



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

지리학박사 학위논문

복잡적응계 개념에 기반한  
토지황폐화와  
식량생산 감소에 관한 연구  
- 1990년대 북한 대기근을 중심으로 -

2021 년 8 월

서울대학교 대학원

지 리 학 과

안 유 순

복잡적응계 개념에 기반한  
토지황폐화와

식량생산 감소에 관한 연구

- 1990년대 북한 대기근을 중심으로 -

지도교수 박 수 진

이 논문을 지리학박사 학위논문으로 제출함

2021 년 4 월

서울대학교 대학원

지 리 학 과

안 유 순

안유순의 박사 학위논문을 인준함

2021 년 6 월

위 원 장 이 건 학

부위원장 김 대 현

위 원 김 영 훈

위 원 명 수 정

위 원 박 수 진

## 국문초록

1990년대 중반의 북한 대기근은 당시 수십만의 사람을 기아의 고통에 빠트렸으며, 20여 년이 지난 현재까지도 북한은 대기근으로 인한 경제·사회·보건 전반에 걸친 후유증을 겪고 있다. 이 대기근의 원인으로 자연재해와 고립, 체제의 비효율성 등이 제기된다. 그러나 근본적인 북한 대기근의 원인은 기존 제기된 원인이 복합적으로 작용하여 토지의 생산성을 떨어트리는 토지황폐화(land degradation) 문제와 이로 인한 식량생산 감소 문제다. 토지황폐화와 식량생산 감소 문제는 북한을 포함해 전 세계 인구 중 10억 명 이상이 경험하는 문제로, 북한만의 문제가 아닌 인류의 지속가능성을 위협하는 주요 문제 중 하나라 할 수 있다.

토지황폐화 문제는 토지의 생태 환경적 요소와 토지이용의 사회경제적 동인이 복합적으로 상호 작용하는 사회생태시스템(Social-Ecological System) 문제다. 사회생태시스템 구성요소의 다양한 상호작용은 문제의 복잡성을 높이고 이해를 어렵게 한다. 또한 토지황폐화와 식량생산 감소 문제는 서로가 원인이자 결과로 작용하는 되먹임 구조의 문제로, 문제가 비선형적으로 증폭되고 어떠한 방향으로 변화할지를 예측하기 어렵게 만드는 원인으로 작용한다. 따라서 북한의 토지황폐화와 식량생산 감소 문제는 사회생태시스템에서 기인하는 복잡적응계(complex adaptive system) 형태라고 볼 수 있으며, 이 때문에 토지황폐화 문제는 프로세스에 대한 이해와 예측이 어렵다고 알려져 있다. 특히 북한의 토지황폐화 문제는 북한 정보의 부족과 학제 간 분절된 연구 풍토로 더 가중된 복잡성의 문제에 시달리고 있다.

이 연구에서는 북한의 토지황폐화와 식량생산 감소 문제를 사회생태시스템과 복잡적응계적 방법론을 통해 접근함으로써 토지황폐화 대기근에 대한 사전예방 접근(precautionary approach)을 통해 위

험을 저감하는 방안을 모색하고자 한다. 이를 위해 사회생태시스템을 기반으로 기존 북한의 토지황폐화와 식량생산 연구와 자료를 재구성하였다(2장). 또한 복잡적응계 방법 중 조기경보신호 탐지 기법(EWS)을 적용함으로써 예측이 어려운 북한 토지황폐화와 식량생산 감소 위험의 수학적·통계적 징후를 모색하였다(3장). 그리고 북한의 토지황폐화와 식량생산 감소 문제를 대표하는 모형을 설계하고, 복잡적응계 기반 모형화 기법인 다행위자시스템(MAS-LUCC)을 이용해 모형을 구현함으로써 1990년대 북한 대기근의 재현 가능성을 확인하여 사전예방적 대안에 대해서 평가하고자 하였다(4장). 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 사회생태시스템 기반으로 북한의 토지황폐화와 식량생산 감소의 기존 연구와 지식을 재구성함으로써, 기존 연구와 자료가 가지고 있는 사회생태적 가치를 확인하고 한계를 인식할 수 있었다. 북한의 토지황폐화와 식량생산 감소에 대한 각각의 연구성과를 확인함으로써 편향과 인식 차이를 확인하였다. 또한, 북한에 관한 역사와 정치문헌 속 맥락을 바탕으로 이들 사이의 요인을 추출하고 사회생태시스템 기반의 개념모형으로 구축할 수 있었다. 그러나 구체적인 관계를 수식 또는 자료기반으로 보완하는 것은 자료 자체의 부족과 기법 등의 한계로 다소 부족한 것이 현실이었다. 특히 인간의 의사결정과 토지황폐화의 핵심적 프로세스는 분석적으로 접근하는 데 한계가 있었으며, 대안적 모색이 필요함을 확인할 수 있었다.

둘째, 1990년대 북한 대기근과 토지황폐화 현상에는 여러 차원의 사전 징후를 확인할 수 있었다. 1960-1990년대 북한의 식량감소 문제와 토지황폐화 문제와 연관된 다양한 시공간 지표와 시계열 지표를 대상으로 조기경보신호를 포착하는 연구를 진행하였다. 그 결과 1980년대 초에는 점진적인 변화를 나타내는 조기경보신호가 토지황폐화 관련 지표를 중심으로 나타났으며, 1980년대 후반에는 토지황폐화 관련 지표를 중심으로 더 큰 위험을 나타내는 조기경보신호가 나타났고, 1990년대 초에는 식량생산 관련 지표에서 조기경보신호가

나타났다. 이를 통해 단순히 조기경보신호 도출 및 시점을 파악할 수 있었을 뿐 아니라, 되먹임 구조와 창발현상 같은 복잡적응계 프로세스를 유추할 수 있었으며 이는 4장의 모형 결과 해석에도 활용할 수 있었다. 또한 토지황폐화 지표와 식량생산 지표 간의 약 5년간의 시차는 기존 연구에서 확인할 수 있듯 1990년대 대기근의 사전 징후가 적어도 1980년대 후반에는 표면화되었다는 것을 암시하는 결과다. 그러나 대응하기에는 충분한 시간이 부족하였거나 잘못된 대응이었을 것이라는 것 또한 문헌 연구를 통해 확인할 수 있었다. 이는 상당 수의 기존 연구와 자료에서 교차검증할 수 있었다.

셋째, 북한농업의 사회생태시스템을 대표할 수 있는 가상의 협동농장 개념모형을 구축하고, 이를 1990년대 북한 대기근을 재현할 수 있는 복잡적응계 기반 다행위자시스템으로 구현할 수 있었다. 모의 결과 현실에서 나타났던 급격한 1990년대 북한 대기근의 형태가 유사하게 재현되었다. 또한 이 결과에서는 모의 후 20년 후(1980년 전후)와 30년 후(1990년 전후)에 변곡점이 나타나는데, 이는 되먹임의 구조와 같은 토지황폐화와 식량생산 감소의 복잡적응계적 프로세스 변화를 나타낸다. 그리고 외부 식량지원 시나리오를 통해 외부 자원 제공이 상당 부분 북한의 토지황폐화와 식량생산 저하 위험을 지연시킬 수 있다는 결론을 내릴 수 있었다. 그러나 모형에서는 대기근의 발생 자체는 막을 수 없었으며, 인구와 생태압력을 줄이는 등 다른 구체적인 대안이 필요함을 확인할 수 있었다.

이 연구의 결과는 북한과 한반도의 지속가능성 정책 수립에 함의를 가진다. 토지황폐화와 식량생산 부족 문제를 포함한 북한의 사회생태시스템에 대한 정책 수립을 위해서는 의외성과 시차를 고려한 장기 관찰과, 사회경제와 자연생태적 요소를 포괄하는 종합적인 접근이 필요하다. 또한 복잡적응계 방법론을 적용함으로써 정책의사결정이 어떠한 파급효과를 불러일으킬지를 확인하고 의사결정을 수행할 필요가 있다. 구체적인 기근 방지 대책으로 단기적으로는 북한을 폐쇄계에서 탈피하도록 할 정책적인 대안을 마련할 필요가 있고, 장

기적으로는 북한을 포함해 전 세계적으로 인구와 생태압력을 줄이는 방안을 모색할 필요가 있다.

이 연구는 북한, 한반도, 그리고 세계적으로 재현 가능성이 큰 기근과 토지황폐화 문제의 위험 저감을 위한 교훈과 대안을 제시했다는 점에서 그 의의가 있다. 특히 토지황폐화 문제뿐 아니라 다방면의 환경문제와 사회생태시스템에 적용할 수 있는 조기경보신호 포착 연구와 같은 최신 연구기법을 적용하고, 학제 간 인식차와 지식 차이를 극복하는 대안을 제시하였다는 점에서 학술적인 의미가 있다. 또한 직접적인 북한 정책 수립뿐 아니라 정책의 전반적인 기초 설정과 평가에까지 의의를 제공하였다는 점에서 의미가 크다고 할 수 있다.

**주요어** : 토지황폐화, 식량생산 감소, 1990년대 북한 대기근, 복잡적응계, 조기경보신호 탐지, 다행위자시스템

**학 번** : 2015-30075

# 목 차

제 1 장 서 론 .....	1
제 1 절 연구배경과 목적 .....	1
1. 연구의 필요성 .....	1
2. 관련 연구동향과 과제 .....	5
1) 전 세계적 차원의 토지황폐화 연구동향 .....	5
2) 1990년대 북한 대기근과 북한 토지황폐화 연구동향과 과제 .....	9
3) 사회생태적 접근법과 복잡적응계적 인식체계의 필요성 .....	11
3. 접근방법과 연구질문 .....	15
4. 연구목적 .....	17
제 2 절 연구대상과 범위 .....	18
1. 연구의 시공간적 범위 .....	18
2. 주요 개념의 정의와 범위 설정 .....	21
제 3 절 연구의 구성 .....	24
제 2 장 북한 토지황폐화와 식량생산 감소에 대한 사회생태적 접근 .....	26
제 1 절 북한 토지황폐화 현황과 연구경향 .....	27
1. 통계 및 정부발간 자료 중심의 토지황폐화 연구 .....	29
2. 토지황폐화에 대한 위성영상 기반 연구 .....	33
3. 토지황폐화에 대한 연구 종합 .....	37
제 2 절 북한의 식량생산 감소경향과 관련 연구동향 .....	39
1. 통계·문헌기반 북한의 식량생산 경향 .....	42
2. 식량생산의 변화 원인과 파급효과에 관한 통계와 문헌 .....	49
1) 농업생산량의 파급효과(기근)와 관련된 통계와 문헌 .....	49
2) 농업생산량 변화의 사회경제적 요인과 관련된 통계와 문헌 .....	52
3) 식량생산 변화의 자연환경 요인 중 기후와 관련된 통계와 문헌 .....	54
3. 북한의 식량생산 자료와 요인들 간의 연관성 연구동향 .....	57
1) 인문사회자료와 식량생산량과의 관계 .....	57
2) 식생지수와 식량생산량과의 관계성 .....	59
3) 식량생산량-식생지수-환경정보와의 관계 .....	63

4. 북한의 식량생산 변화에 관한 요약과 한계 .....	65
<b>제 3 절 북한 토지황폐화와 식량생산 감소에 대한</b>	
<b>전역적 접근 .....</b>	<b>66</b>
1. 북한 토지황폐화와 식량생산 감소의 역사적 맥락 .....	67
2. 1990년대 북한 대기근과 토지황폐화 요인 도출 .....	76
1) 사회경제적·제도적 요인 .....	77
2) 자연환경적 요인 .....	79
3. 사회생태시스템 맥락에서의 개념모형 도출 .....	81
<b>제 4 절 북한 토지황폐화와 식량생산 감소문제 요인들 간의</b>	
<b>관계 .....</b>	<b>84</b>
1. 관련 자료와 분석방법 .....	84
2. 시간자료 간의 관계성을 통한 식량생산량 추정모형 개발 .....	90
3. 시공간자료 간의 관계성 파악과 식생지수 예측모형 탐색 .....	96
4. 미시적 관계성 파악을 통한 개념모형 평가 .....	110
1) 식량생산량·식생지수 예측모형과 개념모형과의 비교와 한계 ..	110
2) 사회시스템에 대한 평가와 보완의 어려움 .....	112
<b>제 5 절 소 결 .....</b>	<b>113</b>
<b>제 3 장 1990년대 북한 대기근과 토지황폐화 문제에 대한</b>	
<b>조기경보신호 .....</b>	<b>115</b>
<b>제 1 절 문헌연구 .....</b>	<b>117</b>
1. 이론적 배경 .....	117
2. 임계전이 조기경보신호 탐지 기법과 사례 .....	125
1) 측정자료 기반 방법 .....	125
2) 모형 기반 방법 .....	129
3) 공간적 조기경보신호 지표 .....	132
<b>제 2 절 연구방법 .....</b>	<b>137</b>
1. 연구자료 .....	137
2. 임계전이 조기경보신호 탐지 모형 설정 .....	140
1) 측정자료 기반 방법 .....	140
2) 모형 기반 방법 .....	141
3) 공간적 조기경보신호 도출방법 .....	142

<b>제 3 절</b>	<b>측정자료 기반 북한 대기근과 토지황폐화 문제의</b>	
	<b>조기경보신호 여부 확인</b> .....	<b>144</b>
1.	식량 관련 자료의 조기경보신호 .....	144
2.	식생지수의 조기경보신호 .....	148
3.	기후자료의 조기경보신호 .....	155
4.	기타 자료의 조기경보신호 .....	163
5.	북한 대기근에 대한 조기경보신호 여부 .....	169
<b>제 4 절</b>	<b>모형·공간기반 북한 대기근과 토지황폐화 문제의</b>	
	<b>조기경보신호 시점 및 지점 확인</b> .....	<b>171</b>
1.	비모수적 추세-확산-도약 모형(DDJ Model) .....	171
1)	식량생산과 수급의 변화 .....	171
2)	식생지수 .....	174
3)	기후자료 .....	183
4)	사회경제지표 .....	188
2.	시간 가변성 자기회귀 모형 적용 결과 .....	191
1)	식량생산과 수급의 변화 .....	191
2)	식생지수 .....	195
3)	기후자료와 사회경제지표 .....	199
3.	공간 기반 조기경보신호 분석결과 및 해석 .....	203
4.	조기경보신호 시점 및 취약지점 확인 .....	207
<b>제 5 절</b>	<b>소 결</b> .....	<b>209</b>
1.	조기경보신호 포착결과에 대한 기초적 논의 .....	209
2.	주요 논의 지점 .....	211

**제 4 장 다행위자시스템 기반 1990년대 북한 대기근  
재현모형 개발** .....

<b>제 1 절</b>	<b>문헌연구</b> .....	<b>216</b>
1.	다행위자시스템 .....	216
2.	LUDAS Framework .....	219
3.	다행위자시스템과 LUDAS Framework의 한반도 적용사례 .....	220
1)	다행위자시스템의 한국 적용사례 .....	220
2)	LUDAS Framework의 한반도 생태계 적용사례 .....	221
3)	LUDAS Framework의 북한 적용사례 .....	224
4.	다행위자시스템의 북한 대기근과 토지황폐화 문제 적용방안 .....	226

<b>제 2 절 가상의 북한 협동농장 모형 설계</b> .....	<b>228</b>
1. 북한 농업 문제에서의 협동농장의 대표성 .....	228
2. 가상의 북한 협동농장 모형 정의 .....	231
1) 규모와 크기, 형태 .....	232
2) 토지피복과 지형, 기타 속성 .....	232
3. 가상의 북한 협동농장 모형 구성 요소 .....	235
1) 환경 .....	235
2) 인간행위자 .....	236
3) 외부요인과 각 요소들 간의 관계 .....	237
<b>제 3 절 다행위자시스템 모형의 구축</b> .....	<b>238</b>
1. 모형의 구성 .....	238
2. 환경 부속모형 .....	241
1) 환경 부속모형의 속성정보와 층위 .....	241
2) 물리적 토양특성 산출모형 .....	242
3) 화학적 토양특성 산출모형 .....	244
4) 토양 질 지표와 농업생산량 산출모형 .....	244
3. 인간행위자 부속모형 .....	248
1) 인간행위자의 속성정보 .....	248
2) 식량의 분배 .....	249
3) 의사결정과 토지이용의 변경 .....	251
4. 외부환경과 결과 도출, 모형의 구동 .....	255
1) 외부환경·변수 .....	255
2) 결과값 도출 .....	256
3) 모형의 구동 .....	258
<b>제 4 절 북한 협동농장 다행위자시스템 모형의 1990년대 대기근   재현여부 확인</b> .....	<b>259</b>
1. 모의 종료 시점 .....	260
2. 토지이용의 변화 .....	264
3. 토지황폐화 및 식량생산 저하와 관련된 내부변수 .....	266
4. 결과에 대한 복잡적응계적 해석 .....	270
<b>제 5 절 북한 협동농장 다행위자시스템 모형의 환경변화   시나리오 적용 결과</b> .....	<b>272</b>
1. 모의 종료 시점 .....	275
2. 토지이용의 변화 .....	275

3. 토지황폐화 및 식량생산 저하와 관련된 내부변수 .....	278
4. 시나리오 결과 종합 .....	282
제 6 절 소 결 .....	284
제 5 장 결 론 .....	286
참고문헌 .....	293
부 록 .....	312
부록 1. 연구자료 목록과 속성정보 .....	313
부록 2. AVHRR GIMMS 식생지수를 활용한 북한 토지황폐화의 경향과 공간적 취약지 도출 .....	323
부록 3. 모형기반 조기경보신호 탐지 기법을 통한 연도별 토지황폐화와 식량생산 감소 조기경보신호 탐지 .....	357
부록 4. 다행위자시스템 모형 인터페이스와 코드 .....	362
Abstract .....	377

## 표 목차

표 2-1. 북한의 시기별 토지피복 비중 변화 통계자료 .....	29
표 2-2. 문헌으로 확인할 수 있는 북한의 산림면적 변화 경향 .....	30
표 2-3. 북한의 토지황폐화 연구를 위한 주요 위성영상자료의 특징 .....	32
표 2-4. 토지황폐화 정보와 연관된 북한 산림면적 변화정보 종합 .....	37
표 2-5. 북한 식량생산량 및 식량생산에 미치는 요인 관련 자료 목록	41
표 2-6. 이석(2004c)의 북한 식량생산량 추정공식 .....	57
표 2-7. 남성욱(2016)의 북한 식량생산량 추정공식 .....	58
표 2-8. 위성영상을 이용한 북한 식량생산량 추정모형 .....	62
표 2-9. 안유순(2013)의 논의 식생지수 예측모형(다중회귀분석) .....	63
표 2-10. 안유순(2013)의 밭의 식생지수 예측모형(다중회귀분석) .....	63
표 2-11. 안유순(2013)의 기타(산림)의 식생지수 예측모형 (다중회귀분석) .....	64
표 2-12. 북한 토지황폐화 식량문제 역사 종합 .....	74
표 2-13. 1990년대 북한 대기근과 토지황폐화 요인 요약 .....	76
표 2-14. 식생지수와 타 자료와의 상관관계분석 주요결과 .....	91
표 2-15. 단위면적당 식량생산량 지표와 타 자료와의 상관관계분석 주요결과 .....	91
표 2-16. 총곡물생산량 지표와 타 시간자료와의 상관관계분석 주요결과 .....	92
표 2-17. 토양침식량 지표(USLE)와 타 자료와의 상관관계분석 주요결과 .....	92
표 2-18. 단위면적당 곡물생산량과 상관관계가 높은 지표와의 교차상관관계(Cross-Correlation) .....	94
표 2-19. 시차를 적용한 단위면적당 곡물생산량 예측 회귀모형(OLS) .....	95
표 2-20. 식생지수 연 최대값과 (시)공간자료 간의 연도별 상관관계분석 결과 요약 .....	98
표 2-21. 식생지수 연 변동계수와 (시)공간자료 간의 연도별 상관관계분석 결과 요약 .....	99
표 2-22. 모형 반영 지표들의 공간적 자기상관성 (Global Moran's I) .....	100
표 2-23. 단순회귀모형을 이용한 정규화식생지수 최대값(NDVI-MAX) 추정 모형 .....	101

표 2-24. 공간시차모형을 이용한 정규화식생지수 최대값(NDVI-MAX) 추정 모형 .....	101
표 2-25. 공간오차모형을 이용한 정규화식생지수 최대값(NDVI-MAX) 추정 모형 .....	102
표 2-26. 단순회귀모형을 이용한 정규화식생지수 변동계수(NDVI-CV) 추정 모형 .....	105
표 2-27. 공간시차모형을 이용한 정규화식생지수 변동계수(NDVI-CV) 추정 모형 .....	105
표 2-28 임의시점(연도) 표본 대상 공간오차모형을 이용한 정규화식생지수 변동계수(NDVI-CV) 추정 모형 .....	106
표 3-1. 임계전이 시스템의 특성에 따른 조기경보신호 지표 .....	119
표 3-2. 임계전이 시스템의 공간자료 기반 조기경보신호 지표 .....	122
표 3-3. 임계전이 조기경보신호 도출 모형의 분석 및 해석방법 요약 .....	139
표 3-4. 북한 식량생산 관련 지표들의 측정자료 기반 Rolling Window 조기경보신호 분석(강도, Kendall tau) 요약 .....	144
표 3-5. 북한 전역의 정규화식생지수의 공간적 대푯값에 대한 측정자료 기반 Rolling Window 조기경보신호 분석(강도, Kendall tau) 요약 .....	149
표 3-6. 1973년부터 1995년까지의 평균기온 변화에 대한 측정자료 기반 Rolling Window 조기경보신호 분석(강도, Kendall tau) 요약 .....	156
표 3-7 1973년부터 2019년까지의 평균기온 변화에 대한 측정자료 기반 Rolling Window 조기경보신호 분석(강도, Kendall tau) 요약 .....	157
표 3-8. 1973년부터 1995년까지의 강수량 변화에 대한 측정자료 기반 Rolling Window 조기경보신호 분석(강도, Kendall tau) 요약 .....	160
표 3-9. 1973년부터 2019년까지의 강수량 변화에 대한 측정자료 기반 Rolling Window 조기경보신호 분석(강도, Kendall tau) 요약 .....	161
표 3-10. 북한 에너지 관련 지표들의 측정자료 기반 Rolling Window 조기경보신호 분석(강도, Kendall tau) 요약 .....	163
표 3-11. 북한 인구 및 기타 지표들의 측정자료 기반 Rolling Window	

조기경보신호 분석(강도, Kendall tau) 요약 .....	167
표 3-12. 측정자료 기반 분석을 통한 조기경보신호 탐지결과 요약 .....	168
표 3-13. 식생지수 DDJ Model의 시기별 경향성 결과 요약 .....	181
표 3-14. 기후자료 DDJ Model 조기경보신호 결과에 대한 시기별 경향성 결과 요약 .....	187
표 4-1. 다행위자시스템 연구 적용방안 : 안유순(2013)과 비교 .....	226
표 4-2. 환경 부속모형의 각 층위(layer)구조 .....	241
표 4-3. 물리적 토양특성 세부 부속모형에서 활용한 USLE 각 지표 계산법 .....	243
표 4-4. 물리적 토양특성 세부 부속모형의 USLE 결과 점수 변환 .....	243
표 4-5. 농업생산잠재력 모형(식생지수를 활용한 농업생산량 예측모형) .....	245
표 4-6. 토지이용별 식생지수 예측 모형 .....	245
표 4-7. 인간행위자 부속모형에서의 행위자의 속성정보 .....	249
표 4-8. 북한 협동농장의 일반적인 분배구조 .....	250
표 4-9. 행위자 노동력 재배분의 기준 .....	252
표 4-10. 모형의 결과값 도출 .....	257
표 4-11. 모의결과와 1960년대-1990년대 북한 현실과의 비교와 복잡적응계적 해석 .....	269
부록 표-1. 연구자료 속성정보 요약 .....	313
부록 표-2. 북한기후 자료 정보 .....	319
부록 표-3. 북한의 토지황폐화와 식량생산 감소 문제 관련 통계자료 목록 .....	322
부록 표-4. 식생지수를 활용한 시간에 따른 토지황폐화 경향 종합 .....	339
부록 표-5. 모형기반 분석을 종합한 연도별 토지황폐화와 식량생산 감소 조기경보 신호 시점 정리 .....	361

# 그림 목차

그림 1-1. 토지황폐화와 식량생산 감소 현상의 되먹임 구조와 연구의 필요성 .....	4
그림 1-2. 연구현황과 문제점, 한계와 접근방법 모식도 .....	14
그림 1-3. 연구질문과 연구목적 모식도 .....	17
그림 1-4. 연구의 시간적 범위 .....	18
그림 1-5. 연구의 공간적 범위(북한)와 지역 구분 .....	20
그림 1-6. 연구의 구성 모식도 .....	25
그림 2-1. AVHRR GIMMS 식생지수의 경향 예시 : 식생지수 연 합계와 변동계수(CV) .....	36
그림 2-2. 1961년 이후 북한의 곡물생산 및 공급 통계 .....	43
그림 2-3. 1961년 이후 북한의 주요곡물생산량 통계 .....	44
그림 2-4. 1961년 이후 북한의 곡물수출입 통계 .....	45
그림 2-5. 단위면적당 곡물생산량 .....	46
그림 2-6. 곡물경작지면적의 변화 .....	46
그림 2-7. 북한의 사망률(천 명당 사망자 수) 연 변화 .....	50
그림 2-8. 북한의 평균수명 연 변화 .....	51
그림 2-9. 북한 인구의 연 변화(단위 : 천명) .....	51
그림 2-10. 북한의 원유수입량(MBPD)의 연 변화 .....	53
그림 2-11. 북한의 전기생산량(10억 kWh)의 연 변화 .....	53
그림 2-12. 북한 주요도시의 연평균기온의 변화 .....	55
그림 2-13. 북한 주요도시의 연강수량의 변화 .....	56
그림 2-14. 사회생태시스템 맥락을 고려한 북한 토지황폐화와 식량생산량 감소문제 개념모형 .....	83
그림 2-15. 북한 토지황폐화와 식량생산 감소문제 개념모형에 대한 평가결과 모식도 .....	109
그림 3-1. 임계감속(critical slowing down)과 깜빡임(flickering)의 예시 .....	121
그림 3-2. 측정자료 기반 방법의 적용 사례 .....	127
그림 3-3. 비모수적 추세-확산-도약 모형의 사례 .....	130
그림 3-4. Taranu et al.(2018)의 토양퇴적물 코어 모형에 대한	

	Timevaring AR(n)모형 적용 사례 .....	132
그림 3-5.	공간적 조기경보신호 지표 .....	135
그림 3-6.	공간적 자기상관 분석을 이용한 공간적 조기경보신호 사례(Nijp et al., 2019) .....	136
그림 3-7.	공간적 조기경보신호 도출을 위한 연구지역 설정 .....	143
그림 3-8.	북한의 1인당 “식량생산량+수입량”에 대한 Rolling Window 조기경보신호 분석결과 예시(왼쪽: 1961-1995, 오른쪽: 1961-2019) .....	146
그림 3-9.	북한의 단위면적당 옥수수 수확량과(a,b) 감자 수확량(c,d)에 대한 측정자료 기반 Rolling Window 조기경보신호 분석결과(AR(1)) 비교 (왼쪽: 1961-1995, 오른쪽: 1961-2019) .....	147
그림 3-10.	북한 정규화식생지수의 공간적 대푯값 중 변동계수에 대한 Rolling Window 조기경보신호 분석결과 예시(왼쪽: 1981-1995, 오른쪽: 1981-2015) .....	150
그림 3-11.	북한 정규화식생지수의 측정자료 기반 Rolling Window 조기경보신호 분석 결과의 공간적 분포 .....	152
그림 3-12.	북한 정규화식생지수의 지점별 Rolling Window 조기경보신호 분석결과 중 전형적인 조기경보신호 결과 예시(왼쪽: 1981-1995, 오른쪽: 1981-2015) .....	153
그림 3-13.	북한 정규화식생지수의 지점별 Rolling Window 조기경보신호 분석결과 중 조기경보신호와 무관한 결과 예시(왼쪽: 1981-1995, 오른쪽: 1981-2015) .....	154
그림 3-14.	평균기온 변화 Rolling Window 조기경보신호 분석결과 예시(평양, 왼쪽: 1973-1995, 오른쪽: 1973-2019) .....	158
그림 3-15.	강수량 변화 Rolling Window 조기경보신호 분석결과 예시(평양, 왼쪽: 1973-1995, 오른쪽: 1973-2019) .....	162
그림 3-16.	북한의 총에너지소비량에 대한 Rolling Window 조기경보신호 분석결과 예시(왼쪽: 1980-1995, 오른쪽: 1980-2014) .....	164
그림 3-17.	북한의 화석연료사용비율에 대한 Rolling Window 조기경보신호 분석결과 예시(왼쪽: 1980-1995, 오른쪽: 1980-2014) .....	166
그림 3-18.	북한의 1인당 “식량생산량+수입량”에 대한 비모수적 추세-확산-도약 모형(Nonparametric DDJ Model) 적용결과 .....	172

그림 3-19. 북한의 단위면적당 옥수수 수확량과(가) 감자 수확량(나)에 대한 비모수적 추세-확산-도약 모형(Nonparametric DDJ Model) 적용결과 비교 .....	173
그림 3-20. 식생지수 대푯값의 비모수적 추세-확산-도약 모형(Nonparametric DDJ Model) 임계수치 연별 빈도 .....	175
그림 3-21. 15일 단위 식생지수의 비모수적 추세-확산-도약 모형(Nonparametric DDJ Model) 연간 조기경보신호(극대값 발생) 빈도의 지점 간 평균(n=1,868) .....	176
그림 3-22. 15일 단위 식생지수의 비모수적 추세-확산-도약 모형(Nonparametric DDJ Model)의 연간 조기경보신호(극대값 발생) 횟수의 지역간 비교 .....	177
그림 3-23. 15일 단위 식생지수의 비모수적 추세-확산-도약 모형(Nonparametric DDJ Model) 조건부 분산(Conditional Variance)의 5년 누적 조기경보신호 포착 횟수 .....	178
그림 3-24. 15일 단위 식생지수의 비모수적 추세-확산-도약 모형(Nonparametric DDJ Model) 확산(Diffusion)의 5년 누적 조기경보신호 포착 횟수 .....	179
그림 3-25. 15일 단위 식생지수의 비모수적 추세-확산-도약 모형(Nonparametric DDJ Model) 도약 밀도(Jump Intensity)의 5년 누적 조기경보신호 포착 횟수 .....	180
그림 3-26. 15일 단위 식생지수 DDJ Model의 각 지수 별 사전예방지수 빈도에 대한 Kendall's Tau 상관관계분석 결과 .....	182
그림 3-27. 비모수적 추세-확산-도약 모형(Nonparametric DDJ Model)의 적용사례: 선봉지역의 평균기온 .....	185
그림 3-28. 연 기후자료의 비모수적 추세-확산-도약 모형(Nonparametric DDJ Model)에서의 조기경보신호 분포 지역(총 27개 지역) .....	186
그림 3-29. 북한의 총에너지소비량에 대한 비모수적 추세-확산-도약 모형(Nonparametric DDJ Model) 적용결과 .....	189
그림 3-30. 북한의 화석연료사용비율에 대한 비모수적 추세-확산-도약 모형(Nonparametric DDJ Model) 적용결과 .....	190
그림 3-31. 북한의 1인당 “식량생산량+수입량”에 시간 가변성 자기회귀 모형 결과 .....	191

그림 3-32. 북한의 단위면적당 옥수수 생산량과 감자 생산량에 시간 가변성 자기회귀 모형 결과 .....	193
그림 3-33. 유사고유치 조기경보신호 사례: 1098번 지점(N 39.895, E 124.557)의 정규화식생지수 시간 가변성 자기회귀 모형 결과 .....	194
그림 3-34. 유사고유치 조기경보신호와 무관한 사례: 33번 지점(N 42.561, E 133.391)의 정규화식생지수 시간 가변성 자기회귀 모형 결과 .....	194
그림 3-35. 정규화식생지수 자료의 시간 가변성 자기회귀 모형 적용결과와 경향성 .....	196
그림 3-36. 정규화식생지수 시간가변성 모형의 유사고유치의 시기별 변화 .....	197
그림 3-37. 정규화식생지수 시간가변성 모형을 통한 임계전이 조기경보신호 도출(유사고유치 1 이상) 건수 .....	198
그림 3-38. 전체 및 각 지역별 정규화식생지수의 연간 임계전이 조기경보신호 도출 횟수 .....	199
그림 3-39. 중강진 강수량의 시간 가변성 자기회귀 모형 결과 .....	199
그림 3-40. 북한의 총에너지소비량에 대한 시간 가변성 자기회귀 모형 결과 .....	202
그림 3-41. 북한의 화석연료사용비율에 대한 시간 가변성 자기회귀 모형 결과 .....	202
그림 3-42. 식생지수 연평균의 공간적 조기경보신호 지표 .....	204
그림 3-43. 식생지수 연 변동계수의 공간적 조기경보신호 지표 .....	204
그림 3-44. 식생지수 연 최대값의 공간적 조기경보신호 지표 .....	205
그림 3-45. 식생지수 연 최소값의 공간적 조기경보신호 지표 .....	205
그림 3-46. 식생지수 지표별 세미베리오그램 상관거리의 변화 .....	206
그림 4-1. 다행위자시스템의 모식도 .....	216
그림 4-2. LUDAS 모형의 구조 .....	218
그림 4-3. 도시정책 관련 국토공간 공간의사결정시스템 사례 .....	220
그림 4-4. 강원도 가리왕산 일원의 LUDAS 모형 적용사례 .....	221
그림 4-5. 안유순(2013)의 북한 평안도 일원 토지황폐화-식량문제 LUDAS 모형 인터페이스 .....	223
그림 4-6. 북한 평안도 일원 토지황폐화-식량문제 LUDAS 모형 적용결과 중 시나리오별 토지황폐화 취약지의 건수 .....	225

그림 4-7. 북한 평안도 일원 토지황폐화-식량문제 LUDAS 모형 적용결과 중 북한 식량문제 취약지역-양호지역 .....	225
그림 4-8. 가상의 북한 협동농장 모형의 거시적인 구조 .....	234
그림 4-9. 가상의 북한 협동농장 모형의 구성요소 .....	235
그림 4-10. 모형의 구조와 흐름 .....	239
그림 4-11. 환경 부속모형의 세부 부속모형 구성 .....	240
그림 4-12. 토지피복 변화 프로세스 중 비농업토지(산지) 개간 프로세스(안유순, 2013) .....	254
그림 4-13. 모의 결과 중 가구 수의 변화(왼쪽)와 시뮬레이션 종료 시점(오른쪽) .....	261
그림 4-14. 토지이용변화 결과 예시 .....	261
그림 4-15. 토지이용변화 모의결과 .....	263
그림 4-16. 토지황폐화와 식량생산 감소 관련 지수의 변화 .....	265
그림 4-17. 토지황폐화와 식량생산 감소 관련 되먹임 메커니즘과 식량압박-토양 질의 수치 변화 모식도 .....	268
그림 4-18. 식량압박도에 대한 측정자료기반 조기경보신호 확인결과 사례 .....	271
그림 4-19. 식량지원 비율에 따른 모의 종료시점의 차이 .....	274
그림 4-20. 각 식량지원 비율 시나리오별 산림면적의 변화 .....	275
그림 4-21. 각 식량지원 비율 시나리오별 논 면적의 변화 .....	276
그림 4-22. 각 식량지원 비율 시나리오별 밭 면적의 변화 .....	277
그림 4-23. 각 식량지원 비율 시나리오별 나지 면적의 변화 .....	277
그림 4-24. 각 식량지원 비율 시나리오별 식량생산량의 변화 .....	279
그림 4-25. 각 식량지원 비율 시나리오별 식량압박도의 변화 .....	279
그림 4-26. 각 식량지원 비율 시나리오별 토양 질 지표의 변화 .....	280
그림 4-27. 토지황폐화와 식량생산 감소 되먹임 메커니즘과 식량압박-토양 질의 수치 변화 모식도 .....	281
부록 그림-1. AVHRR GIMMS NDVI 2001년 평균 예시 .....	316
부록 그림-2. AVHRR GIMMS NDVI 북한지역 정보 요약(평균 및 변동계수) .....	316
부록 그림-3. 북한의 SRTM 고도자료(a)와 지형분석 자료(b~e) .....	317
부록 그림-4. 평양 일대의 기상정보(1973-2019)예시 : 평균기온과 강수량 .....	320
부록 그림-5. 북한기후 측정지점과 자료예시 :	

평균기온(1973-2019 평균) .....	320
부록 그림-6. 북한기후 측정지점과 자료예시 : 평균(1973-2019 평균)	321
부록 그림-7. 식생지수 시간변화에 따른 토지황폐화 경향 도출방법 모식도 .....	327
부록 그림-8. 시간 창(Time window)의 크기에 따른 정규화식생지수-시간 흐름 단순회귀식 기울기 결과 차이 예시 : 연평균 식생지수의 북한 전역 평균 .....	329
부록 그림-9. 북한 전역의 식생지수 지표의 시간 변화 .....	330
부록 그림-10. 지역 구분에 따른 식생지수 연 합계 지표의 시간 변화	332
부록 그림-11. 지역 구분에 따른 식생지수 연 변동계수 지표의 시간 변화 .....	333
부록 그림-12. 고도에 따른 식생지수 연 합계 지표의 변화 .....	334
부록 그림-13. 고도에 따른 식생지수 연 합계 지표의 변화 .....	335
부록 그림-14. 경사도에 따른 식생지수 연 합계 지표의 변화 .....	336
부록 그림-15. 경사도에 따른 식생지수 연 변동계수 지표의 변화 .....	337
부록 그림-16. 식생지수 기반 토지황폐화 시공간 기반 분석기법 모식도 .....	343
부록 그림-17. 관심 시기(A, B, C) 내 식생지수 경사도의 차이 .....	345
부록 그림-18. 관심 시기 내 식생지수 평균의 경사도 빈도(+,-)와 지역별 분포도 .....	347
부록 그림-19. 설정 시기 내 식생지수 변동계수의 경사도 빈도(+,-)와 지역별 분포도 .....	348
부록 그림-20. 시간 창(Time Window)에 따른 식생지수 평균 경사도의 시기별 빈도 변화(+,-) .....	350
부록 그림-21. 식생지수 경사도(w=4)의 지표별, 시기별 빈도 변화(+,-)	351
부록 그림-22. 식생지수 연평균 경사도 음의 값(-, 토지황폐화 지역)이 차지하는 비율(%)의 관심시기별 공간분포 차이(w=4) .....	353
부록 그림-23. 식생지수 변동계수 경사도 음의 값(-, 변동성이 줄어드는 지역) 이 차지하는 비율(%)의 관심시기별 공간분포 차이(w=4) .....	354
부록 그림-24. 1991-1993년의 식생지수 평균의 경사도 값(위 : 유의확률 기준 미적용, 아래 : 유의확률 기준 적용) .....	355
부록 그림-25. 모형의 인터페이스와 구동 캡처화면 .....	362

# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 연구배경과 목적

### 1. 연구의 필요성

우리는 토양(soil, 土壤)에 의존하여 생존을 영위한다. 토양은 식량 공급, 생물 서식처 제공, 오염물질 정화와 탄소 축적, 문화유산의 재료와 장소 마련 등 거의 모든 부분의 생태계서비스(ecosystem service)를 인간에게 제공한다(von Braun *et al.*, 2013). 그러나 토양의 중요성과 가치는 무시되거나 저평가되는 경우가 많았다. 토양에 대한 인식 부족과 무지는 토양의 잘못된 이용을 초래함으로써, 토양의 건강성을 악화시키는 결과를 초래하였다. 토양의 건강성 악화는 토지의 잠재력을 낮추고 생산성 저하를 유발하였다. 우리는 이를 토지황폐화(land degradation)<sup>1)</sup> 문제라고 통칭한다. 토지황폐화는 토지가 생물학적 또는 물리학적, 사회경제적인 측면에서 생산 능력을 잃어버리는 것을 뜻한다(Eswaran *et al.*, 2001; Nkonya *et al.*, 2011; Vogt *et al.*, 2011; Le *et al.*, 2012)<sup>2)</sup>. 유엔환경계획(UNEP)에 따르면 전 세계의 25%에 이르는 토지가 극심하게 황폐화된 상태(highly degraded land)이며, 사막이나 한대 지역을 제외한 대부분의 인간 거주지는 상당 수준 토지황폐화가 진행된 상태 또는 위험한 상태라고 볼 수 있다(UNEP, 1997; Gomiero, 2016에서 재인용).

따라서 토지황폐화 문제는 인간의 지속가능한 삶을 위협하는 지구환경문제로 주목받고 있으며 국제사회에서는 여러 가지 대응 전략을 수립하고 있다. 토지황폐화 대응을 위해 1996년 국제연합(UN) 산하에 유엔사막화방지협약(UNCCD<sup>3)</sup>)이 설치되었으며 2019년까지 14회의 총회가 개최되고 다양한 토지황폐화 방지 활동이 진행되었다.<sup>4)</sup> 그뿐만 아니라 2015년 68회 국제연합 총회에서는 “2015 국제 토양의 해(2015 the international Year of

1) 토양황폐화 또는 토양의 저하(soil degradation)라는 용어가 토양에 한정되는 용어로 사용하고, 토지황폐화는 토양을 포함한 생태시스템 요소들의 관계를 포함한 광범위한 개념으로 사용된다. 그러나 대체로 토양황폐화와 토지황폐화 용어는 잘 구별되지 않는다(Gomiero, 2016). 따라서 본 논문에서는 좀 더 광범위한 개념으로 더 많이 사용되는 토지황폐화라는 용어를 사용하였다.

2) 세부적인 개념 정의와 범위는 1장 2절에서 자세히 설명하도록 한다.

3) United Nations Convention to Combat Desertification

4) <https://www.unccd.int/>

Soil)”를 선포함으로써 지속가능한 삶을 위한 토지와 토양 관리를 지향하고자 하였다(Gomiero, 2016). 또한 같은 총회에서는 2030년까지 달성하고자 하는 17가지의 지속가능 발전 목표(SDGs, Sustainable Development Goals)를 선언하였는데, 그 중 15번째 목표를 토지황폐화 저감으로 정하였다(명수정, 2016).<sup>5)</sup> 이처럼 토지황폐화 문제는 인류의 지속가능한 생존을 위해 필수적으로 해결해야 하는 문제로 우리에게 인식되고 있다.

토지황폐화 문제는 식량 생산 능력을 떨어트린다는 점에서, 토지에 의존하고 있는 인류에게 중요한 문제이다. 현재 전 세계 인구 중 약 10-15억명의 사람들이 토지황폐화로 인한 식량부족 문제에 노출되어 있다(Lai and Steward, 2010; von Braun *et al.*, 2013). 반대로 식량생산 저하는 식량을 증산하겠다는 열망(압력)을 불러일으켜 토지황폐화 문제를 악화시키기도 한다. 산업혁명 이후 폭발적인 인구증가에도 불구하고 인구부양이 가능했던 이유는 녹색혁명(green revolution)이라고 불리는 화학비료와 밀식재배(intensive farming)에 의해서였으며, 이것은 장기적으로 토양의 물리화학적 능력을 악화시키는 결과를 초래하였다(Gomiero, 2016). 이 둘을 종합해 보면, 토지황폐화와 식량생산량 저하 문제는 서로가 인과관계가 되는 악순환(feedback)의 구조이다. 고대문명의 쇠락과 역사시대 주요 기근 또한 이러한 토지황폐화와 식량생산량 감소의 악순환으로 설명할 수 있다(Juo and Wilding, 2019).

“고난의 행군”이라 일컬어지는 1990년대 북한 대기근은 토지황폐화와 식량생산 저하의 악순환으로 인한 기근의 대표적인 사례 중 하나이다. 1995년 전후로 북한의 식량생산량은 평소의 3분의 1 수준으로 감소하였으며 수백만 명의 사람들이 피해를 보았다.<sup>6)</sup> 이 대기근의 원인으로 대개 1990년대 빈발한 자연재해와 1980-90년대 북한체제의 고립이 주로 제시된다. 그리고 사회주의 경제체제와 “주체농법<sup>7)</sup>”으로 대표되는 잘못된 농업정

5) SDGs의 15번째 목표는 “땅 위의 생명(Life on Land)”이라는 이름이며, 구체적으로는 지상 생태계의 지속가능 이용을 보호, 복원, 지원하고(protect, restore and promote sustainable use of terrestrial ecosystems, sustainably manage forests) 사막화를 방지하며(combat desertification), 토지황폐화를 중단·역전시키고(halt and reverse land degradation) 생물다양성 손실을 중단(halt biodiversity loss)한다고 설명되어 있다. 세부내용은 SDGs 홈페이지 참조(<https://sdgs.un.org/goals/goal15>)

6) 이석(2004a)에 따르면 약 25-69만명의 인구가 기근으로 사망하였다고 추정하며, 극단적으로는 300만명의 인구 감소가 있었다는 보고도 있다(Natsios, 1999). 사망자 이외에도 해당 기근은 북한의 사회경제에 큰 영향을 주었다. 당시 성장기를 보낸 2010년대 후반의 20대 북한 남성의 평균신장(157cm 내외)은, 유전적으로 거의 차이가 없는 한·중·일의 20대 남성 평균신장(170-173cm)과 15cm가량 차이가 나며 이는 기근으로 인한 영양학적 차이가 절대적으로 영향을 주었을 것으로 추정할 수 있다(안유순·박수진, 2018).

7) 1970년대 김일성의 교시를 중심으로 진행된 식량증산을 위한 정책을 통칭하며, 두 가지 방향으로 이루어졌다. 첫째, 단위면적당 생산량을 늘리는 것이다. 이를 위해 기술혁명

책으로 인한 비효율성을 사례로 드는 경우도 많다(부경생 등, 2001; 남성옥, 2016). 하지만 북한의 토양·지형·기후 등의 자연조건에 비해 인구가 많아 생태적 압력이 높았으며 당·수령 중심의 의사결정 체제로 인한 비효율적인 토지관리가 이루어짐에 따라 발생한 토지의 생산성 저하, 즉 토지황폐화가 근본적인 이유라 볼 수 있다. 대신, 1980년대 이후 고립으로 인한 에너지·곡물 수입 감소와 1990년대 초반 연이어 발생한 자연재해는 토지황폐화와 식량생산 감소의 연쇄작용의 속도를 높여 결국 대기근으로 이끄는 방아쇠(trigger) 역할을 했다고 볼 수 있다.

1990년대 북한 대기근과 근본 원인으로서는 토지황폐화 문제는 재현 가능성이 높다는 점에서 중요한 문제라 할 수 있다. 조선 후기(17세기)의 경신(庚辛)<sup>8)</sup>·을병(乙丙)<sup>9)</sup> 대기근(이하 조선 후기 대기근)은 1990년대 북한 대기근과 많은 부분에서 유사하여, 재현 가능성을 유추할 수 있는 중요한 연결고리가 될 수 있다(안유순·박수진, 2018). 첫째, 두 기근의 피해 범위가 전 국토였고 피해 규모가 상당했다는 점이 유사하다. 조선 후기 대기근은 전 국토에 걸쳐서 발생하였으며, 당시 인구의 10%이상이었다던 100만명 정도가 피해를 보았으며 고위 관료의 가족이 기아로 사망하였을 정도로 심각한 수준이라고 알려져 있다(김덕진, 2008; 김문기, 2011). 둘째, 대기근의 표면적인 원인으로 기후악화와 재해가 제기되나 근본 원인은 토지황폐화와 식량생산 감소에 의해서라는 공통점이 있다. 조선 후기 대기근은 당시의 전 지구적 소빙기(小氷期, little ice age)로 인한 생산성 감소와 급변기후에 따른 재해가 원인이었다는 인식이 일반적이다(김재호, 2010). 그러나 근본적으로는 당시 인구압력이 높아진 상태<sup>10)</sup>이고, 화전<sup>11)</sup>과 목재

---

(수리화·기계화·전기화·화학화)이 농업에 도입되었으며, 옥수수로 대표되는 작물종류 선택(적지적작, 適地適作)과 밀식재배와 연작을 진행하였다. 둘째, 농토의 면적을 늘리는 것이다. 이를 위해 했던 다양한 시도 중 대개 다락밭의 확장이 대표적으로 알려져 있다. 이는 에너지부족에 취약하고(화학비료와 기계화) 토양침식과 재해에 취약한(다락밭, 옥수수 중심, 밀식) 토지상태를 유발하여 토지황폐화와 1990년대 북한 대기근의 주요한 원인이 되었다고 볼 수 있다(남성옥, 2016).

8) 1670년(경술년, 庚戌年), 1671년(신해년, 辛亥年)의 갑자(甲子)를 탄 명칭

9) 1695년(을해년, 乙亥年), 1696년(병자년, 丙子年)의 갑자를 탄 명칭

10) 조선후기에는 농업생산량의 확대를 위한 농업기술의 발달과 적용이 이루어졌다. 일예로 이양법(移秧法)이 전국으로 확대되었고, 발농사에서 조선평기보다 훨씬 밀식 재배가 용이한 형태로 변화하였다(김재호, 2010). 이는 소빙기로 인해 엄혹해진 기후에 대한 대응 전략이기도 했지만, 기후재난이 없던 해 소출을 상대적으로 늘려주는 효과도 있었다. 이에 따라 당시 한반도의 인구는 역사시대 최초로 1,000만명을 돌파하였다(권태환·신용하, 1977). 이것이 17세기 이후 대기근의 부수적 원인이었다고 보는 시각이 있으며, 대기근 외 여러 사회생태적 부담을 주는 요인이었다고 보는 시각이 있다(박희진, 2014).

11) 전후복구(임진왜란, 병자호란)를 위한 정부의 개간 장려정책과, 인구압력으로 인해 산지개간이 늘어났으며, 특히 화전의 형태가 늘어 17-18세기에는 화전에 의한 산림훼손의 우려가 실록 등 여러 글에서 나타난다(이우연, 2003).

소비가 증가하는<sup>12)</sup> 등의 이유로 한반도의 농토와 산지는 황폐화된 상태였다. 이는 토지생산성을 떨어트리고 자연재해에 취약한 조건을 만들어 결과적으로 대기근의 근본적인 요인으로 작용하였다. 이러한 공통점은 1990년대 북한 대기근은 일회성 사건이 아니라는 점을 시사한다. 특히 이 두 사건은 토지황폐화를 예방 또는 저감하지 못하게 되는 경우 대기근 문제가 재현될 수 있다는 역사적 교훈이 될 수 있다.

따라서 1990년대 북한 대기근 연구는 북한과 한반도에 거주하는 모두의 위험을 저감하고 지속 가능한 삶의 질을 유지하기 위해서 필수적인 연구다. 또한, 북한과 한반도의 토지황폐화와 식량부족 문제에 대한 접근은 앞서 언급한 전 세계적인 토지황폐화와 식량부족 문제의 한 사례로써, 토지황폐화 문제에 대한 국제적인 대응 목표인 토지황폐화중립(Land Degradation Neutrality)<sup>13)</sup>에 이바지할 수 있는 연구로써 그 의미가 있다.



그림 1-2. 토지황폐화와 식량생산 감소 현상의 되먹임 구조와 연구의 필요성

12) 북부지역의 난방방식이었던 온돌이 소빙기 한랭화로 추정되는 이유로 15-19세기를 걸쳐 한반도 전역으로 확대되었으나, 온돌은 기존 난방 방식보다(화로 등) 땀감 소비가 많다는 문제가 있었다(이우연, 2003; 김홍순, 2008). 이는 인구증가와 결합하고, 건축물과 조선에서의 목재 수요와 산업생산(금속, 소금, 도예 등)에서의 연료목소비와 결합하여 산림벌채를 늘렸을 것으로 보인다(김동진, 2017). 결과적으로는 조선 후기의 산림을 다루는 문헌 대부분에서 조선후기에는 인구밀집지역(땀감, 산업생산)과 해안지역(조운, 조선)을 중심으로 민둥산이 확대될 정도로 산지가 험벗게 되었다고 알려져 있다(최병택, 2021).

13) 유엔사막화방지협약 제 12차 당사국총회(터키 앙카라, 2015년)의 결정문에 제시된 개념으로, "생태계의 기능과 생태계서비스를 지원하고, 식량안보(food security)의 향상에 기여하는 토지자원의 양과 질을, 어떤 시공간 스케일과 생태시스템에서도 안정적으로 유지하거나 향상시키는 것"으로 정의하였다(김명은, 2015; www.unccd.int).

## 2. 관련 연구동향과 과제

토지황폐화와 식량생산 감소 문제가 주요 환경·사회 문제로 전세계적으로 주목받고, 1990년대 북한 대기근 이후 유사한 식량 위기가 재현될 수 있다는 우려가 제기됨에 따라, 다양한 분야에서 이 두 문제에 관한 연구를 진행해 왔다. 그러나 토지황폐화와 식량생산 감소 문제 연구가 가지고 있는 특성과, 북한연구 특유의 자료 부족으로 인한 한계는 관련 분야 연구자가 극복해야 할 부분이었다. 아래 내용은 관련 연구동향을 간략하게 요약하고 한계를 설명하며 이를 극복하기 위한 과제에 대해서 제시하고자 한다.

### 1) 전 세계적 차원의 토지황폐화 연구동향

전 세계적 차원의 토지황폐화 연구는 순수과학적 연구보다는 국제기구 중심의 토지황폐화 저감과 지속 가능한 토지관리(sustainable land management)를 목표로 한 실용적인 연구가 일반적이다. 1970년대 토지황폐화 문제가 국제적 문제로 주목받은 이래로, 토지황폐화의 현황을 과학적으로 이해하고 합리적 저감방안을 모색하기 위해 관찰과 평가라는 두 가지 형태의 전통적인 접근이 진행되었다.

첫째, 토지황폐화 현상의 관찰(*monitoring*)을 통한 토지황폐화의 경향과 정도, 파급효과에 관한 연구다. 전세계적 토지황폐화 관찰 연구는 토지황폐화 문제가 국제사회에 본격적으로 부각된 1970년대<sup>14)</sup> 후반부터 시작된다. 1977년 유엔사막화회의의 자료로 제시된 토지황폐화 현황은 전문가의 지식에 기반을 둔 지리정보로 가공되지 않은 자료에 불과하였다(Nkonya *et al.*, 2011). 하지만 1980년대 이후 지리정보시스템(GIS)이 발달하고 위성영상자료가 본격적으로 활용되면서, 관련 국제 연구기관들은 GLASOD<sup>15)</sup>(1987-1990), GLADA<sup>16)</sup>(2000-2008), WOCAT<sup>17)</sup>(1992-현재) 등과 같은 지

14) 아프리카 사헬 지대의 사막화와 대기근이 국제사회의 문제가 됨에 따라, 1974년 유엔 총회에서 개최를 요청하고, 1977년 개최된 유엔 사막화회의(UNCOD; United Nations Conference On Desertification)를 그 시작점으로 본다.

15) Global Assessment of Human-induced Soil Degradation, 인간에 의한 토지황폐화의 상태와 정도, 종류 등에 대해서 전문가 의견에 따라 지도 형태의 관찰결과를 확인하는 접근 방법이다. 유엔환경계획(UNEP)의 지원에 따라 ISRIC(International Soil Reference and Information Centre)에서 진행하였다.

16) Global Assessment of Land Degradation and Improvement, 위성영상(식생지수)을 활용하여 토지황폐화의 전지구적인 현황과 변화탐지(개선)에 대해 확인하는 접근법으로, 결과물은 토지황폐화의 경향 및 취약지점(hot spots)와 개선지점이 도출되며,

리정보와 위성영상 기반의 모니터링 체계를 구축하여 토지황폐화의 현황에 대한 과학적 탐색을 수행하여 왔다(Nkonya *et al.*, 2011; von Braun, 2013). 특히 최근 토지황폐화의 핵심적인 지표인 식물생산 지표(순일차생산량.NPP<sup>18</sup>)가 전세계적·하루 단위의 위성영상자료인 AVHRR·MODIS<sup>19</sup> 정규화식생지수(NDVI)로 도출할 수 있다는 연구가 도출되면서 지구적, 대륙 스케일에서의 개별 연구도 활발하게 이루어지고 있다(Vlek *et al.*, 2008; Le *et al.*, 2012; Nkonya *et al.*, 2011; von Braun, 2013).

둘째, 토지황폐화로 인해 발생한 사회경제적인 현상과 파급효과(impact)에 대한 평가(assessment) 연구다. 전 세계적 토지황폐화에 대한 영향 평가 연구는 토양침식, 식량생산량 저하 등 사회생태·환경의 저하 정도에 대한 연구와, 토지황폐화에 대한 경제적 가치평가 연구로 나뉜다. 사회생태·환경의 저하 정도 연구는 토지황폐화 연구를 토양침식의 측면 또는 식량생산량 증감의 측면에서 구체화한 연구로, ASSOD<sup>20</sup>와 같은 사례가 있다(Bridges and Oldeman, 2019). 다만 이는 토지황폐화 경향 관찰 연구와 크게 구분되지 않는다는 한계가 있다. 토지황폐화에 대한 경제적 가치평가 연구는 1990년대 후반 이후 생태계서비스(ecosystem services) 관련 연구(e.g. Costanza *et al.*, 1997; 2014)에서부터 비롯되었다. 이에 영향을 받아 토지황폐화에 대한 경제성 평가 이니셔티브(ELD Initiative; Economics of Land Degradation)가 2011년에 구성되면서, 토지황폐화가 경제적으로 어떠한 파급효과가 이루어졌는지에 대한 전세계적 스케일과 대륙 스케일의 연구보고서와 연구가 여러 차례 진행된 바 있다<sup>21</sup>).

---

1981-2006년간의 자료를 1:500,000-1,000,000의 축적의 지도로 도출되었다. GEF-UNEP-FAO의 공통 과제였다.

- 17) World Overview of Conservation Approaches and Technologies, 토지황폐화 저감을 위한 지속가능한 토지관리(SLM)의 전문가기반의 접근과제이다. 세계 단위 뿐만 아니라 지역적인 정보까지 포함한 세부 지도로 표현된다.
- 18) Net Primary Production. 순일차생산량은 총일차생산량(Gross Productivity Production)에서 호흡으로 소모된 량(증발산량)을 뺀 값으로, 총일차생산량은 식물이 광합성으로 생성해 낸 유기물 생산량을 말한다. 따라서 생물학적인 토지황폐화의 정도를 파악하는 지표가 된다(Le *et al.*, 2012 :산림청 용어해설, <https://forest.go.kr>).
- 19) 해당 위성영상 정보는 부록 1에서 자세히 설명하도록 한다.
- 20) A study of human-induced soil degradation in South and Southeast Asia, 앞서 언급한 GLASOD에 대해서 지역 스케일로 확장한 것으로, GLASOD가 토지황폐화의 범위와 종류의 관찰에 한정했다면 토양 침식과 식량생산량의 증감에 대해서 다루었다는 특징이 있다.
- 21) E-LD 접근에 따른 전세계적 토지황폐화 비용은 산출 방법에 따라 2007년 기준 연간 약 200억 US\$(Basson, 2010)에서부터 9조 4천억 US\$(Costanza *et al.*, 2014)에 달한다고 보고되고 있다. 식량 부분의 토지황폐화 문제를 평가한 결과 동일시기 전 세계에서 연간 150억 US\$의 토지황폐화의 비용이 발생하고 있으며, 앞으로 30년간 매년 1US\$ 수준의 토지황폐화 저감 투자를 진행한다면, 매년 5US\$ 수준의 가치를 얻을 것

하지만 관찰과 평가 중심의 전통적 토지황폐화 문제는, 특히 식량생산 감소와 기근 위험 저감의 측면에서 한계를 지적받고 있다.

첫째, 토지황폐화 자체의 프로세스와 토지황폐화와 식량생산 감소와의 관계에 대한 이해가 부족하다는 지적을 받고 있다(Eswaran *et al.*, 2019). 이는 과학적 연구보다 실용적인 측면에 집중한 토지황폐화 연구의 배경에서 비롯된 것일 수 있다. 그러나, 실제 과학적 목적에 기반을 둔 토지황폐화와 식량생산 저하의 관계에 대한 상당수의 분석에서, 우리의 상식과는 달리 명확한 관계성이 도출되지 않았다고 알려져 있다(Eswaran *et al.*, 2019). 토지황폐화 프로세스의 이해가 부족한 이유는 여러 가지가 있지만, 토지황폐화 프로세스의 구성 요소들은 다양한 스케일과 속성을 가지고 있는데다가 알려지지 않은 경우가 많으며 이 구성 요소들은 인간적인 요소와 자연적인 요소로 이루어져 있고 복잡한 상호작용 관계하에 있기 때문이다 (Geist and Lambin, 2004; Reynolds *et al.*, 2007; 2011; Vogt *et al.*, 2012).

둘째, 토지황폐화 용어의 정의와 개념의 범위, 관찰과 평가의 기준이 명확하지 않다(Vogt *et al.*, 2011). 토지황폐화의 정의는 학제별 또는 연구자별, 연구기관별로 상이하며<sup>22)</sup>, 같은 토지황폐화 현상에 대해서 다루는데도 불구하고 다른 용어<sup>23)</sup>를 사용하는 경우도 존재한다(Eswaran *et al.*, 2019). 또한 각 연구마다 측정 방식이 상이하고 범위(scale)가 각자 다르므로 “토지황폐화”가 실제 토지의 상태가 황폐화된 상태를 말하는 것인지, 아니면 앞으로 토지의 상태가 황폐화될 위험(risk)에 처해 있다는 것인지 불분명한 경우가 많다(Eswaran *et al.*, 2019). 이 때문에, 토지황폐화 관련 관찰과 평가에 관한 기존 연구의 신뢰성의 의심받고 있으며, 측정방법 및 용어의 통일과 표준화 등 다른 방식의 접근이 필요하다(Dubovyk, 2017).

최근 환원주의(還元主義, reductionism)적 또는 인과론적 접근 방법으로 토지황폐화 문제를 쉽게 설명하기 어려워 이러한 문제가 발생하였다는 인식이 대두되고 있으며, 대안적 접근방법으로 사회생태시스템 기반의 복잡적응계적 접근법이 주목받고 있다(Reynolds *et al.*, 2007; 2011).

사회생태시스템(Social-Ecological System, SES)<sup>24)</sup>은 인간을 생태시스

---

이라는 보고가 있었다(Nkonya *et al.*, 2016).

22) 이는 본 장 2절에서 자세하게 다루며, 본 연구에서 정의하는 토지황폐화 문제의 정의에 대해서 다루도록 하겠다.

23) 토양 황폐화(soil degradation) 또는 사막화(desertification)이라고 부르는 경우도 있다. 하지만 토양 황폐화의 용어의 경우 토지가 가지고 있는 다른 생태적, 물리적 속성을 반영하지 못한다는 이유 때문에, 사막화의 경우 습윤지역 등 다른 생태환경지역에서 발생하는 토지황폐화 문제를 고려하지 못한다는 이유 때문에 현재는 토지황폐화라는 용어로 정착되었다(Eswaran *et al.*, 2019).

템의 일부로 보고, 인간과 자연을 통합적인 하나의 체계로 보는 관점이다(Liu *et al.*, 2007). 2000년대 이후로 많은 연구에서, 토지황폐화 문제는 대개 인간의 행동과 자연의 변화가 서로 영향을 주고받는 사회생태시스템이라고 보았으며 사회시스템적인 관점에서 연구를 진행하였다(Reynolds *et al.*, 2007). 사회생태시스템의 특성은 여러 가지가 있겠지만, 핵심적인 부분은 인간과 자연의 상호작용에서 기인하는 복잡성(complexity)이라고 할 수 있다(Liu *et al.*, 2007).

복잡적응계(complex-adaptive system, CAS)는 사회생태시스템과 같은 복잡성을 가진 체계의 종류로써, 다양한 요소의 상호작용을 바탕으로 복잡한(complex-) 반응을 보이면서, 상호작용의 집합을 통해 특유의 질서(-adaptive)를 만들어가는 체계(system)를 뜻한다(Holland, 2005; Miller and Page, 2007). 복잡적응계의 구성요소들은 이질적(heterogeneous)이며, 상호작용을 통해 서로에게 영향을 줄 뿐 아니라 되먹임(feedback)의 형태로 자기 자신에게도 영향을 준다. 이러한 작용을 거치며 복잡적응계는 동적평형(dynamic equilibrium)상태를 유지하거나, 자기조직화(self-organization), 임계전이(critical transition)<sup>25)</sup>의 변화를 거치며 창발(emergence)적 새로운 질서를 만들기도 한다. 그 과정과 결과는 복잡하고(complicated), 불확실성과 의외성(uncertainty and surprising)이 있으며, 대체로 비선형적(nonlinearity)이다(Liu *et al.*, 2007). 이는 창발 현상으로 만들어지는 질서는 자기조직화한 형태로 과거와 전혀 다르기 때문이며, 임계점과 방향성은 아주 작은 차이에도 크게 변화하기 때문이다. 따라서 복잡적응계의 변화는 예측이 어려우며, 특히 “과거의 자료에 기반을 둔” 수식이나 통계자료로는 예측할 수 없다(Chan, 2001; 운영수·채승병, 2005; Scheffer *et al.*, 2009).

사회생태시스템과 복잡적응계의 관점에서 토지황폐화에 대한 접근방법은 달라졌다. 첫째, 기존의 토지황폐화에 대한 관찰과 평가 연구가 종합적이고, 전체적인 수준으로 범위가 확장되었다. 과거의 관찰과 평가 연구가 특정한 지표(indicator)에만 의존하였다면, 최근의 접근법들은 인간과 사회 요소를 포괄하는 다양한 지표를 선택하여 관찰·평가하거나(e.g. LADA), 인간과 사

24) Coupled Human and Environment System이라 칭하기도 한다(e.g. Liu *et al.*, 2007)

25) 상 전이(phase transition)에서 유래한 복잡적응계 용어다. 상 전이는 온도변화에 따라 물이 얼음으로 또는 수증기로 변화하는 작용을 물리학적 용어로 표현한 것이다. 임계전이는 복잡적응계적 속성을 가지고 있는 사회생태시스템이 일으키는 상 전이와 같은 현상을 말한다. 물이 열을 받아 100°C가 되면 수증기로 변화하듯, 사회생태시스템이 특정한 영향을 받아 임계점(threshold)을 넘어가게 되면 새로운 시스템의 형태로 바뀌는 것을 말한다.

회 지표를 포괄하는 통합 지표를 선택(e.g. E-LD)하는 형태로 발전하였다(Vogt *et al.*, 2012; Turner *et al.*, 2016). 둘째, 토지황폐화에 대한 관찰과 평가 연구에 덧붙여, 토지황폐화 현상을 전역적(holistic)으로 포괄하는 모형기반 연구가 본격적으로 진행되었다. 이는 기존 토지황폐화 접근에서 부족하였던 프로세스 기반 이해를 종합적으로 가능하게 할 것으로 보인다. 토지황폐화에 대한 사회시스템, 생태시스템, 경제 제도 시스템 등으로 분절하여 보고자 하는 시도도 있었으나 점차 통합하고자 하는 방향으로 발전하였다(Reynolds *et al.*, 2011). 궁극적인 형태는 다행위자시스템(Multi-Agent System for Land-Use and Cover Change)으로서 이는 토지황폐화 문제의 인간행위자와 사회시스템, 생태시스템, 정책요소 등을 복잡응계적으로 통합하려는 시도로 평가받고 있다(Parker *et al.*, 2003; Le *et al.*, 2010; Miyasaka *et al.*, 2012)<sup>26)</sup>. 다행위자시스템은 토지황폐화와 관련된 사회생태시스템을 포괄하고, 관찰과 평가를 통합하는 의사결정시스템으로 확장하고자 하는 시도로 발전하고 있다(Reynolds *et al.*, 2011).

## 2) 1990년대 북한 대기근과 북한 토지황폐화 연구동향과 과제

1990년대 북한 대기근과 북한 토지황폐화 현상에 관한 연구는 대기근이 발생한 1990년 이후에 본격적으로 시작되었다.<sup>27)</sup> 앞서 토지황폐화 연구와 마찬가지로, 토지황폐화 현상에 대한 관찰연구와 식량생산량에 대한 평가 연구가 주로 진행되고 있다. 하지만 토지황폐화 문제를 고려치 않고 1990년대 북한 대기근과 북한 식량부족에 접근하는 연구의 비중도 높다.

북한의 토지황폐화 현상에 대한 관찰연구는 현장정보 수집과 조사가 거의 불가능한 수준이기 때문에, 위성영상정보에 의존한 연구가 주로 진행되고 있으며, 학계에서는 임학·원격탐사학 중심으로 그리고 대규모 연구는 산림청 국립산림과학원과 같은 국가기관 중심으로 이루어지고 있다.(e.g. 김경민, 2020). 자료가 부족한 위성영상 연구의 한계와 역사적·학술적 맥락에 따라 산림황폐화 연구에 집중하였다.<sup>28)</sup> 북한의 토지황폐화 평가 연구는 주로 위성영상으로 확인한 토지황폐화 현황과 식량생산 정보 간 관

26) 다행위자시스템의 세부 정의, 개념, 사례는 4장에 자세히 소개하였다.

27) 현재 알려진 북한의 학술지나 자료집 수준으로는 북한의 정확한 관련연구 수준을 평가할 수 없으므로, 북한 자체 연구나 문헌으로 공개되지 않은 남·북 또는 북·중 등의 국제협력 연구는 고려치 않기로 한다.

28) 세부내용 2장 참조

계성을 포착하는 연구에 집중되며, 역시 국가기관 중심(농촌진흥청 국립농업과학원)이다(e.g. 홍석영, 2015).

토지황폐화 문제를 고려하지 않는 1990년대 북한 대기근과 북한 식량부족 문제 연구는 주로 (국제)정치학 또는 (농업)경제·사회학 분야에서 주로 이루어지고 있는 연구다. 이는 1990년대 대기근의 원인에 따라 공급 실패를 다루는 연구(e.g. 이석, 2004a)와 농업생산시스템의 실패를 다루는 연구(e.g. 남성욱, 2016)으로 나눌 수 있다. 공급실패에 대한 연구는 식량획득량 감소(FED)연구로 볼 수 있다. FED연구는 “북한의 시스템적 제한으로 인해 의도적으로 북한 주민의 식량 접근을 막아 기근이 발생했다”고 하는 접근으로, 이 접근에는 생산성 저하에 관심이 없다(문경연 등, 2015). 농업생산시스템 실패 관련 연구는 토지황폐화 요소에 관심이 있으나 주로 사회경제적 요인에만 치중하고 있다.<sup>29)</sup>

1990년대 북한 대기근과 토지황폐화 연구는 기본적으로 사회생태시스템과 복잡응계가 적용되지 않은 전통적인 토지황폐화에 관한 연구에 머물러 있다. 그 이유는 다음과 같이 설명할 수 있다.

첫째, 북한연구계는 토지황폐화라는 용어에 익숙하지 않으며, 특히 토지황폐화와 1990년대 대기근을 연결 짓고자 하는 접근이 이루어지지 않았다. 한국 학계에서 토지황폐화는 산림황폐화와 거의 같은 개념으로 사용하며 대체로 임학과 원격탐사학에 집중되어 있다. 이를 농업과 산림을 포괄하거나 사회경제적, 자연적 요소까지 포괄하는 연구는 본 연구를 포함해 극히 일부에만 해당한다(안유순, 2013; 정승규 등, 2016; 이훈종, 2020). 그 외 연구들은 토지황폐화라는 용어는 사용하지 않지만 그에 준하는 식량생산성 저하 문제에 대해서 언급하는 경우가 있으며, 중요성은 높지 않아 보인다. 단, 공급실패와 관련된 연구 중 FED 연구는 앞서 언급한 대로 생산성 저하 문제와 밀접한 연관이 있다.

둘째, 북한연구는 어떤 지역 연구보다 자료가 부족하다(강성윤, 1999). 특유의 자료부족 문제는 토지황폐화 문제에 대한 과학적 프로세스와 관계성을 이해하는 데 보다 더 큰 장애를 유발한다. 위성영상이 발달하면서 많은 부분 극복이 가능했다고 여겨지나, 위성영상 기반 연구조차도 검증자료가 필요한 것이 현실이다.

셋째, 선입관이나 정치·종교적 의사에 의한 편향이 연구에 개입되는 경우가 많다(고유환, 2015).<sup>30)</sup> 연구자의 정치·종교적 관점에 따라 북한을 악

29) 세부내용은 2장 참조.

30) 북한연구에서 많이 발생하는 문제겠으나, 북한연구만의 문제라고는 볼 수 없다. 과도하게 선입관이나 개인적 관점이 개입되어 사실에 대한 편향적 인식이나 해석이 이루어

마화하거나 북한에 호감을 느끼는 경우, 북한에서 일어난 현상에 대해서 편향적인 이해를 하는 경우가 많다. 예를 들어 1990년대 북한 대기근의 원인에 필연적인 문제<sup>31)</sup>와 우연적인 사건<sup>32)</sup>이 혼재되어 있는데도 각자의 편향에 따라 어느 한쪽만을 강조하는 경우가 많았다.<sup>33)</sup>

넷째, 각 분과학문 및 연구주제 간 공동연구나 교류가 부족한 편이다(고유환, 2015). 각 연구의 부족한 부분이라고 여겨지는 타 분야 동시대 연구가 서로 인용되지 않거나 문제로서 인식되지 않는 경우가 많다. 물론 국제적 토지황폐화 연구도 분과학문별 개념과 용어의 혼선이 존재하지만, 북한 연구에서처럼 두드러진 인식 차이까지는 아닌 것으로 보인다.

결과적으로 북한의 토지황폐화와 1990년대 북한 대기근 연구는 같은 연구대상을 가지고 연구를 하고 있음에도 자료의 부족과 사고의 편향으로 인해 공통된 인식을 찾아보기 쉽지 않다. 최근 분야 간 연구 교류 활동이 진행되는 것으로 보이나, 현재는 북한의 토지황폐화와 1990년대 북한 대기근 연구에까지 성과로 잘 드러나지 않는 것으로 보인다.

### 3) 사회생태적 접근법과 복잡적응계적 인식체계의 필요성

앞서 북한의 토지황폐화 연구의 한계는 기본적으로 전통적 토지황폐화 연구의 한계와 일맥상통한다고 보았다. 프로세스 이해 부족과 용어와 개념의 혼란에 더해, 북한 특유의 자료 부족, 선입관과 편향, 학제 간 교류 문제 또한 북한의 토지황폐화와 1990년대 북한의 대기근 문제 연구를 어렵게 하는 점이다. 이러한 한계는 앞서 토지황폐화의 국제 연구에서의 방안과 마찬가지로 사회생태시스템의 맥락에 따라 복잡적응계적 사고로 접근하는 것이 바람직할 것이다.

프로세스 이해 부족과 용어와 개념의 혼란, 학제 간 교류의 부족 문제는 현상을 부분적 관점으로 보는 한계에서 비롯되었다고 볼 수 있다. 기존 북한의 토지황폐화와 식량생산 부족에 관한 연구들은 산림황폐화 현상 자체)

---

진다면 비판할 필요가 있다. 그러나 북한연구의 동기로서 작용한다면 비판할 수는 없으며 오히려 좋은 결과인 경우도 많다.

- 31) 협동농장체제, 배급제, 주체농법 등의 제도적 문제, 북한의 기후·지형조건 등이 이에 해당할 것이다
- 32) 1990년대 초 연달아 발생한 자연재해 문제, 1980년대 말-1990년대 초의 사회주의권의 붕괴 등이 이에 해당할 것이다.
- 33) 특히 대기근 직후에서부터 2000년대 초반 연구까지 그러하다. 대기근시의 사망자수를 일반적인 인식에 비해 크게 보거나(Natsios, 1999), 북한의 식량생산 저하를 논의에서 배제하는(정광민, 2005) 등의 시도가 대표적인 사례다.

나 식량생산량 변화 예측(e.g. 홍석영 등, 2015), 또는 협동농장(e.g. 남성욱, 2016)이나 배급체제(이석, 2004a) 같은 현상과 제도에만 관심을 가졌다. 각자가 연구한 문제들이 다른 부분에 어떤 영향을 끼쳤을지에 대해서는 언급이 없거나 당위적인 언급에 그쳤다. 이는 전체를 부분과 부분의 합으로 보는 환원주의적 관점에서 비롯된 사고로써, 각 요소를 연결하는 관계성에 대해서는 정작 인식하지 못했다는 한계를 가진다<sup>34)</sup>. 따라서 북한의 토지황폐화 연구는 각 요소들의 단순한 나열에만 그칠 뿐, 시스템 전체가 어떤 메커니즘으로 굴러가는지에 대한 전체성이 부족한 것이 현실이다.

인과관계를 단편적이고, 선형적으로 바라보는 관점은 프로세스 이해 부족과 선입관과 편향 문제의 원인으로 작용하였다고 볼 수 있다. 예를 들어 식량생산 변화 예측모형 연구(e.g. 홍석영 등, 2015)는 현상을 토지황폐화 현상(식생지수)과 기후조건을 원인(독립변수)으로, 식량생산량의 증감을 결과(종속변수)로 가정하고 연구를 진행하였다. 그러나 서두(그림 1-1)에서 언급하였듯, 식량생산의 증감은 사람들의 식량의 필요성에 대한 압력으로 작용하기도 하며, 이 경우 결과가 다시 원인이 되기도 한다. 또한 토지황폐화 현상은 기후변화를 일으키기도 하고, 반대로 기후변화현상은 토지이용에 영향을 끼쳐 토지황폐화를 일으키기도 한다. 그 외 수많은 요인들이 원인과 결과로 연결되어 있을 것이다. 이토록 토지황폐화 현상을 포함한 많은 사회생태시스템의 현상은 결과가 원인이 되고 원인이 결과가 되는 순환적 관계, 즉 되먹임(feedback) 구조로 되어 있다(Liu *et al.*, 2007). 되먹임 구조 내의 현상들은 단순한 인과관계와는 달리 선형적 변화보다는, 되먹임의 고리를 따라 증폭되거나, 감쇄가 되는 멱함수(power law)를 따르는 비선형적(nonlinearity) 변화를 보인다(Miller and Page, 2007).

각 요소 간의 복잡한 관계와 되먹임 구조를 띠고 있는 체계는 필연적으로 급격한 변화 과정을 거친다. 시스템 내의 구성 요소들은 상호작용을 통해 미시적인 관계를 주고받으며 일정한 동적 평형(dynamic equilibrium)을 이루고 있으며, 어느 정도 충격을 받더라도 원래의 평형 상태로 돌아오는 회복력(resilience)을 가지고 있다. 그러나 그 충격이 크거나, 충격의 누적량이 많으면 시스템은 점차 평형상태에서 벗어나게 된다.<sup>35)</sup> 결국 임계치(threshold)를 넘게 되면 기존의 질서는 붕괴되고 자기조직화(self-organization)를 통한 새로운 질서와 평형이 만들어진다. 이를 창발

34) 물론 식량생산량 변화 예측 모형 연구들은 식생지수(토지황폐화)와 식량생산과의 관계에 집중하여 연구를 진행했지만, 그 외 여러 요소들 간의 관계성에 소홀하였기 때문에 근본적으로 같은 한계를 지닌다고 할 수 있다.

35) 혼돈의 가장자리(edge of chaos)

(emergence)현상이라 한다.<sup>36)</sup>

창발현상은 점진적인 경우도 있지만, 대개는 급격하고 파괴적이다. 그러나 어느 시점에서 임계시점에 이르는지, 그리고 임계시점에 이르면 어떠한 방향으로 새로운 질서가 만들어지는지는 알기 어려우며, 같은 조건과 상황이라 해도 대부분 매번 다른 결과가 도출된다(Chan, 2001; Scheffer *et al.*, 2009). 대신 변화가 일어나는지 확신할 수는 없는 일정한 징후가 포착 가능할 뿐이다(Scheffer *et al.*, 2009).

1990년대 북한의 대기근은 복잡적응계에서 발생하는 창발현상의 대표적인 사례라 할 수 있다. 문헌에 분명하게 드러나지는 않지만 여러 정황에 따르면 1990년대 북한의 대기근 자체를 사전 예측하는 전문가는 드물었던 것으로 보인다. 대신 통계수치, 국제정세, 북한의 반응과 같은 북한이 처한 위기와 관련된 여러 징후가 나타났기 때문에, 1980년대 후반 다수의 전문가 집단은 북한이 위기에 가까워지고 있음을 인식하고 있었다. 하지만 1990년대 중반에 기근의 형태로 위기가 발생할 것을 예측했던 이는 드물었던 것으로 보인다. 이후에는 반대로 북한이 1990년대 초반과 비슷한 사회경제적 상황과 자연재해를 경험할 때마다 다수의 전문가들이 제 2의 기근을 예측하거나 우려하는 시각을 보였다. 그러나 적어도 1990년대 중반과 같은 대기근은 현재까지 일어나지 않았다. 이러한 예측의 어려움은 단지 자료부족에서만 비롯된 것이 아니며 토지황폐화와 식량생산 감소가 가지고 있는 복잡적응계적 속성, 특히 창발현상 때문으로 볼 수 있다.

1990년대 북한 대기근과 토지황폐화 문제에 대해서 기존연구가 가진 한계를 극복하기 위해 이 연구에서는 복잡적응계적 인식체계를 바탕으로 연구를 진행하고자 하였다. 이 연구에서의 복잡적응계적 인식체계는 다음과 같다(그림 1-2),

첫째, 문제를 전체적인 관점(holism 또는 holistic approach) 또는 시스템적 관점(system approach)으로 인식하는 것이다. 이는 부분이 아닌 전체를, 각 요소보다 요소 간의 상호작용 관계를 중시하는 관점이다. 특히 기존연구가 가지고 있는 학제 간 접근의 한계를 극복할 수 있고, 부족하였던 프로세스 이해를 증진시킬 수 있는 방법으로 볼 수 있다.

둘째, 되먹임과 비선형성 중심의 인식체계이다. 기존연구의 원인과 결과 중심의 연구와는 달리, 북한의 토지황폐화와 식량생산 감소 문제는 원인과 결과가 복잡하게 뒤섞여있는 문제였다. 이는 앞선 문제뿐만 아니라 연구자

---

36) 이 전제의 현상을 임계전이(critical transition)라 부르기도 한다.

가 가지고 있는 고정관념을 깨트림으로써 편향을 극복하는 데 도움이 될 것으로 보인다.

셋째, 예측이 아닌 징후를 파악하고 이를 회피하고자 하는 인식체계가 다. 토지황폐화현상에 대한 과거와 현재에 대한 관찰과 평가 정보에는, 미래의 창발현상과 새로운 질서에 대한 정보가 빠져 있다. 대신, 현재 질서가 얼마나 안정적인지, 또는 어떤 위험이 있을지에 대한 미세한 징후만 포착할 수 있을 뿐이다. 자료와 인식의 한계를 인식하고, 미세한 징후를 놓치지 않고자 하는 인식체계와 노력이 필요하다.

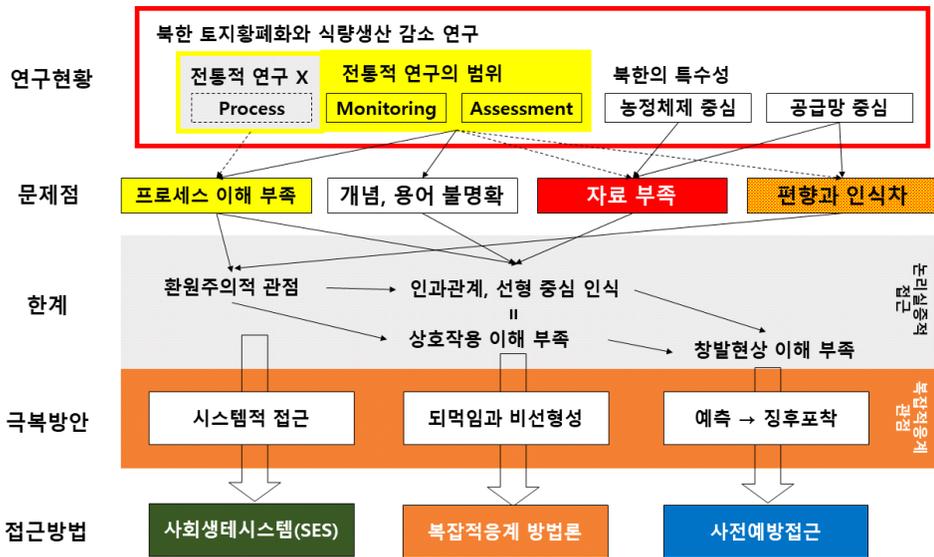


그림 1-3. 연구현황과 문제점, 한계와 접근방법 모식도

### 3. 접근방법과 연구질문

앞서 언급한 대로 이 연구는 1990년대 북한 대기근을 중심으로 복잡적응계 개념에 기반을 둔 토지황폐화와 식량생산 감소 문제에 대한 연구이다. 이 연구를 통해 1990년대 전후 북한이 처한 토지황폐화와 식량생산 감소 문제에 대해서 이해하고, 이를 바탕으로 한반도와 세계적 차원의 토지황폐화와 기근 위험 저감을 위한 대안을 마련하고자 한다. 기존 연구에서 제기된 과제와 기존연구의 한계를 바탕으로, 이 연구에서는 1990년대 북한 대기근과 북한의 토지황폐화 문제에 대해서 다음과 같은 접근방법이 필요하다고 보았다.

첫째, 토지황폐화와 식량생산 감소 문제를 시스템적 접근의 일환인 사회생태시스템의 틀로 접근하여야 한다. 앞서 언급하였듯 토지황폐화와 식량생산 감소 문제는 사회경제적 문제 또는 생태환경 문제로만 정의할 수 없다. 따라서 사회생태시스템 접근은 1990년대 북한 대기근과 토지황폐화 연구에서 필요한 시스템적 접근을 가능하게 해주는 틀(framework)로 작용할 수 있다.

둘째, 복잡적응계 방법론을 활용하여 토지황폐화와 식량생산 감소의 프로세스를 해석하여야 한다. 앞서 언급하였듯 사회생태시스템으로서 토지황폐화와 식량생산 감소 문제는 복잡적응계적인 특성이 있으며, 이는 현상에 대한 이해와 미래예측을 어렵게 한다. 인과관계 중심의 환원주의적 접근방법 대신, 복잡적응계에 기반을 둔 대안적 방법론을 적용할 필요가 있다. 이 연구에서는 토지황폐화와 식량생산 감소와 관련된 복잡적응계적 방법으로, 관찰을 통한 징후 탐지 목적인 조기경보신호 탐지 기법<sup>37)</sup>과 주로 정책 평가 목적의 모형화 방법론인 다행위자시스템<sup>38)</sup>을 활용하여 연구를 진행하고자 하였다.

셋째, 1990년대 대기근과 같은 토지황폐화와 식량생산 감소로 인한 급변사건에 대한 사전예방 방안을 마련해야 한다. 앞서 반복적으로 언급한 복잡적응계시스템의 예측불가능성에도 불구하고, 토지황폐화와 기근 위험을 저감할 수 있는 방안을 모색할 필요가 있다. 사전예방의 원칙(precautionary principle) 또는 “사전예방 접근(precautionary approach)”은 복잡적응계의 예측불가능성에 대한 대안적 접근으로, 현실

---

37) 세부내용 3장 참조

38) 세부내용 4장 참조

에서의 불안정성이 어느정도인지, 변화에 대한 사전 징후는 있는지, 위험의 예상 범위는 어느정도인지를 파악하고, 이를 광범위하게 회피하고자 하는 접근을 말한다(Kriebel *et al.*, 2001).

이 세 가지 접근 방법은 이 연구에서 확인하고자 하는 1990년대 북한의 대기근과 그 원인으로서의 토지황폐화와 식량생산 감소 문제에 관한 연구 질문과 연결된다.

첫째, 북한의 토지황폐화와 식량생산 감소 문제에 관한 지식 부족과 인식 차이 문제를 현재의 성과만으로 극복할 수 있는지를 확인할 필요가 있다. 수십년간 누적되었으나 학제 중심의 부분적 연구인 관련 연구성과를 사회생태시스템 기반 접근으로 전체적이고 포괄적으로 재구성하는 것이 가능한지를 확인할 필요가 있다. 아울러 사회생태적 재구성이 1990년대 북한 대기근에 대한 이해의 폭을 얼마나 넓힐 수 있으며, 부족한 부분이 무엇이며 어떻게 보완해야 하는지를 확인할 필요가 있다.

둘째, 1990년대 북한 대기근의 사전 징후가 있었는지에 대한 여부와 있었다면 어떤 양상이었는지를 확인할 필요가 있다. 예측이 어려운 복잡계적 임계전이와 창발의 징후를 포착하는 조기경보신호 탐지 기법이 이 문제에도 적용 가능한지를 확인하여야 한다. 이는 해당 문제에 대한 사전예방 방안 마련이 가능한지에 관한 질문에 응답할 수 있는 연구 질문이기도 하다.

셋째, 1990년대 북한 기근을 요약하여 이를 재현 가능한 모형으로 개발할 수 있는지, 그리고 이를 바탕으로 사전예방적 시험 모형을 구축할 수 있는지를 확인할 필요가 있다. 다행위자시스템은 토지황폐화와 같은 지표피복변화문제의 복잡계적 재현과 사전예방 접근을 가능하게 해주는 도구가 될 수 있다. 자료 부족에도 불구하고 이러한 현상을 재현하고 예방할 수 있을지 확인할 필요가 있다.

#### 4. 연구목적

이 연구에서의 문제의식과 연구동향, 연구질문 및 접근방법에 따라 이 연구에서는 한반도 차원의 토지황폐화와 기근 위험 저감을 최종적인 목적으로 1990년대 북한의 대기근과 북한의 토지황폐화 문제에 관해 연구하고자 한다(그림 1-3). 세부 연구목적은 아래와 같다.

첫째, 사회생태시스템을 기반으로 북한의 토지황폐화와 식량생산 감소의 프로세스 및 과정을 이해하고자 한다.

둘째, 1990년대 북한의 기근과 토지황폐화 현상에 대해서 조기경보신호를 확인함으로써, 1990년대 북한의 기근의 징후가 어떤 형태로 나타났는지를 파악하고자 한다.

셋째, 다행위자시스템을 활용하여 1990년대 북한 대기근과 토지황폐화 현상을 재현하는 모형을 구축하고, 이를 활용한 사전예방 방안을 모의하고자 한다.

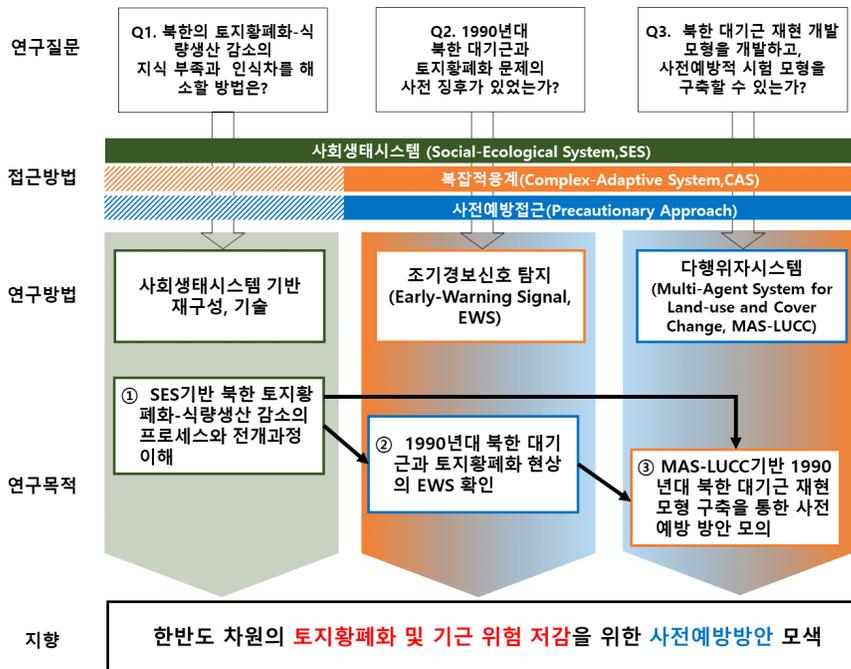


그림 1-4. 연구질문과 연구목적 모식도

## 제 2 절 연구대상과 범위

이 연구의 핵심인 1990년대 북한의 대기근과 토지황폐화, 식량생산 감소와 관련된 자료는 다양한 시공간적 범위로 존재하나 남한 및 다른 국가와 달리 제한적이다. 또한, 앞서 언급하였듯 토지황폐화와 식량생산 감소 연구에 있어서 많은 개념과 용어들이 불명확하다는 문제가 있다. 따라서 연구대상이 가지고 있는 특성과 연구에 주어진 여건을 고려할 필요가 있다. 이에 맞는 시공간적 범위와 개념적 범위는 다음 내용과 같다.

### 1. 연구의 시공간적 범위

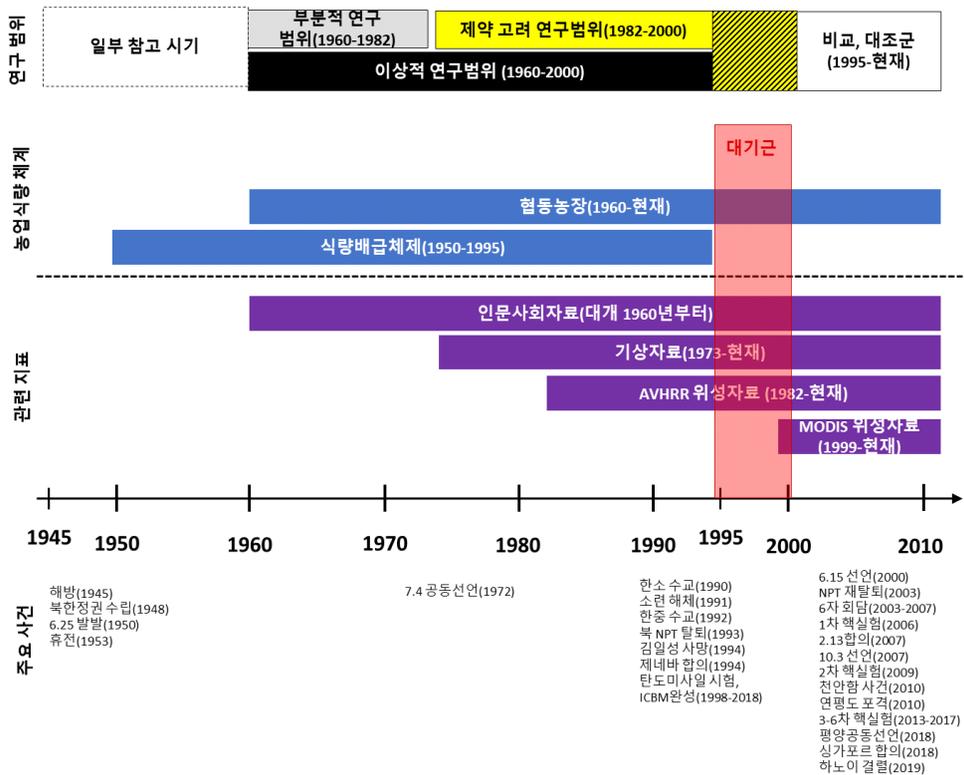


그림 1-5. 연구의 시간적 범위

이 연구의 시간적 범위는 이 연구의 주된 동기이자 연구 대상인 1990년대 북한 대기근과 밀접한 연관이 있다. 1990년대 북한 대기근은 연구자에 따라 그 시기를 달리 정의하지만, 대개 1994~1995년을 시작 지점으로 보며, 대개 2000년 전후에 종료되었다고 본다(이석, 2004a). 그리고 1990년대 북한 대기근의 주요 원인이며 현재에도 이어지고 있는 체계인 북한의 협동농장체제가 1960년 전후에 완성되었다는 것도 중요한 시점이라 할 수 있다. 따라서 1960년부터 2000년까지가 이 연구의 주된 시간적 범위이자, 이상적 연구의 시간적 범위라 할 수 있다.

하지만 연구자료의 제약을 고려하였을 때 1960년부터 2000년까지의 시기를 일률적으로 적용할 수 없었다. 이 연구에서 사용한 연구자료 중 가장 핵심적인 것은 토지황폐화의 정도를 나타낼 수 있으며 식량생산량 추정자료로 활용가능한 식생지수 위성영상 자료(AVHRR GIMMS NDVI)라 할 수 있다. 해당 자료는 1981년 후반부터 2015년 말까지 구축되었기 때문에, 실질적으로는 1982년부터의 자료가 활용가능하다. 또한 식량생산 관련 자료(FAOSTAT, 시작시점 1961년)와 기상자료(한국 기상청, 시작시점 1973년 또는 1981년) 등 다른 자료들 또한 시간 제약이 있었다(세부내용 부록 1 참조). 따라서 분석적 방법을 통한 연구(e.g. EWS)는 연구자료에 맞게 연구의 시간적 범위를 유동적으로 조절할 수밖에 없었으며, 대개 위성영상 자료에 맞춘 1982년부터 2000년까지인 경우가 많았다. 또한 2000년 이후의 자료가 있는 경우, 비교검토에 활용하기 위해 분석에 포함하였다. 단, 모형기반 연구(MAS-LUCC)는 이상적 연구의 시간적 범위를 지키고자 하였다. 세부적인 시간적 범위는 그림 1-4와 같다.

이 연구의 공간적 범위는 북한으로 한정하며, 더 구체적으로는 1948년에 정권이 수립되었으며 1990년대 한국전쟁(6.25)과 1953년 휴전을 통해 현재의 영역을 이루고 있는 북한지역에 한정된 연구를 진행하였다. 대체로 북한 전역을 대상으로 하나, 해석을 위해 북한을 특정 지역이나 행정구역으로 나누었다(그림 1-5). 일반적으로는 북한의 시도 단위의 행정구역이나 주요 도시를 활용하여 설명하고자 하였으며, 해상도에 따라 더 큰 영역으로의 설명이 필요한 경우 북한을 관서, 관북, 휴전선 일원으로 나누었다. 관서(關西)지방과 관북(關北)지방은 철령(鐵嶺)<sup>39)</sup>의 서쪽과 북쪽에 있는 지역이라는 뜻으로 조선시대·일제 강점기에 주로 해당 지역을 지칭할 때 사용하는 표현이었다. 현재 북한이 사용하는 지명과 범위를 기준으로 관서

39) 강원도 회양군과 함경남도 안변군(일제강점기 지명) 경계에 있는 지명. 서울과 원산을 잇는 추가령열곡에 위치해 있다.

지방은 평안남도와 평안북도, 자강도, 평양직할시, 남포특별시라 정의하였으며 관북지방은 함경남도와 함경북도, 양강도로 정의하였다. 휴전선 일원은 그 이외의 지역인 황해남·북도와 개성, 강원도 일대를 지정하였다<sup>40)</sup>.

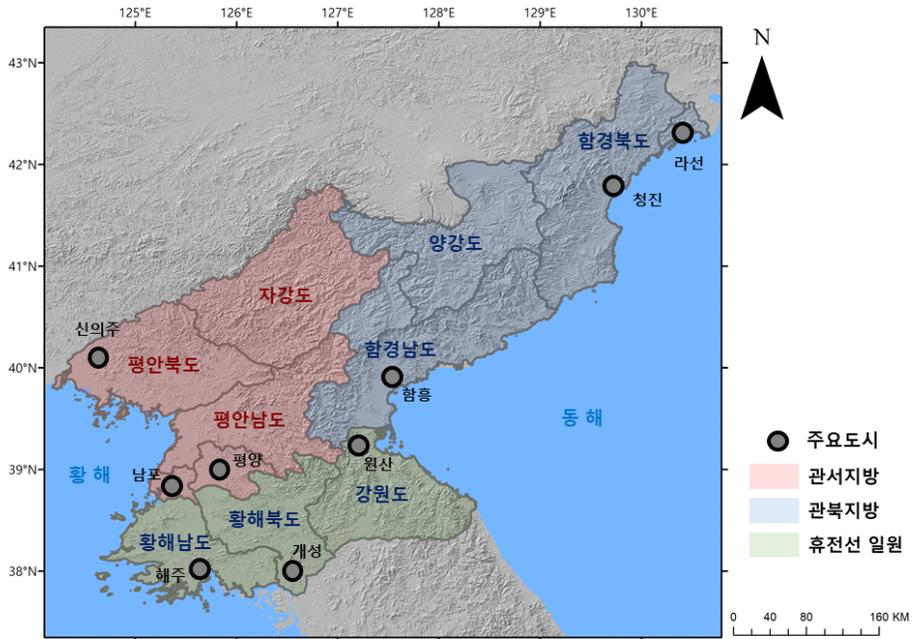


그림 1-6. 연구의 공간적 범위(북한)와 지역 구분

\* 행정구역은 김기혁(2020)의 2008년 지역 구분을 따랐음, 행정구역도는 GADM(<http://gadm.org/>), 배경의 Hillshade는 SRTM 1 arc-sec영상 활용

40) 해방 전에는 함경남도의 일부였으나 해방 후 북한 기준으로 강원도에 포함된 원산 일대는 편의상 휴전선 일대에 포함시켰다.

## 2. 주요 개념의 정의와 범위 설정

이 연구에서의 주요 개념인 토지황폐화와 식량생산 감소에 대한 용어를 설명한다. 특히 이 두 용어는 연구마다 다소 차이가 있는 용어거나 자주 사용하지 않는 표현을 사용하였기 때문에 가급적 구체적으로 규정하고자 하였다. 복잡적응계의 개념에 대한 설명은 1장 1절에, 방법론은 3장과 4절에 구체적으로 설명하였기 때문에 따로 다루지 않았다. 추가적으로 용어에 혼란을 줄 수 있는 다른 용어의 개념에 대해서도 설명하기로 하였다.

서두에서 언급한 대로 토지황폐화는 토지가 생물학적인 측면에서 그리고 물리학적, 사회경제적인 측면에서 생산 능력을 잃어버리는 것을 말한다. 사실 이 현상에 대한 용어는 다양하며 대개 토양황폐화, 토지황폐화, 세 용어로 정리할 수 있다(Eswaran *et al.*, 2019). 이 세 용어의 개념을 정리함으로써 이 연구에서의 토지황폐화와의 정의가 무엇인지를 규명할 수 있을 것이라 생각한다.

토양황폐화(soil degradation)는 인간의 활동 또는 자연환경의 프로세스에 의해 토양이 물리적, 화학적, 생물학적으로 건강도를 잃어버린 상태, 또는 토양이 건강도를 잃어버림으로써 생태계가 필요한 기능<sup>41)</sup>을 공급하지 못하는 상태를 말한다(Gomiero, 2016). 토지황폐화는 토양황폐화가 확장된 개념으로, 여기서 토지(land)는 토양보다 광범위한 토양, 지형, 식생 등으로 구성된 생태계(ecosystem)를 말한다(Eswaran *et al.*, 2019). 따라서 일반적으로 토양황폐화가 토지황폐화에 포함된다고 할 수 있다. 사막화(desertification)는 기후변화 또는 인간의 영향으로 인해 기존에 사막이 아니었던 토지가 사막으로 변모하는 것을 의미하지만, 최근의 학계 및 국제기구에서는 “건조지에서 발생하는 토지황폐화”로 사막화를 정의한다(Vogt *et al.*, 2011). 1960년대와 1970년대 사헬 지대 사막화와 기근 문제가 주요한 환경문제로 대두되었을 때 주로 “사막화”라는 용어를 사용하였지만, 최근 관련 문제가 건조지에서만 발생하는 것이 아니라는 인식이 확산되면서 점차 토지황폐화라는 용어로 대체되고 있다(Vogt *et al.*, 2011; Eswaran *et al.*, 2019). 이 연구의 대상지역인 북한은 온대 또는 냉대 기후 지역으로 구분되기 때문에, 사막화 용어 사용은 부적절하다. 또한 이 연구는 토양의 성질 자체에 집중하기보다는 토양을 포함한 (사회)생태시스템의 전체성에 집중하는 관점을 가지고 있어, 토양황폐화보다는 보

41) 생명체에 대한 영양공급, 식물의 성장기반 제공 등

다 더 광범위한 범위를 가지고 있다고 할 수 있다.

따라서 이 연구에서 토지황폐화의 정의는 “사회생태시스템이 인간의 행동과 자연환경의 영향으로 건강성과 생산력이 저하된 상태”를 말한다. 다만 이 연구에서도 개념이 광범위한 만큼 토지황폐화는 맥락에 따라 서로 다르게 해석할 수 있다.

첫째, 생태계서비스와 생산성 감소로서의 토지황폐화다. 토지황폐화의 경향과 파급효과에 대해서 다루는 2장과 3장의 내용에서 산림면적의 감소, 식생 양의 감소 또는 식생의 건강성 감소(식생지수의 감소), 토양침식의 증가와 같은 자연환경의 감소가 토지황폐화로 정의된다. 이는 주로 인간의 행동과 자연환경 프로세스의 결과로서의 토지황폐화라 할 수 있다.

둘째, 토지이용 변화로서의 토지황폐화다. 산림개간과 벌채, 토지에 대한 노동력 투입 증대, 토양에 대한 에너지투입(비료, 농기구 등)량의 변화와 같은, 토지생산성 감소를 초래하는 인간의 토지이용 변화 행태 또한 토지황폐화의 정의에 포함한다. 이는 대개 생태계서비스 감소 토지황폐화의 원인으로서의 토지황폐화다.

셋째, 사회생태시스템 구성요소 간의 되먹임 고리로서의 토지황폐화다. 앞서 언급하였듯 토지이용의 변화는 생태계서비스와 생산성을 감소시키지만, 반대로 생산성의 감소는 인간에게 압력으로 작용하여 토지이용의 변화를 추동하는 요인이 된다. 이 연구에서 토지황폐화로 부르는 생태계서비스 감소, 생산성 감소, 토지이용 변화 등을 개별적인 현상으로 지시하는 경우, 각각의 현상이 가지는 사회생태시스템 내부의 관계성과 맥락을 누락하게 된다. 따라서 이 연구에서는 서로 다른 행위자(인간, 자연)와 시점, 원인과 결과에도 불구하고 이를 토지황폐화로 포괄하여 정의하는 것이 타당하다고 판단하였다.

이 연구에서는 토지황폐화 또는 다른 이유로 인한 특정 토지의 농업생산성이 저하하거나 사회시스템 전체의 식량생산의 총량이 저하하는 현상을 “식량생산 감소”라는 용어로 따로 정의하여 규정하였다. 토지황폐화로 인한 식량생산 감소문제는 광범위한 측면에서 토지황폐화의 범주에 토지의 생산성 저하라는 맥락으로 포함되는 경우가 있다. 그러나 토지황폐화와 기근문제를 다루는 연구에서, 토지황폐화는 기근을 일으키는 프로세스로, 식량생산 감소 문제는 이를 나타내는 현상으로 분명하게 구분하는 경우가 일반적이다. 이 연구는 1990년대 북한 대기근을 중심으로 진행하는 만큼 이러한 접근이 타당하다고 보았다.

이러한 식량생산 감소 문제와 토지황폐화 문제 관련 연구에서 사용하는

용어 중 농업생산성(agricultural productivity) 저하 문제 또는 식량안보(food security) 문제라고 정의하는 경우가 많았다. 하지만 농업생산성 용어는 토지황폐화 개념과의 교집합이 많아 개념과 용어 정의에 추가적 혼란을 야기한다고 판단하여 사용하지 않았다. 또한 식량안보의 경우 용어의 특성상<sup>42)</sup> 식량생산 감소의 공급으로서의 측면에 치중된다는 오해를 불러일으킬 수 있다고 판단하였다<sup>43)</sup>. 대신 “식량생산 감소”라는 것이 토지황폐화를 통해 대기근으로 이행하는 북한의 1990년대 이전 상황을 객관적으로 설명할 수 있는 용어라고 판단하였다.

그 외에도 이 연구의 자료로 많이 사용한 토지황폐화의 경향을 확인하는 데 주로 사용한 정규화식생지수(NDVI; Normalized Difference Vegetation Index)의 경우 “식생지수”라고 통칭하였다(부록 1 참조). 토지황폐화가 발생하였거나 발생할 위험성이 높은 지역의 경우 토지황폐화 취약지(hotspot)<sup>44)</sup>라 정의하였다.

---

42) 국제식량정책연구소(IFPRI; International Food Policy Research Institute)와 국제연합 세계식량안보위원회 따르면, 식량안보는 모든 사람들이 언제나 그들의 식량에 대한 선호도와 활동적이고 건강한 삶을 위해 필요한 영양소를 충족할 수 있는 충분하고, 안전하며, 영양가있는 식품을 물리적, 사회적, 경제적으로 공급받는 것을 뜻한다(<https://www.ifpri.org/topic/food-security>).

43) 부수적으로 한국에서 사용하는 안보(安保)라는 용어의 어감을 고려할 필요가 있었다. 한국어에서 안보라는 용어는 “안전보장”의 준말로 국제정치적, 군사적 용어로 사용되는 경우가 많다. 따라서 식량의 증감에 해당 용어를 사용하면, 정치·군사적 이유로 인한 식량수급의 측면에 치중한다고 오해할 소지가 있다. 물론 해당 용어는 이러한 선입관보다 광범위한 용어로 실제 사용되며, 정치·군사적인 식량 수급 변화도 1990년대 북한의 대기근에 연관이 높다. 하지만, 이 연구에서는 방법론적·자료의 한계로 정치적인 부분이 크게 다루어지지 않기 때문에, 해당 오해를 감수하면서까지 이 용어를 사용하기는 적절치 않다고 판단하였다.

44) Hotspot이라는 용어는 다른 지리학 및 사회과학 분야 연구에서는 관심지역 등으로 번역하는 경우가 다수 있는 것으로 알고 있으나, 토지황폐화 연구 등 환경연구에서는 환경이 파괴되었거나 파괴될 위험이 있는 지역, 재해나 재난이 우려되는 지역 등으로 쓰인다(e.g. Le et al., 2012).

### 제 3 절 연구의 구성

이 연구는 서론부터 결론까지 다섯 개의 장으로 구성되어 있다. 서론에서는 연구의 필요성과 목적, 기본적인 정의와 개념에 대해서 다루었으며, 결론에서는 연구목적에 맞게 서론에서 제기한 연구 질문에 답하였다. 연구목적에 따른 세 가지 연구주제에 맞추어 본론의 세 개 장을 구성하였다.

2장에서는 기존 북한 토지황폐화와 식량생산 감소 문제에 대한 기존 연구를 사회생태시스템의 접근방법을 이용하여 재구성함으로써, 기존연구에서의 프로세스 지식 부족과 인식 차이를 극복할 수 있는 방안을 모색하고자 한다. 이를 위해 먼저 사회생태시스템을 구성하는 각 요소에 대한 선행 연구를 고찰하고, 선행연구에서 활용한 자료를 분석하였다. 또한 전역적인 이해를 위해 북한 토지황폐화와 식량생산량 감소 문제에 대한 역사문헌을 중심으로 전역적 접근에 대해서 검토하였다. 이를 바탕으로 토지황폐화와 식량생산량 감소 문제 간의 관계에 대해서 수리적으로, 또는 문헌과 자료에서 나타나는 직관과 은유(metaphor)를 바탕으로 한 개념에 기반하여 사회생태적 관계성을 파악해보고자 하였다.

3장과 4장에서는 2장에서 정리한 북한 토지황폐화와 식량생산량 감소 문제에 대하여 복잡적응계 방법론을 적용하여 사전예방접근을 진행하고자 하였다. 3장은 복잡적응계적 임계전이 현상의 사례인 1990년대 북한 대기근에 대한 조기경보신호(EWS) 확인을 통해, 북한의 토지황폐화와 식량생산량 감소문제에 대해 복잡적응계적으로 고찰(retrospective approach)해보고자 하였다. 조기경보신호 탐지방법 중 측정자료기반 방법을 통해서는 1990년대 북한 대기근에 조기경보신호가 있었는지에 대한 여부를 확인하고자 하였다. 모형기반, 공간자료기반 방법으로는 토지황폐화와 식량생산량 지표들의 구체적인 조기경보신호 발현점을 확인해보고자 하였다. 그리고 이들을 지도화함으로써, 토지황폐화의 취약지를 도출하고자 하였다.

4장에서는 2장에서 정리한 문제를 바탕으로 1990년대 북한 대기근에 대한 다행위자시스템을 구축함으로써, 북한 대기근에 대해서 복잡적응계적으로 재현(prospective approach)하고자 하였다. 이를 위해 북한 농업경관을 대표하는 “가상의 북한 협동농장 모형”을 설계하고, 이를 바탕으로 다행위자시스템 모형을 구축하였으며, 1990년대 북한 대기근을 재현할 수 있도록 조정 및 보정의 과정을 거쳤다. 구축된 1990년대 북한 대기근 재현 모형을 바탕으로, 과거의 현실과 다른 선택을 했다면 어떻게 달라졌을지(what-if)를 파악함으로써, 토지황폐화 문제 예방방안에 대해서 평가하

고자 하였다.

이 세 장의 결과를 통해 결론에서는 세 가지 연구질문에 답하고자 하였으며, 이를 바탕으로 작가는 북한 차원에서, 크게는 한반도 차원에서 토지 황폐화 및 기근 위험 저감을 위한 사전예방원칙을 제시하였다.

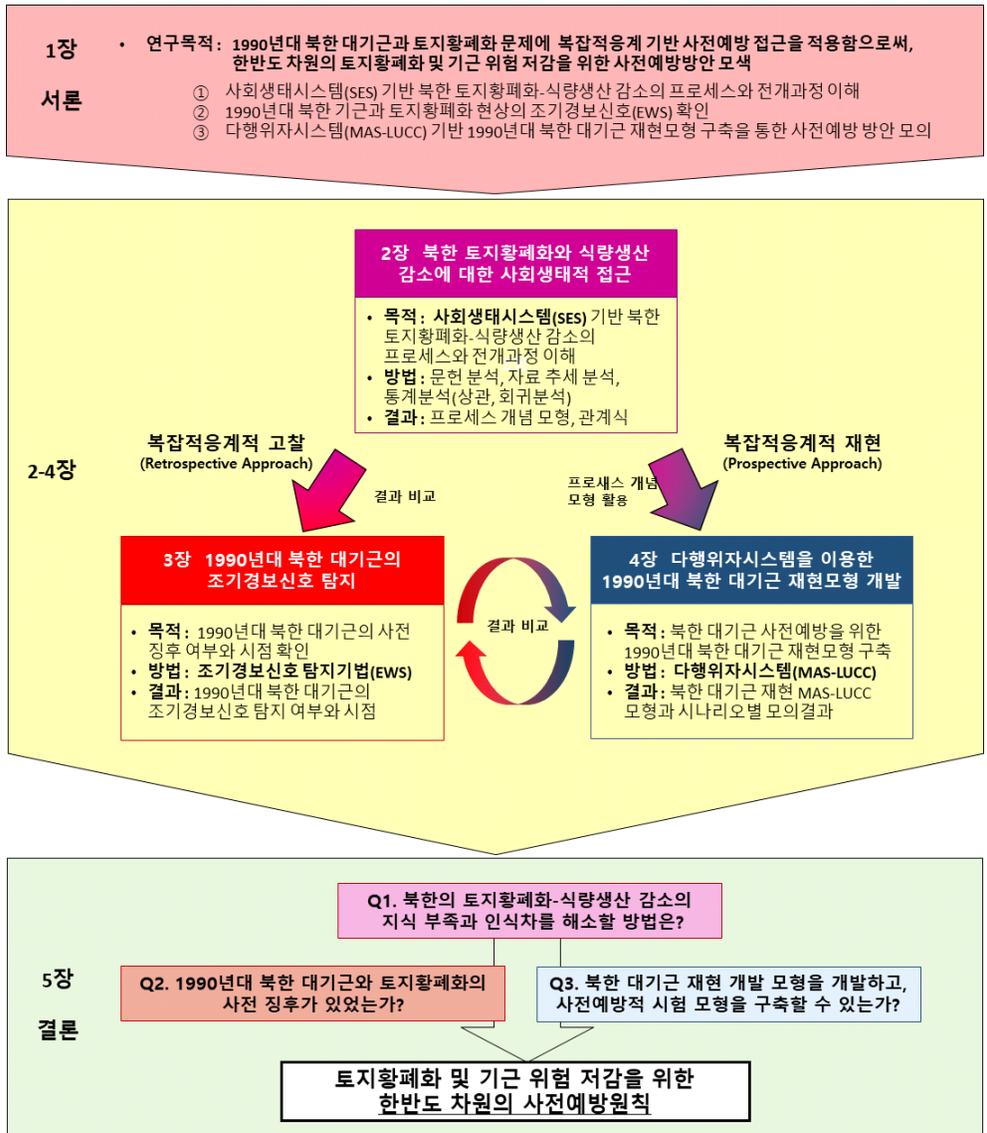


그림 1-7. 연구의 구성 모식도

## 제 2 장 북한 토지황폐화와 식량생산 감소에 대한 사회생태적 접근

서론에서 확인하였던 1990년대 북한 대기근과 토지황폐화 연구의 공통적인 문제 중 가장 핵심적인 부분은 인과관계와 프로세스에 대한 이해 부족과 학제 간 배경과 목적의 차이에 따른 편향과 인식차였다. 특히 북한의 토지황폐화와 식량생산 감소 문제를 다룬 다양한 학제 간 연구들은 토지황폐화에만 집중하거나 식량생산 감소 문제에만 집중하는 등 상당한 인식의 차이가 있었다.

이 연구에서는 학제 간 분절을 해소할 수 있는 북한의 토지황폐화와 식량생산량 감소 문제에 대한 인과관계와 프로세스 연구 방법으로 사회생태시스템 기반 접근을 제안한다. 특히 이 장에서는 복잡적응계 기반 연구 방법을 적용하기 전에 기존 연구성과와 자료를 사회생태시스템의 맥락으로 재구성하고자 한다. 이를 통해 인과관계와 프로세스에 대한 지식 부족을 완화하고 학제 간 인식차를 좁히고자 한다.

이를 위해 이 장에서는 먼저 북한의 토지황폐화 문제(1절)와 북한의 식량생산 감소 문제(2절)에 대해서 기존의 연구성과와 연구자료를 정리하는 형태로 현재의 논의를 정리하고자 한다. 이 결과와 역사자료를 토대로 북한의 토지황폐화와 식량생산량 감소 문제에 대해서 전역적(holistic)으로 이해하고자 한다(3절). 그리고 이를 바탕으로 토지황폐화-식량생산량 관계에 대해서 수식 기반 접근과 거시적 프로세스 접근을 토대로 사회생태적 접근을 보완해나가고자 한다(4절).

## 제 1 절 북한 토지황폐화 현황과 연구경향

이 절에서는 서론에서 소개하였던 북한의 토지황폐화와 식량생산 감소 문제 중 북한의 토지황폐화 연구 경향을 정리하고, 그중 이 연구의 맥락에 맞는 방법을 취사선택하여 북한의 토지황폐화의 경향과 실태를 정리하는 것을 목적으로 한다.

북한의 토지황폐화에 대한 현장조사는 현실적으로 어렵다. 북한 자체적으로 또는 북·중 협력으로 토지황폐화에 관한 연구가 진행된 것으로 보이나 그 결과는 대체로 알 수 없거나 제한적인 경우가 많다.<sup>45)</sup> 따라서, 북한의 토지황폐화 연구는 주로 위성영상 또는 통계자료를 바탕으로 한 연구에 집중되었다. 다만 1970년대까지는 기술의 부족으로 위성정보가 없거나, 비용부담이 과다하거나, 질적으로 낮은 수준인 경우가 많아 북한 정부 또는 국제기구에서 발행한 통계자료에 의존할 수밖에 없었다. 이후 1980년을 전후로 위성영상을 이용한 연구가 가능해졌으며, 1990년대 이후 접근성이 향상됨에 따라 북한 토지황폐화에 관한 위성영상 연구가 활발히 진행되었다. 특히 2000년을 전후로 대한민국 환경부에서 북한을 포함하는 토지피복지도를 10년 단위로 구축하여 배포하고, 미국 지질정보국(USGS)을 중심으로 공개된 위성영상자료가 늘어나면서 북한에 대한 위성영상 기반 연구는 양적·질적으로 풍부해졌다.

북한의 토지황폐화 연구의 상당수는 산림황폐화(forest degradation) 연구다. 우선 한국의 임학(林學) 분과는 북한 연구를 선도하는 분야 중 하나고, 그중 토지황폐화와 가장 가까운 산림파괴와 복원에 관한 연구가 가장 활발하게 이루어지고 있다는 점이 가장 큰 이유일 것이다. 특히 남한은 1980년대 후반 이후 산림녹화의 모범국으로 알려진 반면, 1990년대 이후 북한은 대조적으로 산지개간과 연료목을 위한 산림벌채가 심각한 수준이라는 점도 산림황폐화 연구 편향에 크게 이바지했을 것이다. 다만 임학 이외의 분야에서도 위성영상을 이용한 토지황폐화 연구는 대부분 산림황폐화 연구다. 현장 자료를 구득하기 어려운 상황에서 저해상도 위성영상을 사용하는 경우 작물이 구별되지 않는 등 농업연구에 활용하기 어렵고, 심한 경우 농지와 산지도 구별이 되지 않기 때문이다. 따라서 비교적 변화가

45) 연구지역이 누락되어 있거나, 그 외 핵심적인 정보가 빠져 있는 경우가 많다. 이는 북한이 환경정보, 특히 지리와 공간정보를 일종의 국가기밀로 여기기 때문으로 추정된다. 2000년대 초 남북 농업협력이 활발히 이루어졌을 때 참여자들의 경험에 따르면, 구체적인 환경정보나 지리정보와 관련된 부분은 공개되지 않는 경우가 많았다고 한다.

적은 목본류로 이루어진 산지 연구에 집중될 수밖에 없는 현실적인 이유도 있다.

농지에 대한 토지황폐화 현황을 추정하는 연구가 북한의 식량생산 감소 연구에 가장 좋겠지만, 산림황폐화 연구 또한 북한의 식량생산 감소와 밀접한 연관이 있는 토지황폐화 문제라 할 수 있다. 먼저 산림황폐화는 북한의 식량생산량 저감과 농토의 생산성 저감(농지의 토지황폐화)과 밀접한 연관이 있다. “다락밭, 비탈밭”으로 표현하는 북한의 산지개간 활동은 전형적인 식량부족에 대한 대응이라고 볼 수 있다. 또한 반대로 산림황폐화로 인한 산사태와 토양침식, 토양영양물질의 저하, 농업생태계 구성 생물 서식처파괴 등 다양한 형태로 기존 농지의 토지황폐화에 영향을 주었다. 따라서 산림황폐화 문제는 산림의 토지황폐화 문제일 뿐 아니라 농토의 토지황폐화 문제의 지시자(proxy)라고 할 수 있으며 중요한 연구라 할 수 있다.

북한의 토지황폐화에 관한 여러 가지 자료 중 통계자료를 이용한 연구 성과와 위성영상을 이용한 연구사례를 중심으로 소개한다. 단, 산림황폐화가 내용의 상당 부분을 이루고 있다. 또한 모든 사례를 소개하기보다는, 1990년대 북한 대기근 전후를 담고 있는 연구를 소개하여 뒤이은 분석의 자료로 활용하고자 했다.

# 1. 통계 및 정부발간 자료 중심의 토지황폐화 연구

표 2-1. 북한의 시기별 토지피복 비중 변화 통계자료

피복	시기 및 변화 정도(%)							
	1980s	→	1990s	→	2000s	→	2010s	1980s→2010s
시가지	1.2	△ 0.5	1.7	▽ -0.1	1.6	-	1.6	△ 0.4
농지	17.5	△ 2.2	19.7	△ 5.2	24.9	△ 0.6	25.5	△ 8.0
산림	74.9	▽ -4.4	70.5	▽ -2.1	68.4	▽ -8.9	59.5	▽ -15.4
초지	4.1	△ 1.0	5.1	▽ -2.6	2.5	▽ -2.3	0.2	▽ -3.9
습지	0.4	▽ -0.1	0.3	▽ -0.1	0.2	△ 0.2	0.4	-
나지	0.8	△ 0.7	1.5	▽ -0.5	1	△ 0.3	1.3	△ 0.5
수역	1.2	-	1.2	△ 0.2	1.4	△ 0.1	1.5	△ 0.3

\* 출처 : 명수정 등(2020), 환경부 대분류 토지피복자료의 북한부분(1980-2010년대)

에 대한 정리 내용임

\* 주 : 각 시기 지표는 각 시기 후반을 의미(e.g. 1980s는 1980년대 후반).  
화살표(→)는 각 시기 사이의 비율 변화

토지피복의 변화는 인간에 의한 토지이용의 변화와 자연·생태환경의 변화로 말미암은 토지의 외형적 변화를 나타내는 것으로써, 인간과 자연에 의한 토지황폐화 경향을 즉각적으로 나타내는 지표가 될 수 있다. 대한민국 환경부에서는 북한을 포함한 한반도 전체를 대상으로 1980년대 말부터 약 10년 단위로 토지피복 분류를 진행하고 있다.<sup>46)</sup> 북한에 대한 토지피복 자료 중 상대적으로 고해상도이고 정부기관에서 제공하는 자료이기 때문에<sup>47)</sup>, 토지황폐화를 포함한 북한의 사회생태적 변화를 추적하는데 많이 활용되어 왔다(e.g. 이훈종, 2020).

표 2-1은 환경부 토지피복지도를 활용하여, 북한의 시기별 토지피복 비중의 변화가 어떻게 이루어졌는지를 확인한 자료다. 토지황폐화의 측면에서, 1980년대 후반 이후로 30여년 동안 산림(-15.4%)과 초지(-3.9%)의 감소가 두드러졌음을 확인할 수 있었다. 이는 대체로 농지(+8.0%)로 바뀌었으며, 식량증산에 대한 압력이 토지황폐화와 관련된 토지피복의 변화를 이끌었음을 알 수 있게 해주는 결과다. 특히 대기근 이후인 1990년대 후반에서 2000년대 후반 사이에 농토의 적극적인 증가가 두드러졌음을 확인할

46) Landsat 위성영상을 기반으로 한 토지피복자료로, 소·중·대 분류 토지피복지도로 제공되며, 북한의 경우 대분류에 한해서만 제공된다. 세부내용은 환경부 환경지리정보서비스(<https://egis.me.go.kr>)를 참고하기 바란다.

47) 정부기관의 신뢰도와는 별도로, 자료 구축 방법에서 남한 토지피복은 현지조사를 통한 보정과정인 반면, 북한 자료는 고해상도위성을 통한 제한적 보정에 그치기 때문에 정밀하다고 보기는 어렵다.

수 있다.

이훈종(2020)과 명수정 등(2020)은 해당 토지피복자료를 이용해서 북한의 생태계서비스 가치변화를 확인하였다. 그 결과 중 토지황폐화와 밀접한 연관이 있는 침식조절 기능은 1980년대 대비 2010년대 약 5.5%수준까지 가치가 떨어졌으며<sup>48)</sup> 토양형성의 생태계서비스 가치는 같은 기준으로 약 92.5% 수준으로 떨어졌다<sup>49)</sup>. 전체 생태계서비스의 가치가 같은 시기 약 93.2% 수준으로 감소한 것<sup>50)</sup>으로 볼 때 토지황폐화와 관련된 가치의 감소폭이 큰 편이었다고 할 수 있다.

표 2-2. 문헌으로 확인할 수 있는 북한의 산림면적 변화 경향

연도	산림면적 (km <sup>2</sup> )	자료원*	비고
1910	87,632	조선임적조사자료(배재수, 1997) <sup>a</sup>	1910 조선임야분포도
1942	93,430	1948년 한국은행 조선경제년보(김운근, 1997) <sup>a</sup>	북위 38도 이북
1970	97,726	중국 '조선주요기상대점자료' (김운근, 1997) <sup>ab</sup>	북한발표자료 인용
1978	90,750	북한의 농림축수산업(장원석, 1999) <sup>b</sup>	
1980	94,990	남북한경제사회상 비교(통계청, 1997) <sup>a</sup>	정부
1984	90,320	박경석(2006)	
1986	90,070	한국과학기술단체총연합회(오봉국 외, 1991) <sup>ab</sup>	정부
1987	89,650	FAO 한국협회(김운근, 1997) <sup>ab</sup>	FAO
1987	88,700	북한의 임업, 사회주의 임업(하연, 1993) <sup>ab</sup>	구 동독 발표
1990	81,333	MLEP.DPRK(2012)	Timber Forest
1991	62,980	중국 임업부 북한출장보고서(김운근, 1997) <sup>a</sup>	중국정부
1996	89,060	북한발표자료(State of the Environment, 2003)	북한/UNEP
1996	81,154	MLEP.DPRK(2012)	Timber Forest
1998	75,330	북한발표자료(UNDP/FAO, 1998)	북한/UNEP
2002	75,541	MLEP.DPRK(2012)	Timber Forest
2005	76,432	MLEP.DPRK(2012)	Timber Forest
2010	78,324	SEEA-CCI-LC	FAOSTAT
2015	77,659	SEEA-CCI-LC	FAOSTAT
2018	77,340	SEEA-CCI-LC	FAOSTAT

\* 재인용 출처 : a=박종화(2006), b=박경석(2006)

48) 명수정 등(2020)에 따르면 북한 전체 침식조절의 생태계서비스 가치는 1980년대에 약 24.7백만 USD의 가치에서 2010년대 1.4백만 USD로 하락했다.

49) 상기 문헌에 따르면 북한 전체 토양 형성의 생태계서비스 가치는 1980년대 약 166.1백만 USD의 가치에서 2010년대 153.7백만 USD로 하락했다.

50) 상기 문헌에 따르면 북한 전체 생태계서비스 가치의 총합은 1980년대 약 8,928.2백만 USD의 가치에서 2010년대 8,323.3백만 USD의 가치로 하락했다.

북한 산림면적 통계는 북한 토지황폐화 문제에 대한 유일한 통계자료라 할 수 있다. 다양한 기관에서 논문, 보고서 등의 다양한 형태로 발표된 북한의 산림면적 변화 경향은 박종화(2006)와 박경석(2006)의 글에서 잘 정리된 바 있다. 표 2-1은 이 두 문헌에서 정리한 북한의 산림면적 변화 경향을 정리하고, 최근 북한과 국제기구에서 함께 발간한 문헌(MLEP.DPRK, 2012) 내용을 보강한 북한 산림면적 통계 자료다. 이 자료는 여러 출처에서 인용한 것이기 때문에 시기가 불규칙적이다. 또한, 각 출처마다 산림에 대한 정의가 다소 다른 것으로 보인다(박종화, 2006)<sup>51)</sup>. 따라서 해당 자료의 신뢰도는 높지 않지만, 과거로부터 전체적인 경향을 확인하는 데에는 의미가 있다. 자료의 경향과 뒤이어 다룰 위성영상 등과 교차검증했을 때, 북한의 산림면적은 1970년대에는 90,000km<sup>2</sup> 내외, 1990년대는 많아도 80,000km<sup>2</sup> 전후, 2000년대 이후에는 75,000km<sup>2</sup> 전후로 분명히 감소하는 추세였다.

2005년 이후에 북한의 산림면적 변화에 대한 문헌은 관찰되지 않는다. 2005년 이후로 자료수집이 잘 이루어지지 않는다고 보거나, 신뢰성과 기준의 문제 때문에 북한의 산림면적 변화에 관한 연구가 위성영상을 중심으로 이루어졌기 때문으로 보인다. 유엔식량농업기구(FAO)에서는 북한의 산림면적 통계를 FAOSTAT에 공개하고 있다<sup>52)</sup>. 표 2-2의 하단부에는 이중 일부를 포함하여 보완하도록 하였다. 그러나 위성영상을 이용한 북한의 산림면적 변화는 다양하게 구축된 바 있으며 자세한 내용은 이후에 다루기로 한다.

51) 예를 들어 1991년 중국 임업부 북한출장보고서의 자료가 유사한 시기의 다른 산림면적에 비해 현저하게 낮게 나온 이유가, 북한의 토지 분류 체계에서 보호구역 또는 군사용지 내의 산림을 “특수용지”로 제외하였기 때문이다(박종화, 2006).

52) <http://www.fao.org/faostat/>, 2021년 3월 현재 1992-2018년(SEEA\_CCI\_LC 기준)의 북한 산림면적자료를 공개하고 있음.

표 2-3. 북한의 토지황폐화 연구를 위한 주요 위성영상자료의 특징

구분	촬영 시기	해상도		대표연구	북한 연구에서의 특징	
		공간	시간			
Land-sat	OLI	2013~	30m	16일	이형규·오명관(2018)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 비교적 높은 공간해상도(30m)를 가지고 있으면서, 북한의 토지황폐화 정보와 관련된 다양한 파장대 (가시광선-근적외선) 촬영 가능</li> <li>• 시간해상도가 낮고(16일) 시야가 좁음(180×170km). 북한 전체를 담기 위해서는 적어도 13개의 영상이 필요하고(이승호 등, 1998), 최소 4개 이상의 시차가 발생하며, 구름이 있는 경우에는 더 많은 서로 시차 발생</li> <li>• 따라서, 일, 월, 계절단위 분석이 불가능하며, 특정 시기의 분석이 아닌 연 단위 범위를 설정하여 분석하는 경우가 많음</li> <li>• e.g. 이승호 등(1998)은 1991~1993년로 연구시기를 특정함</li> <li>• 특정 지역에 대한 연구에 활용되는 경우도 있으며 이 경우 위 단점이 다소 상쇄</li> <li>• e.g. Zhang <i>et al.</i>(1997)은 백두산, 이민부 등(2003)은 평안북도에 특정하여 연구 진행</li> </ul>
	TM (ETM+)	1982~	30m	16일	이승호 등(1998)	
	MSS	1972~2013	79m	18일	김상욱(2002)	
MODIS	1999~	250~1km	1일	유재심·김경민(2015)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 시간해상도가 1일 단위(대체로 구름 등을 보정하기 위해 10일 단위 이상으로 합성)로 시계열분석에 용이</li> <li>• SPOT/VEGETATION 및 AVHRR에 비해 공간해상도가 높으며, 이들 대비하여 다양한 파장대를 가지고 있어 식생의 다양한 특성(건강도, 수종 등) 뿐 아니라 기상, 대기특성, 산불 등에 대한 확인이 가능함</li> <li>• 데이터 제공 기관에 따라 다양한 2~3차 자료가 제공됨(식생지수 등)</li> <li>• 때문에, 2000년 이후의 북한 산림지황폐화에 대한 연구는 MODIS가 주를 이루고 있음</li> <li>• 단, 북한의 토지황폐화가 심각했던 1980~1990년대 영상이 없다는 한계가 있음</li> </ul>	
SPOT/VEGETATION	1998-	1.15 km	1일	염종민 등(2010)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 전체적으로 AVHRR의 사양과 유사하며, 식생지수에 특화되어 있음</li> <li>• 공간해상도와 활용능력에서는 MODIS 대비 부족하며, 촬영시기 또한 AVHRR보다 낮아 전체적으로 활용 연구가 저조함</li> </ul>	
AVHRR	1978~	1~4 km	1일	Lv <i>et al.</i> (2019)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• MODIS대비 (시공간)해상도 및 활용능력(파장대)가 떨어지는 문제가 있지만, 1970년대 후반부터 영상을 구득할 수 있다는 장점이 있음</li> <li>• MODIS와 마찬가지로 다양한 2~3차 자료를 구득할 수 있음</li> <li>• 최근에는 MODIS와 상호보완적으로 활용하는 연구가 많음(유재심·김경민, 2015)</li> </ul>	

## 2. 토지황폐화에 대한 위성영상 기반 연구

위성 영상은 가시광선뿐만 아니라, 지표나 식생이 방출하는 적외선 등의 정보를 촬영할 수 있다. 한반도의 기후 특성상 사막과 같은 지표 피복이 완전히 노출된 지역이 거의 없으므로, 토양이나 지질 등의 지표정보를 위성영상으로 파악하기 어렵다. 대신에 토지피복이 어떠한지 그리고 식생이 양적·질적으로 어떻게 변화하느냐를 조사함으로써 토지황폐화의 정도를 양적·질적으로 관찰하고 평가할 수 있다.

다만 위성영상 기술의 한계에 따라 영상의 공간해상도<sup>53)</sup>와 시간해상도<sup>54)</sup>·광학해상도<sup>55)</sup>간의 교환관계(trade-off)를 고려할 필요가 있다(박수진·안유순, 2018). 각 연구의 목적과 위성영상의 한계를 고려하여 위성영상 종류의 선택이 있었다. 대체로 높은 공간해상도가 필요한 연구에는 Landsat TM(MSS, OLI)<sup>56)</sup>를 사용한 경우가 많고, 반대로 전역을 대상으로 하되 정밀한 시간해상도가 필요한 연구는 AVHRR<sup>57)</sup> 또는 MODIS<sup>58)</sup>를 사용해 왔다. 특히 최근에는 MODIS가 가지고 있는 높은 광학해상도를 활용한 연구가 많아지고 있다.

다만 1990년대 북한 대기근에 집중하는 연구는 주로 2000년대 이후 촬영 영상이 대부분인 MODIS나 Landsat OLI와 같은 영상을 활용하기 어

---

53) Spatial Resolution, 지표면을 얼마나 자세하게 또는 선명하게 촬영하였는지를 나타내는 지표를 말한다

54) Temporal Resolution, 한 위치를 얼마나 자주 촬영하는지를 나타내는 지표를 말한다.

55) Spectral Resolution, 지표면을 얼마나 다양한 해상도로 촬영할 수 있는지를 나타내는 지표를 말한다.

56) Landsat 위성은 미국 지질정보국(USGS)의 제안으로 미국 항공우주국(NASA)이 쏘아 올린 원격탐사 위성을 말하며, 1972년 Landsat 1이 임무를 시작한 이래로 2021년 현재 Landsat 7(1999-), 8(2013-)이 활동중이며, Landsat 9가 2021년 중 발사 예정이다(Landsat 6은 발사 실패). 해당 영상이 촬영한 영상은 MSS(Multispectral Scanner System, Landsat 1-5), TM(Thematic Mapper, Landsat 4-5)/ETM+(Enhanced Thematic Mapper Plus, Landsat 7)/OLI(Operational Land Imager, Landsat 8)가 있으며, 세부 정보는 표 2-3 및 출처 링크를 참조하기 바란다.  
(<https://landsat.gsfc.nasa.gov/>).

57) AVHRR(Advanced very-high-resolution radiometer)는 미국 해양대기청(NOAA)의 극궤도임무 환경인공위성(POES: Polar Operational Environmental Satellites)에 주로 탑재된 센서 또는 해당 센서로 촬영한 영상을 말한다. 1978년(TIROS-N) 촬영을 시작한 이래 현재까지 다양한 위성을 통해 촬영중이다(NOAA-6 ~ NOAA-19). 세부 정보는 표 2-2 및 출처 링크를 참조하기 바란다.  
(<https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-advanced-very-high-resolution-radiometer-avhrr>)

58) MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)는 미국 항공우주국(NASA)의 Terra(1999-) Aqua(2002-) 위성에 탑재된 센서 또는 해당 센서로 촬영한 영상을 말한다. 세부 정보는 표 2-3 및 출처 링크를 참조하기 바란다.  
(<https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>)

렵다는 한계가 있다. 대신, 이 연구와 유사한 목적과 시간 범위를 가진 연구들은 공간해상도가 다소 저하되더라도 AVHRR이나 Landsat TM, MSS 등으로 대체하거나 복합 활용하는 경우가 많다(표 2-3).

현실적인 이유 때문에 Landsat보다 공간해상도가 높은 위성영상도 북한 토지황폐화 연구에 사용되는 경우가 많지 않았다<sup>59)</sup>. 고해상도 영상을 북한연구에 활용하기 위해서는 높은 비용<sup>60)</sup>과 많은 시간이 필요하다. 이러한 현실적인 이유로 인하여 고해상도 영상을 이용한 북한의 토지황폐화 연구는 국립산림과학원과 같은 국가기관의 연구에 한정되는 경우가 많았다(e.g. 김경민 등, 2020).

앞서 언급한 내용을 뒷받침하듯 1990년대 대기근 전후 위성영상 기반 북한 토지황폐화 연구의 약 80% 정도는 북한의 산림면적변화 또는 산림의 질적 변화 연구다. 그리고 이 중 대부분은 토지피복 분류방법<sup>61)</sup>을 활용한 산림의 면적변화 연구다. 산림황폐화 면적 산출을 위한 연구 결과에서는 1970년대 이후부터 최근까지의 산림면적의 감소가 공통으로 나타난다. 일부 연구에서는 2010년대 이후 증가하는 경향을 보이기도 한다(김란희 등, 2016, 김경민 등, 2020).

산지의 질적 변화 연구는 공간·시간·광학해상도가 높은 위성영상을 사용하여 산림의 밀도와 건강도가 어떤 형태로 변화하는지, 그리고 어떠한 형태로 산림황폐화가 나타나는지를 확인하는 연구다<sup>62)</sup>. 산지의 질적 변화

---

59) 부수적으로 기술이 충분히 발달하기 전에는 고해상도 위성이 존재하지 않거나 접근성이 나빴기 때문에, 현 시점의 시각으로 고해상도 위성영상이 1980-1990년대에는 사용될 수 없었다는 이유도 클 것이다.

60) 2019년 기준 Rapideye(공간해상도 5m) 국내 구매 총판(주식회사 지오포커스, <http://geofocus.kr>) 문의결과, 구매 비용은 1km당 한화로 1,870원이며, 북한 전역을 대상으로 영상을 수집할 경우 (120,000km<sup>2</sup> 기준), 2.24억원 정도 소요된다. 최소주문면적(4,000km<sup>2</sup>)도 존재하며, 이는 748만원 정도 되는 크기이다. 하나의 시기를 특정해서 연구하지 않으므로, 어떤 범위를 연구하더라도 개인연구자에게는 크게 부담이 되는 규모라 할 수 있다. SPOT(10m) 등도 크게 다르지 않다.

61) 위성영상을 이용한 전통적인 피복분류방법인 감독분류(supervised classification)기법을 사용한 연구(e.g. 이민부 등, 2003a)와 무감독분류(unsupervised classification)를 사용한 연구(e.g. 이동근 등, 2007), 그리고 그 둘을 모두 사용한 연구(e.g. 이승호 등, 1998; 홍석영 등, 2008)가 있다. 이를 위해 필요한 현장연구는 북·중 접경시대 또는 휴전선 답사를 통해 해결하거나(김도형, 2006), Google Earth와 같은 고해상도 공개 영상 활용 등의 대안을 사용하였다(김경민 등, 2020). 최근에는 시간해상도와 광학해상도가 높은 MODIS위성영상을 이용하여, 식생의 종류 등 더 구체적으로 분류하는 분류법(생물계절 의사결정 분지도)을 활용하여 세밀하게 분류하는 기법도 등장하였다(박종화·유재심, 2009; 유재심, 2010). 그 외에도 객체기반분류법(Objective-based Image Analysis)을 사용하는 연구도 있다(Dong et al., 2020).

62) 식생의 성장변화를 통해 이러한 변화를 추출하기 때문에 주로 시간·광학해상도가 높은 MODIS를 사용하는 경우가 많다. 토지피복분류에 대한 여러 분류방법 중 생물계절 의사결정 분지도나 객체기반분류법 등의 방법을 사용한다. 세부적인 것은 이전 각주 내용을 참고하기 바란다.

연구에서는 산지개간 같은 농업적 측면을 확인할 수 있다. 박종화·유재심(2009)와 김경민(2020)에서 확인할 수 있는 관련 내용에 따르면, 1989년 대비 2008년 황폐화된 산지는 약 200,000km<sup>2</sup>에 달한다. 그 중 30%이상이 개간산지(다락밭, 비탈밭)로 확인되었고, 그렇지 않은 지역(무림목지)도 인구밀도가 높을수록 산지훼손지역의 비중이 높았다. 즉 이 연구와 같은 결과는 북한의 산림황폐화가 영농(개간산지) 및 연료목 수요(무림목지)와 밀접한 연관이 있다는 것을 알 수 있게 해 준다(박종화·유재심, 2009; 김경민, 2020).

산림면적과 질적 특성을 반영한 위성영상 활용 북한 토지황폐화 연구 외에도 식생지수를 통한 북한 토지황폐화 연구가 이 시기를 대상으로 이루어져 왔다. 대표적으로 AVHRR GIMMS를 사용한 Lv *et al.*(2019)의 연구를 들 수 있다. 이 연구에서는 남북과 동북아시아 전체의 1982년부터 2015년까지의 식생지수의 경향을 비교하였는데, 동북아시아와 남한의 경우 1998년까지는 식생지수가 증가 추세였고, 그 이후에는 감소 추세였지만, 1998년까지의 북한 식생지수는 분명한 증가 추세를 보이지 않았다. 이는 1990년대 북한의 대기근과 토지황폐화 문제를 나타내는 결과라 할 수 있다. 그 외에도 Fujiwara and Kudoh(2005)는 평양 일대의 1989년부터 2002년 사이의 AVHRR NDVI 경향을 확인하였는데, 그 결과 1994년부터 2000년 사이의 여름철 식생지수가 다른 시기에 비해 75~80%수준으로 저조하였다. 이는 앞선 결과와 마찬가지로 북한이 대기근으로 이행하는 과정에서의 토지황폐화 진행 과정을 보여주는 결과라 할 수 있다. 그 외에도 MODIS등을 통해 일차생산량을 추정함으로써 북한 토지황폐화의 경향을 알 수 있는 연구도 있다(e.g. 도나영 등, 2012).

식생지수를 이용한 북한 토지황폐화 연구는 산림황폐화보다 포괄적인 부분의 토지황폐화 경향을 밝히는 것이기 때문에, 본 연구의 목적과 의도에 가장 부합하는 연구 경향으로 보인다. 실제로 서론에서 언급하였듯 아프리카 지역 등 접근이 어렵거나 광범위한 지역의 토지황폐화 연구에서는 식생지수를 이용한 토지황폐화 경향 파악 연구가 다수 이루어진 바 있다(e.g. Le *et al.*, 2012). 하지만 연구의 개수가 많지 않고, 이 연구에서 확인하고자 하는 1990년대 북한 대기근 전후의 구체적인 경향을 밝히기에는 관련 연구가 다서 부족한다. 최근 연구이자 이 연구와 사용 자료가 유사한 Lv *et al.*(2019)의 방식을 응용하여 1982년에서부터 2015년까지의 식생지수의 구체적인 시·공간적 경향을 확인하여 토지황폐화 시점을 살펴보았다(부록 2). 그 결과 대기근이 발생한 1990년대 초반과 대기근 직후인 2000년의 식생지수의 높고 낮음을 나타내는 지표(연평균 등)는 감소 추세였으

며, 반대로 식생지수의 변동성 지표(연 표준편차, 변동계수 등)는 증가 추세였다(그림 2-1). 식생지수의 활력도가 낮아질수록 토지황폐화에 가까운 상태고, 식생지수의 변동성이 높아질수록 토지황폐화 위험성이 높아진다고 가정한다면, 이는 대기근 직전에 급격한 토지황폐화 현상이 나타났다는 것을 보여주는 결과라 할 수 있다. 이러한 경향은 지수별, 지역별로 거의 동일하며, 관서지방과 해안 일대, 100m이상의 낮은 고도, 경사도가 낮은 지역에서 이러한 경향은 두드러졌다(세부내용 부록 2 참조).

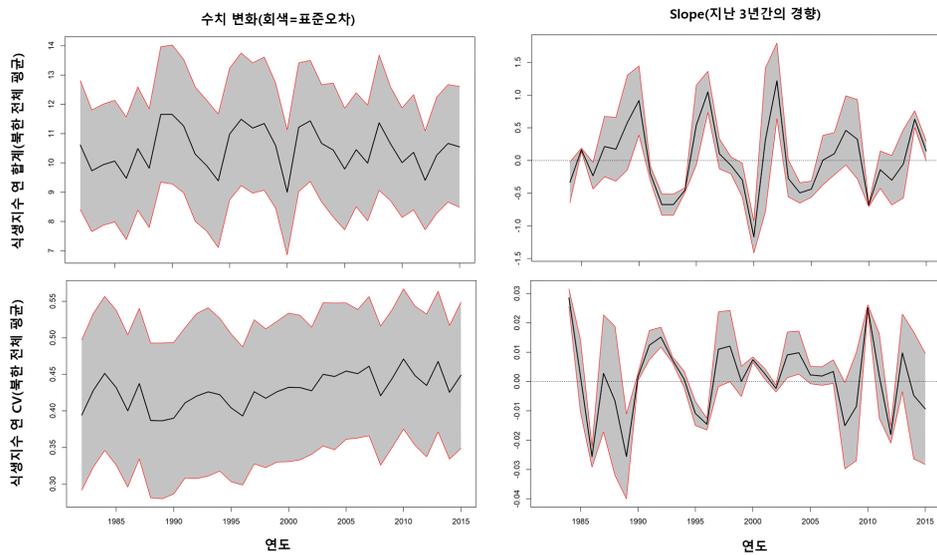


그림 2-1. AVHRR GIMMS 식생지수의 경향 예시 : 식생지수 연 합계와 변동계수(CV)

### 3. 토지황폐화에 대한 연구 종합

표 2-4. 토지황폐화 정보와 연관된 북한 산림면적 변화정보 종합

시기	산림면적(비율) * 단위 : km <sup>2</sup> (%)			
	통계·일반문헌 <sup>a</sup>	환경부 토지피복 <sup>b</sup>	위성영상 연구	
			일반 연구자 <sup>c</sup>	국립산림과학원 <sup>d</sup>
1970년대	95,000(78.8)	-	94,000(78.0)	98,100(81.4)
1980년대	90,000(74.7)	91,726(76.1)	86,000(71.3)	-
1990년대	80,000(66.4)	86,428(71.7)	84,000(69.7)- 85,000(70.5)	75,340(62.5)
2000년대	75,000(62.2)	86,316(71.6)	61,000(50.6)- 83,000(68.6)	61,550(51.1)
2010년대	-	-	66,000(54.8)- 79,000(65.5)	67,670(56.1)

\* 자료설명

a : 표 2-2 의 내용을 개략적인 수치로 요약

b : 이훈중(2020)의 연구에서 제시

c : 2장 2절의 내용 중 각 시기에 해당하는 연구들에서 제시한 범위를 기입,  
관련 연구 중 1970-80년대는 연구가 하나로 하나만 기입

d : 김경민 등(2020)

표 2-4는 북한 산림면적 변화에 관한 문헌연구, 위성영상 연구와 환경부 토지피복 결과를 정리한 것이다. 출처별로 조사방식, 산림의 정의, 대체로 1970~1990년대까지는 유사한 경향을 띄지만, 2000-2010년대는 산림면적에 대한 추정치가 60,000- 80,000km<sup>2</sup>으로 다양하다. 특히 2000년대 까지 산림면적이 감소하였다는 것은 대부분의 연구와 자료들이 가지고 있는 공통 인식이다. 그러나 2010년대 이후에 산림면적에 대해서는 산림면적의 감소가 반전되어 상승하였다는 연구와(김란희 등, 2016, 김경민 등, 2020), 감소 추세가 이어진다고 하는 연구가 있다. 일부 연구에서는 2000년대 이후로 질적 산림황폐화가 오히려 악화되었을 것으로 추정하는 연구 또한 존재한다(박종화·유재심,2009; 유재심, 2010). 향후 몇 년 간의 연구 누적을 통해 부족한 부분이 보완될 것이라 본다.

산림면적 이외에도 식생지수 등 북한의 생·물리적 토지황폐화의 거시적인 부분을 나타내는 지표에서도 특징이 나타났다. 환경부에 따르면 1980

년에서 최근까지 15퍼센트 이상의 산림이 파괴되었으며, 이 중 상당부분은 농지로 변화하였다. 이로써 북한의 대기근이 발생한 1990년대에는 식생지수가 70%수준이었음을 확인하였으며, 동아시아 전체적으로 상승하는 추세를 북한은 분명히 보이지 않는다는 결과를 확인할 수 있었다.

식생지수에 대한 구체적인 확인 결과(부록 2, 그림 2-1) 1990년대 초반과 2000년 전후의 시점에서 공통적으로 식생지수가 급격하게 감소하고, 변동성이 급격하게 늘어나는 경향이 관찰되었다. 이는 평양을 중심으로 한 관서지방에서, 그 외에는 해안지역에서 주로 관찰되었다.

결론적으로 북한의 산림면적 변화로 북한의 생·물리적 토지황폐화의 경향을 확인하는 연구는 충분히 진행되었으며, 연구 방법이나 결과가 충분히 정형화되어 있고, 특히 환경부와 국립산림과학원, FAO 등을 중심으로 꾸준히 이루어지고 있는 것을 확인할 수 있었다. 최근 지표에서 다소 편차가 보이지만 각 기관의 연구를 중심으로 한 연구가 기준이 될 수 있다고 본다. 그러나 산림황폐화가 아닌 농지의 토지황폐화 문제나, 이를 포괄하는 광범위한 토지황폐화 문제에 관한 연구는 미진한 것으로 보인다. 현재 식생지수 연구가 이에 대한 대안으로 제시될 수 있지만, 추가적인 보완과 검토가 필요할 것으로 보인다.

## 제 2 절 북한의 식량생산 감소경향과 관련 연구동향

이 절에서는 북한의 식량문제 감소 문제와 관련된 자료들의 경향을 문헌 및 통계자료를 통해 검토하고, 이를 북한의 토지황폐화 현황자료와 비교해 봄으로써, 1990년대 북한 대기근과 관련된 식량생산 감소문제와 토지황폐화 문제와 관련된 여러 요인을 파악하고 이들의 관계성을 검토할 수 있는 기초자료로 변환하고자 한다.

북한의 식량생산은 토지황폐화 문제를 포함하여 여러 가지 요인에 따라 변화해 왔을 것으로 추정된다. 반대로 북한의 식량생산량의 변화는 토지황폐화 문제를 포함한 북한의 사회생태시스템에 변화를 초래하였으리라 생각한다. 하지만 이를 전체적으로 연결하는 연구는 서론에서 언급하였듯 부족한 실정이었다.

1990년대 북한의 대기근에 관한 연구는 주원인을 무엇으로 보나<sup>63)</sup>에 따라 사회경제 중심의 연구와 자연환경 중심의 연구로 나눌 수 있다. 사회경제 중심 연구는 주로 (농업)경제학과 정치·사회학을 중심으로 한 북한의 식량생산량 또는 공급량 감소에 관한 연구이다. 사회경제 중심 연구는 시장 중심 연구와 농업 중심 연구로 나눌 수 있다<sup>64)</sup>. 시장 중심 연구에서는 1990년대 북한 대기근의 주요한 원인으로 주로 배급제 문제와 시장화 미흡, 국제무역의 문제 등으로 인한 공급의 실패를 주요한 원인으로 보는 연구가 주를 이룬다(김연철, 1997; 이석, 2004a; 정광민, 2005)<sup>65)</sup>. 농업 중심 연구는 공급의 실패보다는 생산량 감소에 대해서 주로 다루며, 협동농장

---

63) 서론에서 언급한대로 이 연구는 사회생태시스템과 복잡적응계를 이용하여 토지황폐화를 중심으로 북한 대기근을 전체적으로 접근(holistic approach)하고자 한다. 따라서 어떤 것이 원인이고 결과인지, 어떤 것이 더 중요한지에 대한 논의는 이 연구에서 다루어 지지 않는다. 이 절에서는 토지황폐화를 제외한 각 지표에서 보이는 대기근과 식량생산 저하의 원인을 개략적으로 다루며, 서론과 본 장 3절에 본 접근과 대기근의 전체적인 요인에 대해 개략적으로 정리하였다.

64) 문경연 등(2015)에 구분하면 북한 기근 연구는 식량획득량 감소(Food Entitlement Decline, FED)연구와 식량 가용량 감소(Food Availability Decline, FAD)연구로 나뉜다. 그러나 일반적으로 사용하는 해당 구분 방법을 택하지 않은 이유는 해당 기준이 틀렸다고 생각하기 때문이 아니라, 연구의 범위와 맞지 않아서다. 이 연구는 북한의 대기근과 토지황폐화의 관계에 집중하고 있는 연구로 FAD를 전제하는 연구다. 결국 일부 FED 인용 문헌과 연구에 도입된 FED적 요소(협동농장 체제, 농업분배 체제 등)를 제외하고는 이 연구 전체가 FAD에 해당하기 때문이다. 또한, 이 연구는 농업경제학 중심이 아닌 사회-자연과학을 포괄하는 북한 기근 연구를 지향하기 때문에 농업경제학에 기반을 둔 이 구분법을 적용할 수 없었다. 따라서 크게 자연환경과 사회경제 중심으로 북한 기근에 대한 원인으로 나누고, 사회경제 중심 연구 중 FED에 해당하는 것을 “시장 중심 연구”로 정의하고, 나머지를 연구자의 기준에 따라 분류하였다.

65) 문경연 등(2015)이 말하는 식량획득량 감소(FED)연구를 뜻한다.

등 농업시스템의 실패(김영훈 등, 2001; 남성욱, 2016), 투입요소(비료, 농약, 연료 등)의 생산 또는 공급의 부족(김영훈·지인배, 2006b), 기계화와 수리시설의 열악함(부경생, 2001; 김영훈·지인배, 2006b) 등의 생산성의 저감을 이끌어낸 사회경제적인 요인에 집중한다.

자연환경 중심 연구의 경우 앞선 여러 가지 이유의 결과로서 토지와 토양의 생산성 감소문제, 즉 토지황폐화와 식량생산과의 관계에 대해서 집중한다. 다만 다른 지역의 토지황폐화-식량생산량 연구와 같은 현장 관찰은 불가능하기위성영상을 통한 관찰에 주력하고 있다. 특히 국립농업과학원을 중심으로 토지황폐화 정도를 나타내는(proxy) 위성영상과 식량생산량 자료와의 비교를 통해 식량생산량을 추정하는 연구가 다수 진행되었다(e.g. 홍석영 등, 2015).

이 절에서는 1990년대 북한의 대기근과 관련하여, 북한의 식량생산 변화에 대한 경향을 관련 통계를 우선 정리하고, 통계에 부합하는 사회경제 중심 문헌을 일부 인용하는 형태로 정리하고자 한다. 사용한 자료 목록은 표 2-5와 같다. 그리고 이 절의 후반부에는 위 자료들을 이용한 북한의 식량생산 변화와 관련 지표 간의 관계성을 통한 인과관계를 모색하고자 했던 연구 경향을 정리하고자 한다.

표 2-5. 북한 식량생산량 및 식량생산에 미치는 요인 관련 자료 목록

자료 구분	자료세목	출처	가용기간	공간 자료?	관련 요인	비고
기후자료	평균기온, 최고기온, 최저기온, 강수량	기상청, 중국 기상청	1973-2019	○	기후 취약성, 기후변화	총 21개 지점, 중국, 남한 자료 이용 보간(Kriging), 가공방법 부록 1 참조
식량생산과 소비 관련자료	식량생산량(톤), 식량수입/수출량(톤), 곡물당 생산량(톤), 경작면적(전체/곡물당), 단 위면적당 식량생산량(Kg/ha)	FAOSTAT, 농촌진흥청, Wordbank	1961-2018	X	식량생산량의 변화	세부내용 부록 1 참조
에너지 관련자료	재생에너지생산량(QuadBTU), 총에너지소비량(QuadBTU), 석탄소비량(QuadBTU), 석유소비량(QuadBTU), 재생에너지소비량(QuadBTU), 발전용량(10억kwh), 전기소비량(10억kwh), 1인당 에너지 강도(백만BTU)	USEIA	1980-2014	X	대외 관계, 에너지 수입	세부내용 부록 1 참조
	화석연료 에너지 소비비율(%)	Worldbank	1971-2013			
인구 및 기타 관련자료	총인구(명), 인구 중 여성의 비율(%), 인구 중 남성의 비율(%), 농어촌 인구비율(%), 도시 인구비율(%), 총 연령 부양비, 노인 부양비, 유·청소년 부양비, 인구밀도(sqkm), 인구성장률(%), 기대 수명(세), 여성 1인당 출산율, 1000명당 합계출산율, 1000명당 합계사망률, 무기수입량,	Worldbank	1960-2018 2010	X	인간시스템 관련	세부내용 부록 1 참조

## 1. 통계·문헌기반 북한의 식량생산 경향

그림 2-2에서 확인할 수 있듯, 북한의 식량생산량 통계는 북한 자체 발표자료, 남한 정부 통계자료(통계청, 농촌진흥청 생산), 유엔식량농업기구(FAO)자료 등 다양한 자료가 있다. 이들 자료의 유사한 부분은 식량 생산량이 1990년대 중반 급격하게 떨어져 1995~1996년과 2000년에는 인구 대비 최소필요량 이하 수준이라는 점, 그리고 대기근이 발생한 1990년대 중반에는 수입량을 합산해도 최소필요량 이하였다는 점이다. 1996년의 통계를 계산해 보면, FAO 생산량 통계 기준 142만톤의 곡물이 부족한 실정이었으며, 수입량까지 합쳐도 32만톤 가량이 부족한 실정이었다<sup>66)</sup>. 김영훈·지인배(2006a)가 계산하는 방식대로 곡물의 비농업적 이용이나 손실까지 고려하는 최소필요량(인구계산 대비 130%)을 고려하면, 빠르면 1980년대 초반(남한 통계자료 기준) 다른 자료에서는 1990년대 중반 이후로 북한의 가용 곡물량(생산량+수입량)은 늘 모자란 상태였다고 할 수 있다.

단, 1990년대 북한 대기근 이전 북한 식량 추정치에는 다소 차이가 있다. 이는 북한의 대기근의 징후가 언제부터 있었는지를 알 수 있다는 점에서 중요한 부분이다. FAO 통계에서는 1960년대 후반-1970년대 초반에 급격한 증가 이후 1980년대 초까지 완만히 상승하는 모습을 보이다가, 1980년대 초 다소 정체하고, 1990년대 초반 급격하게 생산량이 증가하는 형태의 경향을 보인다. 반면 한국 정부의 북한 식량생산 추정치는 1960년대 이후 지속적으로 연간 500만 톤 내외로 정체하고 있다고 보고 있으며, 1990년대 대기근 발생시 절반 수준인 200~300만 톤 정도의 감산이 발생하였다고 보고 있다. 반면, 이석(2004a)이 수집한 북한 당국의 식량생산 통계의 경우 FAO와는 달리 1970년대 초에 급격하게 증가해서, 1980년대 중반에 정점을 이루며, 1990년대에 이르러서는 감소 추세로 FAO의 통계를 만난 후에는 이를 따른다. 대기근 전 세 통계 모두 차이가 있지만, FAO와 북한 자체 통계 경향이 유사하기 때문에 서로 영향을 받았을 것이라 볼 수 있다.

---

66) 김영훈·지인배(2006a)에 따라 1인 1일 50g 기준에 따르면 약 780만명분의 식량생산 부족이 있었으며, 수입량까지 고려하면 170만~180만명분의 식량이 부족했다고 생각할 수 있다.

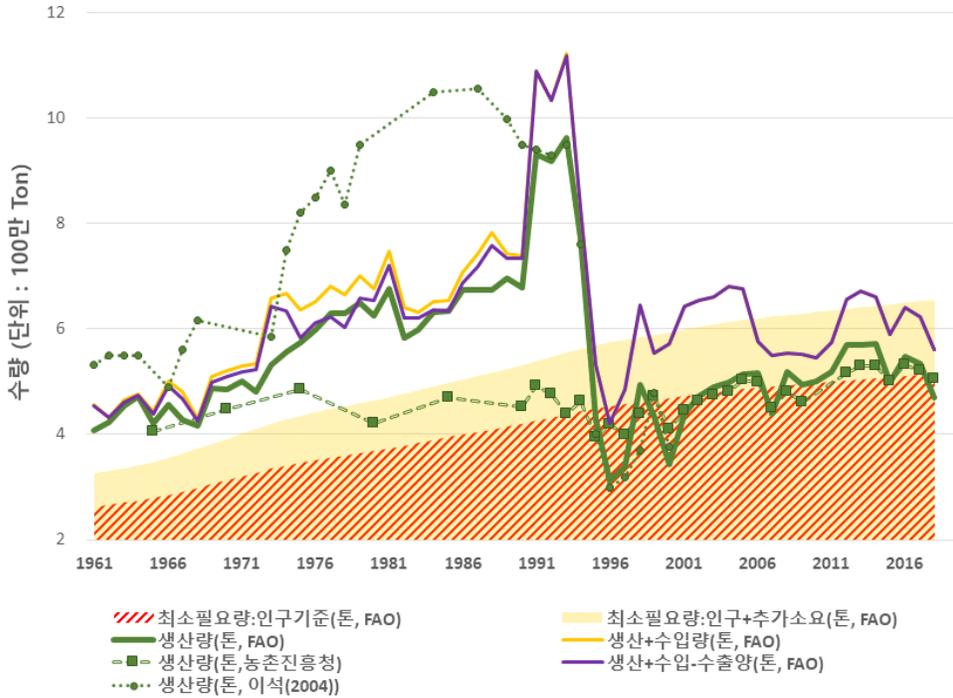


그림 2-2. 1961년 이후 북한의 곡물생산 및 공급 통계

\* 주

- 최소 식량 필요량은 김영훈·지인배(2006a)에 따라 1인 1일 50g으로 설정하고, 북한의 인구를 이용하여 연간 필요 곡물량을 계산하는 형태로 산출, 추가소요량의 경우 위 논문에 따라 식용의 30% 추가 가산
- 이석(2004a)의 북한 발표 통계자료는 북한의 연감, 신년사, 방송 자료를 수집해 모아 놓은 것으로, 2000년 이후 자료는 존재하지 않으나, 1995년 이후 자료가 FAO 통계자료와 일치하기 때문에 그 이후는 이의 연장선상으로 해석 가능

북한의 식량생산 통계 중 어떤 자료가 신뢰도가 높은지는 다양한 시각이 존재한다. 이석(2004a)에 의하면 1994년 이전의 북한의 식량생산 통계에는 체제선전을 위한 일정한 과장이 존재한다고 보기 때문에 이석(2004a)이 인용한 통계와 이 영향을 받은 FAO의 1994년 이전 통계의 신뢰성은 의심스럽다고 볼 수 있다<sup>67)</sup>. 그러나 이석(2004a)은 인터뷰 결과나

67) 1994년 이후 통계는 북한이 식량지원이 필요해짐에 따라 과장이 필요치 않아졌다는 점과 이후 식량지원 관련 국제기구(FAO)의 현장조사 때문에, 협동농장으로 정해진 배급

그 외 자료를 토대로 하였을 때 북한의 총곡물생산량이 해방 후 계속 증가하는 추세였다는 점 그리고 1980년대 후반~1990년대 초반이 그 정점이었다는 것이 확인된다고 하였기 때문에, 농촌진흥청의 1990년대 통계 또한 신뢰하기 어렵다고 보았다. 따라서 전체적인 추세는 북한 또는 FAO가 발표한 내용을 따르되, 절대량은 과장되었다고 생각해야 할 것이다. 따라서 북한의 1980년대 이후로 생산능력이 인구대비 부족했다는 주장은 다소 근거가 미약하다고 볼 수 있다.

그림 2-3은 FAO에서 발표한 북한의 주요곡물생산량 통계를 그래프로 나타낸 것이다. 북한의 주 곡물인 쌀과 옥수수의 생산량은 그림 2-2의 추세를 따라가는 경향을 보인다. 특히 옥수수는 1990년대 초반까지 꾸준히 소출량이 증가하여, 1980년대에는 쌀을 제치고 가장 주종인 곡물의 위치를 점하였다. 이는 옥수수 재배를 강조한 “주체농법”에 힘입은 바가 크다. 대기근 이후 옥수수 수확은 급격하게 감소하였고, 감자가 주된 곡물 중 하나로 자리를 잡았음을 확인할 수 있다. 이는 옥수수 중심의 농업체계가 대기근과 토양침식을 유발하였다는 반성에서 기인하였다고 볼 수 있다(남성욱, 2016). 보리와 밀의 경우 생산량에 거의 영향을 못 미치는 결과가 도출된다.

그림 2-4는 1961년 이후 북한의 곡물수출입 통계자료다. 당연하게도 1990년대 이후 북한의 곡물수출은 거의 없으며, 곡물상황에 특별한 영향을 끼치지 못한 것으로 보인다. 대기근 이전의 곡물수입량은 많아도 100만톤 내외 수준이었다가, 대기근 이후 최대 200만톤 이상까지 곡물수입이 있었다. 단, 곡물수입량은 식량생산이 감소하였을 때 이에 동조해서 증가하는 것으로 보이며, 1990년대 초반에 150만톤 내외로 증가하는 현상이 관찰된다. 따라서 수입량의 변화는 큰 영향을 미치지 못한 것이라 볼 수 있다.

---

만을 받게 된 1960년대 이전에는 소출량 통계가 곧 세금으로 연결되어 소출량 과장이 사회불만 요인으로 작용한다는 점에서 비교적 신뢰할만한 통계라고 한다.

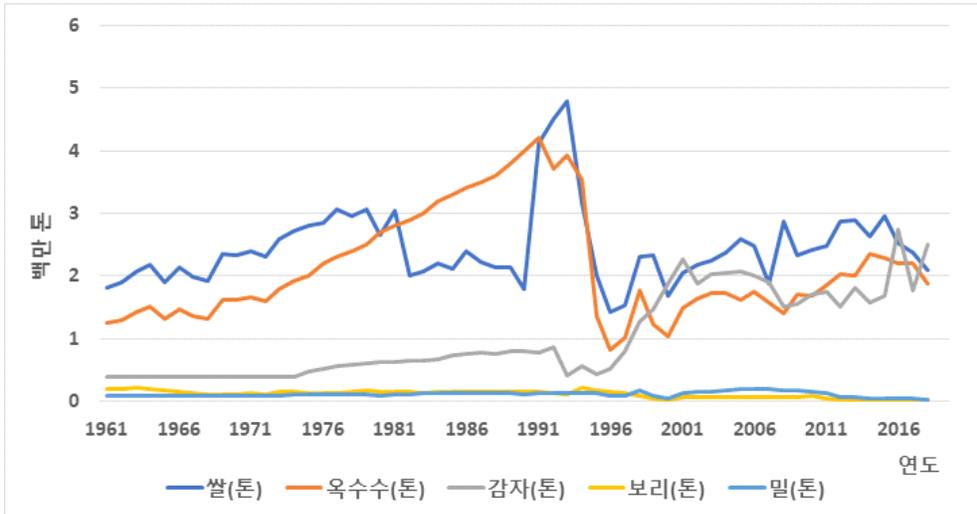


그림 2-3. 1961년 이후 북한의 주요곡물생산량 통계

\* 출처 : FAOSTAT

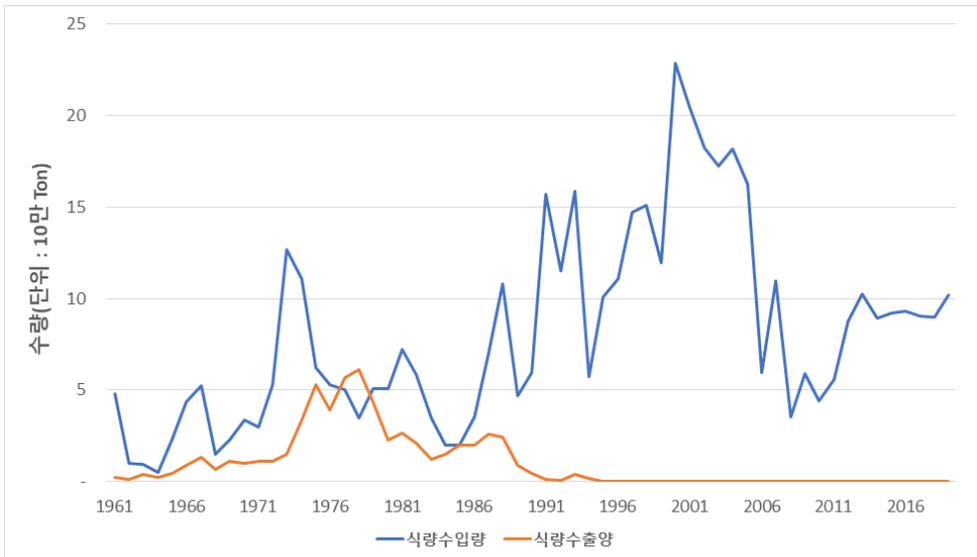


그림 2-4. 1961년 이후 북한의 곡물수출입 통계

\* 출처 : FAOSTAT

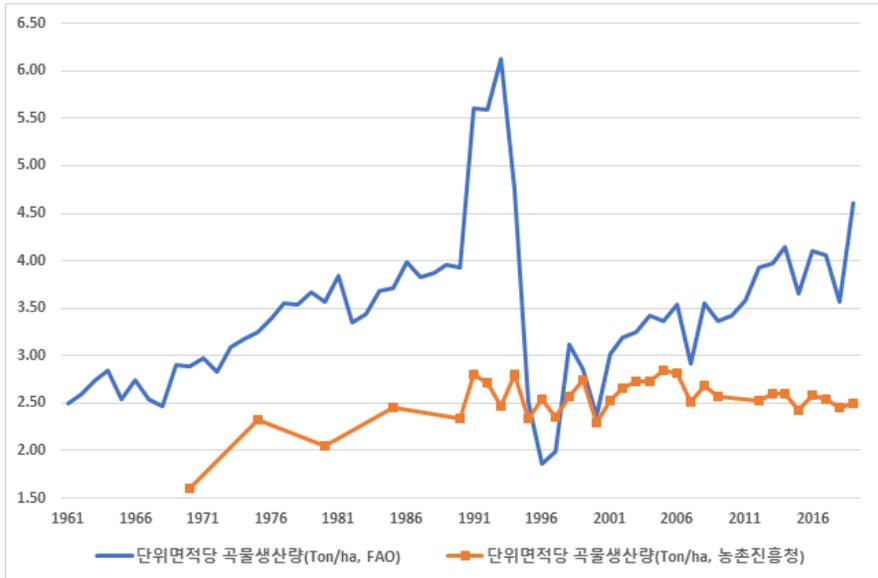


그림 2-5. 단위면적당 곡물생산량

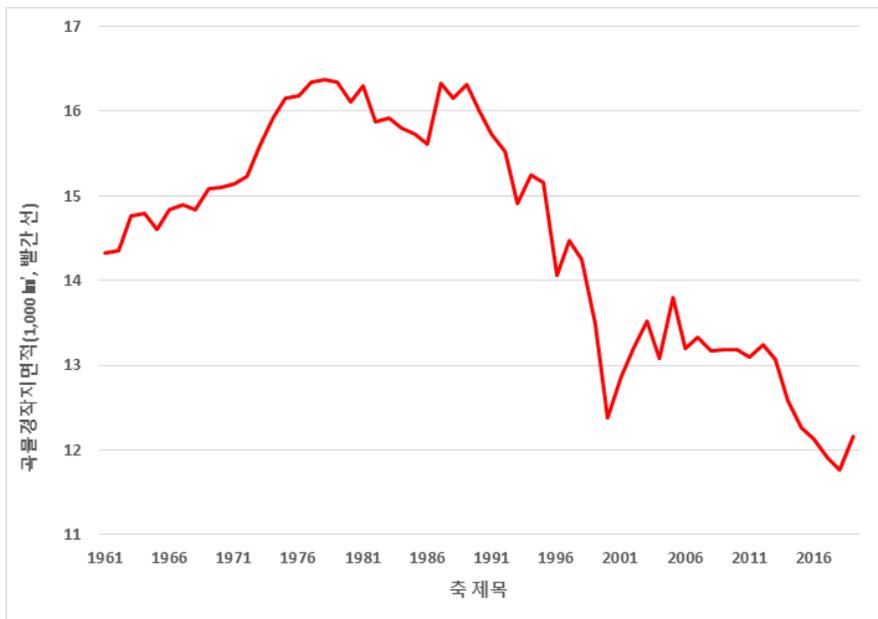


그림 2-6. 곡물경작지면적의 변화

\* 출처 : FAOSTAT

그림 2-5에서 볼 수 있듯이 북한의 식량생산의 감소는 단위면적당 곡물 생산량의 감소가 주된 원인이라 볼 수 있다. 1991년-1993년의 과장으로 보이는 부분을 제외하더라도, 북한의 1980년대 후반 단위면적당 곡물의 생산성은 1960-1970년대보다 1.5-2배 성장하였다. 그러나, 1990년대 이후로 급격하게 감소(FAO) 또는 정체(농촌진흥청)하여 현재에 이르고 있다.

절대적인 곡물경작지 면적의 변화 또한 식량생산 감소의 표면적인 원인으로 작용할 수 있다(그림 2-6). FAO에 통계에 따르면 북한의 전체 경작지면적은 1970년대~1990년대 초에 16,000km<sup>2</sup>로 정점에 도달하였으며, 그 이후에는 1/3가량 감소하였다고 언급한다. 1970년대까지의 경작지의 증가는, 앞서 역사적 변화를 언급할 때 문헌에서 확인하였던 다락밭 또는 간척으로 인한 경작지 증가가 반영되어 있다. 반면, 그 이후에 증가하지 못했고 감소 추세로 반전한 이유는, 개간할 만한 좋은 토지를 더 찾지 못했거나, 아니면 개간토지의 환경파괴 문제를 사전 인식하고 이를 회피하려 했던 시도로 추정된다. 추가적으로는 기존 농지가 도시개발 등으로 활용되었거나, 농지의 기능을 잃을만큼 생산성과 토질이 악화되었다고 해석할 수도 있다.

결과적으로 통계자료로는 북한의 식량생산량과 생산성은 빠르면 1970년대, 늦어도 1990년대 초반에는 정점에 도달하였고, 그 이후에는 감소하는 경향을 보였다는 결론에 도달할 수 있다. 곡물수입과 수출은 수급에 큰 영향을 끼치지 않은 것으로 보이며, 대기근 전후로 옥수수과 감자의 중요도가 변화하는 것을 확인할 수 있었다. 자료별로 특성과 신뢰도가 달라, 정확히 어떤 시점에서 어떤 추세 전환이 나타났다고 이야기하기는 어렵다. 다만 이석(2004a)의 북한의 배급제 관련 연구가 주요한 실마리로 작용할 수 있을 것으로 보인다. 이석(2004a)은 북한의 배급제 관련 통계와 인터뷰를 바탕으로, 대기근 이전 북한의 배급이 1973년, 1982~82년, 1986년 세 차례에 크게 조정되었음을 확인하였다. 이는 해당시기에 북한이 식량배급에 충당할 만한 식량이 부족하였음을 나타내며, 쌀의 소출량이 정체하거나(1973년) 급격히 줄어들던(1982~1983년), 경지면적이 급격하게 줄어들던(1986년) 시기와 대체로 일치한다. 그러나 북한의 식량생산 통계는 그 시기에 큰 변화가 없었는데, 이는 동일 논문에서 해당 시기 북한이 산업용·사료용 곡물의 수요가 증대하고, 식량부족의 상황을 통해서도 식량을 수출

하여 더 식량을 확보하고자 하는 무역 상황에서 비롯되었다는 해석이 존재한다. 결과적으로 1970년대 이후 북한의 식량공급 현황은 1970년대부터 불안정성이 나타났으며, 1980년대 이후 불안정성이 강화되었다고 해석할 수 있다.

1990년대 북한 대기근이 생산의 실패가 아닌 공급의 실패라는 인식이 존재한다(정광민, 2005). 이는 해당 문헌의 저자가 설명하듯 대기근의 피해가 지역별 차이가 막심했다는 부분 등 미시적인 부분을 설명하는 데에는 유용한 부분으로 보이고, 북한이 가지고 있는 여러 가지 본질적인 문제들을 지적하는데 유용한 틀로 보인다. 그러나, 현재까지의 북한 농업과 식량 관련 통계를 종합했을 때, 특히 수입량(그림 2-4), 단위면적당 곡물생산량(그림 2-5), 곡물경작지면적(그림 2-6)을 보았을 때 북한 대기근은 공급의 실패보다는 생산의 실패로 인한 문제임이 분명하다고 판단할 수 있다. 그 원인은 토지황폐화와 밀접한 연관이 있을 것이라 추정할 수 있다.

## 2. 식량생산의 변화 원인과 파급효과에 관한 통계와 문헌

1990년대 북한의 대기근과 식량생산의 변화는 토지황폐화 이외에도 수많은 요인에 영향을 받았을 것이다. 그리고 토지를 포함한 많은 요소에 영향을 주었을 것으로 보인다. 그 원인은 토지황폐화와 밀접한 연관이 있을 것으로 추정할 수 있다. 식량생산에 따른 파급효과, 특히 북한의 대기근과 관련된 파급효과에 대한 자료들을 우선 소개하고, 사회경제적인 원인과 토지황폐화 문제를 제외한 자연환경 문제, 즉 기후에 대해서 소개하는 형태로 진행하고자 한다.

### 1) 농업생산량의 파급효과(기근)와 관련된 통계와 문헌

북한의 식량생산 감소로 인한 1990년대 대기근이 어떠한 결과를 초래하였는지 대한 다양한 연구가 존재한다. 많은 연구와 문헌에서 1995-2000년에 이르는 기간 중 기근사망자를 60-300만 명가량으로 추정한다(Natsios, 1999; 이석, 2004b). 세계은행(Worldbank) 통계에 따르면, 북한의 사망률은 대기근을 전후로 해서 급격하게 증가하였으며(그림 2-7, 이는 평균수명을 약 5세 정도 감소시킬 정도로 강력한 것이었다(그림 2-8).

그러나, 인구 측면에서 1990년대 대기근은 300만 명의 인구 감소를 일으켰다고 하는 극단적인 인식과는 달라 보인다. 이석(2004b)은 북한의 대기근이 초기 전문가들의 인식과는 달리 연평균 초과 사망자수는 연 3.6-16.7만명 정도이며, 25-117만명으로 확인되는 사망자 추계 또한 1990년대 후반~2000년대 초반의 긴 시기에 걸쳐서 발생한 것으로 추정한다. 실제로 북한의 인구는 1990년대에 감소하지 않았던 것이 통계로 나타난다(그림 2-9). 즉 다시 말해서, 당시의 사망자수가 급격하게 증가한 것은 사실이지만, 그 범위가 인구증가율을 초과하지는 않은 상태였다는 것이 통계에서 나타난다. 그리고 사망률이나 평균수명도 의료기술 등의 발달이 미흡했던 1960년대 수준까지 떨어지지 않는 것이다.

다만, 이는 북한이 완전한 붕괴에 이를 만큼은 아니었다는 것이며, 실제 사회 전반에 걸쳐서 큰 영향을 초래하였을 것으로 보인다. 서론에서 언급

하였듯 대기근 시 성장기를 보낸 현재의 북한의 20-30대는 평균신장이 동아시아 평균보다 거의 20cm이상 작은 등 여러 가지 영양학적인 문제가 있으며, 그 이외에도 많은 부분에서 여러 가지 문제와 후유증이 남아있는 것이 현실이다. 가장 심각한 것은 대기근 이후, 북한은 사회시스템의 많은 부분이 과거로 돌아가지 못하고 있다. 북한의 구 체제에는 배급 체제, 계획 경제 중심의 경제 체제 등 북한의 발전을 저해하는 부분이 있는 반면에, 북한의 사회경제체제를 안정적으로 유지하는 부분 또한 있었지만, 이 부분에 대한 항상성이 떨어졌다고 볼 수 있다. 예를 들어 북한의 사망률은 대기근 이후에도 1980~1990년대 초의 수준으로 바뀌지 않았는데, 이는 보건의료시스템이 그 이전으로 회복되지 못했다는 것을 의미한다.

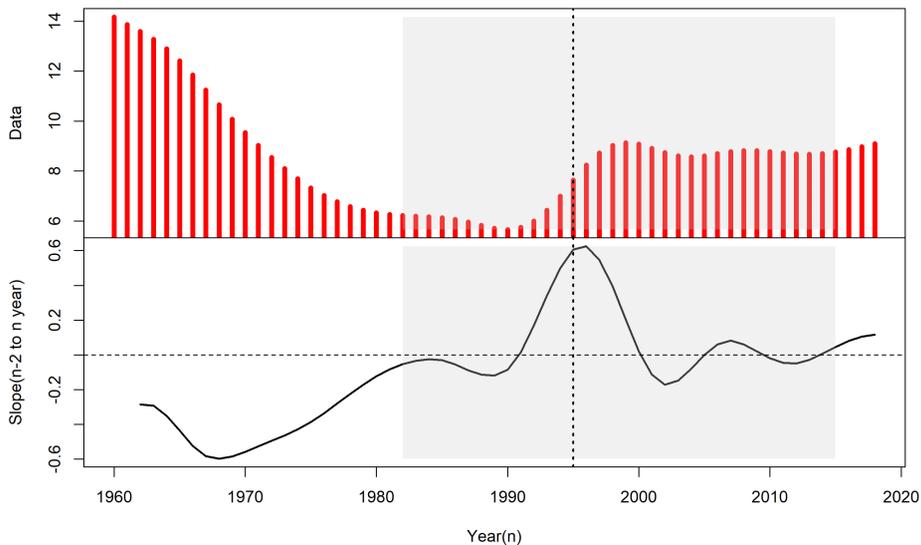


그림 2-7. 북한의 사망률(천 명당 사망자 수) 연 변화

\* 출처 : Worldbank

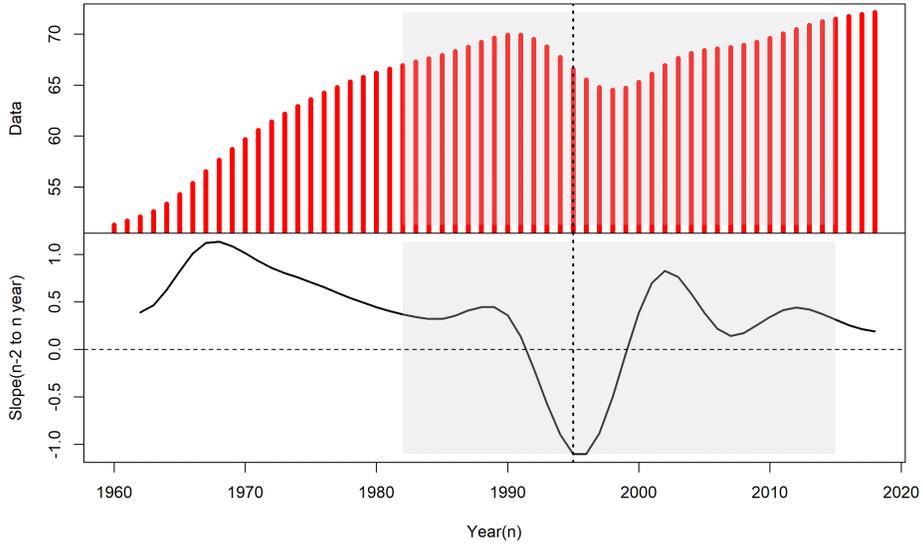


그림 2-8. 북한의 평균수명 연 변화

\* 출처 : Worldbank

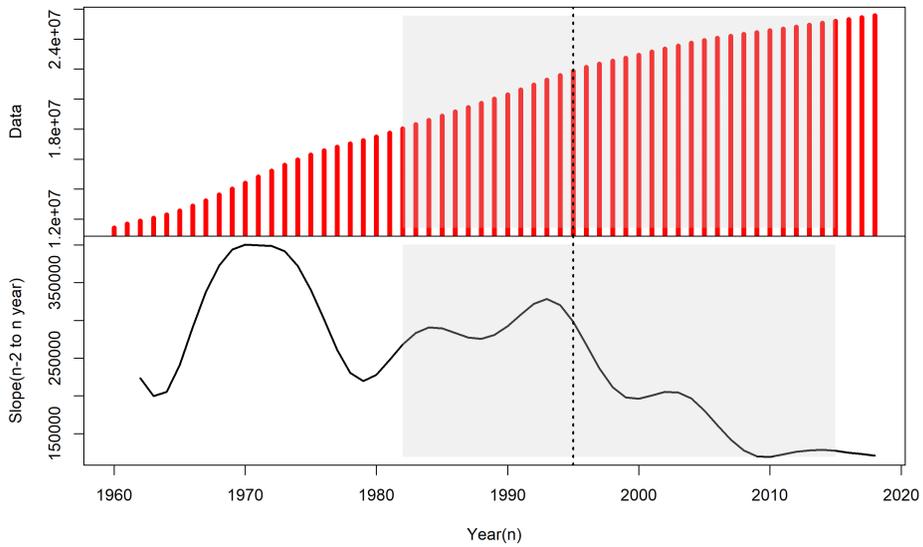


그림 2-9. 북한 인구의 연 변화(단위 : 천명)

\* 출처 : Worldbank

## 2) 농업생산량 변화의 사회경제적 요인과 관련된 통계와 문헌

북한의 식량생산 감소에 대해서 언급할 때 뿐만 아니라 북한의 토지황폐화 문제를 언급할 때 주요요인으로 가장 많이 제기되는 것이 물자와 에너지의 부족이다. 특히 비료의 부족문제와 농기구, 수리시설 자체와 이를 구동할 에너지의 부족이 직접적인 원인 중 하나로 제기된다. 하지만 비료 자료의 경우 FAO와 통계청 모두 1990년대-2000년대 통계 기준이 바뀌어 수치의 연속성이 떨어지는 문제가 발생하였다. 대신 북한의 에너지 수급을 알 수 있는 통계수치를 제시하여 변화를 기술하고자 한다.

그림 2-10은 미국 에너지부 에너지관리청(USEIA)에서 제공하는 북한의 원유수입량의 변화를 나타낸 것이다. 북한은 사회주의권이 붕괴하기 전까지는 우호가격을 통해 원유를 시장가격보다 싸게 공급받았다고 알려져 있다. 그러나 1989년을 정점으로 극적으로 원유수입량이 떨어지는 것을 확인할 수 있으며, 2000년대 이후로는 1980년대의 1/3~1/4수준에 불과한 실정이다. 이는 화학비료의 공급에 심각한 영향을 주었을 뿐만 아니라, 농기구 및 농업기반시설을 위한 에너지 공급에도 분명한 영향을 주었을 것이다.

그림 2-11은 동일 출처의 북한의 전기생산량의 연 변화를 나타낸 그림이다. 석유생산량과 비슷하게 1990년 전후로 생산량이 감소하였지만, 그 폭이 석유보다 크지 않으며, 1985년 이전의 경향도 다소 다르다. 이는 북한의 전기생산이 석유에만 의존하지 않기 때문으로 풀이될 수 있으며, 1980년대 초반의 전기생산 저조는 에너지 부족 이외의 다른 이유도 있을 것으로 해석된다. 이러한 전기에너지의 부족은 수리시설을 포함한 농업기반시설의 전반적인 저하에 큰 영향을 주었을 것으로 예상해 볼 수 있다.

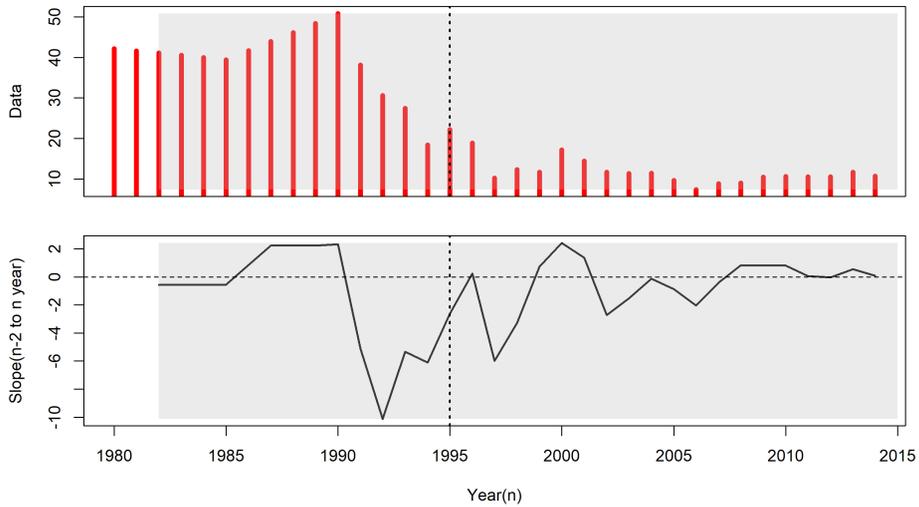


그림 2-10. 북한의 원유수입량(MBPD)의 연 변화

- \* MBPD(Thousand barrels Per Day) : 1000배럴/일, 1배럴은 158.984리터
- \* 출처 : USEIA(United States Energy Unformation Administration, 미국 에너지부 에너지관리청)

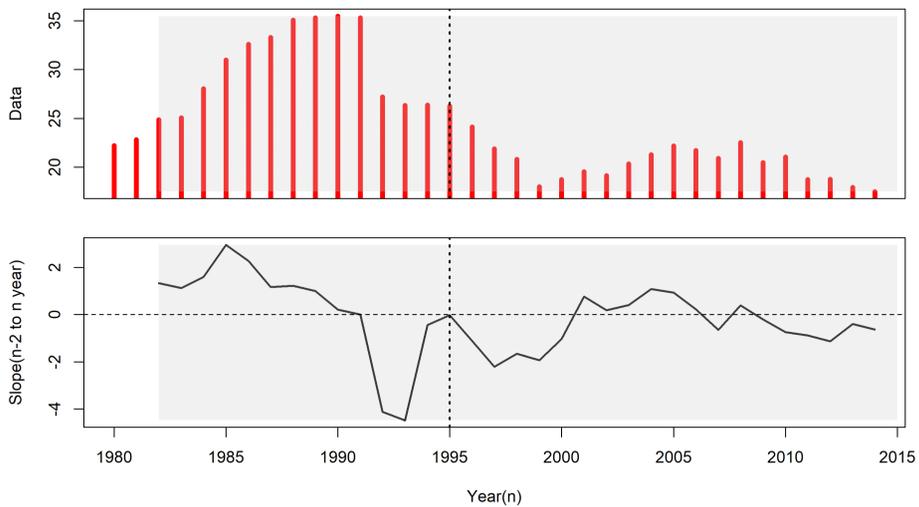


그림 2-11. 북한의 전기생산량(10억 kWh)의 연 변화

- \* 출처 : USEIA(United States Energy Unformation Administration, 미국 에너지부 에너지관리청)

### 3) 식량생산 변화의 자연환경 요인 중 기후와 관련된 통계와 문헌

기후자료는 각 지역마다 요약하기가 어렵기 때문에, 주요 도시를 중심으로 자료를 정리하였다. 먼저 평균기온의 경우(그림 2-12), 일반적으로 냉해 피해를 이야기하지만, 식량 위기 전후에는 극심한 편이 아니었다. 대신 모든 도시에서 공통으로 1980년대 초에 평균기온이 평소보다 1~2도 정도 낮게 도출되었는데, 이는 대기근 전 1980년대 초반 소출 저하와 관련이 있을 것으로 예상해 볼 수 있다.

북한의 대기근과 관련하여 특징적으로 관찰할 수 있는 기후 자료는 아마도 강우자료일 것이다(그림 2-13). 북한 대부분의 지역에서 1995년을 전후로 가뭄이라 볼 수 있는 낮은 연 강우량이 나타났다. 특히 평양의 경우 장기간에 걸쳐 연 500mm 이하의 낮은 강우량이 나타났으며, 다른 지역에서는 단기간내의 연 500mm 이하 강우와 1000mm이하의 강우가 동시에 나타났다. 많은 문헌에서 제기하는 가뭄과 홍수의 연속적인 발생과 밀접한 연관이 있는 현상이라 볼 수 있다. 다만 중강, 청진, 신의주 등과 같은 북부 지방은 상대적으로 식량 위기 이전보다 이후에 강수 저하가 두드러지게 나타났으며, 평양, 함흥, 개성 등은 이전에 두드러지게 나타난 것이 특징이다.

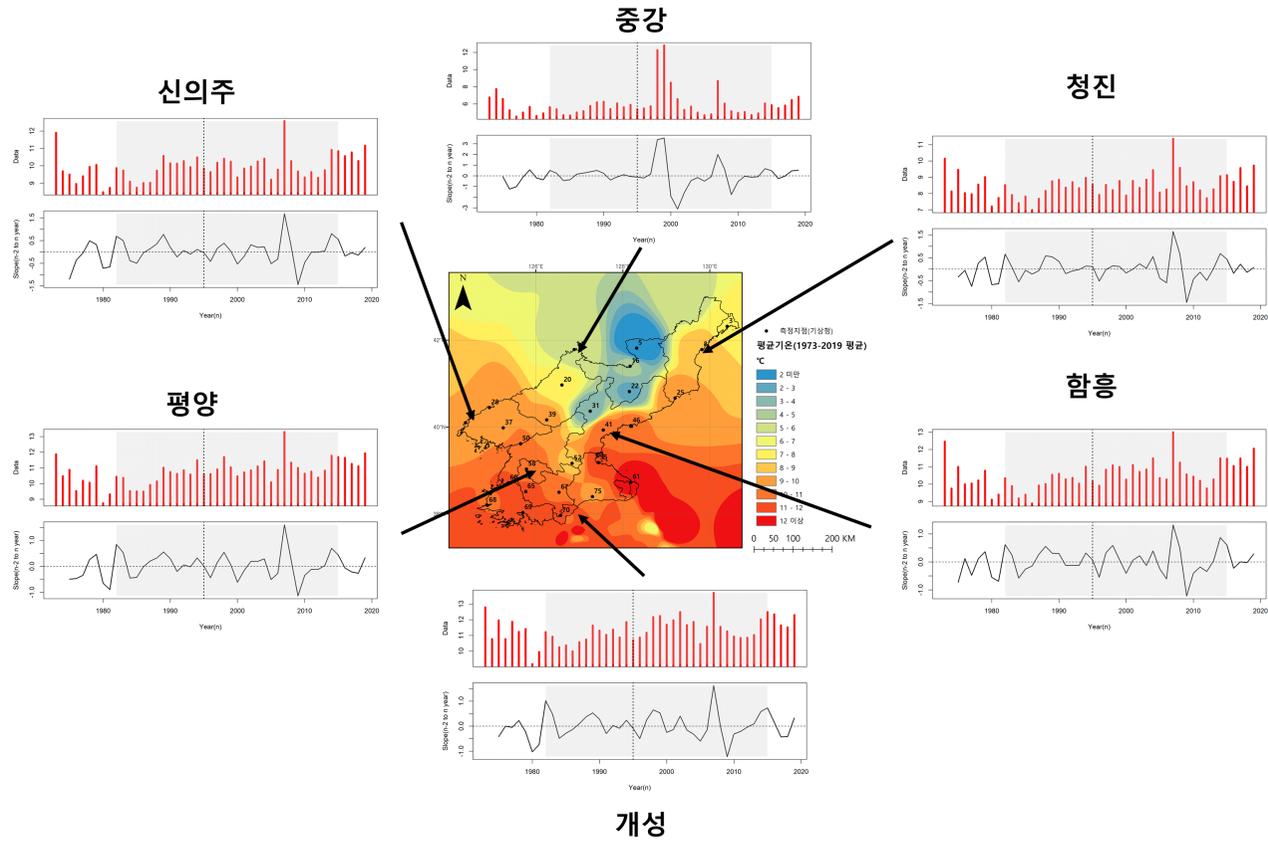


그림 2-12. 북한 주요도시의 연평균기온의 변화

\* 출처 : 기상청, 가운데 그림은 1973년~2015년 평균기온을 IDW기법으로 보간한 자료임

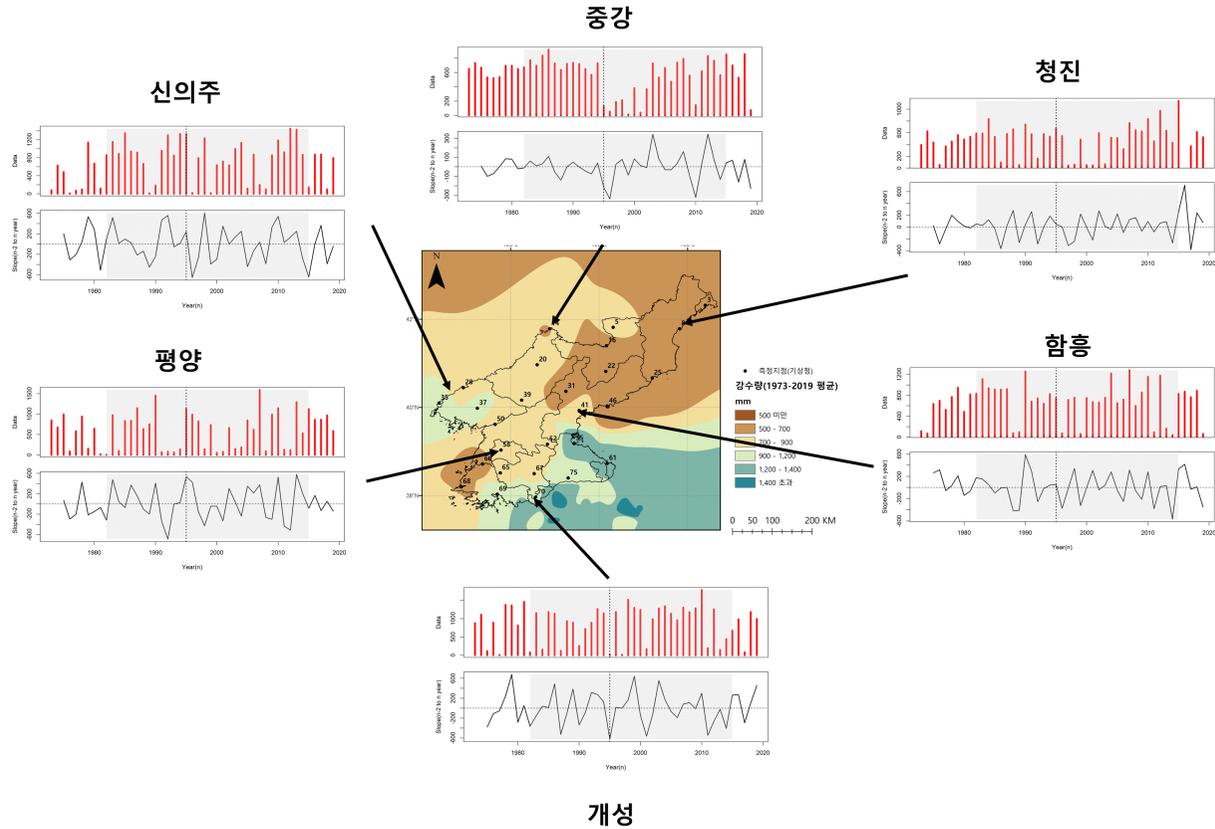


그림 2-13. 북한 주요도시의 연강수량의 변화

\* 출처 : 기상청, 가운데 그림은 1973년~2015년 평균강수량을 IDW기법으로 보간한 자료임

### 3. 북한의 식량생산 자료와 요인들 간의 연관성 연구동향

앞서 확인한 북한의 식량생산량 및 그와 관련된 지표들의 정확성은 여러 가지 측면에서 의심을 받고 있다(이석, 2004a; 2004c; 안유순, 2013). 또한, 북한의 식량생산량에 대한 과거 자료에 대한 분석은, 궁극적으로는 추세를 바탕으로 미래 북한의 식량생산량 변화를 추정하고자 하는 목적이 있을 것이다. 과거와 현재에 대해서는 북한의 통계관련 지표의 신뢰도 문제를 극복하기 위해, 그리고 북한의 미래 연구를 위해 북한의 식량생산량 추정 기법은 여러 차원에서 개발되었다. 특히 농업경제학 및 원격탐사 분야에서 북한의 식량생산량을 추정하는 모형이 다수 개발됐다. 이 중 공개된 연구를 정리하면 아래와 같다.

#### 1) 인문사회자료와 식량생산량과의 관계

경제학 또는 농업경제학적인 방식으로 진행된 북한의 식량생산량 추정 연구는 주로 인문사회통계자료를 기반으로 회귀분석 기법을 적용하여 관계식을 도출하는 방법이 주를 이룬다. 크게 두 연구를 찾을 수 있으며 그 내용은 아래와 같다.

이석(2004c)은 1961년부터 2002년간의 통계자료를 기반으로 북한의 총곡물생산함수를 추정하는 함수를 개발하였다. 크게 자본(비료)와 노동 두 가지로 나누어 분석을 진행했는데, 자본투입량보다 노동투입량이 더 민감하다는 결론에 도달했다(표 2-6). 이 결과는 설명력 및 신뢰구간이 명확하게 제시되어 있지만, 신뢰구간의 범위가 다소 넓다는 점( $p < 0.1$ ), 그리고 구체적으로 어떠한 통계분석 방법을 썼는지를 공개하지 않는다는 점에서 한계가 있다.

표 2-6. 이석(2004c)의 북한 식량생산량 추정공식

모든 $p < 0.1$	상수항	자본(비료)	노동력	$R^2$
변수	5.24	0.34	0.66	0.70

남성욱(2016)은 1961년에서 2001년 사이의 북한의 곡물생산량 통계자료와 북한의 농업사회통계 자료를 활용하고, 일부는 이를 대신할 수 있는 대리변수(proxy variable)로 활용하여 북한의 곡물생산량을 예측할 수 있는 모형을 개발했다. 곡물생산량을 예측하기 위한 독립변수로 토지면적, 농업노동력, 화학비료 사용량, 기계류 사용량, 수리관개화 비율, 날씨, 시간변수를 활용하였다. 날씨자료는 해당 연구가 인문사회연구에 집중하고 있고, 요약하기 어렵다는 점, 그리고 급변기상이 중요하다는 점에 근거하여 정상 이상-정상-정상 이하의 범주형으로 자료를 바꾸어 구성하는 등의 형태로 도입하였고, 나머지 변수도 통계분석을 통해 요약, 가공하는 과정을 거쳤다. 그 결과를 최대우도법(Maximum Likelihood) 회귀분석 결과를 이용하여 표 2-7과 같은 결과를 얻었다. 결과를 해석해 보면, 경지면적, 기계화, 정상 이상, 정상날씨에서 95%이상의 신뢰수준에 들어가는 변수를 얻게 되었다. 이는 구축하기 어려운 자료들 간의 생산관계식을 만들었다는 의의가 있으나, 다중공선성의 문제를 제기함에도 명확한 해결책을 제시하지 않았고, 무엇보다도 모형 전체의 설명력( $R^2$ )과 유의수준(P값)을 제시하지 않았다는 한계를 가진다.

표 2-7. 남성욱(2016)의 북한 식량생산량 추정공식

변수		계수	P값
종속	Log 생산량		
	절편	-9.51	0.0007***
독립	Log 연간시간	-0.05	0.2441
	Log 노동력	0.02	0.9451
	Log 경지면적	2.39	0.0001***
	Log 비료	0.05	0.6686
	Log 기계화	0.24	0.0005***
	Log 관개화	0.02	0.8243
	정상 이상 날씨	0.09	0.0050***
	정상 날씨	0.05	0.0264**
	AR(1)	0.12	0.5463

이 두 연구는 전형적인 농업경제학적 농업생산량 추정 공식으로서, 북한의 여러 사회지표를 이용해 북한의 농업생산량을 추정할 수 있는 모형을 개발하였다는 데 그 의의가 있다. 하지만 각 지표들간의 상관관계와 유의성이 높지 않고, 자료 가공이나 변수 설정 등에 임의성이 다분하다는 한계를 가진다. 이는 북한 자료가 한계가 있고, 검증이나 보정이 어려워서 발생하는 한계로 보인다. 또한 남성욱(2016)의 연구에서는 인문사회적인 속성에 치중하였다는 한계를 극복하기 위해 기후자료를 도입하였지만, 소출에 큰 영향을 미치는 자연환경적인 요인을 추가적으로 반영할 필요가 있다.

## 2) 식생지수와 식량생산량과의 관계성

식량생산량에 대한 통계산출에 어려움을 겪는 나라는 북한 외에도 통계기반이 미흡한 개발 도상국이나, 통계조사를 하기에 국토가 너무 광대한 미국 같은 나라들이 있다. 이들 나라에서는 이에 대한 대안으로 위성영상을 활용해서 식량생산량을 추정하는 연구를 수행하며, 특히 식생지수를 사용한 연구가 널리 알려져 있다(Jensen, 2005).

홍석영 등(2009)은 북한에 대한 정규화식생지수와 연간 식량생산 통계자료를 이용하여 북한의 단위면적당 쌀 생산량을 추정할 수 있는 모형을 개발하였다. 사용한 영상은 미국 항공우주국(NASA)에서 제공하는 MODIS(Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) 위성영상이다. 이를 이용하여 벼농사 지점으로써 확실하다고 할 수 있는 서해안 평야지 4지점을 대상으로 연구 지역을 선정하여 정규화식생지수 값을 추출하였다. 정규화식생지수 값 중 연중 가장 높은 여름철의 값이 식생의 건강도를 나타내는 대푯값이라고 판단하여, 여름철의 최대치를 이용하였다. 또한 FAO와 통계청의 자료를 활용하여 북한의 쌀 생산량을 도출하였다. 이를 바탕으로 정규화식생지수와 단위면적당 쌀 생산량간의 관계식을 회귀분석을 활용하여 도출하였다(표 2-8).

이 연구는 쌀 이외의 다른 작물의 생산량을 설명하지는 못하는 한계가 있으며, 회귀분석을 사용하여 연구를 진행하기에는 표본 수(8개)가 너무 적다는 통계적인 한계도 지닌다. 하지만 이러한 한계에도 불구하고 이 모

형은 NDVI를 이용한 단위면적당 식량생산량을 쉽게 예측할 수 있다는 점에서 자료의 부족으로 식량생산량 자료를 공간적으로 추정해 내기 어려운 북한 지역에서는 간단하고 유용한 방법이다.

안유순(2013)은 홍석영 등(2009)의 방법을 응용하여, 논과 밭의 토지생산량을 추정하는 모형을 개발하였다. 이를 위해서는 논과 밭, 농지가 아닌(산지) 지역을 구별해 내야 했다. 농지 자체는 환경부의 대분류 토지피복도를 통해서 분류해 낼 수 있었는데, 대분류 토지피복도에는 논과 밭까지 구별되지는 않는다. 이를 위해 부경생(2001)의 북한의 벼 재배의 환경조건을 고려하여 농지 중 경사도  $5^{\circ}$  이내, 고도 100m 이하, 30년(1980~2010) 연평균기온이  $10^{\circ}\text{C}$  이상이 되는 지역은 논으로, 이에 해당하지 않는 토지는 밭으로 분류하였다.

안유순(2013)은 이 결과가 대체로 홍석영 등(2009)과 유사하고 모형의 설명력이 높으며 유의수준을 만족하기 때문에 활용에 문제가 없을 것으로 예상하였으며, 북한 지역의 단위면적당 식량생산량을 정규화식생지수로 예측하는데 활용하였다.

이후 홍석영 등(2015)는 정규화식생지수와 강우자료를 이용하여 논벼의 생산량을 예측하려는 연구를 진행하였다. 사용한 자료는 홍석영 등(2009)와 거의 유사하며 그 연도만 2002~2014년도로 바꾸어 분석하였으며, 강우자료는 기상청 국가기후데이터센터에서 제공하는 북한의 27개 자료를 활용하였다. 그 결과 모형의 설명력도 홍석영(2009)보다 나쁘고, 유의수준도 만족하지 못하는 부정적인 결과로서 도출되었다. 하지만 저자 등이 남한에서 진행한 연구(홍석영 등, 2012)로 미루어 보았을 때 자료가 개선이 된다면 충분히 유의미한 결과로 도출될 수 있다고 판단하였다.

이 연구는 앞선 경제학적 연구보다 직관적이고 단순한, 그럼에도 불구하고 설명력이 높은 모형으로 개발하였다는 강점이 있다. 그러나 적은 표본으로 모형을 만들었기 때문에 통계적 유의성에 대해서 비판받을 수 있으며, 주로 일부 작물(쌀)에 관한 연구가 집중적으로 이루어졌다는 한계도 가지고 있다. 또한 여러 인문·사회적 요인이 중요하게 작용할 것이 분명하지만, 이를 위 연구들은 쉽게 반영하지 못했다. 이러한 문제에 대해 홍석영 등(2008) 및 홍석영 등(2015)의 연구에 참여했던 연구진에게 질의한 결과, 쉽게 극복하기 어려운 문제가 많았다. 먼저 쌀에 대한 식량생산 추정

에 집중했던 이유는, 산림이나 다른 밭 작물에 비해서 가장 위성영상으로 분간이 잘 되는 것이 벼이고, 옥수수나 다른 작물은 위성영상 특성상 잘 구분이 되지 않는 문제가 있었다. 특히 쌀 만큼이나 중요한 옥수수 소출은, 옥수수의 재배 특성상 수확이 분산되어 이루어져, 식생지수를 통한 소출량 추정의 정확도가 떨어지는 문제가 있다고 하였다. 그리고 인문사회적인 지표 도입 또한 여러 가지 차원에서 검토하고 있지만, 충분히 유의미한 결과가 나오지 않는다는 어려움을 토로하였다. 이러한 문제를 고려하여 이 방법을 적용하거나 활용할 필요가 있다.

표 2-8. 위성영상을 이용한 북한 식량생산량 추정모형

연구	사용자료			모형				비고
	위성영상	통계자료	시기	생산량추정 대상 (종속변수, Y)	투입변수 (독립변수, X)	모형(수식)	R <sup>2</sup>	
홍석영 등(2009)	MODIS	통계청 북한통계	2000-2008	쌀 생산량 (단위면적당, kg/10a)	NDVI(수잉기, 8월경)	$Y=1078.39X-595.16$	0.591**	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 벼 재배지는 홍석영 등(2008)이 분류한 북한 토지피복도 사용</li> </ul>
안유순 (2013)	MODIS	통계청 북한통계	2000-2008	쌀 생산량 (단위면적당, kg/10a)	NDVI(연평균)	$Y=1137.209X-601.416$	0.449**	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 논, 밭 피복 분류는 환경부 토지피복도 (2000년대)에 대해서 기후조건(부경생 등, 2001)에 맞추어 분류하였음</li> </ul>
				발작물 생산량(단위면적당, ha/t)	NDVI(연평균)	$Y=0.66X+641$	0.555**	
홍석영 등(2015)	MODIS	농촌진흥청 통계, 기상청	2002-2014	쌀 생산량 (단위면적당, kg/10a)	NDVI(연 최대값Xa), 강우량(9월, Xb)	$Y=5.1577Xa-0.003131Xb-0.4293$	0.44	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 벼 재배지는 홍석영 등(2012a)의 연구 활용</li> <li>• 유의수준이 낮게 나왔으나, 남한을 대상으로 동일하게 진행한 연구 (홍석영 등, 2012)에서는 충분한 유의수준이 나왔다는 차이가 있음</li> </ul>

\*\* 95% 신뢰수준 만족

### 3) 식량생산량-식생지수-환경정보와의 관계

안유순(2013)은 위 식생지수의 관계식을 미래환경변화 (예측)모형에 활용하기 위해, 식생지수와 다른 환경자료와의 상관자료와의 관계를 다루는 회귀모형을 개발하였다. 이를 위해 먼저 환경부 토지피복도와 기후자료를 이용하여 토지이용을 논, 밭, 기타(산림)으로 구분하였다. 그리고 NDVI 추정식을 산출하기 위해 각 토지이용별로 5회 씩 무작위로 4,000~5,000개의 표본의 NDVI(종속변수), 지형·기후자료(독립변수)를 추출하여 단순회귀분석을 실시하였고, 그 결과는 표 2-8~10과 같이 도출되었다.

표 2-9. 안유순(2013)의 논 식생지수 예측모형(다중회귀분석)

표본의 수	R	R <sup>2</sup>	계수(비표준화)					
			변수	상수	Ln(경사도)	Ln(고도)	Ln(봄철강우)	연평균기온
4964	.398	.158	계수	1.464	-.019	-.026	.215	-.023
			유의확률	.000	.000	.000	.000	.000

- \* 회귀식의 유의 수준 : 0.000
- \* 종속변수 : exp(NDVI)
- \* NDVI 및 기상자료의 경우 5년 자료(2006~2010)의 평균임

표 2-10. 안유순(2013)의 밭 식생지수 예측모형(다중회귀분석)

표본의 수	R	R <sup>2</sup>	계수(비표준화)					
			변수	상수	경사도	Log(AS)	Ln(고도)	최저기온
4934	.376	.142	계수	2.115	.005	-.01	.02	.002
			유의확률	.000	.000	.000	.000	.002

- \* 회귀식의 유의 수준 : 0.000
- \* 종속변수 : exp(NDVI)
- \* NDVI 및 기상자료의 경우 5년 자료(2006~2010)의 평균임

표 2-11. 안유순(2013)의 기타(산림)의 식생지수 예측모형(다중회귀분석)

표본의 수	R	R <sup>2</sup>	계수(비표준화)						
			변수	상수	Log (AS)	Ln(경사도)	Ln(고도)	연평균기온	강우(봄철)
4777	.537	.289	계수	7111.178	-30.361	83.839	213.554	36.004	-1.107
			유의 확률	.000	.000	.000	.000	.000	0.000

\* 회귀식의 유의 수준 : 0.000

\* 종속변수 : NDVI \* 10000

\* NDVI 및 기상자료의 경우 5년 자료(2006~2010)의 평균임

이 결과들은 앞선 식생지수를 활용한 식량생산량 예측모형과 개발하여 미래의 식량생산을 예측하는데 활용하였다. 뿐만 아니라, 토양침식량을 예측하는 방법에도 활용할수 있었다. 그러나 토지피복 분류 자료의 정확도가 의심스럽고, 추가 토지피복이 필요함에 따라 임의로 분류한 바 있어 신뢰성의 문제가 있다. 뿐만 아니라 도출한 공식의 설명력(R<sup>2</sup>)이 다소 낮은 수준이라는 문제가 있다. 이 때문에 식생지수 자체를 추정하여 활용하는 연구는 다른 연구에 비해서 드문 실정이다<sup>68)</sup>. 따라서 지속적인 개선을 통해 본 모형의 개선이 필요한 실정이다.

68) 하림 등(2007)정도를 찾아볼 수 있다.

#### 4. 북한의 식량생산 변화에 관한 요약과 한계

여러 통계자료를 통해 북한의 농업 생산량은 1990년대 중반 생존에 필요한 수준 이하로 떨어졌고, 이는 1990년대 북한 대기근을 유발하였다. 공급의 문제와 작물생산의 실패 등 여러가지 원인이 통계자료를 통해 확인되지만, 무엇보다도 농업생산성의 저하가 다른 농업 관련된 지표보다 더 큰 연관성이 있다는 것이 확인되었다. 농업생산성의 저하는 토지황폐화의 정의에 포함되는 부분으로, 서론에서 언급하였던 토지황폐화와 식량생산과의 관계에 부합하는 부분이다.

통계자료를 통해 농업생산량의 변화는 인구와 사람들의 건강한 삶에 치명적인 영향을 주었다. 그리고 에너지, 기후와 같은 많은 통계 자료들이 농업생산량과 그 경향이 비슷했으며 연관성이 커 보인다. 이를 고려하여 몇몇 연구들은 북한 농업생산량의 변화와 사회경제-자연환경과의 관계에 대해서 확인하고자 하였다. 특히 최근에는 식생지수와 식량생산과의 관계를 모색하는 연구를 통해, 토지황폐화 자료와 식량생산 자료를 통합하려는 시도를 보여 주었다. 하지만 많은 연구들이 통계적 유의도가 낮거나, 지엽적인 관계만 다루는 등의 한계를 보였다. 이는 서론에서 언급한 전세계적 토지황폐화 연구의 한계인 토지황폐화와 식량생산 감소의 관계와 프로세스 이해와 부합하는 결과라 할 수 있다.

다음 절에서는 이 장에서 확인하였던 한계에 주목하고, 특히 이전 절에서 확인한 토지황폐화 경향과 식량생산 감소와의 관계에 대해서 세부적인 접근을 진행하고자 한다.

### 제 3 절 북한 토지황폐화와 식량생산 감소에 대한 전역적 접근

북한 환경에 관한 연구는 북한에 대한 정치, 군사, 경제적 연구에 비해 상대적으로 부족한 실정이며, 특히 현장연구가 뒷받침되어야 하는 토지황폐화 연구는 많은 제약이 있었다(공우석, 2006; 이민부 등, 2008). 2절에서 확인한 대로 대신 북한의 토지황폐화 경향에 대한 추정은 위성영상인 통계자료를 이용한 2차 또는 3차 연구에 주로 초점이 맞춰질 수밖에 없었다.

북한의 식량생산 변화와 감소에 관한 연구는 북한의 경제와 사회에 대한 연구로 경제·사회학 및 농업경제·사회학 분야에서 진행되어 왔다. 2절에서 확인한 것과 마찬가지로 통계자료를 해석하고 이를 바탕으로 식량생산 감소의 경제적 원인과 징후를 추정하는 연구와, 이를 위성영상과 결합함으로써 “북한 식량생산 감소” 모형 구축을 추구하였던 연구가 있다.

서론(1장)에서 언급한 대로, 북한의 토지황폐화 문제와 식량생산 감소 문제 간의 관계성에 관한 연구는 드물었다. 2절의 북한 식량생산 감소 모형에서는 제한적으로 토지황폐화 지표(식생지수 등)와 식량생산 감소와의 관계를 확인하였다. 그러나 토지황폐화 문제와 식량생산량 감소가 서로 원인과 결과로서 상호작용하는 현실과는 달리, 원인과 결과를 분명하게 구분하는 단선적인 연구에 치중하였다는 한계가 있다.

이 절에서는 앞선 두 절의 연구성과에 대해서 사회생태시스템의 관점에서 통합적·거시적(global, holistic)으로 접근하고자 하는 시도다. 이를 위해 북한의 토지황폐화 식량생산 감소문제에 대한 역사·정치 문헌의 기술을 역사적 흐름에 따라 정리하고, 이를 통해서 북한의 토지황폐화와 식량생산 감소문제에 대하여 어떤 요인들이 주로 제기되는지를 정리하여 보도록 한다. 그리고 이들 사이에서 통계적 검증이나 확인에 선행하여, 직관적으로 어떤 사회생태적 관계성을 가지는지에 대한 개념모형을 기술하고자 한다.

## 1. 북한 토지황폐화와 식량생산 감소의 역사적 맥락

이 부분에서는 토지황폐화와 식량생산 감소와 관련된 북한의 농업과 임업과 연관된 역사를 정리함으로써, 북한의 토지황폐화가 어떤 시공간적 프로세스에 의해서 유래되고, 발전되었으며, 어떻게 대기근으로 전이되었는지를 설명하고자 한다. 이를 토대로 북한 토지황폐화의 요인에 대해서 추출해 내고자 한다.

### 1) 1940년대 : 해방과 분단, 토지개혁

일제강점기 한반도에서는 남쪽의 농업과 경공업, 북쪽의 중화학 공업의 형태로 공간적인 분업이 이루어졌다(Oberdorfer and Carlin, 2014). 공간의 분업에 따라 북한에는 광공업 인구가 유입되고, 남한 지역은 식량을 제공하는 형태로 분업이 이루어져 왔다. 1945년 해방과 함께 미국과 소련의 진주로 38선이 나뉘는 이후, 분단이 점차 고착되면서 기존의 공간분화는 깨어지게 되고, 북한의 식량 사정은 굉장히 어려워졌다(남성욱, 2016). 수급의 측면에서 위험을 느낀 북한 당국은 지속적인 식량 증산과 자연개조 노력을 시작하게 된다.

해방 당시 농토의 소유 구조는 남북 모두 80%이상이 소작농 또는 반소작농이었으며, 토지의 60%가까이를 지주가 소유하고 있었다. 지주의 상당수가 일본인이었으며, 소작료가 소출의 50%를 넘는 고율이었기 때문에, 농업생산성의 문제 해결을 위해서는 남북 모두 이를 해결해야 했다. 또한 북한의 소련군정과 “북조선 임시 인민위원회”에서는 이러한 문제를 환기하고, 해결책을 제시함으로써 정치적 이득을 보고자 하는 의도도 있었다(남성욱, 2016).

이러한 필요성과 이해관계에 따라 1946년 3월 38선 이북 지역에서 토지개혁이 전격적으로 시행되었다. 지주와 일본인의 토지소유와 소작제도를 철폐하고, 경작자에게 토지이용권을 부여하는 것이 골자였다(부경생 등, 2001). 무상몰수 무상분배가 원칙으로, 비슷한 목적으로 1949년 남한에서 시행한 유상몰수 유상분배와 큰 차이가 있었다. 다만 농토에 대한 대량의 소유와 소작이 금지되었을 뿐, 경작할 수 있는 수준의 토지의 사적 소유권은 당시에 완전히 폐지되지는 않았다.

북한의 토지개혁은 당시 농업생산성의 증대에 긍정적인 영향을 미친 것으로 보이며, 그 정도가 “충분한 균량미를 모을 수 있을 정도였기 때문에

북한이 한국전쟁을 일으키는 데 기반이 되었다”는 인식이 있을 정도였다. (남성욱, 2016). 다만 토지개혁은 농업생산성의 증대뿐 아니라 농업집단화를 위한 사전 포석이었다는 인식이 일반적이며, 그 외에도 농업집단화를 위한 시도가 여러 방식으로 진행되었다. 대표적인 예로 생산할당제와 농촌 노동의 조직화 제도를 들 수 있다(木村光彦, 1999). 생산할당제는 각 단위(도, 군, 리 등의 단위)가 의무적으로 파종하고 수확해야 할 식량의 단위를 정해 두는 것으로, 농업경영을 강력하게 구속하는 제도였다. 농촌노동의 조직화 제도는 농업을 위한 협동 활동(모내기, 김매기, 수확 등)에 국가단위가 개입된 활동이다. 이러한 활동은 이후 1950년대 협동농장체제 전환을 위한 제도적 기반이 되었다고 볼 수 있다.

그 외에도 1940년대 북한은 사회주의자들의 주도로 정권이 유지되면서, 사회주의 특유의 자연개조론이 등장하기 시작했고, 이에 따른 자연의 적극적인 이용이 강조되기 시작했다. 또한, 북한이 남한에 비해서 다소 부족한 자연환경적인 한계와 앞서 언급한 일제강점기 산업구조가 깨어지면서 만들어진 불균형을 깨기 위한 적극적인 개간, 관계의 시도가 이 시기부터 시작되었다.

## 2) 1950년대 : 한국전쟁과 협동농장체제 전환

1950년 한국전쟁으로 남북의 많은 경제 부분은 큰 피해를 보았고, 농업 부분도 마찬가지였다. 전쟁이 끝난 1953년을 기준으로 농업 총생산량은 전쟁 전과 비교하면 76% 수준으로 줄었으며, 이는 기반시설 파괴와 농경지 감소에 의해서였다(木村光彦, 1999; 남성욱, 2016). 농업 협동화는 1954년부터 시작되었는데, 감소한 생산력을 증대시키는 데 개인의 노력만으로는 부족하고 노동력을 집단화·효율화해야 한다는 논리가 등장하였다. 이면적으로는 한국전쟁 시기 농촌지역에서 한국군에 협력하거나 월남하는 사례가 등장함에 따라 농촌사회를 강하게 통제해야 한다는 인식 또한 있었다.

개인농의 협동농장으로의 전환은 정부의 적극적인 개입으로 초반부터 완전사회주의 형태로 전환되었으며, 1958년 100% 사회주의적 협동농장으로 전환되었다. 이는 협동농장 체제를 채택한 다른 사회주의 국가에서는 전례를 찾아볼 수 없는 빠른 속도와 방식이었다. 일례로, 구소련과 동유럽의 협동농장체제 전환 이전에는 협동농장 구축을 위한 기반 시설(수리시설

등)과 장비(대형 농기구)와 같은 물적 기반을 사전에 갖추어 두고 점진적으로 전환하였고, 그럼에도 불구하고 많은 저항이 있었으며, 이에 따라 비사회주의적이라고 여겨지는 제도를 도입하는 등의 전환을 위한 중간적 조치가 지속적으로 진행되었다고 알려져 있다. 때문에 당시 협동농장 전환시 구소련 등에서도 졸속 추진이라는 비판이 있어 왔다고 알려져 있다(남성욱, 2016). 그러나 협동농장 전환이 다른 사회주의 국가에 비해 빨랐던 것은 1946년 토지개혁 때 이미 계획과 준비가 되었었기 때문이라는 지적 또한 있다(木村光彦, 1999).

1958년 협동농장 전환 후, 협동농장은 북한의 최소 행정단위인 “리”와 일체화되었으며, 이를 위해 협동농장 또는 행정구역이 이에 맞게 조정되었다. 이에 따라 농촌경제와 제도는 일체화되었으며, 협동농장체제가 사회주의 계획경제적 측면뿐 아니라, 주민통제의 측면 또한 존재했음을 보여주는 것이라고 할 수 있다.

### 3) 1960년대 : 사회주의농업체제 수립과 농촌기반시설 구축

1950년대 협동농장으로 전환은 급격하게 이루어졌기 때문에, 1950년대 후반과 1960년대 초반은 협동농장체제를 보완하고 이를 위한 농업관리제도를 개선하는데 주력을 두었던 것으로 알려져 있다. 이를 대표하는 것이 김일성의 “청산리교시”인데, 이를 토대로 중앙에서 도, 군, 협동농장으로 이어지는 일원적인 협동농장 관리체계가 만들어졌다. 또한 협동농장 제도에 맞는 공간재배치도 있었는데, 주가 되는 것은 경지정리와 “농촌문화주택”이었다. 특히 농촌문화정책을 바탕으로 분산된 종래의 가옥의 분포 형태가, 산기슭의 문화주택으로 바뀌었으며, 이는 구 질서의 파괴와 상호감시의 목적이 있었다고 여겨진다(木村光彦, 1999). 협동농장의 비효율성은 이후 1970년대 이후에 주로 제기되지만, 어떤 이는 초기부터 각종 인센티브 제도(작업반 우대제, 분조관리제 등)가 실시되었던 맥락에서 보았을 때 이 당시부터 비효율성이 있었다고 보는 견해도 있다.

협동농장의 물적 기반이 되는 농촌의 기계화, 수리화, 화학화의 성과 또한 이 시기에 있었으며, 북한 농업이 가장 발달한 시기로 일컬어지기도 한다(남성욱, 2016). 1960년대 초에 트랙터를 중심으로 한 기계화, 화학비료를 중심으로 한 화학화 등 관련된 김일성의 교시가 다수 확인되고 실제로 이 때 농업기계화가 많이 이루어졌다는 자료를 제시한다. 일례로 북한 정

부의 공식 발표에 따르면 1961년~1969년간 트랙터의 개수는 3.3배, 화물 자동차 대수는 6.4배 증가하였다고 한다(木村光彦, 1999). 그러나 木村光彦(1999)의 노동신문 등의 기록을 분석하는 연구로 미루어 보았을 때, 이는 일정량 한계가 있어 보인다. 특히 1960년대 전반에 걸쳐 농경과 운반에 트랙터뿐만 아니라 일소(부림소)가 등장하고 중요하게 여겨졌다는 점에서 농업기계화는 공식 발표대로 이루어지지 못했거나, 트랙터 등이 보급되었더라도 가동률이 떨어졌던 것으로 보인다. 그리고 화학비료를 강조했던 공식 시책과는 달리 1960년대 후반 신문 기사에는 퇴비, 액비 등의 유기 비료가 많이 등장하여 농업의 화학화가 잘 이루어지지 못했던 것으로 보인다. 특히 이 당시 이탄(泥炭)의 사용이 강조된 것으로 미루어, 이 당시부터 토양의 산성화가 많이 이루어졌던 것으로 보인다.

#### 4) 1970년대 : 농업생산성의 정체와 자연개조정책, 주체사상의 대두

1970년대 농업은 공업을 보조하고 부족한 노동력을 보충하기 위한 농업의 고도화, 집약화를 집중적으로 진행했다. 관개면적을 넓혀 이모작을 추진하고, 종자개량사업 등 생물학적인 연구를 강화였다. 그리고 간석지 개간 사업 등을 통해 농지를 늘리려는 시도가 본격적으로 진행되었다. 농업기계화는 1960년대보다 발달했던 것이 분명하고, 화학화 또한 진전되었다는 것이 북한 당국의 공식 입장이었다. 그러나 木村光彦(1999)의 노동신문 분석에 따르면 1970년대에도 유기질 비료의 자급과 관련된 기사가 굉장히 많았던 것을 보았을 때 농업화학화는 충분하지 못한 단계였으며, 같은 기록에서 일소의 기록은 줄어들었으나 트랙터의 부품과 가동 문제가 자주 언급되었다는 것은 가동률 측면에서 문제가 있었다는 것을 보여준다.

이 시기에는 사회주의의 한계가 드러나기 시작하면서 농업생산성의 정체가 본격적으로 나타나기 시작했다. 이석(2004a)에 따르면, 북한의 식량 사정에 처음으로 문제가 생긴 징후가 관찰된 것은 1973년이라고 한다. 이해에 북한은 “전쟁비축비”라는 명목으로, 주민들의 식량배급을 10%이상 삭감하는 제도를 마련하였기 때문이다. 다만 1980년대 초반까지는 더 이상의 식량사정의 위기는 발생하지 않았다고 한다(이석, 2004a).

따라서 1976년 북한 당국은 자연개조 5대 방침(1976년)을 발표하였는데, 이는 농업생산성이 기대했던 것 만큼 성장하지 못하여, 경지면적을 확대하여 식량난을 타개하려는 시도인 것으로 보인다(남성욱, 2016). 자연개

조 5대 방침의 내용은 발관개, 다락밭 건설, 토지정리와 토지개량 사업, 치산치수사업, 간석지 개량사업이다(서유석, 2008). 저수지와 관개수로를 만들어 밭을 중심으로 관개를 확대하고, 산지(다락밭)와 간석지 개간을 통한 농경지 증대와 효율화 등 생산성을 높이기 위한 자연의 전면적인 개조가 행해졌다.

1970년대 북한은 주체사상과 수령유일체제가 확립되었으며, 이는 농업경제 측면에서는 기존의 제도와 합쳐져서 김일성이 직접 실험, 지도했다는 “주체농업”이라는 이름으로 표면화되었다. 주체농법은 자료와 논의 방향에 따라서 다소 다르게 분류되기도 하지만, 크게 앞서 말했던 다락밭 개간, “적지적작의 원칙”, 그리고 “강냉이 영양단지(옥수수 모종심기)”, 옥수수 중심의 밀식 재배 정도로 요약할 수 있다. 이는 당시 북한에는 필요할지도 모를 제도와 방식일수도 있었으나, 당의 지도에 따르는 경직된 제도라는 측면과(적지적작), 산지가 많고 경사도가 높아 침식이 높은 북한에 침식에 취약한 정책을 수립했다는 점(다락밭 개간, 밀식 재배, 옥수수 주종), 기후 변동성이 큰북한에게는 위험한 모종 정책을 시행하였다는 데에서 많은 비판을 받고 있으나, 최근까지도 큰 틀은 유지되고 있다고 알려져 있다.

## 5) 1980년대 : 농업증산정책의 한계 대두

1970년대까지 안정을 유지하던 북한의 농업생산량은 1983년~1984년을 기점으로 악화되기 시작한 것으로 보인다. 그 시점에서 배급하던 곡물에서 쌀보다 잡곡의 비율이 훨씬 증가하였으며, 1987년에는 다시 배급이 10% 감소하였다. 이는 1970년대에는 북한의 곡물생산증가율이 5.1%로, 인구증가율(2.4%)보다 2.7%나 앞섰지만, 1987년에는 그 차이(3.0% - 1.5%)가 1.5%수준으로 줄어들었다는 점에서 분명하게 확인할 수 있다(이석, 2004a).

이러한 인식 때문인지 북한 당국은 토지 확대 사업을 지속적으로 실시하였다. 북한 당국은 앞선 5대 자연개조사업이 큰 성과가 없다고 인식하고 4대 자연개조 사업(1981년)을 시행하였다(서유석, 2008; 남성욱, 2016). 이는 서해갑문, 태천발전소 건설과 30만정보 간석지 개간, 20만정보 새 땅 찾기로, 1970년대 자연개조사업을 구체화한 것에 불과하다. 따라서 이는 북한의 농업증산정책이 성과가 미진했고, 따라서 농지와 관개지를 늘려야 할 필요성이 계속되었기 때문으로 볼 수 있으며, 방법 또한 유희지를 보다

적극적으로 활용하고, 농업과 관계없던 국영기업소 등에도 유희부지를 이용한 농업을 권장하는 등 더 적극적이었다. 하지만 자연개조사업의 한계를 인식했기 때문인지, 1980년대 후반 북한 당국은 1960년부터 권장해 왔고, 1975년 주요 시책으로 내건 다락밭 정책에 대해서 부작용이 크다는 것을 인식하고 이를 막으려 했지만, 큰 성과가 없었다(박경석 등, 2011).

외부요인도 큰 문제였다. 북한은 주어진 환경 조건의 한계로 많은 부분을 다른 사회주의 국가에 의존하였으며, 이는 시장가격이 아닌 우호가격으로 저렴하게 들어오는 경우 또는 러시아-중국의 긴장관계를 이용한 무상 지원 등으로 이루어졌다. 특히 비료와 농약 등의 밀접한 연관이 있는 에너지 자원과, 농업을 위한 소비재, 곡물 등 농업과 경제 많은 부분에서 큰 의존관계하에 있었다. 그러나 1980년대 중반부터 냉전이 해소되어가고, 사회주의권이 정치경제적 변화를 겪음에 따라, 한국이 적극적으로 사회주의권과의 교류를 진행하기 시작했다. 이는 그동안 사회주의국가와의 무역에서 받던 북한의 혜택이 점차 없어짐을 뜻했다. 이는 농업에 큰 영향을 끼쳤을 것이라 예상해 볼 수 있다.

한편, 북한에 대한 고해상도, 또는 고밀도 시계열의 위성영상 자료는 대체로 1970년대 말이나 1980년대 초부터 구득이 가능하며, 따라서 이 시기의 북한의 농업이나 산림의 활력변화에 대한 연구가 이 이후부터 꾸준히 있어 왔다. 이승호(1998)은 Landsat을 통해 1990년대 초(1991~1994년)의 산림지의 변화를 추정했는데, 1970년대의 산림지의 비율이 79.8%에 비해 1990년대 초 산림지의 비율이 68.1%로, 약 10% 가량 감소한 것을 확인할 수 있었다.

## 6) 1990년대 : “고난의 행군”

1990년대에는 본격적인 불안정성의 증대가 이루어졌다. 앞서 언급했던 북한의 고립은 1990년대 초반 한국이 소련, 중국과 수교하면서, 그리고 이에 위협을 느낀 북한이 핵개발을 적극적으로 추진하면서 악화된다. 특히 에너지자원의 수급에 의존하면서, 비료와 농업기계, 농업기반시설의 구동이 거의 불가능해지게 되었다. 게다가 1990년대 초반 연달아 발생하는 급변기후로 인한 재난은 북한의 농업생산성을 결정적으로 악화시킨다. 이에 따라 1995년부터 1998년 또는 2000년까지 “고난의 행군”이라 일컬을 정도로 치명적인 대기근이 발생한다.

## 7) 2000년대 이후 : 대기근 재발 방지노력과 현실적인 제약

고난의 행군에도 불구하고, 협동농장체제는 유지되고 있으나, 분조관리제를 개선하는 등의 협동농장의 동기부여적인 한계를 극복하려는 노력이 계속 진행되고 있다. 주체농법 또한 큰 변화가 없지만, 옥수수를 강조했던 농업 부분의 정책에서, 비교적 토양침식에 자유로운 감자로의 전환을 강조하는 방향으로 변화하고 있다. 그리고 2모작과 품종개량을 강조하는 방향으로 전환하고 있다. 특히 2010년 이전까지 남북농업협력이 활발했을 때는 육종 부분에서 부족한 부분에 대한 협력이 충실히 진행되었다고 평가된다. 마지막으로, 고에너지의 농업기계(트랙터)와 수리시설에서, 중소규모 형태의 농업장비 도입과 중력위주의 수리시설을 통한 효율화를 추구하고 있다. 그러나 협동농장체제의 해체나 주체농법의 폐기(자율적인 농업체제 마련)와 같은 근본적인 대책은 현재까지도 요원해 보이는 것이 현실이다.

다만 대기근의 근본 원인이 되었던 토지황폐화에 대한 저감 노력은 지역별로 차이가 있는 것으로 보인다. 이에 대표적인 사례가 다락밭 확장에 대한 지역적인 차이에 대한 연구 결과이다. 표 3-1의 다락밭 확장의 지역적인 차이를 살펴보면, 1984년에서 2001년 사이에는 다락밭 확장이 모든 지역에서 크게 나타나 지역별 차이가 크게 의미가 없다. 하지만 2001년과 2005년 사이에는 평양 및 그 주변 지역의 다락밭의 면적이 감소하는 반면, 그 외 지역에서는 다락밭의 면적이 여전히 증가하고 있으며, 평양에서 거리가 멀어질수록 증가의 폭은 더 커져 함경북도의 경우 2001년 대비 2006년 다락밭 면적은 두 배 이상이다. 이는 2000년대 이후 북한 정부의 다락밭에 대한 통제가 주변지역으로 갈수록 그 정도가 약화됨으로써 토지 황폐화의 지역적 차이가 발생하게 됨을 보여준다.

표 2-12. 북한 토지황폐화 식량문제 역사 종합

시기	사회경제적-제도적 측면	자연적-토지이용 측면
1940 년대	<ul style="list-style-type: none"> <li>일제강점기 공간분업의 파괴로 인한 기근 위험</li> <li>집단농업체제 전환의 기초로써의 토지개혁 실시</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>사회주의 집권으로 사회주의적 자연개조론 대두</li> <li>자연환경 및 구조적 한계를 극복하기 위한 자연이용</li> </ul>
1950 년대	<ul style="list-style-type: none"> <li>한국전쟁에 대한 피해복구</li> <li>협동농장 전환(1958)을 통한 집단농업체제 확립</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1940년대와 유사</li> </ul>
1960 년대	<ul style="list-style-type: none"> <li>협동농장 체제의 제도적 보완("청산리교시")</li> <li>농촌의 기계화, 수리화, 화학화</li> <li>협동농장 체제의 비효율성 확인과 개선노력(인센티브제) : 근본적 대책은 아니었음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>협동농장 체제에 따른 토지공간의 재배치</li> <li>토지정비사업, 관개로 인한 농토구조 변경</li> <li>토지의 잘못된 이용과 화학화 강조에 따른 토양의 산성화</li> </ul>
1970 년대	<ul style="list-style-type: none"> <li>농업의 고도화, 집약화 추구 식량사정 불안정성 징후(배급량감소) 농업의 경직성 증대(주체농법)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>"자연개조 5대 방침(1976년)" 다락밭 개간 본격적으로 시작 침식정도가 높은 옥수수 재배 강조(주체농법)</li> </ul>
1980 년대	<ul style="list-style-type: none"> <li>농업생산량 안정성 악화(잡곡비중 증대, 배급 추가 감소) 대외관계의 변화로 우호가격"기반의 사회주의권과의 무역비중의 급감 : 식량, 에너지 수급 악화</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>4대 자연개조 사업(1981년)</li> <li>다락밭 개간 권장정책 폐지(1980년대 후반) : 효과가 없었음(높은 열망 또는 너무 늦음)</li> </ul>
1990 년대	<ul style="list-style-type: none"> <li>대외관계의 악화와 핵개발로 인한 고립, 식량과 에너지 수급에 결정적인 타격 김일성의 사망 "고난의 행군"</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>자연재해 빈도 증가 산림황폐화로 인한 자연재해 피해 증가</li> <li>에너지 부족으로 인한 고에너지 농업기반시설 붕괴, 토질 등 유지 불가</li> </ul>
2000 이후	<ul style="list-style-type: none"> <li>체제 전환이 아닌 체제 개혁에 머무르는 변화</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>토지황폐화 노력의 효과 부족(구조적 한계 또는 행정력 한계)</li> </ul>

## 8) 종합

표 2-12는 북한 토지황폐화와 식량문제의 역사를 정리한 표이다. 북한 토지황폐화와 식량문제 역사를 정리해 보면 대체로 사회경제적이고 제도적인 측면의 농업, 임업의 변화가 토지이용 측면에 영향을 주고 이것이 자연환경에 영향을 주어, 농업소출에 영향을 주고, 이것이 제도적, 토지이용 측면에 다시 영향을 주는 되먹임의 형태를 보여 주었다. 특히 제도적 측면에서는 협동농장으로 대표되는 집단농업의 형태가 계속 진행되었고, 토지이용 측면에서는 사회주의적 자연개조론으로 대표되는 농토 확장정책이 대표적이었다. 특히 집단농장의 비효율성이 대두되고 사회주의적 계획이 성과로써 잘 이어지지 않는다고 여겨지던 1970년대 중반부터, 자연개조에 대한 노력이 적극적인 형태로 변화하였음을 확인할 수 있다. 이러한 정책 기조는 1980년대 중반을 기점으로, 식량증산에 효과가 없고 오히려 자연재해 위험을 높일 수 있다는 것을 알게 되며 변경되지만, 이에 대해서는 큰 효과가 없었음을 알 수 있다.

## 2. 1990년대 북한 대기근과 토지황폐화 요인 도출

지금까지 역사의 흐름에 따라 북한의 토지황폐화와 식량문제의 요인을 살펴보았다. 이를 바탕으로 앞으로는 북한의 토지황폐화와 식량문제의 요인을 추출하고자 한다. 먼저 북한의 토지황폐화와 식량문제의 요인은 북한의 사회경제적·제도적 속성과 자연환경적 속성, 또는 그 둘 모두에 기인하여 발생하는 경우가 많았으며, 한 쪽이 일방적이지 않았다. 그리고 북한의 토지황폐화 문제는 현상적 요인에 집중하여 다루는 경우가 다수이나, 근원적 요인과 외부 요인 또한 큰 영향을 주었다고 볼 수 있다. 따라서 크게는 사회경제적·제도적 요인과 자연환경적 요인으로 나누어 북한의 토지황폐화의 요인을 추출하고, 세부적으로는 근본적 요인, 현상적 요인, 외부 요인으로 나누어 설명할 계획이다(표 2-13).

표 2-13. 1990년대 북한 대기근과 토지황폐화 요인 요약

구분	사회경제적·제도적 요인	자연환경적 요인
외부 요인	<p><b>에너지·식량의 높은 해외 의존도</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 연 100만톤 내외 식량 수입</li> <li>- 석탄 외 에너지 지하자원 전무</li> </ul> <p><b>대외관계 고립</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 사회주의 우방 붕괴 또는 태세 전환, 부족한 대외신용도</li> <li>- 핵개발로 인한 고립</li> </ul>	<p><b>급변기상현상</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 1990년대 초, 중반의 가뭄, 홍수, 한발</li> <li>- 2000년 이후에도 반복되고 있음</li> </ul> <p><b>기후변화</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 전세계적 기후변화로 급변기상현상은 계속 증가할 것으로 예상</li> </ul>
현상적 요인	<p><b>협동농장 체제의 유지</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 노동효율성의 약화</li> <li>- 현실과 괴리된 의사결정</li> </ul> <p><b>고에너지형 농업기반시설</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 러시아, 동유럽식 대형 수리시설·농기구에 치중(에너지 수급, 지형 특성 미반영)</li> <li>- 만성적인 유지보수문제와 기자재 부족</li> </ul>	<p><b>토양침식에 노출(물리적 저하)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 다락밭(비탈밭) : 1975년 “자연개조사업”의 일환</li> <li>- 옥수수 중심의 농업(주체농법)</li> </ul> <p><b>토양의 화학적(질적) 저하</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 토양의 산성화 : 만성적 비료부족&amp; 화학비료 의존</li> <li>- 과도한 밀식재배(주체농법)</li> </ul>
근본적 요인	<p><b>사회주의 체제와 북한체제 특유의 취약성</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 사회주의 계획경제의 비효율</li> <li>- “수령중심 의사결정”에 의해 계획경제체제의 강점인 체계성 미발휘, 수동적인 의사결정 구조 확립</li> </ul>	<p><b>한반도·북한 자연환경의 근원적 취약성</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- (지형)높은 산지와 낮은 평지 비중, 높은 경사도</li> <li>- (기후) 강수 여름 집중, (북한의 경우)상대적으로 낮은 기온, 강수</li> <li>- (토양) 상대적으로 낮은 생산성(중국, 일본 대비)</li> </ul>

## 1) 사회경제적·제도적 요인

현대 북한의 문제점에 관해 설명할 때 그 근원적인 이유로 항상 등장하는 것이 “사회주의 체제” 또는 계획경제가 가지고 있는 비효율이다. 북한 토지황폐화와 식량문제에 대해서도 그 근본적인 원인에 대해서는 인식을 같이하는 편이다. 북한의 사회주의 체제와 계획경제적 속성이 의사결정의 경직성을 야기했고, 인간의 이기심을 충분히 반영하지 못하며, 현실과 유리된 엘리트 중심의 의사결정을 야기하여 생산량 저하를 불러왔다는 인식이 지배적이다. 그러나 계획경제 체제는 특정 목표를 달성해야 하는 상황에서 그리고 이를 위한 인력과 자원 관리 측면에서 효율적인 속성을 가지고 있으므로 사회주의 체제에서만 사용하지는 않으며, 우리도 1960~1980년대 경제개발계획 등으로 활용한 바 있다. 하지만 북한은 최소한 농업과 토지 측면에서 이러한 강점이 반영되지 못했다. 그 이유는 “수령 중심의 의사결정 체제” 때문일 것으로 보인다. 이러한 최고 지도자 중심의 의사결정 체제는 스탈린주의라는 용어로 대표되는 사회주의 체제의 주요한 특성 중 하나다. 그러나 구소련의 경우 1950년대 중반 흐루쇼프에 의해 폐기되었으며 중국의 모택동 사상(마오주의) 또한 문화혁명이 끝나고 덩샤오핑이 실권을 잡은 1970년대 후반 이후로는 금기시되고 있다. 하지만 북한은 1950년대-1960년대 김일성의 정적들이 제거되고, 당시의 중·소 대립을 적극적으로 활용하며, 1960년대 후반 사상적인 통제가 본격화됨에 따라 1970년대 초반 김일성을 중심으로 한 “주체사상”이 완성되고 “수령 중심의 의사결정 체제”가 확립되었다(이종석, 2000). 이는 북한의 토지황폐화와 연관된 농업 및 자연 관리에도 마찬가지로, 북한의 많은 기록에서 김일성 3부자의 현지도에 의해, 엘리트들에 의해 세워진 계획이 임의로 생성, 변경, 폐기되는 것을 확인할 수 있으며, 당국들은 당초 계획보다 이들의 현지도에 더 집중하는 것을 확인할 수 있다(남성욱, 2016). 다만 다른 사회주의 국가에 비해 북한의 지도층과 엘리트가 계획경제를 뒷받침할 제도적, 통계적 기반을 충분히 갖추지 못했다는 평가도 있다. 결국 북한의 계획경제가 가지고 있는 비효율성과, 계획경제가 가지고 있는 합리성 조차 지배자의 임의적인 결정에 의해서 저해되었다는 점에서, 북한 체제의 속성은 사회주의 속성이 아닌 “북한 특유의 속성”에서 기인하였다고 보는 것이 타당하다.

북한의 토지황폐화와 식량문제의 요인 중, 사회경제적인 현상으로서 이해하기 어려운 점은 협동농장체제가 여전히 그 기능을 하고 있다는 점이

다. 북한의 협동농장체제는 그 체제를 채택한 어느 나라보다도 급격하게 만들어져 운영하는 체제이며, 일찍부터 그 비효율성이 인식되어 다양한 개선책이 마련되어 오고 있다. 특히 노동효율성의 저하를 극복하기 위한 각종 인센티브제도나 다락밭, 가축과 같은 부업 장려 정책 등을 시행하여 왔다. 그러나 자본주의화된 현재 북한의 다른 부분과는 달리, 북한의 협동농장 체제는 현재까지도 그 외형을 유지하고 있다. 이는 협동농장체제가 가지고 있는 근본 속성 중 “주민 통제”의 속성을 유지하고자 하는 것으로 보인다. 협동농장체제는 행정단위(“리”)와 일체화되어 있으며, 협동농장 체제가 바로 농촌사회에서 체제를 유지하는 주요 단위로서 기능하고 있다. 따라서 토지의 생산성 저하와 같은 비용을 감수하고서라도 협동농장 체제의 외형을 유지하는 것으로 보인다.

고에너지형 농업기반시설 및 농기계가 중심이 된 북한의 농업체제 또한 북한의 토지황폐화와 식량문제를 악화시킨 요인으로 작용한다. 북한은 넓은 평지를 가지고 있는 소련과 동유럽을 모형으로 하여 협동농장 체제와 농업시스템을 계획하였고, 이에 맞추어 농기계도 트랙터 중심의 대형으로, 그리고 수리시설도 초대형의 전기 펌프로 지형의 높낮이를 극복하는 형태로 구성하였다. 이는 산지가 많은 북한의 자연환경 속성에 부합하지 않았을 뿐 아니라, 농업의 유지를 위해 에너지가 많이 드는 구조를 만들었다. 그리고 대형의 시설은 유지관리를 위해서는 높은 유지보수 기술과 충분한 수리부속의 공급이 필요했다. 결국 에너지와 자원이 부족하게 되면 농업기반시설의 운영은 불가능한 형태가 만들어지게 되었다.

북한은 주체성과 자력갱생을 외치지만, 식량자원과 농업을 위한 에너지 자원은 과거부터 해외에 절대적으로 의존하는 편이었다. 1980년대 중반 이전에는 사회주의권과의 경제협력으로, 이러한 자원을 “우호가격”으로 도입할 수 있었으며, 1960년대 이후 중국과 소련의 대립에도 불구하고, 이를 오히려 이용해서 유리한 방식으로 수입 또는 원조를 이끌어낼 수 있었다. 그러나, 이는 1980년대 중반 이후 냉전이 해소되고 사회주의권이 붕괴되면서, 그리고 이들이 남한과의 협력 관계를 만들고 자본주의 체제로 편입되면서, 북한이 식량과 에너지 물자 수입에 받았던 특혜는 점차 해소되고 이들 또한 국제자본주의 시장에 편입될 필요가 있었다. 그러나, 1970-1980년대 북한은 서구 및 제 3세계 국가와의 거래에서 여러 가지로 신용도를 잃은 상태였고, 종전의 유리한 거래를 할 수는 없었다. 결국 이로 인한 에너지와 식량자원의 부족은 북한의 토지황폐화 문제에도, 식량난에도 치명적으로 작용하였다.

정치적·경제적 고립에 북한이 선택한 것은 벼랑 끝 전술, 즉 핵개발이었

다. 특히 중국과 소련이 한국과 수교하고, 북한은 서구권과 그렇게 하지 못하면서, 북한은 정치적 고립을 강하게 인식하고, 자기보호 또는 더 유리한 조건으로 협상하기 위한 핵개발의 길로 나아가게 된다. 이는 1990년대 초반 북핵위기로 표면화되고, 이후 여러 변곡점이 있었지만, 아직 해결되지 못한 상태이다. 결국 이러한 북한의 선택은 여러 가지 경제 제재를 야기하고 북한의 고립을 심화시켜, 북한의 식량난을 일으키고 토지황폐화를 가속화시키는 요인으로 작용하게 된다.

## 2) 자연환경적 요인

북한을 포함하여 한반도는 근본적으로 많은 인구를 부양하는 데 취약한 자연환경속성을 가지고 있다. 한반도는 동북아시아 지역 전체에 비해서 평균고도가 상대적으로 낮지만, 평균경사도는 높으며, 지형다양성이 높은 편이다(박수진, 2014). 그 말은 지형적으로 기복이 많고 평지가 적어 농업에 이용할 수 있는 토지가 적다는 것으로 해석된다. 기후 측면에서도 한반도는 취약성이 많다. 한반도는 동북아시아 특유의 몬순 기후의 영향을 받아 여름철 집중호우와 태풍의 영향권 하에 있으며, 이는 수문학적으로 높은 유량계수를 보이고 홍수의 빈도가 높다. 반면 겨울철에는 대륙의 영향을 받아 강우가 드물고 건조한 기후형태를 보인다. 그럼에도 불구하고 한반도는 과거부터 현재까지 높은 인구밀도를 유지하고 있는 지역으로, 인간의 손이 닿지 않은 곳은 찾을 수 없을 정도로 인간활동의 높은 영향을 받았다. 이는 지형·기후 조건의 불리함과 합쳐져 전세계적으로 낮은 수준의 토지 생산성을 가지고 있다. 이는 조선시대 후기 당시 소빙기 기후와 함께 대기근의 주요한 원인으로 제기되곤 한다.

북한 또한 농업생산성을 떨어트리는 한반도의 자연환경속성을 가지고 있으며, 남한보다 대체로 더 불리한 환경조건을 가지고 있다. 지형적으로는 산지의 면적이 5%이상 더 많고, 산세가 더 급한 편이다. 그리고 북쪽에 위치하고 있어 평균기온과 농업가능일수가 보다 더 적은 편이며, 대륙에 영향을 받아 강수량도 대체로 다소 적은 편이다(부경생 등, 2001).

앞서 언급하였듯 이러한 불리한 환경조건을 극복하려는 노력이, 오히려 농업환경에 불리해지는 환경을 만들었다. 먼저 다락밭으로 대표되는 산지 개간의 노력이 산지의 토양침식을 가속화시켰으며, 이는 산사태 위험성을 높였다. 이는 1975년 “자연개조사업”으로 인해 가속화되었다고 평가되며,

1980년대 후반 이를 되돌리려는 정책에도 불구하고, 계속 진행되고 있는 실정이다. 또한 1990년대 대기근 이전 독려되었던 옥수수의 경우 뿌리가 얇은 특성이 있어, 산지 재배시 토양침식을 가속화시키는 경우가 있다(부경생 등, 2001). 또한 연료자원 채취를 위한 산림벌채 또한 나대지를 늘려 토양침식을 가속화시키고 산사태 위험성을 높이는 문제를 야기하였다.

토양의 물리적 침식 뿐만 아니라 토양의 화학적, 질적 저하도 심각한 문제이다. 토양의 질적 문제를 해소하기 위해 북한은 화학비료와 퇴비를 확보하기 위한 노력을 계속 기울이지만, 이는 북한의 비료부족이 심각했음을 나타내는 것이기도 하다. 여러 정보에서 북한 토양의 토질 저하와 산성화에 대해서 언급되어 있다. 특히 앞서 언급한 옥수수의 경우 영양성분을 많이 요구하기 때문에 토질 저하와 산성화와 밀접하게 연관되는 작물이다. 그리고 생산성을 높이기 위한 과도한 밀식재배 또한 토양의 질적 저하를 심화시켰을 것으로 예상할 수 있다.

자연환경적인 외부요인은 급변기후현상이 대표적이다. 앞서 언급하였듯 빈번한 급변기후사태는 몬순과 대륙기후가 동시에 영향을 주는 한반도에는 일반적인 현상이라 할 수 있다. 그러나 최근 전지구적 기후변화에 따른 급변기후사태의 증가는 한반도에도 큰 영향을 주었다. 특히 1990년대 중반 북한의 대기근 이전에 있었던 가뭄, 홍수, 한발 등의 일련의 기후 재해는 북한의 대기근을 일으키는 방아쇠 역할을 했었을 것으로 추정하고 있다. 이후에도 전지구적 기후변화와 연관지을 수 있는 각종 기후재난이 발생하여 남과 북에 많은 피해를 주고 있으며, 여러 가지 요인들과 결합하여 토지황폐화를 가속화시키고 기근 발생 가능성을 현재도 높이고 있는 것으로 예상해 볼 수 있다.

### 3. 사회생태시스템 맥락에서의 개념모형 도출

서론과 2절에서 확인한 대로 북한 토지황폐화와 식량생산 감소문제와의 관계에 대해서는 구체적인 요인이나 상호작용, 프로세스가 명확히 알려진 바 없으며 각종 연구에서도 명확하게 드러나지 않았다. 이는 서론에서 언급하였듯 토지황폐화와 식량생산 감소문제가 가지고 있는, 그리고 사회생태시스템의 복잡적응계적 특성에서 비롯된 것으로 보이며, 북한의 자료 부족 또한 역할을 하고 있다고 볼 수 있다. 따라서, 북한의 토지황폐화와 식량생산량 관련된 프로세스를 파악하기 위해서는, 부족한 근거와 역사적·거시적 기술(記述)에 바탕을 둔 직관에 어느 정도 의존할 수밖에 없다.

서론에서 언급하였듯, 북한의 토지황폐화와 식량생산 감소문제는 사회생태시스템(SES)의 속성을 가지고 있다. 따라서 앞서 도출한 요인들을 사회생태시스템 맥락으로 구분하고, 이들 사이를 기존의 연구와 문헌을 토대로 연결해 보았다. 이는 그림 2-14와 같다. 편의상 요인들은 “사회시스템”과 “생태시스템”으로 구분하였다.<sup>69)</sup> 앞서 표 2-13에서 도식화한 부분 중, 사회시스템은 “사회경제적·제도적 요인”과 관련된 요인을 말하며, 생태시스템은 “자연환경적 요인”과 관련된 요인들을 말한다. 그리고 표 2-13의 구분에 따라 외부요인, 근본원인, 현상으로 사건을 나누어 보았다. 이를 바탕으로 앞서 확인했던 토지황폐화와 식량생산량 감소 관련 요인을 관계에 따라 배치하였다. 세부적인 내용은 다음과 같다.

사회시스템의 외부요인은 대외관계로 인한 에너지와 식량수입의 변화를 들 수 있을 것이다. 사회시스템의 내부적인 측면에서는 사회주의적 계획경제체제와 “주체사상” 체제가 근본적인 요인으로 작용할 것이다. 이 연구의 관점에 맞게 사회시스템에서 발생하는 현상은 주로 농업경관에서 나타나며, 협동농장과 고에너지 농업기반 시설로 요약하였다.

생태시스템에서의 외부요인은 기후 및 환경변화와 이에 대한 적응전략이 있다. 이는 근본적으로 북한이 가지고 있는 기후, 지형 등 환경취약성과 결합하여, 환경에 영향을 줄 것이다. 많은 생태환경 현상 중 토지황폐화 및 식량생산 감소와 직접 연관되는 부분은 토양시스템이므로, 토양의 속성으로 요약하였으며 이는 토양의 생물리적, 화학적 속성으로 구분된다.

“주체농법”은 사회시스템과 생태시스템을 연결지으며, 원인과 현상의 중간 정도의 형태라고 보았다. 다락밭의 개간, 밀식재배, 작물선택 등 주체

69) 현실의 세계에서는 분명하게 구별되지 않는 부분이 많지만, 명확한 도식화를 위해 구분하였다.

농법의 많은 부분은 “자연개조”와 밀접한 연관이 있다. 따라서 주체농법의 많은 부분은 토양의 물리적·화학적 성질과 밀접한 연관이 있기 때문에 생태시스템의 현상들과 연결될 수 있다.

이 두 시스템의 결과는 토지이용의 변화와 식량생산량으로 요약할 수 있다고 보았다. 토지이용 변화는 식량생산량의 변화에 영향을 줄 뿐 아니라, 토지이용의 결과에 따라 생태시스템이 가지고 있는 회복력(resilience)에 영향을 주게 된다. 이는 토지황폐화와 거의 같은 맥락으로서, 토지이용 결과에 따라 환경시스템이 저하된다면 이는 토지황폐화라고 할 수 있다. 토지이용의 변화<sup>70)</sup>는 환경시스템의 속성변화(토양 질의 변화)가 결합하여 식량생산량의 변화를 유발한다. 식량생산량의 양 자체는 다시 사회시스템에 영향을 주는데, 이는 식량증산의 압박도의 증감(식량압박, food pressure)의 형태라고 보았다.

토지이용의 변화와 식량생산 변화가 사회시스템과 생태시스템에 미치는 영향은, 서론에서 언급하였던 토지황폐화와 식량부족 문제의 되먹임의 연결고리(feedback loop)를 나타낸 것이라 할 수 있다. 실제 역사에서 주체농법이 강화되고, 이를 통해 자연에 대한 적극적인 이용을 권장하게 되는 것이 바로 식량압박에 대한 사회시스템 반응의 대표적인 사례라 할 수 있을 것이다. 이에 따라 생태시스템도 지속적으로 토양의 속성이 악화, 즉 토지황폐화가 발생하는 토지황폐화 악화의 연결고리가 만들어지게 될 것이다. 이는 점진적으로 토지황폐화와 식량부족의 위험성을 높였으며, 결과적으로 1990년대 대기근을 일으킨 근본 원인으로 작용하였을 것이다.

그림 2-14의 모식도에서 도식화한 요인과 관계의 방향, 강도 등은 문헌과 연구를 바탕으로 한 유추의 결과이다. 실제로 북한은 자료가 부족하여 거의 알지 못하는 모형(blackbox)에 가까우며, 대부분의 토지황폐화 문제 관련 사회생태시스템은 블랙박스에 가까운 그레이박스(greybox) 모형일 것이다. 다음 절에서는 이 모식도를 기초로 해서, 자료와 통계기법을 바탕으로 해당 모식도가 어느 정도 합리성을 갖추고 있는지 평가하고, 가능하다면 보완해나갈 계획이다.

---

70) 단순 토지피복(농토, 산지 등)이 아닌, 작물 선택 노동력 투입, 토지의 소유권 등 토지에 대한 인간의 활동 모두를 포괄한다.

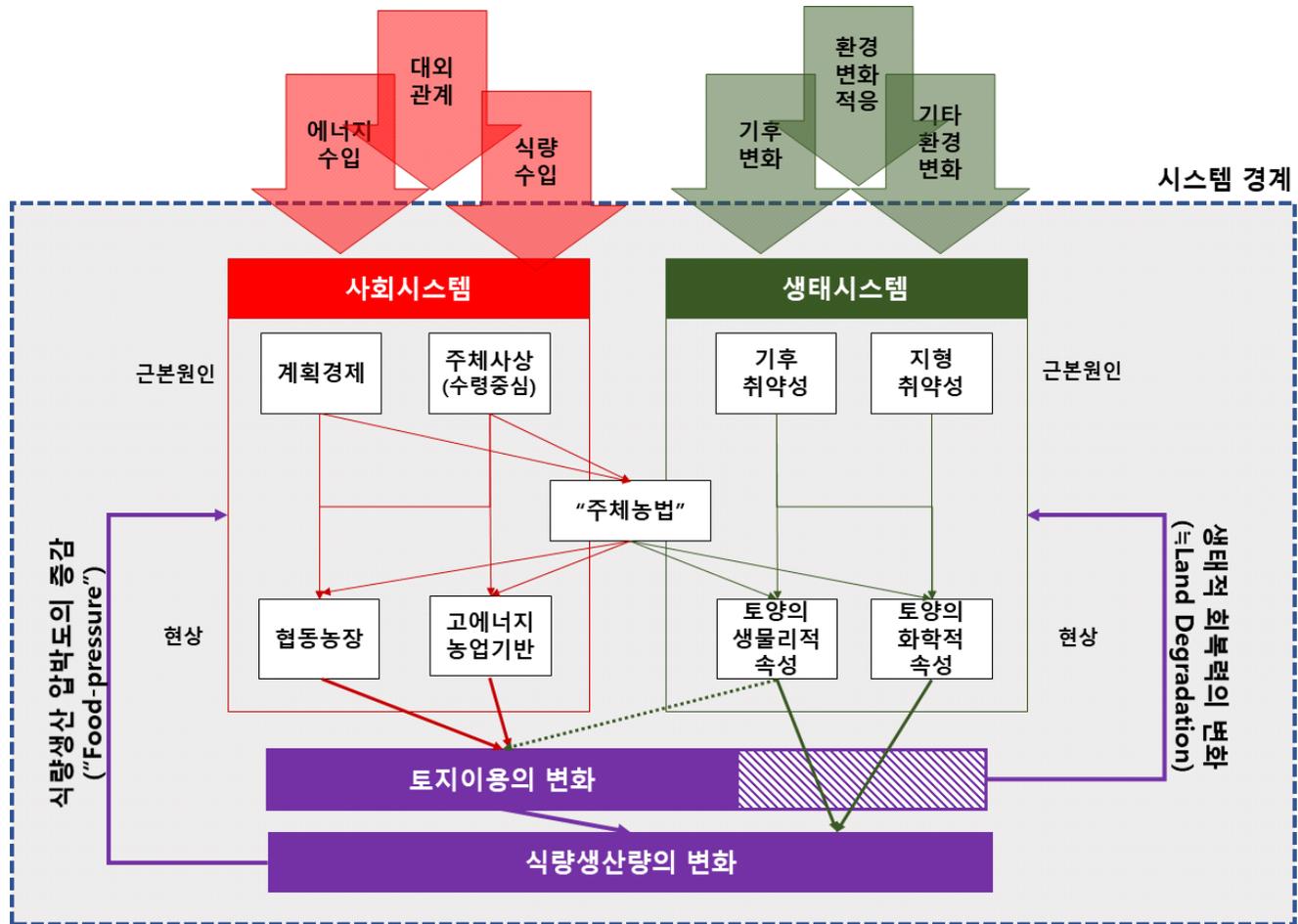


그림 2-14. 사회생태시스템 맥락을 고려한 북한 토지황폐화와 식량생산량 감소문제 개념모형

## 제 4 절 북한 토지황폐화와 식량생산 감소문제 요인들 간의 관계

앞서 3절에서는 북한의 토지황폐화와 식량생산 감소문제를 역사문헌과 1~2절에서 확인한 제한적 정보를 바탕으로 거시적으로 요인을 파악하고, 이들의 관계성을 파악하여 개념모형을 구축하였다. 4절에서는 이에 대해서 통계적 방법을 이용하여 그동안 연구가 부족하였던 관계성에 대해서 구체적으로 접근하고자 한다. 이를 바탕으로 거시적 개념모형에 대해서 부족한 정보를 보완하고, 현재 가지고 있는 자료의 수준에서 어느 정도까지 접근이 가능한지를 확인하고자 한다.

2절 후반부에서 확인한 대로 많은 연구에서 토지황폐화와 식량생산량 감소 문제의 관계를 파악하고자 하였다. 그러나 이 연구들은 앞서 언급하였듯 단선적이었으며, 북한 토지황폐화와 식량생산량 감소문제를 종합적으로 파악하려는 시도가 미흡하였다. 그뿐만 아니라 통계적 유의도와 논리성의 측면에서도 한계가 있었다.

그러나 서론에서 언급하였듯 토지황폐화 문제와 식량생산량 감소문제의 통계적, 수량적 관계성을 파악하는 것은 북한 연구 이외에서도 많은 한계가 봉착하였으며, 이 연구에서도 마찬가지였다. 그러나 최대한 많은 자료와 방법을 바탕으로 알려지지 않은 부분을 모색하고자 하는 것이 이 절의 목적이다.

### 1. 관련 자료와 분석방법

북한의 토지황폐화와 식량생산 감소 관련 자료는 부록 1에서 정리한 자료를 활용하였다. 이 자료는 공간자료가 빠진 시간자료(주로 인문사회 자료)와 공간자료가 포함된 시공간자료(식생지수, 기후자료 등), 시간자료가 없는 공간자료(지형자료)로 나눌 수 있다.

분석에 앞서 토양의 생·물리적 속성을 제시할 수 있는 2차 자료인 토양 침식모형 자료를 사용하였다. 토지황폐화의 중요한 지시자인 토양의 생·물

리적 속성과의 관련자료가 지형과 식생지수로 나뉘어 있으므로, 그리고 시간 차원이 없는 지형지수에 기후 및 식생 관련 시계열 자료를 덧붙여 시간의 차원을 추가하기 위한 목적으로 활용하였다.<sup>71)</sup> 토양침식 관련 모형 중, 지형지수와 식생지수, 기후를 반영할 수 있는 USLE를 활용하여 자료를 도출하였다.<sup>72)</sup> 이 방식은 실제 북한에 대한 국내 토지황폐화 연구 초기(2000년대 전후)에 많이 적용된 바 있다(이민부 등, 2003b; 2006; 2008). USLE는 토양침식량을 추정하기 위해 널리 사용되는 경험모형으로, 가장 널리 사용되는 Wischmeier and Smith(1978)의 공식은 아래와 같다(식 2-1).

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (\text{식 2-1})$$

- A : 연간 토양 유실량
- R : 강수에 의한 침식인자
- K : 토양에 의한 침식인자
- LS : 지형인자(L : 침식사면길이, S : 침식사면의 경사각)
- C : 식생(지표피복)에 의한 침식인자
- P : 경지개간 형태에 의한 침식조절인자

이 중 다른 인자들은 여러 가지 직간접 자료에 의해서 계산할 수 있다.<sup>73)</sup> 그러나 문제는 방문할 수 없는 지역의 식생과 지표 피복의 인자들(C,P 인자) 어떻게 얻고 반영하여 토양침식량을 추정하느냐는 극복하기 어려운 문제였다. 이와 관련하여, 앞서 설명한 이민부 등(2003b; 2006; 2008)의 연구와 다른 광범위한 지역을 대상으로 한 연구에서는 이미 구축

71) 부수적으로는, 식생지수가 제시하는 정보가 “식생의 건강성”으로 광범위하므로 식생지수를 명확한 지수로 변환하고자 하는 목적 또한 있었다.

72) Universal Soil Loss Equation, “범용토양유실공식”으로 해석 가능

73) 4장의 3절 “다행위자시스템 모형 구축”에서도 동일한 USLE 모형이 사용된다. 본 장에서는 해당 모형의 사용 결과를 사용할 뿐이지만, 4장 3절에서는 각 지표들이 모형의 구성요소가 되기 때문에, 세부적인 지표는 4장 3절의 해당 부분에서 자세하게 설명하는 것이 타당하다고 보았으며 필요시 해당 부분을 참고하기 바란다. 이 장에서는 내용전개에 필요한 USLE와 식생지수와의 핵심 연결 지표와 연관된 C, P인자에 대해서만 설명한다.

된 토지피복지도를 바탕으로 이를 대체하여, 토지피복도에 맞는 C와 P값을 도출하는 형태로 연구를 진행하였다. 하지만 알려진 형태<sup>74)</sup>의 북한 토지피복도는 해상도<sup>75)</sup>와 토지피복 구분<sup>76)</sup>의 정밀도가 떨어지거나, 검증이 제한적이기 때문에 신뢰성이 떨어지는 문제<sup>77)</sup>가 있다. 또한, 지형과 마찬가지로 정적인 자료이기 때문에 본 연구와 북한의 특성에는 맞지 않는 방법이라고 판단하였다.

Van der Knijff *et al.*, (1999;2000)는 유럽 일원의 광범위한 지역의 (R)USLE 모형의 적용시 때 유사한 문제의식을 느끼고 있었고, 식생지수를 통해서 C인자와 P인자를 계산하는 대안을 확인하였다. 이 연구의 대상지역인 유럽과 기후지역이 다르다는 문제가 있지만, 이를 북한 토양침식량에 활용한다면, 앞서 제기된 자료의 신뢰성 문제와 정적인 자료로서의 문제의 상당 부분을 해결할 수 있다고 판단하였다. 그 공식은 식 2-2와 같다.

$$C = \exp\left(-\alpha \times \frac{NDVI}{\beta - NDVI}\right) \quad (\text{식 2-2})$$

C : 식생(지표피복)에 의한 침식인자(C)

- 
- 74) 대표적인 사례로 환경부에서 제공하는 토지피복도(<http://egis.me.go.kr>, 30m 공간해상도)가 있으며, 그 외에는 대체로 100m 이상의 공간해상도를 가지는 국제적 범위의 토지피복도가 있다. (사례 : USGS EROS, 1km단위, [https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-land-cover-products-global-land-cover-characterization-glcc?qt-science\\_center\\_objects=0#qt-science\\_center\\_objects](https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-land-cover-products-global-land-cover-characterization-glcc?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects))
- 75) 생태환경 변수의 프로세스 스케일을 확인한 정관용 등(2012)의 연구를 예로 들면, 토양침식량에 영향을 끼치는 사면의 물질이동과 연관이 높은 경사도, 사면곡면률, 사면유역지수의 프로세스 스케일이 각각 750m, 180m, 130m로 도출되었다. 따라서 앞서 예시와 마찬가지로 1km이상의 공간해상도를 갖는 토지피복도는 토양침식 프로세스를 반영하기에 적절하지 못할 가능성이 높다.
- 76) 이민부 등(2008)은 C인자를 정리할 때 토지이용을 논, 밭, 나지, 수관(0-100%까지 4개로 구분), 도시지역 및 수계, 초지로 구분하였다. 그러나 앞서 언급한 환경부 토지피복도(<http://egis.me.go.kr>)는 북한을 대상으로는 대분류 토지피복만 제공하며 이는 도시지역, 농지, 산림, 초지, 나지, 수계 정도로 분류된다. 이민부 등(2008)을 적용하기 위해서는 농지를 논과 밭으로 추가 분류하고, 산림의 수관밀도를 확인할 필요가 있다.
- 77) 환경부 대분류 토지피복도의 제작과정에 따르면, 현지조사를 통한 자료의 보정은 남한의 자료에만 제한되어 있으며, 이에 따라 북한은 위성영상을 통한 정확도 검증만 진행한다. 이에 영향을 받아 75%이상의 정확도가 검증되어야 하는 남한의 자료와는 달리, 북한의 경우 70%만 정확도가 보증된다면 정확도를 충족하는 것으로 설명되어 있다 (<http://egis.me.go.kr>).

$\alpha, \beta$  : 경험지수(대개  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 1로 이 연구에서도 1로 적용)

이 연구에서는 이 방법을 적용하여 USLE를 연별 자료로 구하여 토양의 생물리적 속성을 대표하는 2차 시공간자료로 활용하였다.

이 절에서는 시간자료 간의 분석과 (시)공간자료 간의 분석으로 나누어 진행하였다. 시간자료에는 시공간자료를 복한 전체로 요약·축소하여 시간자료로 요약한 자료가 포함되며, 시간 단위는 연 단위로 통일하였다.<sup>78)</sup> 상관관계분석을 통해 자료 간의 관계를 파악하고, 유의미한 자료를 바탕으로 회귀분석을 진행함으로써 관계 모형을 만드는 형태로 진행하였다.

상관관계분석은 자료 간 피어슨 상관관계를 확인하는 형태로 진행하였다. 단, 문헌에서 확인하였을 때 그리고 논리적으로 판단하였을 때 분명한 상관관계가 있다고 판단하나 명확한 관계성이 도출되지 않는 결과는 시차에 의한 것이라 보았다. 이를 대상으로는 시차의 변화에 따른 교차상관관계분석(Cross-correlation)<sup>79)</sup>을 진행하여 상관관계를 확인하였다.

그 결과 관계성이 높으며 논리적으로 타당한 지표들을 대상으로 최소자승법(OLS)에 기반을 둔 단순회귀분석을 적용하였다. 최종적으로는 홍석영 등(2009)의 연구와 마찬가지로 식량생산 예측모형을 만들으로써 식량생산과 식생지수(토지황폐화 지표), 기타 지표와의 관계를 파악하는 것으로 하였다. 따라서 식량생산 관련 지표를 종속변수로, 그렇지 않은 자료를 독립변수로 설정하였다.

(시)공간자료는 각 자료의 공간해상도 차이를 고려하여 임의자료 표집(random sampling)으로 진행하였으며, 분석 횟수마다 1,000개의 복한 내의 임의자료 표집 지점을 선정하여 산출 후 분석을 진행하였다. 먼저 임의자료 표집 결과에 대한 피어슨 상관관계분석을 진행하여, 시·공간에 따른 각 요인 지표 간의 관계를 확인하였다.

---

78) 한 예로 정규화식생지수는 복한 전체 연평균, 연 최대값, 연 합계, 연 변동계수로 요약하였다.

79) 두 시계열 사이에 존재하는 발생 시간의 시차관계를 이용하여 두 시계열사이에 존재하는 통행성, 선형성 도는 후행성의 관계를 규명하기 위해 활용하는 통계적 검정 기법을 말한다(박재수·이재수, 2019).

그리고, 앞서 도출한 시간자료 회귀모형에서 토지황폐화 지표로 정의한 “식생지수”를 예측하고자 하는 목적으로, 식생지수를 종속변수로 그 외 지형·기후 환경변수를 독립변수로 설정하는 회귀분석을 진행하였다. 회귀분석 진행에는 시공간 차원 중 시간 차원을 줄이기 위해 각 임의자료 표집 지점마다 자료의 시점을 임의로 지정하는 형태로 설정하였다.<sup>80)81)</sup> 이 경우 임의성이 너무 크기 때문에 시간과 공간 임의표집을 5회 반복하여 실시하여 그 결과를 모두 제시하였다.

공간자료에 대한 회귀분석의 신뢰도를 높이기 위해서는 모형의 지표와 잔차의 공간적 자기상관성(spatial autocorrelation) 문제를 고려할 필요가 있다(이희연·노승철, 2012). 따라서 최소자승법 이외에도 공간시차모형(spatial lag)과 공간오차모형(spatial error)을 적용한 회귀분석을 진행하여 이 결과들을 비교하였다.

공간시차모형은 종속변수에 공간적 자기상관성이 있다고 가정하는 회귀분석 모형이다(이희연·노승철, 2012). 회귀식의 종속변수 항에 공간가중행렬을 추가함으로써 공간상관으로부터 야기되는 오류를 제거하고자 하는 방법이며 식은 아래 식 2-3과 같다(이희연·노승철, 2012; 오창화·김영호, 2016; 이석호·김감영, 2019).

$$Y = \rho WY + X\beta + \epsilon \quad (\text{식 2-3})$$

Y : 독립변수, X : 종속변수, β : 종속변수의 추정계수, ε : 오차항,  
 WY : 공간시차 변수, ρ : 공간시차항의 추정계수

공간오차모형은 오차에서 자기상관성이 발견되었을 때<sup>82)</sup> 사용하는 회귀분석 모형으로 다음 식 2-4와 같이 정의할 수 있다(이희연·노승철, 2012;

80) 즉, 공간뿐 아니라 시간도 임의자료표집의 형태로 진행하였다고 보면 된다. 단, 한 지점에 추출된 지표의 시점은 동일하다.

81) 시간자료와 시공간자료 모두 시계열자료로 시계열분석 모형을 활용하는 것이 타당하겠으나, 이 연구에서 사용하는 자료의 양이 많고 이에 따라 분석 결과의 해석에 어려움이 있었기 때문에 시계열 분석방법은 따로 적용하지 않았다.

82) 이희연·노승철(2012)는 이러한 경우의 원인을, 관측되지 않았거나 관측할 수 없는 변수가 오차에 포함되어 있거나, 측정단위와 실제 공간범위가 불일치하는 문제 등으로 발생할 수 있다고 본다.

오창화·김영호, 2016; 이석호·김감영, 2019).

$$\begin{aligned} Y &= X\beta + \epsilon \\ \epsilon &= \lambda W\mu + \mu \end{aligned} \quad (\text{식 2-4})$$

Y : 독립변수, X : 종속변수,  $\beta$  : 종속변수의 추정계수,  $\epsilon$  : 오차항,  
W : 공간가중 행렬,  $\lambda$  : 공간 오차모형의 공간 회귀계수,  $\mu$  : 임의 오차항

본 절의 모든 분석은 R 3.6.2를 사용하여 진행하였으며, 공간자료의 임의표본추출은 ESRI ArcGIS 10.6을 사용하여 진행하였다.

## 2. 시간자료 간의 관계성을 통한 식량생산량 추정모형 개발

북한의 식량생산량 추정모형을 도출하기 위한 분석에 앞서, 시간자료<sup>83)</sup>를 대상으로 상관분석을 실시하였다. 부록 1에 설명한 자료 중 시간자료로 나타낼 수 있는 모든 자료를 투입하였고, 이 중 유의미하다고 판단한 자료들만 표현하였다. 자료에 대한 설명은 식생지수와 다른 지수와의 관계에 대해서 우선 설명하고, 단위면적당 식량생산량, 총 식량생산량 토양침식 지표 순으로 설명하였다.

표 2-14는 식생지수와 식량생산 및 타 지표와의 관계성을 확인한 결과 중 일부다. 식생지수가 식생의 건강도와 식물의 생체량을 나타낸다는 점에서 식량생산량 관련 지표와 밀접한 관계가 있을 것으로 예상하였으며, 특히 단위면적당 식량 생산량과 밀접한 양의 상관관계가 있을 것이라 예상하였다. 그러나 기대와는 달리 주로 밭 작물(보리·밀 등) 관련 지표와 연관이 있을 뿐 나머지 지표에서는 상관성이 낮거나 음수의 상관관계가 도출되는 등의 문제가 있었다. 오히려, 석유 에너지, 탄소배출 등과 상당한 상관관계를 보여주었다<sup>84)</sup>.

표 2-15는 단위면적당 식량생산량 지표와 식생지수를 제외한 다른 지표와의 상관관계에 대한 주요 결과를 요약한 것이다. 역시 에너지와의 상관관계 지수가 0.6 이상의 높은 상관관계를 보여주고 있다. 이는 표 2-14의 결과와 함께 에너지의 투입이 농업기반시설, 농업기계의 운용과, 비료공급에 영향을 준다는 것을 보여주는 결과라 할 수 있다. 본 연구의 연구대상과는 직접적인 연관은 없으나, 특이한 점은 단위면적당 식량 생산 지표와 기대수명 및 사망률과의 관계가 높게 나타난다는 점이다. 이는 앞선 2절의 식량생산 감소에 의한 사회적 파급효과를 재확인하여주는 결과일라 할 수 있다<sup>85)</sup>. 총곡물생산량지표(표 2-16) 또한 에너지 및 인구와 관련된 지표에서 유사한 결과가 도출되었다.

---

83) 시간자료로 요약한 시공간자료들을 포함한다.

84) 이는 에너지 투입이 비료의 투입과 농기구와 농업기반시설 운영에 긍정적인 역할을 수행할 뿐만 아니라, 연료와 식량증산 목적의 산지개간에 영향을 준다는 것을 보여주는 결과라 할 수 있다.

85) 단, 이 연구의 목적과는 관련도가 낮아 이에 대한 단순 기술에 그치며 이는 추후 추가 연구에서 확인해 볼 계획이다.

표 2-14. 식생지수와 타 자료와의 상관관계분석 주요결과

자료	식생지수			
	평균	최대값	합계	변동계수
단위면적당 식량 생산량(Hg/ha)	-0.1991	-0.2266	-0.2442	0.1429
농업지역면적(Ha)	<b>0.4308</b>	0.3271	<b>0.4067</b>	<b>-0.4898</b>
옥수수 재배면적(Ha)	<b>0.5284</b>	<b>0.4150</b>	<b>0.5066</b>	<b>-0.5417</b>
감자 재배면적(Ha)	-0.4227	-0.4119	-0.3168	<b>0.5233</b>
벼 생산면적(Ha)	<b>0.6197</b>	<b>0.5788</b>	<b>0.6084</b>	-0.3049
보리 생산량(톤)	0.3333	<b>0.3029</b>	0.2684	-0.5157
감자 생산량(톤)	<b>-0.4416</b>	-0.4364	-0.3106	<b>0.4765</b>
밀 생산량(톤)	0.4420	<b>0.4554</b>	0.4591	-0.2611
단위면적당 보리 생산량(Kg)	0.4829	<b>0.4185</b>	0.4042	-0.5574
단위면적당 밀 생산량(kg)	0.3035	0.3062	0.3566	0.0416
식량수입량(톤)	-0.3497	-0.1387	-0.3299	<b>0.5714</b>
1인당 식량수입량(kg)	-0.3182	-0.1060	-0.3058	<b>0.5486</b>
총에너지소비량(QuadBTU)	<b>0.4362</b>	0.2425	0.0708	-0.4438
석탄소비량(QuadBTU)	0.3460	0.2101	0.0599	-0.2883
석유제품소비량(QuadBTU)	<b>0.4294</b>	0.1470	0.0366	<b>-0.6175</b>
재생에너지 소비량(QuadBTU)	0.2575	0.2360	0.1051	-0.3981
전력생산량(10억kwh)	<b>0.4145</b>	0.2116	0.1023	<b>-0.6002</b>
에너지소비량(10억kwh)	<b>0.4123</b>	0.1969	0.0971	<b>-0.6090</b>
1인당 에너지 밀도 (MMBtu/person)	0.3891	0.1290	0.0036	<b>-0.5069</b>
탄소배출량	<b>0.4031</b>	0.2101	0.0633	-0.4012
석유수입량(Mb/BTU)	0.3182	0.0203	0.0092	<b>-0.6081</b>
석탄수입량(석유환산단위)	0.2467	0.0048	-0.0711	<b>-0.5084</b>
석탄수출량(석유환산단위)	<b>-0.4766</b>	-0.3098	-0.1578	0.4109
1000명당 원유 양	0.3359	0.0117	-0.0396	<b>-0.6606</b>

\* 자료 선택 방법 : 하나 이상의 식생지수 자료가 상관지수 절대값 0.3을 초과하는 자료 선택, 해당하지 않더라도 연구자가 중요하다고 생각하는 자료 추가

표 2-15. 단위면적당 식량생산량 지표와 타 자료와의 상관관계분석 주요 결과

자료	단위면적당 곡물생산량(T/ha)
총에너지생산량(QuadBTU)	0.7120
석탄생산량(QuadBTU)	0.7192
석유류소비량(QuadBTU)	0.6693
석탄수입량(Mst)	0.7340
석탄수출량(Mst)	0.7376
기대수명(연)	0.7823
사망률(1000명당 사망자수)	-0.7951

\* 자료 선택 방법 : 상관지수 절대값 0.6을 초과하는 자료 선택(앞 표와 중복 제외), 연구자가 중요하다고 생각하는 자료 추가, 표 2-14와 중복되는 항목 제외

표 2-16. 총곡물생산량 지표와 타 시간자료와의 상관관계분석 주요결과

자료	총곡물 생산량(톤)	자료	총곡물 생산량(톤)
기대수명(연)	0.7972	석유류생산량(QuadBTU)	0.6996
사망률(1000명당 사망자수)	-0.8482	재생에너지소비량(QuadBTU)	0.6466
인구증가율	0.6567	전기발전량(10억kwh)	0.6466
노인부양비비율	-0.6317	전기소비량(10억kwh)	0.6416
화석연료소비량	0.7120	인구당 전기 집중도(MMBtu/person)	-0.1245
총에너지생산량(QuadBTU)	0.7596	탄소배출량	-0.7743
석탄생산량(QuadBTU)	0.7625	원유수입량(Mb/d)	0.6096
재생에너지생산량(QuadBTU)	0.6627	석탄수입량(Mst)	0.7786
총에너지소비량(QuadBTU)	-0.5072	석탄수출량(Mst)	0.7703
석탄소비량(QuadBTU)	-0.8581		

\* 자료 선택 방법 : 상관지수 절대값 0.6을 초과하는 자료 선택(앞 표와 중복 제외), 연구자가 중요하다고 생각하는 자료 추가, 표 2-14~15와 중복되는 항목 제외

표 2-17. 토양침식량 지표(USLE)와 타 자료와의 상관관계분석 주요결과

자료	USLE				
	평균	중앙값	최대값	표준편차	변동계수
총식량생산량(톤)	0.5446	0.5359	0.6234	0.5838	-0.0487
식량수출량(톤)	0.5405	0.4795	0.7310	0.7112	0.1248
식량작물생산면적(ha)	0.3965	0.2743	0.7962	0.7222	0.3965
옥수수생산면적(ha)	0.3488	0.1896	0.7942	0.7323	0.4744
쌀생산면적(ha)	-0.0811	-0.1894	0.5106	0.3972	0.6605
옥수수생산량(톤)	0.5696	0.5523	0.6552	0.6243	-0.0065
단위면적당 보리생산량(Hg/Ha)	0.3465	0.2101	0.7171	0.6701	0.4410
단위면적당 옥수수생산량(Hg/Ha)	0.5660	0.5645	0.5998	0.5755	-0.0649
단위면적당 감자생산량(Hg/ha)	0.3955	0.3280	0.7435	0.6913	0.3230

\* 자료 선택 방법 : 하나 이상의 USLE 자료가 상관지수 절대값 0.3을 초과하는 자료 선택, 연구자가 중요하다고 생각하는 자료 추가

토양침식량(USLE) 지표와 다른 지표와의 상관관계분석 결과(표 2-17)는 식량생산량 지표와 상관관계가 높으나, 가정했던 것<sup>86)</sup>과는 반대의 결과도 도출되었다. 분명한 근거는 없지만 토양침식량을 늘리는 선택인 산지 개간, 옥수수 위주의 작물 선택, 밀식재배 등의 선택이 단기간내에는 식량생산량을 늘리는 결과가 초래되었기 때문이 아닐까 한다.

상관분석 결과에서는 식생지수와 식량생산량과의 관계, 침식량 지표와 식량생산량과의 관계에서 큰 상관성이 없는 결과가 도출되거나, 앞서 확인 하였던 북한의 상황과 부합하지 않는 결과가 도출되었다. 이는 토지황폐화와 식량생산과의 관계에서 발생하는 원인과 결과 간의 시차 때문으로 추정하였다. 따라서, 이 중 일부 지표를 추출하여 시차에 따라 상관관계가 어떻게 변화하는지를 교차상관관계분석을 통해 확인하였다. 북한에 대한 식량생산량 추정 모형을 목표로 하는 것인 만큼, 단위면적당 식량 생산량에 대해서는 고정하여 두고, 식생지수 관련 지표와 토양침식량 지표, 에너지 관련 지표와의 교차상관분석을 반복하였다. 그 결과 중 유의미한 결과로 정리한 것이 표 2-18과 같다.

표 2-18에서 채택된 지표는 식생지수 최대값(NDVI-MAX)과 식생지수 변동계수(NDVI-CV), 토양침식량의 변동계수(USLE-CV), 전기에너지사용량이다. 예상했던 대로 시차에 따라 상관관계의 큰 변화가 있었다. 이 중 각 지표와 단위면적당 식량 생산량 간의 타당한 시차를 반영하여 분석에 활용하였다. 식생지수 최대값은 식생의 생산량을 나타내는 지표이기 때문에 높은 양의 상관관계일 때 타당하다고 보았고, 시차가 없을 때가 가장 타당하다고 보았다. 식생지수 변동계수와 토양침식량의 변동계수는 작물이 안정적으로 자라는지 나타내기 때문에, 변동성이 커질수록 식량생산량에는 부정적인 영향을 끼친다고 볼 수 있다. 이에 이 두 지표는 단위면적당 식량생산량과 음의 상관관계인 시점이 타당한 시차라고 판단하였고, 단위면적당 식량생산량과 비교했을 때 5년 전의 시점과 관계가 가장 논리적으로 부합한다고 보았다. 마지막으로 전기에너지사용량은 단위면적당 식량생산량 지표의 3년 전 자료와의 관계가 가장 논리적으로 부합한다고 판단하였다<sup>87)</sup>.

86) 침식량이 늘어나는 경우 식량생산량에 부정적인 영향을 초래할 것이다.

87) 단, 상관관계의 절대값이 가장 높은값을 선택하지는 않았으며, 이는 표 2-19 결과를 도출하는 시행착오를 거쳐 조정된 것이다.

표 2-18. 단위면적당 곡물생산량과 상관관계가 높은 지표와의 교차상관관계(Cross-Correlation)

시차**	단위면적당 곡물생산량과의 교차상관관계			
	NDVI-MAX	NDVI-CV	USLE-CV	전기에너지 사용량
12	0.024	-0.246	0.090	0.007
11	0.069	-0.219	0.143	-0.021
10	0.109	-0.134	0.247	-0.034
9	0.111	-0.106	0.145	-0.062
8	0.186	-0.093	0.091	-0.074
7	0.269	0.043	0.081	0.004
6	0.391	0.024	0.273	0.059
5	0.457	0.018	0.529	0.171
4	0.367	0.015	0.513	0.283
3	0.247	0.262	0.308	0.347
2	0.158	0.460	-0.008	0.380
1	0.309	0.497	-0.196	0.358
0	<b>0.398</b>	0.493	-0.123	0.407
-1	0.477	0.282	0.030	0.459
-2	0.387	-0.071	0.111	0.533
-3	0.079	-0.333	0.047	<b>0.539</b>
-4	-0.083	-0.360	-0.061	0.416
-5	-0.250	<b>-0.361</b>	<b>-0.332</b>	0.252
-6	-0.236	-0.421	-0.354	0.096
-7	-0.250	-0.399	-0.322	-0.014
-8	-0.294	-0.275	-0.298	-0.138
-9	-0.135	-0.151	-0.227	-0.283
-10	-0.173	-0.015	-0.224	-0.376
-11	-0.222	0.076	-0.131	-0.417
-12	-0.240	0.155	-0.053	-0.403

\* 약어설명

- NDVI-MAX : 북한 연평균 정규화식생지수(GIMMS NDVI)의 최대값
- NDVI-CV : 북한 연평균 정규화식생지수의 변동계수(표준편차/평균)
- USLE-CV : 북한 토양침식모형(USLE, 기후, 지형 반영) 결과값의 변동계수

\*\* 시차 : 0 인 경우 단위면적당 곡물생산량과 동일시기 상관관계, -(+)일 경우에는 해당 값 만큼 이전(이후)의 시기와의 상관관계를 뜻함

\*\*\* 굵은 글씨 : 채택된 지표별 시차, "가장 상관관계가 높은"것이 채택되지 않은 이유는 이후 분석에서 지표들간의 상관성이 너무 높거나, 연구자가 생각하기에 논리가 맞지 않는 등의 이유로 여러 가지 시행착오를 거치며 조정하였기 때문임

표 2-19. 시차를 적용한 단위면적당 곡물생산량 예측 회귀모형(OLS)

종속변수	R <sup>2</sup>	보정된 R <sup>2</sup>	Durbin-Watson
단위면적당 곡물생산량(kg/ha)	0.6487***	0.5876***	1.5324*
독립변수(시차)	비표준화계수	유의확률	VIF
상수항	3585.9	0.35789	-
NDVI-CV(-5)	-48610.7	0.02644 *	1.133
NDVI-MAX(0)	10665.0	0.00220 **	1.699
USLE-CV(-5)	-1668.5	0.00473 **	1.551
전기에너지사용량(-3)	3605.9	0.01782 *	1.246

유의확률 : 0 '\*\*\*\*' 0.001 '\*\*\*' 0.01 '\*\*' 0.05 '\*' 0.1 '.' 1

표 2-19는 교차상관관계 결과로 도출된 시차를 활용하여, 단위면적당 곡물생산량과 요인들과의 관계에 대한 회귀분석 결과이다. 0.6487의 높은 설명력과 유의수준을 보였으며, 다중공선성 등 전제를 깨트리는 결과도 도출되지 않았다. 식생활력도의 높고 낮음을 나타내는 식생지수 최대값 지표가 양의 지표이고, 식생활력도의 변동성을 나타내는 식생지수 변동계수가 음의 지표로 나온 것은 1절의 결과로 미루어 보았을 때 상식적으로 타당하다고 판단된다. 침식모형(USLE)의 경우 식생지수가 투입된 변수이기 때문에 다중공선성의 문제가 우려되었으나 그렇지 않은 결과(Durbin-Watson 1.53, VIF 1.6)가 도출되었다. 침식량의 변동계수가 생산량에 부정적인 영향을 준다는 결과 자체는 타당해 보이며 “물리적 침식량”을 대표하는 변수로의 대표성을 보이는 결과로 보인다. 전기에너지사용량은 에너지를 대표하는 변수로 판단하였으며, 의도한 바와 같은 결과가 도출되었다.

표 2-19에서 도출한 곡물생산량 예측 회귀모형은 앞서 2절에서 확인한 홍석영 등(2009; 2012)에 비해서 설명력이 다소 높고, 더 많은 지표를 투입하였음에도 공선성 등의 문제가 드러나지 않은 모형으로 평가할 수 있다. 이는 현실 프로세스의 시차를 반영하였기 때문으로 보인다<sup>88)</sup>.

88) 단 해당 시차가 왜 발생하는지에 대해서는 분명히 밝혀진 바가 없으며, 2장과 3장의 내용을 바탕으로 종합적으로 논의해야 할 필요가 있다 이는 토론 및 3장의 내용에서 자세하게 다루기로 한다.

### 3. 시공간자료 간의 관계성 파악과 식생지수 예측모형 탐색

앞선 식량생산량 추정공식(표 2-19)에 따르면, 식생지수의 평균과 변동계수 등으로 북한 식량생산의 변화를 추정할 수 있다<sup>89)</sup>. 하지만 식생지수 지표는 위성영상에 대한 관측 자료로, 환경변화에 대한 모형을 구축하기 위해서는 다른 예상가능한 환경변수를 바탕으로 도출해 낼 수 있어야 한다.

식생지수의 예측모형 구축을 위해서 시공간자료 간의 상관분석을 진행하여 식생지수와 관계가 높은 대표 지형·기후변수<sup>90)</sup>를 추출하고자 하였다. 북한 전역을 대상으로 임의의 표집 지점을 선정하여 자료를 수집한 후 연도별로 상관관계분석을 실시하였다. 연도별 상관분석결과에 대한 평균, 최대, 최소, 표준편차를 요약하면 표 2-20~21과 같다.

식생지수의 최대값과 시공간자료와의 상관분석결과(표 2-20) 지형자료(고도, 사면유역지수)와의 높은 양의 상관관계를 보여주었다. 기후자료는 평균기온과 최저기온에서 다소 높은 수준의 음의 상관관계를 보여주었으며, 강수량의 경우 상관관계가 다소 낮으나 시기별로 변위가 큰 편이었다. 다만 모형에 반영하기 위한 변수 선택의 측면에서는 다른 요소를 고려해야 했다. 식생지수의 최대값을 추정하는 상관관계분석에는 평균기온과 최저기온 사이의 상관성이 높아 하나만 선택해야 했으며, 평균기온을 선택하였다. 강수량의 경우 상관성은 낮으나, 강수의 정도가 식생의 성장과 식량생산에 큰 영향을 미치기 때문에 변수에 포함시켰다. 지형변수 또한 모두 포함시켰다.

식생지수의 변동계수와 시공간자료와의 상관분석결과(표 2-21) 모든 부분에서 상관관계지수가 식생지수의 최대값에 비해 높지 않은 편이었다. 따라서 식생지수의 최대값과 같은 지표를 모형에 반영하였다.

따라서 식생지수의 평균, 표준편차, 지형(해발고도, 사면유역지수)과

---

89) 앞서 식 2-2 등을 활용하여 식생지수와 다른 예상가능한 지표를 바탕으로 토양침식 관련 지표는 쉽게 구할 수 있기 때문에 식생지수에 대한 모형에 대해서만 확인하였다.

90) 지형변수는 고도와 사면유역지수, 기후변수는 평균, 최고, 최저기온과 강수량을 활용하였다. 지형변수 중 경사도 자료는 사면유역지수와 상관성이 높고, 경험적으로 향과 곡면률 지표는 식생지수와의 상관관계가 높게 도출되지 않아 이 두 지표만을 활용하였다. 각 자료의 속성은 부록 1을 참고하기 바란다.

기후(평균기온, 강수량)으로 예측하는 예측모형을 개발하였다. 이에 앞서 표 2-22와 같이 Global Moran's I 분석을 통해 지표가 가지고 있는 공간적 자기상관성을 확인하고자 하였다. 연별 자료가 없는 지형변수를 제외한 지표는 연도별 계산을 수행하였으며, 모든 자료를 대상으로 5회의 임의시점·지점을 추출하여 계산하였다. 보간을 거친 자료인 기후자료(평균기온, 강수량)는 0.9이상의 매우 높은 Moran's I 값을 보여주었으며, 식생지수의 연평균과 변동계수는 0.4~0.6가량의 값을, 고도는 0.8 내외를, 사면유역지수는 0.3내외의 값이 도출되었다. 각 연도별 Moran's I 값에 비해 임의시점 표집을 적용한 방법이 대체로 낮은 공간적 자기상관성을 나타냈다. 다만 다른 시공간지표가 0.1정도의 차이를 보이는 반면, 강수량자료는 0.4이상의 큰 Moran's I 값의 차이를 보여 주었다. 해당 자료가 가지고 있는 공간적 자기상관성을 고려한 분석을 진행할 필요가 있음을 보여준다.

표 2-20. 식생지수 연 최대값과 (시)공간자료 간의 연도별 상관관계분석 결과 요약

1982-2015 상관계수 평균 (최소값-최대값, 표준편차)	식생지수 연 최대값	평균기온	최고기온	강수량	최저기온	고도	사면유역지수 (LogAs)
식생지수 연 최대값	1	-0.4101 (-0.5597--0.2268, 0.0825)	-0.1807 (-0.5121-0.5304, 0.1950)	-0.1370 (-0.3989-0.2257, 0.1691)	-0.4415 (-0.5460--0.2940, 0.0614)	0.5851 (0.4680-0.6643, 0.0482)	0.5041 (0.4120-0.5618, 0.0357)
평균기온	-0.4101 (-0.5597--0.2268, 0.0825)	1	0.6448 (-0.3863-0.9671, 0.3177)	0.6831 (0.2045-0.9232, 0.1899)	0.8266 (0.4820-0.9817, 0.1024)	-0.6808 (-0.7320--0.4927, 0.0603)	-0.2738 (-0.3045--0.1683, 0.0320)
최고기온	-0.1807 (-0.5121-0.5304, 0.1950)	0.6448 (-0.3863-0.9671, 0.3177)	1	0.4601 (-0.3568-0.9349, 0.3397)	0.3783 (-0.6202-0.7744, 0.3444)	-0.4057 (-0.6270-0.3506, 0.2010)	-0.1139 (-0.2592-0.3636, 0.1274)
강수량	-0.1370 (-0.3989-0.2257, 0.1691)	0.6831 (0.2045-0.9232, 0.1899)	0.4601 (-0.3568-0.9349, 0.3397)	1	0.4914 (-0.0200-0.8447, 0.2340)	-0.3769 (-0.5710-0.0243, 0.1364)	-0.1066 (-0.2583-0.1275, 0.1059)
최저기온	-0.4415 (-0.5460--0.2940, 0.0614)	0.8266 (0.4820-0.9817, 0.1024)	0.3783 (-0.6202-0.7744, 0.3444)	0.4914 (-0.0200-0.8447, 0.2340)	1	-0.6567 (-0.7516--0.4902, 0.0725)	-0.3199 (-0.3660--0.2340, 0.0348)
고도	0.5851 (0.4680-0.6643, 0.0482)	-0.6808 (-0.7320--0.4927, 0.0603)	-0.4057 (-0.6270-0.3506, 0.2010)	-0.3769 (-0.5710-0.0243, 0.1364)	-0.6567 (-0.7516--0.4902, 0.0725)	1	0.3942 (0.3929-0.3957, 0.0014)
사면유역지수 (LogAs)	0.5041 (0.4120-0.5618, 0.0357)	-0.2738 (-0.3045--0.1683, 0.0320)	-0.1139 (-0.2592-0.3636, 0.1274)	-0.1066 (-0.2583-0.1275, 0.1059)	-0.3199 (-0.3660--0.2340, 0.0348)	0.3942 (0.3929-0.3957, 0.0014)	1

표 2-21. 식생지수 연 변동계수와 (시)공간자료 간의 연도별 상관관계분석 결과 요약

1982-2015 상관계수 평균 (최소값-최대값, 표준편차)	식생지수 연 변동계수	평균기온	최고기온	강수량	최저기온	고도	사면유역지수 (LogAs)
식생지수 연 변동계수	1	0.1346 (-0.0839-0.3727,0. 1088)	0.1664 (-0.1428-0.3812,0. 1354)	0.1114 (-0.1305-0.3230,0. 1052)	0.0384 (-0.2068-0.3482,0. 1125)	-0.1993 (-0.4542-0.0197,0. 1219)	-0.2278 (-0.3712--0.1113,0. 0542)
평균기온	0.1346 (-0.0839-0.3727,0. 1088)	1	0.6432 (-0.3894-0.9663,0. 3183)	0.6804 (0.2002-0.9233,0.1 914)	0.8258 (0.4826-0.9816,0.1 025)	-0.6797 (-0.7305--0.4931,0. 0606)	-0.2747 (-0.3047--0.1666,0. 0322)
최고기온	0.1664 (-0.1428-0.3812,0. 1354)	0.6432 (-0.3894-0.9663,0. 3183)	1	0.4591 (-0.3573-0.9343,0. 3393)	0.3759 (-0.6266-0.7709,0. 3443)	-0.4023 (-0.6224-0.3532,0. 2009)	-0.1138 (-0.2578-0.3652,0. 1277)
강수량	0.1114 (-0.1305-0.3230,0. 1052)	0.6804 (0.2002-0.9233,0.1 914)	0.4591 (-0.3573-0.9343,0. 3393)	1	0.4864 (-0.0271-0.8429,0. 2353)	-0.3733 (-0.5646-0.0279,0. 1370)	-0.1060 (-0.2574-0.1279,0. 1063)
최저기온	0.0384 (-0.2068-0.3482,0. 1125)	0.8258 (0.4826-0.9816,0.1 025)	0.3759 (-0.6266-0.7709,0. 3443)	0.4864 (-0.0271-0.8429,0. 2353)	1	-0.6575 (-0.7526--0.4912,0. 0726)	-0.3200 (-0.3653--0.2373,0. 0344)
고도	-0.1993 (-0.4542-0.0197,0. 1219)	-0.6797 (-0.7305--0.4931,0. 0606)	-0.4023 (-0.6224-0.3532,0. 2009)	-0.3733 (-0.5646-0.0279,0. 1370)	-0.6575 (-0.7526--0.4912,0. 0726)	1	0.3947 (0.3947-0.3947,0.0 000)
사면유역지수 (LogAs)	-0.2278 (-0.3712--0.1113,0. 0542)	-0.2747 (-0.3047--0.1666,0. 0322)	-0.1138 (-0.2578-0.3652,0. 1277)	-0.1060 (-0.2574-0.1279,0. 1063)	-0.3200 (-0.3653--0.2373,0. 0344)	0.3947 (0.3947-0.3947,0.0 000)	1

표 2-22. 모형 반영 지표들의 공간적 자기상관성(Global Moran's I)

구분	반복회수 /연도	식생지수 연 최대값	식생지수 연 변동계수	평균기온	강수량	고도	사면유역 지수
임의시점 조합	1	0.5424	0.3991	0.8314	0.4021	0.8175	0.2751
	2	0.5570	0.3963	0.8158	0.4401	0.8331	0.3670
	3	0.5712	0.4045	0.8163	0.3727	0.8271	0.3392
	4	0.5998	0.4176	0.8146	0.3563	0.8230	0.2986
	5	0.5503	0.4098	0.8100	0.3752	0.8304	0.3009
연도별 자료	1982	0.6038	0.5406	0.9831	0.9615	해당사항 없음	
	1983	0.6402	0.4793	0.9837	0.9854		
	1984	0.5628	0.4585	0.9837	0.9797		
	1985	0.5983	0.4788	0.9833	0.9935		
	1986	0.5752	0.5110	0.9842	0.9707		
	1987	0.6510	0.5028	0.9847	0.9856		
	1988	0.6290	0.5512	0.9837	0.9842		
	1989	0.5845	0.5284	0.9846	0.9722		
	1990	0.6049	0.5174	0.9842	0.9870		
	1991	0.6191	0.4775	0.9841	0.9833		
	1992	0.6063	0.4936	0.9838	0.9874		
	1993	0.6217	0.4978	0.9845	0.9847		
	1994	0.5997	0.4793	0.9844	0.9882		
	1995	0.6535	0.4845	0.9833	0.9899		
	1996	0.6507	0.5053	0.9862	0.9778		
	1997	0.6495	0.4463	0.9916	0.9892		
	1998	0.6171	0.4585	0.9929	0.9895		
	1999	0.6111	0.4559	0.9894	0.9867		
	2000	0.6189	0.5059	0.9866	0.9664		
	2001	0.5532	0.5676	0.9865	0.9935		
	2002	0.6021	0.4758	0.9861	0.9758		
	2003	0.5838	0.5020	0.9854	0.9906		
	2004	0.5504	0.5363	0.9838	0.9970		
	2005	0.5400	0.4490	0.9855	0.9880		
	2006	0.6294	0.4668	0.9846	0.9827		
2007	0.6319	0.4522	0.9837	0.9942			
2008	0.6566	0.5675	0.9831	0.9911			
2009	0.7017	0.5274	0.9838	0.9954			
2010	0.6868	0.4632	0.9836	0.9910			
2011	0.7151	0.5215	0.9841	0.9931			
2012	0.6668	0.5612	0.9845	0.9826			
2013	0.7230	0.5169	0.9844	0.9929			
2014	0.6990	0.5396	0.9845	0.9769			
2015	0.6801	0.5915	0.9840	0.9490			

\* 모든 Global Moran's I 분석결과는 99% 신뢰수준(p-value<0.01)을 만족

표 2-23. 단순회귀모형을 이용한 정규화식생지수 최대값(NDVI-MAX) 추정 모형

시도	모형 적합성				Moran's I			회귀계수			
	R <sup>2</sup>	Log Likelihood	AIC	Durbin-Watson Test	종속변수	잔차	상수	평균기온	강수량	해발고도	Log(사면유역지수)
1	0.3725 ***	2506.91	-5001.8	1.344 ***	0.4898 ***	0.2822 ***	0.735902***	0.000982	7.95E-06	7.20E-05 ***	0.048697***
2	0.3468 ***	2463.92	-4915.8	1.377 ***	0.4813 ***	0.2739 ***	0.742259***	-0.00037	2.08E-05 ***	7.01E-05 ***	0.043979***
3	0.3768 ***	2520.10	-5028.2	1.341 ***	0.4929 ***	0.2833 ***	0.742114***	-0.00034	1.70E-05 ***	7.19E-05 ***	0.045778***
4	0.3590 ***	2479.17	-4946.3	1.396 ***	0.4719 ***	0.2630 ***	0.74123***	0.000585	7.63E-06	6.90E-05 ***	0.049485***
5	0.3660 ***	2473.18	-4934.3	1.368 ***	0.4811 ***	0.2693 ***	0.742437***	0.000652	5.43E-06	7.11E-05 ***	0.049018***

“임의시점(연도) 표본” : 각 지점별로 임의의 시점의 환경자료를 대입하여 만든 표본, 5회 실시하였음

종속변수 : NDVI-MAX, 유의확률 : 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

표 2-24. 공간시차모형을 이용한 정규화식생지수 최대값(NDVI-MAX) 추정 모형

시도	모형 적합성			공간효과	Moran's I	회귀계수				
	유사 R <sup>2</sup>	Log Likelihood	AIC	ρ(rho)	잔차	상수항	평균기온	강수량	해발고도	Log(사면유역지수)
1	0.5032	2722.81	-5431.6	0.5965***	0.0081	0.254761 ***	0.00316 ***	4.58E-06	4.27E-05 ***	0.030503 ***
2	0.4848	2683.22	-5352.4	0.6130***	0.0066	0.248057 ***	0.002475 ***	9.86E-06 **	4.12E-05 ***	0.024696 ***
3	0.5059	2734.77	-5455.5	0.5996***	0.0110	0.25755 ***	0.002533 ***	7.19E-06	4.26E-05 ***	0.02767 ***
4	0.4795	2671.67	-5329.3	0.5736***	0.0033	0.277903 ***	0.00312 ***	3.44E-08	4.20E-05 ***	0.031751 ***
5	0.4913	2676.71	-5339.4	0.5880***	0.0049	0.264584 ***	0.003496 ***	-1.66E-06	4.39E-05 ***	0.030203 ***

종속변수 : NDVI-MAX, 유의확률 : 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1, 유사 R<sup>2</sup> : Nagelkerke pseudo-R-squared

표 2-25. 공간오차모형을 이용한 정규화식생지수 최대값(NDVI-MAX) 추정 모형

시도	모형 적합성			공간효과	Moran's I	회귀계수				
	유사 R <sup>2</sup>	Log Likelihood	AIC	$\lambda$ (lambda)	잔차	상수항	평균기온	강수량	해발고도	Log(사면유역지수)
1	0.5050	2726.28	-5438.5	0.6640***	-0.012	0.734995 ***	0.002568 **	5.56E-06	8.21E-05 ***	0.024905 ***
2	0.4844	2682.45	-5350.8	0.6718***	-0.009	0.746298 ***	0.001965 *	7.97E-06	7.91E-05 ***	0.018196 ***
3	0.5077	2738.27	-5462.5	0.6665***	-0.009	0.75091 ***	0.001336	2.62E-06	8.13E-05 ***	0.022217 ***
4	0.4800	2672.52	-5331.0	0.6372***	-0.013	0.746492 ***	0.002246 **	-2.31E-06	7.83E-05 ***	0.026862 ***
5	0.4928	2679.33	-5344.6	0.6558***	-0.012	0.738844 ***	0.0032 ***	-3.11E-06	8.31E-05 ***	0.024088 ***

종속변수 : NDVI-MAX, 유의확률 : 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1, 유사 R<sup>2</sup> : Nagelkerke pseudo-R-squared

먼저 식생지수 최대값(NDVI-MAX)에 대해서 OLS(표 2-23), 공간시차(표 2-24), 공간오차(표 2-25) 회귀분석을 진행하였다. OLS 결과(표 2-23)의 회귀계수를 확인한 결과 지형변수(해발고도, 사면유역지수)에만 유의 수준 내에 있었다. 반면 기후자료인 강수량은 일부 결과에만 유의하게 도출되었고, 평균기온은 전혀 유의하게 도출되지 못했다. Moran's I의 결과는 종속변수의 경우 0.5에 가까운 값을, 잔차의 경우 0.26~0.28 정도의 값으로, 모두 공간적 자기상관성을 유의한 수준에서 확인할 수 있었다. 이는 공간시차 모형과 공간오차 모형을 적용할 필요성이 있음을 보여주는 결과라 할 수 있다.

식생지수 최대값에 대한 공간시차모형 결과(표 2-24)에서는 모든 결과에서 공간효과를 나타내는  $\rho$  계수가 통계적 유의도가 있었으며, 잔차의 공간적 자기상관성(Moran's I)은 유의도가 없어 OLS의 공간적 자기상관성이 충분히 설명된 것을 확인했다. 또한 OLS에서 유의하게 도출되지 않았던 평균기온의 계수가 유의하다고 도출되었다. 나머지 변수들은 큰 차이가 없었다.

식생지수 최대값에 대한 공간오차모형 결과(표 2-25) 또한 공간시차모형과 마찬가지로 공간효과를 나타내는  $\lambda$  계수가 통계적 유의도가 있었으며, 잔차의 공간적 자기상관성이 제거된 것을 확인하였다. 단, 일부 모형에서 평균기온의 계수는 유의하지 않다고 도출되었다.

OLS에서 유의하지 않다고 도출된 평균기온 지수가 공간시차모형과 공간오차모형에서 유의하게 도출된 것은 해당 지수가 가지고 있는 공간적 자기상관성이 공간시차모형과 공간오차모형을 통해서 설명되었기 때문으로 보인다. 이는 사용한 기상자료가 공간적 자기상관성을 전제로 하는 보간(interpolation)을 통해 만들어진 자료(표 2-22, 부록 1 참조)이기 때문으로 보인다<sup>91)</sup>.

OLS, 공간시차, 공간오차 모형의 적합도를 확인하기 위해 (유사) $R^2$ 과<sup>92)</sup> AIC를 확인하였다. 그 결과 공간오차모형과 공간시차모형이 AIC 기준으로 OLS의 적합도보다 높게 도출되며,  $R^2$  기준으로도 마찬가지다. OLS의 종

91) 그러나 기상자료 원자료는 표본이 27개밖에 되지 않으며, 식생지수, 지형자료 등과 비교할 필요가 있기 때문에 보간을 진행할 수밖에 없다.

92) OLS 회귀분석의  $R^2$ 과 같은 설명력을 나타내느냐에 대해서는 여러 가지 논란이 있다는 것을 염두에 두어야 한다.

속변수와 잔차의 공간적 자기상관성이 공간시차모형과 공간오차모형 모두에서 잘 설명된 것과 함께 고려한다면, 이 둘 모두 OLS보다 더 적합도가 높은 모형이라고 판단할 수 있다. 단, 회귀계수와 유의도에 차이가 있으므로, 이를 고려하여 합당한 모형을 선택할 필요가 있다<sup>93)</sup>.

종합하면, 식생지수 연 최대값은 해발고도가 높아질수록, 그리고 사면유역지수가 증가할수록 증가하였으며, 공간적 속성을 함께 고려하였을 때에만 평균기온이 상승이 식생지수의 연 최대값의 증가에 긍정적인 영향을 주었다. 단, 해발고도는 산지 여부와 산림훼손에 대한 접근성과 연관이 있기 때문에 지형지수보다는 토지이용과 관련된 지수라고 해석하는게 타당할 것으로 보인다.

---

93) 공간오차모형보다 공간시차모형이 평균기온의 유의도를 만족하는 경우가 많기 때문에 공간오차모형이 가정했던 전제에 보다 더 부합하는 모형이라고 판단할 수 있다..

표 2-26. 단순회귀모형을 이용한 정규화식생지수 변동계수(NDVI-CV) 추정 모형

시도	모형 적합성				Moran's I			회귀계수			
	R <sup>2</sup>	Log Likelihood	AIC	Durbin-Watson Test	종속변수	잔차	상수	평균기온	강수량	해발고도	Log(사면유역지수)
1	0.0759 ***	1819.20	-3626.4	1.144***	0.4241 ***	0.3851 ***	0.477418***	-0.00182	1.88E-05 **	-2.94E-05 ***	2.57E-13 ***
2	0.0723 ***	1802.40	-3592.8	1.180***	0.4251 ***	0.3891 ***	0.476457***	-0.00287 **	2.74E-05 ***	-2.63E-05 ***	2.60E-14 ***
3	0.0855 ***	1845.73	-3679.4	1.190***	0.4189 ***	0.3799 ***	0.476696***	-0.00138	1.60E-05 **	-3.29E-05 ***	2.22E-13 ***
4	0.0719 ***	1820.73	-3629.4	1.134***	0.4173 ***	0.3816 ***	0.486193***	-0.00281 **	1.86E-05 **	-3.16E-05 ***	2.89E-12 ***
5	0.0768 ***	1879.79	-3747.6	1.144***	0.4200 ***	0.3870 ***	0.495056***	-0.00237 *	5.58E-06	-3.28E-05 ***	1.03E-13 ***

“임의시점(연도) 표본” : 각 지점별로 임의의 시점의 환경자료를 대입하여 만든 표본, 5회 실시하였음

종속변수 : NDVI-CV, 유의확률 : 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

표 2-27. 공간시차모형을 이용한 정규화식생지수 변동계수(NDVI-CV) 추정 모형

시도	모형 적합성			공간효과	Moran's I	회귀계수				
	유사 R <sup>2</sup>	Log Likelihood	AIC	ρ(rho)	잔차	상수항	평균기온	강수량	해발고도	Log(사면유역지수)
1	0.3585	2157.36	-4300.7	0.7289 ***	-0.0060	0.144795 ***	0.062774 *	1.41E-05 **	-1.18E-05***	-0.01972 ***
2	0.3643	2152.59	-4291.1	0.7381 ***	-0.0086	0.141975 ***	0.008674 ***	1.88E-05 ***	-1.08E-05**	-0.02079 ***
3	0.3591	2175.07	-4336.1	0.7268 ***	0.0005	0.14493 ***	0.035125 **	1.81E-05 ***	-1.39E-05***	-0.01995 ***
4	0.3544	2157.00	-4299.9	0.7308 ***	-0.0089	0.15 ***	0.010715 **	1.44E-05 **	-1.41E-05***	-0.01883 ***
5	0.3590	2217.81	-4421.6	0.7296 ***	-0.0051	0.159126 ***	0.00587 ***	8.67E-06	-1.73E-05***	-0.01911 ***

종속변수 : NDVI-CV, 유의확률 : 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1, 유사 R<sup>2</sup> : Nagelkerke pseudo-R-squared

표 2-28 임의시점(연도) 표본 대상 공간오차모형을 이용한 정규화식생지수 변동계수(NDVI-CV) 추정 모형

시도	모형 적합성			공간효과	Moran's I	회귀계수				
	유사 R <sup>2</sup>	Log Likelihood	AIC	$\lambda$ (lambda)	잔차	상수항	평균기온	강수량	해발고도	Log(사면유역지수)
1	0.3613	2161.43	-4308.8	0.7496 ***	-0.0090	0.425539 ***	0.002747	1.84E-05 ***	-3.40E-05***	-0.01581 ***
2	0.3644	2152.77	-4291.5	0.7552 ***	-0.0097	0.4339 ***	0.001169	2.01E-05 ***	-3.11E-05***	-0.01766 ***
3	0.3643	2182.70	-4351.4	0.7511 ***	-0.0046	0.421824 ***	0.00259	2.67E-05 ***	-3.83E-05***	-0.0163 ***
4	0.3539	2156.31	-4298.6	0.7437 ***	-0.0115	0.446472 ***	0.000511	1.68E-05 **	-3.39E-05***	-0.01514 ***
5	0.3641	2225.16	-4436.3	0.7538 ***	-0.0108	0.454559 ***	0.000687	1.40E-05 **	-4.67E-05***	-0.01455 ***

종속변수 : NDVI-CV, 유의확률 : 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1, 유사 R<sup>2</sup> : Nagelkerke pseudo-R-squared

식생지수 변동계수(NDVI-CV)를 대상으로 OLS(표 2-26), 공간시차(표 2-27), 공간오차(표 2-28) 모형을 적용하였다. OLS 결과(표 2-24)의 회귀계수를 확인한 결과 지형변수(해발고도, 사면유역지수)의 회귀계수가 유의수준 내에 있었다. 단, 강수량과 평균기온은 OLS결과마다 다소 상이한 결과가 도출되었다. 종속변수(0.41~0.42)와 잔차(0.38 내외)의 공간적 자기상관성이 모두 유의수준을 충족하는 결과가 도출되었다. 특히,  $R^2$  이 0.1에 못 미치는 것이 식생지수 최대값의 OLS와 다른 점이었다( $R^2$  0.35-37). 회귀계수의 유의도가 임의표본에 따라 달라지고, 공간적 자기상관성이 확인되며,  $R^2$  이 낮다는 사실은 이 모형 내의 공간적 자기상관성이 변수의 설명력을 떨어뜨리고 있다는 것을 보여준다고 볼 수 있다.

식생지수 변동계수의 공간시차모형 결과(표 2-25)에서는 모든 결과에서 공간효과  $\rho$  계수가 통계적 유의도가 있었다. 회귀계수의 측면에서는 평균기온이 OLS에 비해서 유의수준이 높아졌다<sup>94</sup>). 평균기온과 사면유역지수의 회귀계수는 OLS와 부호가 바뀌었는데, 식생지수 변동계수와 상관분석 결과(표 2-21)의 부호와 일치하는 공간시차모형의 회귀계수가 더 적절할 것으로 보인다. 설명력 또한 유사  $R^2$  기준 0.3수준이며, AIC를 기준으로 높은 모형 적합성을 보여준다.

식생지수 변동계수의 공간오차모형 결과(표 2-26)에서는 모든 결과에서 공간효과  $\lambda$  계수가 통계적 유의도가 있었다. 모형의 적합성 수준 등의 속성이 전체적으로 공간시차모형과 유사하다. 그러나 평균기온의 회귀계수가 유의수준을 만족하지 못했고, 대신 강수량 회귀계수가 유의수준을 만족했다. 이러한 결과의 차이는 각 지표의 공간적 자기상관성이 모형의 종속변수의 자기상관성과 연관이 있는지(평균기온)와 잔차의 자기상관성과 연관이 있는지(강수량)의 차이일 것으로 추정해 볼 수 있다.

종합하여 살펴보면, 식생지수 변동계수 모형의 경우 전반적으로 식생지수 최대값 모형과 비교했을 때 모형 적합성이 다소 떨어지는 결과가 도출되었다. 이는 앞선 상관관계분석 결과에서도 확인할 수 있는 내용이다. 공간시차모형과 공간오차모형은 OLS결과에 비해서 설명력이 더 좋다고 판단할 수 있다. 특히 사면유역지수의 OLS회귀계수에 대한 예상과는 다른

94) 5번만 95%신뢰수준에서 만족, 나머지 변수는 99%신뢰수준 이상에서 만족한다. 이는 5개 모형 중 2개가 95% 신뢰수준에 불만족했던 OLS모형과 다른 결과다.

해석<sup>95)</sup>과는 달리 사면유역지수가 증가하여 물과 물질의 공급이 충분한 경우 변동성이 줄어든다고 해석할 수 있는 결과가 도출되었다. 해발고도 변수 또한 식생지수 최대값에 대한 해석과 마찬가지로 토지이용을 반영하는 요소로 해석할 수 있으며, 산지에 가까울수록 변동성이 낮아진다는 해석이 가능한 결과가 도출되었다. 그러나 식생지수의 변동성에 대해 기후가 어떠한 영향을 줄 것인지에 대해서는 공간시차모형과 공간오차모형이 다소 다른 결과가 도출되었으며, 이는 해석하기에는 다소 어려운 문제로 판단할 수 있다.

식생지수의 최대값과 변동계수의 모형 모두 공간시차와 공간오차모형이 OLS에 비해 다소 높은 설명력을 보였으며, 특히 기후요소와 관련된 회귀계수의 변화에 많은 영향을 주었다. 이는 앞서 설명했던 것처럼 보간의 영향으로 기후자료에 공간적 자기상관성이 특히 높아져있을 가능성이 높다. 다만 나름대로 지형변수와 평균기온으로 명확하게 설명되는 식생지수의 최대값과는 달리, 식생지수의 변동성에 대해서는 모형마다 다소 다른 결과가 도출되어 해석에 어려움이 있다.

---

95) OLS분석결과에 따르면 사면유역지수가 증가하여 물과 물질의 공급이 풍부한 경우 식생의 변동성이 커진다고 해석할 수 있다. 상식적으로 물과 물질의 공급이 충분히 이루어지면 식생의 변동성은 줄어들기 때문에 OLS분석만으로는 해석의 곤란함이 있었다. 공간시차모형과 공간오차모형은 예상대로 도출되었기 때문에 해당 어려움에서는 벗어날 수 있었다.

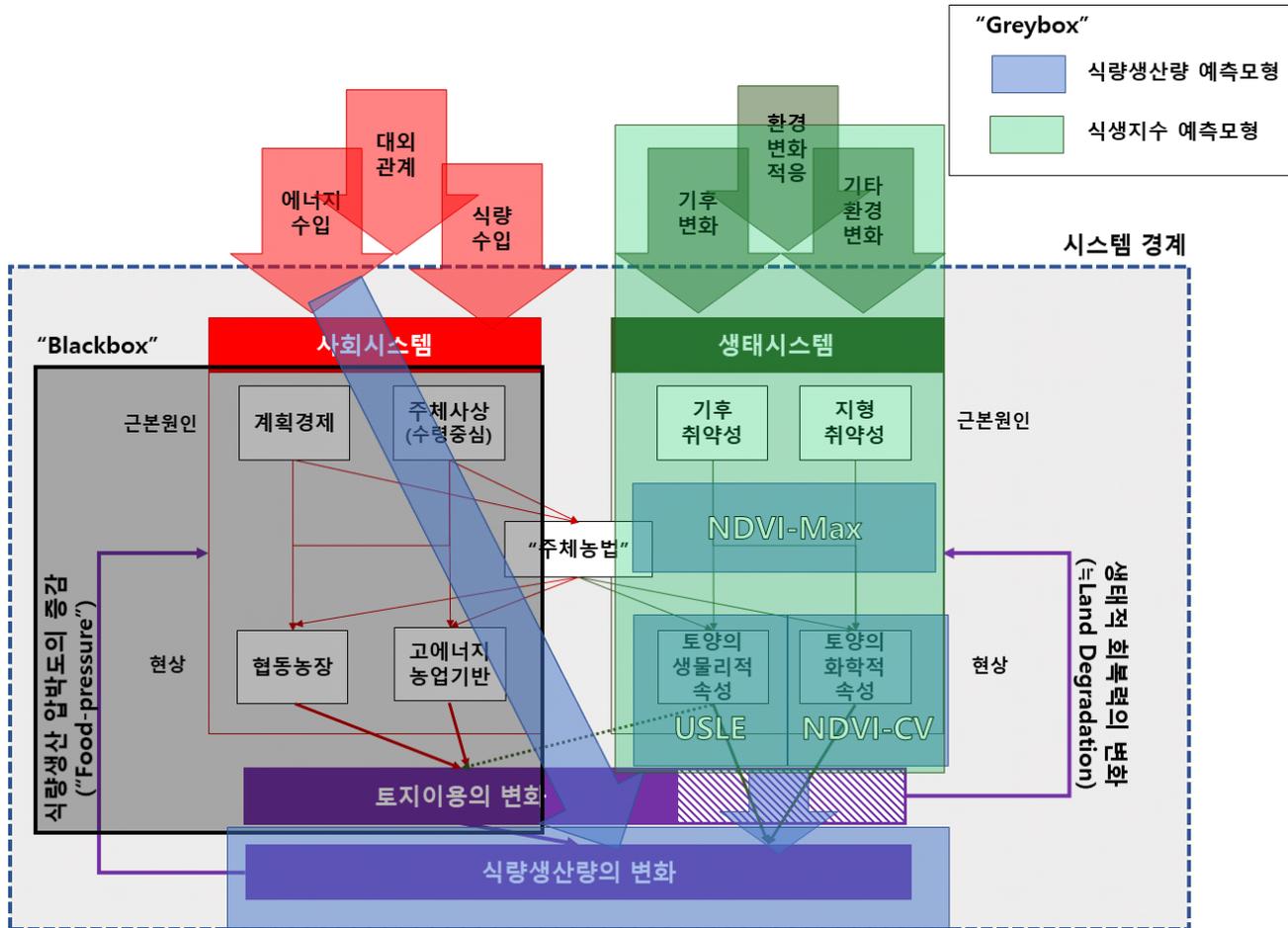


그림 2-15. 북한 토지황폐화와 식량생산 감소문제 개념모형에 대한 평가결과 모식도

#### 4. 미시적 관계성 파악을 통한 개념모형 평가

앞선 분석 결과를 바탕으로 북한 토지황폐화와 식량생산량 관련 사회생태시스템 기반 개념모형(그림 2-15)이 얼마나 합리적인지, 그리고 통계 자료를 바탕으로 알 수 있는 것과 없는 것이 무엇인지를 평가하고자 하였다. 앞서 도출한 식량생산량 예측모형과, 이를 보완하기 위한 식생지수 예측모형이 일정 부분의 설명력을 가지고 있으며 논리적으로도 모순되지 않는 모형임을 확인하였다. 이 둘을 중심으로 개념모형에 대해서 평가하였다. 또한 종합적으로 사회시스템과 관련된 요인과 지표들은 상관관계가 높지 않은 것으로 평가되었으며, 이 부분에 대한 개념모형을 평가하기는 어려웠다.

##### 1) 식량생산량·식생지수 예측모형과 개념모형과의 비교와 한계

식량생산량 예측모형은 주로 식생지수 관련 지표와 에너지 관련 지표에 의해 결정된다. 식생지수와 식량생산량과의 관계는 2장에서 확인한 홍석영(2009; 2015), 안유순(2013)의 연구에서 확인할 수 있어 선행 연구와의 관계와 부합하며, 이 연구에서 고려하지 못했던 토지황폐화의 물리적 특성(토양침식 모형)과 에너지와 같은 인문지표의 반영은 새로운 발견이라 할 수 있다.

식생지수 관련 지표 중 토양침식 모형 결과(USLE-CV)는 개념모형에서 토양의 생물리학적 속성을 나타내는 것으로, 식생지수 결과 자체(NDVI-MAX, NDVI-CV)는 나머지 부분인 토양의 화학적인 성질을 나타낸다고 해석할 수 있다. 그러나 식생지수는 화학적인 성질보다 광범위한 식생의 건강성에 대한 지표를 담고 있다. 따라서, 장기적으로는 토양의 생물리학적 속성을 담고있는 침식모형과 마찬가지로, 식생지수 자체보다는 이를 반영한 보다 더 구체적인 모형을 반영하는 것이 타당해 보인다. 특히 화학적 지표는 비료 등의 에너지 공급과, 토지이용의 변화와 밀접한 연관이 있기 때문에 이를 반영하는 방법에 대해서 고려가 필요하다.

또한 앞서 언급했듯, 식생지수(토양침식 모형 포함) 결과가 식량생산량에 시차를 두고 영향을 준다는 모형의 결과는 일견 타당해 보이지만 그 근거가 분명한지를 확인해 보아야 한다. 해당 관계식에서는 5년 정도의

시차를 고려하였는데, 1절에서 확인하였던 토지황폐화(식생지수)의 저하 경향(1991~1993년)과 대기근의 발생(1995년 전후)의 시차는 2~4년 정도의 수준이었다. 현재 자료로써는 어느정도의 유추만 가능할 뿐 논리적으로 대답할 수 있는 방법이 없다는 것이 한계다.

에너지 관련 지표와 식량생산량의 관계는 비료와 농자재 공급과 토지황폐화 또는 식량생산량과의 관계에 대해서 지적하였던 선행 연구 결과와 문헌에 부합하는 결과라 볼 수 있다. 그러나, 에너지 관련 지표는 외부 요인으로 이것이 어떠한 중간과정을 거쳐 식량생산량에 영향을 주는지에 대해서는 현재 통계 분석으로는 확인하기 어려웠다. 특히 석유 등의 에너지 자체가 아닌, “전기에너지사용량”의 지표가 높은 상관성이 도출되어 모형에 부합되었다. 전기에너지사용량과 식량생산량과의 관계는 엄밀히 따지면 같은 원인으로 추정되는 서로 다른 자료의 평가로, 상관성은 있지만 인과성이 있다고 보기는 어렵다. 물론 이 또한 훌륭한 예측 모형이 될수 있겠지만, 개념모형을 정교화하고자 식량생산량 예측모형을 활용한다면 에너지 부분에서 보다 더 논리적 관계가 있으며, 중간 단계를 명확하게 알 수 있는 형태의 보완모형을 모색할 필요가 있다.

결과적으로 본 절의 식량생산량 예측모형에서는 개념모형에 부합하지 않는 결과를 찾지 못했으며 어느정도의 합리성을 확인시켜 준다고 할 수 있다. 그러나 식량생산량 예측모형으로 개념모형 구성요소들의 속성과 관계를 정의하기 위해서는 현재는 확인하지 못한 여러 가지 중간 단계의 지표들을 발굴하거나 보완할 필요가 있다.

이 절의 식생지수 예측모형은 기후취약성과 지형취약성 문제와, 현상에 관련된 지표인 식생지수와 인과·상관관계를 나타냈기 때문에 본 개념모형 생태시스템의 타당성을 확인하였다고 할 수 있다. 그러나 식량생산량 예측모형과 비교해서 설명력이 떨어지며, 특히 관련도가 높을 것이라 보았던 강우량 지표와의 연관성이 높지 않았다는 문제가 있다. 물론 관점에 따라서 단순회귀모형 기준 0.1~0.3정도의 설명력( $R^2$ )은 낮지 않은 수준이라 판단할 수 있다. 하지만 식생지수 예측 모형의 주 목적은 식량생산량 예측 모형에 활용하고자 하는 것인 만큼, 전체적인 모형의 설명력을 떨어트릴 수 있어서 아쉬운 부분이 많다. 식생지수 예측 모형을 바탕으로 개념모형을 구체화하기 위해서는 현재보다 더 설명력이 높은 모형의 구축이 요구된다.

식량생산량 예측모형과 식생지수 예측모형을 통해 개념모형을 보완하기 위한 추가적 과제는 자료와 분석 방법의 정교화라 할 수 있다. 좀 더 많은 정교한 자료를 수집하여야 하고, 복잡한 자료를 요약하는 방안에 대해서 강구해야 한다. 그리고 고려하지 못했던 시간적 자기상관성 등도 고려해야 한다.

## 2) 사회시스템에 대한 평가와 보완의 어려움

북한의 토지황폐화와 식량생산량 감소에 대해 문헌 및 역사자료에 언급되어있는 사회시스템 속성 관련 문제와 관련하여 업생산량 관련 자료(소출, 비료 등), 인구, 에너지 등의 자료를 비교하여 상관관계를 파악하고, 비교 검토해보고자 하였다. 그 결과 이 자료들은 상관관계가 높지 않거나, 높더라도 기대했던 인과관계에 부합하지 않는 경우가 많았다. 하지만, 그보다 문제는 많은 요인과 관련한 인과관계 또는 상관관계를 확인할 수 있는 자료가 부재하다는 점이다. 특히 사회주의 계획경제 체제의 움직임, 수령중심의 주체사상과 같은 정치적·주관적인 부분을 어떠한 수치 또는 논리로 표현할 수 있는지, 혹 가능하다면 과연 다른 지표와 비교를 할 수 있을지는 답변하기 어려운 문제였다. 또한 토지이용의 변화와 같은 인간의 행동과 관련된 문제가 사회시스템을 구성하는 핵심적인 요소이지만, 인간은 언제나 합리적으로 판단하고 움직이지 않기 때문에, 분명한 인과관계나 상관관계로 표현하기가 어려울 것으로 보인다. 이 두 문제는 북한의 자료부족에서 기인하는 측면도 있지만, 현실적으로 자료의 접근성이 높아지거나 장기간의 현지조사와 참여 관찰을 통해 자료를 직접 구득하더라도 완전히 얻기 힘든 자료일 가능성이 높다.

따라서 통계적 방법론을 바탕으로 사회시스템의 개념모형을 구체화하는 것은 현재 수준으로는 어렵다고 볼 수 있다. 이는 일부분이라도 계량적인 모형으로 설명되는 생태시스템, 그리고 이 둘의 관계에서도 마찬가지로의 문제일 것이다.

결론적으로 이 결과는, 사회시스템과 생태시스템에서의 차이가 존재하기는 하지만, 서론에서 언급한 토지황폐화와 식량생산 감소 문제의 인과관계 파악의 어려움을 뒷받침해주는 결과이며, 대안적인 접근이 필요하다는 것을 보여주는 결과이다. 그러나 이 결과 자체가 무의미하지 않으며, 뒤이어 소개할 대인적 접근의 참고자료로 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

## 제 5 절 소 결

이 장에서는 북한의 토지황폐화와 식량생산 감소 문제에 대한 기존 연구 성과와 자료를 사회생태시스템의 맥락으로 재구성함으로써, 인과관계와 프로세스에 대한 지식 부족을 완화하고자 하였다. 이를 위해 기존 연구성과와 자료를 검토하고, 거시적으로 이들의 관계성을 파악하며, 이를 부분적으로 검증·보완하고자 한다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 북한 토지황폐화와 식량생산 감소에 대한 연구동향과 경향을 확인한 결과(1,2절), 식량생산 감소는 대기근에 임박하여 급격하게 나타났으며(1995년 전후), 토지황폐화의 취약성은 그보다 2~4년 전인 1991~1993년 경 급격하게 올라가는 결과가 도출되었다. 토지황폐화와 식량생산과 관련된 사회경제적 지표 중 에너지 수급 관련 자료, 강수량과 평균기온 자료가 경향상 관계성이 있다고 판단할 수 있었다.

둘째, 북한 토지황폐화와 식량생산량 감소에 대해서 역사·정치문헌을 사례로 검토한 결과 사회생태시스템을 포괄하는 다양한 요인들을 추출할 수 있었고, 이들을 거시적으로 연결하는 개념모형을 그릴 수 있었다(3절). 이는 북한의 토지황폐화 문제와 식량생산량 감소 문제를 협동농장 농업경관 중심의 사회시스템과, 토양환경 중심의 생태시스템, 그리고 이들 사이를 연결해주는 “주체농법”의 문제, 그리고 이로 인한 토지이용의 변화와 식량생산량의 변화의 형태로 구성된다. 식량생산량의 변화는 식량생산 압박도의 증감의 형태로, 토지이용의 변화는 생태적 회복력의 변화 형태로 사회생태시스템에 되먹임을 주게 되고, 이로써 토지황폐화와 식량생산량 감소 문제가 발생하는 것으로 설명할 수 있었다. 이 개념모형을 구체화한다면 북한 토지황폐화와 식량생산량 감소의 프로세스를 분명하게 이해할 수 있을 것이라고 판단할 수 있었다.

셋째, 북한 토지황폐화와 식량생산량 감소 개념모형을 구성하는 요인들과 관계된 자료에 대한 통계분석을 통해, 개념모형에 활용할 수 있는 두 개의 통계모형을 구축할 수 있었다. 그 중 하나는 식량생산량의 변화를 생태시스템의 특성(식생지수)와 외부요인(에너지 수입, 사회시스템)으로 설명하는 식량생산량 예측 모형이며, 나머지는 식량생산량 예측 모형의 핵심 변수인 식생지수의 기후, 지형요소에 따른 변화양상을 예측하는 모형이다.

이 모형은 제한된 수준에서 북한의 토지황폐화와 식량생산 감소문제 활용할 수 있고, 개념모형의 논리적 타당성을 일부 확인시켜주는데 의미가 있었다. 하지만, 사회시스템의 대부분은 통계모형으로 설명이 어려웠으며, 통계모형으로 대체로 설명 가능했던 생태시스템도 자료와 기법이 가지고 있는 한계가 있었다.

종합적으로 이 장에서는 북한의 토지황폐화와 식량생산량 감소문제에 대해서 지금까지의 경향을 정리·보완하고, 이를 사회생태시스템 기반으로 재구성하였다. 여러 가지 시도를 통해 일부 보완이 있었지만, 상당 부분은 토지황폐화와 식량생산 감소 간의 관계와 프로세스의 이해에 어려운 부분이 존재한다는 서론에서 제기한 한계를 재확인하는 결과가 도출되었다. 결과적으로, 앞으로 3장과 4장에서 적용할 복잡적응계적 방법론의 정당성을 뒷받침해주는 결과라 할 수 있다.

그러나 이 장의 성과 또한 충분히 의미가 있다. 이 장에서 확인·정리한 토지황폐화와 식량생산 관련 자료들은 3장과 4장의 복잡적응계 방법론 적용 연구에 활용될 수 있다. 또한 이 장에서 포괄한 요인들 간의 관계는 모 4장의 모형화 연구에 활용될 수 있다.

### 제 3 장 1990년대 북한 대기근과 토지황폐화 문제에 대한 조기경보신호

1990년대 중반 북한 대기근은 북한의 시스템적 실패로 인해 갑작스럽게 발생한 일종의 급변사태이다. 당시 북한은 점진적인 재난이었다면 발생하기 어려운 엄청난 규모의 참혹한 피해를 보았으며, 그 전후로 식량배급 체제를 포함한 각종 사회시스템의 붕괴가 나타났다(이석, 2004a; 2004b). 따라서 1990년대 북한의 대기근은 복잡적응계적 관점에서의 임계전이(critical transition) 창발현상의 대표적 사례라 할 수 있다.

북한의 대기근과 같은 급변사태와 임계전이는 복잡적응계적 속성을 가진 많은 사회생태시스템에서 발생한다. 북한 대기근에 대한 북한 주민과 당국의 피해와 마찬가지로, 사회생태시스템에서의 임계 변화는 시스템 자체와 시스템 내·외의 구성 요소에게는 대체로 큰 위협 또는 치명적인 피해로 작용한다. 따라서 각각의 시스템의 관점에서 피해를 예방하고자 임계전이의 시점과 강도를 예측하려고 하는 수많은 시도가 있었다. 하지만 변화의 징후를 예측하기 위해서는 시스템에 대한 정보가 부족하고 실제로 임계전이 이전에 시스템 상태의 변화가 거의 없는 경우가 많기 때문에, 복잡적응계 시스템에서의 임계전이 예측은 어렵거나 불가능하다고 여겨진다(Scheffer *et al.*, 2009; Dakos *et al.*, 2012).

이에 대한 대안적 접근으로, 복잡계과학 연구에서는 임계전이에 대한 조기경보신호(early warning signal) 또는 선행지표 탐지(leading indicator)를 제시한다. 이는 시스템이 언제 임계전이를 맞이하게 될지, 그리고 이는 어떤 방향으로 일어날지를 예측해 내지는 못하지만, 갑작스러운 시스템 변화의 이전에 나타나는 수학적·통계학적 사전 징후를 관찰함으로써, 시스템이 임계전리와 파국적 분기(catastrophic bifurcations)에 얼마나 가까워졌는지는 알 수 있다는 것을 뜻한다. 이를 통해 우리는 예상되는 시스템의 파국적인 변화의 위험을 회피할 방안에 대해서 사전에 모색할 수 있다.

이 연구에서는 1990년대 북한 대기근 또한 마찬가지로의 사전예방 신호가 있었다는 것을 가정한다. 1장에서 제기한 대로 1990년대 대기근의 근본 원인은 그 이전부터 진행된 북한의 토지황폐화이며, 이는 1990년대에 급격하

게 발생한 문제가 아닌 과거부터 지속되어왔던 문제다. 특히 1980년대부터 북한은 토지황폐화 문제의 심각성을 인식하고, 성과는 없었지만 이를 방지하고자 하는 시도를 시작했다(박경석 등, 2011). 이는 북한은 토지황폐화 문제가 식량난을 유발한다는 것을 사전에 알지 못했지만, 토지황폐가 북한 시스템에 부정적인 후과를 불러일으킬지도 모른다는 인식은 했었을 것이라 추정해 볼 수 있는 대목이다. 하지만 북한의 대기근, 그리고 이의 원인이 되는 토지황폐화에 대한 조기경보신호 탐지와 복잡적응계적 접근에 대한 연구는 찾아보기 어려운 것이 실정이다.

이 장에서는 이러한 문제의식을 바탕으로, 북한의 1990년대 대기근과 이것의 원인이 되는 북한 토지황폐화 문제와 관련된 시계열자료를 복잡적응계적으로 관찰함으로써, 북한의 토지황폐화와 1990년대 대기근의 임계전이 가 확인되는지, 그리고 조기경보신호를 확인할 수 있는지를 살펴보는 것이 목적이다.

구체적으로 이 장에서는 세 가지 목표를 달성하고자 한다. 첫째, 대기근이 발생한 1990년대까지의 지표와 최근까지의 지표를 비교함으로써, 토지황폐화와 대기근에 대한 조기경보신호가 대기근 발생 전까지 존재하였는지를 확인하고자 한다(대기근 조기경보신호 여부 확인). 둘째, 토지황폐화와 대기근 임계전이의 요인들에서 조기경보신호로 볼 수 있는 징후들이 어느 시점에 나타났는지를 확인하여, 이를 바탕으로 토지황폐화와 식량생산 감소 문제 관련 지표의 선후관계와 프로세스를 유추하고자 한다(대기근 조기경보신호의 시점 확인). 셋째, 조기경보신호 포착을 통해 확인한 징후의 지역간 차이를 바탕으로 토지황폐화와 식량생산량 감소에 취약한 지점을 확인하고자 한다(조기경보신호를 통해 확인한 토지황폐화 취약지점 확인).

이 장의 본론에 들어가기에 앞서, 이 장에서는 토지황폐화와 식량생산량 감소 문제에 대한 전체 또는 각각의 통합 또는 대표지표를 적용하지 못하였음을 밝혀 둔다. 2장에서 토지황폐화와 식량생산량 감소 문제에 대한 통계적·논리적 관계성은 부분적으로만 확인 가능하였다. 따라서 통합 지표를 만들거나 특정 지표가 해당 문제를 대표하는 지표라고 주장할 수는 없었기 때문에 부득이 가급적 모든 지표를 적용하여 유의미한 지표만을 설명하는 형태로 내용과 결과를 기술하였다.

## 제 1 절 문헌연구

이 절에서는 복잡적응계의 임계전이 문제와 임계전이를 포착할 수 있는 조기경보신호에 대한 이론적 배경을 검토하고, 이를 바탕으로 임계전이 조기경보신호를 도출하는 방법에 대해서 정리하고자 한다.

### 1. 이론적 배경

북한의 토지황폐화와 식량생산 감소 문제와 같은 사회생태시스템 차원의 문제는 다양한 네트워크와 행위자들로 인하여 복잡계시스템으로 해석되는 경우가 많다(Liu *et al.*, 2007). 임계전이는 복잡계시스템 이론에서 등장하는 시스템의 변화와 질서의 변경에 관해서 기술할 때 사용하는 용어이다. 복잡계 시스템은 시스템을 구성하는 행위자와 요인 간의 균형을 통해서 일정한 평형 상태를 유지한다. 이 구성 요소와 관계는 끊임없이 변화하지만, 시스템의 항상성을 크게 변화시키지 않는다. 하지만 변화가 누적되게 되면 시스템 구성 요소 간의 상호작용이 긴밀해져 각 요인들간의 관계가 커지게 되고 이를 통해 불안한 균형을 이루고 있는 상태가 만들어진다. 이 수준 이상을 넘기게 되면, 시스템 전체를 뒤흔드는 거시적인 현상이 벌어지고, 현재의 균형 상태는 파괴되고 자기조직화를 통해 새로운 질서가 창발된다. 바로 이 “불안한 균형”과 거시적인 현상 사이의 상태를 우리는 임계점(critical point)이라 정의하고, 이때 발생하는 변화를 임계전이라 칭할 수 있다.

북한의 토지황폐화와 식량생산 문제로 인해 1990년대의 북한 대기근이 발생하고 큰 피해를 입은 북한과 북한 주민과 마찬가지로, 사회생태시스템과 이를 포함한 복잡계시스템에서의 임계 변화는 시스템 자체와 시스템 내·외의 구성 요소들에게는 큰 위협 또는 치명적인 피해로 작용하는 경우가 일반적이다. 예를 들어 금융시장의 급격한 붕괴(May *et al.*, 2008), 영저 드라이어스(Younger Dryas)와 같은 급격한 기후 변화(Dakos *et al.*, 2008; Lenton *et al.*, 2008; Rypdal, 2016), 생물종의 급격한 멸종

(Scheffer *et al.*, 2001) 등의 사례들은 임계전이가 시스템에 얼마나 치명적으로 작용하였는지를 보여 준다.

따라서 각각의 시스템의 관점에서 피해를 예방하기 위해서, 시스템의 취약성(fragility)을 파악하고 회복력을 높이기 위해서 임계전이의 시점과 강도를 예측<sup>96)</sup>하려는 시도가 있었다. 하지만 이는 큰 성과를 얻을 수 없었다. 임계전이가 나타나는 시스템에서는 대부분 급격한 변화의 임계점(tipping point) 직전까지는 눈에 띄는 변화가 나타나지 않는 경우가 대부분이기 때문에 변화의 정확한 시점을 예측하는 것은 대체로 불가능하다(Scheffer *et al.*, 2009). 그럴 뿐만 아니라 복잡계 사회생태시스템의 내부 구조와 정보에 대한 이해에는 한계가 있으며, 특히 임계전이의 유발요인(driver)에 대한 정보나 임계점(critical threshold)에서의 시스템 구성요소의 속성값에 대한 정보를 얻기 어렵다(Dakos *et al.*, 2012). 때문에 복잡계시스템의 임계전이의 시점과 분기의 방향을 정확하게 예측하는 것은 불가능하다는 것이 학계의 일반적인 시각이다(Scheffer *et al.*, 2012).

복잡계과학에서는 임계전이의 정확한 예측에 대한 대안으로, 임계전이에 대한 포괄적인 조기경보신호(generic early-warning signal)를 탐지 또는 사용하는 것을 제시한다. 조기경보신호는 시스템이 임계점에 얼마나 근접했나를 판별해(detect)낼 수 있는 지표로 정의된다(Dakos *et al.*, 2012). 이 지표는 시스템이 파국적 분기를 맞이하였을 때 나타나는 시스템 내부의 일반적인 수학적 속성을 통해 도출되며, 시스템의 속성 및 시스템 내부 역학관계(dynamics)에 따라 다양한 형태의 지표가 존재한다.

임계전이에 가까워진 시스템은 시스템의 반응양상(dynamics)에 따라 임계감속(critical slowing down)을 보이는 경우와 편향된 반응-깜빡임(skewed response and flickering)으로 구분할 수 있다. 시스템이 어떠한 형태의 반응을 보이냐에 따라 임계전이에 대한 조기경보신호 포착 방법은 달라질 수 있다. 이에 대한 Scheffer *et al.*(2009)와 Dakos *et al.*(2012)의 내용을 요약하면 아래 및 표 3-1과 같다.

---

96) prediction 또는 estimation에 대한 번역이다.

표 3-1. 임계전이 시스템의 특성에 따른 조기경보신호 지표

특성	설명	지표
임계감속 (Critical Slowing Down)	<ul style="list-style-type: none"> <li>교란과 섭동에 대한 회복속도(recovery rate)가 낮아지면, 점점 임계점과 분기에 가까워짐.</li> <li>회복속도가 느려지면서 변화율이 감소하기 때문에, 시스템 상태는 과거 상태와 비슷해짐(Rising Memory)</li> <li>회복속도가 느려지면 Fluctuation의 분산이 증가(Rising Variance)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rising Memory : 자기상관성 지표와 스펙트럼 분석, Autocorrelation at lag-1(AR1), Spectral Density 등</li> <li>Rising Variance : 표준편차, CV 등</li> </ul>
편향된 반응 (Skewed Response) & 깜빡임 (Flickering)	<ul style="list-style-type: none"> <li>임계점에 가까워진 시스템이 불안정한 상황에서 혼돈의 가장자리와 평형 상태 사이를 오고 갈 때, 변화의 속도는 느려짐에 따라 시스템은 혼돈의 가장자리, 즉 현재 평형과 멀어지는 방향으로 편향됨</li> <li>즉, 편향이 증가한다는 것은 시스템이 단순히 임계전이에 가까워 졌다는 것 뿐 아니라, 새로운 안정 상태로 넘어갈 수 있는 혼돈의 가장자리에 가까워졌음을 말함</li> <li>해당 상태에서는 시스템이 여러 다른 평형 상태로 전환될 수 있기 때문에, “깜빡거리는(Flickering)”형태로 진폭이 급격하게 증가할 수 있음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>왜도(Skewness), 첨도(Kurtosis)</li> <li>분산(Variance)</li> </ul>

\* 출처 : Scheffer *et al.*(2009); Dakos *et al.*(2012)

시스템이 임계감속(critical slowing down, 그림 3-1의 왼쪽)의 특성을 보이는 경우, 시스템에 교란과 섭동이 가해지면 평형상태로 회귀하는 속성을 보인다. 회복력이 높은(high resilience) 시스템의 경우, 시스템이 교란을 받을 때 평형상태로 돌아가는 속도(이하 회복속도, recovery rate)가 빠르지만, 회복력이 낮은(low resilience) 시스템의 경우 회복속도가 느릴 것이다(Scheffer *et al.*, 2009). 따라서 회복속도가 느려지는 경우 임계전

이와 파국에 가까워진다고 해석할 수 있으며, 회복속도를 측정함으로써 얼마나 시스템이 임계전이에 가까워졌는지를 추정할 수 있다.

그러나, 현실 세계에서 시스템의 구성 요소들의 회복속도를 측정하는 것은 어렵다. 대신 회복속도가 느려진다는 것은 직전 상태(가까운 과거)와 유사해진다는 것을 나타내기 때문에, 시스템의 (단-중기적인) 기억력이 증가(rising memory)하는지를 파악함으로써 임계전이에 따른 시스템의 회복속도의 변화를 측정할 수 있다(Scheffer *et al.*, 2009). 기억력의 증가를 측정하는 방법으로 대표적인 것은 시간적 자기상관성을 확인하는 것(lag-1 Autocorrelation)이며, 다양한 스펙트럼 분석을 통해 이를 확인할 수도 있다. 또한, 회복속도가 느려지는 경우 정상 상태를 중심으로 넓은 변위가 나타나게 되기 때문에, 일반적으로는 시스템의 분산(variance)이 증가하게 된다. 즉, 시간적 자기상관성의 증가, 회복속도의 감소를 나타내는 스펙트럼 분석, 분산의 증가가 임계감속을 나타내는 지표라고 할 수 있다(표 3-1).

임계전이에 가까워진 시스템은 편향되거나 깜빡이는 형태를 보이기도 한다(그림 3-2의 오른쪽). 시스템의 교란은 시스템을 임계전이 이후의 새로운 두 가지의 평형상태에 가깝게 흔들어놓는다. 이 경우 시스템은 임계점에서 가까운 혼돈의 가장자리에 놓이게 되는데, 앞서 설명한 대로 임계점에 접근하는 경우 회복속도가 낮아지게 된다. 따라서 시스템은 임계점에서 더 오래 머무르게 되고, 시간상의 편향이 나타나게 된다. 이러한 두 평형 상태의 인력에 더 강한 영향을 받아 시스템이 각 평형상태 모두를 오르내리는 정도가 되면 “깜빡임(flickering)” 또는 강한 섭동(strong perturbation)이라고 부르는 큰 오르내림이 나타난다. 이는 지속되게 되면 결국 하나의 새로운 안정상태로 변화할 수 있는 시스템의 상태이기 때문에, 시스템이 더 임계전이에 가까워졌음을 나타낸다.

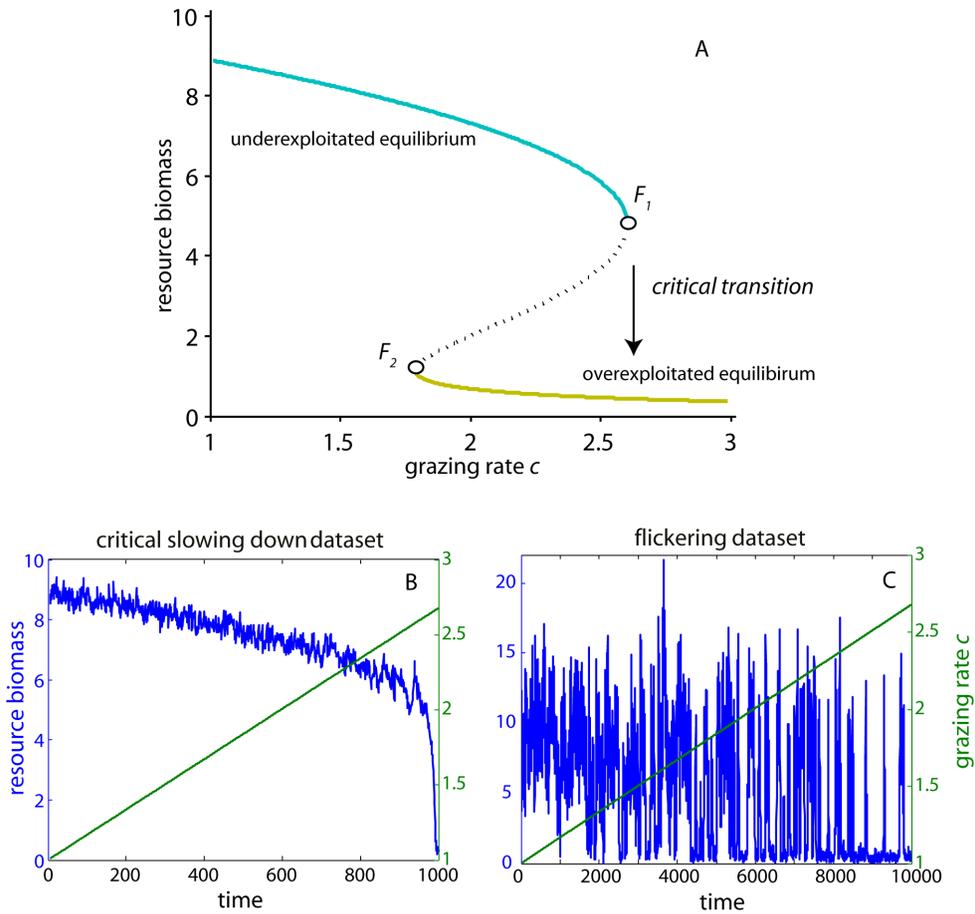


그림 3-1. 임계감속(critical slowing down)과 깜빡임(flickering)의 예시

\* 출처 : Dakos *et al.*(2012), Figure 1.

편향에 대해서는 시간자료를 이용한 왜도(skewness)를 관찰함으로써 조기경보신호를 확인할 수 있다. 왜도가 증가하면, 보다 임계전이에 가까워졌다고 해석할 수 있다. 깜빡이는 상황 또한 왜도로 평가할 수 있지만, 첨도(kurtosis)와 분산을 통해서도 조기경보신호로 사용할 수 있다. 그리고 쌍봉분포(bimodality)의 상태를 통해서도 해당 상황임을 추정해 볼 수 있다.

표 3-2. 임계전이 시스템의 공간자료 기반 조기경보신호 지표

방법/지표	현상/거동			예상되는 변화
	기억의 증대	분산의 증가	패치 기반 특성	
공간적 상관성 (Spatial Correlation)	○			증가
회복시간 (Return Time)	○			증가
이산 푸리에 변환 (Discrete Fourier Transform)	○			파장의 적색화 (spectral reddening)
공간 분산 (Spatial Variance)		○	○	증가
공간 왜도 (Spatial Skewness)		○	○	최대치(Peaks)
패치 크기 분포 (Patch-size Distribution)			○	패치크기 분포가 역함수의 형태를 띠
무늬 패턴 (Regular Spotted Pattern)			○	특정한 형태로 변화 (e.g. 사막화된 지역의 식생패턴)
스펙트럼 밀도 (Power Spectrum)			○	파장의 적색화 (spectral reddening)

\* 출처 : Kéfi *et al.*(2014)

지금까지 확인한 임계전이에 대한 조기경보신호는 시스템 전체의 속성에 대한 시간적인 변화에 초점을 맞추었다. 하지만 Scheffer *et al.*(2009)은 공간적인 패턴(spatial pattern) 또한 조기경보신호로 활용될 수 있음을 지적한다. 대표적인 예시가 많은 생태시스템에서 발생하는 임계전이에 나타나는 자기조직화된 공간 패턴이다. Scheffer *et al.*(2009)에 따르

면, 자기조직화에 따라 특정한 공간 패턴(e.g. 경관조각의 크기)이 스케일 불변<sup>97)</sup>으로 분포한다면, 시스템이 변화에 근접했다는 것을 보여준다고 한다. 이 연구에서는 시공간정보에서 도출가능한 임계전의 초기경보신호를 정리한 Kéfi *et al.*(2014)의 논문을 중심으로 이 이론적 배경과 방법을 제시하고자 한다(표 3-2).

Kéfi *et al.*(2014)는 앞서 설명한 임계전이 시스템의 거동 특성을 임계감속에 따른 기억의 증대(rising memory), 임계감속과 깜빡임과 연관된 변위 증대(rising variability) 그리고 공간자료의 패치 기반 특성(patch based indicators) 이 세 가지로 구분하였으며, 이에 따라 나타나는 공간 지표를 제시하였다(표 3-2).

임계감속과 관련된 공간자료 기반의 사전예방지표는 주로 공간 상관성(spatial correlation)과 주파수 속성(spectral properties)에 대한 지표이다. 교란 이후에 임계감속이 발생하여 회복 시간이 충분히 커져 임계전과 분기를 일으킬 정도의 수준이 되면, 시스템 구성요소들 각각은 공간적으로 유사한 속성을 가지게 된다(Dakos *et al.*, 2010 ; Kéfi *et al.*, 2014). 공간적 유사성은 공간적 상관성 지표로 수치화될 수 있는데, 공간 자기상관 지표로 많이 활용되는 Moran의 I(Moran's I)를 활용하는 경우가 많다. 특히 이는 시간자료에서의 초기경보신호로 lag-1 자기상관지표(AR1)을 사용하는 것과 비슷한 맥락으로 생각할 수 있다. 또한, 지표들에 대한 세미베리오그램분석(semivariogram analysis)에서의 상관거리(correlation range)를 사용하는 경우도 있다(Nijp *et al.*, 2019).

주파수 속성의 변화는 이산 푸리에 변환(discrete fourier transformation)을 사용한다. 이는 공간자료를 다양한 사인과 코사인 파장의 공간 주파수(spectral frequency)로 분해(decompose)함을 통해 패턴을 도출해 내는 방법이다. 공간 주파수는 특정한 공간 단위에 특정한 패턴이 얼마나 반복되는지로 해석할 수 있으며, 공간상의 주기성이 높아질수록 파장의 길이는 줄어드는 것으로 해석할 수 있다. 이 결과는 대체로 복잡하기 때문에 주파수 밀도(파워 스펙트럼, power spectrum)로 변환하여 해석한다. 앞서 언급하였듯 임계감속은 공간적인 유사성과 기억력이 증대되는 것으로 해석할 수 있기 때문에, 파장이 짧아지는 것(즉, 적색으로 파

---

97) scale-invariant 또는 scale-free의 번역어이다.

장이 변화하는 것, spectral reddening)이 바로 시스템이 임계전이에 가까워 졌다는 것을 나타낸다.

공간의 분산과 관련된 지표는 임계감속으로 인한 회복시간 증가와, 분기점에 접근함으로 인해 발생하는 강한 진폭(깜빡거림) 모두와 관련된 것이다. 이 현상은 공간자료에서는 국지적인 깜빡거림에 의한 공간 분산 (spatial variance)의 증가와, 공간 왜도(spatial skewness)의 극대화로 나타난다.

패치 기반 지표는 주로 생태학적인 공간 조기경보신호의 맥락에서 많이 활용된다. 생태계 내에서 생물체의 경쟁과 상호 작용으로 인하여, 생태계의 종 구성과 분포는 특정한 패턴을 띄는 경우가 많으며, 특히 (반)건조지에서 그러하다. 이러한 특정 패턴이 갑자기 나타나거나, 갑자기 사라지거나, 다른 형태로 변화하거나 하는 경우 생태시스템의 변화의 조기경보신호로서 해석될 수 있다. 일례로, 건조지에서의 점 형태의 식생 분포 형태로의 변화는 사막화의 조기경보신호로 주로 해석된다(Rietkerk *et al.*, 2004; Kéfi *et al.*, 2014). 하지만 많은 경관 형태는 이러한 주기성을 띄지 않는 경우가 많으며, 이 경우에는 패치의 크기를 정량화하고, 시스템 전체의 패치크기 분포를 확인하는 형태로 시스템이 얼마나 임계전이에 가까워졌는지를 확인할 수 있다. 패치 크기의 분포가 멱함수(power law)에 가깝거나 유사한 꼬리가 긴(long-tail) 분포를 보인다면, 이는 스케일에 관계없이 자기조직화가 이루어지는 형태라고 해석할 수 있다.

## 2. 임계전이 조기경보신호 탐지 기법과 사례

시계열 자료를 이용한 임계전이 탐지의 세부 방법론에 대해 정리한 Dakos *et al.*(2012)에 따르면, 시계열자료를 이용한 임계전이 탐지 방법은 크게 측정자료 기반 방법(metric-based methods)과 모형 기반 방법(model-based methods)으로 구분할 수 있다. 측정자료 기반 방법은 측정자료를 통계적으로 분석함으로써, 앞서 언급한 시간적 자기상관, 표준편차, 왜도, 첨도 등과 같은 임계현상과 관련된 수치의 변화에서 볼 수 있는 임계전이 신호를 탐지하는 방법이다. 모형 기반 방법은 주어진 측정자료 또는 시계열자료를 임계전이시스템 일반모형에 맞추어(fit) 봄으로써, 임계전이 신호를 확인하는 방법이다. 즉, 두 방법은 임계전이 시스템 내부의 프로세스 변화(모형 기반 방법)를 관찰하는지, 임계전이 시스템에서 도출되는 결과(측정자료 기반 방법)에 집중하는지 대한 차이이다. 이 두 방법 중 임계전이를 관찰하는데 어떤 방법이 더 효과적인지는 아직 구체적으로 밝혀진 바 없지만, 본 연구의 시간스케일과 해상도에 맞는 방법을 정리하여 보았다.

시공간 자료를 이용한 임계전이 탐지는, Kéfi *et al.*(2014)에서 정리한 다양한 형태의 공간적 조기경보신호의 탐지를 활용하여 연구를 진행하였다. 이 연구에서는 앞서 이론적인 측면에서 언급하였던 공간적 자기상관성과 공간 분산을 활용한 연구를 진행하였다. 주파수 속성 및 패치관련 지표와 같은 부분 또한 중요한 부분이지만, 본 연구의 자료 특성에는 적당하지 않다고 판단하여 따로 정리하지 않았다.

### 1) 측정자료 기반 방법(metric-based methods)

측정자료 기반 방법은 앞서 언급한 대로 임계전이의 주요 현상인 임계감속과 깜빡임, 왜곡과 관련된 수치 변화를 확인하는 방법이다. 주로 앞선 시간(time window)과 현재와의 통계적 비교를 통해 임계전이를 확인한다.

임계감속을 확인하는 대표적인 방법은 시간적 자기상관성(Autocorrelation-at-lag 1)에 대한 확인이다. 시간의 흐름에 따라 시간

적 자기상관성이 증가하면 시스템은 임계감속하는 형태를 보인다. 이는 아래와 같은 식으로 표현할 수 있다(식 3-1).

$$\rho_1 = \frac{E[(z_t - \mu)(z_{t+1} - \mu)]}{\sigma_z^2} \quad (\text{식 3-1})$$

$$Z_{t+1} = \alpha_1 Z_t + \epsilon_t$$

여기서  $Z_t$ 는  $t$ 시점에서의 상태값,  $\mu$ 와  $\sigma$ 는  $t$  시점까지 시간시야 범위의 (time window) 평균과 표준편차,  $\alpha_1$ 은 자기상관 계수(autoregressive coefficient),  $\epsilon_t$ 는  $t$ 시점에서의 가우스 잡음(Gaussian white noise)를 말한다. 해당 지표들은 이후의 방식에서도 대부분 동일하게 사용된다.

임계감속 시 증가하는 분산은 시간시야 범위 내의 표준편차 또는 변동 계수를 구하는 방법이 쓰이며, 이 연구에서는 표준편차를 추출하였으며 공식은 아래와 같다(식 3-2).

$$SD = \frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^n (z_t - \mu)^2 \quad (\text{식 3-2})$$

깜빡임, 왜곡과 관련된 지표는 시간시야 범위 내에서 왜도와 첨도를 구하는 형태로 계산할 수 있다. 왜도(skewness,  $\gamma$ )와 첨도(kurtosis,  $\kappa$ )의 증가는 시스템이 임계전이에 가까워졌다는 것을 나타낼 수 있으며 아래와 같은 형태로 계산할 수 있다(식 3-3~4).

$$\gamma = \frac{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (z_t - \mu)^3}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (z_t - \mu)^2}} \quad (\text{식 3-3})$$

$$\kappa = \frac{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (z_t - \mu)^4}{\left( \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (z_t - \mu)^2} \right)^2} \quad (\text{식 3-4})$$

이 값들의 증가와 감소가 어떠한 강도로 나타나고 그것이 의미가 있는지는 켄달의 타우(Kendall's Tau,  $\tau$ ) 상관관계분석을 활용하여, 시간의 변화(1→n)에 따른 각 수치의 변화를 검정할 수 있다. 이 값은 -1에서 1까지 나타나며, 다른 상관관계지표와 마찬가지로, 1에 가까울수록 높은 양의 상관관계, -1에 가까울수록 낮은 양의 상관관계를 나타낸다.

시간시야를 이용한 해당 지표는 알려져 는 통계적 유의도를 검증할 방법이 없으며, 특히 제1종 오류(false positive)를 막는 방법이 필요하다, 이를 위해 Dakos *et al.*(2012)는 단순한 귀무가설을 설정하여 이를 검증하는 방법을 제시하였다. 이는 분석 지표가 가지고 있는 고유의 푸리에 스펙트럼(fourier spectrum)과 진폭(amplitude)을 활용하여 임의의 유사모형(surrogate model)을 만들어, 이와 본래 결과를 비교해 봄으로써 임의의 모형과의 차이가 없다는 귀무가설을 설정하고, 이에 대한 기각 여부를 확인함으로써 임의성이 있는지를 검정해 내는 방법이다.

측정자료 기반 방법을 사용하여 임계전이에 대한 조기경보신호를 추적한 연구의 대표적인 사례는 빙하코어 자료를 활용한 과거 급격한 기후변화에 대한 분석적 연구(Dakos *et al.*, 2008), 뇌전증과 같은 신체의 급격한 변화에 대한 연구(McSharry *et al.*, 2003; Scheffer *et al.*, 2009에서 재인용)습지시스템의 임계전이에 대한 연구(Alibakhshi *et al.*, 2017) 등 다양한 분야의 임계전이와 조기경보신호 확인에 활용되었다(그림 3-2). 주로 장기간 또는 시간해상도가 높은 고기후 연구와 모형결과를 기반으로 한 연구에서는 본 연구를 통해서 분명한 조기경보신호와 임계전이가 확인된 반면, 본 연구와 유사한 위성영상을 활용한 연구에서는 측정기반 분석결과로 분명한 조기경보신호와 임계전이가 확인되지 않았다. 이는 해당 방법이 표본의 수에 결정적인 영향을 받기 때문으로 보이며, 이는 1970년대 이후부터 활용 가능한 위성영상을 활용한 본 연구와 같은 연구에는 다소 불리한 것으로 보인다(Alibakhshi *et al.*, 2017).

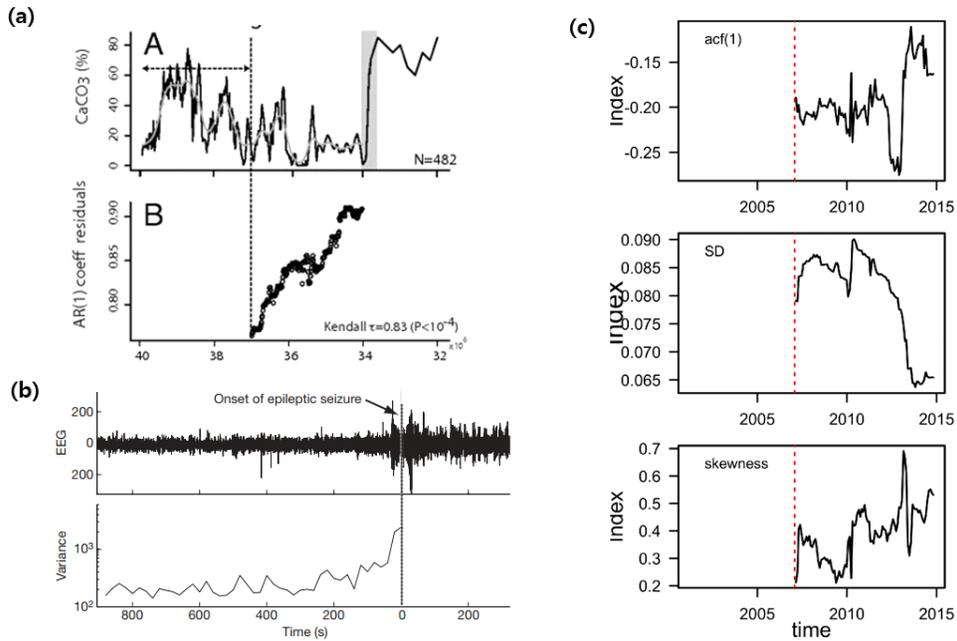


그림 3-2. 측정자료 기반 방법의 적용 사례

- (a) “ODP tropical Pacific core 1218”의 자료를 이용한 3400만년 전 빙하기 종료 시점(회색 지점)에 대한 임계전이를 시간적 자기상관성을 통해 확인하였으며 높은 정도의 임계전이가 확인됨, Dakos *et al.*(2008)에서 인용.
- (b) 뇌전증(간질,epileptic seizure)은 뇌파 검사 시계열 자료에서 몇 분 일찍 미묘한 조 기경보 신호의 변화를 나타냄. McSharry *et al.*,(2003)의 내용을 Scheffer *et al.*(2009)에서 재인용.
- (c) 이란 Dorge Sangi 습지의 위성영상(MODIS) 식생지수(NDVI)에 대한 측정자료 기반 적용 사례. 다른 결과에 비해 분명한 결과를 나타내지 않음. Alibakhshi *et al.*(2017)에서 인용.

## 2) 모형 기반 방법(model-based methods)

모형 기반 방법은 앞서 설명한 대로 정해져 있는 임계현상과 연관된 일반모형에 자료를 대입 또는 맞추어(fit) 봄으로써, 임계전이의 신호가 있는지를 확인하는 모형이다. 앞서 측정자료 기반의 임계현상 관측이 현실 세계 임계현상의 결과에 대한 기술(記述, description)에 집중하였다면, 모형 기반 방법은 임계전이가 시스템 내의 어떠한 프로세스에 의해 발생하였는지 집중한다고 볼 수 있다. 이 연구에서는 Dakos *et al.*,(2012)이 제시한 다양한 방법 중 비모수적 추세-확산-도약 모형과 시간 가변성 자기회귀 모형을 사용하였다.

“비모수적 추세-확산-도약 모형”이라고 번역할 수 있는 Nonparametric Drift-Diffusion-Jump Model(DDJ Model)은 임계전이가 일어나는 비선형적 프로세스에 대해서 일반모형에 대입(fitting)하고자 하는 접근방법이다(Dakos *et al.*, 2012). 이 방법에서는 임계전이를 일으키는 시스템의 알려지지 않은 프로세스를 추세, 확산, 도약의 세 가지 개념으로 모사(surrogate)할 수 있다는 것을 전제한다(Carpenter and Brocks, 2011). 그 개념공식은 아래와 같다(식 3-5).

$$dx_t = f(x_t, \theta_t)dt + g(x_t, \theta_t)dw + dJ_t \quad (\text{식 3-5})$$

이 공식에서  $t$  시점에서의 시스템의 상태(state,  $x_t$ )는 비선형 함수  $f(x_t, \theta_t)$ 으로 표현되는 추세(drift), 비선형 함수  $g(x_t, \theta_t)$ 로 표현되는 확산(diffusion),  $J_t$ 로 표현되는 도약(jump)에 의해 결정된다. 추세(drift)는 부분적인 변화율에 대해서 측정하는 것이며, 확산(diffusion)은 비교적 잦은 간격으로 발생하는 조그마한 충격(shock)을 나타내는 지표이며, 도약(jump)는 간헐적으로 일어나는 큰 충격을 의미한다. 여기서 비선형 함수  $f(), g()$ 를 구할 수 있는 공식은 알려지지 않았으며, 여기서  $\theta_t$ 는 알려지지 않고 측정할 수도 없다. 이에 대한 대안으로 비모수 회귀(nonparametric regression)을 이용하여 추세, 확산, 도약 모형을 맞추는(fitting) 식으로 임계전이의 조기경보신호를 추정하는 모형을 만들어 낼 수 있다(그림 3-3).

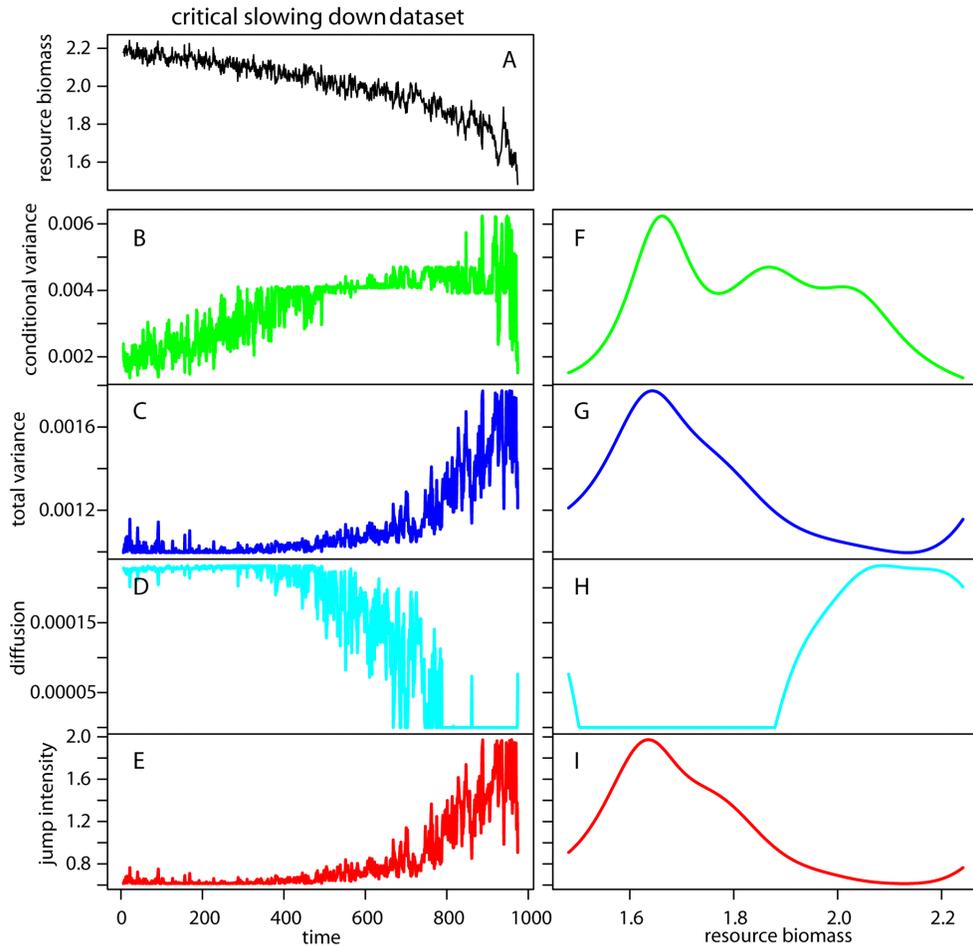


그림 3-3. 비모수적 추세-확산-도약 모형의 사례

Dakos *et al.*(2012)에서 생체량(Biomass)에 대한 임계감속 모형 자료를 분석에 활용한 사례임. B와 F는 조건부 분산(Conditional Variance)지표로써 추세를 나타내며, C와 G는 총 분산(Total Variance), D와 H는 확산(Diffusion) 지표, J :도약 밀도(Jump Intensity) 지표임. F,G,H,I와 같이 각 자료와 지표를 비교함으로써 임계 지점을 선정하고, 이 자료에 부합하는 시점(B,C,D,E)를 확인함으로써 임계전이의 시점을 확인할 수 있음

시간 가변성 자기회귀 모형(Time-varying AR(p) model)은 복잡계시스템에서 임계전이시 발생하는 회복률(return rate)의 감소를, 시간의존적(time-dependent) 모형에 기반하여 확인하는 접근 방법이다(Dakos *et al.*, 2012). 시간 가변성 자기회귀 모형의 개념적 공식은 다음 식 3-6과 같다(Ives and Dakos, 2012).

$$x(t) = b_0(t-1) + \sum_{i=1}^p b_i(t-1)[x(t-i) - b_0(t-1)] + \epsilon(t) \quad (\text{식 3-6})$$

$$b_i(t) = b_i(t-1) + \Phi_i(t)$$

여기에서  $p$ 는 자기회귀모형의 차수를 말하며,  $x(t)$ 는  $t$  시기의 상태 변수,  $b_0$ 는 시계열자료의 평균을 결정하는 계수,  $b_i$ 는 평균으로부터의 각각의 시점의 변동성(dynamics)을 결정하는 계수,  $\epsilon(t)$ 는 상태 변수의 환경변위를 결정하는 가우스 확률 변수(Gaussian random variable)이다.

시계열 자료의 특성과 목적에 따라, 적합한 시간 가변성 자기회귀 모형의 차수와 변수를 선정하는 방식은 다양한 방식이 있다. 하지만 복잡계 시스템의 임계전이를 확인하기 위해 시간 가변성 자기회귀 모형을 채택한 연구에서 일반적이거나 객관적으로 합리적인 방법을 특정하기는 어려운 실정이다. 시간가변성 자기회귀 모형의 차수 설정 또한 개념적으로는 1차 이상의 정수를 무한히 사용가능하나, 대부분의 연구에서는 3차 정도까지만 활용하며 최대 8차 정도가 최대로 사용하는 차수이다. 연구의 목적 및 방법에 따라 적합 모형 도출 방법을 이용하여 차수별 모형을 도출하고, 모형의 성능을 검사하는 방법인 Akaike's Information Criterion(AIC)를 통해 최적의 차수를 선정하는 형태로 진행되는 경우가 일반적이다.

시간 가변성 자기회귀 모형으로 임계전이를 확인할 방법은 Ives and Dakos(2012)이 제안한 유사고유치(pseudo-eigenvalue)를 활용한 방법이다. 최적 적합모형의 유사고유치가 증가하거나 1이 넘으면 임계전이에 가까워졌다고 해석할 수 있다(Ives and Dakos, 2012; Dakos *et al.*, 2012)(그림 3-4 참조).

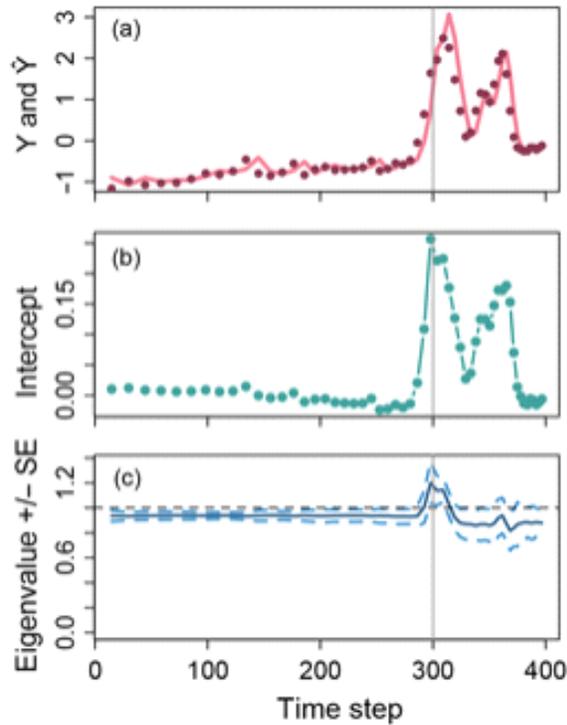


그림 3-4. Taranu *et al.*(2018)의 토양퇴적물 코어 모형에 대한 Timevarying AR(n) 모형 적용 사례

유사고유치를 바탕으로 임계전이가 사전에 확인됨을 알 수 있다.

### 3) 공간적 조기경보신호 지표

앞서 언급한 대로 공간시스템이 분기점에 접근하여 임계전이에 가까워 지게 되면 시스템의 구성요소들은 서로 공간적인 유사성을 가지게 되고, 이는 대개 Moran's I로 정량화된다.

두 서로 다른 위치인 거리가  $r$ 만큼 분리된  $z[i,j]$ 와  $z[m,n]$ 에 대한 Moran's I의 공식은 아래 식 3-7~8과 같이 정의한다(Kéfi *et al.*,2014).

$$C_2(r) = \frac{MN \sum_{i=1}^M \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{n=1}^N w[i,j;m,n] (z[i,j] - \bar{z})(z[m,n] - \bar{z})}{W \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (z[m,n] - \bar{z})^2} \quad (\text{식 3-7})$$

$$\bar{z} = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N z[m,n]}{MN} \quad (\text{식 3-8})$$

$w[i,j;m,n]$ 는 두 환경자료가  $r$ 거리 안에 들어왔는지를 확인하는 매개변수이며( $r$ 거리 안에 들어온 경우 1, 그렇지 않으면 0),  $W$ 는 이동거리 안에 들어오는 총 개수이다. 시스템이 임계전이의 분기점에 들어오면 이 함수는 모든 방향에서 증가하는 패턴을 보인다.

공간분산은 회복시간과 관련된 지표로 시스템이 임계전이의 시점에 오르기 직전에, 시스템의 공간 분산은 증가하게 된다. 공간분산은 다음과 같은 공식으로 정량화할 수 있다(Kéfi *et al.*, 2014).

$$\sigma^2 = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (z[m,n] - \bar{z})^2 \quad (\text{식 3-9})$$

추가적으로 공간왜도는 공간분산과 관련된 지표로 시스템이 정상상태로 돌아가는 것에서 얼마나 멀어지고 있는지를 확인하는 지표로 깜빡임과 연관이 있는 지표다. 공간왜도는 아래와 같이 정량화할 수 있다(Kéfi *et al.*, 2014).

$$\gamma = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \frac{(z[m,n] - \bar{z})^3}{\sigma^3} \quad (\text{식 3-10})$$

앞서 언급한 환경요인의 공간적인 유사성은 세미베리오그램분석의 상관

거리를 통해 분석되기도 한다(Nijp *et al.*, 2019). 세미베리오그램은 반분산값이라고도 표현될 수 있으며, 거리  $h$ 만큼 떨어진 자료들 간의 차이를 제공한 것의 기댓값으로 아래 식 3-11과 같이 정의할 수 있다(Curran, 1988; 정관용 등, 2012).

$$2\gamma(h) = E[z(x) - z(x+h)]^2 \quad (\text{식 3-11})$$

$h$ 가 증가하게 되면 세미베리오그램 기댓값(반분산,  $2r(h)$ )는 증가하게 되는데, 일정 거리가 되면 더 증가하지 않고 일정한 패턴을 유지하게 된다. 이를 상관거리(correlation range) 또는 분리거리라고 한다(그림 3-6a 참조). 즉 상관거리는 공간적 유사성이 더는 나타나지 않는 거리기 때문에 Moran's I와 마찬가지로 공간적인 유사성, 공간적 자기상관성을 나타내는 지수라 할 수 있을 것으로 보인다.

그림 3-5는 앞서 언급하였던 공간적 (자기)상관, 공간분산, 공간왜도를 임계전이 조기경보신호에 적용한 사례이다. 생태계가 퇴화 또는 황폐해질 수록(degraded) 해당 지표는 증가함을 확인할 수 있다. 그림 3-7은 세미베리오그램분석 결과를 예시로 든 것이다. 앞서 그림 3-6과 마찬가지로 시스템의 퇴화가 일어날수록 상관거리가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그림 3-6은 초지의 황폐화에 대한 세미베리오그램 기반 조기경보신호 분석의 사례이다. 그림 3-6d에서 확인할 수 있듯이 임계전이의 징후(pattern)가 발생하였을 때(그림 3-6의  $\gamma$ ) 분리거리가 증가함을 확인할 수 있다.

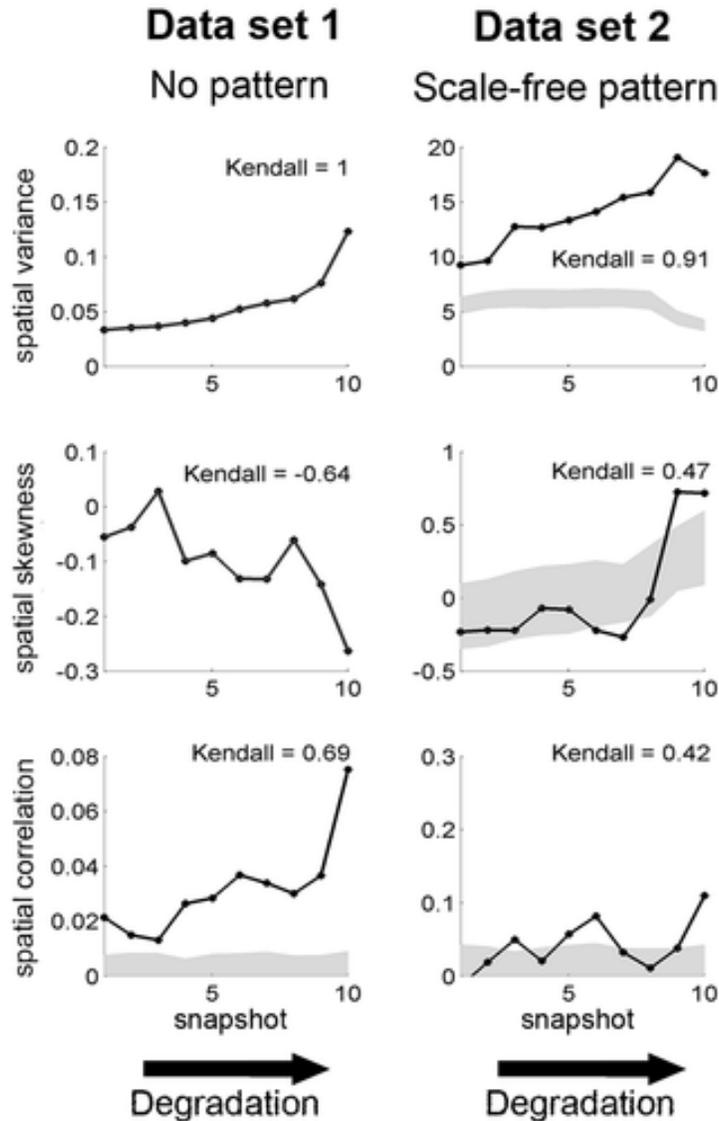


그림 3-5. 공간적 조기경보신호 지표

Kefi *et al.*(2014)가 모형 제약과 시연을 위해 사용한 가정의 무패턴(Data Set 1) 및 Scale-free 패턴(Data Set 2)의 임계전이 시공간시스템 모형. 생태적 저하가 심해질수록 공간분산, 공간왜도, 공간상관성이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

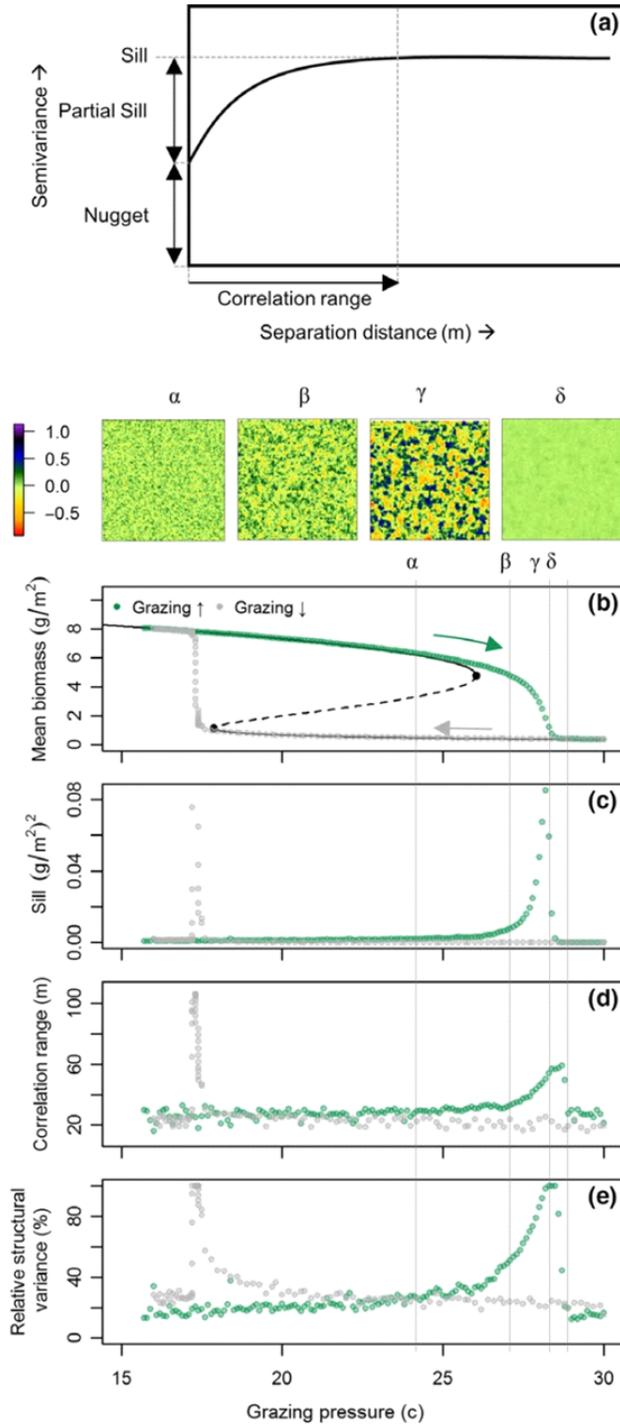


그림 3-6. 공간적 자기상관 분석을 이용한 공간적 조기경보 신호 사례 (Nijp *et al.*, 2019)

- (a) 세미베리오그램 모형의 예시
- (b) 바이오메스 값(분석 대상)
- (c) 분리 거리
- (d) 상관거리
- (e) 상대구조분산

## 제 2 절 연구방법

1절에서 확인한 임계전이에 대한 조기경보신호 도출방법을 이용하여, 2절에서는 북한의 토지황폐화와 식량생산 감소로 인한 “1990년대 북한 대기근”이라는 임계전이현상에 대한 조기경보신호를 구체적으로 어떻게 도출하였는지를 설명한다. 먼저 북한의 토지황폐화와 1990년대 북한의 대기근을 설명할 수 있는 연구자료를 어떻게 수집·가공하였는지를 설명한다. 그리고 앞서 설명한 조기경보신호 도출방법이 어떤 형태로 구현되었는지를 소개한다.

### 1. 연구자료

이 연구에서는 1990년대 중반 북한의 대기근을 중심으로, 북한의 토지황폐화와 식량생산량 감소문제의 조기경보신호를 관찰하는 것이 목적이다. 북한의 토지황폐화 문제를 대표할수 있는 지표로, 식생의 1차 생산량을 나타내고 때문에 토지황폐화 문제에 대한 거시적인 지표로 기능할 수 있는 식생지수(NDVI)를 사용하였다(Le *et al.*, 2012). 북한의 식량생산 및 식량수급 관련 정보를 위해서 FAOSTAT의 북한 식량 통계를 사용하였다. 그 외 토지황폐화와 식량생산에 영향을 끼칠 수 있는 기후와 인문사회 자료를 사용하였다 (세부내용 부록 1 참조).

이 연구에서 사용하는 시계열자료는 크게 1년 단위 자료, 15일 단위 자료, 1일 단위 자료로 나누어진다<sup>98)</sup>. 식생지수와 기상자료를 제외한 모든 자료는 1년 단위 자료이다. 식생지수와 기상자료의 경우 1년 단위로 변환하거나, 원자료를 그대로 사용하거나, 1년보다 작은 단위로 요약할 수 있다. 이를 그대로 사용하였을 때 확인되는 경향성과 주기성의 문제는 연구결과의 해석을 어렵게 할 수 있다. 이에 따라 이 연구에서는 이를 적절한 방법으로 분해하여 분석하는 것 시계열 분해법을 사용하였다. 구체적으로

---

98) 1년보다 더 큰 주기의 자료는 분석에 사용할 수 없어 제외하였다.

는 김준하 등(2018)의 환경자료에 대한 시계열 분해방식을 중 선형추세요소를 분해한 자료(detrending), 주기 및 순환요소를 분해<sup>99)</sup>한 자료(deperiod)를 도출하였으며, 연 자료를 제외한 시계열 자료에 활용하여, 추세나 주기성에 영향을 최소화하고자 하였다.

식생지수와 기후자료의 경우 시·공간자료로 구축하였으며, 식량생산 자료와 기타 인문사회 자료들은 연 단위의 시간자료로 구축되었다. 정규화식생지수는 15일 단위 자료와 1년 단위로 요약한 자료<sup>100)</sup>를 모두 사용하였다. 기후자료는 유일하게 일 단위 자료로 제공되는데, 일 자료를 그대로 활용 시 강우자료에서 빈번하게 발생하는 “0”값이 발생하는 오류를 고려하여, 식생지수와 똑같이 15일 단위로, 1년 단위<sup>101)</sup>로 구분을 진행하였다.

식생지수는 산림지와 농지와 같은 토지이용에 따라, 해발고도의 높음과 낮음에 따라 전혀 경향이 다른 경우가 많다. 그래서 북한 전체를 대표할 수 있는 지표로 요약하기는 어렵다. 하지만 부족한 정보와 해상도 문제로 인해 이를 구분해서 대푯값을 도출하고 분석하는 것에는 한계가 있다. 따라서 이 연구에서는 북한 전체의 식생지수를 대표할 수 있다고 여겨지는 가급적 많은 지표(평균, 최대·최소값, 중앙값, 표준편차, 변동계수)를 사용하여 북한 전체 정규화식생지수 대푯값을 추출하였고, 이에 대한 각각의 분석을 진행하였다. 그뿐만 아니라, 정규화식생지수 자료 1,868개 좌표에 대한 결과를 일일이 분석에 투입하기도 하였다. 반면 기후자료는 자료가 균등하게 분포하고 있지 않기 때문에, 공간적으로 요약하는 것은 적절하지 않다고 판단하였고, 21개 지점에 대해서 별개 자료로 분석을 진행하였다.

이들의 통합해서 토지황폐화 문제와 식량생산 저하 각각 또는 전체를 포괄하는 지표를 개발하여 적용하는 것이 가장 명쾌한 결론을 제시할 수 있겠으나, 현실적으로 정당화 할 수 있는 방안이나 대표 지표를 선정하는 것은 어려웠다. 자료 각각의 시점이나 범위, 해상도(시·공간)가 각자 달라 어떤 형태로 통일할지도 어려운 부분이 있었다. 결과적으로는 통합 지표를 선택하지 않고 관련한 모든 지표를 반영하고자 하였다.

---

99) 주기요소를 Fourier 2차식으로 정의한 후, 계수를 추정하는 형태로 이루어졌다.

100) 연평균 자료를 사용하였다.

101) 평균기온은 연평균을, 최고기온은 연최고기온을, 최저기온은 연최저기온을, 강수량은 연 합계강수량을 대푯값으로 사용하였다.

표 3-3. 임계전이 조기경보신호 도출 모형의 분석 및 해석방법 요약

구분	측정자료 기반	모형기반		공간적 조기경보신호		
		Nonparametric DDJ	Timevarying AR(n)	공간상관/분산/왜도	Semivariogram	
분석 방법	연구	Dakos <i>et al.</i> (2012)	Carpenter and Brock(2011), Dakos <i>et al.</i> (2012)	Pace <i>et al.</i> (2017), Taranu <i>et al.</i> (2018)	Kéfi <i>et al.</i> (2014)	Nijp <i>et al.</i> (2019)
	도구	R "earlywarnings" Package	R "earlywarnings" Package	DynamicLinear-Models by Carpenter(in R) + R MARSS Package	R "Spatialwarnings" Package	R gstat Package
해석 방법	대기근 시점 (1995)과 현재와의 비교	○	○	○	○	○
	구체적인 임계전이 시점 특정	X	○	△	△	△
	취약지점 (Hotspot) 추출	○	○	△	X	X
	임계전이의 프로세스적 해석 (이 연구 한정)	X	○	X	△	△

## 2. 임계전이 조기경보신호 탐지 모형 설정

시계열 임계전이 모형은 2절에서 언급한 바와 같이 이 연구에서는 Dakos *et al.*(2012)의 연구에 따라 측정자료 기반 방법(metric-based methods)과 모형기반 방법(model-based methods)을 사용하였다(표 3-3).

### 1) 측정자료 기반 방법

측정자료 기반 방법의 분석은 Dakos *et al.*(2012)의 방법을 R로 구현한 R “earlywarnings” 패키지를 사용하였다(Dakos and Lahti, 2013). 분석에 사용한 R version은 3.6.2이다. 측정자료 기반 방법의 분석은 해당 패키지의 “generic\_ews” 함수를 사용하였으며, 원자료를 지수함수로 변환하고, 가우스 필터(Gaussian filtering)를 적용하였다. 이를 위한 부트스트랩(bootstrap) 분석은 100회 진행되도록 설정하였다. 시간 창은 해당 패키지의 기본 옵션이자 선행 연구에서 많이 사용하는 “시계열자료 총 길이의 절반”으로 설정하였다. 결과는 지수별 결과와 시간자료와의 상관분석(Kendall’s Tau)을 사용하여, 양의 관계가 있는 경우 임계전이가 있다고 볼 수 있으며 그 관계가 높을수록(Kendall’s Tau가 1에 가까울수록) 임계전이에 보다 더 가까워졌다고 해석할 수 있다. 유사모형 자체의 유의도 검증에는 해당 패키지의 “surrogate\_ews”를 활용하였으며, 임계전이에 가까워졌다는 정도에 관한 판단은 상관관계분석의 유의수준(p-value)을 바탕으로 하였다.

측정자료 기반 방법은 모형의 종료 시점이 임계전이의 시점인가를 확인하는 방법이기 때문에, 임계전리로 예상되는 시점을 설정해야 할 필요가 있다. 따라서 측정자료 기반 분석은 자료를 시작 시점(1960-1982년)부터 대기근 발생의 시점이라 볼 수 있는 1995년까지와, 시작 시점에서 종료 시점(2015-2019)까지 둘로 나누어 분석을 진행하였다. 이를 통해 실제 각 시계열자료의 측면에서 1990년대 북한 대기근이 임계전리로 해석될 수 있는지, 그리고 1980~1990년대에 한정되어 있는지를 해석하고자 하였다.

## 2) 모형 기반 방법

모형 기반 방법은 앞서 설명한 대로 비모수적 추세-확산-도약 모형(Nonparametric DDJ Model)과 시간 가변성 자기회귀 모형(Time varying AR(n)) 을 사용하였다.

DDJ Model은 Carpenter and Brocks(2011) 와 Dakos *et al.*(2012)에 기반을 둔 “R earlywarnings” 패키지를 활용하였으며, 세부적인 도구 정보는 측정자료 기반 분석과 같다. 이 패키지에서는 결과로서 조건부 분산(conditional variance), 총 분산(total variance), 확산함수의 예측치, 도약함수의 예측치 등이 도출되며, 각 지수는 시계열의 임계전이의 추세-확산-도약 부분을 각각 대표한다. 모형에 투입한 원자료와 결과로 도출되는 각 지수를 비교했을 때, 각 지수의 최대값(peak)을 보이는 원자료가 나타나는 시점에 임계전이 나타난다고 해석할 수 있다(Dakos *et al.*, 2012)(그림 3-3 참조). 즉, 각 지수의 최대치가 나타나는 지수와 원자료의 시점이 바로 각 지수별 임계전이의 시점이라 해석할 수 있다.

해당 모형에 관한 선행 연구에서는 주로 추세를 나타내는 조건부 분산과 확산을 중심으로 임계전이를 설명한다. 이 연구에서도 마찬가지로 해석하고자 하였다. 단, 15일 단위의 시계열자료는 임계전이를 해석하기 복잡하기 때문에, 연 단위로 최대값(peak)이 보이는 시점의 횟수를 세는 방법으로, 얼마나 임계전이의 조기경보신호가 자주 나타났는지를 확인하는 형태로 임계전이를 관찰하였다. 앞서 측정자료 기반 방법과 마찬가지로 시작 시점부터 1995년까지, 그리고 시작 시점부터 현재까지 각 지수의 경향 또는 임계전이 조기경보신호 도출 건수가 증가하는지를 확인함으로써<sup>102)</sup> 1995년의 임계전이에 조기경보신호가 있었는지 확인하였다. 뿐만 아니라 앞선 측정자료 기반 방법과 달리 종료 시점 설정이 모형 자체 결과에 큰 영향을 주지 않는다. 따라서 각 지수가 많이 도출된 시점 또는 조기경보신호가 많이 도출된 시점으로 조기경보신호가 도출된 시기를 비교적 구체적으로 특정할 수 있어 이를 활용하여 해석하였다. 마지막으로 각 지수의 특

---

102) 마찬가지로 두 시기의 각 지수 및 임계전이 신호 횟수와 시간 흐름과의 Kendall's Tau 분석을 진행하였다.

성에 맞춰서, 해당 지수 또는 해당 시계열에 어떠한 프로세스의 임계전이의 징후가 나타났는지를 해석하고자 하였다.

시간 가변성 자기회귀 모형(Time-varying AR(p) model)은 자료의 특성에 부합하는 시간 가변성 자기회귀 모형을 추정하는 방법이 다양하며, 어떤 방법을 택하나에 따라 결과가 다소 달라질 수 있다. 일반적으로 가장 적합하다고 알려진 방법은 존재하지 않으나, 이 연구에서는 비교적 최근에 연구가 진행되었으며 소스코드가 공개되어 접근이 쉬운 Carpenter의 방법론<sup>103)</sup>을 적용하여 연구를 진행하였다(Pace *et al.*, 2017; Taranu *et al.*, 2018). 이 방법은 Holmes *et al.*(2014)의 R MARSS 패키지를 기반으로 최대우도 상태 공간 방법(maximum-likelihood state-space method)을 적용하여 시간 가변성 자기회귀 적합모형을 도출해내는 방법이다. 앞서 언급한 대로 일반적으로 사용하는 1~3차 적합모형을 도출해내고, AIC(Akaike's Information Criterion)을 통해 최적의 차수 모형을 선정하는 형태로 진행하였다.

결과해석은 유사고유치(pseudo-eigenvalue)를 중심으로 진행하였으며, 유사고유치가 1 이상인 경우 임계전이와 가까워졌다고 정의하였다. 연 단위보다 구체적인 시간해상도를 가지고 있는 자료의 경우에는 해석이 복잡해지기 때문에, 유사고유치가 1 이상인 시점의 수를 세어 임계전이에 가까운 사건이 얼마나 자주 발생하였는지를 확인하고자 하였다. 앞서와 마찬가지로 시작 시점과 1995년까지의 시점과, 시작 시점과 종료 시점까지의 결과를 비교·검토하였다. 뿐만 아니라 유사고유치의 결과를 통해서 임계전이를 나타내는 시점을 특정하는 형태의 해석 또한 진행하였다.

### 3) 공간적 조기경보신호 도출방법

공간상관(공간적 자기상관성, Moran's I), 공간분산, 공간왜도의 경우 R Spatialwarnings Package를 활용하였다(Genin, 2018). 해당 지표들은

---

103) Pace et al.(2017)의 호수 미생물 생태계 연구와 Taranu et al.(2018)의 고환경 기록 연구에서 사용. 소스 코드는 R에서 사용할 수 있는 형태로 Taranu et al.(2018)에서 공개되었음.

[https://github.com/SRCarpen/Demo\\_DynamicLinearModels](https://github.com/SRCarpen/Demo_DynamicLinearModels)

R Spatialwarnings의 “generic\_sews”함수를 이용하여 계산하였으며, 통계적 유의성 검정은 해당 패키지의 “incicstest” 함수를 활용하였다.

공간상관을 위해 추가적으로 사용한 세미베리오그램 분석은 R gstat Package을, 이 중에서도 “fit.variogram” 함수를 분석을 위해 사용하였다 (Pebsma, 2004; Graler *et al.*, 2016). 해당 R 패키지에서는 세미베리오그램의 네 가지 형태(Exp<sup>104</sup>, Sph<sup>105</sup>, Gau<sup>106</sup>, Mat<sup>107</sup>)를 설정할 수 있는데, 이 중에서 적합도가 높은 모형으로 자동으로 선택할 수 있도록 설정하였다.

공간모형의 경우 해상도가 어떤지, 그리고 공간자료의 배치가 어떻게 되는지에 따라 결과가 상이하게 도출된다. 특히 결측치가 많은 경우 오류가 발생하는 경우가 많다<sup>108</sup>). 따라서 공간적 조기경보신호 도출에서는 오류가 최대한 적게 도출되는 방향으로 북한이 최대한 포함될 수 있는 임의의 형태를 설정할 수 밖에 없었다(그림 3-7). 또한 공간적 조기경보신호 도출은 연속형 공간자료가 있는 식생지수에 한정하여 분석을 진행하였다.

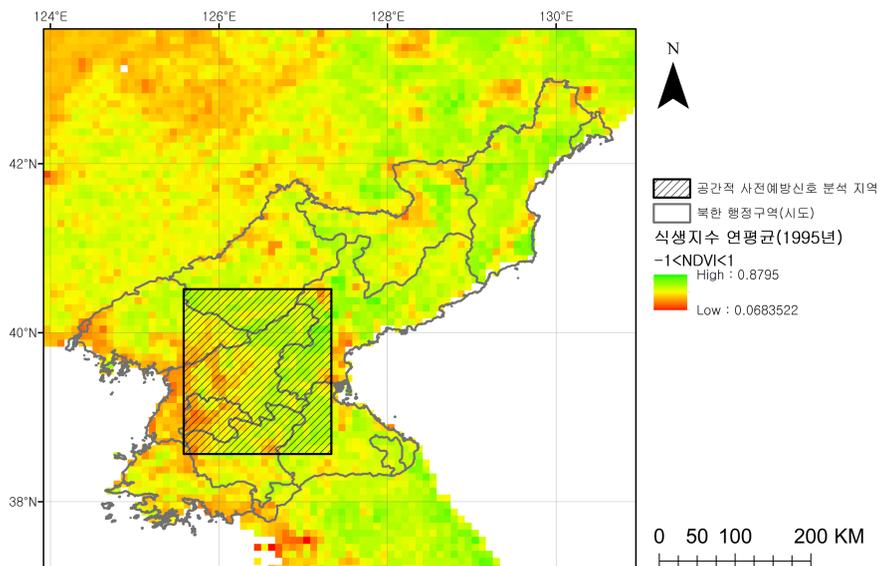


그림 3-7. 공간적 조기경보신호 도출을 위한 연구지역 설정

104) Exponential variogram model, 지수함수 베리오그램 모형

105) Spherical variogram model, 구형 베리오그램 모형

106) Gaussian variogram model, 가우시안 베리오그램 모형

107) Matern variogram model

108) R Spatialwarnings Package는 특히 이에 민감해서, 수가 완전히 채워진 행렬의 형태(직사각형, 결측값 없음)로 데이터를 구성하지 않으면 계산이 되지 않는다.

### 제 3 절 측정자료 기반 북한 대기근과 토지황폐화 문제 의 조기경보신호 여부 확인

북한 대기근이 발생하였던 1995년 이전 대기근에 대한 조기경보신호가 있었는지를 확인하기 위해, 측정자료 기반 조기경보신호 탐지기법을 적용하였다. 2절에서 제시한 대로, 대기근이 있었던 1995년 이전의 북한 토지 황폐화와 식량생산 감소 관련 자료에 측정자료 기반 조기경보신호 탐지기법을 적용하여, 조기경보신호가 탐지되었는지 여부를 확인하였다. 일종의 대조군으로써, 각 자료가 가지고 있는 전체 시계열을 대상으로도 이 방법을 적용하여 비교해 보았다. 식생지수의 경우, 시간자료로 요약한 자료 뿐만 아니라 화소 개개의 측정자료 기반 분석을 진행함으로써, 조기경보신호 탐지 여부에 대한 지도화를 진행하여 조기경보신호 관점에서의 취약지점을 도출하였다.

결과는 대기근의 현상적인 부분인 식량생산과 수급의 변화에서부터, 토지황폐화 지표를 나타내는 식생지수, 식량생산과 토지황폐화에 강한 영향을 미치는 기후자료, 기타 인문사회자료의 순으로 기술하고, 이를 종합적으로 정리하여 대기근 전 조기경보신호가 나타났는지에 대한 결론을 내리고자 한다.

#### 1. 식량 관련 자료의 조기경보신호

표 3-4는 북한 식량생산 관련 지표들에 대한 측정자료 기반 조기경보신호 결과를 확인한 것이다. 자료의 시작시점인 1960년대부터 1995년까지에 대한 결과에서는, 식량생산량과 식량수입량의 조기경보신호가 관찰되지 않는다. 대신 식량생산량과 식량수입량을 합친 결과와 해당 결과를 1인당 또는 단위면적당으로 분류하였을 때 분명한 임계전이에 대한 조기경보신호가 관찰된다(그림 3-8). 즉, 식량생산량과 식량수입량 자체는 1995년 전후의 대기근에 대한 징후가 분명하게 포착되지 않았지만, 이를 합쳤을 때는 분명한 징후가 포착되었다고 해석할 수 있다. 즉 생산 측면과 외부지원

표 3-4. 북한 식량생산 관련 지표들의 측정자료 기반 Rolling Window 조기경보신호 분석(강도, Kendall tau) 요약

자료구분	시작시점부터 1995년까지			
	AR(1)	표준편차	왜도	첨도
식량생산량(톤)	0.3987**	0.3203*	0.0588	0.6340***
식량수입량(톤)	-0.0065	-0.3464**	-0.4248**	-0.7124***
식량생산량+수입량(톤)	0.5817***	0.4510***	0.4379**	0.1503
1인당 식량생산량+수입량(KG)	0.5817***	0.4641***	0.4118**	0.1634
단위면적당 식량생산량(Kg/ha)	0.4118**	0.3987**	0.0327	0.5163***
단위면적당 옥수수 생산량(100g/ha)	0.3203*	-0.2288	0.6993***	0.6863***
단위면적당 감자 생산량(100g/ha)	-0.6078***	0.8824***	-0.0327	-0.2288
단위면적당 쌀 생산량(100g/ha)	0.2418	0.8562***	-0.2026	0.0588
자료구분	시작시점부터 2019년까지			
	AR(1)	표준편차	왜도	첨도
식량생산량(톤)	-0.1218	0.8713*** ★	0.0805	-0.3839***
식량수입량(톤)	-0.7793***	-0.6736***	0.6138***	-0.0943
식량생산량+수입량(톤)	0.4989***	0.8667*** ★	-0.0483	-0.4575***
1인당 식량생산량+수입량(KG)	0.5080***	0.8667*** ☆	-0.0805	-0.4575***
단위면적당 식량생산량(Kg/ha)	-0.1080	0.8299*** ★	-0.0483	-0.3747***
단위면적당 옥수수 생산량(100g/ha)	-0.4345***	0.9908*** ★	-0.1310	-0.6368***
단위면적당 감자 생산량(100g/ha)	-0.5770***	0.8483*** ★	0.4759***	0.0529
단위면적당 쌀 생산량(100g/ha)	-0.4069***	0.7701*** ☆	-0.4667***	-0.6736***

\* 주

- 수치는 총 시계열의 절반에 대한 Time Window으로 계산한 각 지표와 시간의 흐름과의 상관관계지표(Kendall's Tau, -1~1)
- Kendall's Tau의 유의수준(P-value) : \*\*\* 0.01, \*\* 0.05, \* 0.1
- 데이터의 유의도 검정(surrogate Test, P-value) : ★ 0.05, ☆0.1

측면을 모두 고려하였을 때에만 당시 징후를 포착할 수 있었다는 결론을 내릴 수 있다.

단, 최근인 2019년까지의 해당 자료들의 조기경보신호는 표준편차 외에는 분명하게 도출되지 않는다. 이는 식량수급의 관점에서 최근에는 확연하게 위기 징후가 줄어들었다는 것을 확인해 주는 결과라 볼 수 있다. 특히 임계감속(critical slowing down)을 나타내는 AR(1) 조기경보신호가 1995년까지의 자료에서만 분명하게 나타났던 것은, 1995년 이전의 식량수급 상황은 늦게 회복이 되는 상황, 즉 회복력이 떨어지는 상황이었다고 해석해 볼 수 있다. 2019년까지의 식량수급 상황은 AR(1)의 결과가 불분명하기 때문에 비교적 약하다고 할 수 있다.

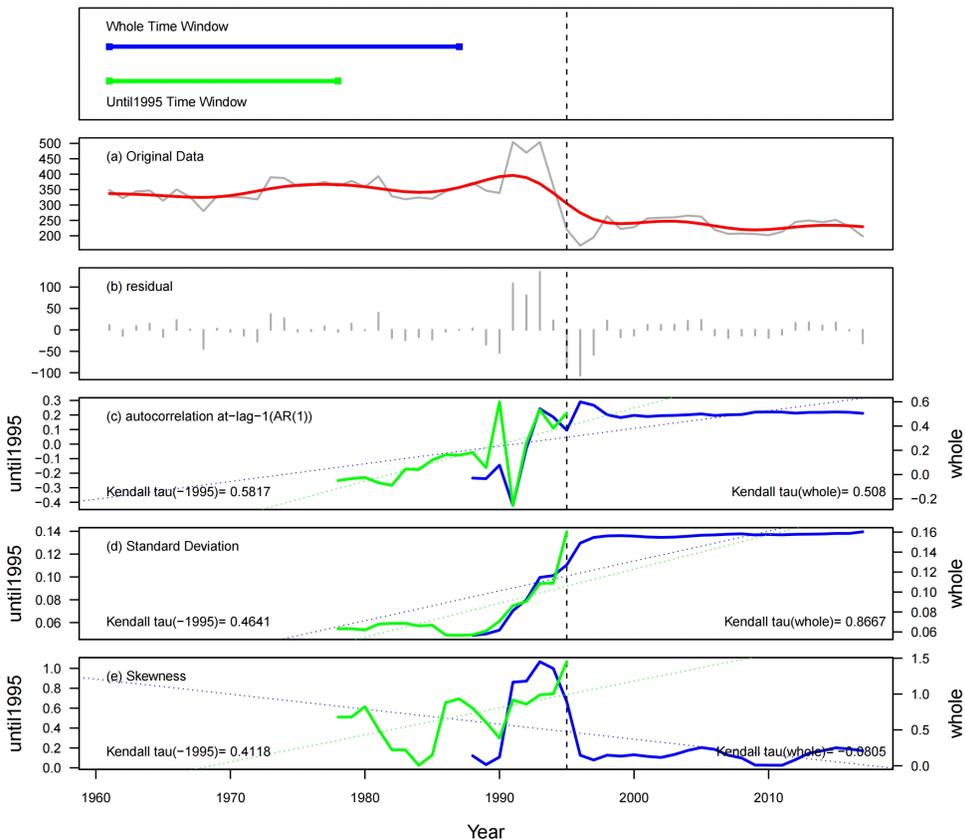


그림 3-8. 북한의 1인당 “식량생산량+수입량”에 대한 Rolling Window 조기경보신호 분석결과 예시(왼쪽: 1961-1995, 오른쪽: 1961-2019)

표 3-4에서 추가적으로 주목해야 할 부분은 세부 곡물인 옥수수와 감자 생산량의 조기경보신호다. 옥수수는 대기근 이전에 주요 작물이자, 산지에서 잘 자라지만 뿌리가 얇아 토양침식과 산사태 위험성을 높이는 작물로 알려져 있으며, 감자는 이에 대한 대안으로 제시된 작물이다(부경생 등, 2001). 1995년까지의 결과를 비교해 보면 옥수수는 표준편차를 제외한 모든 부분에서 조기경보신호가 나타났으며, 특히 왜도나 첨도 지표에 기반을 둔 징후가 포착되었다. 1995년까지의 감자 자료와, 2015년과 의 옥수수 및 감자 자료에서는 징후가 나타나지 않거나 약하게 나타나는 경향을 보인다.

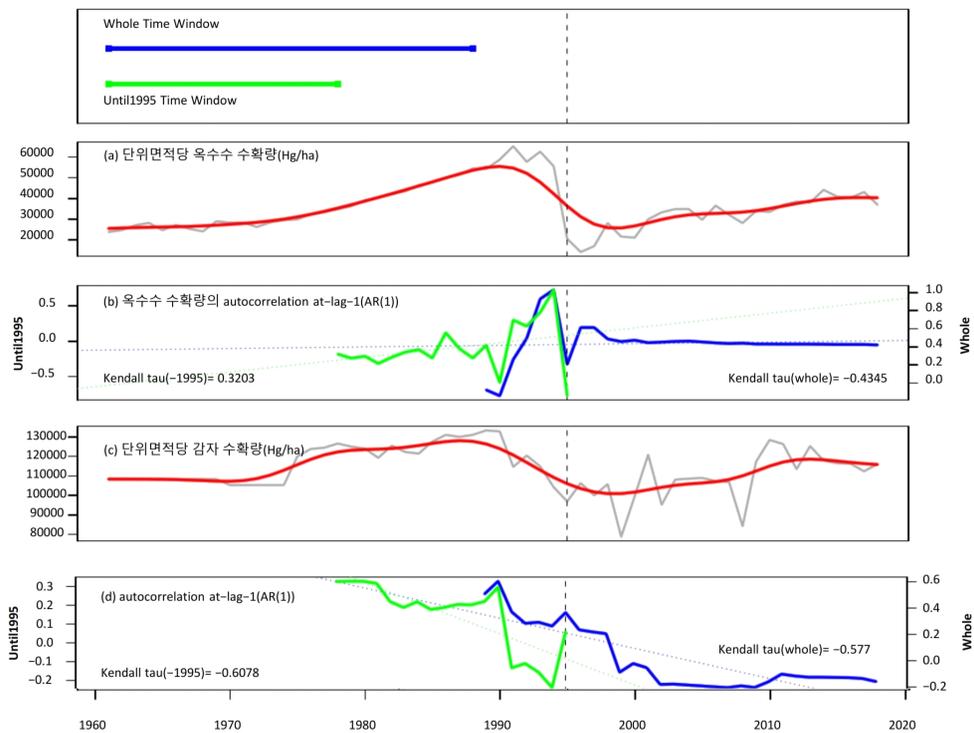


그림 3-9. 북한의 단위면적당 옥수수 수확량과(a,b) 감자 수확량(c,d)에 대한 측정자료 기반 Rolling Window 조기경보신호 분석결과(AR(1)) 비교(왼쪽: 1961-1995, 오른쪽: 1961-2019)

## 2. 식생지수의 조기경보신호

시공간자료인 식생지수에 대해서 연 단위로 자료를 요약하는 경우, 자료의 시작 시점이 1982년으로 1995년까지는 약 12년 가량이 되어 분석 자체가 되지 않는 문제가 있었다. 따라서 식생지수의 경우 원래 자료의 속성대로 15일 단위의 자료를 사용하고, 2절에서 설명한대로 추세 및 주기성을 제거하는 형태로 분석을 진행하였다. 그리고 대표성의 문제와 관련하여서는 식생지수의 공간 평균, 최대값, 최소값, 중앙값, 표준편차, 변동계수를 모두 적용하는 것으로 하였다.

먼저 북한 전역을 대상으로 한 정규화식생지수의 공간적 대푯값에 대한 측정자료 기반 조기경보신호를 분석한 결과는 표 3-5와 같다. 1981년부터 1995년까지는 AR(1)의 측면에의 조기경보신호는 모든 지표에서 분명하게 도출되었다. 표준편차에서는 식생지수의 평균과 식생지수의 표준편차를 제외한 지표에서 비교적 강한 사전예방징후가 관찰되었다. 이는 1981년부터 2015년까지의 결과와 분명하게 구별되는 결과라 할 수 있다. 특히 변동계수(CV)가 선행연구와 유사한 전형적인 조기경보신호 도출결과의 형태를 보였다(그림 3-10). 그리고 AR(1)을 중심으로 징후가 포착된 것에 미루어 보았을 때, 식생지수도 식량생산량과 마찬가지로 원래 상태로 돌아오는 회복력의 저하, 즉 임계감속의 프로세스로 징후가 포착되었다고 판단할 수 있다.

시작시점부터 최근(2015년)까지의 조기경보신호 결과는 AR(1)과 표준편차 측면에서는 대기근때 까지의 결과보다 분명하지 않지만, 왜도와 첨도에서는 특히 변동성의 측면에서 분명한 조기경보신호가 도출되었다. 이는 최근 식생지수 측면에서 검출되는 조기경보신호가 과거와는 달리 변동성의 증가(flickering)의 속성을 띤다는 것을 보여주는 결과라고 할 수 있다.

덧붙여, 식생지수의 평균지표가 다른 지표에 비해서 임계전이를 잘 나타내지 않는 이유는, 앞서 설명한 대로 산림과 농지, 산지와 평지에 따라 식생지수의 반응이 서로 다르게 나타남에 따라 토지황폐화에 따른 영향들이 서로 상쇄되기 때문으로 추정할 수 있다. 반면 변동계수와 최대최소값 같은 변동성을 나타내는 지표들이 당시 북한 전체의 토지황폐화 경향을 해당 시기의 지표에서 더 잘 반영하고 있다고 해석할 수 있다.

표 3-5. 북한 전역의 정규화식생지수의 공간적 대푯값에 대한 측정자료 기반 Rolling Window 조기경보신호 분석(강도, Kendall tau) 요약

구분	시작시점부터 1995년까지			
	AR(1)	표준편차	왜도	첨도
평균	0.5611 ***	-0.1588 ***	0.1015 **	-0.4484 ***
최대값	<b>0.7974</b> ***	<b>0.4246</b> ***	-0.7387 ***	-0.8107 ***
최소값	<b>0.8814</b> *** ★	<b>0.6226</b> ***	-0.5335 ***	-0.6525 *** ★
중앙값	<b>0.7461</b> *** ★	<b>0.8655</b> ***	0.0521	0.0185
표준편차	0.8447 *** ★	0.0661	-0.7048 ***	-0.5631 ***
변동계수	<b>0.8137</b> ***	<b>0.8353</b> ***	-0.3090 ***	-0.5610 ***
구분	시작시점부터 2015년까지			
	AR(1)	표준편차	왜도	첨도
평균	0.6769 *** ☆	0.8367 ***	-0.3053 ***	-0.2298 ***
최대값	<b>0.4444</b> ***	<b>0.4440</b> ***	-0.3315 ***	-0.5563 ***
최소값	0.1590 ***	-0.5627 ***	0.2391 ***	0.6273 ***
중앙값	<b>0.3328</b> ***	<b>0.1675</b> ***	-0.4591 ***	-0.2738 ***
표준편차	0.7451 *** ☆	0.8656 *** ★	0.5821 ***	0.2345 ***
변동계수	0.4293 ***	0.2858 ***	0.7416 ***	0.3215 ***

\* 주

- 수치는 총 시계열의 절반에 대한 Time Window으로 계산한 각 지표와 시간의 흐름과의 상관관계지표(Kendall's Tau, -1~1)
- Kendall's Tau의 유의수준(P-value) : \*\*\* 0.01, \*\* 0.05, \* 0.1
- 데이터의 유의도 검정(surrogate Test, P-value) : ★ 0.05, ☆0.1
- 시작시점 : 1981년 7월 1일, 종료시점 : 2015년 12월 31일(15일 간격 자료)

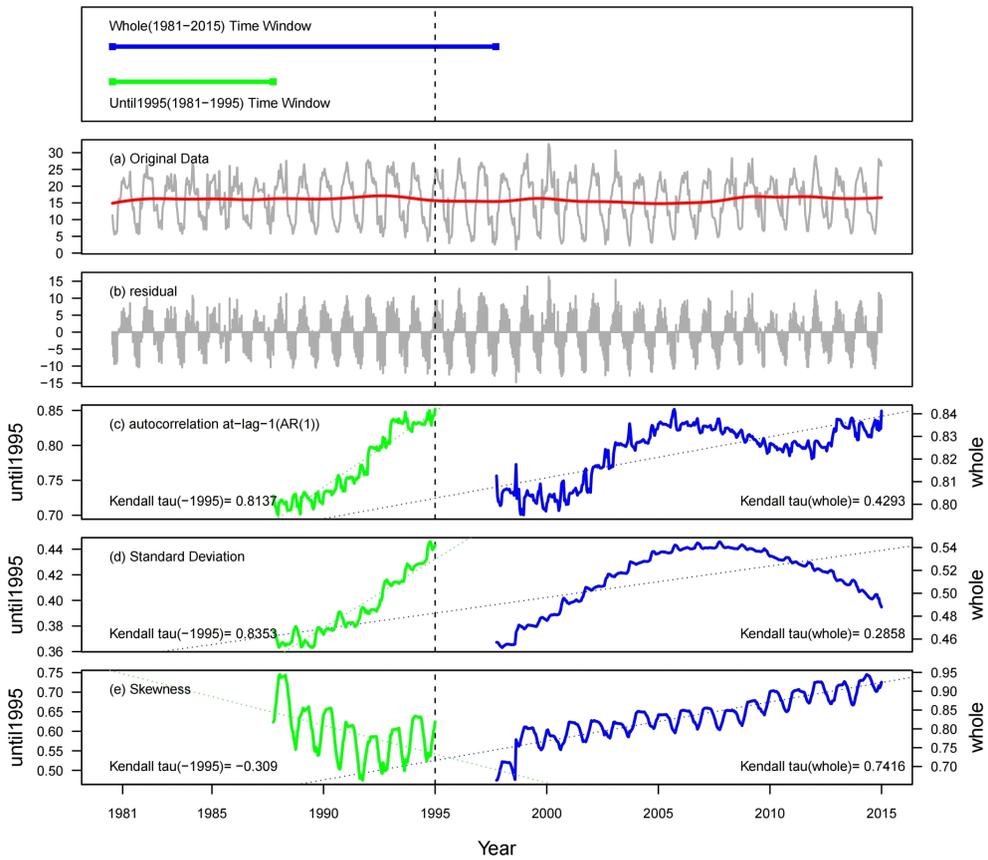


그림 3-10. 북한 정규화식생지수의 공간적 대푯값 중 변동계수에 대한 Rolling Window 조기경보신호 분석결과 예시(왼쪽: 1981-1995, 오른쪽: 1981-2015)

측정자료 기반 조기경보신호 탐지를 식생지수 화소별로 진행한 결과 요약은 그림 3-11<sup>109)</sup>와 같다. 각 지표의 조기경보신호가 분명한 지역을<sup>110)</sup> 1981년에서부터 1995년까지(그림 3-11 a,b), 그리고 1981년부터 2015년까지(그림 3-11 c,d) 도출해 낸 것이다. 그 결과 AR(1)을 기준으로 1981년부터 1995년까지는 총 477개 지점(전체의 25.81%), 1981년부터 2015년까지는 총 839개 지점(44.91%)이 임계전이가 관찰된다는 결과가 도출되었다.

이는 전체 평균과는 상당히 다른 결과로, 지역적인 스케일로 보았을 때는 1995년까지보다 2015년까지가 훨씬 식생지수의 임계전이의 조기경보신호가 빈번하게 등장했음을, 즉 지역적으로는 식생지수의 측면에서 토지황폐화와 대기근의 징후가 1995년 이후에도 더 강하고 지속적으로 나타남을 보여주는 결과라 할 수 있다.

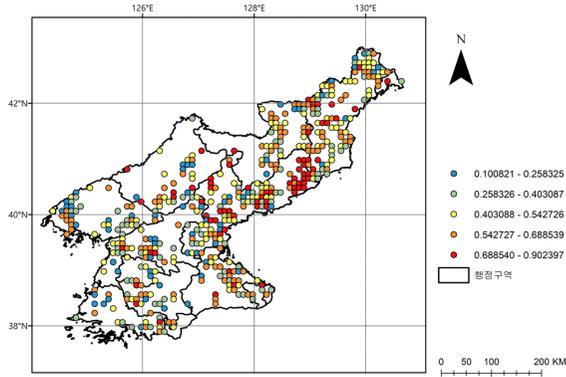
그림 3-11에서 확인할 수 있는 다른 특성은 1995년까지의 임계신호가 높게 도출된 지점은 주로 함경남도 해안 산지에 집중되어 있다는 점(그림 3-11a,b, 그림 3-12), 2015년까지는 함경남도 해안 일대와 함께 평안남북도-황해도가 추가되었다는 점이다(그림 3-11 c,d). 특히 함경남도-북도(관북지방) 해안 일대는 어느 시기-어느 자료에서나 강한 조기경보신호의 경향을 보인다(그림 3-12). 반면 시기와 지표를 통틀어 공통적으로 묘향산과 낭림산맥 일원, 평안남도 서부 해안, 금강산 일원에는 다소 조기경보신호 도출이 드문 편인데(그림 3-13), 이는 해당 지역이 고산지 또는 관광지로 임계전리와는 다소 무관한 속성을 가졌다고도 해석할 수 있지만, 본 자료에서 확인하기 어려운 1980년대 이전의 변화가 있을 수 있어 이러한 해석에는 주의가 요구된다.

---

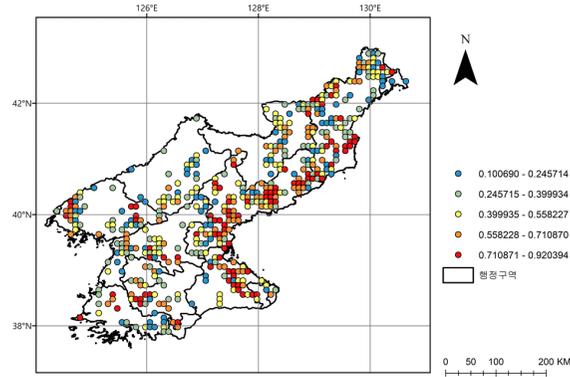
109) 주로 유의미하게 도출되었던 AR(1)(그림 3-11 a,c)와 표준편차(b,d)로 구분하였다.

110) AR(1)과 표준편차의 해당 시기 내 Kendall's Tau가 0.1이상, 유의도가 0.05 이내

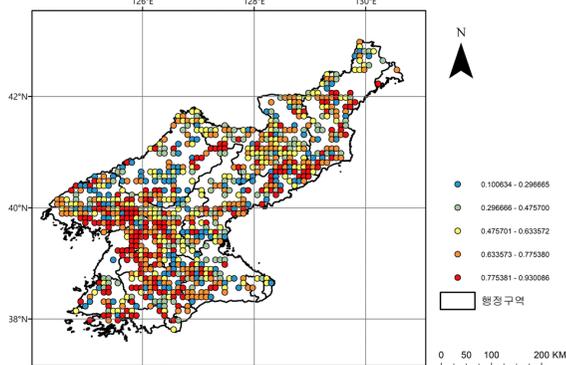
(a) 1995년까지의 AR(1) Kendall Tau 0.1이상(P-value >0.05)



(b) 1995년까지의 표준편차 Kendall Tau 0.1이상(P-value >0.05)



(c) 2015년까지의 AR(1) Kendall Tau 0.1이상(P-value >0.05)



(d) 2015년까지의 표준편차 Kendall Tau 0.1이상(P-value >0.05)

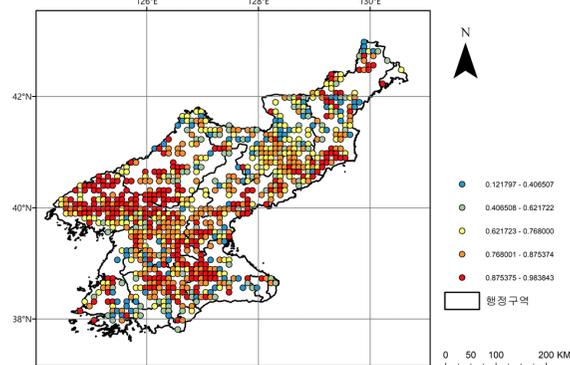


그림 3-11. 북한  
정규화식생지  
수의 측정자료  
기반 Rolling  
Window 조기  
경보신호 분석  
결과의 공간적  
분포

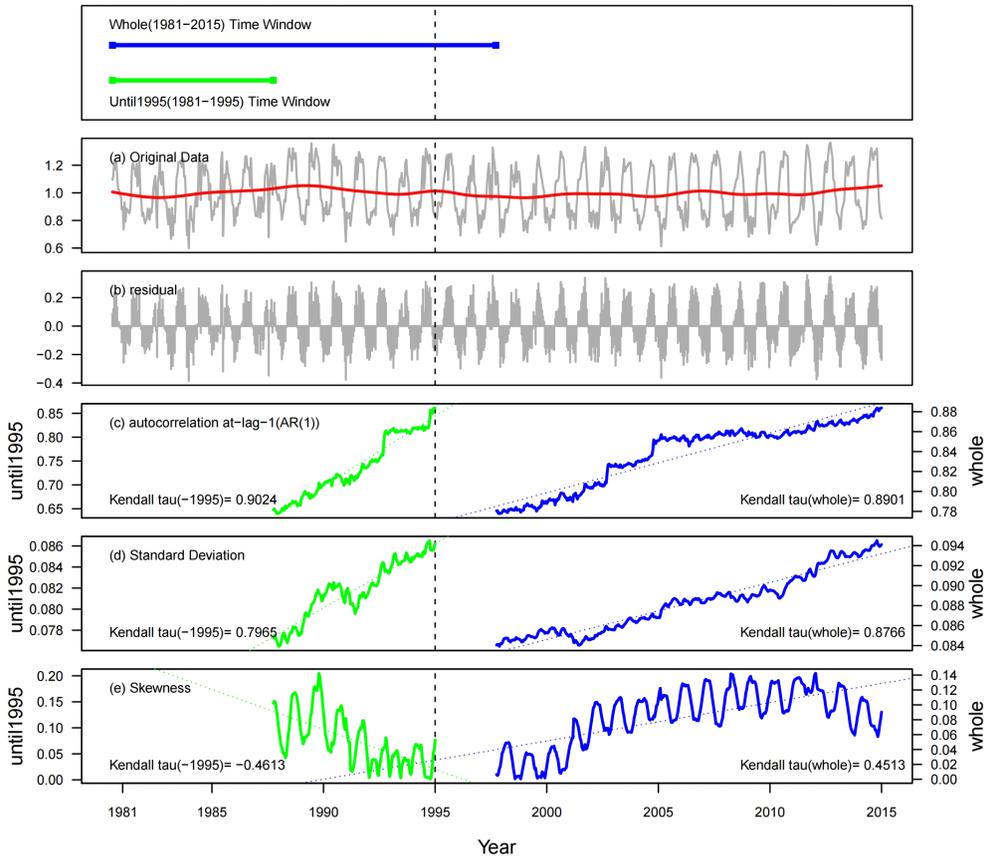


그림 3-12. 북한 정규화식생지수의 지점별 Rolling Window 조기경보신호 분석결과 중 전형적인 조기경보신호 결과 예시(왼쪽: 1981-1995, 오른쪽: 1981-2015)

\* 주 : 해당 지점은 총 1868개 지점 중 775번 지점이며, 좌표는 N 40.47792, E 126.307임, 관북지방에 해당

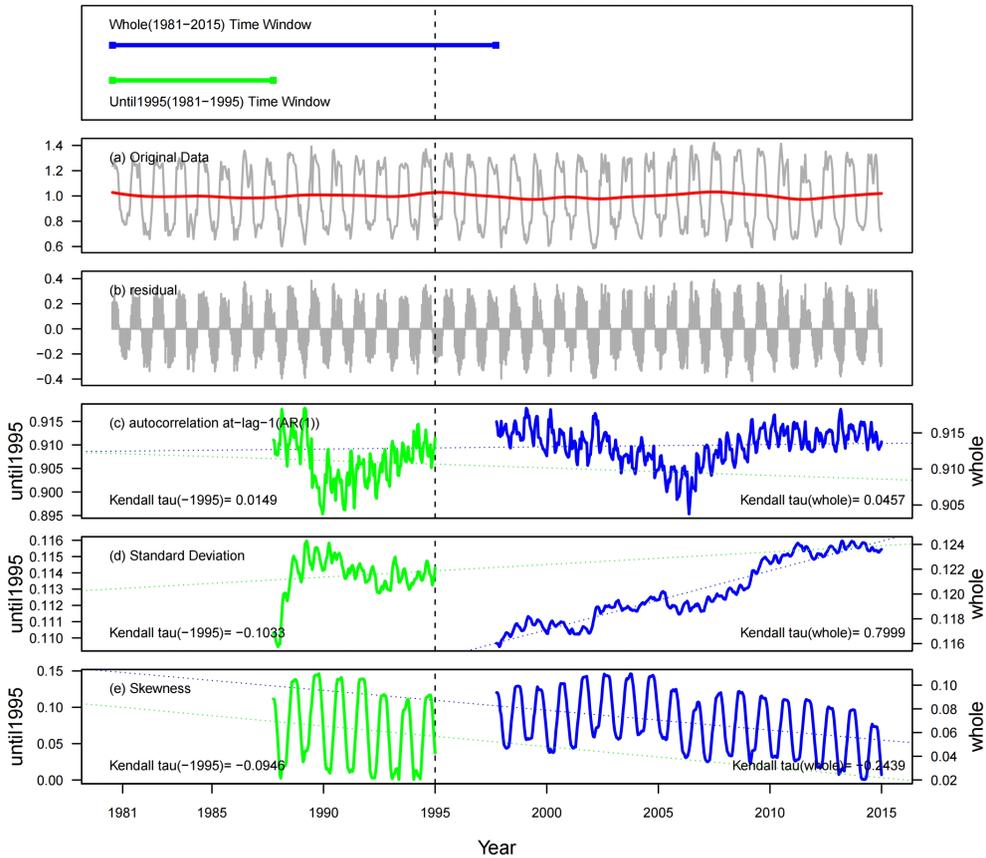


그림 3-13. 북한 정규화식생지수의 지점별 Rolling Window 조기경보신호 분석결과 중 조기경보신호와 무관한 결과 예시(왼쪽: 1981-1995, 오른쪽: 1981-2015)

\* 주 : 해당 지점은 총 1868개 지점 중 1494번 지점이며, 좌표는 N 38.89458, E 128.807임, 휴전선 일원에 해당

### 3. 기후자료의 조기경보신호

기후에 대한 측정자료 기반 분석은 앞서 언급한대로 북한 전체를 대표하는 자료를 뽑는 것이 어려워 북한의 21개 기후측정지점 모두를 투입하는 형태로 분석을 진행하였다. 그리고 연단위 및 15일 단위 자료에 대한 분석을 진행하였다. 연단위 분석 결과와 15일 단위의 분석 결과 중 최고·최저기온에 대한 결과는 해석하기에 어려움이 있어<sup>111)</sup> 이 논문에 신지 않았다. 대신, 15일 단위 자료에 대한 평균기온과 강수에서는 임계전이 탐지에 유의미한 수준의 결과가 도출되었다고 판단하였다.

각 측정지점을 대상으로 평균기온에 대한 측정자료 기반 임계전이 조기경보신호에 대한 분석결과는 표 3-6(1973-1995년) 및 표 3-7(1973-2019년)과 같으며, 그 중 평양을 일원으로 한 사례는 그림 3-14와 같다. 1995년까지의 조기경보신호에서는 AR(1)의 결과가 대체로 높은 강도의 임계전이에 대한 조기경보신호를 보여주었으며(평균 Kendall tau 0.6343), 이는 2019년까지의 결과와는 분명한 차이가 있었다(0.1617). 지역별로 살펴보면, 1995년까지 평양을 포함하는 관서 지역 일대가 평균기온의 임계전이를 더 강하게 나타냈다(0.6985). 이는 기온의 측면에서 북한, 특히 평양과 같은 중심 지역이 1990년대 임계전이와 가까운 조기경보신호를 나타냈다는 것을 보여 준다. 다만, 표준편차, 왜도, 첨도에서는 그러한 경향을 나타내지 않았다.

---

111) 조기경보신호의 강도를 나타내는 Kendall tau 지표가 지역별로 상이하여, 이를 전체 평균내었을 때 거의 모든 지표에서 0에 수렴하였다. 그 외에도 임계전이에 대한 조기경보신호인지 아닌지 알 수 없는 복잡한 결과와 유의수준이 검출되어 다루지 않기로 한다.

표 3-6. 1973년부터 1995년까지의 평균기온 변화에 대한 측정자료 기반 Rolling Window 조기경보신호 분석(강도, Kendall tau) 요약

지역		지표			
		AR(1)	표준편차	왜도	첨도
관서지방 (평안남·북도, 자강도)	중강	0.6801***	0.9353***☆	-0.5089***	-0.5816***
	강계	0.7754***	0.9453***	-0.4372***	-0.6739***
	수풍△	0.4949***	0.2613***	-0.1069**	-0.1483***
	신의주	0.7387***	0.9555***	-0.2787***	-0.5615***
	구성△	0.5157***	-0.4591***	-0.2066***	-0.5044***
	안주△	0.7622***★	-0.5293***	-0.1056** ☆	-0.4931***
	양덕△	0.8165***★	-0.5007***	0.0723 ☆	-0.3982***
	평양	0.7381***	0.9482***☆	-0.3344***	-0.6244***
관북지방 (함경남·북도, 양강도, 원산일대 포함)	남포△	0.7650***★	-0.6226***	0.2178***	-0.4981***
	선봉	0.6935***	0.9450***	0.1852***	-0.5257***
	삼지연△	0.7565***☆	-0.5100***	0.3711***	0.2001***
	청진	0.7333***	0.9534***	0.1672***	-0.5625***
	혜산	0.6902***	0.9438***	-0.3157***	-0.5301***
	풍산△	0.4015***	-0.6561***	0.4209***	0.4430***
	김책	0.8099***	0.9353***	0.1104***	-0.5802***
	장진△	0.1214**	-0.6593***	-0.3103***	0.4443***
	희천△	0.8077***☆	-0.3800***	0.1117** ☆	-0.6300***
	함흥	0.7072***	0.9537***	-0.1865***	-0.6241***
휴전선 일원 (황해남·북도, 강원도)	신포△	0.1855***	-0.7947***	-0.2184***	-0.2932***
	원산	0.7669***	0.9547***	-0.1455***	-0.6695***
	장전△	0.6474***	0.2862***	0.0729	-0.1833***
	사리원	0.7323***	0.9457***	-0.4379***	-0.6672***
	신계△	0.5896***	-0.6156***	-0.5041*** ☆	-0.3524***
	용연△	0.5963***	-0.2878***	-0.2791***	-0.4530***
	해주	0.7668***	0.9526***	-0.2835***	-0.6176***
개성	0.7703***	0.9467***	-0.3170***	-0.6414***	
평강△	0.0635	-0.5700***	-0.4758***★	-0.1240**	

\* 주

- 총 27개 지점 중 수풍군 등 14개소(△)는 1981년 1월 1일부터 현재까지, 나머지 13개소는 1973년 1월 1일부터 현재까지의 자료임
- 수치는 총 시계열의 절반에 대한 Time Window으로 계산한 각 지표와 시간의 흐름과의 상관관계지표(Kendall's Tau, -1~1)
- 원자료에서 경향성을 제거하고(detrending), 계절성을 제거하는(deperiod) 형태로 전처리 진행
- Kendall's Tau의 유의수준(P-value) : \*\*\* 0.01, \*\* 0.05, \* 0.1
- 데이터의 유의도 검정(surrogate Test, P-value) : ★ 0.05, ☆0.1

표 3-7 1973년부터 2019년까지의 평균기온 변화에 대한 측정자료 기반 Rolling Window 조기경보신호 분석(강도, Kendall tau) 요약

지역		지표			
		AR(1)	표준편차	왜도	첨도
관서지방 (평안남·북도,자강도)	중강	0.0904***	-0.0170	-0.2388***	-0.0351
	강계	0.1756***	0.0392	-0.0304	0.0095
	수풍△	0.3182***★	0.4505***	-0.0394	-0.4905***
	신의주	0.4215***★	-0.0361	-0.4478***★	-0.0888***
	구성△	0.2890***	-0.5470***	0.0803***	0.3525***
	안주△	0.5040***	-0.2782***	0.4073***	0.1656***
	양덕△	0.1687***	-0.1127***	0.6963***	0.7653***
	평양	0.2393***	-0.0284	-0.2449***	-0.0147
	남포△	0.5247***	0.2588***	0.5502***	0.4993***
관북지방 (함경남·북도, 양강도, 원산일대 포함)	선봉	0.0813***	-0.0132	-0.6135***★	-0.1245***
	삼지연△	-0.1643***	-0.0201	0.7102***	-0.6086***
	청진	0.0479*	-0.0685**	-0.5990***☆	-0.0087
	혜산	0.2468***	-0.0461	-0.3469***	-0.0282
	풍산△	0.1359***	-0.2450***	0.5300***	-0.4291***
	김책	0.1140***	-0.0562**	-0.5387***☆	-0.0562**
	장진△	0.1732***	-0.4475***	-0.1474***	-0.0104
	희천△	0.2461***	-0.6263***	0.4968***	0.1159***
	함흥	0.2926***	-0.0468*	-0.3881***	0.0215
	신포△	-0.2521***	-0.4212***	0.1408***	0.6715***
원산	0.2579***	-0.0302	-0.2751***	0.0633**	
휴전선 일원 (황해남·북도, 강원도)	장전△	0.0262	0.1416***	-0.1223***	-0.2435***
	사리원	0.1313***	-0.0278	-0.2420***	0.0448
	신계△	-0.0644**	-0.2395***	-0.4365***	0.0096
	용연△	0.1642***	0.3131***	0.6980***	0.7520***
	해주	0.2220***	-0.0546*	-0.4409***	-0.0649**
	개성	0.1719***	-0.0251	-0.3954***	-0.1004***
평강△	-0.1969***	-0.1466***	0.0317	-0.0729**	

\* 주

- 총 27개 지점 중 수풍군 등 14개소(△)는 1981년 1월 1일부터 현재까지, 나머지 13개소는 1973년 1월 1일부터 현재까지의 자료임
- 수치는 총 시계열의 절반에 대한 Time Window으로 계산한 각 지표와 시간의 흐름과의 상관관계지표(Kendall's Tau, -1~1)
- 원자료에서 경향성을 제거하고(detrending), 계절성을 제거하는(deperiod) 형태로 전처리 진행
- Kendall's Tau의 유의수준(P-value) : \*\*\* 0.01, \*\* 0.05, \* 0.1
- 데이터의 유의도 검정(surrogate Test, P-value) : ★ 0.05, ☆0.1

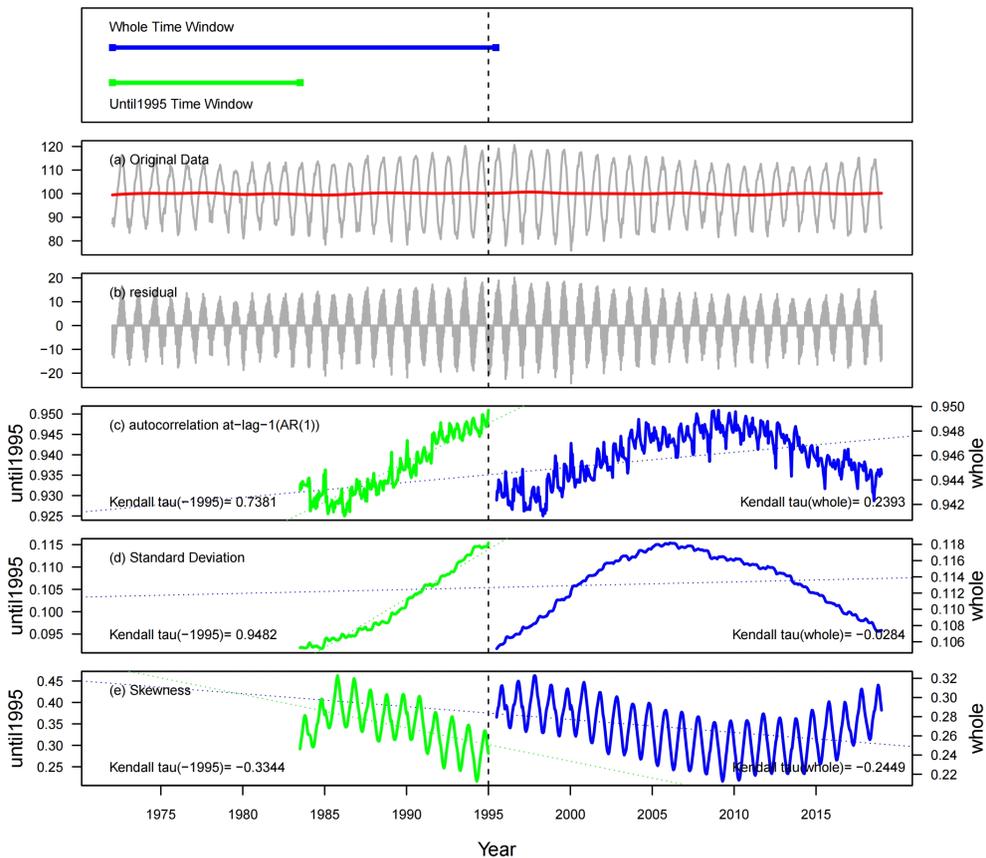


그림 3-14. 평균기온 변화 Rolling Window 조기경보신호 분석결과 예시 (평양, 왼쪽: 1973-1995, 오른쪽: 1973-2019)

강수에 대한 측정자료 기반 조기경보신호에 대한 결과는 표 3-8(1973-1995년) 및 표 3-9(1973-2019년)과 같으며, 이에 대한 평양 지역의 사례는 그림 3-15와 같다. 강수에 대한 1995년까지의 조기경보신호는 평균기온에 비해 분명한 편이다. 해당 시기 AR(1)의 임계전이 조기경보신호 강도(Kendall tau)는 평균 0.3646으로 평균기온(0.6343)으로 낮은 편이지만, 역의 관계를 보이는 일부를 제외하면 대체로 비슷한 수준이다. 표준편차의 임계전이 조기경보신호 강도의 평균은 0.6094로 평균기온(0.2325)에서보다 더 분명한 강도로 조기경보신호를 보임을 확인할 수 있다. 이 또한 2019년까지의 임계전이 조기경보신호에서는 모든 부분에서

분명하지 않아 명확한 차이가 나타난다. 즉, 평균기온 변화와 마찬가지로 또는 더욱 강하게, 강우에 대해서도 1995년 기준으로 임계전이에 대한 조기경보신호가 나타났다고 해석할 수 있다.

1995년까지의 강우의 조기경보신호에서 특징적인 것은 AR(1)과 표준편차를 중심으로, 관북지방에서 강한 조기경보신호가 도출되었다는 것을 확인할 수 있다는 점이다. 이는 강우의 측면에서 관북지방이 더 큰 폭의 변화를 경험했다는 것을 나타내 주는 결과라고 해석할 수 있다.

기후자료에 대한 측정자료 기반 조기경보신호 지표에 대한 분석결과를 종합해 보면, 연 단위 통계자료나 기온에 관한 극한지표(최고, 최저기온)에서는, 최근(2019년)이 종점인 기후지표에서는 조기경보신호가 도출되지 않았으나, 1995년도의 일 단위에 가까운 정보에서는 조기경보신호가 도출되는 경우가 있었다. 특히 식생의 생산성에 강한 영향을 주는 강수와 평균기온에서 이 결과가 분명하게 드러났다. 이는 토지생산성에 영향을 주는 기후요소에서 임계전이의 조기경보신호가 도출된다는 것을 보여주는 결과로, 북한의 토지황폐화와 1990년대 중반 북한 대기근에는 일정 부분 기후가 기여하였음을 나타내는 결과라 할 수 있다. 특히 강수의 경우에는 임계감속을 나타낼 수 있는 지표(AR(1))와 깜빡임을 나타내는 지표(표준편차)가 모두 강한 강도를 나타내는 것을 미루어 볼 때, 북한의 대기근의 주원인으로 여겨지던 1990년대 초반의 홍수와 가뭄의 반복은, 1980년대부터 있었던 강우의 변화가 점차 빈도가 커지고(깜빡임) 강도가 커지는 (임계감속에 의한 지속성 증대) 되었다고 해석할 수 있다.

표 3-8. 1973년부터 1995년까지의 강수량 변화에 대한 측정자료 기반  
Rolling Window 조기경보신호 분석(강도, Kendall tau) 요약

지역		지표			
		AR(1)	표준편차	왜도	첨도
관서지방 (평안남·북도,자강도)	중강	-0.4033***	-0.5325***	0.5264***	0.8960*** ★
	강계	0.3967***	0.5247***	-0.3545***	-0.0325
	수풍△	-0.2432***	0.5483***	-0.7504***	-0.5876***
	신의주	-0.4199***	0.6896***	0.6315***	0.6820*** ☆
	구성△	0.4233***	0.6304***	0.5876***	-0.0837*
	안주△	0.1774***	0.5944***	-0.6667***	0.0831*
	양덕△	0.2029***	0.7653***★	0.5641***	-0.3379***
	평양	0.8114***	0.8333***	-0.6282***	-0.7389***
	남포△	0.4572***	0.7470***☆	0.4648***	-0.3282***
관북지방 (함경남·북도, 양강도, 원산일대 포함)	선봉	0.4733***	0.7774***	-0.2916***	-0.4642***
	삼지연△	0.6320***	0.6654***	0.4322***	0.3772***
	청진	0.6941***	0.7998***☆	-0.4608***	-0.6300***
	혜산	0.7246***	0.7641***	-0.5686***	-0.7013***
	풍산△	0.7729***	0.8180***	-0.6814***	-0.0824*
	김책	0.6071***	0.6022***	-0.0872**	-0.6627***
	장진△	0.6771***	0.8452***	-0.5056***	0.1610***
	희천△	0.4309***	0.7812***☆	0.4438***	-0.4593***
	함흥	0.2039***	0.1713***	-0.1517***	-0.3474***
	신포△	0.6119***	0.6916***	0.4727***	-0.4246***
원산	-0.2980***	0.4462***	0.6258***	0.4944***	
휴전선 일원 (황해남·북도, 강원도)	장전△	0.3958***	0.2955***	0.4333***	-0.2233***
	사리원	0.7295*** ☆	0.7523***☆	-0.3865***	-0.8076***
	신계△	0.6738***	0.7244***	-0.7713***	-0.3684***
	용연△	0.3414***	0.4146***	0.3862***	0.6866*** ☆
	해주	-0.3762***	0.6901***	0.6653***	0.6686***
	개성	0.8508***	0.8844***	-0.7917***	-0.5808***
평강△	0.2975***	0.5295***	0.3666***	0.1676***	

\* 주

- 총 27개 지점 중 수풍군 등 14개소(△)는 1981년 1월 1일부터 현재까지, 나머지 13개소는 1973년 1월 1일부터 현재까지의 자료임
- 수치는 총 시계열의 절반에 대한 Time Window으로 계산한 각 지표와 시간의 흐름과의 상관관계지표(Kendall's Tau, -1~1)
- 원자료에서 경향성을 제거하고(detrending), 계절성을 제거하는(deperiod) 형태로 전처리 진행
- Kendall's Tau의 유의수준(P-value) : \*\*\* 0.01, \*\* 0.05, \* 0.1
- 데이터의 유의도 검정(surrogate Test, P-value) : ★ 0.05, ☆0.1

표 3-9. 1973년부터 2019년까지의 강수량 변화에 대한 측정자료 기반 Rolling Window 조기경보신호 분석(강도, Kendall tau) 요약

지역		지표			
		AR(1)	표준편차	왜도	첨도
관서지방 (평안남·북도,자강도)	중강	-0.7160***	0.7202***	0.7013*** ☆	0.6070***
	강계	-0.6330***	0.2900***	0.2779***	0.0764***
	수풍△	-0.1803***	0.9379***	-0.6603***	-0.0792**
	신의주	-0.2509***	0.4922***	-0.0016	0.2881***
	구성△	-0.3908***	-0.3818***	-0.3541***	0.4261***
	안주△	-0.4747***	0.4250***	-0.2140***	0.0770**
	양덕△	-0.7001***	-0.4797***	-0.6714*** ☆	-0.4306***
	평양	-0.4556***	0.6142***	0.0296	0.1005***
	남포△	-0.6693***	-0.4122***	-0.4215***	-0.7420***
관북지방 (함경남·북도, 양강도, 원산일대 포함)	선봉	-0.0640**	0.5860***	-0.7313***	-0.3289***
	삼지연△	-0.6104***	0.5595***	-0.5019***	-0.2003***
	청진	0.0016	0.4331***	-0.4743***	-0.1091***
	혜산	-0.3476***	0.3287***	-0.0823***	0.2075***
	풍산△	-0.1887***	0.0560*	-0.3866***	0.0330
	김책	0.2168***	0.9174***★	-0.4520***	0.2969***
	장진△	-0.1027***	-0.2161***	-0.6733*** ☆	-0.0421
	희천△	-0.2344***	-0.0513*	-0.2568***	-0.2083***
	함흥	-0.3647***	0.6070***	-0.1806***	0.0748***
	신포△	-0.0172	-0.2137***	-0.2147***	0.0508
원산	0.4791***	-0.6077***	-0.7483*** ☆	-0.2382***	
휴전선 일원 (황해남·북도, 강원도)	장전△	-0.3057***	-0.7139***	-0.6433***	-0.2930***
	사리원	-0.3673***	-0.1043***	-0.0786***	0.1017***
	신계△	-0.4756***	0.0622**	0.4914***	0.3101***
	용연△	-0.6733***	0.0331	-0.2169***	-0.2888***
	해주	0.2802***	0.4665***	0.3163***	0.2375***
	개성	-0.3798***	0.0040	-0.1017***	0.1686***
	평강△	-0.4261***	-0.2412***	-0.3605***	0.0712**

\* 주

- 총 27개 지점 중 수풍군 등 14개소(△)는 1981년 1월 1일부터 현재까지, 나머지 13개소는 1973년 1월 1일부터 현재까지의 자료임
- 수치는 총 시계열의 절반에 대한 Time Window으로 계산한 각 지표와 시간의 흐름과의 상관관계지표(Kendall's Tau, -1~1)
- 원자료에서 경향성을 제거하고(detrending), 계절성을 제거하는(deperiod) 형태로 전처리 진행
- Kendall's Tau의 유의수준(P-value) : \*\*\* 0.01, \*\* 0.05, \* 0.1
- 데이터의 유의도 검정(surrogate Test, P-value) : ★ 0.05, ☆0.1

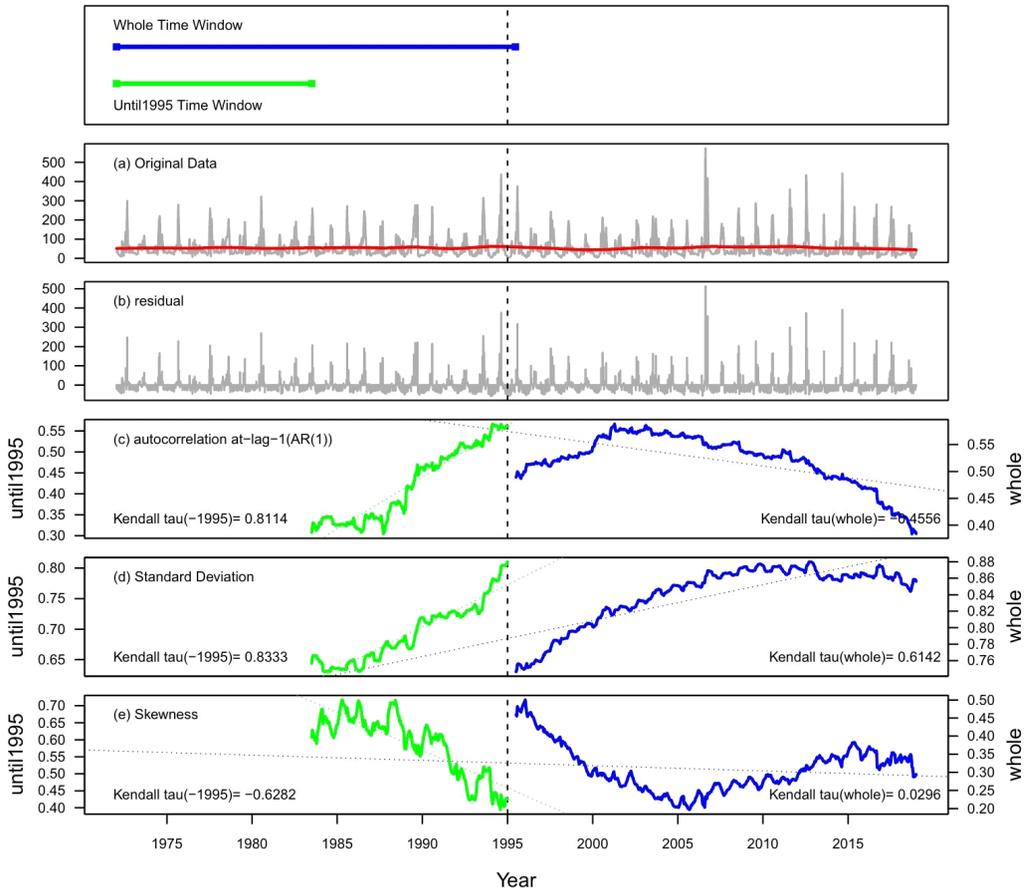


그림 3-15. 강수량 변화 Rolling Window 조기경보신호 분석결과 예시(평양, 왼쪽: 1973-1995, 오른쪽: 1973-2019)

#### 4. 기타 자료의 조기경보신호

표 3-10. 북한 에너지 관련 지표들의 측정자료 기반 Rolling Window 조기경보신호 분석(강도, Kendall tau) 요약

자료구분	시작시점부터 1995년까지			
	AR(1)	표준편차	왜도	첨도
총에너지소비량(QuadBTU)	0.0556	0.9444*** ★	-0.2222	-0.7222***
석탄소비량(QuadBTU)	-0.2222	0.9444*** ★	-0.1111	-0.6111**
석유소비량(QuadBTU)	-0.0556	0.8889*** ☆	0.4444	0.0000
발전용량(10억kwh)	0.1667	0.5556**	-0.0556	0.5000*
전기소비량(10억kwh)	0.0556	0.4444	-0.3333	0.7222***
1인당 에너지 강도(백만BTU)	0.0556	0.9444*** ★	-0.2778	-0.7778***
화석연료 에너지 소비비율(%)	-0.4286**	0.9341***	0.5165***	0.1868 ★
자료구분	시작시점부터 2016년까지			
	AR(1)	표준편차	왜도	첨도
총에너지소비량(QuadBTU)	-0.0458	-0.5033***	-0.5686***	0.4510***
석탄소비량(QuadBTU)	0.0327	-0.6471***	0.2941*	0.0196
석유소비량(QuadBTU)	-0.5033***	-0.1634	0.7778*** ☆	0.7647*** ★
발전용량(10억kwh)	-0.5817***	-0.5817***	0.3072*	0.6601***
전기소비량(10억kwh)	-0.4902***	-0.5948***	0.3725**	0.5033***
1인당 에너지 강도(백만BTU)	0.0065	-0.1895	0.1111	0.4118**
화석연료 에너지 소비비율(%)	-0.3518**	0.9842***	-0.0988	0.3439**

\* 주

- 수치는 총 시계열의 절반에 대한 Time Window으로 계산한 각 지표와 시간의 흐름과의 상관관계지표(Kendall's Tau, -1~1)
- Kendall's Tau의 유의수준(P-value) : \*\*\* 0.01, \*\* 0.05, \* 0.1
- 데이터의 유의도 검정(surrogate Test, P-value) : ★ 0.05, ☆0.1

에너지관련 자료에서는 1995년까지의 자료에서, 표준편차에 한정하여 높은 조기경보신호가 도출된다(표 3-10). 이는 에너지의 측면에서는 임계 전이의 형태가 임계감속의 형태(AR(1)으로 대표되는)보다는 깜빡임, 즉 극단적으로 변동성이 증가하는 형태로 발생하였음을 보여 준다. 이는 최근까지의 자료에서는 전혀 나타나지 않으며, 이는 식생지수나 기후자료에서 잘

보여지지 않았던 극명한 차이라고 볼 수 있다. 이에 대한 전형적인 모습은 그림 3-16의 총에너지소비량에 대한 결과에서 확인할 수 있다.

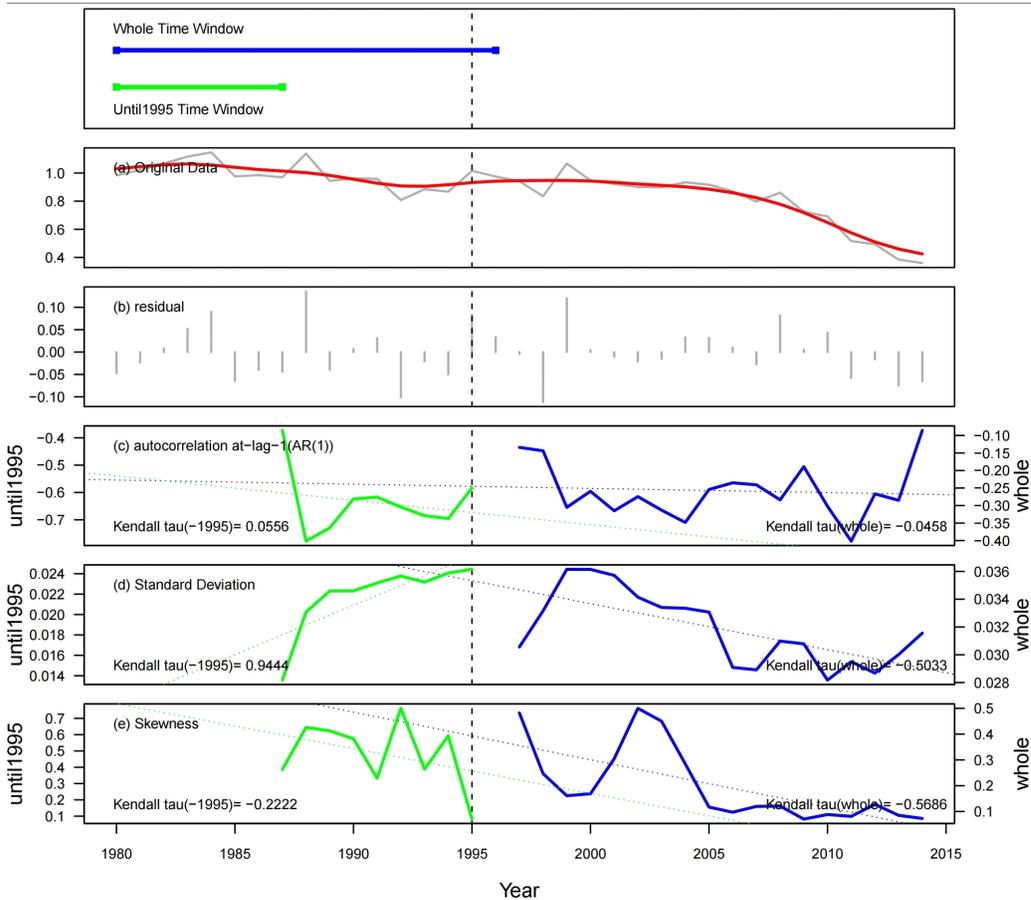


그림 3-16. 북한의 총에너지소비량에 대한 Rolling Window 조기경보신호 분석결과 예시(왼쪽: 1980-1995, 오른쪽: 1980-2014)

에너지관련 자료에서 측정자료 기반 분석의 다른 경향성을 보이는 것은 화석연료에너지 소비비율 자료이다(그림 3-17). 에너지 자료를 포함한 다른 모든 연구에서, 그리고 선행 연구에서 이론적으로 제시하고 있을 뿐 잘 나타나지 않는 왜도의 조기경보신호가, 화석연료에너지 소비비율의 조기경보신호에서 관찰된다. 뿐만 아니라 다른 에너지 자료에서 잘 나타나지 않은 현재까지의 결과에서 비교적 높은 조기경보신호를 보여준다. 이는 화석연료의 측면에서는 다른 에너지 문제보다 2000년대 후반~2010년대에 더 임계전이에 대한 영향이 컸음을 보여 주는 결과라 해석할 수 있다.

에너지자료는 1995년 이전의 지표에만 제한적으로 조기경보신호가 나타나는 것으로 결과가 도출되는 경우가 많았다. 하지만 주로 1980년대 전후에 정점을 보이는 원자료의 수치 패턴을 보았을 때, 이 자료가 다른 사회자료와 마찬가지로 1980년 이전 자료가 있었다면 그 결과는 다소 다르지 않았을까 추정할 수 있다.

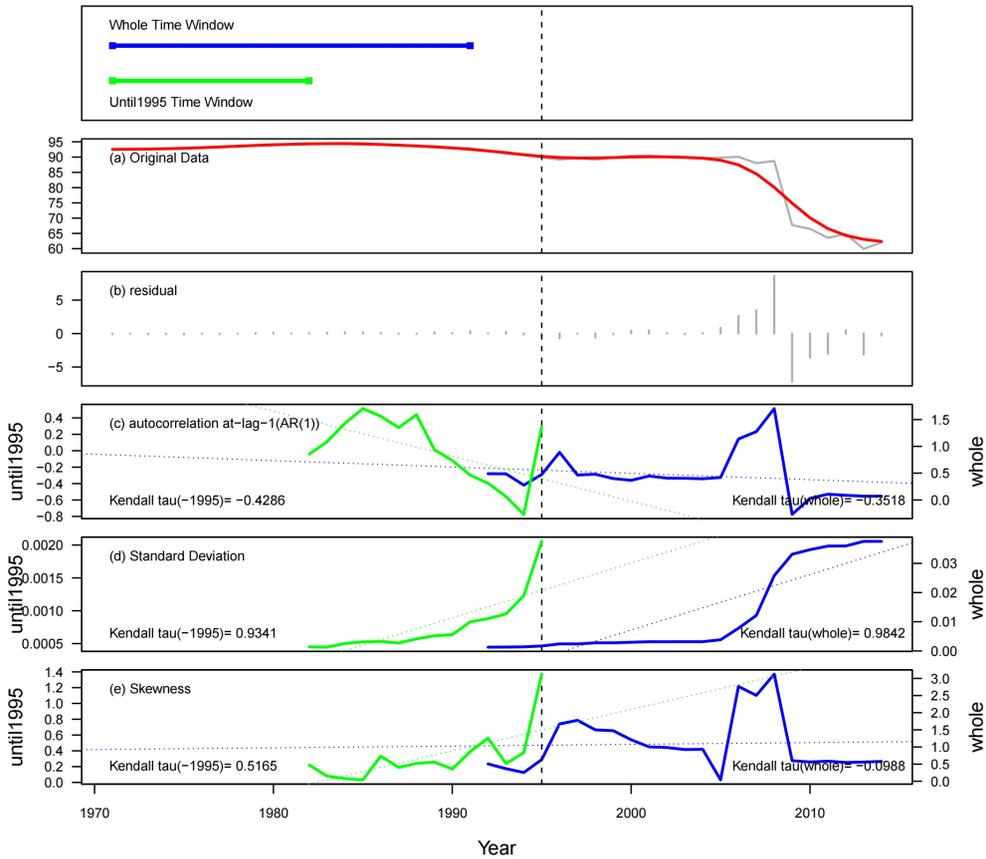


그림 3-17. 북한의 화석연료사용비율에 대한 Rolling Window 조기경보신호 분석결과 예시(왼쪽: 1980-1995, 오른쪽: 1980-2014)

북한의 인구 및 기타 지표들의 측정자료 기반 조기경보신호 분석결과(표 3-11)는 해석하기 용이한 결과를 보여주고 있지 못하다. 이는 해당 자료의 신뢰도가 다른 자료보다 낮거나, 1990년대 대기근과 직접적인 연관관계가 없기 때문으로 보인다.

표 3-11. 북한 인구 및 기타 지표들의 측정자료 기반 Rolling Window 초기경보신호 분석(강도, Kendall tau) 요약

자료구분	시작시점부터 1995년까지			
	AR(1)	표준편차	왜도	첨도
총인구(명)	0.3567**	-0.4971***	0.5088***	0.3450**
인구 중 남성(%)	0.4386***	-0.7193***	0.1930	0.1696
도시 인구비율(%)	0.1579	-0.9883***	0.2398	0.2982*
노인 부양비	0.4971***	-0.2632	-0.2982*	-0.2281
인구밀도(sqkm)	0.4379**	-0.4641***	0.3595**	0.1634
여성 1인당 출산율	-0.2632	-0.9415***	0.3216*	0.6959***
1000명당 합계출산율	-0.5556***	-0.7544***	0.6959***	0.8713*** ★
1000명당 합계사망률	0.1696 ☆	0.2632	0.3918**	0.6023***
무기수입량	0.1345	-0.6140***	0.4737***	0.3450**
자료구분	시작시점부터 2016년까지			
	AR(1)	표준편차	왜도	첨도
총인구(명)	0.3287**	-0.8391***	-0.1218 ☆	-0.1494
인구 중 남성(%)	0.4713*** ★	-0.8483***	-0.0759	0.1586
도시 인구비율(%)	0.5310***	-0.7793***	-0.0575	-0.0805
노인 부양비	0.5816*** ★	0.3655***	0.1034	-0.1448
인구밀도(sqkm)	0.3379***	-0.8161***	-0.1770 ☆	-0.1310
여성 1인당 출산율	-0.3287**	-0.9908***	0.3103**	0.1402
1000명당 합계출산율	0.1724	-0.9862***	0.2736**	0.0759
1000명당 합계사망률	-0.4253***	0.3333***	-0.6598***	-0.1402
무기수입량	-0.2677*	0.6369***	0.1446	0.4585***

\* 주

- 수치는 총 시계열의 절반에 대한 Time Window으로 계산한 각 지표와 시간의 흐름과의 상관관계지표(Kendall's Tau, -1~1)
- Kendall's Tau의 유의수준(P-value) : \*\*\* 0.01, \*\* 0.05, \* 0.1
- 데이터의 유의도 검정(surrogate Test, P-value) : ★ 0.05, ☆0.1

표 3-12. 측정자료 기반 분석을 통한 조기경보신호 탐지결과 요약

자료구분		조기경보신호 탐지여부								결과 요약 설명	
		자료 시작점 -1995년까지				자료 시작점 -최근까지					
		AR (1)	SD	왜 도	철 도	AR (1)	SD	왜 도	철 도		
식량		○	○	△	X	△	◎	X	X	<ul style="list-style-type: none"> <li>전체적으로는 1995년까지의 자료에서 임계전이 징후가 농후</li> <li>표준편차의 측면에서는 오히려 최근까지의 자료가 더 높은 사전예방 징후를 보임</li> </ul>	
정규식생 지수	전역	◎	○	X	X	○	○	X	X	<ul style="list-style-type: none"> <li>두 자료 모두에서 조기경보신호를 보여 주지만, 1995년까지가 비교적 더 강한 조기경보신호를 보여 줌</li> <li>전역 평균보다는 최대·최소값·변동계수가 더 유의미한 결과 도출</li> </ul>	
	관서	△	△			◎	◎			<ul style="list-style-type: none"> <li>현재부터 2015년까지의 분석에 더 강한 조기경보신호가 나타남</li> <li>묘향산 일대 및 압록강 중·상류 일원의 조기경보신호는 잘 나타나지 않음</li> </ul>	
	관북	◎	◎			◎	◎			<ul style="list-style-type: none"> <li>두 시기 모두에서 조기경보신호가 잘 나타남</li> <li>특히 동해 연안 일대의 조기경보신호가 높게 나타나며 개마고원 일대에는 두 시기 모두 잘 나타나지 않음</li> </ul>	
	휴전선	○	○			○	○			<ul style="list-style-type: none"> <li>현재부터 2015년까지의 분석에 더 강한 조기경보신호가 나타남</li> <li>금강산 일대 등 산지에서는 조기경보신호가 잘 나타나지 않음</li> </ul>	
기후자료	기온	관서	◎	△	X	X	○	X	X	X	<ul style="list-style-type: none"> <li>1995년까지의 자료에서 큰 임계전이의 징후가 관찰됨</li> </ul>
		관북	○	△	X	X	△	X	X	X	<ul style="list-style-type: none"> <li>1995년까지의 자료에서 더 많은 임계전이 징후 포착</li> </ul>
		휴전선	○	△	X	X	△	X	X	X	<ul style="list-style-type: none"> <li>1995년까지의 자료에서 더 많은 임계전이 징후 포착</li> </ul>
	강수	관서	△	◎	X	X	X	△	X	X	<ul style="list-style-type: none"> <li>1995년까지의 자료에서 더 많은 임계전이 징후 포착</li> </ul>
		관북	◎	◎	X	X	X	△	X	X	<ul style="list-style-type: none"> <li>다른지역보다 강한 1995년까지의 자료에서 더 많은 임계전이 징후</li> </ul>
		휴전선	○	◎	X	X	X	△	X	X	<ul style="list-style-type: none"> <li>1995년까지의 자료에서 더 많은 임계전이 징후 포착</li> </ul>
인문사회 자료	에너지	X	○	△	X	X	X	△	X	<ul style="list-style-type: none"> <li>표준편차에 한정하여 1995년까지 조기경보신호가 관찰</li> <li>최근까지의 자료 중 일부에서 왜도의 조기경보신호가 관찰됨</li> </ul>	
	인구/ 기타	△	X	X	X	△	X	X	X	<ul style="list-style-type: none"> <li>전체적으로 조기경보신호가 도출된다고 보기 어려움</li> </ul>	

\* 조기경보신호 탐지여부의 여부와 강도에 대한 기호

◎ : 매우 강함(kendall's Tau가 양의 값이고, 유의수준을 충족하는 경우가 대부분), ○ : 강함(kendall's Tau가 양의 값이고, 유의수준을 충족하는 경우가 현저하게 많음), △ : 보통(kendall's Tau가 양의 값이고, 유의수준을 충족하는 경우가 다소 적음), X : 미약(kendall's Tau가 양의 값이고, 유의수준을 충족하는 경우가 현저하게 적음)

## 5. 북한 대기근에 대한 조기경보신호 여부

대기근이 발생하기 전인 1995년 이전의 토지황폐화(e.g. 식생지수)와 식량수급(e.g. 식량생산량+수입량) 관련 지표들에 대한 조기경보신호 확인 결과, 대부분의 지표에서 “대기근의 징후”와 관련된 조기경보신호가 나타났다(표 3-12). 특히 임계감소 현상, 회복력의 감소를 나타내는 AR(1)과 표준편차에서의 조기경보신호가 도출되었다. 반면 최근까지의 변화에 대한 조기경보신호 도출은 일정한 경향을 보이지 않았고, 보이더라도 떨림(flicker)과 급격한 변동성과 나타낸 조기경보신호인 경우가 많았다. 따라서 대기근 전에 토지황폐화와 식량생산 관련 지표들에는 분명한 징후를 보이고 있었으며, 이는 급격한 변동성 보다는 회복력이 점차 떨어지는(critical slowing down)형태로 진전되었다고 해석할 수 있다.

단, 식생지수의 조기경보신호를 지도화함으로써 도출한 조기경보신호의 공간적 분포로 보았을 때는 경향이 다소 다르다. 조기경보신호가 도출되는 지역의 수(취약지, hotspot)는 1995년까지보다 최근(2015년)까지의 조기경보신호 분석을 통해서 더 많이 도출되었다. 이는 북한 전체의 식생지수 조기경보신호가 주로 1995년 이전에서 더 분명하게 도출되었던 것과 분명한 차이를 보인다. 식생지수가 토지황폐화를 나타낸다고 가정한다면, 이 결과는 대기근의 원인이 되었던 1995년 이전의 토지황폐화가, 최근에 발생하고 있는 토지황폐화 현상보다 일부지역에 한정되고 더 강력했었다고 해석할 수 있다. 실제로 1995년까지의 결과를 보면 관북 지역, 특히 관북 해안 일대에서 집중된 조기경보신호가 도출된 것을 확인할 수 있었다.

위 지도화 결과가 “토지황폐화 취약지”라고 정의한다면, 이 결과는 2장과 부록 2의 식생지수 경향성 파악을 통해 도출한 토지황폐화 취약지의 분포와는 다소 다른 결과라 할 수 있다. 2장에서는 식생지수의 수년간의 경향을 바탕으로 한 토지황폐화 취약지를 도출하면서 1990년대 초반 관서 지역에서 집중적으로 토지황폐화 취약지가 도출되었다는 결론을 내렸었다. 우선 관북 해안 지역과 평양을 제외한 관서지역은 당시 토지황폐화의 피해가 심각했다는 소도시가 많이 분포했던 지역이고, 인구밀도가 다소 높은 지역이기 때문에, 공통점을 가지고는 있다. 물론 환경조건과 정치경제적 상황이 두 지역이 다소 다르고, 방법과 관심 시간 스케일이 다소 차이가

있기 때문에, 다른 결과와 함께 추가적인 검토가 필요할 것으로 보인다.

Dakos *et al.*,(2012)이 측정기반 분석 방법의 자료 검증 방법으로 제시했던 시험방법(surrogate test)에 자료 대부분이 통과하지 못했다는 점이 이 연구가 가지고 있는 한계이자 해석에 유의해야 할 부분이다. 그 이유가 분명히 밝혀진 바는 없으나 자료의 숫자가 충분하지 않기 때문으로 보인다<sup>112)</sup>. 실제 Dakos *et al.*,(2012) 등의 연구는 모형을 통해 나온 결과물이나, 빙하코어와 같은 수천, 수만개의 시계열 표본 자료를 통해 연구를 수행한 것으로서, 북한에 대해서, 그리고 위성영상을 적용해서 하는 연구의 시간 스케일에는 다소 불리한 방법이다. 이는 본 연구와 유사한 저해상도 위성영상에 본 방법을 적용한 연구에서도 연구의 한계로 언급하는 사안이다(Alibakhshi *et al.*, 2017). 그리고 이 방법을 적용한 다른 연구들에서도 해당 방법을 통해 자료의 유의도를 검증했던 시도를 확인하기 어려웠다(e.g. Wang *et al.*, 2012). 따라서 측정기반 분석 방법에서 도출된 조기경보신호는 일부분 오분류<sup>113)</sup>되었을 가능성이 있다고 가정하고, 조심스럽게 해석할 필요가 있다. 또한, 향후 연구에서는 이 연구 및 관련 연구에서 적용하지 못한 다른 검증의 대안을 마련하거나, 자료의 시계열 범위를 늘릴 수 있는 방안에 대해서 모색해 볼 필요가 있다.

---

112) 실제로 훨씬 긴 규모의 시계열(10,000개 이상)의 자료에 시험 적용하는 경우 해당 시험이 대체로 무리가 없다. 하지만, 이 연구에서는 아무리 긴 시계열이라도 그 정도 길이인 경우는 드물다.

113) surrogate test는 연구 방법에서 언급하였듯 1종 오류를 막는 방법이다.

## 제 4 절 모형·공간기반 복한 대기근과 토지황폐화 문제의 조기경보신호 시점 및 지점 확인

측정자료 기반 분석방법이 특정 시기 동안의 조기경보신호의 유무를 파악하는 데 유용한 방법이라면, 모형기반 방법과 공간기반 방법은, 문제의 징후에 더 가까웠던 시기가 언제인지를 특정하는 방법이라고 할 수 있다.

이 절에서의 내용 구성은 각 방법론에 따라 구분한다. 비모수적 추세-확산-도약모형, 시간 가변성 자기회귀 모형, 공간기반 모형의 순서대로 기술한다. 각 방법마다 3장의 순서와 마찬가지로 식량생산과 수급의 변화에서부터, 토지황폐화 지표를 나타내는 식생지수, 식량생산과 토지황폐화에 강한 영향을 미치는 기후자료, 기타 인문사회자료의 순으로 기술하였다.

결과는 각 지표별로 어떤 시기에 조기경보신호가 발현되었는지를 해석하는 형태로 진행한다. 모든 결과를 제시하지 않으며, 결과 중 논리적으로 부합하거나 타당한 결과에 관해서만 소개하였다. 일부 결과의 경우 지역별, 시기별로 합산하여 해당 조기경보신호 발현 빈도를 확인하고, 이를 결과로 소개한다. 역시 3장과 마찬가지로 식생지수와 관련된 결과는 화소별로 계산한 후 지도화하는 방식을 택하여, 지표별로 조기경보신호 시점을 확인하였는지를 모색하고자 한다.

### 1. 비모수적 추세-확산-도약 모형(DDJ Model)

#### 1) 식량생산과 수급의 변화

먼저 1인당 식량생산과 수입량의 합계 지표를 DDJ Model에 적용해 보았다(그림 3-18). 분석 결과, 작은 변화에 대한 지표(조건부 분산 또는 추세, drift, 그림 3-18 b, c)는 1960년대 후반과 1990년에 조기경보신호가 도출되는데, 큰 변화에 대한 지표(c~f)에서는 대기근이 발생한 시점 또는 그 직전인 1990년대 초 중반에 조기경보신호가 도출되었다.

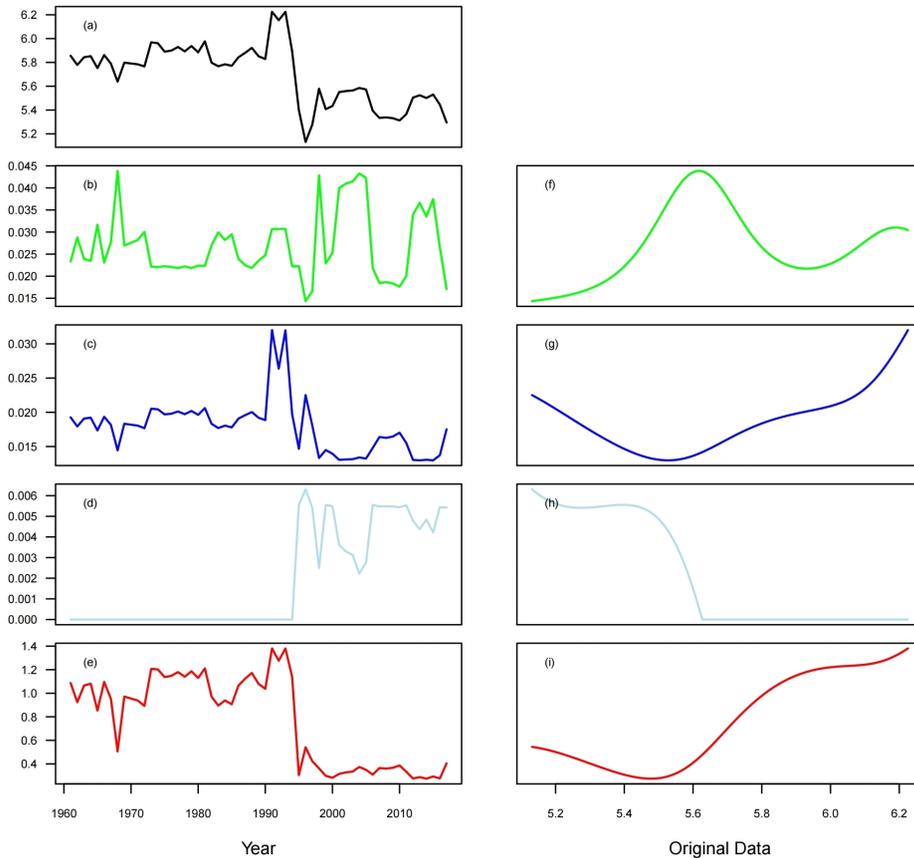


그림 3-18 북한의 1인당 “식량생산량+수입량”에 대한 비모수적 추세-확산-도약 모형(Nonparametric DDJ Model) 적용결과

(a) 원 시계열 자료( $\ln(\text{원자료}+100)$ ), (b,f) 시계열, 자료구간별 조건부 분산, (c,g) 시계열, 자료구간별 총 분산, (d,h) 시계열, 자료구간별 확산지수, (e,i) 시계열, 자료구간별 도약 밀도. 자료구간별 지표들이 최대치에 이른 지점과, 이에 해당하는 시점이 각 자료가 나타내는 임계전이의 조기경보신호 지점이라 해석할 수 있다.

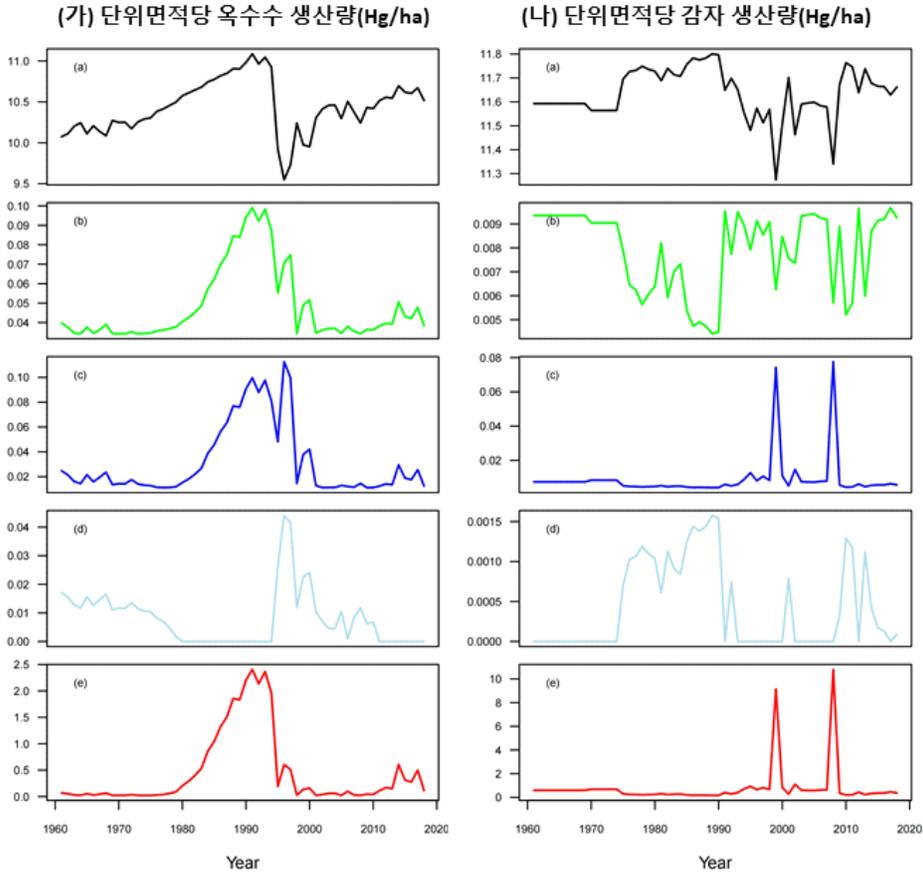


그림 3-19. 북한의 단위면적당 옥수수 수확량과(가) 감자 수확량(나)에 대한 비모수적 추세-확산-도약 모형(Nonparametric DDJ Model) 적용 결과 비교 (a) 원 시계열 자료(Ln(원자료+100)), (b) 시계열, 자료구간별 조건부 분산, (c) 시계열, 자료구간별 총 분산, (d) 시계열, 자료구간별 확산지수, (e) 시계열, 자료구간별 도약 밀도. 자료구간별 지표들이 최대치에 이른 지점과, 이에 해당하는 시점이 각 자료가 나타내는 임계전이의 조기경보신호 지점이라 해석할 수 있다.

측정자료 기반 결과에서 분명한 차이를 보였던 옥수수와 감자 소출량에 대한 DDJ Model도 적용하였다(그림 3-19). 앞서 그림 3-18과 유사한 시기에 조기경보신호가 도출되는 옥수수(그림 3-19 가)와는 달리, 감자의 경우 2000년대 이후에나 조기경보신호가 도출되었다(그림 3-19 나). 즉 2장

의 내용에서 확인할 수 있는 대로, 옥수수는 1990년대 이전까지 북한의 식량생산량 저하와 대기근과 밀접한 연관이 있는 작물인 반면, 감자는 2000년대 이후에나 중요하게 대접받았기 때문인 것으로 보인다.

## 2) 식생지수

북한의 정규화식생지수 대푯값의 DDJ 모형의 결과는 각 대푯값마다 경향이 상이하고 원 자료 시계열(15일 단위) 그대로 사용하기 때문에<sup>114)</sup>, 복잡성이 높아 해석의 어려움이 있다. 따라서 각 대푯값마다 확인한 각 임계 시점에 도달하는 빈도를 파악하고, 이를 연 단위의 빈도로 확인함으로써 결과를 요약하고자 하였다. 이는 그림 3-20과 같으며, 그 특징은 두 가지로 설명할 수 있다.

첫째, 대기근 이전인 1980년대에는 최대값 측면에서 조건부 분산과 확산지수가 높았다. 식생지수의 최대값은 대체로 여름철에 나타나며, 일반적인 식물 개체와 작물 생산에 대체로 밀접한 영향이 있다. 점진적인 변화 또는 작은 충격과 관련된 임계전이 사전예방지표로 해석할 수 있는 조건부 분산과 확산지수가 1980년대 높게 나왔다는 것은, 해당 시기 토지황폐화의 경향은 앞으로 큰 변화를 불러올 작고 점진적인 위험이었기 때문으로 추정할 수 있다.

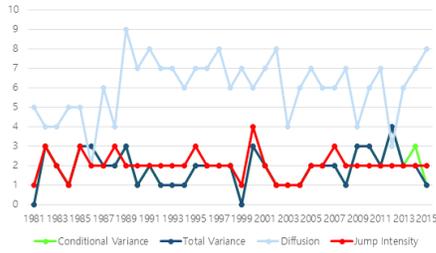
둘째, 대기근이 발생하였던 1990년대 전반에 중앙값의 확산지수가 도약지수가 높게 도출되었다는 점이다. 중앙값의 경우 최대값과 최소값의 차이에 큰 영향을 받게 되는데, 1990년대에 충격과 관련된 확산 및 도약지수가 높게 도출되었다는 것은, 해당 시기 식생지수의 지역적인 차이가 극심해졌다는 것을 암시하고, 공간 패턴의 변화가 발생하였음을 나타낸다고 해석할 수 있다.

결과적으로 식생지수가 나타내는 토지황폐화의 측면에서, 임계신호는 1980년대의 점진적인 임계전이와, 1990년대의 급격한 변화라는 두 가지 임계변화 과정을 거쳤다고 해석해 볼 수 있다.

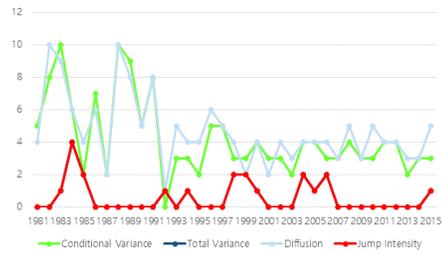
---

114) 연 단위로 요약하는 경우 1982년부터 시작하여 시계열이 너무 짧아져 결과가 분명하게 나타나지 않는다.

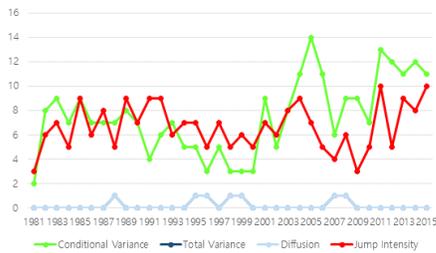
(a) 북한 전체 평균



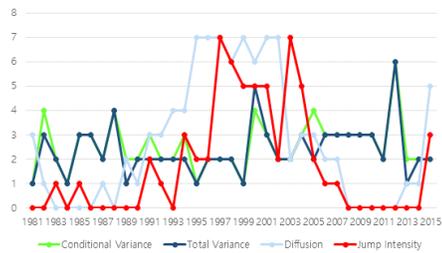
(b) 북한 전체 최대값



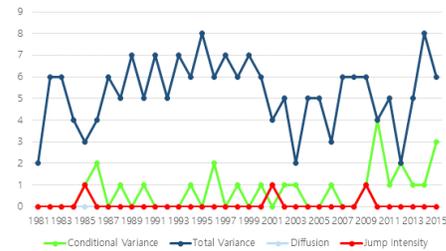
(c) 북한 전체 최소값



(d) 북한 전체 중앙값



(e) 북한 전체 표준편차



(f) 북한 전체 변동계수

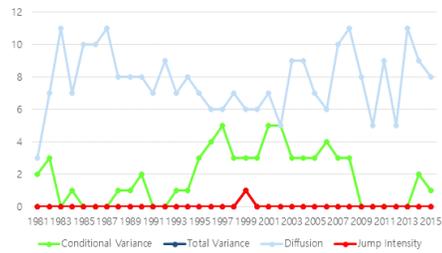


그림 3-20. 식생지수 대푯값의 비모수적 추세-확산-도약 모형 (Nonparametric DDJ Model) 임계수치 연별 빈도

북한 전역의 대푯값이 아닌, 전체 화소 각각을 대상으로 DDJ 모형을 사용한 결과를 마찬가지로 방법으로 연별 조기경보신호 빈도를 확인하여 도식화 한 것은 그림 3-21(전역적 결과) 및 그림 3-22(각 지역 결과)으로 요약할 수 있다. 그림 3-21를 통해 보면, 전체적으로는 확산지수가 임계수치에 도달한 지역횟수가 전 시기를 거쳐서 높은 편이었고 경향성은 전체적으로 비슷한 편이었다. 다만 1980년대 후반에 조건부 분산의 수치가 급격

하게 증가하는 형태를 보였다. 조건부 분산은 주로 추세를 나타내는 것으로, 부분적인 변화율에 해당하는 부분이다. 1980년대 후반에 급격하게 수치가 증가한 것이 급격한 변화를 상징하는 도약이나 확산 관련 수치가 아니라, 추세를 나타내는 조건부 분산이라는 점에서, 이 결과는 자연재해와 같은 급변사태보다는 점진적인 시스템의 상태 변화가 토지황폐화의 원인일 수 있다는 것을 보여주는 결과라 할 수 있다.

DDJ Model의 각 지표는 지역별로 다른 형태를 보였다. 가장 작은 충격을 나타내는 조건부 분산은 시기와 상관없이 개마고원, 백두산 일원의 산지와 함경도 해안, 평안-황해도 해안 일대에서 높은 수치를 나타냈다(그림 3-23). 중간 정도의 충격을 나타내는 확산 지표는 주로 1980년대에 많이 나타났으나, 비산지에서는 전체 시기 높은 빈도로 조기경보신호가 나타났(그림 3-24). 큰 충격을 나타내는 도약 지표는 주로 평안도 일원에서 높게 나타났으며, 1980년대 말과 1990년대 초에 나타났(그림 3-25). 종합하면 작은 변화와 관련된 신호는 넓은 시·공간적 범위에서 나타났으며, 큰 충격을 나타낼수록 평지, 평안도 일대를 중심으로 나타나는 결과가 도출되었다.

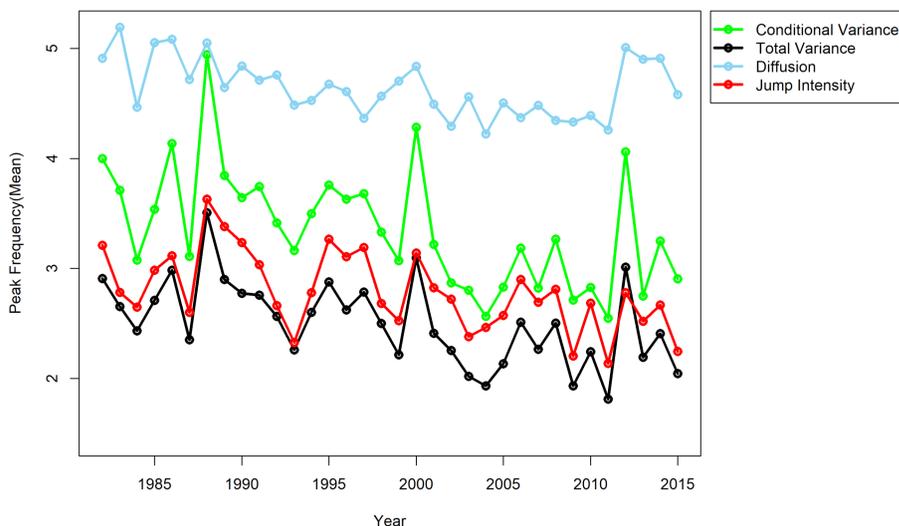
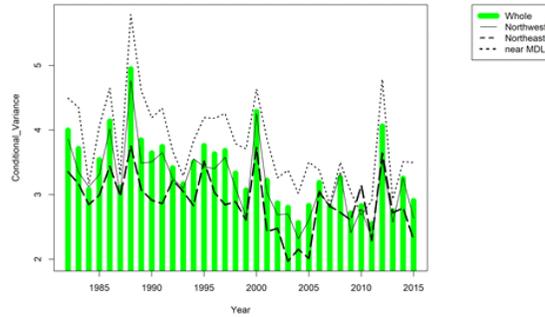
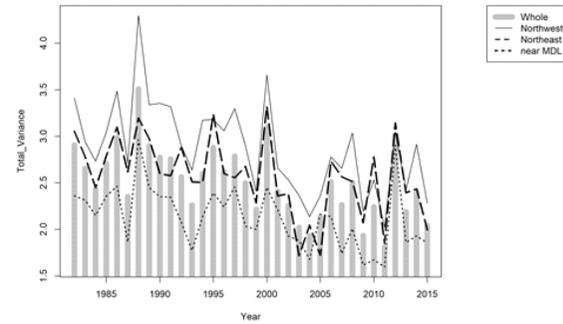


그림 3-21. 15일 단위 식생지수의 비모수적 추세-확산-도약 모형 (Nonparametric DDJ Model) 연간 조기경보신호(극대값 발생) 빈도의 지점 간 평균(n=1,868)

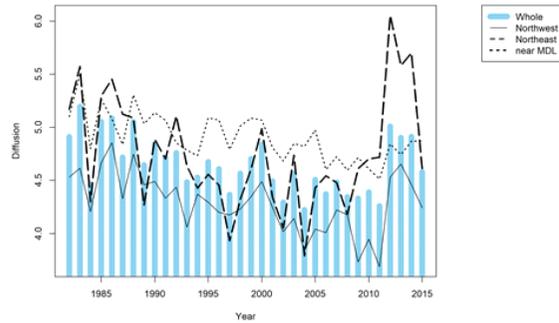
(a) Conditional Variance



(b) Total Variance



(c) Diffusion



(d) Jump Intensity

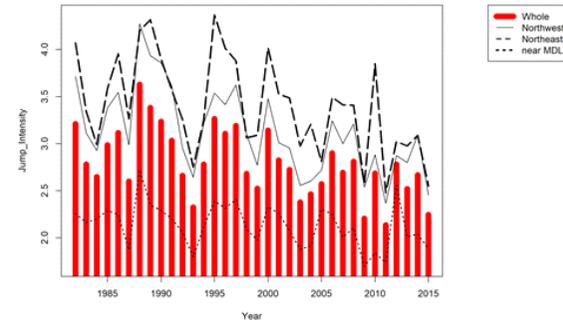


그림 3-22. 15일 단위 식생지수의 비모수적 추세-확산-도약 모형(Nonparametric DDJ Model)의 연간 조기경보신호(극대값 발생) 횟수의 지역간 비교

\* Whole : 북한 전역, Northwest : 관서 지방(평안남북도, 자강도), Northeast : 관북지방(함경남북도, 양강도), Near MDL : 휴전선 주변(황해남북도, 강원도)

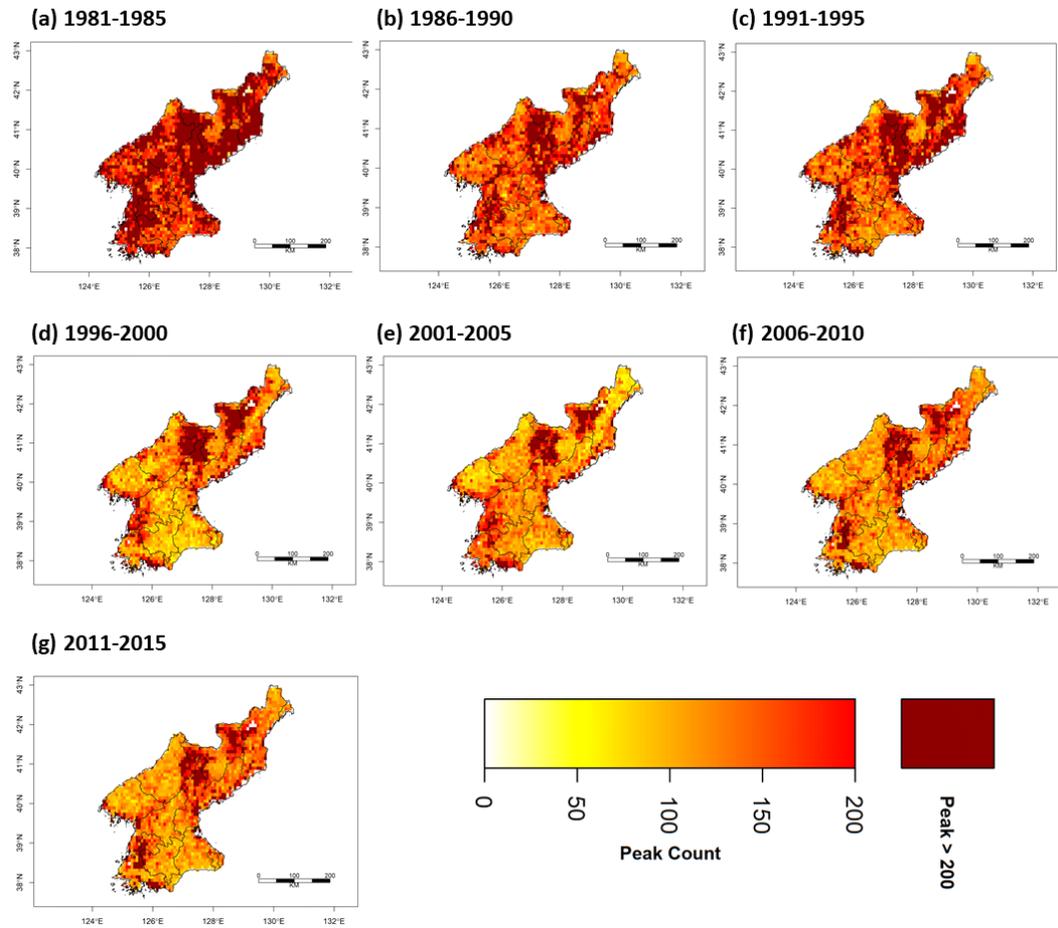
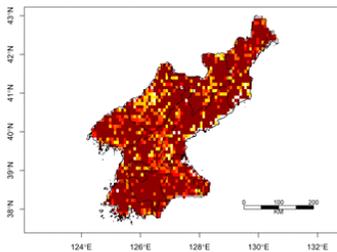
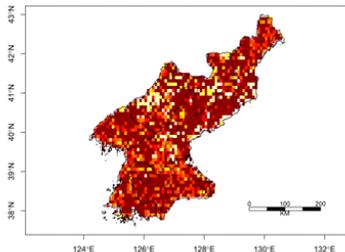


그림 3-23. 15일 단위  
식생지수의  
비모수적  
추세-확산-도약  
모형(Nonparametric  
DDJ Model) 조건부  
분산(Conditional  
Variance)의 5년  
누적 조기경보신호  
포착 횟수

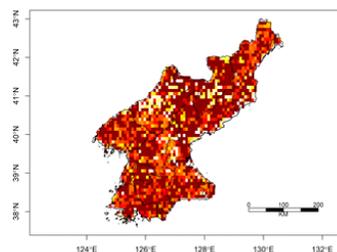
(a) 1981-1985



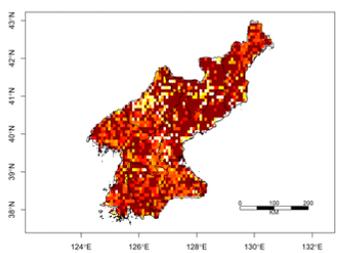
(b) 1986-1990



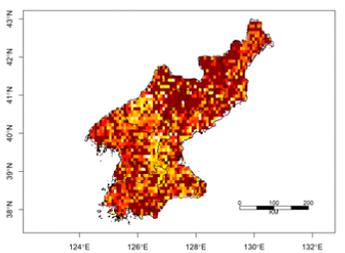
(c) 1991-1995



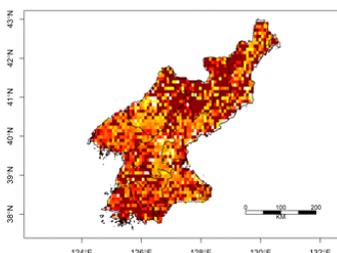
(d) 1996-2000



(e) 2001-2005



(f) 2006-2010



(g) 2011-2015

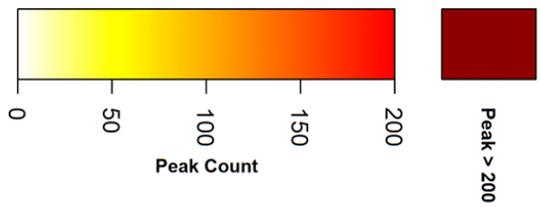
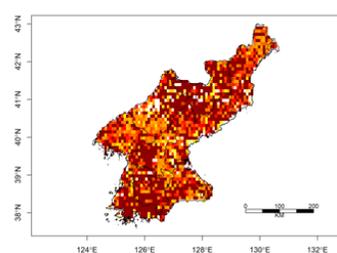
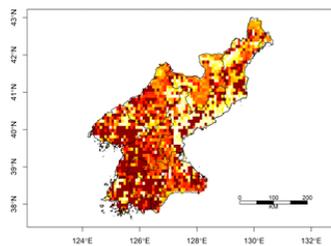
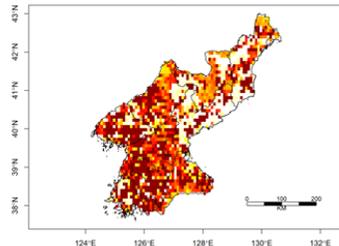


그림 3-24. 15일 단위  
 식생지수의  
 비모수적  
 추세-확산-도약  
 모형(Nonparametric  
 DDJ Model)  
 확산(Diffusion)의  
 5년 누적  
 조기경보신호 포착  
 횟수

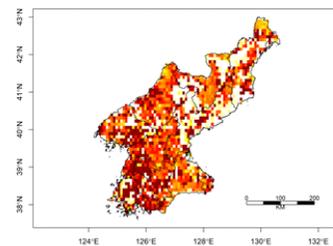
(a) 1981-1985



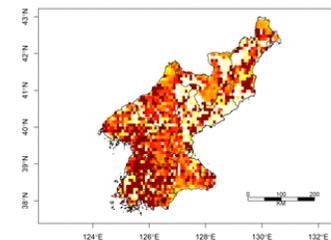
(b) 1986-1990



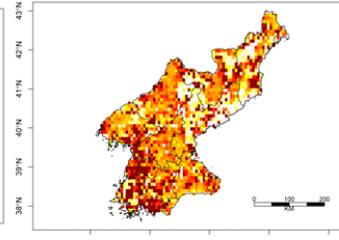
(c) 1991-1995



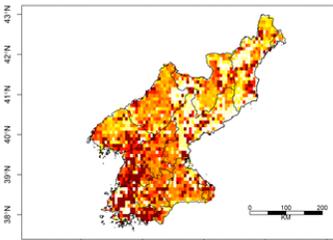
(d) 1996-2000



(e) 2001-2005



(f) 2006-2010



(g) 2011-2015

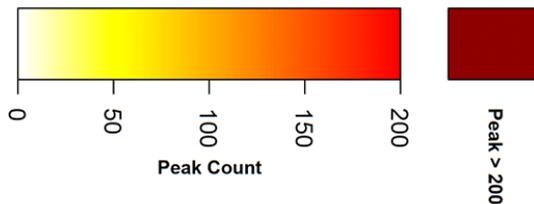
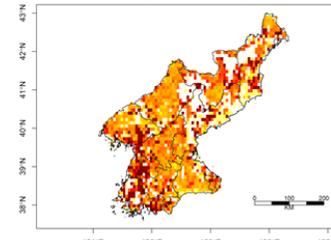


그림 3-25. 15일 단위  
식생지수의  
비모수적  
추세-확산-도약  
모형(Nonparametric  
DDJ Model) 도약  
밀도(Jump  
Intensity)의 5년  
누적 조기경보신호  
포착 횟수

표 3-13. 식생지수 DDJ Model의 시기별 경향성 결과 요약

자료 구분	자료 시작점-1995년까지				자료 시작점-최근까지				결과 요약 설명
	C	T	D	J	C	T	D	J	
전역	○	○	△	△	X	X	△	X	<ul style="list-style-type: none"> <li>전체 모형의 지표에서 자료 시작점부터 1995년까지의 사전 예방신호의 증가 정도가, 최근(2015년)까지의 그것과 시각적으로 확연히 차이가 날 정도로 더 많음.</li> <li>단 확산의 경우 두 시기 간 큰 차이를 나타내지 않음</li> </ul>
관서	○	○	△	△	X	X	△	X	<ul style="list-style-type: none"> <li>전역 결과와 유사한 결과 도출</li> </ul>
관북	○	○	○	△	△	X	○	X	<ul style="list-style-type: none"> <li>전역 결과와 유사</li> <li>확산의 경우 분명히 최근까지 결과도 높게 도출되는 경향을 보임</li> </ul>
휴전선	○	○	△	△	△	X	△	X	<ul style="list-style-type: none"> <li>전역 결과와 유사하나, 두 시기의 차이가 다소 적음</li> </ul>

\* 약자 설명

C : 조건부 분산(Conditional Variance), T: 총 분산(Total Variance),  
D : 확산(Diffusion), J :도약 밀도(Jump Intensity)

\* 조기경보신호의 강도에 대한 기호

◎ : 매우 강함(kendall's Tau가 양의 값이고, 유의수준을 충족하는 경우가 대부분),  
○ : 강함(kendall's Tau가 양의 값이고, 유의수준을 충족하는 경우가 현저하게 많음),  
△ : 보통(kendall's Tau가 양의 값이고, 유의수준을 충족하는 경우가 다소 적음),  
X : 미약(kendall's Tau가 양의 값이고, 유의수준을 충족하는 경우가 현저하게 적음)

앞서 측정자료 분석 비법과 마찬가지로 과거(1981년)부터 대기근 발생 시(1995년) 까지, 과거부터 최근(2015년)까지의 조기경보신호의 빈도가 어떻게 나타났는지를 확인하였다(그림 3-26). 그 결과 네 지표 모두 1995년 까지의 자료에서 양의 관계와 유의수준을 가진 지역이 많았으며, 그 패턴은 앞서 설명과 같다. 또한 이 두 시기의 조기경보신호 빈도에 대한 경향성 분석을 진행하였다(kendall's Tau)(표 3-13). 그 결과 또한 위 결과와 유사하다.

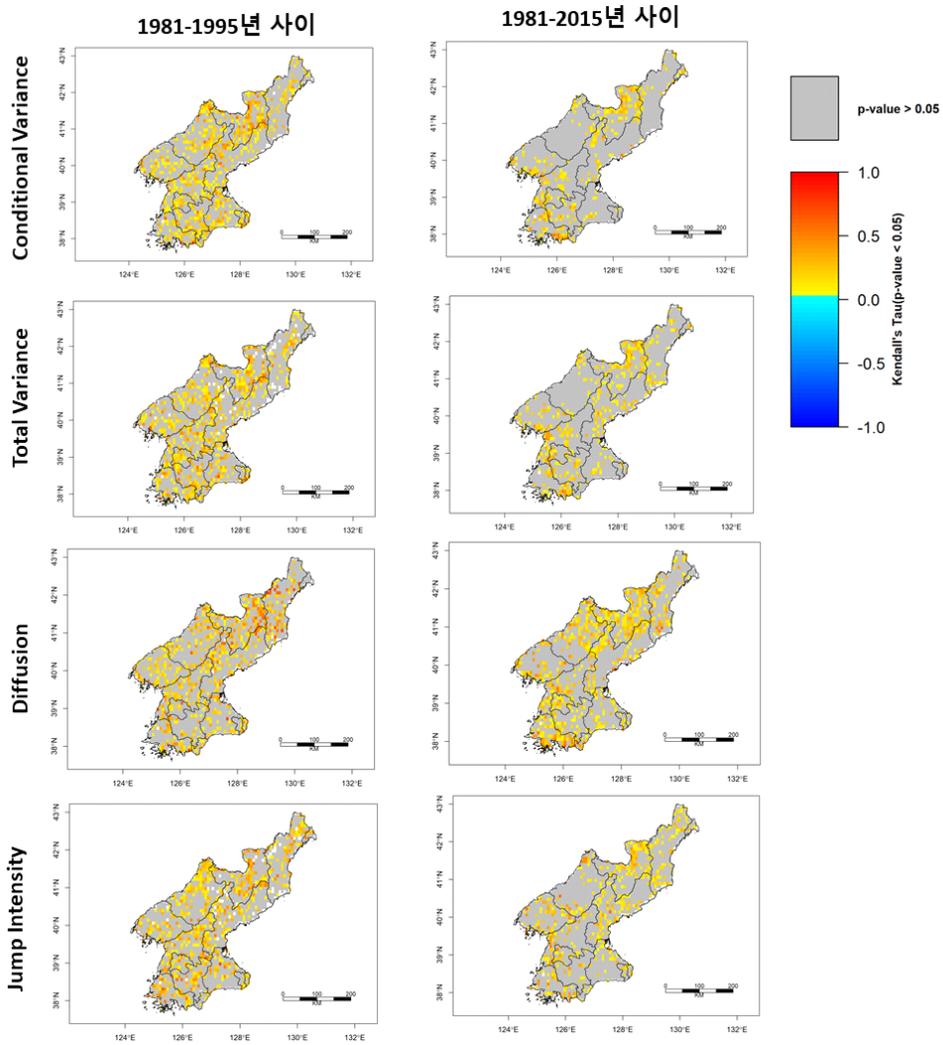


그림 3-26. 15일 단위 식생지수 DDJ Model의 각 지수 별 사전예방지수 빈도에 대한 Kendall's Tau 상관관계분석 결과

### 3) 기후자료

기후자료에 대한 DDJ Model의 대입 또한 식생지수와 마찬가지로 연 단위 및 15일 단위로 분석을 진행하였다. 15일 단위 분석 결과는 경향성과 주기성을 제거했는데도 불구하고 해석하기 어려울 정도로 결과가 복잡하여, 연 단위 분석을 통해 결과를 제시하고자 한다(e.g. 그림 3-27). 특정 대푯값을 제시할 수 없다는 기상자료의 특성을 고려해서, DDJ Test결과에서 임계전이를 나타낸 지역의 수를 연도별, 수치별로 정리하였다(그림 3-28).

먼저, 평균기온에 대한 DDJ Model의 결과를 요약하면 그림 3-28a와 같다. 조건부 분산(Conditional Variance)은 1982-1983년에 과반수 가까이 지역에서 경보신호가 포착되었으며, 1988년 이후에도 과반수 정도 되는 지점에서 조기경보신호가 나타났다. 확산(diffusion)지수의 경우에는 1980년대 초반과 중반에 비교적 높은 임계수치를 나타냈고 이는 8개 지역이었다. 그 후 확산지수의 조기경보신호는 2~3개소의 지역에서만 한정적으로 나타났다. 도약(Jump)지표는 1998년 전후에 약하게, 그리고 2007년에 거의 대부분의 지역에서 나타났다. 2007년의 큰 변화를 나타내는 도약 부분의 임계지수가 거의 대부분의 지역에서 나타났던 것은 대부분의 북한 지역에서 해당 시기 평균 기온이 높았던 자료 특성에서 기인하며, 이는 남한에도 마찬가지로, 2007년의 평균기온이 높다는 기상청의 보도자료가 남아있다<sup>115)</sup>.

강수량에 대한 DDJ Model결과 요약은 그림 3-28b와 같다. 조건부 분산에서는 1990년을 전후로 임계수치를 나타내는 지역이 최대치(10지역)이고, 1998년에 유사한 경향을 나타낸다, 확산 지수는 이와 다르게 1985년을 전후와 1992-1993년, 2008년 전후, 2016년 전후에 높게 나타난다. 도약지표는 1990년과 2014년에 다소 높은(6회) 임계지역을 보이고, 그 외에는 1998년 전후에 높게 나타났다.

최고기온에 대한 DDJ Model결과 요약은 그림 3-26c와 같다. 조건부

---

115) 기상청 보도자료(2020. 8. 20 검색내용) : 2007년 기후 특성 : 지난 35년 동안 기온이 2번째로 높았던 해 : [http://www.kma.go.kr/notify/press/kma\\_list.jsp;jsessionid=00YA1Q1tEOjzaSXaueU5E8cvXKBbHRf0HLSGb2itjlngwnSa0qu15j1ZdLvLMhzw?printable=true&bid=press&mode=view&num=1183403](http://www.kma.go.kr/notify/press/kma_list.jsp;jsessionid=00YA1Q1tEOjzaSXaueU5E8cvXKBbHRf0HLSGb2itjlngwnSa0qu15j1ZdLvLMhzw?printable=true&bid=press&mode=view&num=1183403)

분산에서는 1990년대 초반과 2000년대 초반에 높은 빈도가 나타나고, 확산 지수는 1980년대 초와 후반, 그리고 1998년 이후에 10개소 이상으로 높게 나타난다. 도약 지표는 1987년에 8회, 1993년에 11회로 높게 나타난다. 이는 1990년대 초반에 발생하였던 폭염 등이 반영된 것으로 보인다.

최저기온에 대한 DDJ Model 결과 요약은 그림 3-26d와 같다. 최저기온의 조건부 분산은 1998년에 11개소가 임계수치를 나타낸 것을 제외하면 변화폭이 큰 편이다. 확산지수도 최대치가 2003년(13개소)일 뿐 양상은 비슷하다. 도약지표는 2001년에 급격한 증가가 나타나는 경향을 보인다.

이 결과를 1995년까지의 결과와 최근(2019)까지의 결과와 비교해 보면, 강우량의 경우는 1995년까지가 확산(Diffusion)의 측면에서 더 높은 조기경보신호의 증가 경향을 보이고, 최고-최저 기온은 반대로 최근까지가 조건부 분산의 측면에서 증가 경향을 보이는 결과가 도출되며 지역별로는 차이가 없다(표 3-14). 이는 강우량과 관련된 조기경보신호는 1990년대 이전에 확산의 형태에서 빈번하게 발생하였고, 최근에는 기후변화의 영향으로 기후극값에서 큰 영향을 끼친다고 볼 수 있다.

결과를 종합해 보면 평균기온과 강수에서는 1980년대부터 1990년대까지 작은 변화에 대한 조기경보신호의 빈도가 증가한 후, 중간 정도의 조기경보신호가 증가하는 형태가 번갈아가며 나타나는 형태를 보인다. 이는 추세가 임계전이에 가까워지는 변화에 이어 확산이 발생하고, 이것이 반복되어 발생하다가(1980-1990초), 결국 임계전이(Jump)(1993)로 발전한다는 것을 보여주는 결과라고 할 수 있다. 기후자료 지역이 많지 않아 지역별로 설명하기는 어려우나 지역적인 차이는 크지 않다는 것을 확인할 수 있으며, 강우량은 1995년 이전에, 최고-최저 기온은 최근에 조기경보신호의 빈도가 증가하였다는 것을 확인할 수 있다.

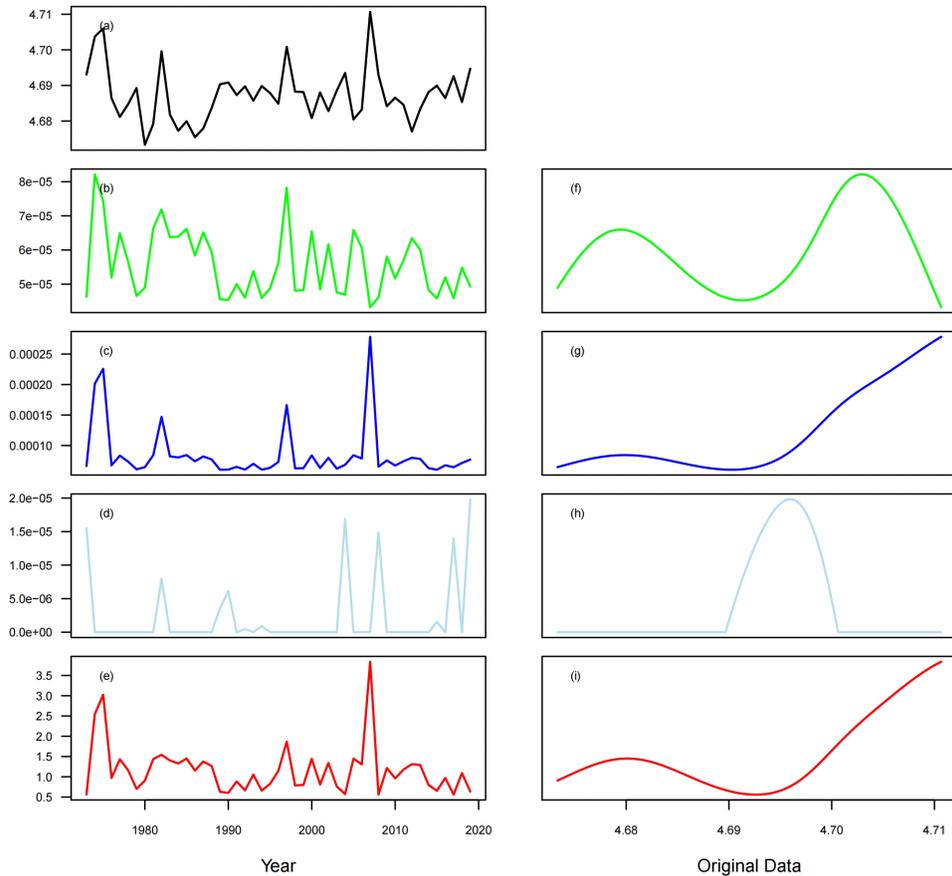
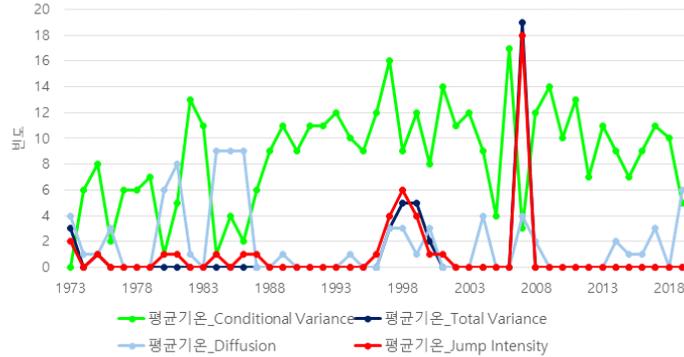


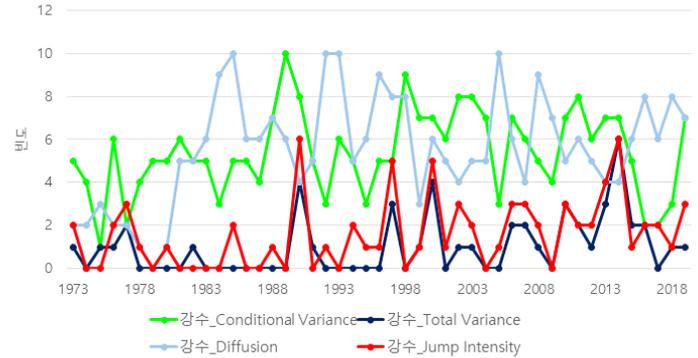
그림 3-27. 비모수적 추세-확산-도약 모형(Nonparametric DDJ Model)의 적용사례: 선봉지역의 평균기온

(a) 원 시계열 자료( $\ln(\text{원자료}+100)$ ), (b,f) 시계열, 자료구간별 조건부 분산, (c,g) 시계열, 자료구간별 총 분산, (d,h) 시계열, 자료구간별 확산지수, (e,i) 시계열, 자료구간별 도약 밀도. 자료구간별 지표들이 최대치에 이른 지점과, 이에 해당하는 시점이 각 자료가 나타내는 임계전이의 조기경보신호 지점이라 해석할 수 있다.

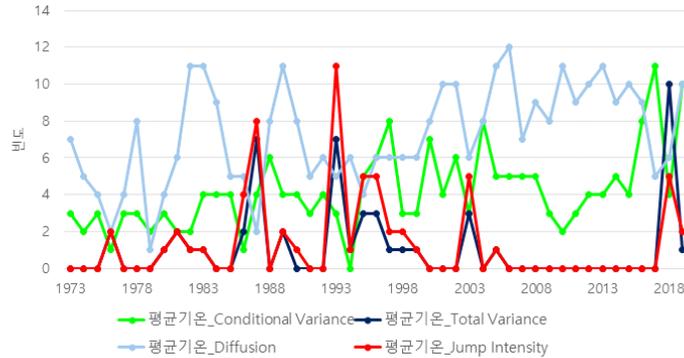
(a) 평균기온



(b) 강수량



(c) 최고기온



(d) 최저기온

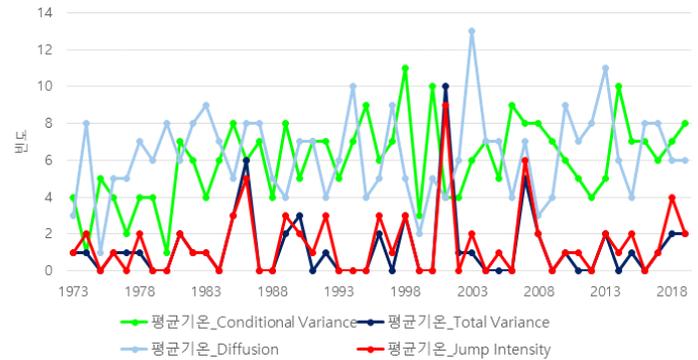


그림 3-28. 연 기후자료의 비모수적 추세-확산-도약 모형(Nonparametric DDJ Model)에서의 조기경보신호 분포 지역(총 27개 지역)

표 3-14. 기후자료 DDJ Model 조기경보신호 결과에 대한 시기별 경향성 결과 요약

자료	지역	1973년부터 1995년까지				1973년부터 2015년까지			
		C	T	D	J	C	T	D	J
평균기온	전체	0.4011 **	-0.3931 *	-0.2172	-0.2894 .	0.2680 **	-0.0651	-0.0827	-0.1848
	관서	0.4740 ***	-	-0.2229	-	0.2506 *	0.0948	-0.2151 .	0.1043
	관북	0.2810 .	-0.3931 *	-0.2819 .	-0.2614	0.2549 *	-0.0726	-0.1366	-0.2179 .
	휴전선	0.2897 .	-0.2949 .	0.0425	-0.2949 .	0.2063 .	-0.0166	0.0974	-0.0166
강수량	전체	0.1657	-0.2438	<b>0.4715 ***</b>	-0.0048	0.1688	0.2823 *	0.2508 *	0.3144 ***
	관서	0.0945	-0.2117	<b>0.4357 **</b>	0.1690	-0.0011	0.1420	0.2787 *	0.1516
	관북	0.0088	-0.1877	<b>0.4610 **</b>	-0.3343 .	0.0661	0.2457 *	0.1846	0.1968 .
	휴전선	0.1642	-0.0096	<b>0.3273 *</b>	-0.0096	0.2048 .	0.1682	0.1789	0.1655
최고기온	전체	0.2817 .	0.2764 .	0.0876	0.3189 .	<b>0.3967 ***</b>	-0.0985	0.3668 ***	-0.0904
	관서	0.2976 .	0.2931 .	-0.2928 .	0.4475 **	<b>0.3819 ***</b>	0.0985	0.2293 *	0.0321
	관북	0.1202	0.3259 .	0.1959	0.3259 .	<b>0.2780 *</b>	-0.0981	0.2771 *	-0.0981
	휴전선	-0.0373	0.0000	0.2639	0.1254	<b>0.2409 *</b>	-0.1461	0.2596 *	-0.1569
최저기온	전체	0.5086 ***	-0.1131	0.0713	-0.0137	<b>0.3163 ***</b>	0.0011	0.0649	0.0751
	관서	0.3627 *	0.0353	-0.0732	-0.0056	<b>0.2421 *</b>	-0.0517	-0.0216	-0.0225
	관북	0.4736 ***	-0.1852	0.3193 .	-0.0160	<b>0.3067 **</b>	-0.0229	0.2303 *	0.1147
	휴전선	0.1162	0.0487	0.1276	0.0487	0.1499	0.1525	0.0268	0.1525

\* 약자 설명

C : 조건부 분산(Conditional Variance), T: 총 분산(Total Variance), D : 확산(Diffusion), J :도약 밀도(Jump Intensity)

\* Kendall's Tau의 유의수준(P-value) : \*\*\*0.005, \*\* 0.01, \* 0.05, . 0.1

#### 4) 사회경제지표

사회경제 지표의 경우 앞서 측정기반 분석 결과를 토대로, 유의미하다고 여겨지는 자료에 대해서만 분석을 진행하였으나, 결과적으로 총에너지소비량에 대한 자료만 유의미한 결과를 보여 이를 소개하고자 한다.

북한의 총에너지소비량 변화에 대한 분석결과 전혀 다른 결과가 도출된다(그림 3-29). 전체적으로 2010년 전후로 해서 에너지 수급에 조기경보 신호가 강하게 나타난다. 이는 에너지 문제는 1990년대에도 존재했지만, 핵문제가 본격적으로 표면화된 2000년대 후반~2010년대에 더 임계전이에 가까웠음을 나타내는 결과라 할 수 있다. 화석연료사용비율 지표는 특징적으로 DDJ Model에서 1990년대를 전후해서, 빠르게는 1970년대 전후(확산 지표)에서 조기경보신호를 확인할 수 있다(그림 3-30).

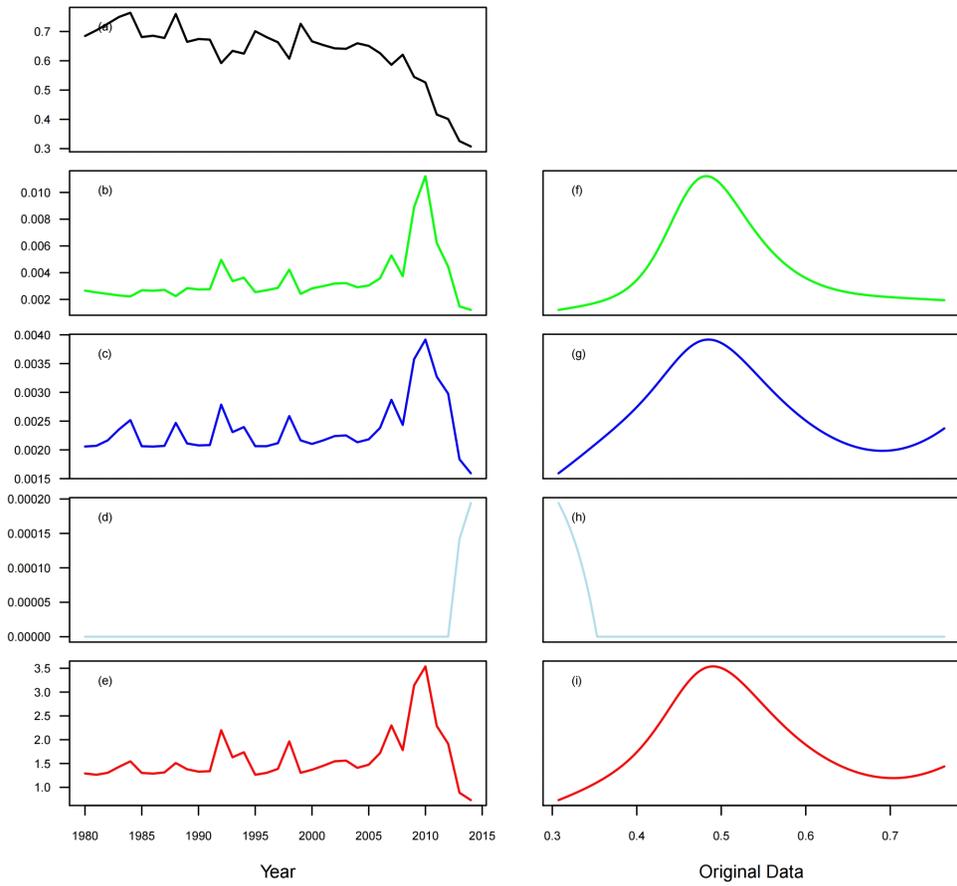


그림 3-29. 북한의 총에너지소비량에 대한 비모수적 추세-확산-도약 모형(Nonparametric DDJ Model) 적용결과

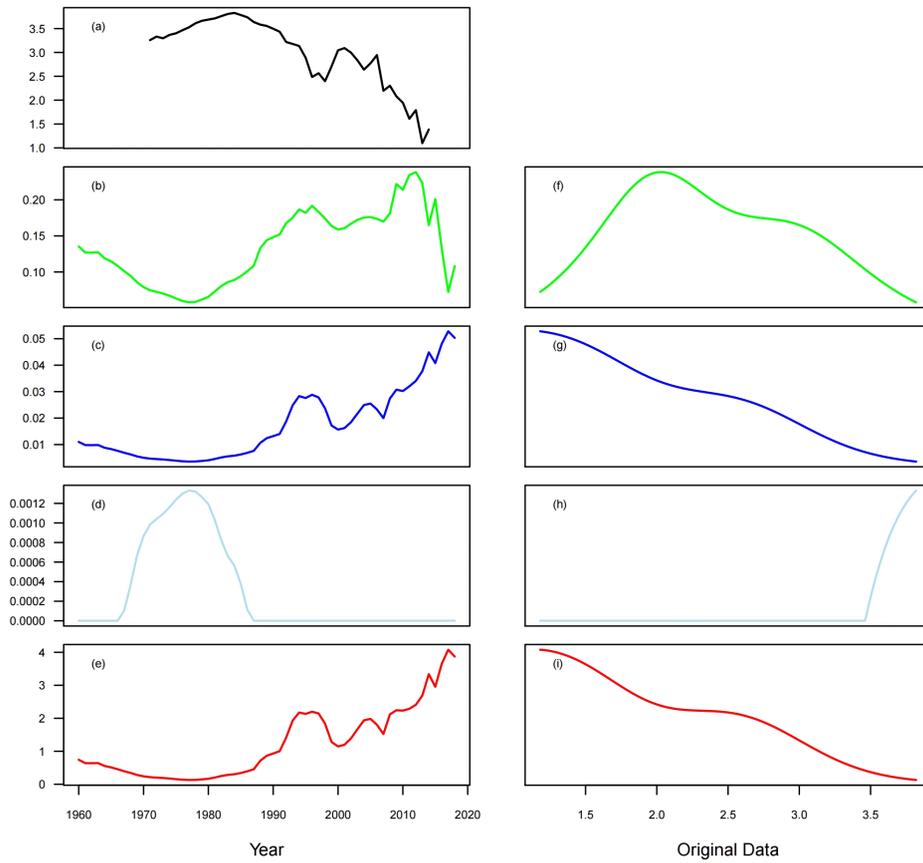


그림 3-30. 북한의 화석연료사용비율에 대한 비모수적 추세-확산-도약 모형(Nonparametric DDJ Model) 적용결과

## 2. 시간 가변성 자기회귀 모형 적용 결과

### 1) 식량생산과 수급의 변화

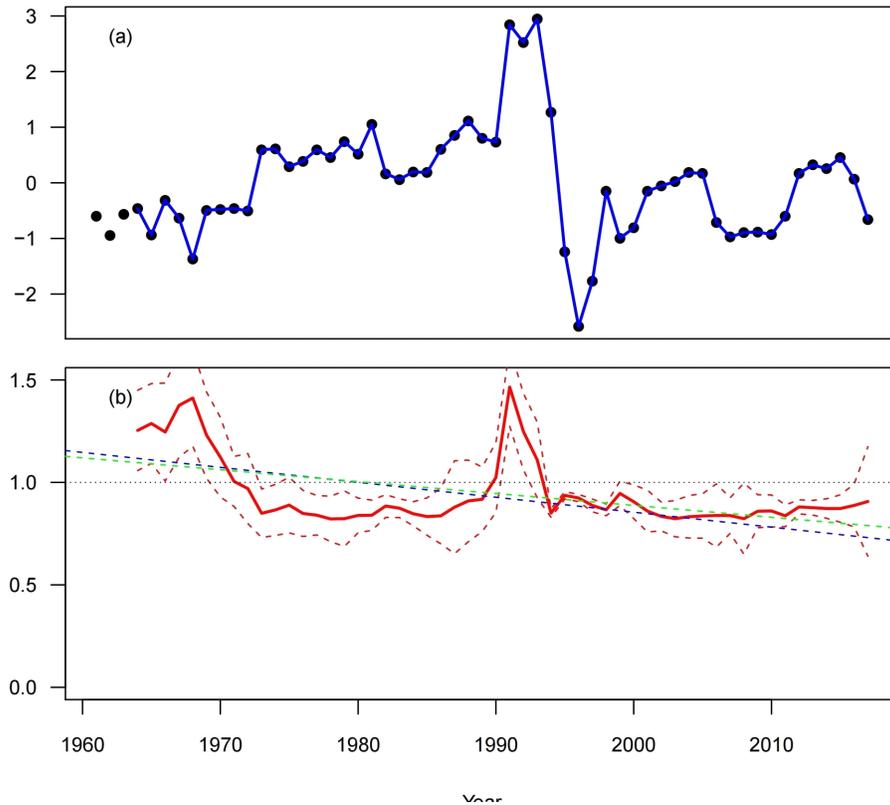


그림 3-31. 북한의 1인당 “식량생산량+수입량”에 시간 가변성 자기회귀 모형 결과

(a) 모형, 시간 가변형 AR(3) 모형으로 도출되었으며 AIC지표는 113.9651, Log Likelihood는 -47.9825으로 도출됨

(b) 모형의 유사고유치(pseudo-eigenvalue), 1이 넘으면 임계전이에 근접했다고 판단할 수 있음.

1995년과 2019년 기준 모두에 임계전이 조기경보신호가 관찰되었던 1인당 식량생산+수입량 지표(그림 3-31)에 대해서 시간 가변성 자기회귀모형을 적용하였다. 그 결과 1990년대 중반을 기점으로 조기경보신호가 관찰되는 형태로 결과가 도출되었으며, 그 이전인 1970년대 전후의 조기경보신호도 확인할 수 있었다(그림 3-31). 이는 동일 지표의 DDJ model 결과와 매우 유사한 결과라 할 수 있다.

해당 신호는 그림 3-32 (가)의 단위면적당 옥수수 생산량에서 유사하게 확인할 수 있으며, 전체 식량생산량보다 훨씬 오래 전부터, 자주 유사고유치의 조기경보신호에 해당하는 지표 수준이었던 것을 알 수 있다. 즉 이 결과만을 통해 보았을 때, 북한의 옥수수 재배는 1970년 이후부터 지속적으로 유지가 어려운 수준의 취약성을 보였다고 해석이 가능하다. 반대로 감자 소출량의 경우 조기경보신호가 전혀 도출되지 않았다(그림 3-32 나). 이는 앞서 지속적으로 확인한 대로 1990년대 대기근 이전 옥수수 위주의 발작물 선택에서 이후 감자 중심의 발작물 선택의 동기를 설명할 수 있는 자료로 유용할 것으로 보인다.

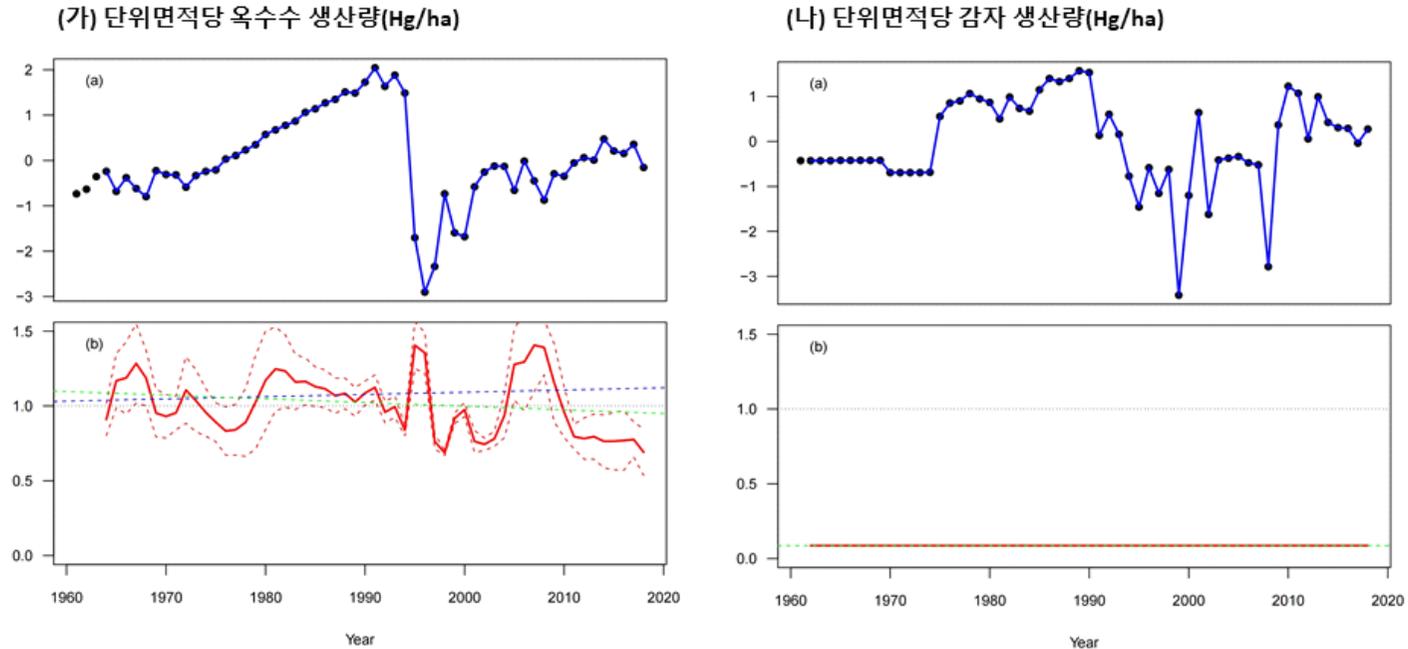


그림 3-32. 북한의 단위면적당 옥수수 생산량과 감자 생산량에 시간 가변성 자기회귀 모형 결과

(a) 모형, 옥수수의 경우 (가) 시간 가변형 AR(3) 모형으로 도출되었으며 AIC지표는 78.29494 Log Likelihood는 -30.1475로 도출됨, (나)의 감자의 경우 시간 가변형 AR(1) 모형으로 도출되었으며, AIC지표는 149.0942, Log Likelihood는 -69.5471로 도출됨

(b) 모형의 유사고유치(pseudo-eigenvalue), 1이 넘으면 임계전이에 근접했다고 판단할 수 있음.

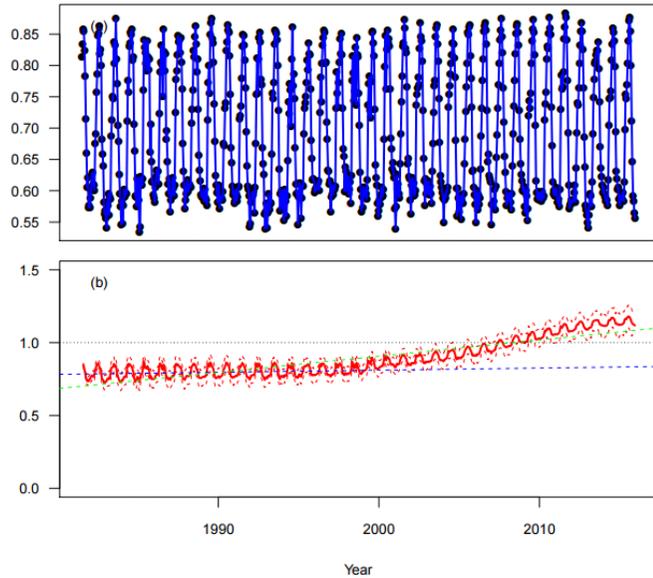


그림 3-33. 유사고유치 조기경보신호 사례: 1098  
번 지점(N 39.895, E 124.557)의 정규화식생지수  
시간 가변성 자기회귀 모형 결과

- (a) 모형, AR(2) 모형으로 도출되었으며 AIC지표는 -3017.83 Log Likelihood는 1515.914로 도출됨
- (b) 모형의 유사고유치(pseudo-eigenvalue), 1이 넘으면 임계전이에 근접했다고 판단할 수 있음.

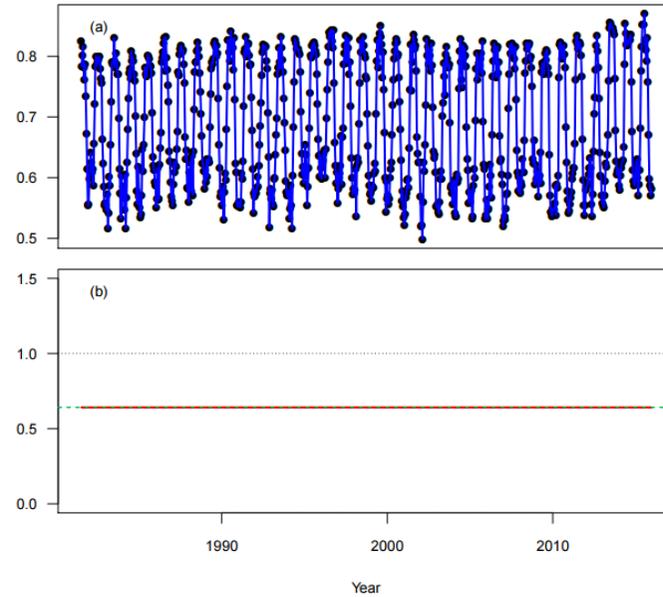


그림 3-34. 유사고유치 조기경보신호와 무관한 사  
례: 33번 지점(N 42.561, E 133.391)의 정규화  
식생지수 시간 가변성 자기회귀 모형 결과

- (a) 모형, AR(1) 모형으로 도출되었으며 AIC지표는 -2982.26 Log Likelihood는 1496.131로 도출됨
- (b) 모형의 유사고유치(pseudo-eigenvalue), 1이 넘으면 임계전이에 근접했다고 판단할 수 있음.

## 2) 식생지수

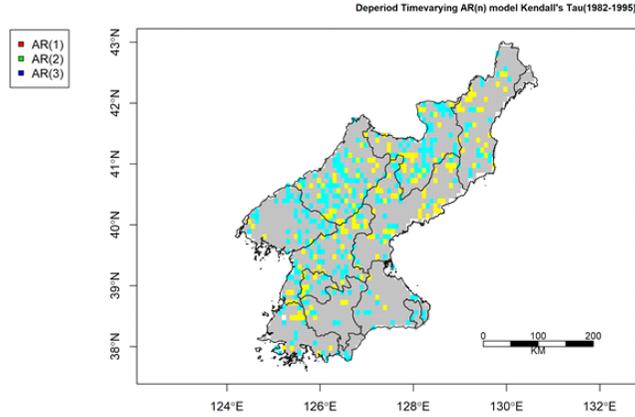
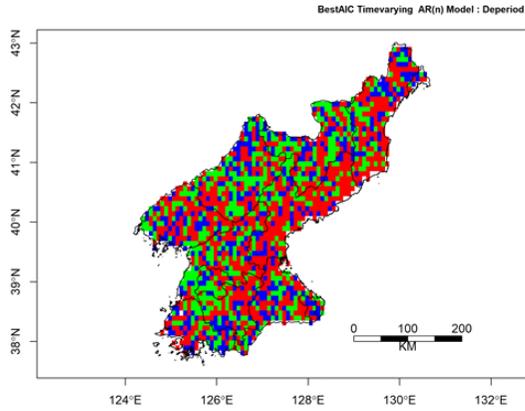
북한의 식생지수 대푯값에 대한 시간 가변성 자기회귀 모형은, 거의 대부분의 지표에서 유의미하게 해석할 만한 결과가 도출되지 않았다. 단, 각 지점에 대해 시간 가변성 자기회귀 모형을 적용해 본 결과, 다수의 지점에서는 그림 3-33과 같이 임계전이로 해석할 수 없는 결과가 도출되었지만, 그림 3-34와 같이 임계전이에 대한 조기경보신호라고 해석할 수 있는 결과가 일부 도출되는 경우가 일부 있다.

각 화소별 식생지수의 시간 가변성 자기회귀 모형을 적용한 결과를 요약하면 그림 3-35와 같다. 전체 1,868개 지점 중 AR(1)모형이 적합한 지역이 46.1%, AR(2)모형은 29.5%, AR(3) 모형은 22.9%가 적합하다고 도출되었다(그림 3-33a)<sup>116)</sup>. 유사고유치의 1982년부터 1995년 대기근시까지의 변화 경향과(그림 3-33b), 최근인 2015년까지의 변화 경향을(그림 3-33c) 살펴보면, 유사고유치가 증가하는 경향이 거의 확인되지 않는다. 따라서 시간 가변성 자기회귀 모형으로 각 시기별 식생지수를 분석하였을 때에는 조기경보신호로 볼 수 있는 현상이 잘 관찰되지 않는다.

그러나, 미시적인 식생지수의 시·공간적 경향(화소별, 연도별)을 살펴보면, 시기별로 조기경보신호가 도출이 되는 지역도 확인할 수 있다. 그림 3-36과 그림 3-37를 보면 유사고유치의 값이 증가하는 추세이며, 유사고유치가 1이 넘는 취약지점도 점차 증가하고 있는 것을 볼 수 있다. 지도(그림 3-36~37)에서는 정적으로 보이지만, 이를 북한 전체 및 북한의 3개 지역으로 구분한 그래프(그림 3-36)로 확인하면 2010년 전후를 기점으로 해서 유사고유치가 1이 넘는 지역 및 시기가 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 특징적인 것은 증가폭이 전번적으로 두드러지는 2010년여경 이전에는 관북 지방의 조기경보신호가 높았다면, 그 이후에는 관서 지방의 조기경보신호의 빈도가 높아짐을 확인할 수 있다. 이는 측정자료 기반 결과의 취약지역 중심이 관북(1995년 이전)에서 관서로 이동한 것과 유사한 결과라 할 수 있다.

---

116) 이는 조기경보신호 자체와는 큰 관계가 없지만, 북한의 식생지수는 시기가 가까울수록 연관성이 높은 특성을 식생지수는 시계열이 더 가까운 자료와 연관성이 높은 특성을 가진다고 해석해 볼 수 있어 참고자료로 활용할 수 있다.



(a)	(b)
	(c)

(a) 지점별 적합 시간가변성 모형의 차수 (n : 1~3)

(b) 1981-1995년 사이의 시간가변성 모형 유사임계치의 Kendall's Tau

(c) 1981-2015년 사이의 시간가변성 모형 유사임계치의 Kendall's Tau

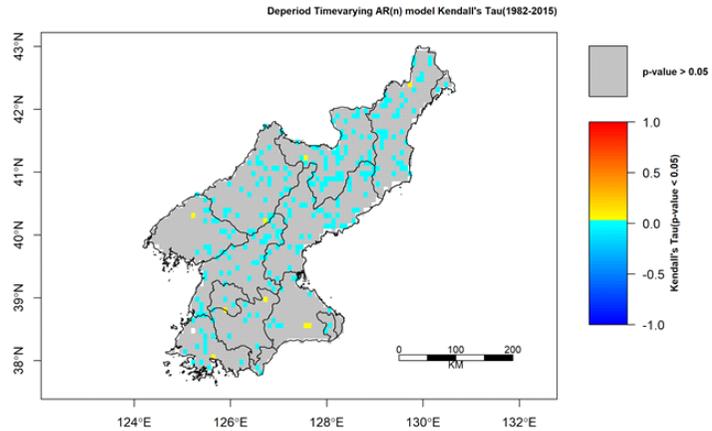


그림 3-35. 정규화식생지수 자료의 시간 가변성 자기회귀 모형 적용결과와 경향성

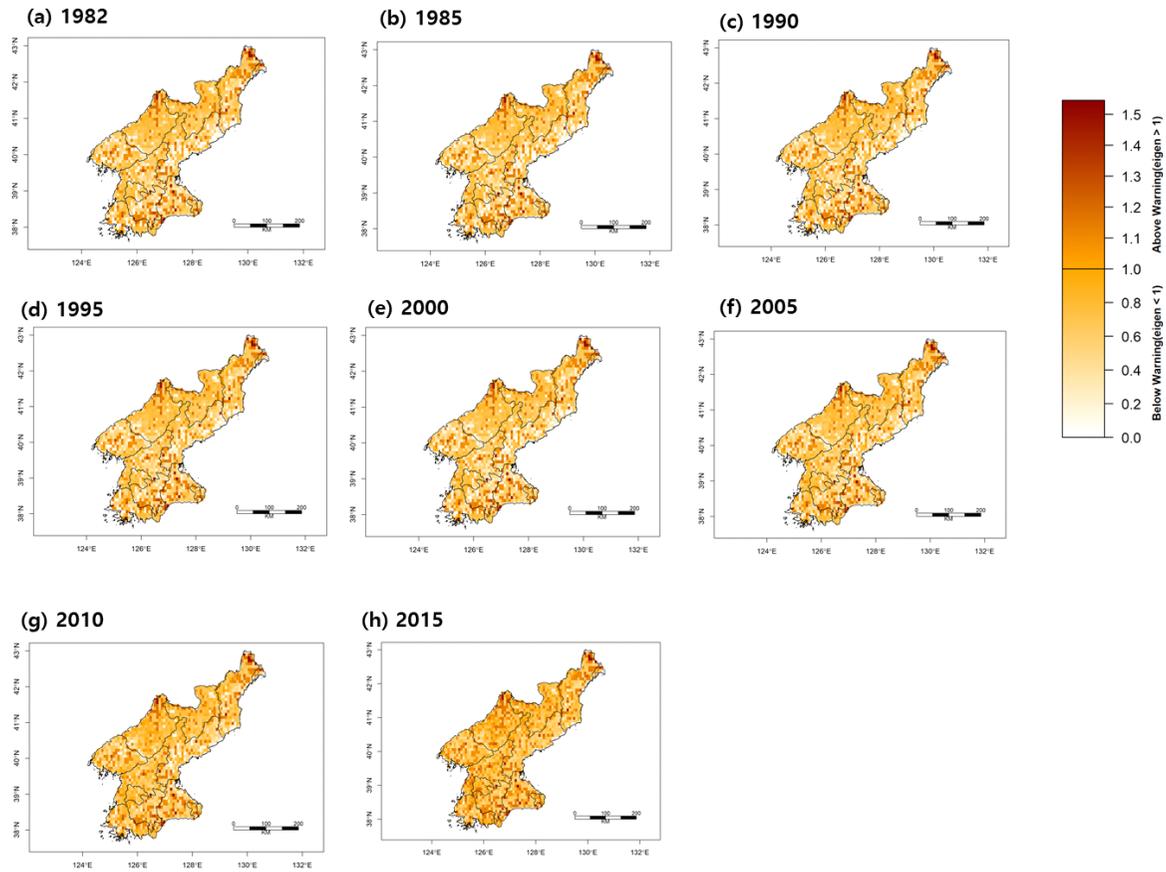


그림 3-36. 정규  
화식생지수 시  
간가변성 모형  
의 유사고유치  
의 시기별 변  
화

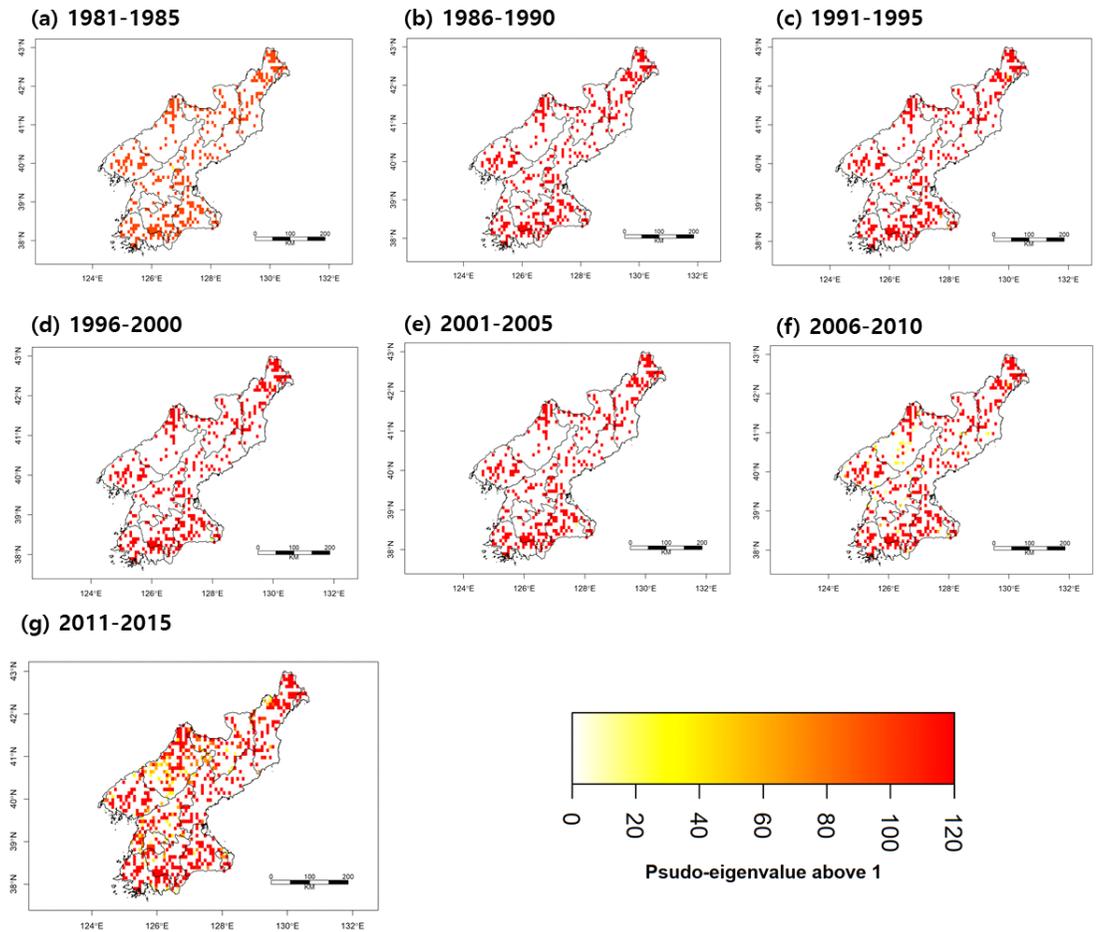


그림 3-37. 정규화 식생지수 시간가 변성 모형을 통한 임계전이 조기경보신호 도출 (유사고유치 1 이상) 건수

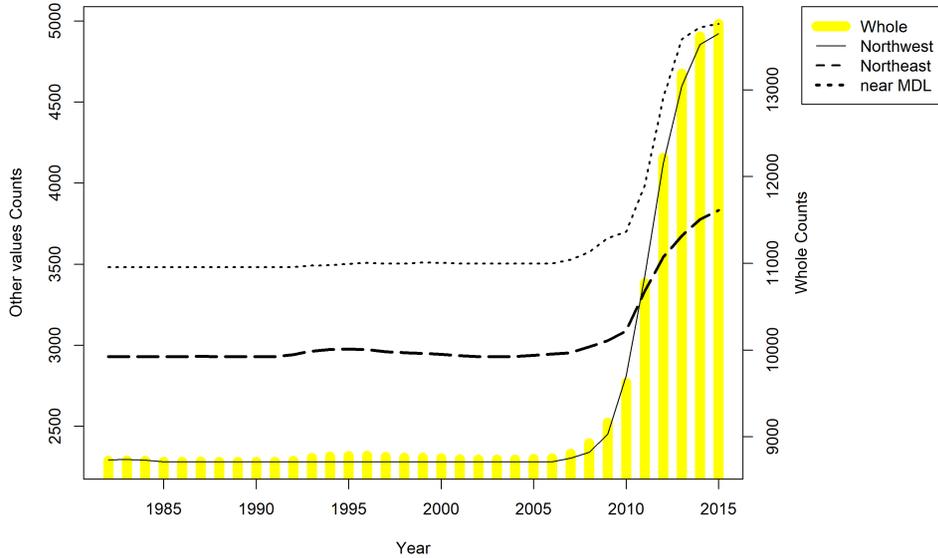


그림 3-38. 전체 및 각 지역별 정규화식생지수의 연간 임계전이 조기경보 신호 도출 횟수

\* Whole : 북한 전역, Northwest : 관서 지방(평안남북도, 자강도), Northeast : 관북지방(함경남북도, 양강도), Near MDL : 휴전선 주변(황해남북도, 강원도)

### 3) 기후자료와 사회경제지표

기후자료에 대한 시간 가변성 자기회귀 모형을 적용한 결과, 15일 단위 및 연 단위 모두 대부분 지표에서 임계전의 기준인 유사고유치 1 이상을 충족하는 모형이 거의 만들어지지 않았으며, 넘었다고 해도 모든 시계열에서 유사고유치를 초과하는 정적인 형태의 모형이 만들어졌다. 다만 그림 3-39와 같이 일부 지역의 기후자료는 동적인 형태의 유사고유치가 만들어지는 시간 가변성 자기회귀 모형이 확인된다. 그림 3-39의 결과는 특히 1990년대 초-중반의 조기경보신호를 나타내는 결과로서 의미가 있다. 그러나 이는 극히 일부로 유의미한 해석을 하기는 어렵다.

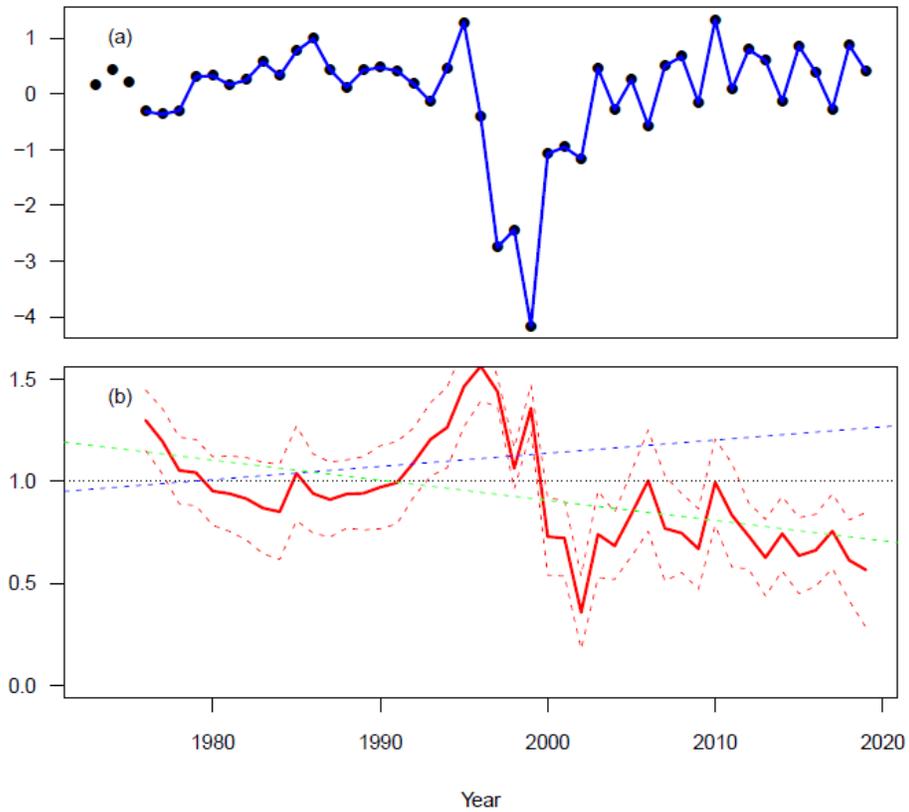


그림 3-39. 중강진 강수량의 시간 가변성 자기회귀 모형 결과

(a) 모형, 시간 가변형 AR(3) 모형으로 도출되었으며 AIC지표는 113.4853, Log Likelihood는 -47.7426으로 도출됨 (b) 모형의 유사고유치 (pseudo-eigenvalue), 1이 넘으면 임계전이에 근접했다고 판단할 수 있음.

사회경제 지표 중 에너지와 관련해서는 북한의 총에너지소비량(그림 3-40)과 화석연료사용비율(그림 3-41)에 대한 시간 가변성 자기회귀 분석에서 유의미한 결과가 도출되었다. 총에너지소비량은 현재 시점까지 점진적인 임계전이로의 이동의 형태를 보여주고 있다(그림 3-41). 반면, 화석연료사용비율은 1960-70년도에 다소 높은 유사고유치와, 2010년대의 급격한 유사고유치의 증가가 확인된다. 에너지가 북한의 토지황폐화와 식량 문제에 많은 영향을 주었겠지만, 이 자료에서는 1990년대 대기근과 관련된 자료보다는 최근 북한의 핵개발 등으로 인한 고립에서 기인하는 조기경보신호가 주로 관찰되는 것으로 보인다.

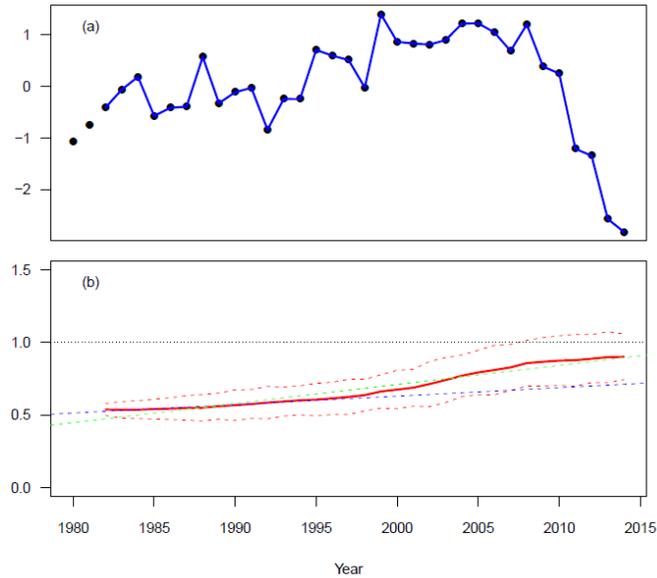


그림 3-40. 북한의 총에너지소비량에 대한 시간 가변성 자기회귀 모형 결과

- (a) 모형, 시간 가변형 AR(3) 모형으로 도출되었으며 AIC지표는 71.57212 Log Likelihood는 -26.7861로 도출됨
- (b) 모형의 유사고유치(pseudo-eigenvalue), 1이 넘으면 임계전이에 근접했다고 판단할 수 있음.

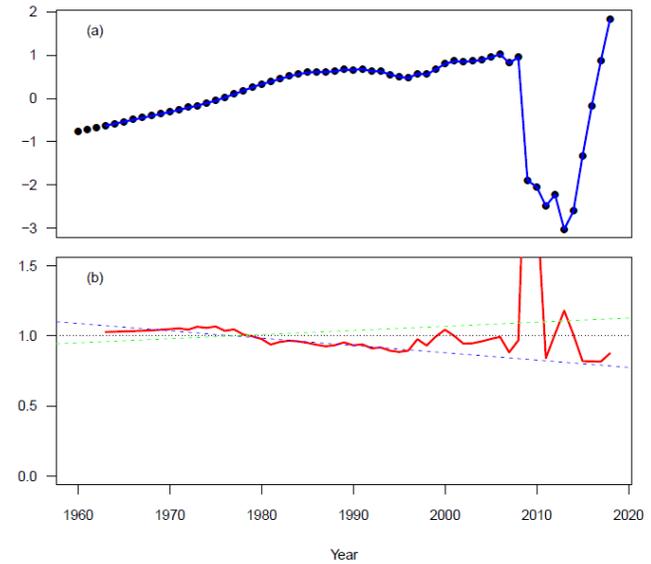


그림 3-41. 북한의 화석연료사용비율에 대한 시간 가변성 자기회귀 모형 결과

- (a) 모형, 시간 가변형 AR(3) 모형으로 도출되었으며 AIC지표는 21.68764, Log Likelihood는 -1.84382로 도출됨
- (b) 모형의 유사고유치(pseudo-eigenvalue), 1이 넘으면 임계전이에 근접했다고 판단할 수 있음.

### 3. 공간 기반 조기경보신호 분석결과 및 해석

앞서 언급한 대로 공간적 조기경보신호 지표는 식생지수 자료만을 분석할 수밖에 없었다. 그 결과는 그림 3-42~45과 같다. 모든 결과에서 공간 왜도의 결과는 유의미하지 않게, 나머지는 유의수준 안에서 유의미한 결과로 도출되었다.

공간자기상관성이 높아지는 경우 조기경보신호로 볼 수 있기 때문에 도출한 Moran's I의 경우 식생지수의 모든 연단위 요약 지표에서 대기근이 발생 시점인 1995년 이후에야 높아지는 것을 볼 수 있다. 이는 공간자기상관성 지표가 식생지수(토지황폐화)의 조기경보와 별로 관계가 없거나, Moran's I가 해당 자료와 잘 맞지 않음을 나타내는 결과라고 할 수 있다. 반면 공간 분산은 평균을 제외하고는 1980년대 후반과 1990년대 초반 증가하는 경향을 보이며, 이때 공간적인 조기경보신호가 보였다고 해석할 수 있다.

앞서 문헌 연구 분석에서 Moran's I의 경우 임계 감속과 연관이 되어 있고, 공간 분산은 깜빡임(flickering)과 연결되어 있다고 확인하였다. 이를 통해 해석한다면 1980-1990년대 식생지수에서의 공간적 조기경보신호에서는 깜빡임 또는 분기(bifurcation)와 같은 급격한 변화와 관련된 임계전이 발생한다고 해석이 가능하다. 그러나 이는 측정기반 분류 결과에서의 결과와 반대로 서로 모순되는 결과라 할 수 있다.

세미베리오그램분석 상관거리 결과는 Moran's I와 유사하게 도출되었다(그림 3-46). 단, 연 최소값의 경우 Moran's I와 다소 차이가 있다. 종합적으로는 세미베리오그램분석은 Moran's I 결과와 마찬가지로 유의미하게 해석할 만한 요소가 없었다.

결과가 명확하지 않고 유의미한 자료가 모순된 형태로 도출된 이유를 찾기는 어렵다. 현재로서는 앞서 측정기반 분석이나 모형기반 분석과 결과가 상이하게 나왔던 것은, 자료와 도구의 한계로 인하여 연구지역을 북한의 내륙으로 한정(그림 3-7)했기 때문으로 추정해 볼 수 있다. 자료의 한계에도 불구하고 분석할 수 있는 다른 방안이나, 북한을 대표할 수 있는 다른 공간범위 설정을 고민해볼 필요가 있다.

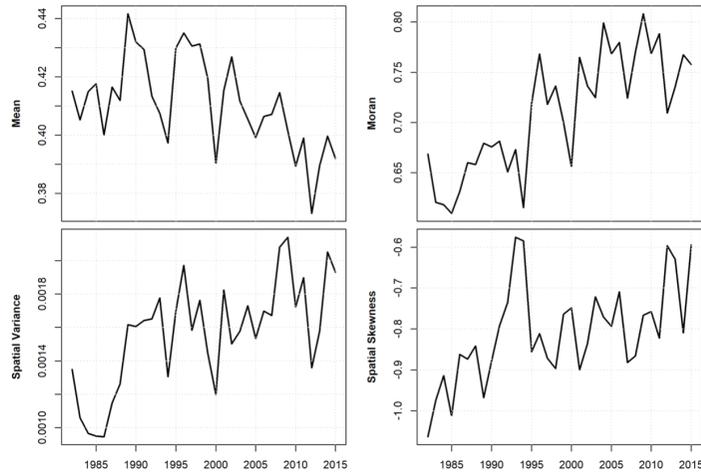


그림 3-42. 식생지수 연평균의 공간적 조기경보신호 지표

연도별 평균(Mean)은 참고자료로 제시,  
 유의성검정 결과 : Moran's I < 0.001, Spatial Variance < 0.001, Spatial Skewness > 0.1

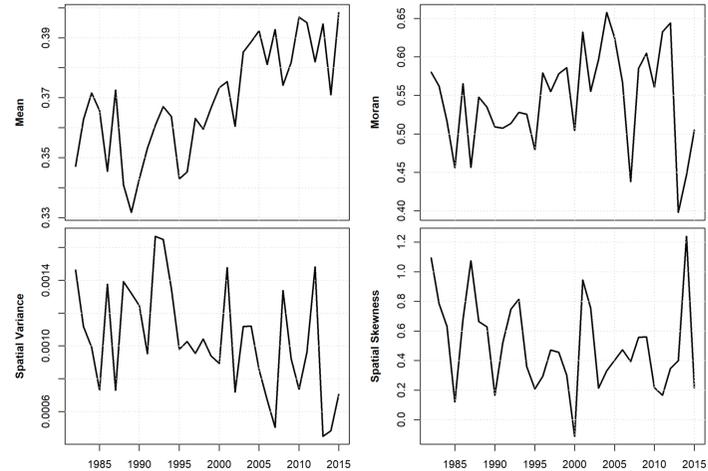


그림 3-43. 식생지수 연 변동계수의 공간적 조기경보신호 지표

연도별 평균(Mean)은 참고자료로 제시,  
 유의성검정 결과 : Moran's I < 0.001, Spatial Variance < 0.001, Spatial Skewness는 1982-1987-2001-2014년 < 0.05, 1993-2003년 < 0.1 나머지 자료는 > 0.1

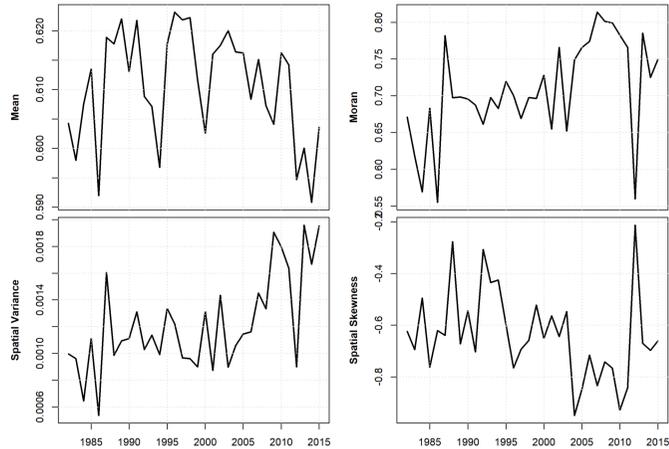


그림 3-44. 식생지수 연 최대값의 공간적 조기경보신호 지표  
 연도별 평균(Mean)은 참고자료로 제시,  
 유의성검정 결과 : Moran's I < 0.001, Spatial Variance < 0.001, Spatial Skewness > 0.1

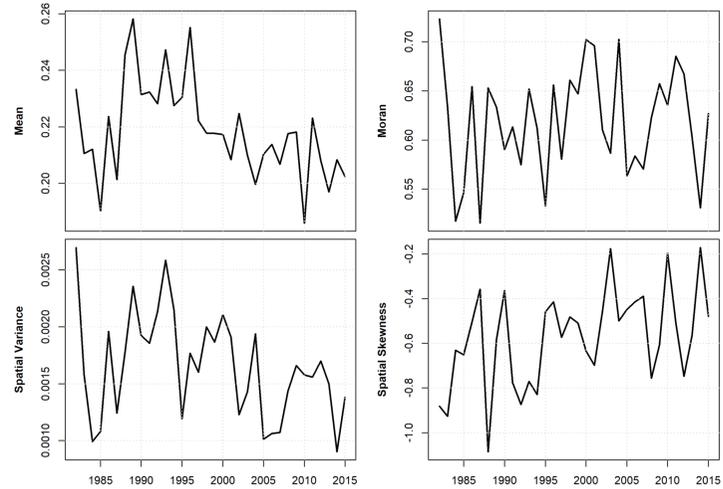
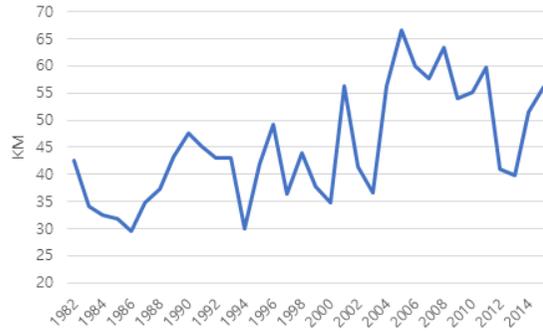
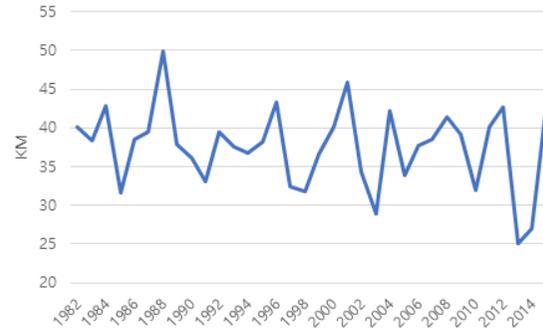


그림 3-45. 식생지수 연 최소값의 공간적 조기경보신호 지표  
 연도별 평균(Mean)은 참고자료로 제시,  
 유의성검정 결과 : Moran's I < 0.001, Spatial Variance < 0.001, Spatial Skewness > 0.1

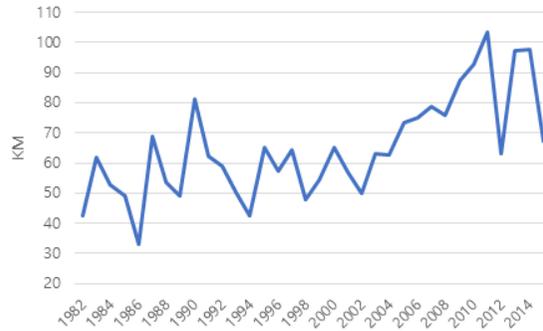
(a) 연 평균



(b) 연 변동계수



(c) 연 최대값



(d) 연 최소값



그림 3-46. 식생지수 지표별 세미베리오그램 상관거리의 변화

#### 4. 조기경보신호 시점 및 취약지점 확인

DDJ Model과 시간 가변성 자기회귀와 같은 모형기반 조기경보신호 도출방법과 공간 기반 조기경보신호 도출방법을 이용해 북한의 토지황폐화 모형과 식량생산량 감소문제와 관련한 조기경보신호가 있었는지, 있었다면 어느 시기에 있었는지를 확인하였다.

측정기반 분류법과 마찬가지로 1990년대 북한 대기근의 조기경보신호가 있었는지 여부를 모형·공간기반으로 확인한 결과는 DDJ Model을 통한 확인만 제한적으로 가능했다. DDJ Model에서 기후자료를 제외한 대부분의 자료에서 과거부터 1995년까지의 경향에서 조기경보신호가 더 분명하게 나타나는 경우가 많았다. 단, 기후 중 최고-최저기온은 1995년까지의 변화보다 최근 자료가 더 조기경보신호가 분명하게 도출되었으며, 이는 기후 변화에 의한 극한기후현상의 증가로 해석할 수 있다. 시간 가변성 자기회귀와 공간 기반 조기경보신호 도출 방법에서는 이러한 해석을 하기가 어려웠다.

모형·공간기반 조기경보신호 포착 기법을 통해 조기경보신호의 발생 시기를 특정할 수 있다. 앞서 설명한 자료를 포함하여 각 지표에 대한 모형 기반지표를 확인하여, 이를 각 연도별로 표현한 것이 부록 3과 같다. 이를 요약, 정리하면 아래와 같은 결론을 내릴 수 있다.

첫째, 1990년대 북한 대기근의 핵심적인 조기경보신호는 1980년대 전반을 걸쳐서 발생하였으며, 특히 1988년을 전후로 한 1980년대 후반이 핵심적인 시점이었다. 특히 토지황폐화에 대한 핵심 지표인 식생지수의 결과와, 기후 관련 지표들이 주로 이 시기에 조기경보신호로서 도출되었다. 특히 1980년대 초반 조기경보신호가 주로 작은 변화에 대한 신호로 도출되었고, 1980년대 후반에는 큰 변화에 대한 신호로 도출되었던 결과는, 토지황폐화의 프로세스가 임계감속(critical slowing down)과 회복력의 점진적 저하에서, 깜빡거림(flickering)으로 표현되는 급격한 변화로 전환되었다는 것을 보여준다.

둘째, 대기근의 발생과 관련되는 식량생산량과 공급량(수입량) 자체의 조기경보신호는 대기근이 임박한 1990년대 초반과 중반에 주로 나타났다. 이는 대기근의 징후라고 하기에는 가까운 시점이며, 식량생산과 공급의 측

면에서는 사실상 대처할 여유가 충분치 못했다고 볼 수 있다. 대신 그 근본 원인으로 작용하였던 토지황폐화와 기후 관련 지표가 1980년대 초반(회복력의 점진적 저하) 및 후반(급격한 변화)과 식량생산과 공급 관련 조기경보신호는 3~10년 정도의 격차가 있음을 확인할 수 있었다.

그 외에도 몇몇 인문사회지표들은 1970년대부터 조기경보신호를 보이는 것이 있으며, 자료가 보강될 수 있다면 이후에는 더 늘어날 것으로 예상된다. 따라서 잠재적으로는 각 요인들마다 단계적인 형태로 조기경보신호가 나타났을 것이라고 판단할 수 있다. 첫째 단계는 1970년 전후로, 인문사회지표와 체제, 에너지 관련 요소의 측면에서 조기경보신호가 있었을 것으로 보인다. 둘째 단계는 1980년대 초로, 토지황폐화 요소와 기후요소의 점진적 저하 형태의 조기경보신호가 있었다. 셋째 단계는 1980년대 후반으로, 토지황폐화 요소와 기후요소의 급격한 변화 형태의 조기경보신호가 도출되었다. 마지막 단계는 1990년대 초반부터 대기근까지로, 식량공급 측면에서 조기경보신호가 임박해서 도출하는 형태로 도출되었다. 따라서 조기경보신호는 자료의 특성에 따라 다양한 시기에, 다양한 형태로 나타났으며, 여러 징후를 보여 주었다고 사후적으로 평가할 수 있다.

공간적 차이를 구체적으로 볼 수 있는 식생지수 측면에서는 DDJ Model에서 조기경보신호의 스케일을 상징하는 조건부 분산, 확산, 도약, 지표에 따라 결과가 다르게 나타났다. 주로 작은 문제와 임계 감속 관련된 지표는 관북 지역을 중심으로, 중간단계는 평지 전체에서, 큰 변화와 관련된 지표는 평안도 주변에서 나타났다. 즉, 일반적인 프로세스적인 측면에서는 관북 지방의 해안-산지 일원에서 취약성을 가지고 있고, 중간단위의 현상은 비산지 전체에서, 거대한 충격은 평안도 일원에서 가지고 있는 취약성이라 볼 수 있다. 이는 근본적인 자연사회환경의 취약성은 산지가 많은 관북 지방이, 자연재해와 같은 급변사태는 인구가 많은 관서지방이 더 큰 타격을 받았음을 암시하는 결과라 할 수 있다.

## 제 5 절 소 결

이 장에서는 복잡적응계적 임계전이와 창발현상의 예측불가능성의 문제가 있는 1990년대 북한의 대기근과 토지황폐화와 같은 원인에 대해서, 조기경보신호(EWS) 탐지 기법이라는 대안적 방법을 적용해서, 그 사전 신호와 징후를 포착하고자 하였다. 이 장의 서두에서 언급하였던 질문을 중심으로 결과를 정리하고, 서론 및 2장에서 제시한 내용들과 비교·검토를 통해 주요 논점을 정리하고 이 장 차원에서의 결론을 정리하였다.

### 1. 조기경보신호 포착결과에 대한 기초적 논의

#### 1) 대기근 조기경보신호의 유무

측정자료, 모형 기반 조기경보신호를 포착 기법을 이용하여 대기근이 시작된 1995년까지의 조기경보신호 여부를 확인 결과, 식량생산과 공급 지표, 토지황폐화(식생지수) 지표, 기후관련 지표 모두에서 조기경보신호가 존재함을 확인할 수 있었다.

2장에서 확인할 수 있듯 1960년대부터 북한은 식량생산량 증가를 위해 “자연개조” 등 여러 가지 정책 변경을 지속적으로 수행해 왔다. 이는 조기경보신호와 대기근 발생의 근본 원인으로 작용하지만, 이 연구결과에서 포착한 징후에 대한 북한 나름대로의 대응일 가능성이 높다.

측정자료 기반 분석을 토대로 이 결과는 대부분 임계감속 또는 점진적 회복력의 저하의 프로세스로 이해할 수 있다. 이 상태에서는 시스템의 변위가 다소 증가하고, 특정한 시공간적 경향을 띠는 경우가 많아 징후가 포착되지만 깜빡임(flickering)현상과는 다르게 급격한 변화와 혼돈, 분기(bifurcation)와 같은 현상이 일어나지 않아 더 알아차리기 어려웠을 것으로 보인다.

단, 기후 등 일부 지표와, 지역적인 토지황폐화 지표(식생지수)의 변화 양상은 다소 다른 결과가 도출되었으나, 이는 북한 토지황폐화와 식량생산 감소의 취약성으로 인한 문제가 앞으로 발생할 수 있음을 암시하는 결과

라고 해석할 수 있다.

## 2) 대기근 조기경보신호의 시점 확인

모형 기반 조기경보신호를 포착 기법을 활용한 결과, 대기근과 관련된 인문사회적 요인 관련 징후는 1970년 전후로, 토지황폐화와 기후 관련 지표 중 점진적인 변화 관련 징후는 1980년대 초반에, 토지황폐화와 기후 관련 지표 중 큰 형태의(flickering) 변화 징후는 1980년대 후반에, 식량 생산 및 공급과 관련된 징후는 대기근 직전에 포착된 것으로 보인다. 이는 북한의 대기근이 발생하는 프로세스가 인문사회적 요인, 자연환경의 미시적 프로세스, 자연환경의 거시적 프로세스의 시간 순서로 발생하였음을 암시하는 결과라 할 수 있다.

핵심적인 조기경보신호의 징후는 1980년대의 토지황폐화 관련된 징후인 것으로 보인다. 2장에서 인용한 문헌들은 실제로 북한 내·외에서 이 시점에 다양한 징후를 포착했다는 것을 보여준다. 일례로 1980년대 초반과 후반 두 차례에 걸쳐 북한은 배급제도 유지에 어려움을 느끼고 배급량을 줄이는 등 배급제도의 불안정성을 체감하였다(이석, 2004a), 그리고 1980년대 후반 북한은 종래 자연개조 활동으로 장려하였던 다락밭 개간 정책을 제한하는 정책을 수립하는 등 토양침식과 산사태와 같은 토지황폐화 위험성을 인식하기 시작했다(박경석 등, 2011).

## 3) 조기경보신호를 통해 확인한 토지황폐화 취약지점 확인

위성영상의 각 화소를 대상으로 측정자료·모형 기반 조기경보신호 포착 방법을 적용하여, 이를 시기별 지도화를 진행함으로써 일종의 토지황폐화 취약성 징후도 또는 조기경보신호를 고려한 토지황폐화 취약지 지도(hotspot map)를 제작할 수 있었다.

측정자료 기반 분석으로 구체적인 조기경보신호와 취약지 지점을 확인한 결과 대기근이 발생할 때까지 취약했던 지점은 관북 해안지역으로 도

출되었다. 반면 모형 기반 분석 결과 임계 감속 관련된 지표는 관북 지역을 중심으로, 큰 변화와 관련된 지표는 평안도 주변에서. 그 중간은 산지를 제외한 지역에서 주로 나타났다.

종합적으로 자연환경과 관련된 지속적인 저하와 관련된 취약지점은 관북 지역으로, 인간에 의한 영향과 자연재해에 의해 피해가 큰 지역은 관서 지역의 인구밀집지역으로 특정할 수 있다. 1990년대 대기근 발생시 피해가 컸던 지역으로 농업활동이 불가능했고 식량수급을 월급으로 충당할 수 없었던 중소도시의 사무·노동계급<sup>117)</sup>이 언급된다(김연철, 1997). 평양과 함흥을 제외하고, 이 지역은 이러한 소도시가 비교적 많이 분포한 지역으로 연관성이 있지 않을까 생각한다.

## 2. 주요 논의 지점

이 장의 주요 결과들을 종합하였을 때 서론 및 2장의 내용과 모형 전반적으로 차이를 보였던 부분에 대해서, 어떤 형태로 차이가 나고 그 이유가 무엇인지를 논의해 보고자 한다. 그리고 결과를 어떻게 적용할 수 있을지에 대해서 검토해 보고자 한다. 마지막으로 연구 곳곳에 정리하였던 본 장의 한계를 확인하고, 추후 보완방안이 무엇인지를 제시하고자 한다.

### 1) 실제 지표와 조기경보신호와의 시공간적 차이

이 장에서 확인하였던 1990년대 북한 대기근에 대한 1970년대~1980년대 조기경보신호와 달리, 2장과 부록 2에서의 지표의 단순 경향 확인 자료에서는, 대기근에 임박한 시기에 주로 관련지표의 증가와 감소 형태가 나타난 바 있다. 이는 이 장에서의 조기경보신호 탐지 기법이 실제 벌어졌던 일을 탐색하는 것이 아니라, 현재 또는 과거에 벌어졌던 사건보다 상당히 전에 확인할 수 있었던 징후를 포착하는 데 목적이 있기 때문이다. 따

---

117) 주로 교사, 하위직 공무원, 공장 노동자들이 해당한다.

라서 2장에서 확인하였던 각 지표의 시점들은 실제 관련 문제와 관련된 현상이 표면화된 상태로, 조기경보신호 탐지 시점은 그 징후가 “최초”로 포착된 시기라고 이해할 수 있다. 복잡적응계적 관점에서, 조기경보신호는 임계전이현상이 시작되었다는 일종의 징후로써, 그리고 2장에서 확인한 시점은 임계전이현상의 결과 임계점을 넘어간, 창발현상이 일어난 시점으로 이해하는 것이 타당하지 않을까 생각한다.

2장과 부록 2에서 포착된 토지황폐화 취약지는 주로 관서지역으로 한정되어 있다. 조기경보신호로 포착된 토지황폐화 취약지는 관점에 따라 관서, 관북 지역으로 다양하게 포착되었다. 다만 2장에서 확인한 취약지 관련 정보가 주로 “실제 일어난”일에 가깝다고 보았을 때, 조기경보신호로 포착된 관서 지역의 “급격한” 형태의 조기경보신호는 임계전리와 창발현상에 보다 더 가까운 것이라고 해석할 수 있다.

## 2) 토지황폐화와 식량생산 저하 프로세스에 대한 적용방안

조기경보신호의 시점 확인 결과에 따른 북한 토지황폐화와 식량생산량 저하의 프로세스간 시차와 순서는 개념모형의 보완과 구체화에 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 각 요인간의 파급효과가 전달되는지 얼마나 시간이 소요되는지, 그리고 되먹임에 의한 반응이 얼마나 후에 도출되는지를 확인할 수 있는 결과라 할 수 있다.

다만 이는 사후적 관점에서 조기경보신호가 당시 있었는지를 확인하는 연구로서, 이를 바탕으로 모형을 만들어 모의하는 것은 조기경보신호 이후 발생하는 창발현상의 예측불가능성을 여전히 해결할 수 없다는 한계에 여전히 봉착한다. 따라서 수식이나 통계 기반으로 조기경보신호의 시점을 그대로 적용한다면, 실제 현상에 부합하지 않는 결과가 도출될 가능성이 높으며, 이에 대한 대안적 접근이 필요하다.

### 3) 연구에 대한 보완방안

1990년대 대기근의 주요 요인과 북한의 토지황폐화 관련 시공간 자료는 양과 질적으로 모두 부족한 상태로, 추가적인 보완이 요구된다. 2장에서 언급하였듯, 계량화하기 어려운 북한의 정치체제와 관련된 부분과, 주관적 의사결정과 관련된 부분에 대해서 어떻게 계량화하여 분석에 적용할 수 있을지를 검토해 볼 필요가 있다. 이에 대한 후속연구가 진행된다면, 다양한 차원에서 북한 토지황폐화와 1990년대 대기근과 관련한 징후를 분명히 포착할 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

자료가 보완되어 북한의 토지황폐화와 1990년대 대기근에 대한 자료가 충분히 수집된다면, 통합 지표에 대한 조기경보신호 도출이 가능하리라 판단한다. 현재 수준의 자료로서는 자료간의 복잡한 상호작용에 대한 설명이 부족한 상태라 통합된 지표를 만드는 것이 어렵다고 보나, 자료가 보강되거나 복잡성을 충분히 설명한다면 문제를 통합적으로 설명하는 지표를 설정할 수 있을 것으로 보인다. 이 연구 4장에서 기술할 토지황폐화와 대기근 관련 모형에 이 방법을 적용한다면<sup>118)</sup>, 통합적 지표에 대한 대안이 될 수 있을 것으로 기대한다.

또한, 본 방법은 장기생태자료(고생태 자료)와 장기생태모델링에 쓰였던 방법으로, 물론 본 연구처럼 단기간의 위성영상을 이용한 연구에도 쓰인바가 있지만, 유사 연구와 마찬가지로 결과가 잘 도출되지 않거나, 결과가 도출되더라도 해석이 어려운 한계가 있었다. 향후 연구에서는 이에 대한 보완이 필요하다. 이 연구는 빠르면 2000년 전후, 대개는 2010년 전후에 이루어진 연구로 연구기법에 대한 개선과 발전의 여지가 많다고 판단하며 연구의 발전에 따라 지속적으로 보완해나갈 필요가 있다.

---

118) 자세한 내용은 4장에서 다루기로 한다.

## 제 4 장 다행위자시스템 기반 1990년대 북한 대기근 재현모형 개발<sup>119)</sup>

2장에서는 북한의 토지황폐화와 식량생산량 감소 문제의 요인중 핵심적인 요인으로 농업을 위한 사회경제·자연환경의 근본적인 한계와, 이를 극복하기 위한 근시안적 정책인 주체농법을 통한 적극적인 자연개조 노력, 이로 인한 토지황폐화와 식량생산 감소의 악순환 프로세스를 확인하였다. 이러한 프로세스를 계량적 방법으로 구체화, 정교화하고자 하였으나 한계가 있었으며, 특히 인간의 의사결정 과정에 대한 이해 부족과 북한 특유의 자료부족에 기인한 사회시스템의 재현에 어려움이 있었다. 결과적으로는 서론에서 지적한 토지황폐화와 식량생산 감소문제가 가지고있는 복잡응계적 속성에 의해, 관계 파악에 어려움이 있다는 한계를 다시 한번 재확인할 수 있었다.

3장에서 북한의 토지황폐화와 식량생산 감소 문제에 대한 복잡응계적 한계를 극복하기 위한 대안으로서 임계전이에 대한 조기경보신호 포착방법을 적용하였다. 이를 바탕으로 1990년대 북한의 대기근의 조기경보신호가, 토지황폐화와 관련된 지표는 1980년대 초반-1980년대 후반에 도출되었다는 사실을 확인하였다. 그러나 이는 과거의 현상에 대해서 사후적으로 분석하는 형태의 논의일 뿐, 과거에 다른 결정을 하였을 때(what-if) 예방이 가능할지, 미래에 같은 상황이 발생할 수 있을지와 같은 재현가능성 평가와 미래예측에 대한 사용에는 한계가 있다.

이 장에서는 2장과 3장에서 다루었던 1990년대 북한 대기근과 그 원인인 토지황폐화 문제를 재현하는 모형을 개발함으로써, 토지황폐화와 대기근의 재현을 예방하는 방안을 모색하는 것을 목적으로 한다. 그러나 서론

---

119) 이 장의 내용은 수차례 학술대회 발표를 통해서 발전시켜 왔으며, 그 과정 중 일부가 아래 북챗터로 출판된 바 있다 이 장의 내용은 이를 기반으로 수정·보완·발전시킨 내용임을 밝혀 둔다.

An, Y. and Park, S., 2020, An Agent-Based Model for Simulating Land Degradation and Food Shortage in North Korea, 83-100, In : Carmichael, T., and Yang, Z.,(eds.), 2020, *Proceedings of the 2018 Conference of the Computational Social Science Society of the Americas*, Springer.

에서 제기하고 2장에서 재확인하였듯 북한의 토지황폐화와 식량생산 감소 문제는 사회생태시스템의 속성에 기반한 복잡적응계적 연구이며, 그 예측이 어렵다.

다행위자시스템을 이용한 토지이용-토지피복변화 모형(Multi-agent System for Land-Use/Cover Change Modeling, 이하 다행위자시스템 또는 MAS-LUCC)은 기존의 수리적, 통계적 토지이용-토지피복변화 모형이 설명하지 못하는 현실의 복잡성과 불확실성을 해결할 수 있는 모형 기법으로, 최근 다양한 사회생태시스템의 복잡계적 문제를 극복할 수 있는 모형으로 각광받고 있다. 특히, 설정한 모형에 영향을 끼치는 외부환경 요인들을 바탕으로 시나리오를 설정하여 이를 모사할 수 있는 특성을 활용하여, 정책의사결정시스템으로 활용하는 사례가 있다.

이 연구에서는 이러한 다행위자시스템 모형의 강점을 활용하여, 북한의 1990년대 대기근과 토지황폐화 문제에 대한 다행위자시스템 모형을 구축하여, 이 문제들의 재현가능성을 평가하고자 한다. 미래에 대한 예측은 앞서 언급한 대로 어렵지만, 북한의 대기근을 재현한 다행위자시스템에 대해서 만약 다른 대안을 적용했다면 사전예방이 가능했는지에 대해서 시나리오 기반으로 평가한다면, 미래 북한과 한반도의 대기근 재현과 토지황폐화 방지를 위한 예방적 대안을 모색할 수 있을 것이라 기대한다.

4장은 다행위자시스템의 개념과 적용사례에 대한 선행연구를 제시함으로써, 연구에 적당한 다행위자시스템 틀을 제시하는 것을 그 처음으로 한다(1절). 그리고 다행위자시스템 구축을 위한 틀을 마련하기 위해, 2장에서 설계한 북한의 토지황폐화와 식량생산 감소에 대한 개념모형을 바탕으로 북한의 농업경관을 대표하는 “가상의 북한 협동농장 모형을 설계한다(2절). 이를 바탕으로 1990년대 북한의 대기근을 재현할 다행위자시스템의 전체와 그 부속을 설계·구축한다(3절). 그리고 1990년대 북한 대기근을 재현할 수 있는 형태로 조정하고, 시나리오를 통해 대기근 재현방지를 위한 대안을 모색한다(4절).

## 제 1 절 문헌연구

이 절에서는 연구방법론인 다행위자시스템과, 다행위자시스템 방법론 중 이 연구에서 활용한 LUDAS Framework에 대해서 소개하고, 주요 활용 사례들을 소개하기로 한다.

### 1. 다행위자시스템

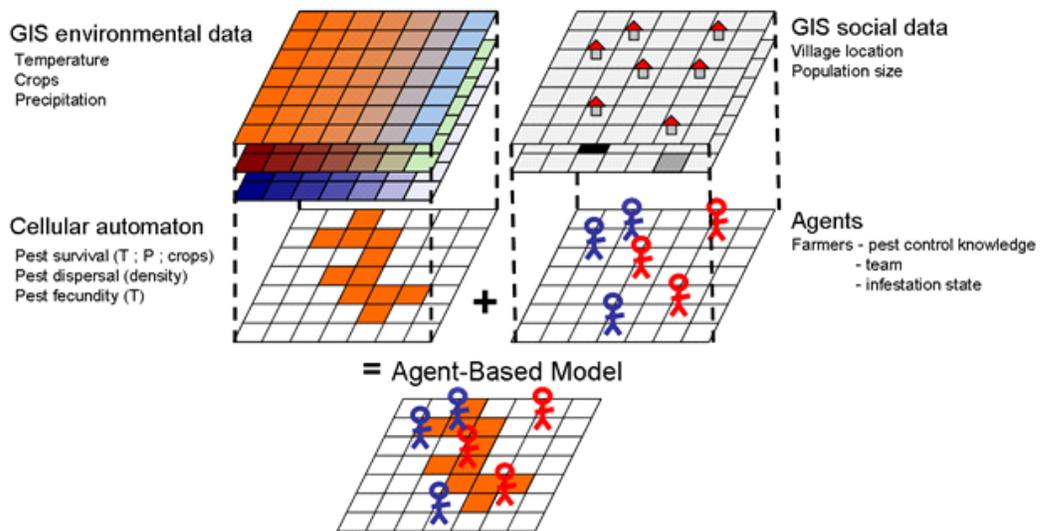


그림 4-1. 다행위자시스템의 모식도

\* 출처 : Rebaudo *et al.*(2011)

토지이용 및 토지피복 변화 모델링(Land-Use and Land-Cover Change Modeling, 이하 LUCC Modeling) 기법은 환경변화에 따른 공간 구조의 변화를 연구하는 방법론 중 토지이용 및 토지피복의 변화를 중심으로 한 방법이다. LUCC Modeling은 사회경제적 변화 및 자연환경의 변화로 인해 발생하는 공간구조 변화의 시·공간적 변화양상과 그 요인을 파악하고자 하는 모델링 기법이다(Veldkamp and Lambin, 2001; Verberg *et al.*, 2004; Lambin and Meyfroidt, 2011). 전통적인 LUCC Modeling은 토지이용변화와 관련된 수식을 이용하거나, 통계자료를 이용하여 변화를 예측하는 등의 방법론이었으나, 현실의 복잡성(complexity)과 비선형성

(nonlinearity)을 반영하지 못한다는 한계가 지적되어 왔다(Parker *et al.*, 2003; Heckbert *et al.*, 2010; An, 2012). 뿐만 아니라, 북한에 대한 정보의 부족은 북한의 토지이용의 시공간적 변화 예측의 불확실성을 증대시키고, 오히려 복잡성을 더 크게 하는 결과를 초래하기 때문에, 북한의 토지이용변화에 대한 연구에는 활용되지 못하여 왔다.

최근에는 기존 LUCC Modeling의 한계를 보완하기 위해 다행위자시스템(Multi-Agent System for Land-Use and Cover Change)<sup>120)</sup> 기법이 활발하게 사용되고 있다(그림 4-1). 다행위자시스템은 행위자와 환경을 정의하고 행위자 간의 상호작용을 구현하는 모형으로, 이를 통해 기존의 모형에서 반영하지 못했던 현실의 복잡성과 비선형성을 반영한다는 장점이 있다(Parker *et al.*, 2003; Moncitino *et al.*, 2007; Le *et al.*, 2008; An, 2012). 특히 통계나 수식기반 모형이 반영하지 못하는 되먹임(dynamic feedback)을 반영하고, 시스템다이나믹스(system dynamics)와 진화모형(evolutionary model)이 다루지 못하는 상호작용을 모사할 수 있으며, 세포자동자(cellular automata)모형이 반영하지 못하는 의사결정요인(adaptive decision-making)을 반영할 수 있다는 강점이 있다(Heckbert *et al.*, 2010). 또한 다행위자시스템은 다른 모형과의 결합·수정이 용이하여 학제간 연구 성과를 종합하는 틀로서 활용할 수 있다는 강점이 있다(Le *et al.*, 2008). 특히 최근에는 정부 및 국제기구의 정책변화에 따라 행위자와 환경의 변화가 어떠한지를 모의하는 공간의사결정지원시스템(Spatial Decision Support System; SDSS)의 실용적 목적으로도 활용되고 있다(Parker *et al.*, 2003; Le *et al.*, 2008; 김동한, 2012; 김동한 등, 2014).

이러한 맥락에서 다행위자시스템은 정보의 부족으로 불확실성과 복잡성이 큰 북한의 공간구조 변화에 대한 연구에, 사회·생태시스템으로서 인간과 자연의 복잡한 상호작용과 관련된 토지황폐화 연구를 위해 충분히 타당한 연구의 도구라 할 수 있다. 다행위자시스템을 토지황폐화 연구에 활용한 사례로 아마존 일대의 산림지황폐화에 대해서 다룬 LUCITA(Lim *et al.*, 2001; Deadman *et al.*, 2004), 미국 중서부의 산림지황폐화에 대해

---

120) 또는 토지이용에 대한 행위자기반모형(Agent-based Model for Land Use Cover Change, ABM-LUCC) 으로사용하기도 한다

서 다룬 LUCIM(Hoffmann *et al.*, 2002; Evans and Kelley, 2004), 주로 동남아시아 일원의 산림지황폐화 문제와 공유자원 관리에 대해서 다룬 CORMAS(Bosquet *et al.*, 1998; Purnomo *et al.*, 2005; Trébuil *et al.*, 2005), 동아시아 전반(베트남, 인도네시아, 중국 내몽골 등)의 토지황폐화와 농업경관에 대한 모형인 LUDAS(Le *et al.*, 2008) 등의 방법론이 있다(안유순, 2013). 이 연구는 그 중에서 최근에 진행되었으며, 동아시아 전반에 걸쳐 활용된 바 있는 LUDAS Framework를 활용하는 것이 타당하다고 판단된다.

식량문제에 관하여서는 주로 과거 기근에 대한 고고학적인 복원 연구가 주를 이룬다. 예를 들어 Dean *et al.*(2000)은 미국 애리조나 주의 Anasazi 문명을 대상으로, Heckbert(2013)는 중남미 유카탄 반도의 고대 마야 문명을 대상으로 기근으로 인한 문명의 붕괴를 다행위자시스템을 이용하여 복원한 바 있다.

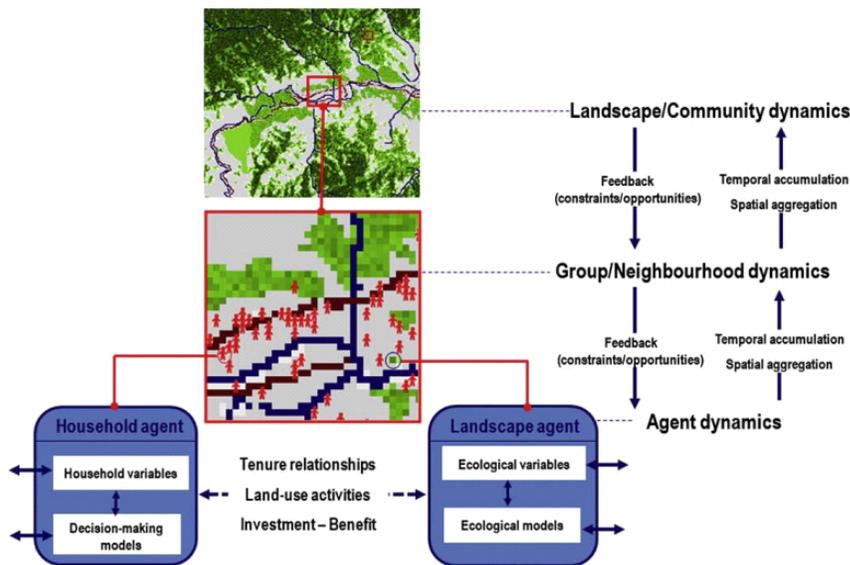


그림 4-2. LUDAS 모형의 구조

\* 출처 : Le *et al.*(2008)

## 2. LUDAS Framework

Le *et al.*(2008; 2010)이 개발한 LUDAS (Land-Use DynAmic Simulator) 모형은 주로 소유역을 대상으로 다양한 농업-산지관리 정책이 지역에 미치는 영향을 모의하는 다행위자시스템이다. LUDAS는 베트남의 홍하(Hong Ha)유역의 마을에서 농업정책 및 토지관리 정책에 따라 사람들이 어떻게 반응하고, 결과적으로 자연환경에 어떠한 파급효과를 끼치는지를 분석하기 위해 개발된 모형이다(Le, 2005; Le *et al.*, 2008; Le *et al.*, 2010). LUDAS는 유사한 다른 다행위자시스템 기반 공간의사결정시스템에 비해서 자연환경 요소와 인간 행위자가 동적으로 상호작용하는 특성을 가지고 있다는 강점이 있어, 인도네시아, 가나, 내몽골 등 다양한 지역에 적용되어 왔다(Le, 2005; Le *et al.*, 2008; Miyasaka *et al.*, 2012).

LUDAS의 구성은 그림 4-2와 같이 크게 네 가지 부분으로 이루어져 있다. 첫째, 행위자와 행위자의 의사결정 체계를 뜻하는 인간시스템(human-system)으로, 모형의 행위자로 선정된 가구(household)의 행위 패턴을 정의하는 시스템이다. 행위자는 세 가지 유형의 집단(논농사기반 가구, 밭농사 및 목축기반 가구, 비 농경 및 부유한 가구)으로 구분되며 각각 다른 특성을 보인다. 행위자는 제한된 합리성<sup>121)</sup>에 따라 토지이용에 관한 의사결정과정을 한다. 둘째, 다양한 속성을 포함하고 있는 각각의 격자로 구성된 자연환경시스템(Landscape System)이다. 특히 LUDAS의 자연환경시스템이 다른 다행위자시스템의 환경 요소와 차별적인 것은 환경에 대한 요소 하나하나 또한 행위자(Agent)로서 기능한다는 점으로, LUDAS의 자연환경 시스템을 구성하는 격자들은 행위자 및 외부 정책요인과 주변 환경에 영향을 받아 동적으로 변화한다(Le, 2005; 안유선, 2013). 셋째, 토지이용선택에 중요한 정책요인이다. 넷째, 가구와 환경, 정책에 대한 정보를 행위자의 토지이용 선택으로 통합하는 의사결정 절차로 구성된다.

---

121) 제한된 합리성은 일부 행위자가 최적의 대안을 선택하지 않고, 가장 좋은 대안을 선택할 가능성이 높다는 것을 의미하며, 따라서 위험성을 포함한다(Le *et al.*, 2008).

### 3. 다행위자시스템과 LUDAS Framework의 한반도 적용사례

#### 1) 다행위자시스템의 한국 적용사례

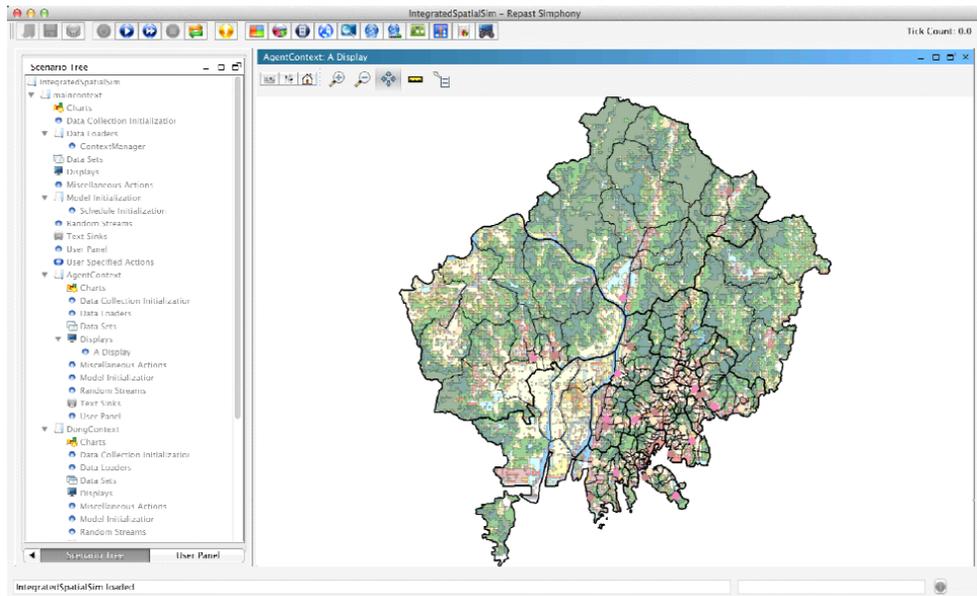


그림 4-3. 도시정책 관련 다행위자시스템 사례

\* 출처 : 김동한 외(2014)

다행위자시스템 방법론은 다양한 분야에서 한국 및 한반도를 대상으로 각 정책의 효과를 평가하는 연구를 중심으로 진행되었다. 대표적으로는 교통, 보건, 도시 분야에서 활용되었다. 교통시스템에 대한 연구로는 극한기 후에 의한 교통시스템 변화에 관한 나유경 등(2012)의 연구와 자율주행차량과 개인용 이동수단(personal mobility)의 확산이 교통에 미치는 영향을 모의한 이종덕 등(2015)의 연구, 유연근무제의 서울 교통의 영향을 모의한 조성진 등(2017)의 연구가 있다. 보건에 관한 연구에는 구제역의 전파·확산과 관련된 Ariuntsetseg·염재홍(2013)과 신혜섭(2014)의 연구, 전상은·신동빈(2018)의 메르스 전파확산 관련 연구가 있다. 도시정책에 관한 연구는 김동한 외(2014)의 연구가 대표적이다. 환경 및 생태계와 관련해서는 드물게 연구가 진행됐으나 최근 Shin and Bithell(2019)과 Shin(2020)과 같이 환경오염(대기오염)과 건강과의 관계를 다행위자시스템을 통해 접

근하는 경우가 다수 있었다. 하지만, 토지황폐화 문제와 같은 한반도의 생태계와 사회생태시스템에 대한 접근은 최근 연구에서도 드문 것이 현실이다.

## 2) LUDAS Framework의 한반도 생태계 적용사례

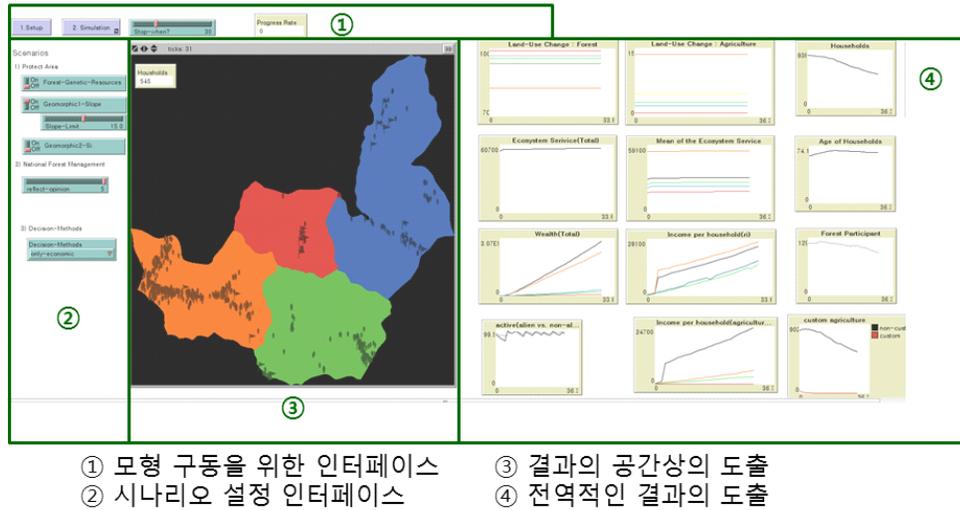


그림 4-4. 강원도 가리왕산 일원의 LUDAS 모형 적용사례

\* 출처 : 박수진 등(2015); 허동숙 등(2016)

한반도 사회생태시스템에 적용한 사례는 앞서 언급하였던 LUDAS Framework을 적용한 연구에서 확인할 수 있다. 박수진 등(2015), 허동숙 등(2016), 안유순 등(2017)의 연구에서는 강원도 평창군 및 정선군 일원에 위치한 가리왕산과 그 주변 일원을 대상으로 LUDAS Framework를 적용하여 산림정책 에 따른 사회생태시스템의 파급효과를 확인하였다(그림 4-4).

박수진 등(2015)은 산림정책 수립에서 주요 갈등과 대립의 요인 중 하나로 제기되는 산림의 보존과 개방 문제에 집중하여, 산림개방의 공간적 범위와 대상, 개방의 형태의 정책변화에 따라 연구지역의 산림생태계와 지역주민의 삶의 변화에 대해 모의하였다. 그 결과 비교적 안전한 지형요소(122)를 가진 산림을 개방하고, 모두에게 개방하기보다는 지역주민을 대상

122) 예를 들면, 낮은 경사도의 경우 일반적으로 산사태 위험이 낮아진다고 볼 수 있다.

으로 산림이용을 개방하며, 산림이용 개방시에는 산림휴양 기능을 강조하면서 산지의 경제적 이용(산림복합경영)을 종합적으로 하는 산림정책이 가장 산림의 생태계서비스 유지와 지역주민의 소득 창출에 도움이 되는 시나리오라고 판단하였다.

허동숙 등(2016)은 앞선 연구보다 미시적인 측면에서 연구를 진행하였다. 지역주민들과의 심층 인터뷰를 통해 공통적으로 요구하는 산림정책 변화 요구사항을 반영하였을 때 산림생태계와 지역주민이 어떠한 변화를 겪을지를 모의하였다. 그 결과 지역주민의 의견을 현재보다 적극적으로 반영하고, 산림개방의 공간적 범위를<sup>123)</sup> 지형(경사도)을 고려하여 다소 완화하는 것이 최적의 시나리오로 선정되었다.

안유순 등(2017)은 연구에서는 허동숙 등(2016)의 연구를 중심으로 모형을 수정·보완하고 시나리오를 구체화하여, 환경적·경제적 지속가능성을 위한 국유림 거버넌스 체계와 관리방안에 대해서 논하였다. 이 지역의 토지 이용은 국유림이 대부분을 차지하고 있으므로, 지역주민에게 있어서 국유림을 어떻게 활용하는지가 중요하다<sup>124)</sup>. 반면에, 이 지역의 국유림은 생태적으로 중요한 지역(산림유전자보호구역, 백두대간보호구역 등)으로 여겨지고 있어 정부 입장에서는 보존이 중요하다. 이러한 지역주민과 정부 당국의 입장 중에서 어떤 것이 지역 주민의 경제적 효용과 국가 전체의 환경적 효용을 모두 극대화할 수 있는지를 확인하였다. 결과는 큰 차이가 없으나, 이 지역에서는 지역주민 중심의 국유림 거버넌스 체제보다는 정부가 중심이 되고 지역주민은 보조적인 역할을 수행하는, 즉 현재 체제에서 크게 벗어나지 않는 국유림 관리체제가 생태적·경제적으로 최적의 거버넌스 체제임이 확인되었다.

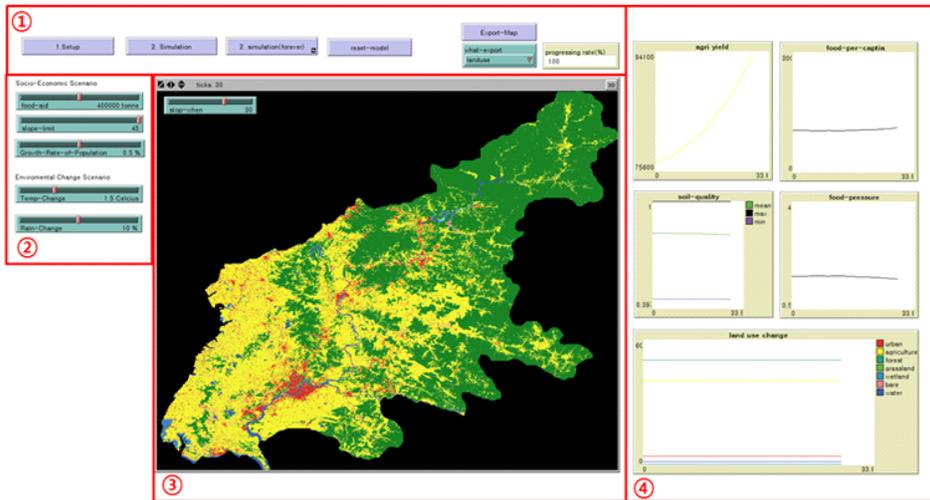
위 연구들은 가리왕산 지역의 특수성이 반영된 소유역 단위의 모형이라

---

123) 산지이용행위에 대한 규제는 대체로 산지의 경사도로 이루어지며, 일예로 15도를 넘어서는 경사도의 산지는 산지전용 행위가 금지되어 있다.

124) 국유림은 말 그대로 국가가 소유한 산림으로 지역주민과는 관계없어 보이나, “산림보호협약”이라는 제도로 이는 연결되어 있다. 국유림의 면적이 높은 강원도에서 정부(산림청)이 산림을 모두 관리한다는 것은 어려운 일이며, 농토가 좁은 연구지역 일대에서는 농업에 의존하여 생계를 이루는 것이 어렵다. 이에 정부에서는 산지관리(산불방지, 산지 불법훼손 감지)와 소출의 10%를 납부하는 것을 대가로, 산림자원(산나물, 잣종실, 고로쇠 수액 등)을 채취하는 허가를 지역주민에게 내 주는데, 이를 위한 협약을 “산림보호협약”이라 한다. 단, 이 지역에서는 다양한 보호지역이 있어 이러한 국유림 이용이 상당히 제한적이다.

는 점에서, 산림정책의 파급효과를 중심으로 관찰하였다는 점에서 북한과 한반도 전체에 대한 의사결정지원시스템 구축의 측면과 맥락을 달리할 수 있다. 하지만 소유역 및 마을 단위의 스케일이 국토이용정책의 파급효과를 개개인의 단위로 볼 수 있는 최적의 스케일이라는 점에서 공간 정책의사결정시스템 구축의 모범이 된다고 볼 수 있다. 뿐만 아니라 지역, 주제를 변경하면 쉽게 다른 지역 및 정책을 대상으로 파급효과에 대한 모의가 가능하다는 강점이 있다. 따라서 북한 및 한반도 전체에 대한 공간의사결정시스템 구축의 틀로서 충분히 활용 가능한 틀이라고 판단된다.



- ① Buttons for Running Model
- ② Options for External Factor
- ③ Spatial Monitor
- ④ Graph

그림 4-5. 안유순(2013)의 북한 평안도 일원 토지황폐화-식량문제 LUDAS 모형 인터페이스

### 3) LUDAS Framework의 북한 적용사례

안유순(2013)은 북한일원의 토지황폐화와 식량문제에 대해 LUDAS Framework을 적용하여 연구를 진행하였다(그림 4-5). 자료의 부족 및 개인의 자유도가 떨어지는 사회주의의 특성을 반영코자, 행위자의 스케일은 종래의 개인 또는 가구 단위에서 각 행정구역 단위로 변경하였으며, 이에 따라 연구 지역도 북한을 대표하는 평양과 그 주변(평안남도)일원으로 한정하였다. 평안남도 일대의 위성영상(MODIS) 및 통계자료를 바탕으로 토지황폐화와-식량 문제에 대한 자연환경시스템을 구축하였다. 행위자의 의사결정시스템은 직접 인터뷰나 구체적인 정보가 없었기 때문에, “식량 압박에 따라 토지이용을 달리 한다는 최소한의 전제를 기반으로 모형을 구축하였다. 가정한 미래환경 변화 요인(정책시나리오)로 북한 내부의 토지황폐화와 식량문제를 해결하려는 정책대안(다락밭 경작제한), 북한 외부의 토지황폐화 저감 및 식량문제 해결을 위한 정책대안(식량지원), 기후변화를 반영하였다.

모의한 결과 북한의 토지황폐화를 저감하고, 식량문제를 완화하기 위해 가장 파급력이 큰 외부환경 요인은 식량지원 시나리오가 가장 컸으며, 기후변화, 다락밭 경작제한이 그 다음 순이었다. 특히 식량지원을 하는 경우 대부분의 경우에서 토지황폐화 취약지의 억제에 큰 영향을 주었다. 또한 특징적인 부분은 이러한 시나리오 특성도 일정 시점(18~20년 경과)가 지나면 효과가 저감되는 현상이 나타났다. 많은 부분에 가정에 기반하였기 때문에 결과 해석에 조심스러운 부분은 있으나 안유순(2013)은 북한이 본질적인 체제 전환을 이루어내지 않으면 여러 가지 저감 노력 또한 소용이 없다는 것을 보여주는 결과라 해석하였다.

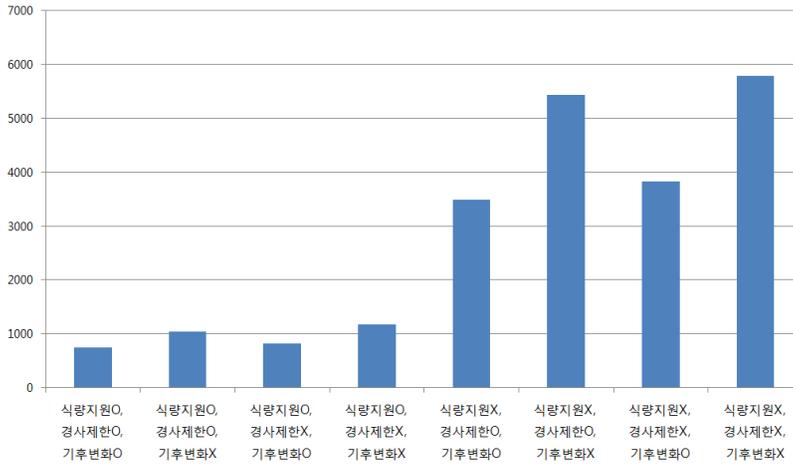


그림 4-6. 북한 평안도 일원 토지황폐화-식량문제 LUDAS 모형 적용결과 중 시나리오별 토지황폐화 취약지의 건수  
\* 출처 : 안유순(2013)

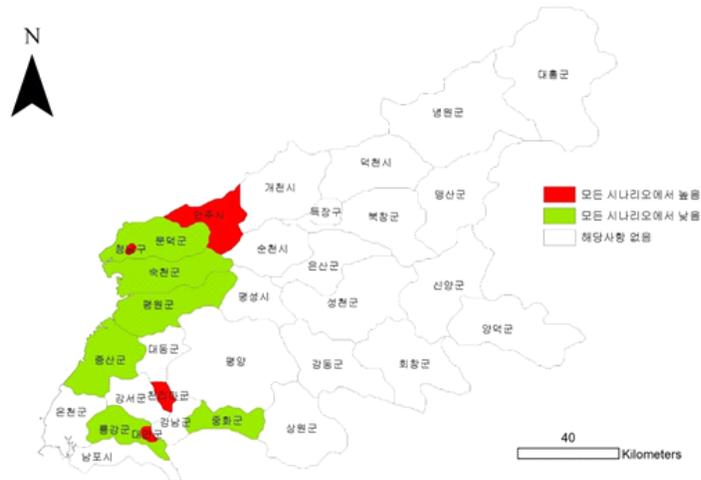


그림 4-7. 북한 평안도 일원 토지황폐화-식량문제 LUDAS 모형 적용결과 중 북한 식량문제 취약지역-양호지역  
\* 출처 : 안유순(2013)

#### 4. 다행위자시스템의 북한 대기근과 토지황폐화 문제 적용방안

표 4-1. 다행위자시스템 연구 적용방안 : 안유순(2013)과 비교

구분	안유순(2013)	이 연구	비고
접근 방법	기술적 접근	설명적 접근	<ul style="list-style-type: none"> <li>현실을 최대한 요약하여 가설에 대한 실험과 검증 목적</li> <li>정책의사결정보다는 가설검증 연구에 가까움</li> </ul>
목적 (개략)	북한 토지황폐화의 미래 경향 탐지	1990년대 북한 대기근 모사 및 재현방지방안 실험	<ul style="list-style-type: none"> <li>북한 대기근을 모사하는 모형을 만들고, 이를 토대로 실험하는 형태로 구성</li> <li>특정 시나리오가 적용되었다면(What-IF) 얼마나 예방할 수 있었을까?</li> </ul>
시점	알 수 없음 (현재와 가까움)	일반적으로 1960-2000년	<ul style="list-style-type: none"> <li>목적과 연관됨</li> </ul>
스케일	거시 스케일 (평안남도)	마을, 소유역 스케일	<ul style="list-style-type: none"> <li>행위자의 상호작용과 의사결정을 모사하기에 적절한 크기로 축소</li> </ul>
행위자	시, 군	개인, 가구	<ul style="list-style-type: none"> <li>스케일의 축소에 따름. 대부분의 농업경관 모형(대부분의 LUDAS)은 가구 단위</li> </ul>
환경 정의	평안남도 및 평양에 대한 모사	북한을 대표하는 가상의 경관 설정	<ul style="list-style-type: none"> <li>평양 일대는 북한의 자원이 집중되는 공간으로 대표성이 있을지에 대한 의심</li> <li>현실 요약의 필요로 실제 환경을 그대로 적용할 필요가 없음</li> <li>세부내용 2절 참조</li> </ul>

안유순(2013)의 연구는 북한에 관한 모형화 연구에서 일반적으로 가지고 있는 자료 부족의 한계를 내포하고 있다. 그러나 자료부족에도 불구하고 LUDAS Framework를 북한에 적용하여 취약지를 도출하고 정책결정자들에게 함의를 제공했다는 점에서 의의를 찾을 수 있다. 자료를 보강하고 공간적 범위와 스케일을 다양화하며, 행위자의 의사결정 행태를 보다 구체화하는 것이 대안이 될 수 있다.

하지만 현재 상황을 고려하였을 때 단기간 내에는 북한에 대한 구체적

인 자료를 구하는 것은 어려운 일이며, 인터뷰 및 행동실험과 같은 행위자의 의사결정 행위를 구체적으로 모사하기 위한 연구를 수행하기는 어렵다. 따라서 이 연구에서는 LUDAS Framework를 기초로 하되, 실증적인 자료기반 접근법과는 다소 접근을 달리하여 연구를 진행하기로 했다(표 4-1).

다행위자시스템에 대한 연구를 분석·정리한 Parker *et al.*(2003)의 구분에 따르면 LUDAS Framework는 현실을 모사한 다행위자시스템의 기술적인 접근(descriptive approach)<sup>125</sup>방식이다. 자료가 부족한 북한에 대해서는 다소 접근을 바꾸어서 현실을 추상적으로 요약하여 설명하고자 하는 부분에 집중하는 설명적 접근(explanatory approaches)<sup>126</sup>으로 전환하였다. 특히 이 연구의 목적이 안유순(2013)과는 달리 1990년대 북한의 대기근을 재현하는 모형을 개발하고 실험을 진행함으로써 대안을 모색하는 것이기 때문에 타당한 접근방식이라고 보았다.

설명적 접근은 현실을 최대한 요약하여, 가설에 대한 실험과 검증에 맞는 것들만 남겨 놓으면 되기 때문에 현실의 조건과 환경을 그대로 모사할 필요가 없었다. 따라서 안유순(2013)이 평양과 평안남도의 경관을 실제로 모사한 것과는 달리, 이 연구에서는 북한을 대표하는 가상의 공간으로 추상화하였으며 크기도 마을 또는 소유역 스케일로 축소하였다. 이에 따라 행위자의 스케일도 안유순(2013)의 시-군 단위에서 LUDAS Framework를 포함한 농업경관 및 토지황폐화 관련 다행위자시스템에서 주로 사용하는 가구 스케일로 전환할 수 있었다.

종합하자면 이 연구는 안유순(2013)의 연구를 구체화하기 위한 접근에서 시작하였지만, 자료의 부족에 대응하고 현실의 모사보다는 토지황폐화와 식량문제의 프로세스에 집중하는 것이 타당하다고 판단하였다. 따라서 북한을 요약하는 접근방식과 연구의 스케일이 달라졌다. 이를 기반으로 이후에는 모형의 개념을 어떻게 잡고, 설계했는지를 다루고자 한다.

---

125) 경험적 사실과 정책요소들을 평가하기 위해 현실세계를 가급적 거의 그대로 모사하고자 하는 다행위자시스템의 접근법을 말한다(Parker *et al.*,2003).

126) 현실을 단순화해서 이론과 가설을 검증하는 것을 목적으로 하는 다행위자시스템의 접근법을 말한다(Parker *et al.*,2003).

## 제 2 절 가상의 북한 협동농장 모형 설계

앞서 언급한대로 이 연구는 1990년 북한 대기근과 북한의 토지황폐화 문제에 대한 설명적 접근법으로서 “사회생태적 실험실(Social-Ecological Laboratory)”의 역할을 할 수 있다. 이를 위해서는 북한 농업경관에 대한 추상화가 필요하며, 이 연구의 목적에 따라 이는 북한의 농업의 환경조건 및 사회생태적 조건을 대표할 수 있어야 한다. 이 연구에서는 북한의 최소 농업 단위이자 행정 단위로서 협동농장에 주목하고, 이를 요약 및 추상화한 “가상의 북한 협동농장 모형”을 1990년대 북한 대기근 문제에 적용하고자 설계를 진행하였다.

### 1. 북한 농업 문제에서의 협동농장의 대표성

2장에서 언급한 대로 북한의 협동농장은 1960년대 전후로 만들어졌으며, 현재까지 유지되고 있다. 북한의 협동농장화는 사회주의권에서도 유래 없는 속도와 방식으로 진행되었으며 그 체제가 독특한 편이다.

협동농장 또는 국영농장체제는 소련을 위시한 현실사회주의권에서 이상적인 농업시스템으로 여겨지고 있으며 대부분의 사회주의체제를 도입했던 국가에서 적용해 보았던 농업시스템이다. 하지만 협동농장체제는 농업생산의 협동화와 공동화를 추구하는 만큼 시스템과 기반을 갖추기 위해서는 많은 유·무형의 자본이 소요되며, 이에 구소련과 동유럽권에서는 물적 기반을 갖추어 둔 다음 협동농장체제로 전환하였으며, 이에도 많은 저항과 어려움이 있었다고 알려져 있다. 북한 또한 해방 후 사회주의 세력이 집권하여, 1946년 토지 개혁과 무상 분배 수행 시 점진적으로 협동농장체제 또는 국영농장으로의 전환을 목표로 하였을 것으로 추정된다. 그러나, 한국전쟁 이후 떨어진 생산성을 집단화로 극복하자는 동기와, 이면적으로 한국전쟁기에 주로 농촌사회에서 체제이탈이 일어났기에 이를 통제해야 한다는 이면이 계기가 되어 협동농장 체제로의 전환이 가속화되고, 서류상으로 1958년, 실질적으로는 1960년 전후에 100% 협동농장으로 전환되었다(남성욱, 2016). 이후 협동농장의 생산성을 개선하기 위한 여러 가지 개혁이 이루어지지만 현재까지도 협동농장 체제의 해체는 이루어지지 않았다.

따라서 북한의 농업경관은 모두 협동농장으로 이루어져 있다. 다시 말해서, 북한을 제외한 다른 나라들의 최소 규모의 농업 경관은 자작농의 농장 경관으로 이루어져 있거나, 자작농·기업농·협동조합 등의 다양한 단위들이 존재하는 반면, 북한은 하나의 일률적인 협동농장 체제로 이루어져 있다고 볼 수 있다. 때문에 북한의 협동농장은 북한의 농업경관을 설명할 수 있는 최소이자 유일한 경관이라고 설명할 수 있다.

북한 협동농장체제는 북한 토지황폐화와 식량생산 감소의 근본 원인이거나, 북한의 토지황폐화-식량문제의 원인을 드러나게 하는(proxy)원인이라 할 수 있다. 이는 북한의 협동농장을 포함하는 사회주의권 협동농장 체제의 특성에서 보이는 문제와 북한의 협동농장의 특수성에서 보이는 문제가 있다.

북한 협동농장을 포함한 사회주의권에서 보이는 협동농장 체제에서의 공통된 문제로 제기되는 것은 의사결정의 경직성 문제이다. 북한의 협동농장, 소련의 콜호스(Kolkhoz, колхоз), 중국의 인민공사(人民公司)의 협동농장 체제는 계획경제 체제의 일부였으며, 중앙 당의 계획에 따라 각 지방당이, 그리고 협동농장으로 이어지는 하향식(top-down)의사결정 체제로, 이에 따라 생산과 수매, 분배 등이 이루어졌다. 특히 북한 협동농장과 중국의 인민공사는 행정구역 단위와 일치하는 속성을 보여, 경제적 단위이자 정치사회적 단위가 되는 속성을 보인다. 일례로 북한의 최소 행정 단위는 “리”로 구성되어 있으며, 이는 남한의 “리”보다는 다소 크고, 북한에는 현재 없어진 “읍”이나 “면”보다는 다소 작은 단위로, 대체로 10개의 자연부락이 합쳐져서 구성되어 있다고 한다(부경생 등, 2001; 남성욱, 2016). 이러한 특성은 농업 의사결정과정에서 농민을 유리시키기 때문에, 현실에 맞지 않는 비효율적 의사결정이 일어나는 원인으로 작용하며, 농민들의 의욕을 저하시키는 문제를 불러왔다.

북한의 협동농장이 가지고 있는 특수성은, 북한의 협동농장은 기본적으로 폐쇄계(closed system)라는 점이다<sup>127)</sup>. 북한은 일반적으로 교통인프라가 열악하다고 알려져 있으며, 때문에 농업물자와 농산물의 이동이 많지 않다고 한다. 특히 북한은 남한보다 산지가 많고 산세가 비교적 험하기 때

---

127) 이 내용은 문헌보다는 주로 북한 농업 관련 연구진과 새터민 인터뷰를 통해 확인한 사실이다.

문에 협동농장의 내-외부의 교통에 제약을 초래하였으며 개선도 어려웠을 것이다. 따라서 평양 주변의 특성화되어있는 일부 전문화된 국영·협동농장을 제외한다면 대부분의 협동농장은 자급자족을 목표로 한 작물 선택과 인프라 구축을 진행하는 것이 일반적이라고 알려져 있다. 결과적으로 지형과 기후의 차이에도 불구하고 북한 협동농장은 대부분 유사한 특성을 가지고 있다는 것이 북한 관련 전문가나 북한의 농업환경을 경험한 새터민들이 가지고 있는 일반적인 인식이다. 결과적으로 이러한 문제는 1980년대 이후 북한 전체의 고립과 폐쇄계로의 이행과 결합하여, 각각의 협동농장이 필요한 자원(에너지)을 공급받지 못하고, 위기에 봉착했을 경우 충분한 지원을 못받게 되는 결과를 초래한 것으로 보인다. 특히 이러한 북한 협동농장의 폐쇄계적 속성과 교류의 부족은, 1990년대 대기근 발생시에 피해의 지역간의 큰 차이로 나타났다고 알려져 있다.

이처럼 북한의 협동농장 체제의 속성은 북한의 농업경관의 유일·최소 단위 경관이고, 그 자체가 북한의 토지황폐화와 식량생산 감소 문제에 있어서 중요한 요인이기 때문에, 북한의 농업 제반 문제와 대기근을 대표할 수 있는 단위이자 경관이라 할 수 있다. 특히 북한의 협동농장 체제는 일부를 제외하고는 서로 교류가 어려운 자급자족을 목표로 한 폐쇄계이기 때문에, 일관된 속성을 가지고 있다고 판단된다. 따라서 각각의 협동농장의 속성과 정보를 구체적으로 파악하고 있지 않더라도, 우리가 알고 있는 수준에서 협동농장의 정보를 요약, 구체화하여 북한을 대표하는 협동농장의 모형을 설계하는 것이 가능할 것으로 판단할 수 있다.

## 2. 가상의 북한 협동농장 모형 정의

북한의 협동농장과 관련된 연구는 수많은 연구에서 수행되어 왔다. 또한 2000년대 남북 농업협력에서의 경험과 농촌 출신 새터민들의 경험을 통해 북한 협동농장에 대한 기록 또한 여러 곳에서 발견할 수 있다. 그러나, 개별적인 협동농장을 모사하는 모형을 구축하기 위해서는 참여관찰 등을 통해 세밀한 정보까지 수집해야 할 필요가 있으나, 이 정도 수준의 자료는 확인하기 어렵다. 그럴 뿐만 아니라, 특정 협동농장에 대한 모형화 연구는 1990년대 대기근과 북한 토지황폐화의 일반속성을 확인하고자 하는 이 연구의 목적에도 부합하지 않다고 판단할 수 있다.

따라서, 이 연구는 북한의 협동농장의 일반특성을 요약, 정리하여 하나의 “가상의 협동농장”을 설계하고, 이에 따라 모형을 구축하고자 하였다. 북한 협동농장에 대한 정보는 부경생 등(2001), 김경량 등(2005), 남성욱(2016) 등의 연구에서 정리하였으며, 북한 농업 전문가와 북한 농업 관련 새터민 대상으로 조연을 받아 조정을 진행하였다. 복잡성이 크거나 정보가 부족한 부분은 최대한 단순화, 추상화하여 설계하였다.

이 연구에서 정의하는 “가상의 협동농장”은 두 가지 차원과 목표로 설계하였다. 첫째, 북한의 농업경관과 토지황폐화와 식량생산 감소를 대표하는 하나의 협동농장이다. 토지황폐화와 식량생산 감소를 경험하는 북한의 협동농장 중 하나라는 인식을 바탕으로 설계함으로써, 정보가 많지 않은 북한의 소규모 스케일에서의 토지황폐화와 식량생산 감소의 사회생태적 프로세스가 어떤 형태로 이루어지는지를 확인하는 도구로 사용하고자 하였다. 둘째, 북한의 전체 농업경관 및 사회구조를 하나의 협동농장으로 압축하는 “요약된 북한(농업경관)”이다. 이를 토대로 거시적인 북한의 토지황폐화와 식량생산 감소 문제를 이해하고자 하였다. 이 두 목표는 서로 모순되는 부분이 존재하지만, 자료의 수준에 따라 “가상의 북한 협동농장”의 세부 구성요소의 정의 시 일부는 북한 협동농장의 일반 속성으로 정의하고, 일부는 북한 전체에 대한 정보를 스케일만 다소 조정하는 형태로 진행할 수 밖에 없었다.

가상의 북한 협동농장에 대한 모식도는 그림 4-8과 같으며, 이를 설명하면 아래와 같다.

## 1) 규모와 크기, 형태

북한 협동농장은 앞서 언급하였듯 리 단위의 행정구역과 일치하며, 지형과 기후 속성에 따라 지형과 기후 조건이 좋은 곳은 500ha정도이며, 좋지 않은 곳은 750ha 내외인 것으로 알려져 있다. 이 연구에서 설정한 가상의 협동농장은 정사각형의 형태로 각 변의 크기는 2.5km, 625ha정도로 설정하였다.

북한 협동농장은 10개 내외의 자연부락으로 이루어져 있다고 알려져 있으며, 규모에 따라 약 300-500호 정도의 인구가 있다고 알려져 있다. 하나의 자연부락은 대체로 하나의 작업반으로 구성되어 있으며, 작업반은 약 30-50호 정도이다. 이 연구에서는 작업반당 40호, 400호 정도의 인구를 설정하였다<sup>128)</sup>.

## 2) 토지피복과 지형, 기타 속성

토지피복은 북한의 일반적인 농업토지이용특성을 반영하였다. 일반적으로 북한의 농업 토지이용은 논이 약 30%, 밭이 약 70%로 알려져 있으며, 이 특성을 반영해 농토 중 논과 밭의 초기조건이 3대 7 정도가 되도록 설정하였다. 그러나 협동농장의 모든 부분을 농지로 설정한다는 것은 이치에 타당하지 않으며, 산지개간 문제를 모형에 반영해야 할 필요가 있어 500ha에 해당하는 토지만 농지로 설정하고, 나머지 125ha정도의 토지는 산지와 거주지로 설정하였다.

앞서 언급한 정사각형 형태의 “가상의 북한 협동농장”설계의 상단부를 북쪽이라고 가정하고, 북쪽부터 산, 거주지, 밭, 논의 순서로 배치하였다. 이는 한반도의 일반적인 농촌 촌락 구성원칙인 배산임수(背山臨水)를 따른다고 생각해 구성한 배치이다. 지형은 토지이용에 따라 최대 경사도 30도

---

128) 이 연구에서는 자료와 자원의 한계로 인하여 “가상의 협동농장” 크기를 하나로 제한하였다. 북한의 협동농장의 현실을 반영하여 북부 산악지대의 크기가 크고 인구가 작은 협동농장, 현재 형태, 해안 평지의 크기가 작으나 인구가 많은 협동농장의 형태로 유형화하고 분류하는 것도 타당하다고 보고 있으며, 이는 추후 연구에 반영할 계획이다.

로 설정하고 산의 고도와 경사도가 높고, 순차적으로 경사가 낮아져, 밭의 경우 경사도 5~10도, 논인 경우 경사도 5도 이하가 되도록 구성하였다. 고도는 가장 하단의 논을 상대고도 0으로 설정하고, 설정한 지형에 맞추어 구성되도록 설정하였다. 결과적으로 스키 슬로프 형태의 단순한 지형으로 구성하였다. 현실을 요약하고자 한다면 분지 형태의 지형이 더 타당할 것으로 판단하고 있지만, 모형이 지나치게 복잡해지는 문제가 있어 이처럼 단순화시켰으며, 현실의 지형 반영과 모사는 이후의 과제로 생각하고 있다.

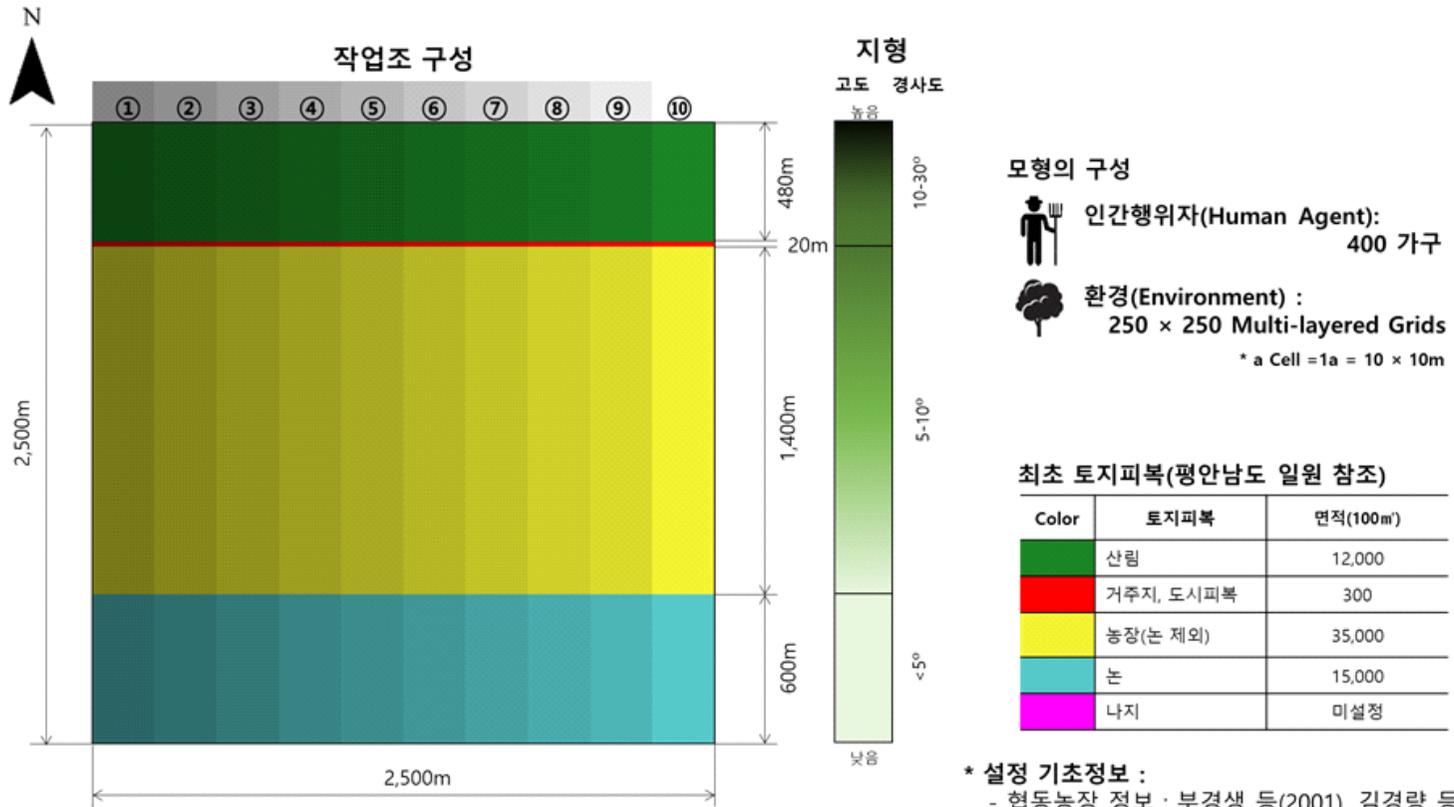


그림 4-8. 가상의 북한 협동농장 모형의 거시적인 구조

### 3. 가상의 북한 협동농장 모형 구성 요소

LUDAS Framework에서는 현실의 농업경관을 환경(자연환경시스템, Landscape-Environmental System 또는 Landscape Agent)과 행위자(인문환경시스템, Human System), 그리고 외부환경요인과 이들 간의 상호작용으로 정의, 요약한다. 앞서의 가상의 북한 협동농장의 기본 정의를 바탕으로 각 요소들을 아래와 같이 정의내렸다.

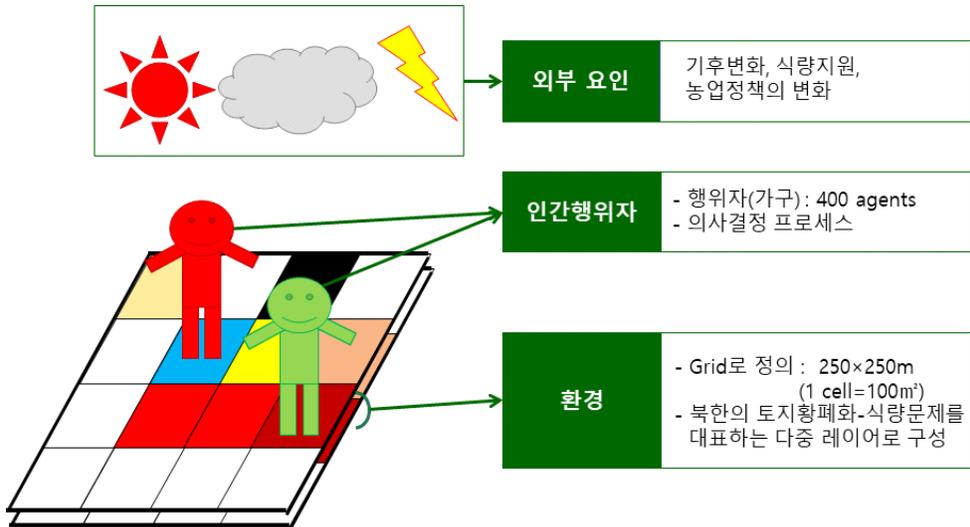


그림 4-9. 가상의 북한 협동농장 모형의 구성 요소

#### 1) 환경

LUDAS Framework에서 환경은 격자(Grid, Raster)로 설정된다. 앞서 “가상의 북한 협동농장”을 각 변이 2.5km인 정사각형 형태로 정의내린 부분에 맞추어, 각 격자 단위는 각 변이 10m, 격자당 100m<sup>2</sup>로 설정하였으며, 각 면당 250개의 격자로 구성된다. 일반적으로 LUDAS Framework를 적용한 연구의 격자 단위는, 연구 자료의 최소 해상도에 따라 결정되었으나<sup>129)</sup>, 이 연구는 “가상의 북한 협동농장”으로 요약 및 추

129) 대개 수치고도모형(DEM)이나 농업경관분석에 많이 활용하는 Landsat TM의 해상도를 고려하여 30m 해상도로 설정하는 경우가 많으나(Le et al..2008; 허동숙 등, 2016; 안유순 등, 2017), 박수진 등(2015)는 MODIS위성영상의 격자를 고려하였기 때문에, 그리고 연구지역이 광범위하여 250m 단위 격자를 설정하였다.

상화 하였기 때문에 이에 구매받을 필요가 없었고, 여건이 허락하는 선에서 자유롭게 설정이 가능했다. 단, 행위자들의 행동 모사를 위해서는 가구당 평균적인 분배 면적으로 예상할 수 있는 1ha(한 면의 크기 100m)보다는 작아야 한다고 판단하였다. 가급적 작을수록 좋겠지만, 격자의 양이 많아지면 그만큼 연산속도는 떨어지며, 각 변의 격자가 1,000개를 넘어가게 되면 동작하지 않는다는 현실적인 문제가 있어서 적당한 크기를 선택할 필요가 있었다. 따라서 1ha의 1/100인 10m(100m<sup>2</sup>, 1a)단위를 선정하는 것이 타당하다고 판단하였다.

환경 격자는 북한의 토지황폐화와 식량생산 감소 문제와 관련된 여러 층위로 정의하였다. 인간에 의한 토지이용변화 층위와 토지황폐화 관련 층위(물리적/화학적 황폐화), 식량생산량 예측과 관련된 층위로 구성된다. 세부적인 내용과 이들의 프로세스에 대해서는 4절에 자세히 설명한다.

## 2) 인간행위자

LUDAS Framework의 일반적인 구성과 “가상의 북한 협동농장”의 정의를 바탕으로 가구를 행위자의 단위로 설계하였으며, 앞서 언급한 대로 400가구를 설정하였다. 하향식인 북한 협동농장의 의사결정 구조에서 각 가구 또는 개인 단위의 의사결정이 존재하느냐는 지적이 있을 수 있다. 그러나 그 전제대로라면 북한의 핵심 계층 또는 당 중앙 이외에는 주체적으로 결정하는 행위자를 찾기 어렵고, 협동농장과 같은 스케일에서 북한을 설명하는 모형을 어떤 방식으로든 만들기 어렵다는 결론에 도달할 수 있다. 그 대신에 하향식과 중앙 계획 중심의 북한 협동농장이라고 하더라도, 최대한 단순한 부분에서 각 가구 또는 개인 단위, 작업반 단위의 의사결정이 어느 정도 존재한다고 판단하고 모형을 설계하였다

북한 협동농장에서 행위자(각 가구)의 의사결정 요인에 대해서 잘 모르기 때문에, 그리고 북한 체제 특성상 행위자들의 행동 양식에는 한계가 있기 때문에 북한 협동농장에서의 의사결정 규칙은 최대한 단순하고 다수가 동의할 수 있는 방식으로 구성하였다. 이 내용은 4절에서 자세히 설명하도록 한다.

### 3) 외부요인과 각 요소들 간의 관계

이 연구에서는 기후변화, 식량지원 여부(외부 관계), 농업정책의 변화를 모형의 외부 요인으로 설정하였다. 각 외부 요인들은 주로 환경과 행위자의 의사결정 규칙에 영향을 주게 된다. 그 외의 요소에 대해서는 앞서 언급한 대로 폐쇄계의 형태로 모형을 설계하였다.

인간행위자와 환경과의 관계는 토지이용과 식량생산을 매개로 관계가 연결된다. 사람들에게 충분한 식량이 공급되지 않으면, 인간행위자들은 토지이용(지목, 노동력)을 변경하고, 이는 다시 환경에 영향을 주는 환류의 형태를 띤다. 자세한 내용은 4장에서 자세히 설명하도록 한다.

### 제 3 절 다행위자시스템 모형의 구축

이 절에서는 앞서 2절에서 제시한 개념 모형인 “가상의 북한 협동농장 모형”을 바탕으로, 북한의 농업경관과 토지황폐화, 1990년대 대기근을 모사하는 다행위자시스템 모형을 구성하고자 한다. 전체적으로 모형이 어떤 형태로 구축되었는지를 설명하고, 각 부속모형을 어떤 형태와 구조로 구축하였는지를 설명하였다. 부속모형의 설명 순서는 모형의 흐름에 따라 환경과 인간행위자, 외부환경 및 정책변수와 결과 도출의 순으로 진행하였다. 3절의 개념모형을 바탕으로 모형을 구축하였으나, 관계성은 2절의 개념모형에 기반을 두었으며, 일부 자료는 외부 문헌 연구에서 반영하였다.

#### 1. 모형의 구성

모형의 흐름은 그림 4-10과 같다. 환경 부속모형은 북한의 토지황폐화 문제를 전반적으로 요약하는 토양속성으로 주로 구성되며, 이는 농업생산량에 영향을 주게 된다. 농업생산량의 변화는 인간의 의사결정과 관련된 인간 행위자 부속모형에 영향을 주고, 인간은 이에 따라 토지이용의 종류와 강도에 영향을 주는 의사결정을 하게 된다. 이는 다시 환경 부속모형에 영향을 주는 환류의 형태를 띄게 된다. 외부 환경은 기후, 외부 식량지원, 정책요소 등으로 다양하게 설정하였다. 모형의 순환 주기는 1년이다.

모형은 다행위자시스템과 행위자기반모형의 전용 프로그래밍 도구이자 개발 환경인 Netlogo 6.0.4를 활용하였다(Wilensky, 1999). 해당 전용 프로그램은 다행위자시스템 개발자 외에도 사용자가 모형을 구동하고 결과를 확인하기 쉽도록 인터페이스(GUI)를 구성할 수 있는 특성이 있다. 모형의 구체적인 코드와 인터페이스는 부록 4를 통해 확인할 수 있다.

부속모형의 설명은 환경 부속모형, 인간 부속모형, 외부환경 순서로 소개한다. 부속모형은 앞서의 “가상의 북한 협동농장”을 기초로, 부족한 부분은 안유순(2013)에서 사용하는 부속 모형을 스케일에 맞게 수정·보완하는 형태로 구성하였다.

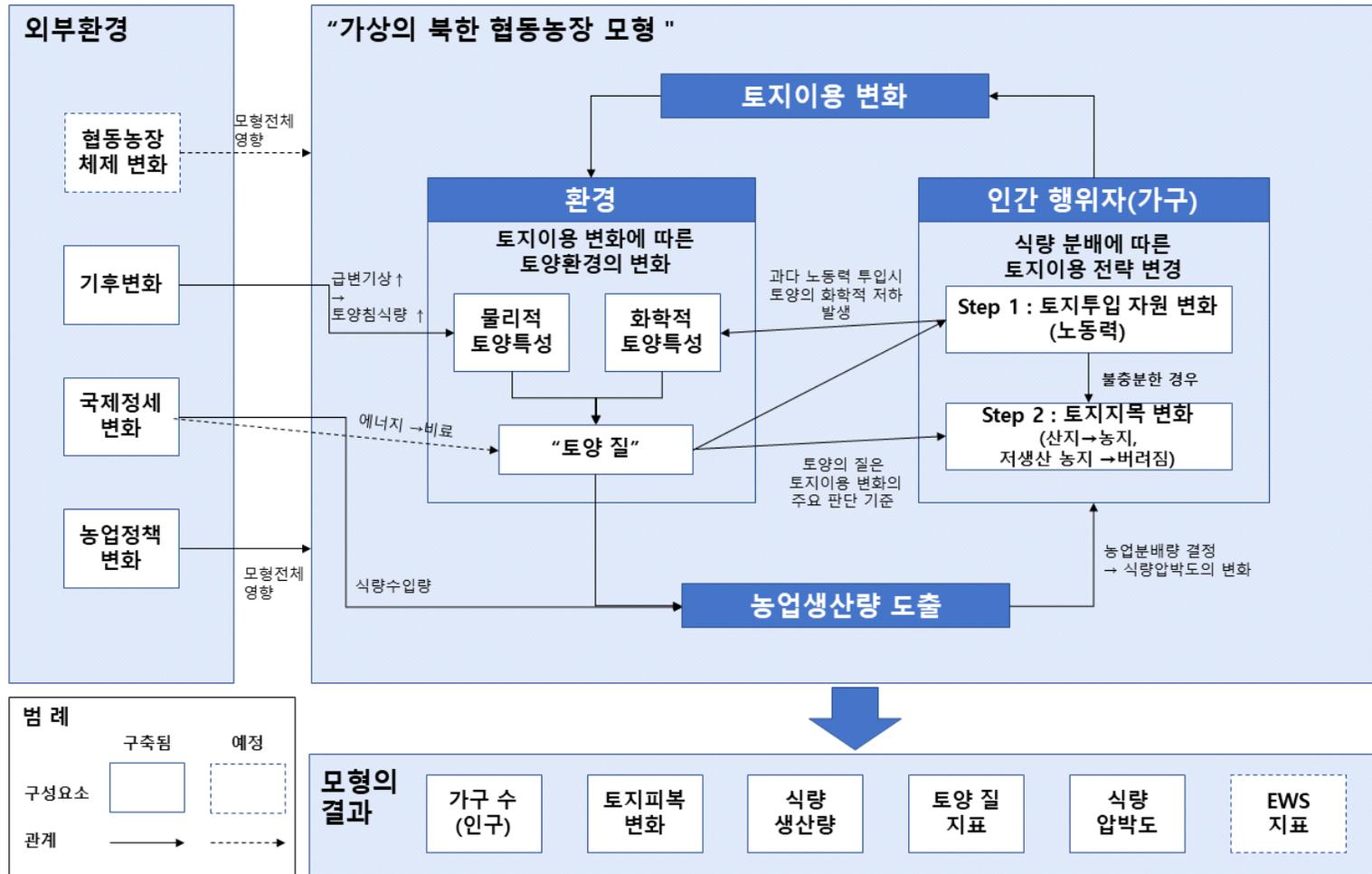


그림 4-10. 모형의 구조와 흐름

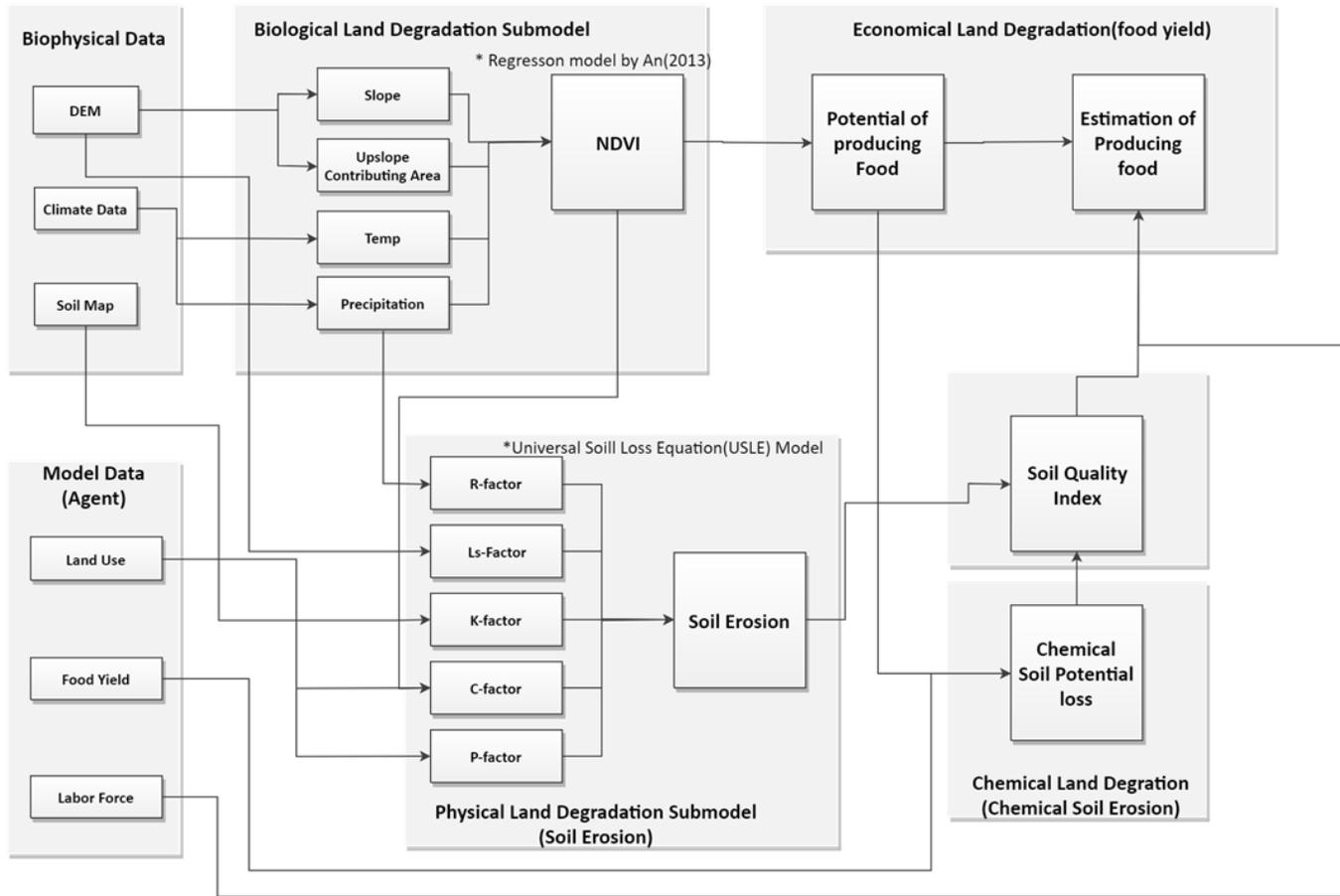


그림 4-11. 환경 부속모형의 세부 부속모형 구성

\* 전체적인 열개는 안유순(2013)을 따르나, 구체적인 구조는 변경된 스케일에 따라 변화하였음

## 2. 환경 부속모형

3절에서 언급하였듯 환경 부속모형은 북한의 토지황폐화와 식량생산 감소 문제의 프로세스를 대표하는 여러 층위의 격자로 구성되어 있다. 각 세부 부속 모형별 층위의 구조는 표 4-2와 같다. 여기서 기초정보(지형)의 경우 개념모형 설계에 따라 경사도를 먼저 구하고, 이를 바탕으로 상대고도를 역으로 구한 후, 사면유역지수, 사면곡면률을 구하는 형태로 구축하였다.

### 1) 환경 부속모형의 속성정보와 층위

표 4-2. 환경 부속모형의 각 층위(layer)구조

구분		층위명	모형 내 코드	
기초정보	환경 기초정보(불변)	고도(m)	p_elevation	
		경사도(도)	p_slope	
		사면유역지수	p_as	
		사면곡면률	p_cur	
	외부환경정보	강우량	p_rainfall	
		평균기온	p_temp	
환경 부속모형 → 인간행위자 부속모형 → 관련	물리적 토양특성 산출모형	토양에 의한 침식인자(K)	p_kfactor	
		강우인자(R)	p_rfactor	
		토지이용 관련인자(C)	p_cfactor	
		지형관련 인자(LS)	p_lsfactor	
		토지이용 관련인자(P)	p_pfactor	
		USLE결과	p_usle	
		USLE결과 점수환산	p_usle_es	
	화학적 토양특성 산출모형	토양의 화학적 질 지표	p_soil-potential	
		토양 질 지표 산출모형	토양의 물리적 질 지표	p_soil-physical-point
			토양 질 지표	p_soil-quality
환경 부속모형 → 인간행위자 부속모형 → 관련	농업생산량 산출모형	식생지수	p_ndvi	
		식량생산잠재력(kg/100m <sup>2</sup> )	p_yield-potential	
		식량생산예측량(kg/100m <sup>2</sup> )	p_yield-estimation	
		식량생산량(kg/100m <sup>2</sup> )	p_yield	

구분		총위명	모형 내 코드
인간행위자 부속모형 → 환경 부속모형 관련	토지이용 변화	토지 투입 노동력(시간/100m <sup>2</sup> )	p_time
		토지 투입 노동력 (각 토지이용별 단위면적당 표준 노동시간=1)	p_labor
		버려진 토지의 경과연수	p_abandon-year
		농업이용 가능 토지 여부	p_agri-usable
		할당된 토지 여부	p_farmer_id
		작업반	p_group
		토지피복	p_cover-type

환경 부속모형은 북한의 토지황폐화 문제를 전반적으로 요약하는 토양 속성으로 구성된다. 크게는 토양의 물리적 토양특성과 화학적 토양특성으로 나뉘며, 이들이 결합하여 토양의 질이 평가되고, 이것이 식량생산량으로 도출되는 흐름으로 구성된다(그림 4-11).

## 2) 물리적 토양특성 산출모형

물리적 토지황폐화 산출모형은 토양침식의 양을 추정하는 모형이다. 이 연구에서는 그 중 가장 유명한 토양침식 모형인 Universal Soil Loss Equation(USLE)을 사용하였다. USLE는 토양침식량을 추정하기 위해 널리 사용되는 경험모형으로, 가장 널리 사용되는 Wischmeier and Smith(1978)의 공식은 아래 식 4-1과 같다.

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (\text{식 4-1})$$

A : 연간 토양 유실량

R : 강수에 의한 침식인자

K : 토양에 의한 침식인자

LS : 지형인자(L : 침식사면길이, S : 침식사면의 경사각)

C : 식생(지표피복)에 의한 침식인자

P : 경지개간 형태에 의한 침식조절인자

표 4-3. 물리적 토양특성 세부 부속모형에서 활용한 USLE 각 지표 계산법

인자	계산방법
강우인자(R)	이민부 등(2003; 2008)의 Toxopeus 공식 이용 $R = 38.5 + 0.35 \times P$ P : 연평균 강우량
토양에 의한 침식인자(K)	산림청 산림입지토양도의 입도정보를 기반으로 서일규 등 (2010)의 방법 이용한 결과에 대해 안유순(2013)이 적용한 평안남도 일대의 데이터 값을 임의로 대입하도록 설계 * 가상의 모형에 "토양정보"가 없음을 고려
토지이용 관련 인자(C,P)	이민부 등(2008), 박찬원 등(2010) 등의 자료를 이용하여 행위자의 토지이용 변화에 따라 바뀌도록 설계 * C-식생, P-경지개간 형태 산지의 C인자는 경우 Van der Knijff <i>et al.</i> , (1999;2000)의 공식 사용 $C = \exp\left(-\alpha \times \frac{NDVI}{\beta - NDVI}\right)$ C : 식생(지표피복)에 의한 침식인자(C) α, β : 경험지수(대개 α와 β는 1로 이 연구에서도 1로 적용)
지형 관련 인자 (LS)	모형에 구현된 지형경사도와 사면유역지수를 기반으로 Van der Knijff <i>et al.</i> , (1999;2000)에서 제시한 공식에 따라 구성 $L = 1.4 \left(\frac{A_s}{22.13}\right)^{0.4} \quad S = \left(\frac{\sin\beta}{0.0896}\right)^{1.3}$ As : 사면유역지수 β : 경사도

표 4-4. 물리적 토양특성 세부 부속모형의 USLE 결과 점수 변환

USLE 결과 (이민부 등, 2003b)	100 이하 (침식이 거의 없음)	100-500 (침식이 일부 발생)	500-1000 (침식이 상당히 발생)	1000이상 (침식이 매우 많이 발생)
물리적 토양 질 지표 (0~0.5, 높을수록 침식이 덜 일어남)	0.5	0.45	0.4	0.35

각 지표에 대한 계산은 표 4-3과 같이 진행하였다. R지표에 의해 강수에 영향을 받으며, LS에 의해 지형에 영향을 받고, 토지이용의 영향은 C와 P로 반영된다. 계산 방식은 안유순(2013)의 방식과 거의 유사하나 스케일의 축소(평안남도→협동농장)와 가상공간 활용 특성상 지형특성을 반영하는 방법을 다소 바꾸었으며, 강우인자와 토양인자의 경우 해당 지역 전반에 걸쳐 동일한 또는 특정 범위에 해당하는 결과가 투여되는 방식으로 변경되었다.

물리적 토양특성 모형의 결과는 표 4-4와 같이 변환하여 토양 질 지표에

반영하였다. 물리적 토양특성이 양호한(침식이 거의 일어나지 않는) 경우 0.5점을 부여하였고, 매우 많이 발생하는 경우에도 0.35점을 부여하였다.

### 3) 화학적 토양특성 산출모형

화학적 토양특성에 대해서 구체적으로 확인하기 위해서는 현장 연구가 필요하겠으나 현실적으로 불가능하며, 물리적 토양특성과는 달리 잘 알려진 모형이 존재하지 않다. 따라서 부득이 가정에 기반한 모형을 활용할 수밖에 없었다. 앞서 언급한대로 안유순(2013)의 방법을 활용하였다.

화학적 토양특성 세부 부속모형은 인간의 의사결정에 따라 토지에 노동력이 얼마나 투입되는지에 따라 바뀌도록 설계되었다. 즉, 인간이 토지에 더 많은 노동력과 에너지를 투입하여 토양잠재력보다 더 많은 식량생산을 하게 되면, 토질이 그만큼 떨어진다는 가정에 바탕을 두었다. 세부적인 공식은 식 4-2와 같다.

$$F_{yield} > F_{yield-potential}, \text{ 라면, } Sc_1 = Sc_0 - \alpha \frac{F_{yield}}{F_{yield-potential}} \quad (\text{식 4-2})$$

그렇지 않으면  $Sc_1 = Sc_0$

$Sc_1$  : 금년의 화학적 토양 질 지표

$Sc_0$  : 전년의 화학적 토양 질 지표

$F_{yield}$  : 금년의 식량생산량

$F_{yield-potential}$  : 금년의 토지의 식량생산 잠재력

$\alpha$  : 상수(1 부여)

### 4) 토양 질 지표와 농업생산량 산출모형

앞서 물리적 토양특성 세부 부속모형과 화학적 토양특성 세부 부속모형은 각각 0.5점 만점으로 구성된다. 이를 합산한 값이 북한의 토양특성과 토지황폐화의 현황을 확인하는 토양 질 지표(soil-quality index)이라고 가정하고 모형에 활용하였으며, 모형의 결과를 나타내는 지표로도 활용하였다(안유순, 2013)<sup>130)</sup>.

130) 토양 질이 낮은 경우, 휴경(농지→나지)을 통해 화학적 잠재력이 회복된다는 것만 가

2장에서 소개한 알려져 있는 북한의 단위면적당 식량생산 예측모형모형의 각 환경의 지형, 기후, 환경조건에 따른 식량생산 예측량은 “농업생산 잠재력”이라 가정하고, 이를 모형에 반영하였다. 현재는 홍석영 등(2009)의 방식을 활용한 안유순(2013)의 공식을 활용하였다(표 4-4). 좀 더 설명력이 높은 모형으로 대체하고자 분석을 진행하였으나, 현재는 안유순(2013)의 결과를 대체할 만큼의 분석 결과가 나오지 않아 이를 그대로 활용하였다(세부내용 2장 참조).

표 4-5. 농업생산잠재력 모형(식생지수를 활용한 농업생산량 예측모형)

작물	공식	R <sup>2</sup>
쌀 생산잠재력	$F_{\text{yield-potential}} = 1137.209\text{NDVI} - 601.416$	.449
밭작물 생산잠재력	$F_{\text{yield-potential}} = 0.66\text{NDVI} + 0.641$	.555

\* 세부 내용 2장 참조

표 4-6. 토지이용별 식생지수 예측 모형

토지이용	공식	R <sup>2</sup>
논	$\text{NDVI} = \ln(1.464 - 0.019 \ln S - 0.026 \ln E + 0.215 \ln R - 0.023T)$	.158
밭	$\text{NDVI} = \ln(2.115 + 0.005S - 0.01 \ln A_s + 0.02 \ln E + 0.002T)$	.142
산림	$\text{NDVI} = ((7111.178 - 30.361 \log A_s + 8.3839 \ln S + 213.554 \ln E + 36.004T - 1.107R))$	.289

\* 세부 내용 2장 참조

농업생산잠재력 모형에서 사용하는 식생지수(NDVI)는 위성영상을 통해 구하는 지표로 모형에 활용하기 위해서는 다른 자연환경자료와의 관계식이 필요하다. 이러한 목적에 따라 안유순(2013)은 북한 전역을 대상으로 논, 밭, 산림으로 구분하고, 그 지역마다 식생지수와 다른 환경자료와의 관계식을 도출하였다. 이는 표 4-6과 같다. 이 부분 또한 보완을 위한 분석을 진행하였으나, 결과적으로 안유순(2013)이 도출한 결과가 가장 타당하다고 판단하였다(세부내용 2장 참조).

농업생산잠재력 도출을 위한 예측식(표 4-4)과 이를 위한 식생지수 예측

정하였다. 에너지(비료)를 투입하는 경우에도 마찬가지로 효과가 있겠으나, 현재 수준에서 합리적인 방법으로 이를 반영하는 방법을 찾지 못했다.

식(표 4-5)이 가지고 있는 한계와 현실에서 발생하는 임의성을 고려하여 식 4-3 수식과 같은 형태로 변형하였다.

$$\begin{aligned}
 Y_m &= Y_{estimate} + Y_{random} && \text{(식 4-3)} \\
 Y_{estimate} &= Y_{equation} \times R^2 \\
 Y_{random} &= \xi \times (1 - R^2)
 \end{aligned}$$

$Y_m$  : 각 산출모형(농업생산잠재력, 식생지수)의 최종 결과

$Y_{estimate}$  : 각 산출모형의 설명력에 해당하는 부분

$Y_{equation}$  : 각 산출모형의 예측식으로 계산한 값

$R^2$  : 각 산출모형 예측식의 설명력

$Y_{random}$  : 각 산출모형의 설명력이 미치지 않는 임의의 부분

$\xi$  : 각 산출모형이 도출될 수 있는 범위에서 추출된 임의의 수

표 4-4와 4-5의 각 수식들에 의해 도출된 결과는 모형에 설명력( $R^2$ )만큼만 반영되고( $Y_{estimate}$ ), 설명력에 해당하지 않는 부분( $1-R^2$ )은 해당 지표가 나타날 수 있는 범위의 값 중 임의의 수가 도출되도록 설계하였다( $Y_{random}$ ). 그 결과( $Y_m$ )는 이 둘의 합으로 계산되도록 하였다.

기존 북한 단위면적당 식량생산 예측모형은 미시적인 차원의 노동력 투입, 에너지자원 투입 등이 반영되지 못하였음을 고려하여, 모형을 보완하려고 하였지만, 유의미한 결과가 도출되지 않았다(2장 참조). 이에 안유순(2013)이 동일 목적으로 활용한 가정에 기반을 둔 농업생산량 산출모형을 사용하였으며, 그 내용은 아래 식 4-4과 같다.

$$\begin{aligned}
 F_i^{yield} &= \alpha F_i^{yield-potential} \times \beta SQ_i \times \gamma L_i && \text{(식 4-4)} \\
 L_i &= \frac{LT_i}{LT_{reference}}
 \end{aligned}$$

$F_i^{yield}$  : i 토지의 식량생산 추정치

$F_i^{yield-potential}$  : i 토지의 식량생산 잠재력

$SQ_i$  : i 토지의 토양 질 지표(최대치 1)

$L_i$  : i 토지의 노동력 투입 지수(단, 2는 넘지 않도록 설계)

$\alpha, \beta, \gamma$ : 가중치(현재 모두 1 부여)

$LT_i$  :  $i$  토지의 노동력 투입 시간

$LT_{reference}$  :  $i$  토지의 작물(토지피복)별 토지의 연 기준 노동 시간

이 공식은 토지의 식량생산이 각 지목(작목)별 기본적 생산능력 ( $F_{\text{yield-potential}}$ ) 뿐만 아니라, 토양 질( $SQ_i$ )과 노동력 투입( $L_i$ )에 비례하여 변화한다는 것을 전제하였다. 여기서 노동력 투입 지수는 인간 행위자의 의사결정 결과를 반영하는 것으로서, 각 작물(토지피복)당 평균 노동시간 ( $LT_{reference}$ )과 실제 해당 토지에 투입된 노동시간( $LT_i$ )의 비율을 계산하여 도출된다. 예를 들어, 행위자가 평균보다 많은 노동시간을 투입하면, 노동력 투입 지수는 1이 넘게 되고, 적게 투입하면 1 이하가 되어 식량생산량에 영향을 미치게 된다<sup>131</sup>). 자세한 내용은 인간행위자의 의사결정 모형에서 설명하기로 한다. 물론, 각 요소들이 어느 정도의 가중치로, 어느 정도의 수준(기울기)로 식량생산에 영향을 끼치는지는 알려져있지 않지만, 모두 동등하다( $\alpha, \beta, \gamma$  모두 1)고 가정하고 모형을 구축하였다.

---

131) 예를 들어 2000년 남한 특정 논에 대한 지수를 계산한다고 하면, 먼저 평균 노동시간 ( $LT_{reference}$ )는 100m<sup>2</sup>당 연간 3시간 내외다. 해당 토지에 3시간을 투자하면, 토지의 노동력 투입 지수는 1이 되고, 4시간을 투자하여 소출을 늘리고자 하면, 토지의 노동력 투입 지수는 1.33이 되며, 만약 2시간으로 줄였다면 노동력 투입 지수는 0.66이 된다.

### 3. 인간행위자 부속모형

인간행위자 부속모형은 환경의 영향으로 바뀐 농업생산성에 따라 사람들의 사고가 어떻게 바뀌고, 어떻게 의사결정을 해서 토지이용과 환경을 바꾸는지에 대해서 모사하는 모형이다. 크게 농업생산량의 분배모형과 의사결정 모형으로 나눌 수 있으며, 인간행위자의 속성정보를 어떻게 설명했는지를 먼저 설명하고 부속모형에 대해서 설명하고자 한다.

#### 1) 인간행위자의 속성정보

인간행위자 부속모형의 속성정보는 인간행위자로 정의된 가구가 가지고 있는 기초적인 속성 및 모형이 구동됨에 따라 환경과의 상호작용을 통해 변경되는 속성으로 구성된다(표 4-7). 최초 모의 설정시 인간행위자의 기초정보가 설정된다. 먼저 가구의 인구 구성은 4명 또는 5명 중 임의의 값으로 지정되도록 설계하였다<sup>132)</sup>. 세부적으로는 가구의 형태를 노동가능인구 2명과 부양가족(아동, 노인) 2~3명이 되도록 설계하였다<sup>133)</sup>. 작업반 설정과 가구의 모형내 위치는 일률적으로 설정하였다.

인간행위자는 앞서 언급한 대로 400가구가 모형 내에 설정된다. 가구의 증가나 가구 내 구성원의 증가는 고려하지 않았다<sup>134)</sup>. 단, 행위자 가구가 극심한 배고픔을 느끼는 경우 모형에서 제거가 되도록 설계하였다<sup>135)</sup><sup>136)</sup>.

---

132) 남민지(2010)가 정리한 유엔인구기금(UNFPA)의 2008년 북한 인구센서스 자료에 의하면, 북한의 가구당 인구수는 약 3.9명이다. 이에 따르면 3-5명으로 지정하는 것이 타당할 것으로 보이나, 본 모형은 1인가구 또는 소가족이 많을 것으로 예상되는 도시 지역을 제외한 조사이고, 대기근이 발생하기 이전 시기를 모사하는 모형(이 시기에 대한 인구센서스 자료는 확인하기 어려움)이기 때문에 이보다 다소 더 많을 거라고 판단하여, 가구당 4-5명으로 설정하였다..

133) 실제로는 가구의 인구 구성 방식에는 확대가족, 핵가족, 1인가족 등 다양한 형태가 있겠으나, 모형의 복잡성을 고려하여 최대한 단순하게 구성하였다.

134) Worldbank에 따르면, 북한의 인구성장률은 최근(2010년 이후) 0.5%내외로 낮은 수준이지만, 그 이전에는 1.5%(1990년대)-2.5%(1960-70년대) 수준이다. 이는 무시할 수 없는 수준이며, 최근의 수치라도 장기 관찰시 무시 못 할 인구의 변화가 예상된다. 단, 본 모형이 “북한의 농업경관”만을 다루었다는 점에서, 그리고 지역 간 인구이동에 대한 정보가 적고 이를 반영하기 어렵다는 점에서, 그리고 현재 수준에서도 높은 임의성에 추가적인 임의성을 반영하는 것에 대한 어려움을 고려하여, 반영하지 않는 것이 타당하다고 보았다. 이후 장기예측 모형으로 전환하거나, 고령화나 도시화 같은 요소를 반영할 때 반영여부를 검토할 필요가 있다.

135) 이는 기근을 이기지 못해서 협동농장 체제를 떠난다는 것을 의미한다. 이는 모형의 전체적인 구동 측면에서도 의미가 있으며 세부 내용은 4장 4.를 참고하기 바란다.

136) 분명한 기준이 없어, 여러 차례의 시험 모의를 통해 “가구의 식량압박도가 4 이상인 경우가 3년 연속해서 이루어지는 경우”라고 임의로 정의하였다.

표 4-7. 인간행위자 부속모형에서의 행위자의 속성정보

구분		속성정보명	모형 내 코드
기초정보		가구의 구성원 수	h_people
		가구의 노동가능인원	h_labor_pop
		가구의 비농업인원	h_non_labor_pop
		가구의 모형내 위치	h_xcor
			h_ycor
작업반	h_group		
의사결정의 요인	식량의 분배 관련	가구의 총 생산량	h_yield
		가구의 총 생산량 중 국가와 협동농장 점유 부분	h_yield_gov
		가구의 총 생산량 중 분배분	h_yield_mine
		가구의 식량 지원량	h_food_gov
		가구의 총 식량	h_food
		1인당 식량 분배량	h_food-houshold
		가구의 식량압박도	h_food-pressure
행위자 의사결정 (토지이용 변경) 관련	노동전략 변경	노동시간	h_time
		회수 노동력	h_redundancy
	행위자의 이탈(제거) 관련 정보	배고픔을 느끼게 되는 경과 시기	h_hunger-time
		가구가 배고픔을 느끼는지 여부( $h\_food\_pressure > 4$ )	h_hunger

## 2) 식량의 분배

농업생산량 분배구조는 북한의 협동농장 분배구조에 대해서 세부적으로 조사한 김영훈 등(2001)의 연구와, 이를 기반으로 일부 보완·정리한 남성욱(2016)의 연구를 따랐다. 전체적인 구조는 표 4-8과 같다.

표 4-8. 북한 협동농장의 일반적인 분배구조

분배서열 높음 ←		협동농장분			→ 낮음
국가 수매분(생산량의 20%)	생산시설 이용료, 관개사용료, 농기계 작업료 등 (수확량의 30-40%)	공동기금 문화, 후생시설 유지비 (순수입의 20-30%→수확량 의 8-15%)	생산물 분배분 (기본)	생산물 분배분 (초과소득)	
	생산비	공동기금	분배총량	우대기금	
총수입					
우대기금 생성 범위(90%)					
할당량(100%)					
* 생산량 미달시 생산물 분배분을 공제					

\* 남성욱(2016)의 내용을 김영훈 등(2001)을 참고하여 수정

각 개인별 분배구조는 작업반우대제하 기본분배(1960~)을 따랐으며, 각 가구당 연간 노동량을 기반으로 분배하는 형태로 구성하였다. 세부적인 내용은 식 4-5와 같다.

$$W_i = D_i \times T_p / \sum D_f \quad (\text{식 4-5})$$

$W_i$  : i 가구 분배몫

$T_p$  : 분배총량(총수입-생산비-공동기금-우대기금)

$D_i$  : i 가구 노동일수

$\sum D_f$  : 농장 총노동일수

그 외 작업반우대제에서는 할당의 90%를 초과한 작업반을 대상으로 보상을 시행하나, 시험 구동 결과 구현 여부가 모형 결과에 큰 영향을 끼치지 않아 반영하지 않았다. 또한 인센티브를 구현하는 경우 이에 기준이 되는 할당량의 의사결정과정을 모사해야 하는데, 이 부분에 임의성이 상당히 반영하지 못했다.

외부환경 모형에서의 식량지원 또는 수입량 또한 생산량의 일부로 포함하여 투입되는 것으로 하였다. 토지배분은 각 작업조 당 가구의 노동인구에 따라 평등하게 분배되는 것으로 설정하였다.

### 3) 의사결정과 토지이용의 변경

다른 행위자기반모형과 달리 이 모형에서는 관련 행위자들에 대한 직접적인 참여관찰이나 인터뷰가 불가능하기 때문에 “인간 행위자가 식량을 필요로 한다면, 그들은 노동력 투입 전략을 바꾸거나 토지이용을 바꾼다”라고 하는 최소한의 전제를 바탕으로 모형을 구축할 수 밖에 없었다.

위 절차를 통해 행위자들은 식량을 분배받게 된 결과에 따라 행위자들은 아래와 같은 식량압박도를 각자 계산하게 된다. 이는 안유순(2013)의 방법과 같으며 식 4-6과 같다.

$$AF_{pressure} = \frac{Pop \times Fl}{AF_{yield} + AF_{aid}} \quad (\text{식 4-6})$$

$AF_{pressure}$  : A행위자의 식량압박도

$AF_{yield}$  : 행위자 경작 토지의 소출 중 분배분

$AF_{aid}$  : 외부 수입(지원)식량 중 행위자 분배분

Pop : 행위자의 부양 인구

Fl : 1인당 연간 식량 최소 요구량, 김연철(1997)의 UN이 정한 1인당 하루 최소 식량 권장량인 450g에 1년을 곱한 값

이 모형에 따르면 식량압박도가 1이 넘으면 1인당 연간 최소요구치에 못미치는 식량을 수확할 것이라고 예상할 수 있다. 행위자들은 각자 배분 받은 식량에 따라 식량압박도를 느끼게 되고, 이에 따라 노동전략을 바꾸게 된다. 먼저 토지투입 자원을 변화하게 되고(“노동력 배분 모형”), 그 다음으로 토지지목을 변화(“토지피복 변화 모형”)하게 된다<sup>137)</sup>.

#### (1) Step 1 : 노동력 배분모형

노동력 배분모형은 식량압박도에 따라 행위자가 배분받은 토지에 투자

137) 실제 현실에서는 이 둘의 순서가 분명하게 나타나지 않을 것이다. 하지만, 북한의 협동농장에서는 하향식, 권위적인 의사결정으로 각 가구들의 의사결정에 제약이 있을 것이기 때문에, 소극적인 행동을 우선적으로 수행하고, 그 이후 적극적인 행동을 수행한다고 가정하였다. 구체적으로는, 비교적 소극적인 행동(노동강도, 노동력의 변화)를 먼저 수행하고, 그럼에도 불구하고 배고픔을 해소할 수 없을 때 토지이용의 변화 행동을 수행한다고 가정하였다.

하는 노동강도(노동시간 또는 비중)를 조정함으로써, 식량생산량을 늘리고 자 하는 전략을 모사한 모형을 말한다. 이는 토지의 노동력 투입이 늘어날 수록, 그에 비례해서 농업생산량이 증가한다는 전제에 기반한다. 단, 앞서 환경모형에서 가정하였듯, 일정량 이상(단위 1 이상)의 노동력을 투입할 경우, 토지의 화학적 잠재력이 떨어지도록 설계되어 있다.

노동력 배분 모형은 세 가지의 단계가 있다. 첫째, 노동시간의 기본 배분 단계이다. 행위자들은 자신이 배분받은 토지를 대상으로, 기본 노동 시간을 각 토지별로 할당한다. 이 단계는 유일하게 식량압박도가 1이 넘지 않아도 시행하는 단계다. 이를 위해 행위자는 배분받은 농지를 토양 질 지표의 순서대로 배열하고, 토양 질 지표가 높은 순서대로 각 작물(토지피복)에 해당하는 연 평균 노동시간(식량생산량 예측모형의  $LT_{reference}$ 에 해당)<sup>138)</sup>만큼 노동시간을 투입한다. 둘째, 노동력의 회수 단계이다. 식량압박도가 1을 넘으면, 행위자는 “행위자 노동력 재배분의 기준”에 따라 토양 질 지표(SQi)가 떨어지는 토지의 노동력을 회수한다. 셋째, 노동력의 추가 부여 단계이다. 앞선 단계의 절차에 따라 잉여 노동력을 가지게 된 행위자는, “행위자 노동력 재배분의 기준”에 따라 토양 질 지표(SQi)가 높은 토지에 잉여 노동력을 추가 투입한다.

“행위자 노동력 재배분의 기준”은 표 4-9와 같다. 토양 질 지표와 행동 방식에는 적절한 정도의 임의성을 부여하여, 행위자의 제한된 합리성을 모사하고자 하였다.

표 4-9. 행위자 노동력 재배분의 기준

행동구분	기준	행동방식
노동력 회수	$SQ_i < 0.5 \pm 0.05$ $F_{yield-potential} \leq 0$	노동시간 전체 삭감(토지 포기)
	$0.5 \pm 0.05 \leq SQ_i < 0.6 \pm 0.05$	노동시간 20±5% 삭감
	$0.6 \pm 0.05 \leq SQ_i < 0.7 \pm 0.05$	노동시간 10±5% 삭감
아무 행동 안함	$0.7 \pm 0.05 \leq SQ_i < 0.9 \pm 0.05$	-
노동력 추가 부여	$0.9 \pm 0.05 \leq SQ_i$	노동시간 20±5% 추가 부여

\* 주 : SQi - 토양 질 지표  $F_{yield-potential}$  - 식량 생산 잠재력

\* 안유순(2013)의 방식을 바뀐 노동시간의 기준에 따라 변경하여 사용

138) 행위자들의 행동의 임의성 및 모형의 동적 요소를 반영하기 위해 1-2시간 내외로 임의조정되도록 설계하였다.

## (2) Step 2 : 토지피복 변화 모형

토지피복 변화 모형은 노동력 배분모형과 마찬가지로 행위자가 의사결정을 하는 절차 중에 하나이며, 앞선 단계와 마찬가지로 식량압박도가 1 이상인 경우에만 작동하고, 앞선 단계인 노동력 배분모형에서 배분되지 않은 잉여 노동력을 활용하여 토지피복에 변화를 준다.

토지피복 변화 방식은 안유순(2013)의 방식과 동일하며, 농지가 아닌 토지를 개간하거나, 노동력이 완전히 박탈된 토지를 나지로 바꾸거나, 기후 및 지형조건에 따라 농지를 논으로 이용할지 밭으로 이용할지를 결정한다. 농지 개간 프로세스에서 주요한 고려사항은 토양 질 지표와 토지이용 제한 시나리오이다. 행위자는 농지 개간을 할 때 토양 질 지표가 0.5 이상인 토양만 선택하며, 제한된 경사도 이내의 토양만 선택하여 개간한다(그림 4-12).

농지 개간 프로세스 이외에도 노동력이 완전히 박탈된 토지는 버려졌다고 판단해서 토지이용 변화 모형에서 나지로 변경된다. 또한 기후변화와 지형조건을 고려하여 농지를 논으로 이용할지 밭으로 이용할지도 이 모형에서 변경된다.

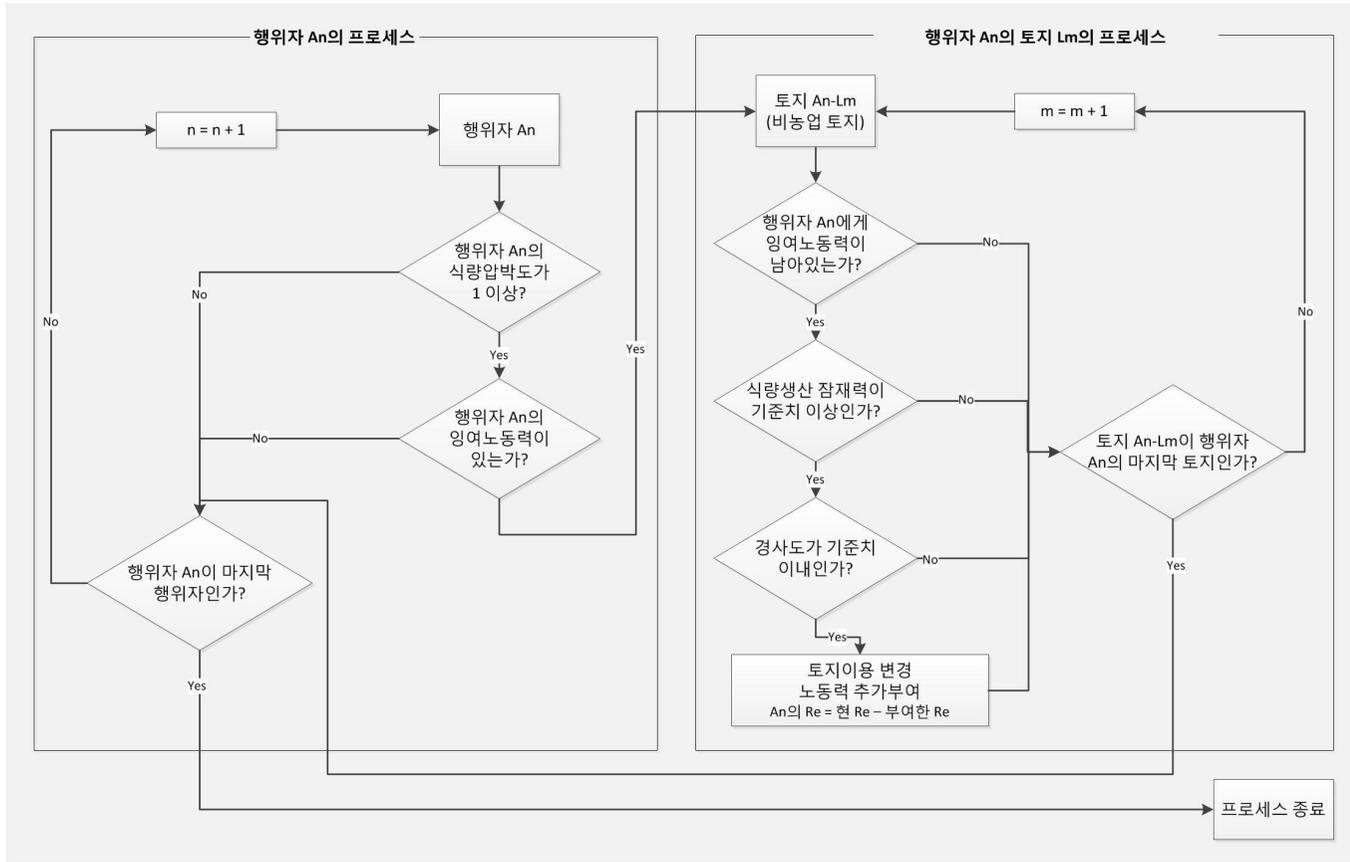


그림 4-12. 토지피복 변화 프로세스 중 비농업토지(산지) 개간 프로세스(안유순, 2013)

## 4. 외부환경과 결과 도출, 모형의 구동

다행위자시스템 모형의 환경과 행위자 이외의 모형의 구성요소의 구축 내용을 소개한다. 먼저 외부환경 및 변수를 어떻게 설정하였는지에 대해서 소개하고, 결과값이 어떻게 도출되는지를 설명한다. 마지막으로 모형이 어떻게 구동되는지를 소개한다.

### 1) 외부환경·변수

외부환경 및 정책변수 중 현재 설정된 환경변수는 기후변화, 국제정세(식량 및 에너지 수급) 변화, 농업정책(경사도 제한정책)의 변화이다. 기후변화는 IPCC 5차 보고서(2013)을 활용해서, RCP 2.6~8.5 시나리오에 따라 기온변화와 강수변화 예상치의 평균과 표준편차를 나누어서 반영하였다. 국제정세 변화는 식량이 수입이 원활한가 그렇지 않느냐를 가지고 설정하였다. 북한 전체를 대상으로 하지 않는 만큼, 모형 내의 가구들이 생존을 영위해 갈 수 있는 수준(인구×연간 최소식량 요구량)에서 어느 정도 비율만큼 보급이 되느냐로 설정하였다. 경사제한 정책은 경사도를 기준으로 토지이용 제한 정책을 실시하느냐 그렇지 않느냐를 기준으로 설정하였다. 제한 경사도의 적당한 기준이 없어, 모형의 시험 가동을 통해 제한 경사의 기준을 10도로 설정하였다. 단 경사제한 정책은 행위자의 식량압박도가 3을 초과할 경우 무시할수 있다고 설정하였다<sup>139)</sup>.

먼저 기후변화와 경사제한정책의 경우 어떠한 형태로 적용해도 결과에 큰 차이가 없었음을 밝혀 둔다. 따라서 현재는 국제정세 변화(외부 식량수급)요인만을 시험해 본 상태이다. 다만 이에 대한 개선을 계획하고 있다.

추가적으로 협동농장 체제의 변화가 시나리오에 반영되어야 한다는 의견을 반영할 필요가 있다. 하지만 구체적으로 어떤 형태로 반영할 것인지에 대한 검토가 필요할 것으로 보여, 이는 추후 연구의 확장 범위로 고려중이다.

외부환경 및 정책변수 외에도 모형의 구동에 중요한 변수는 의사결정과

---

139) 실제로 1980년대 이후로 북한은 고지대에 대한 다락밭 개간 정책을 막았지만, 식량이 필요한 지역 주민에 의해서 제한정책이 무시되었다는 예가 있어 이렇게 적용하였다.

농업생산량 도출에 핵심적인 작물(토지피복)별 토지의 연 기준 노동 시간 ( $LT_{reference}$ )이다. 토지피복에 따라 논과 밭의 단위면적( $100m^2$ )당 평균 노동 시간을 확인하여 반영해야 하는데, 북한에 대해서 이는 알려져 있지 않으며, 기계화와 에너지 투입, 농업기술의 차이 때문에 남한의 정보를 대입하는 것은 한계가 있다<sup>140</sup>). 따라서 남한의 정보에서부터 값을 늘려가는 형태로 조정을 진행하여, 알맞은 값을 선택할 수 밖에 없었다. 이는 결과 도출에 해당하는 부분이기도 하기 때문에 5장에서 자세하게 설명하기로 한다.

## 2) 결과값 도출

모형의 결과는 가구 수, 토지피복 면화, 식량 생산량, 토양 질 지표, 식량 압박도로 도출된다(표 4-10). 이 모형에서는 가구 수가 초기 설정에서 절반 이상으로 감소하면 정지하도록 설계되어 있어, 가구 수는 모형의 붕괴를 나타내는 결과라고 할 수 있다. 토지피복 변화와 토양 질 지표는 토지황폐화를 나타내는 결과라 할 수 있다. 식량압박도와 식량생산량의 변화는 식량문제와 기근 위험을 나타내는 지표라 할 수 있다. 토양 질 지표와 식량압박도는 추가적으로 모형 내 환경의 프로세스와 행위자의 의사결정을 확인할 수 있는 모형의 내부 변수로서 의미가 있다고 할 수 있다.

3장의 조기경보신호 관련 방법론을 적용하여, 위 결과들의 사전경고신호가 있었는지에 대한 결과를 도출하였다. Netlogo 6.0.4가 가지고 있는 R 확장 도구를 사용하여 공간적 조기경보신호를 도출하는방법(Moran의 I 사용)과, 모형의 전체적인 결과를 바탕으로 조기경보신호를 도출하는 방법(추정기방 방법)을 사용하였다(세부 방법 3장 참조). Moran의 I는 명목 척도가 아닌 공간적 결과물(토양질 지표, 식량압박도)과 모형의 중간 지표(식생지수 예측결과)를 대상으로 구하였다. 다만 이 결과는 현재 수준에서는 해석이 어렵고, 공간적 격자 등 고려해야 할 요소가 있어 본격적으로 다루기는 어렵다고 판단하였으며, 개략만 다루기로 한다.

---

140) 예를 들어, 발작물인 겉보리의 경우 남한의 1966년 노동력투입시간 대비 2007년 단위면적당 투입시간은 약 1/16수준이다(통계청 농축산물생산비조사). 남북의 여건 차이를 고려하였을 때 이 이상 차이가 날 수 있다.

표 4-10. 모형의 결과값 도출

구분		설명
현재 사용하는 결과값	가구 수	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 식량압박이 3년 이상 극심한 행위자가 제거되고, 행위자가 절반 이상 제거되면 모형이 종료 되는 것에 기반</li> <li>• 각 모의 종료 시점에 가구의 수를 세어 결과값으로 도출</li> </ul>
	토지피복 변화	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 산지, 농지(논, 밭), 나지의 변화 경향 확인</li> <li>• 모형에 시가지는 설정되어 있으나, 변화하지 않으므로 확인하지 않음</li> </ul>
	식량 생산량	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 모형 내의 가구, 토지의 식량생산량 총 합계</li> <li>• 단위 : KG</li> </ul>
	토양 질 지표	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 모형 내 환경 부속모형에서 도출된 모형 내 토양질 지표의 평균</li> <li>• 단위는 없으며, 0에 가까울수록 토양 질이 낮고, 1에 가까울수록 토양 질은 높음</li> </ul>
	식량 압박도	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 모형 내 가구의 식량에 대한 압박의 정도(가구 평균)</li> <li>• 연 최소 식량 요구량(1인당 곡물 기준 165kg)을 충족하는 경우 1이하이며, 2인 경우 최소 식량 요구량의 절반으로 정의됨</li> </ul>
현재 사용하지 않는 결과값 (보완 필요)	EWS 지표	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Moran의 I : 모형 내 EWS가 도출 가능한지를 확인하기 위해 사용, 식생지수 예측결과, 토양 질 지표, 식량압박도를 대상으로 계산</li> <li>• Moran의 I의 적정 스케일(계산 셀의 범위) 등에 대한 시험 중이며, 현재수준에서는 결과가 분명히 도출되지 않아 결과에 반영하지 않음</li> <li>• 모의 종료 후 R과 연동하여 모형 전체 결과가 측정자료 기반 EWS에 부합하는지에 대한 결과도출 모색중(방법 3장 참조)</li> </ul>

### 3) 모형의 구동

모형의 구동은 초기 설정(setup)과 실행(go)으로 구분된다. 초기 설정에서는 “가상의 북한 협동농장” 설계내용 및 모형의 초기정보에 맞춰 모형이 설정된다. 대부분의 외부환경·변수는 초기 설정단계에서 설정된다. 단, 기후변화 변수의 경우 모형의 실행 단계의 흐름에 따라 변화한다.

모형의 실행 단계에는 앞서 설명한 환경과 행위자의 되먹임 프로세스가 구동된다. 앞서 설명하였듯 1회 실행될 때마다 1년이 경과되는 것으로 정의된다. 모형의 실행은 100년 또는 북한의 토지황폐화 문제와 식량문제가 극대화되는 시점으로 설정하였다. 북한의 토지황폐화와 식량문제가 극대화되는 시점에 대해서 가정하기 위해, 우선 식량압박이 3년 이상 극심한 가구 행위자들은 모형에서 제거(“가상의 협동농장에서 이탈”)되는 것으로 설정하였다. 이탈된 가구 행위자들의 수가 초기 설정 행위자수의 절반에 도달하면, 모형이 붕괴되었다고 가정하고 종료되도록 설정하였다.

모의는 각 케이스마다 100번 실시하는 것을 원칙으로 하였다.

## 제 4 절 북한 협동농장 다행위자시스템 모형의 1990년대 대기근 재현여부 확인

이 모형은 다른 다행위자시스템 모형과 달리 현장 자료 적용이 한정되어 있기 때문에, 검증과 보정에는 한계가 존재한다. 이를 대신하여, 1960년대부터 1990년대까지의 북한의 농업환경, 토지황폐화와 식량생산 감소 문제에 맞는 모형으로 조금씩 맞추어 봄으로써, 1990년대 대기근을 재현하는 모형으로 만들어가고자 했다.

이에 본 연구에서는 모형의 시작 시점을 북한이 협동농장 체제를 완비한 1960년대로 가정하였다. 이에 맞추어 모형의 외부환경 조건을 20세기 후반의 북한의 조건으로 설정하였으며, 이는 기후변화를 현재와 같은 배출량의 시나리오로, 토지이용 제한 정책도 북한 당국이 정해 둔 15도 경사도 이상으로, 그리고 식량지원 또한 북한 전역에 연간 100만 톤 지원 조건(인구 고려하여 축소)으로 설정함으로써 구현하였다.

처음 모형을 구성하였을 때에는 임의로 할당한 변수 간의 관계로 인하여 의도치 않은 결과가 도출되었다. 여러 차례 시험 모의를 바탕으로, 작물(토지피복)별 토지의 연 기준 노동 시간( $LT_{reference}$ )을 어떻게 정하는지가 결과에 큰 영향을 미친다는 사실을 재확인하였다. 이에 대한 세부 조정 결과 논 100m<sup>2</sup><sup>141)</sup>당 연간 36시간, 밭 100m<sup>2</sup>당 연간 48시간의 노동력이 투입되는 경우에 균형이 맞는 결과가 도출되었으며, 이보다 많은 노동시간이 필요하다고 가정하는 경우 모형 자체가 너무 불안정해지는 결과가 도출되었다.

위와 같은 시험 모의를 바탕으로, 각 임의 변수 설정을 완료하였고, 1960년을 시작 시점으로 초기 조건을 설정·가정하여 모의를 진행하였다. 그 결과를 모의의 종료시점, 토지피복변화, 지표변화를 중심으로 소개하고, 이 결과를 2, 3장에서 확인하였던 북한 토지황폐화와 식량생산 감소 문제의 요인 및 조기경보신호와 비교, 검토하고자 한다.

---

141) 이 모형에서의 최소 토지 단위이다.

## 1. 모의 종료 시점

그림 4-13의 좌측 그림은 모의 중의 행위자(가구) 수의 변화를 뜻하며, 우측은 각 모의가 종료된 시점을 상자 도표로 나타낸 것이다. 행위자 수는 30년이 지난 후 급격하게 변화하는 결과를 보여준다. 100번의 모의결과 평균 36.12년 후 모의가 종료되었으며, 대체로 35~38년 정도에서 모의가 멈추었다. 즉 모의가 시작된 후 약 35년 전후의 시점에서 기근과 유사한 문제가 발생하였다 볼 수 있다. 앞서 전제하였던 대로 모형의 시작 시점을 1960년이라 가정한다면, 1980년대 후반~1990년대 초반에 토지황폐화로 인한 식량부족 문제가 본격화되고, 1990년대 중반 기근이 발생하였다고 해석할 수 있다.

북한의 대기근이 1990년대 중반에 경험하였다는 점에 비추어 볼 때, 이 결과는 어느 정도 사실에 부합하는 결과라고 할 수 있다. 이 연구에서는 모형구축의 한계상 북한이 경험한 자연재해나 경제제제 등의 사건에 대해서 반영하지 못하였다<sup>142)</sup>. 이는 모형에 필수적인 부분을 요약함에 따라 발생하는 단순 오류일 가능성도 있으나, 1990년 북한의 대기근을 설명하는데 있어서 일시적인 자연재해나 경제제제 같은 문제보다 협동농장체제가 가지고 있는 한계, 주체농법, 경직된 사회구조 등의 시스템 내부 프로세스가 중요하다는 것을 보여주는 결과다. 또는 식량이나 에너지 공급이 제한되어 있기 때문에 생기는 폐쇄계적 문제로 인한 결과일 가능성 또한 있다.

3장의 조기경보신호 결과와 비교해 보면, 1990년대 초반부터 발생하는 모형의 붕괴 또는 정지는, 식량생산 감소 문제의 사전경고신호가 1990년대 초에 나타났던 것과 유사한 결과이며, 토지황폐화 관련 지표보다는 다소 이후의 일이다. 행위자의 수 자체가 “식량 압박도”에 따라 결정되는 것으로 설계하였기 때문에, 행위자 수 결과와 모의 종료 시점은 분명히 대기근의 발생을 나타내는 결과라고 생각할 수 있다.

---

142) 2장에서 확인하였듯, 북한의 토지황폐화와 식량생산 감소문제와 관련해서 자연재해와 경제제제 등의 사건(event)이 중요한 요인으로 제기된다. 이를 모형에 반영하기에는 모형에 핵심적인 가정·전제 외에도 추가적인 조건이 상당히 요구되어 불필요한 임의성을 높인다고 판단하였기 때문에 제외하였다. 부수적으로는, 이 연구에서는 사람들이 일반적으로 인식하는 자연재해와 경제제제가 아닌 의외성에 관한 요인이나, 잠재적 요인을 관찰하는 것이기 때문에, 이를 제거하고 보는 것이 타당하다는 판단 또한 있었다.

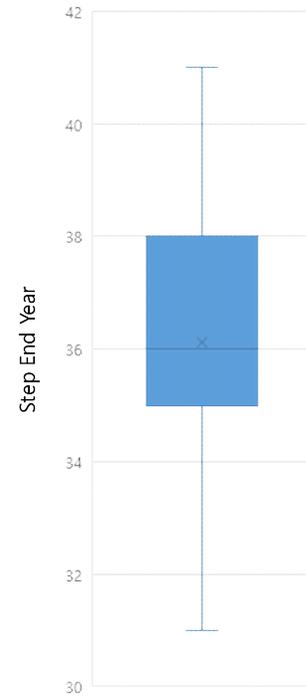
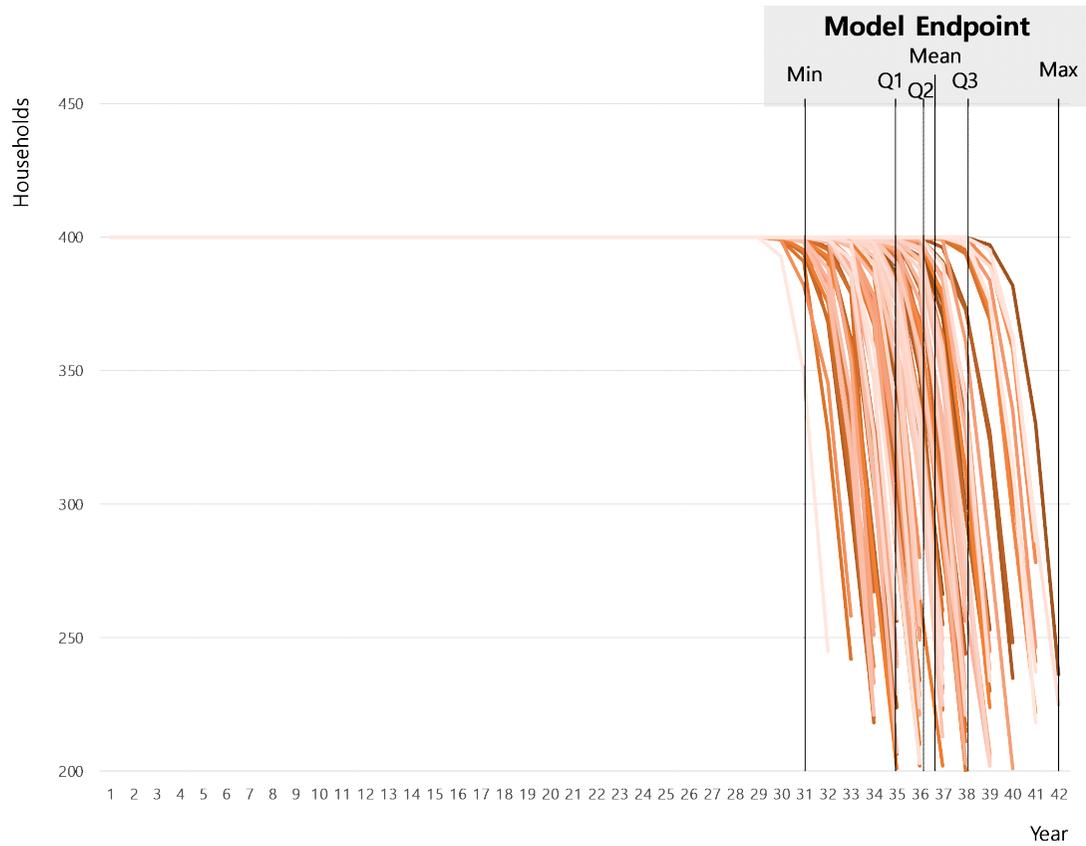


그림 4-13. 모의 결과 중 가구 수의 변화(왼쪽)와 시뮬레이션 종료 시점(오른쪽)

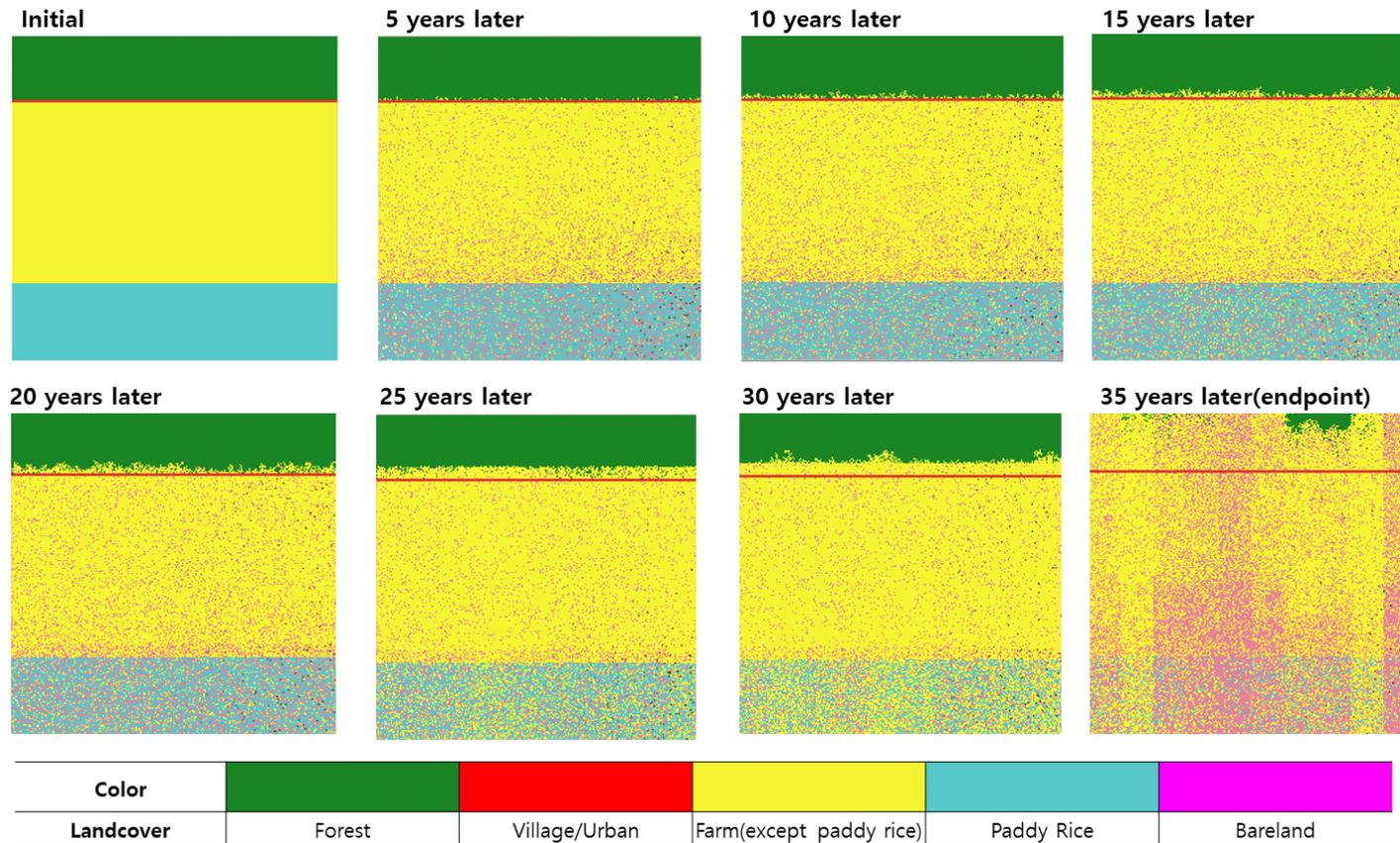
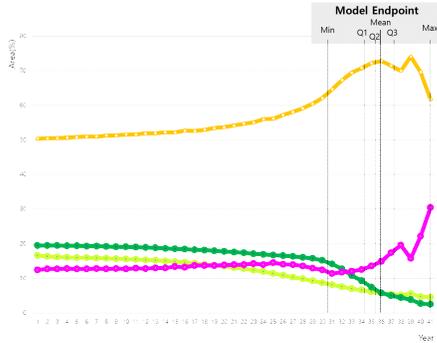
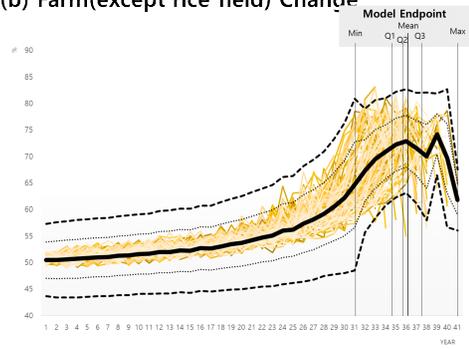


그림 4-14. 토지이용변화 결과 예시

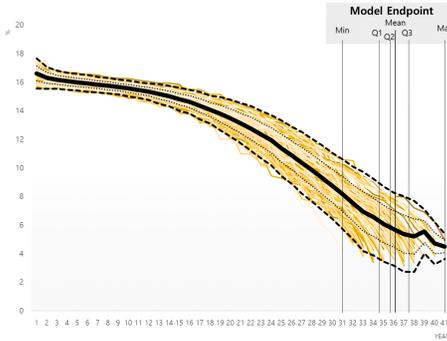
(a) Land Use Change



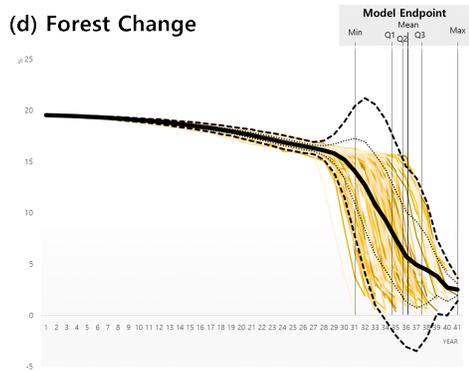
(b) Farm(except rice field) Change



(c) Rice Field Change



(d) Forest Change



(e) Bareland Change

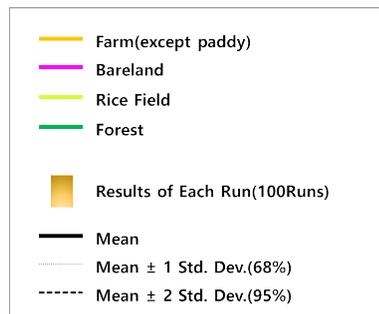
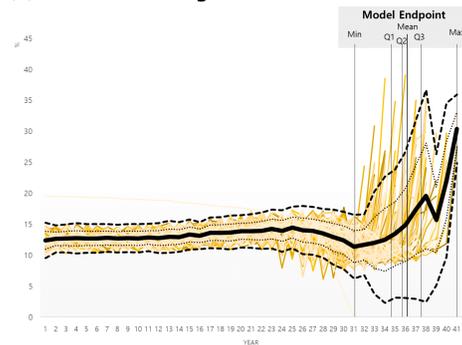


그림 4-15. 토지이용변화 모의결과

## 2. 토지이용의 변화

그림 4-14은 여러 개의 모의 결과 중 일반적인 결과 하나를 가져온 예시로, 토지이용의 변화 결과는 모의결과마다 상당한 차이를 보인다. 그 결과를 종합·요약한 것은 그림 4-15와 같다.

그림 4-15를 확인하면, 모의 초기부터 20년까지는 나지 면적이 추가되고, 산지개간이 점진적으로 이루어진다는 것 외에 추가적인 변화는 관찰되지 않는다. 모의 후 20년이 지난 이후 산지개간이 더 많아지는 등 밭의 면적이 급격하게 올라가는 모습을 관찰할 수 있다. 30년이 지난 이후에는 모의결과마다 다른 경향을 보이는데, 산지가 대부분 개간되고, 나지 면적이 급격하게 늘어난 이후 모의가 종료되는 것을 결과를 통해 확인할 수 있다.

종합해 보면 토지이용의 측면에서 1960년대부터 “가상의 북한 협동농장”모형은 분명한 토지황폐화 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. 구체적으로는 이는 모의 시작 후 27~28년 즈음(실제시기 1987-1988)부터 본격화 된 산지개간으로부터 말미암은 산림지황폐화(산림면적 포함)와, 모형의 종료 시점에 임박하여 분명하게 나타나는 생산성 악화로 인한 경제적 토지황폐화(나지면적의 증가)의 시기가 분명하게 차이가 나는 것을 확인해 볼 수 있다. 이는 앞서 언급하였던 토지황폐화와 식량문제 관련 지표의 조기경보신호의 도출 시기, 그 사이의 시차(time-lag)을 확인할 수 있는 결과라 볼 수 있다.

토지이용의 변화 결과만 확인하였을 때 이러한 시차가 발생하는 요인은 모형의 내부적인 측면에서, 토지이용 규제정책의 설계와, 모형 자체의 되먹임으로 설명할 수 있다. 먼저 토지이용 규제 관련 시나리오는 식량압박이 높을 때 행위자에 의해 무시되도록 설계되었다. 농업생산성 저하는 점진적이고, 지속적으로 변화하였겠지만 식량압박이 정해 둔 기준점을 넘어 급격하게 산지 개간이 이루어지고, 그리고 급격히 농지가 버려지는 결과가 초래되었기 때문에 아래와 같은 결과가 도출되었다고 볼 수 있다.

이 결과에 대해 북한 관련 농업전문가 및 새터민을 대상으로 의견을 물은 결과 상반된 반응이 있었다. 먼저 토지이용의 변화가 너무 급격하고 현실적이지 않다는 것이다. 해당 전문가는 다락밭의 개간으로 산림이 줄어든

것은 현실에 부합하는 결과일 수 있으나, 협동농장 내의 토지이용은 상부(당)의 지령을 받은 것으로, 생산성이 떨어진다고 해서 토지를 버리는 것(농지→나지)은 북한의 협동농장 체제 특성상 불가능하며 현실과는 다소 다르다는 반응이 있었다. 반면 1990년대 북한 대기근을 경험한 새터민 출신 전문가의 의견은 다소 달랐다. 앞서 전문가의 언급대로 북한에서는 농토를 유기하는 형태의 토지이용은 불가능하나, 실제로 대기근 직전 북한의 농토의 토지생산성은 극심하게 낮았기 때문에, 땅이 버려진 것과 다름없었다고 언급하기도 하였다. 때문에 이 모형의 붕괴시점 이전의 나지의 급격한 증가는 현실을 잘 반영하고 있으며, 단 행위자(가구)의 적극적인 행동이 아닌 도저히 생산성이 낮아 “자연스럽게 버려진 것과 다름없게 된” 상태라고 해석하면 충분히 현실과 유사한 결과라는 자문을 주었다.

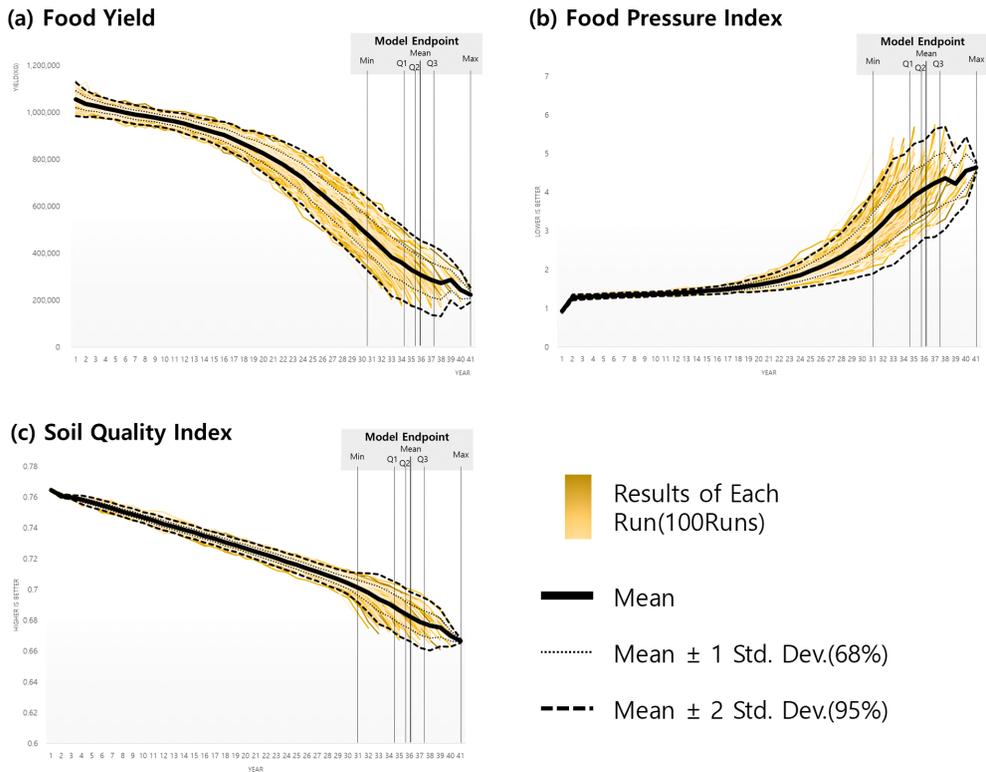


그림 4-16. 토지황폐화 및 식량생산 저하 관련 지수의 변화

### 3. 토지황폐화 및 식량생산 저하와 관련된 내부변수

그림 4-16은 토지황폐화와 식량생산 저하 관련 모형 내부 지수의 변화를 나타낸 것으로, 그림 4-16a는 식량생산량의 변화, 그림 4-17b는 식량압박도의 변화, 그림 4-16c는 토양 질 지표의 변화를 나타낸 것이다. 식량생산량의 변화와 식량압박도의 변화를 살펴보면, 대체로 20년까지는 완만한 경향을 보이다가, 20년 전후로 식량생산량의 감소와 식량압박도의 증가 경향으로 전환되는 것을 볼 수 있다. 그리고 30년 이후부터 모형 붕괴시까지도 또 경향이 바뀌어 감소 및 증가 경향이 극적으로 늘어나는 것을 확인할 수 있다. 이는 토지이용의 변화와 유사한 결과로 해석할 수 있다. 토양 질 지표의 경우 다소 다른데, 모의 종료 직전까지는 큰 변화가 없이 점진적으로 감소하며 다른 결과들과 달리 눈에 띄는 변곡점 또한 찾기 어렵다.

모형 내에서의 20년까지의 변화는 실제 세계에서는 1960년부터 1980년대까지를 나타내며, 두 번째 변곡점인 30년 전후는 1990년 정도라 볼 수 있다. 실제 2장에서 확인할 수 있는 해당 시기 북한의 식량생산량 경향이 증가 경향을 띄고 있었고, 이는 1990년대 초까지 이어진다는 점에서는 모형 내 해당 시기 완만한 식량생산량의 감소 추세는 현실과 다소 다른 결과라 할 수 있다. 하지만, 이석(2004a)가 지적한 1970-80년대 배급제의 불안, 1970년대 후반부터 이어지는 “자연개조”와 개간에 대한 계속된 강조는, 당시의 식량수급이 불안정함을 보여주며, 식량압박도의 점진적인 증가와 부합하는 결과라 볼 수 있다. 실제 이석(2004a;2004b;2004c)이 지적하는 북한 식량생산 통계량의 신뢰도 문제 등을 고려해 보았을 때 식량생산량 자체보다는 식량압박도가 더 토지황폐화와 식량생산 감소 문제를 설명하는 데 유의미한 변수로 판단해 볼 수 있다<sup>143)</sup>.

토양 질 지표의 점진적인 변화는, 모형 내 환경 부속모형과 행위자 의사

---

143) 이러한 결과를 보여주는 모형 내부적인 원인으로, 모형의 복잡성 저하를 위해 모형내 “인구성장”을 고려하지 않았던 것이 있을 수 있다. 인구가 증가하지 않는다고 가정하고 모형을 구축하고, 이를 기반으로 조정하였기 때문에, 식량생산이 감소 추세인 것으로 중간 결과가 도출되었다. 그러나 이 모형에서 추구하는 것이 “현실에 대한 정확한 모사” 보다는, “현실에 있었던 현상(토지황폐화)로 인한 의외성 모사”에 가깝기 때문에, 중간 단계 지표인 이 결과가 큰 의미가 있다고 보기는 어렵다.

결정이 지속적으로 이루어졌음을 나타내는 결과이자, 현실의 토지황폐화를 상징하는 결과로서 의미가 있다. 토양 질 지표는 물리적 토양침식과, 화학적 잠재력 저하로 구성되어 있으며, 모형의 설계상 물리적 토양침식은 토지이용의 변화와 화학적 잠재력 저하는 행위자가 우선 수행하는 토지 노동력 투입 변화와 밀접한 연관이 있다. 30년이 경과할 때까지는 토지이용의 변화가 거의 없으므로, 그 이전까지는 철저히 화학적 잠재력 저하에 따라 변화하게 된다고 생각해 볼 수 있다. 이 시기 토양 질 지표가 거의 선형의 경향을 보이고, 그 변위(표준편차)도 크지 않았던 것은 모형의 시작 이후 행위자들은 점진적으로 식량 부족을 느꼈고, 이에 따라 점진적으로 토지의 노동력 투입 변경 전략을 늘렸다고 해석해 볼 수 있다. 결과적으로는 이는 점진적인 토지황폐화를 유발했고, 이러한 점진적인 토지황폐화의 누적에 30년 이후 급격한 변화의 잠재적 원인이 되었다고 해석해 볼 수 있다. 30년 이후에는 산지의 변화가 있었기 때문에, 토양 질 지표의 물리적 부분에도 큰 영향을 주었을 것으로 예상하며, 그래서 모형 후반부에 토양 질 지표의 결과에 다소 차이가 나타났다고 해석해 볼 수 있다.

북한의 토지황폐화를 나타내는 현실의 지표인 식생지수 자료는 1980년 이전의 자료를 구득할 수 없기 때문에<sup>144)</sup>, 현실과 얼마나 부합하는지에 대해서 비교하기는 어렵다. 그러나 3장의 결과에서 북한의 토지황폐화의 조기경보신호가 1980년대 후반에 나타나고, 이후 대기근은 1990년대 중반에 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 모형 내 토양질 지표의 변화-식량생산량 지표와의 결과를 비교해 보면 유사한 관계가 나타난다. 이러한 관계를 통해 북한의 토지황폐화와 식량생산 감소 프로세스의 선후관계(토지황폐화가 먼저)와 복잡적응계적 되먹임(토지황폐화)<sup>145)</sup>-창발(대기근)의 메커니즘을 유추해 볼 수 있다(그림 4-17).

144) AVHRR이나 Landsat MSS등을 통해 70년대 초 식생지수를 추출할 수 있으나 해상도와 촬영 시기의 문제 등을 이유로 대체로 1980년대 초부터 자료구득이 용이한 실정이다.

145) 식량부족→토지 노동력 투입 전략 변경→토지황폐화→식량부족→반복의 형태로 진행된다고 보았다.

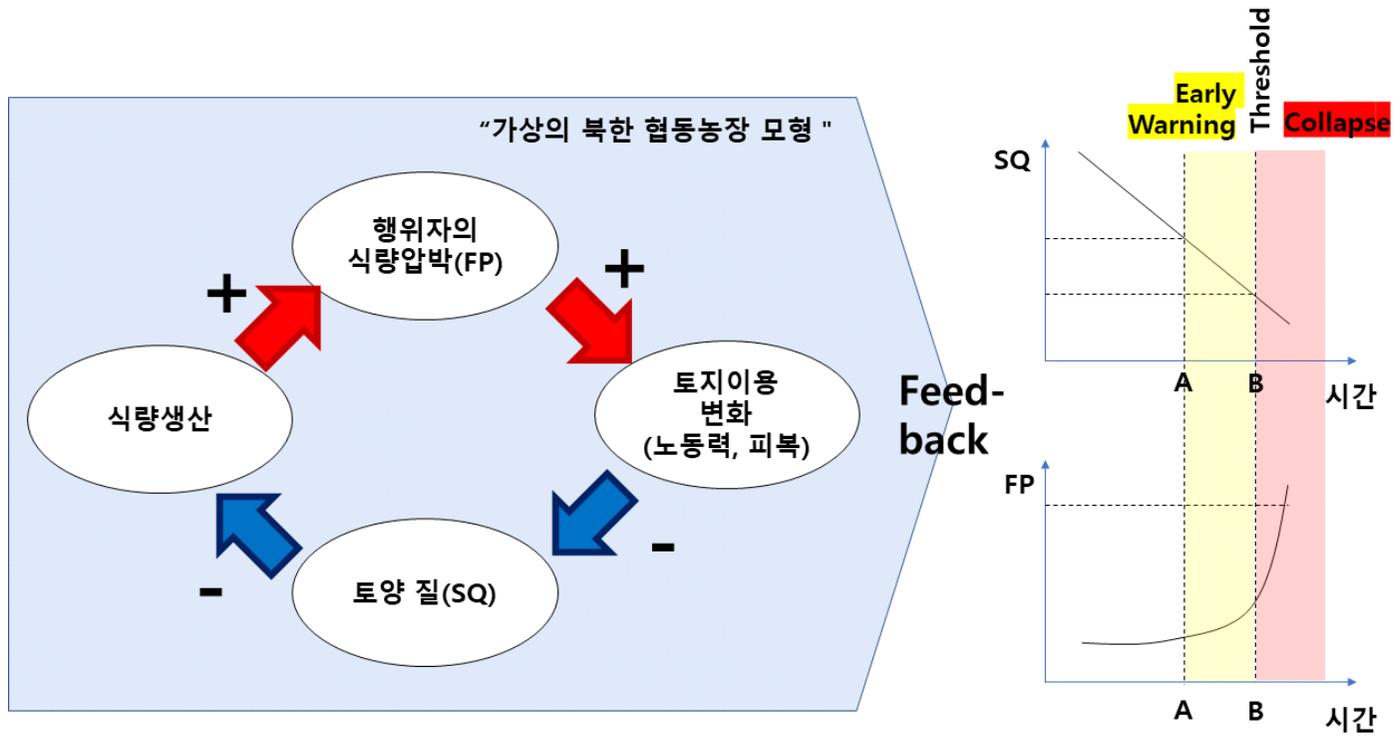
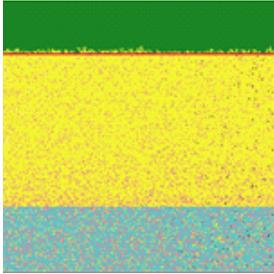
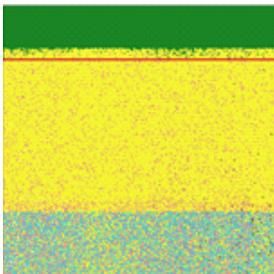
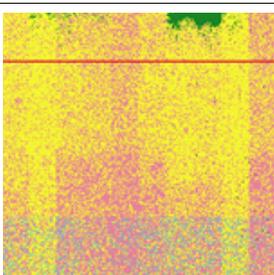


그림 4-17. 토지황폐화와 식량생산 감소 관련 되먹임 메커니즘과 식량압박-토양 질의 수치 변화 모식도

표 4-11. 모의결과와 1960년대-1990년대 북한 현실과의 비교와 복잡적응계적 해석

단계	토지이용 (그림 4-14)	현상		복잡적응계적 해석
		“가상의 북한 협동농장” (모형 내 결과)	현실의 북한 농업경관 (2장, 3장)	
1단계		<ul style="list-style-type: none"> <li>0-20년 경과</li> <li>거의 변화가 없음</li> <li>토양 질 지표의 점진적 저하</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1960-1980년대</li> <li>협동농장체제가 완비됨(1960)</li> <li>자연개조정책 적극 추진</li> <li>주체농법 강조</li> <li>토지황폐화에 대한 특별한 기록을 확인하기 어려움</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>평형 상태 (Equilibrium),</li> <li>자연개조→ 토지황폐화의 되먹임 (feedback)</li> </ul>
2단계		<ul style="list-style-type: none"> <li>20-30년 경과</li> <li>행위자들의 의사결정 잦은 변경→ 토지피복 변화</li> <li>산지에 대한 개간이 적극적</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1980년대-1990년대 초</li> <li>농업소출 증가 한계</li> <li>불안정성의 징후 등장: 배급제 불안(이석, 2004a), 다락밭 제한 정책 효과 X(박경석, 2011)</li> <li>토지황폐화 지표(식생지수) 조기 경보신호(1980년대 말)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>불안정성의 증대 (“The edge of Chaos”)</li> <li>임계전이(Critical Transition), 임계점(Threshold) 으로의 이행</li> <li>EWS의 검출</li> </ul>
3단계		<ul style="list-style-type: none"> <li>30년 경과-붕괴시</li> <li>급격한 토지이용 변화</li> <li>나지의 급격한 증가 : 토지 생산성의 급격한 저하</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1990년대</li> <li>자연재해의 빈발한 발생</li> <li>경제, 식량문제에 대한 조기경보신호(1990년대)</li> <li>토지황폐화 지표(식생지수) 실제 감소 추세</li> <li>대기근 발생</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>기존질서 붕괴와 새로운 질서의 수립</li> </ul>

#### 4. 결과에 대한 복잡적응계적 해석

앞서 언급하였듯 모의 결과는 북한의 토지황폐화와 식량생산 감소 문제의 현실에 일부 부합하는 결과가 도출되었다. 이 결과가 현실을 모사한다고 가정하고 이를 바탕으로 모의 결과와 현실의 상황을 서로 비교하여 보았을 때, 협동농장이 완비된 1960년대 이후로, 북한의 토지황폐화와 식량생산 감소 문제의 경향은 3개의 단계가 있다고 볼 수 있다(표 4-11). 첫 번째 단계는 1960년대부터 1980년대까지이며, 이 시기는 큰 변화가 예상되지 않는 평형(equilibrium)상태였다고 볼 수 있다. 이 시기에는 특별한 식량생산 부족 사태 또는 토지황폐화 징후는 보이지 않으나, 자연개조 정책 등 잘못된 정책의 시초가 발견된다. 두 번째 단계는 1980년대를 말하며, 본격적인 변화가 있었으나, 어떤 형태로 변화할지는 알 수 없는 상태라고 생각해 볼 수 있다. 이 시기는 앞서 평형상태에서 있었던 문제가 되먹임(feedback)에 따라 점차 영향을 받아 변화하기 시작하였으며, 시스템이 임계점(threshold)의 상태로 점점 다가가는 상태로 해석할 수 있다. 세 번째 시기는 1990년대 시기로, 모형의 세계나 실제 세계 모두 급격하게 변화하는 붕괴의 모습을 보여 주었다. 이는 일종의 창발(emergence) 또는 붕괴(collapse), 새로운 평형의 형성 등으로 볼 수 있다. 2장과 3장의 결과로 미루어 보았을 때 3단계의 창발과 붕괴현상의 조기경보신호는 2단계와 3단계 사이에서 발생했다고 볼 수 있으며, 모형의 결과에서 보이는 20-30년 사이의 변곡점으로 보이는 두 시점은 이를 나타내는 것이라고 할 수 있다. 그리고 데이터를 통해 유추할 수 있는 임계점의 메커니즘은 토지황폐화와 식량압박도 증가가 되먹임 고리로 이어지면서 발생하는 형태이다(그림 4-17).

앞선 해석은 3장에서 사용한 조기경보신호(early warning signal) 방법을 적용해서 확인해 볼 수도 있다. 여러 가지 방법이 있지만, 먼저 전체적인 결과를 대상으로 시간적 자기상관성(AR(1))과 표준편차에 대한 측정기반 분석 기법을 적용하였으며, 분석 결과를 R의 “earlywarnings” 패키지를 사용하여 조기경보신호 분석을 진행하였다. 모든 모의 결과에서 조기경보신호가 도출되지는 않지만, 식량압박도와 토지이용(산림면적 변화)에서 AR(1)과 표준편차가 증가하는 결과가 도출되었다. 그림 4-18은 그 예시인

식량압박도에 대한 사례로, 잘 도출된 결과를 나타낸 예시이다. 모든 결과에서 분명한 조기경보신호가 도출되지 않은 것은, 3장의 결과 해석에서 언급하였듯, 이 방법이 원래 적용되던 시간 스케일에 비해 모의한 스케일이 작기 때문으로 보인다.

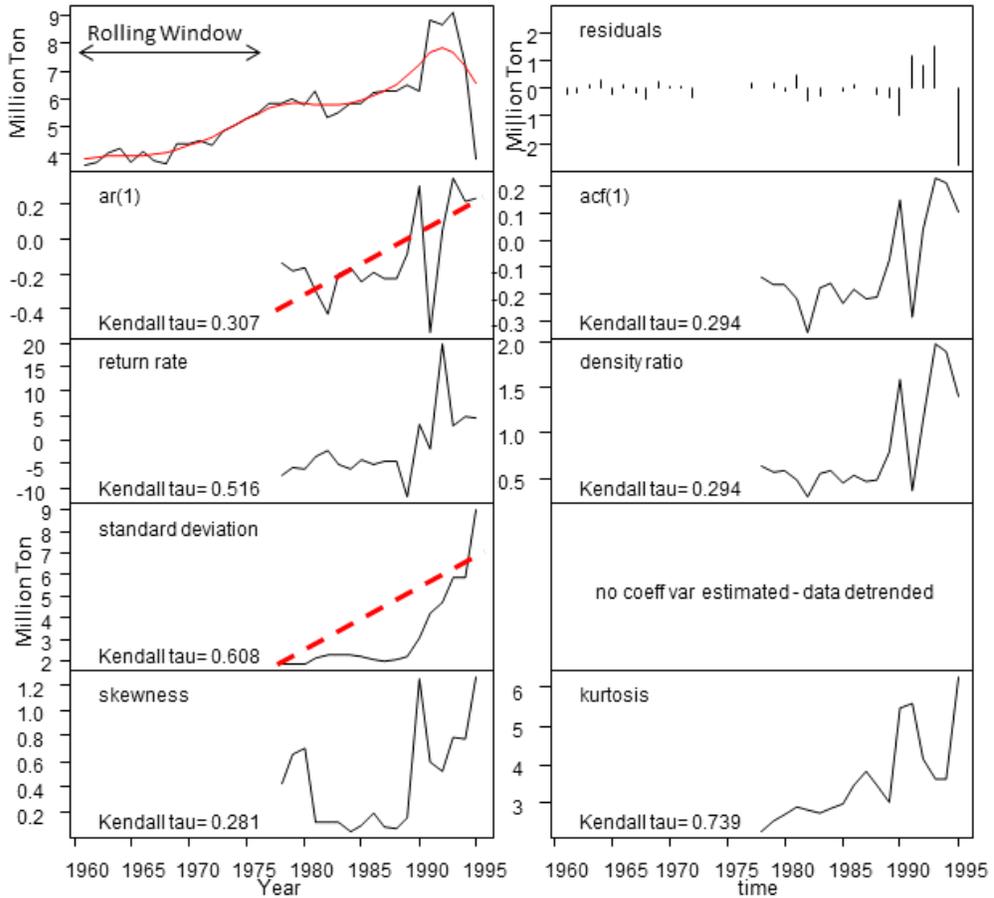


그림 4-18. 식량압박도에 대한 측정자료기반 조기경보신호 확인결과 사례

## 제 5 절 북한 협동농장 다행위자시스템 모형의 환경변화 시나리오 적용 결과

4절에서는 모형의 시작시점을 1960년으로 설정하여, 이 연구의 모형이 얼마나 북한의 토지황폐화와 식량생산 감소 문제와 1990년대 대기근을 잘 구현하는지를 평가하여 보았다. 다양한 해석의 여지는 있지만, 목표한 대로 1990년대 대기근을 어느 정도로 모사할 수 있는 모형이 구축되었다.

이 장에서는 이렇게 설정된 모형에 대한 환경변화 시나리오를 적용함으로써, 특정 환경변화 시나리오가 얼마나 북한의 토지황폐화문제를 저감하고 대기근의 위험성을 줄이는데 대해서 평가하고자 한다. 앞선 모사 모형을 기준점으로 두고, 특정 시나리오가 적용되었을 때 경향이 어떤 식으로 변화하는지, 그리고 1990년대 대기근을 막을 수 있는지에 대해서 평가하고자 하였다. 즉, 앞선 결과와 마찬가지로 “1960년대를 시작점으로 한 현실 모사”가 아니라, “만약 조건이 이런 식으로 달랐더라면, 기준 결과에서 얼마나 현실이 달라졌을까(what-if)?”를 확인함으로써 환경변화 시나리오를 평가하고자 하였다.

먼저 여러 가지 시험 모의에도 불구하고, 환경변화 시나리오에 대해서 쉽게 적용할 수 있는 부분은 외부 식량지원에 대한 시나리오였음을 밝힌다. 외부 식량지원은 인구밀도가 높아 현재 자연환경 조건으로는 식량에 대한 자급이 불가능하다고 여겨지는 한반도에는 필수적인 것이라는 전제에 기반한다<sup>146)</sup>. 특히 외부 식량지원 또는 식량수입의 감소는 북한의 대기근의 주된 원인 중 하나로 제기되기 때문에, 그리고 북한의 대기근 이후에도 북한의 태도와(핵개발 등) 국제사회의 대응(경제제재)으로 인하여 현재 진행형이기 때문에 특히 확인해야 할 외부환경 조건이라고 할 수 있다.

앞서 모형 구축에서 소개한 것처럼, 외부 식량지원 시나리오는 외부에서의 식량 지원 도는 수입이 모형 내의 가구들이 생존을 영위해 갈 수 있는 수준(인구×연간 최소식량 요구량)에서 어느 정도 비율만큼 추가로 보급이 되느냐를 기준으로 설정하였다. 민감도를 확인하기 위해 0%(앞의 결과와

146) 남한의 경우 실질적인 자급률이 20%수준에 불과하다고 알려져 있다. 북한 또한 세계적 스케일로 보면 거의 유사한 수준이고, 남한보다 낮은 인구밀도에 대비하여 산지 비중이 높기 때문에 유사하거나, 자원의 부족으로 더 낮을 것으로 예상해 볼수도 있다.

동일)부터 12.5%씩 비율을 늘려서, 100%까지 설정하였다. 남한의 실질적인 자급률인 20%를 고려하여 200%이상까지 시험하는 것이 당초 계획이었으나, 그 경우 모형이 지나치게 느려져 구동 자체가 불가능한 현실적인 이유가 있고, 100%까지 설정할 경우 모형에서 설정한 모형구동의 한계(100년)에 거의 도달하기 때문에, 100%까지를 한계로 설정하였다. 결과는 앞서와 마찬가지로 모의 종료 시점, 토지이용의 변화, 토지황폐화-식량생산 지수의 변화 순으로 소개하도록 한다. 0%는 앞선 시험 모의 결과이며, 따라서 “1960년을 기점으로 다른 선택을 했다면, 이후 어떻게 다른 결과가 초래되었을까”라고 해석하였다.

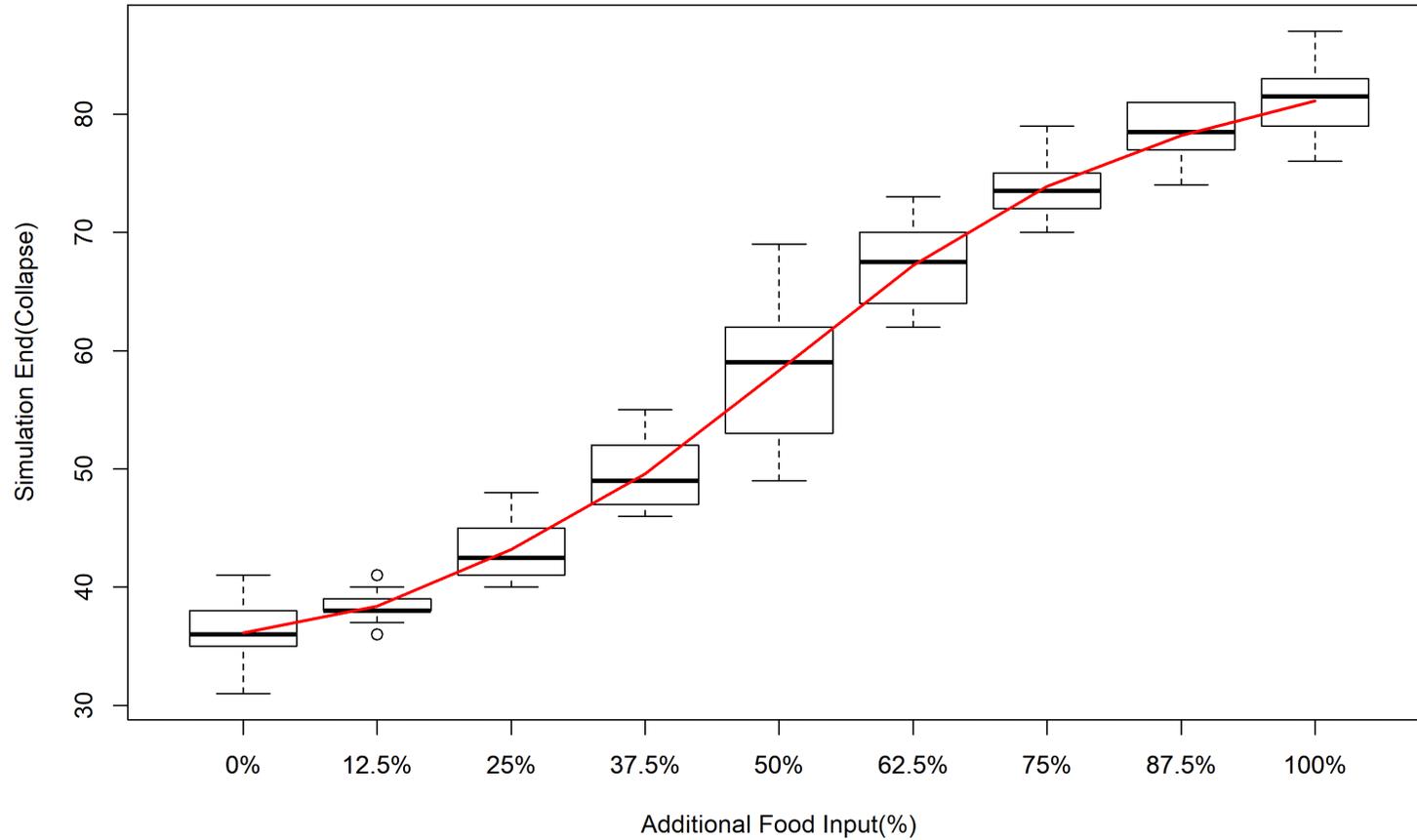


그림 4-19. 식량지원 비율에 따른 모의 종료시점의 차이

## 1. 모의 종료 시점

모의 종료 시점(그림 4-19)은 식량지원 비율에 따라서 증가하는 경향을 보인다. 필요량의 50%까지 추가 지급하는 경우, 시나리오를 적용하지 않은 대조군 대비 두 배 가까이 모의가 오래 유지된다. 이는 식량 수입 및 지원이 충분히 이루어졌다면, 북한의 토양생태 시스템 및 농업경관 시스템의 붕괴가 그만큼 늦춰질 수 있다는 가능성을 보여주는 결과이다. 그러나 모의 자동 종료 시점(100년)까지 유지되는 시나리오는 없었으며, 75%지원을 기점으로 해서 모의 종료시점의 증가는 정체되는 모습을 보인다. 이는 식량의 추가 지원만으로는 북한의 토양생태시스템의 붕괴를 근본적으로 막을 수 없었다는 것을 보여주는 결과라 볼 수 있다.

## 2. 토지이용의 변화

앞서 1960-1990년대에 대한 시험 모의 결과에서 토지이용의 변화는 모의 후로부터 20년(1980년)에 한번 변화가 나타났고, 30년(1990년)에 급격한 변화를 보여 주었다. 모든 토지이용의 변화 결과에서 또한 시점만 다를 뿐 두 개의 변곡점은 그대로 나타났다(그림 4-20~4-23).

모의 종료 시점 결과와 마찬가지로 식량 추가 지원의 효과는 모형 붕괴 시점의 지연으로 나타난다. 단 앞 변곡점의 시간 지연 효과보다는, 뒤의 모형의 붕괴로 치달아가는 급격한 붕괴에 대한 시간 지연 효과가 컸다. 다만 모형의 붕괴가 시작되는 시점부터 실제 붕괴하는 시점까지의 시간지연은 크지 않은 것으로 보인다.

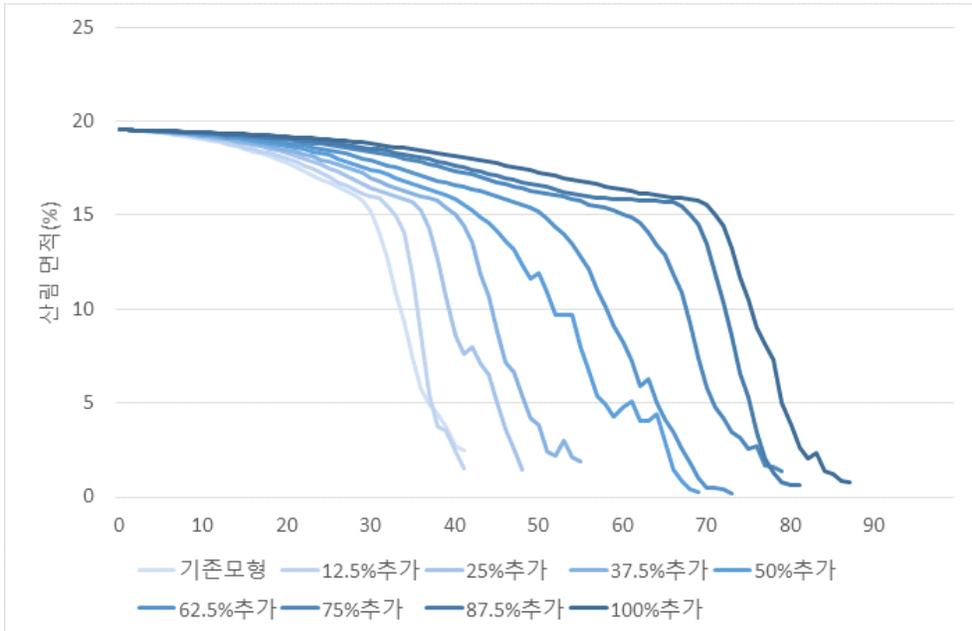


그림 4-20. 각 식량지원 비율 시나리오별 산림면적의 변화

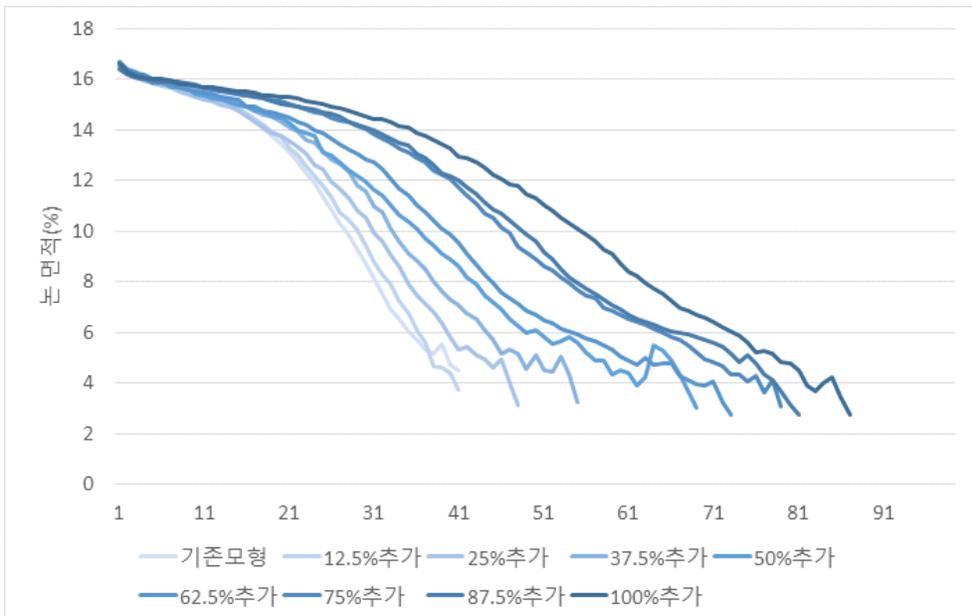


그림 4-21. 각 식량지원 비율 시나리오별 농지 면적의 변화

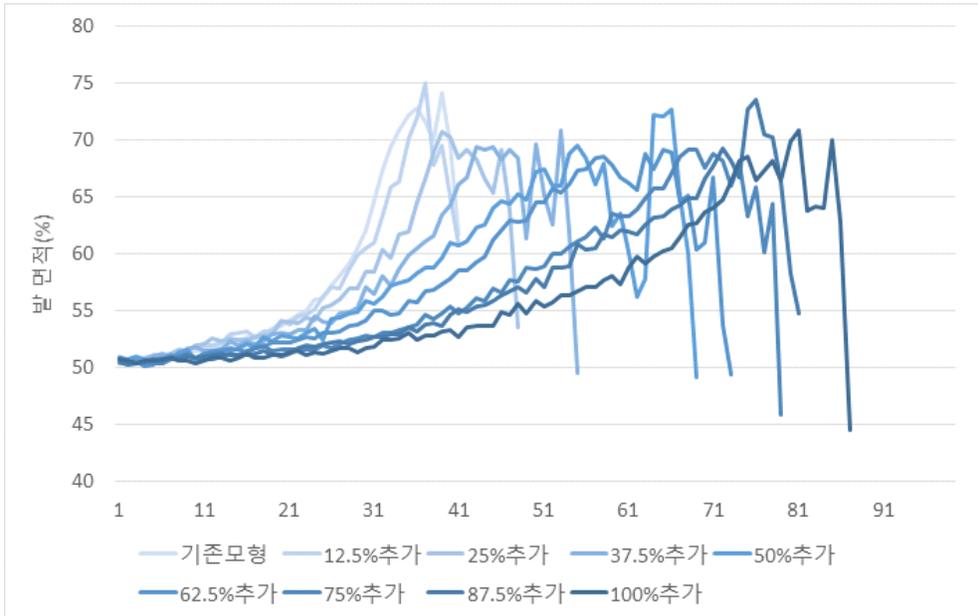


그림 4-22. 각 식량지원 비율 시나리오별 쌀 면적의 변화

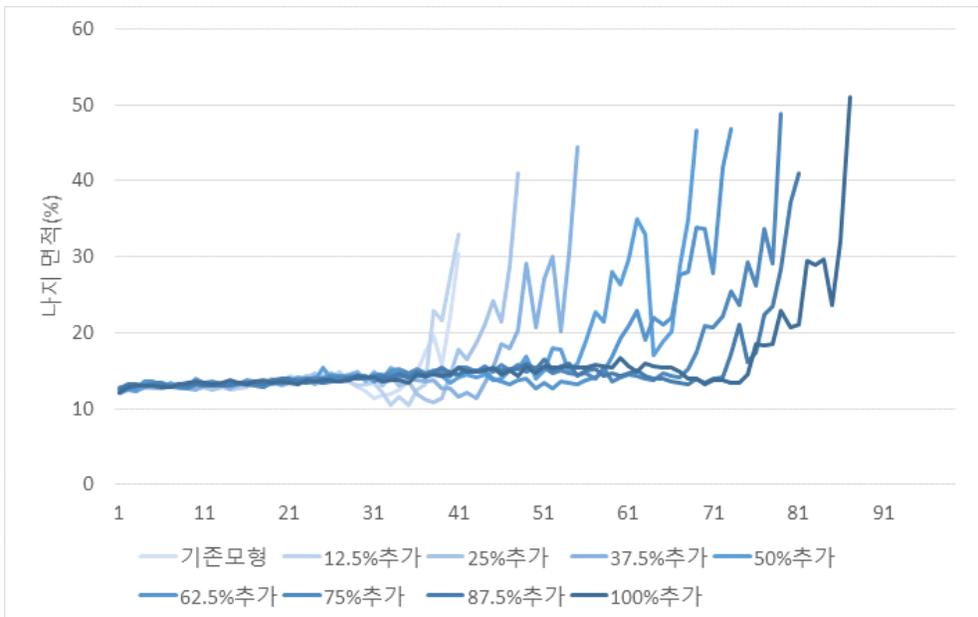


그림 4-23. 각 식량지원 비율 시나리오별 나지 면적의 변화

### 3. 토지황폐화 및 식량생산 저하와 관련된 내부변수

앞서 1960-1990년대에 대한 시험 모의 결과에서 토지이용 변화에서 확인할 수 있는 변곡점의 변화는 모형 내 식량생산량의 변화와 식량압박도에서 나타났으며, 토양 질 지표에서는 잘 나타나지 않았다(그림 4-24~4-26). 이 결과에서도 그대로 토양 질 지표에서는 변곡점이 확인되지 않는다.

시간지연 효과는 모든 지표에서 나타난다. 다만 식량생산-식량압박 관련 지표와 토양 질 지표의 시간지연 효과가 다른 형태로 나타난다. 식량생산량과 식량압박도는 토지이용의 변화와 마찬가지로 변곡점을 뒤로 보내는 형태로 시간지연 효과가 나타났다. 반면, 토양 질 지표의 경우 결과 경향의 기울기가 바뀌는 형태의 시간지연이 나타났다(그림 4-26).

앞서 유사 결과를 통해 주장하였던 토지황폐화(토양 질 지표)-식량생산 감소 문제(식량압박) 프로세스의 되먹임으로, 대기근이 발생하였다는 메커니즘은, 이 결과에서도 충분히 확인된다. 이는 해당 주장이 “(가상의) 북한 협동농장”에서 분명히 작동하는 것으로 뒷받침해주는 결과라고 해석할 수도 있지만, 식량지원이 이 되먹임의 프로세스를 근본적으로 바꾸지는 못한다는 것을 보여주는 결과라고도 할 수 있다.

해당 결과를 모형 내 행위자의 관점에서 생각해 보면, 외부의 추가 식량 공급이 늘어날수록, 행위자는 식량에 대한 압력을 천천히 느끼게 되고, 토지이용 변화 행동에 대한 동기가 크지 않아, 비교적 느리게 토양의 질이 저하되고, 다시 식량생산량에 미치는 영향이 적어지는 형태로 메커니즘이 변했다고 해석할 수 있다(그림 4-27). 다만 시나리오에 가정했던 식량지원의 양만으로는, 그리고 식량지원 자체만으로는 이러한 되먹임 구조를 타파할 수는 없었다고 해석해 볼 수 있다.

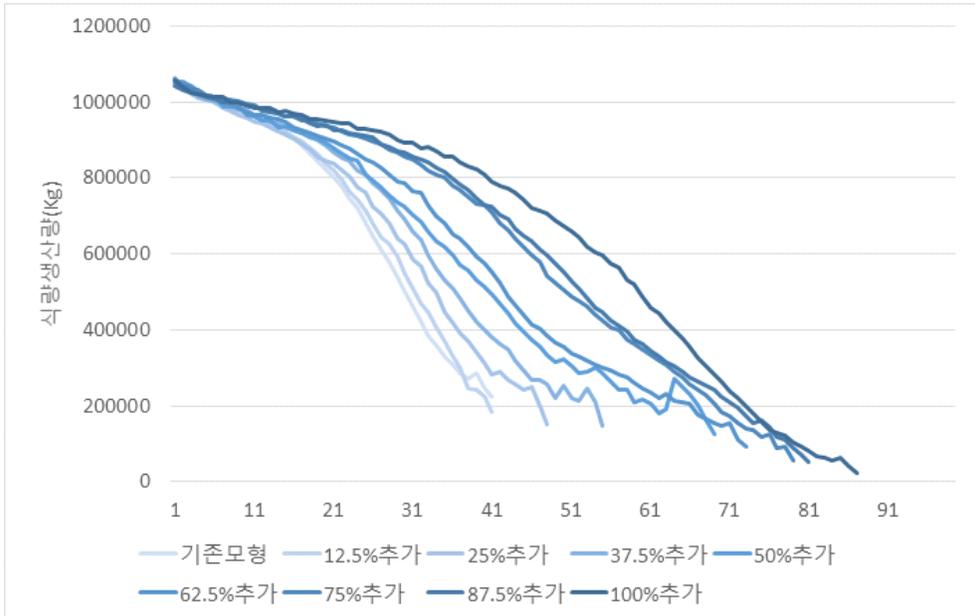


그림 4-24. 각 식량지원 비율 시나리오별 식량생산량의 변화

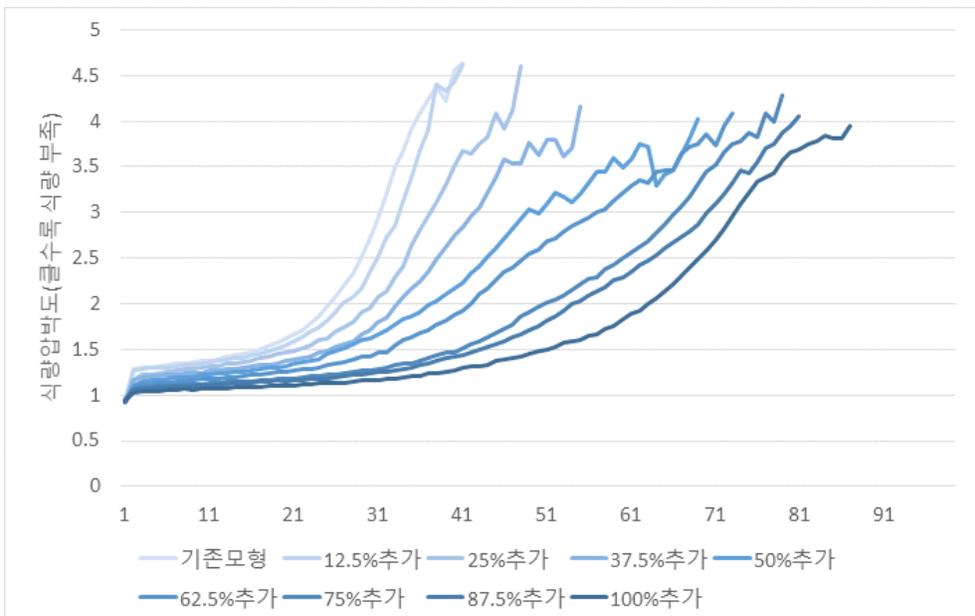


그림 4-25. 각 식량지원 비율 시나리오별 식량압박도의 변화

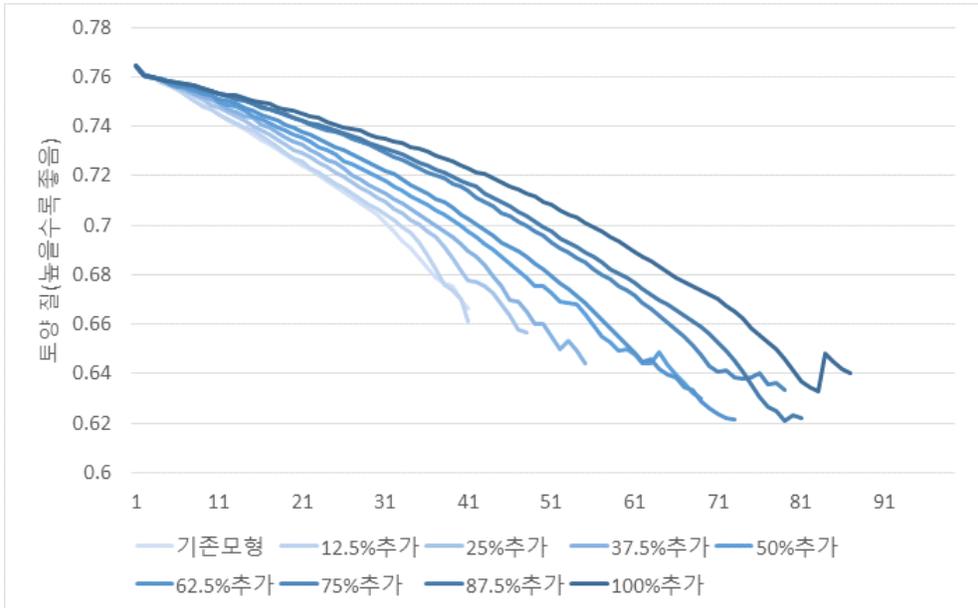


그림 4-26. 각 식량지원 비율 시나리오별 토양 질 지표의 변화

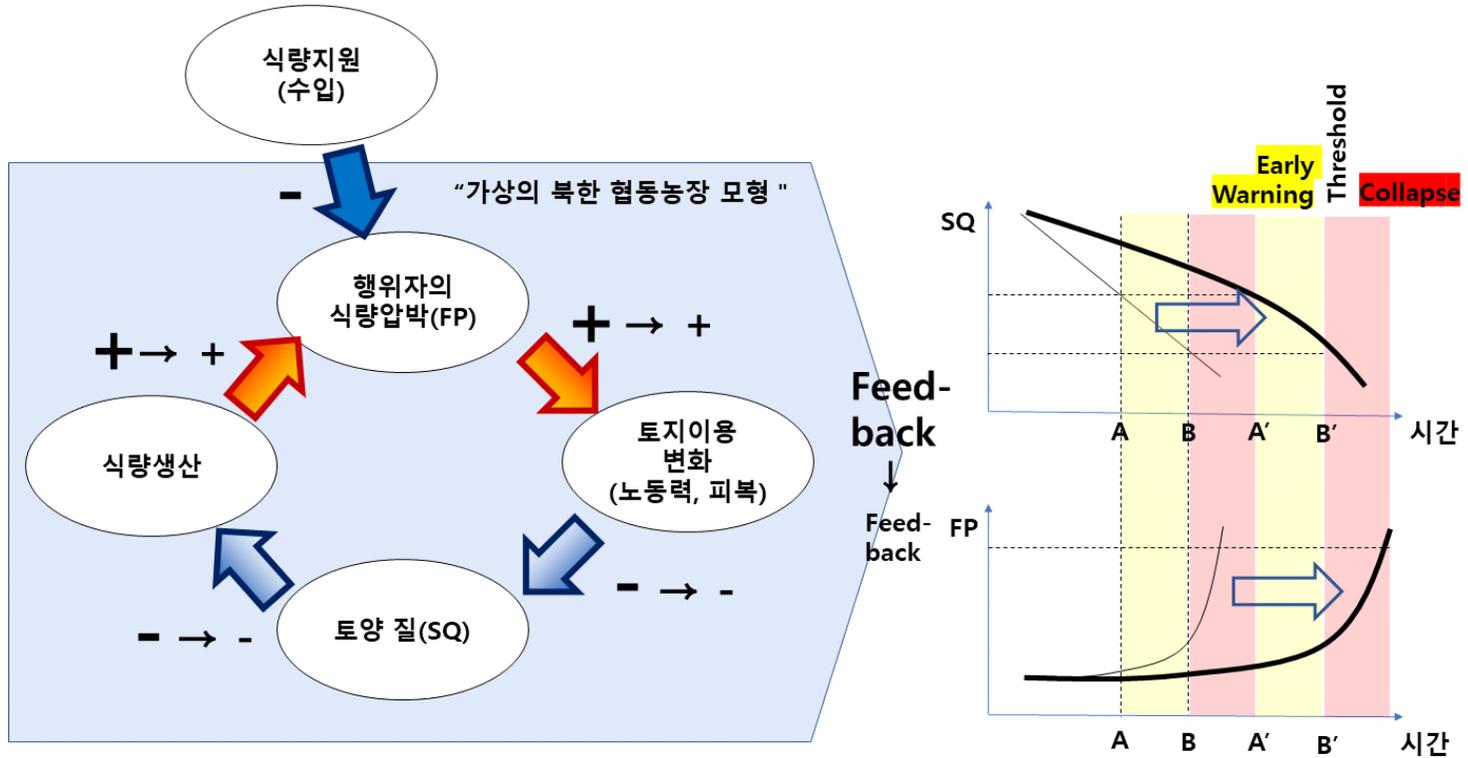


그림 4-27. 토지황폐화와 식량생산 감소 되먹임 메커니즘과 식량압박-토양 질의 수치 변화 모식도

#### 4. 시나리오 결과 종합

추가 식량지원(수입)에 대한 시나리오 모의 결과를 종합하면 다음과 같다.

첫째, 모의결과 추가 식량지원의 양을 늘리면 대기근의 시점 또한 비례해서 늦춰지는 결과가 도출되었다. 즉, 추가지원은 기근이 일어날 수 있는 시점을 뒤로 미루어 주는 효과가 있었다. 기존 시나리오가 1960년 기준으로 1995년(35년) 전후로 붕괴가 이루어졌다면, 인구 기준 100%의 식량을 지원해 주는 경우 80년 전후(1960년 기준이라면 2040년 전후)에 붕괴가 이루어지는 결과가 도출되었다. 이는 모형의 붕괴 자체를 나타내는 행위자 수 외의 다른 변수에서도 분명하게 나타났으며, 특히 토지황폐화 또는 식량에 대한 압박이 분명히 시작되는 첫 번째 변곡점에서 분명한 시간지연 효과가 나타나는 것을 확인해 볼 수 있었다. 단, 첫 번째 변곡점에서 두 번째 변곡점까지의 시기 차이는 그리 크지 않아 보이며, 이를 통해 본격적인 위기가 시작되는 두 번째 변곡점보다는 첫 번째 변곡점을 찾는 것이 중요하다고 생각해 볼 수 있으며, 이는 이 자체로도 3장에서 다루었던 조기경보신호의 일종으로 해석될 수 있는 여지가 있다고 판단한다.

둘째, 앞선 결과를 뒤집어서 생각하면, 이 연구에서 중요하다고 생각하였던 외부 식량 지원은 궁극적인 대안이 아니라는 결론을 내릴 수 있다. 극단적으로 말해서, 가장 식량지원을 많이 하는 시나리오라도 100년 안에는 붕괴가 일어나는 것으로 도출되었기 때문에, 추가 식량지원 만으로는 결국 대기근은 지연될 뿐 막을 수 없다는 결과가 도출되었다. 모형 내 행위자에게 추가적인 식량을 공급하여 식량압박을 낮추면, 토지이용변화의 유인이 떨어질 뿐 계속 진행되며, 악순환 구조를 타파할 수 없었다. 토지 황폐화와 식량생산 감소 사이의 악순환을 해결하기 위해서는 다른 방법이 병행될 필요가 있다고 판단된다.

결과적으로는 식량지원 외의 추가적인 북한 협동농장 체계의 변화가 필수적일 것으로 보인다. 예를 들어 협동농장의 분배구조를 개편하거나, 협동농장 체제를 혁파하는 것과 같은 방법이 있을 수 있다. 다만 비료공급 등 에너지를 추가 투입하는 전략은 마찬가지로 결과가 도출될 것으로 보이며, 무엇보다도 모형 내에서 효과적으로 구현하는 방식을 고민해야 할 필요가 있다.

다만 북한의 상황을 고려하였을 때, 붕괴 시간 지연만으로도 북한의 토지황폐화와 식량생산 감소로 인한 대기근 방지에 도움을 줄 수 있을 것이다. 특히, 북한이 본질적인 대책을 세울 수 있는 시간을 벌어주는 데 큰 도움이 될 수 있다. 따라서 잠정적으로는 북한의 토지황폐화와 식량생산 감소 문제 해결과 대기근 위험 절감을 위해서는 외부의 식량 지원 또는 북한의 식량 수입이 필요하며, 이를 토대로 근본적인 대책 마련을 수행할 필요가 있다고 결론을 내릴 수 있다.

## 제 6 절 소 결

이 연구에서는 북한 토지황폐화와 식량문제 문제에 대해서 접근하기 위해 북한을 대표하는 가상의 협동농장을 가정하고, 이에 대한 행위자기반모형을 구축하였다. 그리고 1960년을 기점으로 이후의 변화 양상을 모의함으로써 현재 파악하고 모의한 북한의 토지황폐화와 식량문제의 프로세스와 원인에 대해서 살펴보고, 토지황폐화와 식량생산 감소 문제 연구로써 본 모형이 타당성이 있는지를 파악하여 보았다. 이로써 파악한 세 가지 핵심적인 확인 사항은 다음과 같다.

첫째, 모의시점인 1960년 이후 35년 전후의 시점에서 대기근이 모의되었다. 이는 북한에서 발생하였던 1990년 대기근과 유사한 결과로, 이 장에서 목표로 하였던 1990년대 북한 대기근 현상과 토지황폐화 문제의 재현을 상당 부분 달성했다고 판단할 수 있다.

둘째, 식량난의 발생은 창발적 발현의 형태로, 토지황폐화의 패턴은 점진적이고 꾸준한 되먹임의 형태로 변화가 이루어졌다. 이는 3장에서 확인한 토지황폐화는 점진적인 프로세스에 의해 이루어지다가 급격한 변화로 식량난과 연결된다는, 조기경보신호의 시차와 특성의 결과와 부합하는 결과라 할 수 있다.

셋째, 토지황폐화와 대기근 예방 방법에 대해 모의한 결과, 식량지원을 통한 토지황폐화 문제와 대기근 위험을 다소 지연시킬 수 있다는 것을 발견하였다. 그러나 근본적으로 모형 내에서는 토지황폐화 문제와 대기근 위험을 막지는 못하며, 다른 부분에 대한 근본적인 개선이 필요할 것으로 보인다.

단 이 연구의 결과는 북한 토지황폐화와 식량생산 감소 문제의 경향을 그대로 모사하는 것을 목표로 하기보다는 북한 토지황폐화와 식량생산 감소 문제로 인해 벌어지는 대기근과 같은 급변사태를 모의하는 것을 목표로 했다는 것을 유념해 둘 필요가 있다. 특히 1960년대에서 1990년대 사이의 자료를 기반으로 모의했기 때문에, 2000년대 이후를 예측하는 모형으로 사용하는 것은 한계가 있다. 따라서 서론에서 언급한 대로 이 모형의 결과는 “미래의 예측”보다는 “미래에 혹시 발생할지도 모를 위험을 회피하는 전략

마련”에 더 적절하다. 다시 말해서, 북한의 토지황폐화와 식량생산 부족 관련 새로운 정책에 대해 직접 평가하지 않고, 과거 사건에 당시와 달랐던 새로운 정책의 요소를 대입해 보고 그 결과가 실제 과거와 어떤 부분에서 차이가 있는지를 파악하는 형태로 진행했다고 이해할 수 있다.

본 연구에서 구축한 연구는 향후 추가적인 수정, 보완과 시나리오 적용을 통해 작게는 북한 토지황폐화와 식량생산량 감소 문제의 위험회피 전략 수립에, 크게는 한반도 차원의 농업 또는 사회생태시스템의 문제해결에 활용하고자 한다. 이는 크게 두 가지 전략으로 수행할 계획이다.

첫째, 북한 토지황폐화와 식량생산 감소문제 또는 한반도의 토지황폐화 문제와 관련된 환경시나리오를 개발하고 적용하는 것을 목표로 한다. 특히 협동농장의 체계 변화와 같은 근본적인 해결 방안에 대해서 어떤 식으로 구현할지, 그리고 결과를 어떻게 도출할지를 검토하고자 한다. 그 외에도 여러 새로운 환경시나리오를 적용할 수 있도록 모형의 외부요인 관련 부분을 유연화시킬 필요가 있다. 특히 3장의 소결에서 언급한 것과 마찬가지로, 국제정치·경제적 요소에 대해서 계량화하고 환경시나리오로서 반영할 필요가 있다.

둘째, 자료가 추가되는 대로 모형의 내부 구조를 정교화할 계획이다. 이는 환경시나리오의 개발과도 밀접하게 연결되어 있다. 상황에 따라 북한의 현장 자료를 대입할 수도 있고, 현재 하나의 형태로 되어 있는 “가상의 협동농장” 구조를 여러 개로 유형화해서 모의할 수도 있다고 생각한다.

셋째, 3장의 조기경보신호 기법을 모형과 결합할 계획이다. 3장의 후반부와 본 장에서 언급하였듯 3장의 방법론을 4장에 적용하기 위한 시도를 여러 차례 시도했음에도 불구하고 아직 결과가 좋지 않았다. 해당 방법을 적용하기에는 시간스케일이 짧다는 문제를 해결할 필요가 있다.

## 제 5 장 결 론

이 연구는 북한의 1990년대 대기근을 사례로, 북한과 한반도, 전 세계 차원의 토지황폐화와 기근 위험 저감을 위한 방안을 모색하고자 하였다. 이를 위하여 사회생태시스템을 기반으로 북한의 토지황폐화와 식량생산 감소의 프로세스 및 과정을 이해하였다(2장). 1990년대 북한의 기근과 토지황폐화 현상에 대해서 조기경보신호(EWS)를 확인함으로써, 1990년대 북한의 기근의 징후가 어떤 형태로 나타났는지를 파악하고자 하였다(3장). 마지막으로 다행위자시스템(MAS-LUCC)를 활용하여 1990년대 북한의 대기근과 토지황폐화 현상을 재현하는 모형을 구축하고, 이를 활용한 사전예방 방안을 모의하였다.

위 세 가지 연구를 바탕으로 이 연구에서는 북한의 1990년대 대기근의 원인이 되는 북한의 토지황폐화와 식량생산 감소 문제에 대한 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 북한의 토지황폐화와 식량생산 감소의 지식부족과 인식차를 해소할 방법으로 적용해 보았던 사회생태시스템 기반 분석에는 성과와 한계가 있었다. 북한의 토지황폐화와 식량생산량 감소에 대한 각각의 연구성과를 확인함으로써 편향과 인식차를 확인하였으며, 역사자료를 통해 이들 사이의 요인을 추출하고 사회생태시스템 기반의 개념모형으로 구축하여 복잡적응계 분석방법(3, 4장)에 활용할 수 있었다. 그러나 구체적인 관계를 수식 또는 자료기반으로 보완하는 것은 자료 자체의 부족과 기법 등의 한계로 다소 부족한 것이 현실이었으며, 서론에서 제기한 프로세스 이해 부족 부분을 일정 부분 재확인하는 결과라고 해석할 수 있다.

둘째, 1990년대 북한 대기근과 토지황폐화 현상에는 여러 차원의 사전징후를 확인할 수 있었다. 1990년대 북한 대기근과 토지황폐화 현상은 적어도 1980년대 중반, 빠르게는 1980년대 초반에 사전 징후가 나타났다. 특히 1980년대 초반의 토지황폐화 경향에서 점진적인 회복력의 감소를 나타내는 신호가 포착되었다면, 1980년대에 후반에는 토지황폐화 경향에서

급격한 변화를 나타내는 신호가 포착되는 등 신호가 커지고 불안해지는 경향을 관찰할 수 있었다. 이는 단순히 조기경보신호 도출 및 시점을 파악할 수 있었을 뿐 아니라, 내부적인 복잡적응계 프로세스를 유추할 수 있는 좋은 자료가 될 수 있었다. 이는 2장에서 확인하였던 문헌과 통계를 통해서 교차 검증되었으며, 4장의 연구 결과에서도 두 개의 변곡점의 형태로 나타났다.

셋째, 다행위자시스템 모형을 구축하여 1990년대 북한 대기근 이전의 북한 농업 경관을 대표할 수 있는 모형을 구축한 결과, 현실에서 나타났던 복잡적응계적 창발현상이 유사하게 재현되었다. 2장에서 확인한 북한의 불확실한 토지황폐화와 식량생산 감소 요인 간 인과관계가 명확하지 않게 드러났음에도 불구하고, 행위자의 간단한 규칙과 단순화한 환경조건을 통해 이를 극복할 수 있는 방법론적 대안을 제시한 것으로서 그 의미가 크다. 그리고 외부 식량지원 시나리오를 통해 외부 자원 제공이 상당 부분 북한의 토지황폐화와 식량생산 저하 위험을 지연시킬 수 있다는 결론을 내릴 수 있었다. 그러나 근본적인 시스템의 붕괴는 막을 수는 없으며 다른 대안이 필요하다는 결론도 함께 내릴 수 있었다.

이 연구는 토지황폐화와 식량생산 감소 문제의 핵심적인 부분으로 언급되고 있으나, 기존 북한 토지황폐화와 식량생산 감소에 관한 연구에서 잘 적용하지 않던 사회생태시스템 기반의 인식체계와 복잡적응계적 방법론을 적용하였다. 이를 바탕으로 위 결론처럼 1990년대 북한 대기근에 대한 새로운 방식으로 해석할 수 있었다. 또한, 서론에서 언급하였던 기존연구의 한계와 학제 간 분절을 극복하는 새로운 시각을 제공하였다는 의의가 있다. 구체적으로는 1990년대 북한 대기근의 예방을 위한 학술적 연구로서 사회생태시스템 기반의 인식체계와 복잡적응계 방법론, 사전예방 원칙의 중요성을 다음과 같이 확인할 수 있었다.

첫째, 사회생태시스템 기반의 인식체계는 북한의 토지황폐화와 식량생산 감소로 인한 1990년대 대기근의 발생과정을 설명하는데 핵심적인 부분이며, 이를 위해서는 복잡적응계적 방법론의 적용이 필요함을 확인할 수 있었다. 1990년대 북한 대기근 이후 여러 분야에서 북한의 토지황폐화와 식

량생산 감소에 관한 많은 연구성과가 있었다. 2장에서 기존 연구성과를 재구성함으로써 북한 토지황폐화와 식량생산 감소와 관련된 많은 부분에서 시차와 같은 새로운 사실을 밝히고 프로세스 모형을 유추해 낼 수 있었다. 하지만 관점의 차이와 용어의 혼란, 관계성에 대한 이해 부족으로 많은 부분은 완전히 밝혀지지 않는 사실로 남았다. 4장에서 설계·모의하였던 사회생태시스템 기반의 다행위자시스템 모형은, 관계성의 측면과 외부 환경 요건 등 많은 알려지지 않은 부분을 간단한 가정으로 대체하였음에도 불구하고 기존의 연구에서 구현하기 어려웠던 1990년대 대기근의 창발적 속성을 재현할 수 있게 해 주었다. 이는 북한과 세계의 토지황폐화 현상과 기근에 대한 사회생태적 이해를 위해서는 복잡적응계적 방법론이 필요하다는 선행 연구(e.g. Reynolds *et al.*, 2012)의 주장을 재확인해주는 결과라 할 수 있다. 추가로 학제 간 연구를 통해 관점의 차이를 조정하고 관계성에 대한 자료를 보강한다면 더 좋은 결과가 도출될 수 있다는 가능성 또한 보여주었다고 볼 수 있다.

둘째, 북한의 토지황폐화와 식량생산 감소 문제의 관계성의 측면에서, 되먹임의 연결고리와 이로부터 발생하는 비선형성이 1990년대 북한 대기근의 핵심적 프로세스임을 확인할 수 있었다. 특히 이 둘 사이의 인과관계 중첩으로 인한 되먹임의 연결고리가 1990년대 북한 대기근에 대한 설명에 핵심적인 부분임을 확인하였다. 2장과 3장에서 확인할 수 있었던 북한 토지황폐화 문제와 식량생산 감소 간의 시차를 통해 이들 사이에는 선형적으로 설명하기 어려운 연쇄적인 관계가 있음을 짐작할 수 있었다. 이 시차는 4장의 모형의 내부 지표 확인을 통해 토지황폐화와 식량생산 감소 사이의 상호 인과관계로 인한 연쇄작용으로 설명할 수 있었다. 하지만 이는 이 연구의 서론 초입에서 언급하였듯 토지황폐화와 식량생산에 관한 세계적인 차원의 연구에서는 결코 새로운 시각이 아니다. 이 연구에서 적용한 조기경보신호 도출과 다행위자시스템 모의와 같은 대안적 접근법은 토지황폐화의 되먹임 연결고리와 비선형적 현상을 설명하는데 많이 활용된 바가 있다. 향후 연구에서도 유사한 문제를 겪거나 예상되는 다른 국제적 현상에 관한 연구를 참고하여 토지황폐화와 대기근 위험의 비선형성을 극복하는 연구방안을 모색할 필요가 있다.

셋째, 1990년대 북한 대기근과 같은 토지황폐화와 식량생산 감소로 인

한 문제를 사전에 정밀하게 예측하는 것은 어려우며, 광범위한 방향에서 위험을 저감 할 수 있는 사전예방원칙 중심의 대응이 필요하다는 것을 확인할 수 있었다. 2장의 환원주의적, 단선적 인과관계 중심의 시각에서는 대기근이 임박한 1990년대 초에야 대기근의 징후를 확인할 수 있었던 반면, 복잡적응계적 방법론을 적용한 3장과 4장의 결과에서는 1980년대와 1990년대 초반에 걸쳐 광범위하게 여러 방식으로 징후가 나타남을 확인할 수 있었다. 그러나 3장에서 확인한 여러 차례의 조기경보신호는 1990년대 북한 대기근의 가능성만 나타낼 뿐, 어떤 신호가 결정적으로 대기근을 야기하였는지는 알 수 없다. 즉, 3장의 결과는 토지황폐화와 식량생산 감소로 인한 대기근이 왜 해당 시기에 발생했는지를 설명해줄 수 없다. 또한 4장의 모형 결과에서는 현실과 유사하게 1990년대 중반에 대기근이 발생하였다고 결론 내렸지만, 이는 평균적인 경향에 관해 설명한 것으로 여러 모의에서는 그보다 일찍 혹은 더 늦게 기근시점을 예상하는 결과도 있었다. 결국, 1990년대 북한 대기근은 토지황폐화와 식량생산 감소의 관계와 같은 필연적인 요인 이상으로, 우연적인 요소가 결정적인 요인으로 작용했다고 볼 수 있다. 따라서 대부분의 조기경보신호와 징후가 실제 위험으로 이어지지 않았더라도 인내심을 가지고 지속해서 회피해야 1990년대 대기근과 같은 문제를 예방할 수 있다는 것을 알 수 있게 해 준다.

이 연구는 남북교류협력과 지속가능한 한반도 사회생태시스템 유지를 위한 정책에 여러 가지 함의를 제공한다. 이 연구의 결과를 통해 제시할 수 있는 북한 한반도의 지속가능성과 회복력 유지를 위한 방안은 다음과 같으며, 일반적인 정책 기조에서부터 세부적인 기근 방지 대책까지 단계적으로 기술하고자 한다.

첫째, 북한에 대한 정책 기조와 접근은 적어도 5년 이상의 장기적인 시각이 필요하다. 특히 북한의 토지황폐화 문제와 대기근 위험 저감과 같은 사회생태적 문제는 창발현상 발현을 고려하여 장기적인 시각으로 접근해야 한다. 최근<sup>147)</sup> 남한의 대북 정책 기조는 대통령의 임기(5년)에 따라 크

---

147) 빠르면 현 단임제 대통령제가 시작된 1980년대 후반을 말하고, 적어도 지난 10년간 이명박 정부(2008-2013), 박근혜 정부(2013-2017), 문재인 정부(2017-)를 말한다.

게 변화해 왔다. 정권 초에는 대통령과 소속 정당의 정치적 시각에 따라 의욕적으로 대북 정책을 수립하지만, 대통령의 임기 말에는 학계·언론·대중 등 모든 부분에서 해당 정책의 효과를 의심하고 대북 정책의 동력이 약해지는 모습을 확인할 수 있다. 과거 정책에 대한 부정적인 낙인은 새로운 대통령의 임기가 시작되었을 때, 대북 정책의 전면적인 변경의 원인 중 하나로 작용하였을 것이고 악순환이 이어졌을 것이다. 2~3장에서 확인하였으며 4장에서 모형으로 재현한 북한 토지황폐화 문제와 대기근 발생의 시차 문제는, 북한에 대한 정책 결정과 북한을 둘러싼 외부환경의 영향이 상당 기간(약 5년 내외)의 시차를 두고 북한의 사회생태시스템에 영향을 끼침을 보여준다. 따라서 이 연구에서 보여주는 시차 문제는, 대북 정책에 대해 평가할 때 장기적인 안목으로 인내심을 가져야 함을 보여준다. 정책기조의 급격한 변화는 아무리 작은 일이라도 창발적 질서를 일으켜 어떠한 변화를 초래할지 알 수 없으므로 자제하거나 병행(two-track)하는 형태로 진행할 필요가 있다. 10년 이상의 단위로 진행되는 국토계획이나 교과과정의 수립과 마찬가지로 장기적 남북교류 협력 정책이 수립되고, 장기간에 걸친 평가가 이루어지는 것이 합리적인 대안이 될 수 있다.

둘째, 북한에 대한 정책적 인식은 사회생태시스템에 기반을 두고 총체적으로 이루어져야 한다. 1990년대 북한 대기근과 토지황폐화 현상을 이해하지 않고서는, 현재 북한의 정치와 경제체제를 이해할 수 없다. 반대로 북한의 산림황폐화는 북한의 정치적 결정과 경제 상황을 이해하여야만 원인을 이해할 수 있다. 따라서 북한의 현재에 대해서 이해하기 위해서는 북한의 사회경제적인 요소뿐만 아니라 자연환경 요소를 병행하여 총체적으로 이해할 필요가 있다. 사회경제적인 요소는 북한의 언론매체, 북한의 탈북자 연구 등 다양한 방면으로 다각적으로 이루어지고 있는 것으로 여겨진다. 북한의 자연환경 요소에 관한 연구는 위성영상을 이용한 연구로 한정될 수밖에 없는데, 현재 농업(e.g. 홍석영 등, 2015), 산림(e.g. 김경민 등, 2020), 안보 등의 주제 중심 연구가 주를 이루며 종합적이고 다각적인 접근을 찾기는 어렵다<sup>148)</sup>. 북한에 대한 종합적인 위성영상 기반 모니터링 체계를 이를 하나로 연결한다면, 북한에 대한 사회생태적 인식과 총체적·종합적 인식을 가능하게 하고, 북한에 대한 지식과 이해의 폭을 넓힐 수

148) 비공개 영역에서는 진행할 수도 있으나 현재 수준에서는 알 수 없다.

있을 것이다.

셋째, 북한의 예측 불가능성과 의외성은 복잡적응계적 방법론으로 접근할 필요가 있다. 1990년대 북한의 대기근뿐만 아니라 북한의 국제정치적 행동 등 많은 부분에서 북한은 예측 불가능성과 의외성의 문제를 나타내고 있다. 3장의 조기경보신호와 4장의 다행위자시스템 방법론이 좋은 대안으로 작용할 수 있다. 조기경보신호 도출방법은 북한의 급격한 태도와 상황변화의 징후를 포착하거나, 발생하였을 때 사후적으로 징후를 평가하는 데 활용할 수 있다. 또한 다행위자시스템은 정책의사결정시스템으로 활용하여, 남한이 북한 관련 정책을 어떤 형태로 수행할 때 예측불가능성과 의외성이 나타나는지를 확인하는 모형으로 활용이 가능하다.

넷째, 북한의 기근 위험 저감과 지속가능한 사회생태시스템을 위해서는 폐쇄계를 탈피할 필요가 있다. 서론에서 언급하였던 것처럼 17세기 한반도의 대기근과 1990년대 북한 대기근의 공통점 중 하나는 고립으로 인하여 외부와의 무역과 교류가 극히 적은 폐쇄계였다는 점이다. 4장의 시나리오 모의 결과에서 확인할 수 있듯 식량의 외부 공급이 증가하면 북한이 대기근으로 이행하는 시간을 지연시켜주는 효과가 있었다. 물론 식량의 외부 공급만으로는 모형의 붕괴를 막을 수 없다는 결론도 함께 도출되어 제한적이기는 하지만, 최소한 본질적인 대응체계를 마련하기 위한 시간을 마련할 수 있다는 것도 중요한 부분이라 할 수 있다.

다섯째, 1990년대 북한 대기근이 북한과 한반도에 언제든 재현 가능하다고 생각하고 광범위한 사전예방원칙을 수립할 필요가 있다. 4장 후반부에서 확인하였듯 식량의 외부 공급 정책대안에도 불구하고 대기근 위험 발생 시점을 뒤로 미룰 뿐, 결정적으로 문제를 제거하지는 못한 연구 결과가 도출되었다. 이러한 본질적인 위험은 한반도가 사회생태적으로 가지고 있는 한계일수도 있으며, 기후변화와 환경변화에 따라 전 지구가 봉착할지도 모를 사회생태적 회복력의 한계일 수도 있다. 한반도 차원 또는 전 세계적 차원의 기근위험을 저감하기 위해서는 당위적이겠지만 궁극적으로는 생태압력, 그 중 인구압력을 줄이고자 하는 노력이 필요하다. 이를 위해서는 현재보다 더 기술적으로 발전하여 생태압력을 줄일 방법을 개발하거나, 현재 수준보다 많이 후퇴하더라도 지구 또는 한반도의 지속가능성을 유지하여야 한다는 사회적 합의가 필요한 실정이다. 그러나 이 둘 다 현재 수

준으로는 현실적이지 않다. 이에 대한 여러 가지 대안을 설정하고 시험함으로써 궁극적인 지속가능성 유지를 위한 방안에 한걸음 다가갈 필요가 있다.

이 연구는 많은 부분에서 발전의 여지가 있다. 특히 3장의 경우 자료를 통합하는 통합지표를 개발하거나 추가자료 보강, 개선 등을 진행함으로써, 4장의 경우는 다른 시나리오를 개발하여 적용해 봄으로써 발전시킬 여지가 충분하다고 본다. 또한 3장과 4장의 방법론을 결합한다면 장기적으로 토지황폐화와 기근 예방을 위한 복잡적응계적 모형화 연구의 틀로서 활용 가능할 것으로 기대할 수 있다. 후속 연구를 통해 이 부분을 보완하여, 작가는 북한이 겪을 사회생태적 위험을 회피할 방안을, 거시적으로는 한반도와 세계가 겪을 사회생태적 위험을 회피할 수 있는 전략을 모색할 수 있는 방법론으로 확장하고자 한다.

# 참고문헌

## 1. 국내 문헌

- Ariuntsetseg, E., 염재홍, 2013, 행위자 기반 공간 모델을 이용한 구제역 확산 시뮬레이션, 한국측량학회지 31(3), 209-219.
- lv, G. T., Zhu, Y., Liu, W. Q., Huang, X., Li, C.L., Cui. G. S., 2019, 한반도 식생의 녹색화에 대한 시계열적 분석, 한국기후변화학회지, 10(4), 479-489.
- 강성운, 1999, 「북한학」연구의 현황과 과제; 북한연구학회 편, 분단 반세기 북한 연구사, 한울아카데미, pp.13-18.
- 고유환, 2015, 분단 70년 북한연구 경향에 관한 고찰, 통일정책연구, 24(1), 29-54.
- 공우석, 2006, “북한의 자연생태계”, 집문당.
- 권태환·신용하, 1977, 조선왕조시대 인구추정에 관한 일시론, 동아문화, 14, 289-330.
- 김경량·이광석·홍성규, 2005, “북한 농업의 개혁-전망과 과제”, 한울아카데미
- 김경민·임중빈·김은희·양아람·김서린·박진우·박주원, 2020, "위성영상과 AI를 활용한 북한산림정보 구축 방법 개발", 국립산림과학원.
- 김덕진, 2008, “대기근, 조선을 뒤덮다”, 푸른역사
- 김도형, 2006, MODIS 다중 시기 영상을 이용한 북한 지역의 토지피복 변화 분석, 서울대학교 환경대학원 환경조경학과 조경학석사학위논문
- 김동진, 2017, 15-19세기 한반도 산림의 민간 개방과 숲의 변화, 역사와 현실, 103, 77-118.
- 김동한, 2012, 행위자 기반 도시모형의 장점 및 한계 분석에 관한 연구, 국토연구 75:69-85.
- 김동한·서태성·구형수·강민규·성혜정·김은빈, 2014, “행위자 기반의 공간 변화 시뮬레이션 모형구축과 국토도시정책 활용방안 연구”, 국토연

- 구원 정책보고서.
- 김란희·김현우·이재희·이승훈, 2016, 위성자료를 이용한 북한지역 토지피복 및 식생변화 추정, 국토연구, 90, 117-128
- 김명은, 2015, UN사막화방지협약 논의 동향, 세계농업, 184, 201-209.
- 김문기, 2011, 기후변동과 역사 : 17세기 중국과 조선의 재해와 기근, 이화사학연구, 43, 71-129.
- 김상욱, 2002, 지형조건을 고려한 북한지역 산림황폐화 변화조사, 통일과 국토, 10, 125-134
- 김연철, 1997, “북한의 배급제 위기와 시장개혁 전망”, 삼성경제연구소
- 김영훈·전형진·문순철, 2001, “북한 집단농장의 분배제도에 관한 연구”, 한국농촌경제연구원.
- 김영훈·지인배, 2006a, 북한 농업 현황과 전망, KERI 북한농업동향, 7(4), 3-14.
- 김영훈·지인배, 2006b, 식량난 이후 북한의 농업과 농정변화 분석, 1995-2005년, 한국농촌경제연구원
- 김재호, 2010, 조선후기 한국 농업의 특징과 기후생태학적 배경, 비교민속학, 41, 97-127.
- 김준하·김범조·정희원·신소라, 2018, “환경통계 및 데이터 분석”, 한나라아카데미.
- 김홍순, 2008, 조선후기 산림정책 및 산림황폐화-시장주의적 고찰과 그에 대한 비판, 한국지역개발학회지, 20(2), 169-192.
- 나유경·이승호·조창현, 2012, 극한기후 시 의사결정 변화를 고려한 ABM 연구 - 폭우·폭설 시 교통수단 선택을 사례로, 한국경제지리학회지, 15(2), 304-313.
- 남민지, 2010, 2008년 북한 인구센서스 결과, KERI 북한농업동향, 12(1), 3-14.
- 남성욱, 2016, “현대 북한의 식량난과 협동농장 개혁(개정판)”, 한올아카데미
- 도나영·강신규·명수정·천태훈·이지혜·이종범, 2012, MODIS 광합성유효복사흡수율과 WRF 기상자료를 이용한 북한지역의 총일차생산성 추정, 한국원격탐사학회지, 28(2), 215-226.

- 명수정, 2016, “토지환경 분야의 지속가능발전목표(SDGs) 이행을 위한 정책 방향”, 한국환경정책·평가연구원.
- 명수정·이훈종·허학영·Kim, Y. · Moores, N.· Borzée, A., 2020, “지속 가능한 한반도 자연생태계 보존을 위한 남북환경협력 연구”, 한국환경정책·평가연구원.
- 문경연·강환우·백인립·이수철·정소민·윤설화, 2015, 북한 기근의 원인 분석: FAD, FED 접근법에 관한 비판적 고찰, 아태연구, 22(2) 77-109.
- 박경석, 2006, 북한의 산림현황 및 산림정책, KREI 포커스, 15(3), 1-21.
- 박경석·이성연·박소영. 2011, 북한의 경제사회적 여건을 고려한 황폐산림복구 기본방향 연구, 한국임학회지, 100(3), 423-431.
- 박재수·이재수, 2019, 아파트 매매가격과 부동산 온라인 뉴스의 교차상관관계와 인과관계 분석- 온라인 뉴스 기사의 비정형 빅데이터를 활용한 감성분석 기법의 적용, 국토계획, 54(1), 131-147.
- 박수진, 2014, 한반도 지형의 일반성과 특수성, 그리고 지속가능성, 대한지리학회지, 49(5), 656-674.
- 박수진·안유순·신유진·이수연·심우진·문지윤·정관용·김일권·허동숙·성주한·박찬열, 2015, 다행위자시스템(Multi-Agent System)을 이용한 토지이용 변화와 그 영향에 대한 연구: 산림정책의 변화에 따른 가리왕산과 그 일원의 토지이용변화를 사례로, 대한지리학회지 50(3), 1-22.
- 박종화, 2008, 위성영상을 이용한 북한지역의 다락밭 분석, 제 3장; 윤여창·박동균·박종화·전효택·최종근·허은녕·윤순진, 2008, 남북한 환경정책 비교연구 1, 서울대학교출판부
- 박종화·유재심, 2009, 원격탐사를 이용한 북한의 산림황폐화 현황 조사, 환경논총, 48, 3-24.
- 박희진, 2014, 역사인구학적 관점으로 해석하는 조선후기, 역사와 현실, 93, 505-528.
- 부경생·김성필·김운근·김종환·김채수·류인수·박규택·박근용·박석홍·손해룡·유병일·이근상·이실관·임상철·최장경, 2001, “북한의 농업 : 실상과

- 발전방향”, 서울대학교출판부
- 서유석, 2008 북한의 3대 개조사업의 전개와 현황, 북한학연구 4(2), 103-128.
- 신혜섭, 2014, An Agent-based Approach for Modelling Spatial Transmission Processes of Foot-and-mouth Disease in Korea 2010-11, 서울대학교 지리학과 석사학위 논문.
- 안유순, 2013, “다행위자시스템(Multi-Agent System)을 이용한 북한 토지황폐화의 모형구축 및 분석”, 서울대학교 지리학과 석사학위 논문.
- 안유순·박수진, 2018, 북한의 토지황폐화와 지속가능한 발전을 위한 의사결정시스템 구축, 260-307; 정근식·최규빈 편, 2018, “남북한 협력과 발전을 위한 기초연구 1 - 북한의 현실과 남북협력”, 진인진.
- 안유순·허동숙·박수진, 2017, 국유림의 경제적·환경적 효용을 극대화하는 최적 거버넌스 구축방안 : 가리왕산을 사례로, 대한지리학회지, 52(3), 321-340.
- 염종민·한경수·이창석·박운영·김영섭, 2008, SPOT/VEGETATION NDVI 자료를 이용한 북한지역 식생 변화 탐지, 한국지리정보학회지, 11(2), 28-37.
- 오창화·김영호, 2016, 공간 회귀와 공간 필터링을 이용한 서울시 젠트리 피케이션의 발생 원인 및 특징 분석, 한국도시지리학회지, 19권 3호, 71-86.
- 유재심, 2010, 생물계절 의사결정 분지도에 의한 북한 토지피복 분류기법 연구, 서울대학교 환경대학원 환경조경학과 조경학석사학위논문
- 유재심·김경민, 2015, 북한 산림의 시·공간 변화와 황폐화 추동, 한국환경복원기술학회지, 18(6), 73-83.
- 윤영수·채승병, 2005, “복잡계 개론”, 삼성경제연구소.
- 이동근·오영출·김재욱, 2007, A/R CDM을 위한 북한지역의 산림변화 연구, 한국환경복원녹화기술학회지, 10(2), 97-104.
- 이민부·김남신·최한성·신근하, 2003a, GIS와 RS를 이용한 토지피복 및 식생 분포의 시·공간적 변화-평안북도 서부 지역을 중심으로, 대한지리학회지, 38(5), 835-848

- 이민부·김남신·강철성·신근하·최한성·한옥, 2003b, 북한 회령지역의 농경지 변화에 따른 토양침식 추정, 한국지역지리학회지, 9(3), 373-384.
- 이민부·김남신·한옥·한주연·최한성·강철성·신근하, 2006, 북한의 환경변화와 자연재해, 한올아카데미
- 이민부·김남신·金石株·김항덕, 2008, 임진강유역의 토지이용에 따른 지표침식에 관한 연구, 대한지리학회지, 43(3), 263-275.
- 이석, 2004a, 1980년대 북한의 식량생산, 배급, 무역 및 소비 : 식량위기의 기원, 현대북한연구, 7(1), 41-86.
- 이석, 2004b, 1994-2000년 북한 기근: 초과 사망자 규모와 지역별 인구변화, 국가전략, 10(1), 117-145.
- 이석, 2004c, "1994~2000년 북한기근 : 발생, 충격 그리고 특징", 통일연구원
- 이석호·김감영, 2019, 공간통계기법을 이용한 암 발생율과 지리·환경적 특성과의 연관성 분석, 한국지도학회지, 19(3), 57-74.
- 이승호·정성학·송장호, 1998, 원격탐사에 의한 북한의 산림자원조사, 산림과학논문집, 58, 1-13
- 이우연, 2003, 18·19세기 산림황폐화와 농업생산성, 경제사학, 34, 31-57.
- 이종덕·박인선·황기연, 2015, 행위자기반모형을 활용한 Personal Mobility와 Partial Autonomous Vehicle의 교통혼잡개선효과 분석, 교통연구 22(1), 27-44.
- 이종석, 2000, “새로 쓴 현대북한의 이해”, 역사비평사
- 이종호, 2003, 교통시스템분석시 에이전트기반모형기법의 적용, 대한교통학회지 21(1), 147-156.
- 이형규·오명관, 2018, 다시기 위성영상을 이용한 북한 전체의 산림 변화 특성 분석, 한국산학기술학회 논문지, 19(1), 633-638.
- 이훈종, 2020. 북한의 토지이용과 2030년대 생태계서비스 가치변화 특성 및 전망. 대한지리학회지, 55(2), 97-121.
- 이희연·노승철, 2012, “고급통계분석론-이론과 실습”, 법문사
- 전상은·신동빈, 2018, 공간 빅데이터를 활용한 행위자 기반 전염병 확산 예측 모형 구축에 관한 연구-서울특별시 메르스 사태를 중심으로,

- 한국지리정보학회지, 21(2), 94-106.
- 정관용·양희문·김석권·박수진, 2012, 환경요인의 다계층성을 고려한 생태 지역 분류, 대한지리학회지, 47(5), 654-676.
- 정광민, 2005, “북한기근의 정치경제학 : 수령경제·자력갱생·기근”, 시대정신.
- 조성진·Bellemans, T.·조창현·최기주, 2017, 활동기반모형을 활용한 유연근무제의 교통부분 영향 연구, 대한교통학회지, 35(6), 511-524.
- 최병택, 2021, 조선후기 산림황폐화 현상과 일제 당국자의 산림 문제 인식 검토, 역사와경계, 118, 47-77.
- 하림·신형진·김성준, 2007, 위성영상을 이용한 기후변화에 따른 미래 식생정보 예측 기법 제안, 한국지리정보학회지, 10(3), 58-69.
- 허동숙·안유순·박수진, 2016, 토지이용 및 토지피복 변화 모델링(LUCC Modeling)에서의 행위자 의사결정 체계 구축 방안-가리왕산 일대를 중심으로, 국토지리학회지, 50(1), 63-80.
- 홍석영·임상규·이승호·이정철·김이현, 2008, 위성영상을 이용한 북한의 농업환경 분석 I. Landsat TM 영상을 이용한 북한의 지형과 토지 피복분류, 한국환경농학회지, 27(2), 120-132
- 홍석영·최은영·김건엽·강신규·김이현·장용선, 2009, MODIS NDVI를 이용한 북한의 벼 수량 추정 연구, 2009 대한원격탐사학회 춘계학술대회 논문집, 116-120.
- 홍석영·민병걸·이지민·김이현·이경도, 2012, RapidEye영상을 이용한 북한의 논 면적 산정, 한국토양비료학회지, 45(6), 1194-1202.
- 홍석영·나상일·이경도·김용석·백신철, 2015, MODIS NDVI와 강수량 자료를 이용한 북한의 벼 수량 추정 연구, 한국원격탐사학회지, 31(5), 441-448.

## 2. 국외 문헌

- Alibakhsik, S., Goren, T., Rautiainen, M., and Naimi, B., 2017, Remotely-Sensed Early Warning Signals of a Critical Transition in a Wetland Ecosystem, *Remote Sensing*, 9(4), 352.
- An, L., 2012, Modeling human decisions in coupled human and natural systems: Review of agent-based models, *Ecological Modeling*, 229, 25-36.
- An, Y. and Park, S., 2020, An Agent-Based Model for Simulating Land Degradation and Food Shortage in North Korea, 83-100, In : Carmichael, T., and Yang, Z.,(eds.), 2020, *Proceedings of the 2018 Conference of the Computational Social Science Society of the Americas*, Springer.
- Bai, Z., Dent, D., Olsson, L., and Schaepman, M., 2008, Proxy global assessment of land degradation, *Soil Use and Management*, 24(3), 223-234.
- Basson, G. 2010, *Sedimentation and sustainable use of reservoirs and river systems*. International Commission on Large Dams (ICOLD) Bulletin.
- Bousquet, F., Bakam, I., Proton, H., Le Page, C., 1998. Cormas: common-pool resources and multi-agent Systems. *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, 1416, 826-838.
- Bridges, E., and Oldeman, L., 2019, Food production and environmental degradation, in Bridge, E., Hannam, I, Oldeman, L., de Vires, F., Scherrer, S., Sombatpanit, S.,(eds.) 2019, *Response To Land Degradation*, CRC Press, pp,36-43.
- Carpenters, S. R., and Brock, W. A., 2011, Early warnings of unknown nonlinear shifts: a nonparametric approach, *Ecology*, 92(12), 2196-2201.

- Chan, S., 2001, Complex Adaptive Systems, *ESD.83 Research Seminar in Engineering Systems*, October 31, 2001/November 6, 2001, (<http://web.mit.edu/esd.83/www/notebook/Complex%20Adaptive%20Systems.pdf>)
- Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V., and Böhner, J. 2015, System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4, *Geoscience Model Development*, 8, 1991-2007, doi:10.5194/gmd-8-1991-2015
- Costanza, R., D'arge, R., Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'neill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P., Belt, M., 1997, The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387, 253-260.
- Costanza, R., de Groot, R., Sutton, P., van der Ploeg, S., Anderson, S. J., Kubiszewski, I., Farber, S., and Turner, R... 2014. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 26, 152-158.
- Curran, P., 1988, The Semivariogram in Remote Sensing : An Introduction, *Remote Sensing of Environment*, 24. 493-507.
- Dakos, V., and Lahti, L., 2013, R Early Warning Signals Toolbox, *the R Project for Statistical Computing*, available at <http://cran.r-project.org/web/packages/earlywarnings/index.html>
- Dakos, V., Carpenter, S.R., Brock, W.A., Ellison, A.M., Guttal, V., Lves A.R., Kéfi, S., Livina, V., Seekell, D.A., van Nes, E. H., and Scheffer, M., 2012. Methods for Detecting Early Warnings of Critical Transitions in Time Series Illustrated Using Simulated Ecological Data. *PLoS ONE* 7(7), e41010.
- Dakos, V., Scheffer, M., van Nes, E. H., Petoukhov, V., and

- Held, H., 2008, Slowing down as an early warning signal for abrupt climate change, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(38), 14308-14312.
- Dakos, V., van Nes, E., Donangelo, E., Fort, H., Scheffer, M., 2010, Spatial correlation as leading indicator of catastrophic shifts, *Theoretical Ecology*, 3, 163-174.
- Deadman, P., Robinson, D., Moran, E., Brondizio, E., 2004, Colonist Household Decisionmaking and Land-use Change in the Amazon Rainforest : an Agent-based Simulation, *Environment and Planning, Planning and Design*, 31, 693-709.
- Dean, J.S., Gumerman, G. J., Axtell, R. L., Swdlund, A. C., Parker, M. T., and McCarroll, S., 2000, Undertanding Anasazi Culture Change Through Agent-Based Modeling, 179-206. In: Kohler, T. A., and Gumerman, G. J.(eds.), 2000, *Dynamics in Human and Primate Societies : Agent-Based Modeling of Social and Spatial Processes*, Oxford University Press.
- Dong Y., Ren, Z., Wangm Z., Yu, Q., Zhu, L., Yu, H., Bao, G., 2020, Spatiotemporal Patterns of Forest Changes in Korean Peninsula Using Landsat Images During 1990-2015: A Comparative Study of Two Neighboring Countries, *IEEE Access*, 8, 73623-73633.
- Dubovyk, O, 2017, The role of Remote Sensing in land degradation assessment : opportunities and challenges, *European Journal of Remote Sensing*, 50(1), 601-613.
- Eswaran, H., Lal, R., Reich. P., 2001, Land degradation: an overview. in Bridges, E.M., Hannam, I.D., Oldeman, L.R., Pening de Vries., F.W.T., Scherr, S.J.. Sompatpanit, ed. Responses to Land Degradation. Proc. 2nd. International Conference on Land Degradation and Desertification, New

Delhi : Oxford Press

- Eswaran, H., Lai, R., Reich, P., 2019, Land degradation : An overview, in Bridge, E., Hannam, I., Oldeman, L., de Vries, F., Schrerr, S., Sombatpanit, S.,(eds.) 2019, Response To Land Degradation, CRC Press, pp. 20-35.
- Evans, T.P., Kelley, H., 2004, Multi-scale Analysis of a Household Level Agent-based Model of Landcover Change, *Journal of Environmental Management*, 72, 57-72
- Fujiwara K, Kudoh J., 2005, NDVI analysis in Korea with NOAA AVHRR images. In *25th Anniversary International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2005: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2005.* 3067-3069.  
<https://doi.org/10.1109/IGARSS.2005.1526484>
- Genin, A., Majumder, S., Sankaran, S., Danet, A., Guttal, V., Schneider, F., Kefi, S. 2018. Monitoring ecosystem degradation using spatial data and the R 'spatialwarnings'. *Methods in Ecology and Evolution*, 9(10), 2067-2075.
- Gomiero, T., 2016, Soil Degradation, Land Scarcity and Food Security : Reviewing a Complex Challenge, *Sustainability*, 8, 281
- Graler, B., Pebesma, E. and Heuvelink, G., 2016. Spatio-Temporal Interpolation using gstat. *The R Journal*, 8(1), 204-218.
- Geist, H., and Lambin, E. 2004, Dynamic Causal Patterns of Desertification, *BioScience*, 54(9), 817-829.
- Heckbert, S., Baynes, T., and Reeson, A., 2010, Agent-based Modeling in Ecological Economics, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1185: 39-53.
- Heckbert, S., 2013, MayaSim: An Agent-Based Model of the Ancient Maya Social-Ecological System, *Journal of Artificial*

- Societies and Social Simulation*, 16(4), 11.
- Hoffmann, M., Kelley, H., Evans, T., 2002, Simulating Land-Cover Change in South-Central Indiana : an Agent-Based Model of Deforestation and Afforestation, 219-248, in: Janssen, M. A.(ed.) 2002, *Complexity and Ecosystem Management-International Society for Ecological Economics*, Edward Elgar Publishing
- Holland, J. 2006, Studying Complex Adaptive System, *Journal of Systems Sciences and Complexity*, 19, 1-8.
- Holm, A., Cridland, S., Roderick M., 2003, The use of time-integrated NOAA NDVI data and rainfall to assess landscape degradation in the arid shrubland of Western Australia, *Remote Sensing of Environment*, 85(2), 145-158.
- Holmes E.E., Ward E.J., Scheuerell M.D., 2014, *Analysis of Multivariate Time Series Using the MARSS package. V 3.9*. Northwest Fisheries Science Center, NOAA, Seattle, WA, USA
- Ives, A. R., and V. Dakos. 2012. Detecting dynamical changes in nonlinear time series using locally linear state-space models. *Ecosphere*, 3(6), 58.
- Jensen, J. R., 2005, *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*, 3rd Edition, 임정호·박종화·손홍규 역, 2005, 원격탐사와 디지털 영상처리, 시그마프레스
- Julien, Y. and Sobrino, J. A., 2009, Global land surface phenology trends from GIMMS database, *International Journal of Remote Sensing*, 30(13), 3495-3513.
- Juo, A., and Wilding, L., 2019, Land and civilization: An historical perspective, in Bridge, E., Hannam, I, Oldeman, L., de Vires, F., Scherrer, S., Sombatpanit, S.,(eds.) 2019, *Response To Land Degradation*, CRC Press, pp,13-19
- Kéfi, S., Guttal, V., Brock, W. A., Carpenter, S. R., Ellison, A.

- M., Livina, V. N., Seekell, D. A., Scheffer, M., van Nes, E. H., and Dakos, V., 2014. Early warning signals of ecological transitions: methods for spatial patterns. *PloS one*, 9(3), e92097.
- Kriebel, D., Tickner, J., Epstein, P., Lemons, J., Levins, R., Loechler, E. L., Quinn, M., Rudel, R., Schettler, T. and Stoto, M., 2001, The precautionary principle in environmental science, *Environmental Health Perspectives*, 109(9), 871-876.
- Lai, R., and Stewart, B., 2010, Introduction : Food Security and Soil Quality; in Lai, R., and Stewart, B.(eds.), 2010, *Food Security and Soil Quality*, CRC Press, 1-4.
- Lambin, E., Meyfroidt, P., 2011, Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity, *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 108(9), 3465-3472.
- Le, Q. B., 2005, *Multi-Agent System for Simulation of Land-Use and Land Cover Change: a Theoretical Framework and Its First Implementation for an Upland Watershed in the Central Coast of Vietnam*, Ecology and Development Series NO.29
- Le, Q. B., Park, S. J., Vlek, P, Cremers, A., 2008, Land-Use Dynamic Simulator (LUDAS): A multi-agent system model for simulating spatio-temporal dynamics of coupled human-landscape system. I. Structure and theoretical specification, *Ecological Informatics*, 3, 135-153.
- Le, Q. B., Park, S. J., Vlek, P, 2010, Land Use Dynamic Simulator (LUDAS): A multi-agent system model for simulating spatio-temporal dynamics of coupled human-landscape system 2. Scenario-based application for impact assessment of land-use policies, *Ecological Informatics*, 5,

203-221.

- Le, Q. B., Nkonya, E., and Mirzabaeb, A., 2016, Biomass Productivity-Based Mapping of Global Land Degradation Hotspots; in Nkonya, E., Mirzabaev, A., von Braun, J. (eds.), *Economics of Land Degradation and Improvement-A Global Assessment for Sustainable Development*, Springer Open,
- Le, Q. B., Tamene, L., and Vlek, P. L. G., 2012. Multi-pronged assessment of land degradation in West Africa to assess the importance of atmospheric fertilization in masking the processes involved, *Global and Planetary Change*, 92-93, 71-81
- Lenton, T., Held, H., Kriegler, E., Hall, J.W., Lucht, W., Rahmstorf, S., and Schellnhuber, H. J. ,2008 ,Tipping elements in the Earth's climate system, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105 (6) 1786-1793.
- Lim, K., Deadman, P. J., Moran, E., Brondizio, E., McCracken, S., 2001, Agent-Based Simulation of Household Decision Making and Land Use Change near Altamira, Brazil, 277-310 In : Gimblett, H. R., 2002, *Integrating Geographic Information Systems and Agent-based Modelling*, Oxford University Press.
- Liu J., Dietz T., Carpenter S.R., Alberti, M., Folke, C., Moran, E., Pell, A.N, Deadman, P., Kratz, T., Lubchenco, J., Ostrom, E., Ouyang, Z., Provencher, W., Redman, C.L., Schneider, S.H., Taylor, W.W., 2007, Complexity of Coupled Human and Natural System, *Science*, 317, 1513-1516.
- May, R., Levin, S. & Sugihara, G., 2008, Ecology for bankers, *Nature*, 451, 893-894.
- Miyasaka, T., Le, Q. B., Okuro, T., Zhao, Scholz, R., 2012, An agent-based model for assessing effects of a Chinese PES programme on land-use change along with livelihood

- dynamics, and land degradation and restoration, 6th International Congress on Environmental Modelling and Software - Leipzig, Germany - July 2012
- MLEP(Ministry of Land and Environmental Protection), DPRK, 2012, *Environment and Climate Change Outlook*, Democratic People's Republic of Korea
- Monticino, M., Acevedo, M., Callicott, B., Cogdill, T., Lindquist, C., 2007, Coupled human and natural systems: A multi-agent-based approach, *Environmental Modelling & Software*, 22, 656-663.
- Natsios, A., 1999, *The Politics of Famine in North Korea*, USIP Special Report
- Nijp, J.J., Temme, A., van Voorn, G., Kooistra, L., Hergeveld, G., Soons, M., and Teuling, A., 2019, Spatial early warning signals for impending regime shifts: A practical framework for application in real-world landscapes. *Global Change Biology*. 25, 1905-1921.
- Nkonya, E., Anderson, W., Kato, E., Koo, J., Mirzabaeb, A., von Braun, J., Meyer, S., 2016, Global Cost of Land Degradation, in Nkonya, E., Mirzabaeb, A., von Braun, J., 2016 *Economics of Land Degradation and Improvement - A Global Assessment for Sustainable Development*, pp. 117-166.
- Oberdorfer, D. and Carlin, R., 2013, *The Two Koreas: a Contemporary History*,(Revised and Updated Edition), Basic Books. 이종길·양은미 역, 2014, *두개의 한국*(개정판), 도서출판 길산
- Pace, M., Batt, R., Buelo, C., Carpenter, S., Cole, J., Kurtweil, J., and Wilkinson, G., 2016, Reversal of a cyanobacterial bloom in response to early warnings, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114 (2), 352-357.
- Park S. J., McSweeney, K., and Lowery, B., 2001, Identification

- of the Spatial Distribution of Soils using a Process-based Terrain Characterization, *Geoderma*, 103, 249-272.
- Parker, D. C., Manson, S. M., Janssen, M. A., Homann, M. J. and Deadman, P., 2003, Multi-agent system for the simulation of land-use and land-cover change: a review, *Annals of the Association of American Geographers*, 93, 314-337.
- Pebesma, E.J., 2004. Multivariable geostatistics in S: the gstat package. *Computers & Geosciences*, 30, 683-691.
- Purnomo, H., Mendoza, G. A., Prabhu, R., and Yasmi, Y., 2005, Developing multi-stakeholder forest management scenarios: a multi-agent system simulation approach applied in Indonesia, *Forest Policy and Economics*, 7(4), 475-491.
- Rebaudo, F., Crespo-Perez, V., Silvain, J., and Dangles, O., 2011, Agent-Based Modeling of Human-Induced Spread of Invasive Species in Agricultural Landscapes: Insights from the Potato Moth in Ecuador, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 14(3), 7
- Reynolds J, Smith, D., Lambin, E., Turner, B., Mortimore, M., Batterbury, S., Downing, T., Dowlatabadi, H., Fernandez, R., Herric, J., Huber-Sannwald, E., Hong, J., Leemans, R., Lynam, T., Maestre, F., Ayrza, M., Walker, B., 2007, Global Desertification : Building a Science for Dryland Development, *Science*, 316, 847-851
- Reynolds, J, Grainger, A., Smith, D., Bastin, G., Garcia-barrios, L., Fernandez, R., Janssen M, Jurgens, N, Scholes, R., Veldkamp, A., Verstraete, M, von Maltits, G., Zdruli, P, 2011, Scientific Concepts for an integrated analysis of desertification, *Land Degradation & Development*, 22, 166-183.
- Rietkerk, M., Dekker, S. C., de Ruiter, P. C., and van de

- Koppel, J., 2004, Self-Organized Patchiness and Catastrophic Shifts in Ecosystems, *Science*, 305, 1926-1929.
- Rypdal, M., 2016, Early-Warning Signals for the Onsets of Greenland Interstadials and the Younger Dryas-Preboreal Transition, *Journal of Climate*, 29(11),4047-4056.
- Scheffer, M., Carpenter, S., Foley, J. A., Folke, C., and Walker, B., 2001, Catastrophic shifts in ecosystems, *Nature*, 413, 591-596.
- Scheffer, M., Bascompte, J., Brock, W. A., Brovkin, V., Carpenter, S. R., Dakos, V., Held, H., van Nes, E., Rietkerk, M., and Sugihara, G., 2009, Early-warning signals for critical transitions, *Nature*, 461, 53-59.
- Scheffer, M., Carpenter, S.R., Lenton, T., Bascompte, J., Brock, W., Dakos, V., van de Koppel, J., van de Leemput, I. A., Levin, S. A., van Nes, E., Pascual, M., Vandermeer, J., 2012, Anticipating Critical Transition, *Science*, 338, 344-348.
- Shin, H. 2020. *Assessing Health Vulnerability to Air Pollution in Seoul Using an Agent-Based Simulation*, Doctoral thesis, University of Cambridge. <https://doi.org/10.17863/CAM.65615>
- Shin, H. and Bithell, M., 2019, An Agent-Based Assessment of Health Vulnerability to Long-Term Particulate Exposure in Seoul Districts, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 22(1), 2.
- Taranu, Z. E., Carpenter, S. R., Frossard, V., Jenny, J.-P., Thomas, Z., Vermaire, J. C., and Perga, M.-E.. 2018. Can we detect ecosystem critical transitions and signals of changing resilience from paleo-ecological records? *Ecosphere* 9(10), e02438.
- Trébuil, G., Bousquet, F., Ekasingh, B., Baron, C., Le Page, C., 2005, A multi-agent model linked to a GIS to explore the relationship between crop diversification and the risk of

- land degradation in northern Thailand highlands, 167-189, In: Bousquet F, Trébuil, G, Hardy, B, (eds.). 2005. *Companion modeling and multi-agent systems for integrated natural resource management in Asia*, International Rice Research Institute.
- Turner, K., Anderson, S., Gonzales-Chang, M., Costanza, R., Courville, S., Dalgaard, T., Dominati, E., Kubiszewski, I., Ogilvy, S, Porfirio, L, Ratna, N., Sandhu, H., Sutton, P, Svenning, J., Turner, G., Varennes, Y, Voinov, A., Wratten, S., 2016, A review of methods, data, and models to assess changes in the value of ecosystem services from land degradation and restoration, *Ecological Modeling*, 319.190-207.
- UNEP RRC.AP, 2003, *DPR Korea : State of the Environment*, UNEP
- van der Kniiff, J., J. Jones, and L. Montanarella. 1999. *Soil erosion risk assessment in Italy*. European Soil Bureau.
- van der Kniiff, J., J. Jones and L. Montanarella. 2000. *Soil erosion risk assessment in Europe*. European Soil Bureau.
- Veldkamp, A., Lambin, E. F., 2001, Predicting land use change, Agriculture, *Ecosystems and Environment*, 85, 1-6.
- Verburg, P. H., de Nijs, T. C. M., van Eck J. R., Visser, H. and de Jong K., 2004, A method to analyse neighbourhood characteristics of land use patterns, *Computers, Environment and Urban Systems*, 28, 667-690.
- Vlek, P. L. G., Le, Q. B., Tamene, L., 2008, *Land decline in Land-Rich Africa:A creeping disaster in the making*. CGIAR Science Council Secretariat.
- Vogt, J., Safriel, U., von Maltitz, G., Sokona, Y, Zougmore R., Bastin, G., Hill, J., 2011, Monitoring and assessment of land degradation and desertification: Towards new conceptual

- and integrated approaches, *Land Degradation & Development*, 22, 150-165.
- von Braun, J., Gerber, N., Mirzabaev, A., Nkonya, E., 2013, The Economics of Land Degradation, *ZEF Working Paper Series*, 109.
- Wang, R., Dearing, J., Langdon, P., Zhange, E., Yang, X., Dakos, V., and Scheffer, M., 2012, Flickering gives early warning signals of a critical transition to a eutrophic lake state, *Nature*, 492, 419-422.
- Wilensky, U. 1999. *NetLogo. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling (CCL)*. Northwestern University, Evanston. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D., 1978, Predicting rainfall erosion losses—a guide to conservation planning, *U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook NO.537*
- Zhang, D., Wallin, D. O., Hao, Z., 1997, Rates and patterns of landscape change between 1972 and 1988 in the Changbai Mountain area of China and North Korea, *Landscape Ecology*, 12. 241-254.
- 木村光彦, 1999, 北朝鮮の經濟-起源·形成·崩壞, 創文社, 정재성·김현숙 역, 2001, 북한의 경제-기원·형성·붕괴, 해안

### 3. 인터넷 자료 및 기타

- 기상청(<http://www.kma.go.kr>)
- 기상청 기상자료개방포털(<https://data.kma.go.kr>)
- 산림청(<https://forest.go.kr>)
- 주식회사 지오포커스(<http://geofocus.kr>)
- 환경부 환경공간정보서비스(<https://egis.me.go.kr/>)

China Meteorological Data Service Centre, National  
Meteorological Information Center(<https://data.cma.cn/en/>)  
FAOSTAT(<http://www.fao.org/faostat>)  
International Food Policy Research Institute  
(<https://www.ifpri.org/>)  
NASA Ecocast(<https://ecocast.arc.nasa.gov/>)  
NASA Landsat Science(<https://landsat.gsfc.nasa.gov/>)  
R programs demonstrating use of Dynamic Linear Models,  
Github([https://github.com/SRCarpen/Demo\\_DynamicLinearModels](https://github.com/SRCarpen/Demo_DynamicLinearModels))  
UNCCD(<https://www.unccd.int/>)  
USGS Earthexplore(<https://earthexplore.usgs.gov/>)  
U.S. Energy Information Administration (<https://www.eia.gov/>)  
Worldbank Open Data(<https://data.worldbank.org/>)

## 부 록

부록 1. 연구자료 목록과 속성정보 .....	313
부록 2. AVHRR GIMMS 식생지수를 활용한 북한 토지황폐화의 경향과 공간적 취약지 도출 .....	323
부록 3. 모형기반 조기경보신호 탐지 기법을 통한 연도별 토지황 폐화와 식량생산 감소 조기경보신호 탐지 .....	357
부록 4. 다행위자시스템 모형 인터페이스와 코드 .....	362

## 부록 1. 연구자료 목록과 속성정보

부록 표-1. 연구자료 속성정보 요약

구분		출처	가용 기간*	공간적 속성 (해상도)	설명
위성 영상	식생 지수	NOAA (NASA)	1982- 2015	해상도 1/12 degree (약 8km)	<ul style="list-style-type: none"> <li>미국 NOAA의 극궤도 환경위성인 AVHRR 자료를 활용한 GIMMS 자료 이용</li> <li>15일 간격의 자료로, 시 공간적으로 요약하여 사용</li> </ul>
	지형	USGS (NASA)	단일 시기	해상도 1 arc-second (약 30m)	<ul style="list-style-type: none"> <li>2000년 미국 우주왕복선 엔데버 호에서 촬영한 세계 단위의 지형자료</li> <li>약 27미터 내외 해상도를 30미터로 통일하여 사용</li> </ul>
기후		기상청, 중국 기상청	1973- 2019	27개 지점(북한)	<ul style="list-style-type: none"> <li>기상청에서 구득한 27개 지점에 대한 기온(평균, 최대, 최소 등) 및 강수량 자료</li> <li>1일 단위의 자료로 요약·합산하여 사용</li> <li>외곽지역의 보간을 위해 남한 및 중국 동북지역 자료(중국 기상청)을 보조자료로 활용</li> </ul>
통 계 자 료	식량 관련	FAOSTAT, Worldbank	1961- 2019	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>연 단위 자료</li> <li>경우에 따라 추정치 이거나 결측이 있는 경우가 있음</li> <li>일부 자료의 경우 2~3차 가공 진행</li> </ul>
	에너지 관련	USEIA, Worldbank	1980- 2014	-	
	인구, 기타	Worldbank	1960- 2018	-	

\* 일부 자료는 공간적 위치 또는 세부 데이터 속성에 따라 가용기간에 차이가 있음

이 연구에서는 북한의 토지황폐화와 식량생산 감소 문제에 관한 접근을 위해 다양한 연구자료를 활용하였다. 이 연구를 구성하는 각 장의 목적에 따라 연구 자료와 문헌을 다양하게 활용하였지만, 북한이 가지고 있는 자료의 한계상 공통적으로 사용한 자료가 있으며, 이를 요약하면 부록 표-1과 같다. 특히 북한은 직접방문이 어렵고, 문헌 및 통계자료의 정확도를 담보하는 것이 불가능하기 때문에 위성영상에 대한 의존도가 높았다. 또한 더 좋은 자료가 있더라도, 북한의 토지황폐화와 식량생산 감소와 밀접하게 연관된 1980년대와 1990년대가 반드시 포함된 자료여야 했다.

부록 1에서는 각 장에서 사용하는 공통적인 연구자료의 속성과 기본적인 처리 방안에 대해서 다루며, 구체적인 활용 방법은 각 장에서 설명하도록 한다.

## 1. 식생 위성영상 자료

토지황폐화의 현황을 파악하는데 가장 적절한 방법은 현장조사이며, 식량문제에 대한 현황은 시장가격 및 식량수급상태를 직접 확인하는 것이겠지만 북한에서는 이것이 모두 불가능한 것이 현실이다 때문에 북한의 토지황폐화 및 식량문제에 대한 자연환경적 접근의 대부분과 일부 농업경제적 접근은 위성영상자료에 의한 것이었다(안유순, 2013; 안유순·박수진, 2018). 위성영상을 통한 북한의 토지황폐화 및 식량문제에 대한 연구는 방법론적 측면에서는 피복분류를 통해 산림의 양과 질에 어떤 변화가 있는지를 확인하는 연구와, 식생지수를 이용하여 산림과 농업경관에서의 식물의 활력도가 어떻게 변화하는지에 대한 연구로 나누어진다. 해상도 측면에서는 고해상도 위성을 이용한 구체적인 변화 탐지 연구와, 저해상도 영상을 이용한 전역적 변화 탐지 연구로 나눌 수 있다. 먼저 Landsat, Rapideye와 같은 공간해상도가 높은 영상을 이용하여 피복분류와 같은 구체적인 토지황폐화 경향성 연구가 있었다(이승호 등, 1998; 홍석영 등, 2008; 홍석영 등, 2012), 하지만, 공간해상도가 높은 경우 시간해상도가 낮아지는 교환관계 때문에, 북한 토지황폐화에 대한 위성영상 연구는 주로 AVHRR이나 MODIS와 같은 저해상도지만 시간해상도는 높은 영상들을 이용한 연구가 다수를 점하고 있으며 특히 최근에는 MODIS를 이용한 연구가 많다(김도형, 2006; 유재심, 2009). 그럼에도 불구하고, 이 장에서는 1995년도를 중심으로 북한의 토지황폐화와 식량문제의 경향성을 시·공간적으로 관찰하고자 하므로, 1980년대부터 자료가 구축되어 있으며 시간해상도가 높은 AVHRR영상을 사용할 수밖에 없었다.

AVHRR은 “발전된 고해상도 방사측정기(Advanced Very High Resolution Radiometer)”로, 미국 해양대기청(NOAA; National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 발사한 극궤도 환경위성에 달려 있는 센서를 말하는 것으로, 1978년 8월부터 발사된 TIROS-N위성, 1982

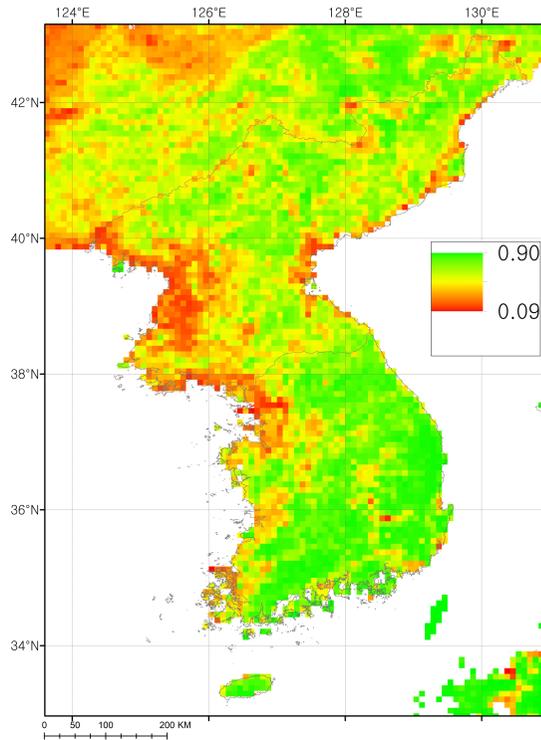
년 이후 발사된 NOAA위성(NOAA-6~19), 에 달려 있다. 이 영상은 토지 피복 특성, 주야간 구름의 상태, 눈, 얼음 등 표면온도 등을 구하는데 사용된다. 가장 정밀한 공간해상도가 약 1km정도로 거칠지만, 하루에 두 번 까지 촬영이 가능하기 때문에 큰 규모의 자료 수집에 유용하다(이상 Jensen, 2005; Julien and Sobrino, 2009 내용을 정리).

AVHRR 영상의 다양한 제공 형태 중 이 연구에서는 미국 항공우주국(NASA)의 Ecocast<sup>149)</sup> 서비스에서 제공되는 GIMMS(Global Inventory Monitoring and Modeling System)영상을 사용하였다. 이 영상은 AVHRR 자료를 NDVI로 변환한 후, 구름 등의 오류 자료를 제거하기 위해, 15일 간의 자료를 합쳐서(최대값) 구축한 자료로, 해상도는 약 8KM이며, 1981년 7월부터 현재까지 자료가 이용 가능하다(Julien and Sobrino, 2009).

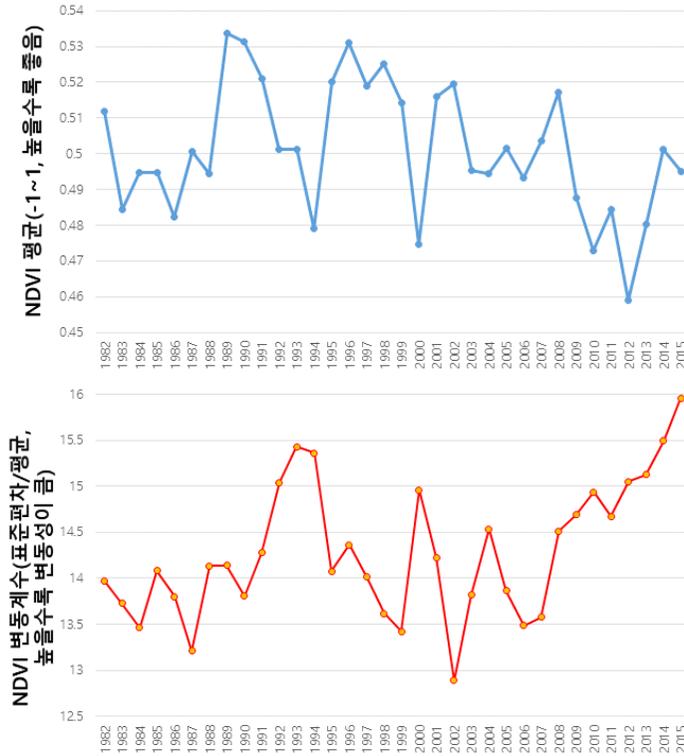
이 연구에서는 한반도 전역에 해당하는 구역의 GIMMS자료를 R “Gimms” 패키지를 사용하여 1981년 7월부터 2015년 12월까지 구득하였으며, 본 자료에서 제공되는 자료 중 QA(품질관리 자료)를 이용하여 구름 등의 에러가 없는 자료로 변환하였다. 그리고 이를 연 단위 자료(연평균)으로 가공하여, 분석에 활용하였다. 그 결과의 예시는 부록 그림-1과 같으며, 북한지역의 정보를 요약하면 부록 그림-2와 같다. 부록 그림-2를 통해서, 북한의 대기근이 있던 1990년대 중반에는 NDVI평균이 상대적으로 낮고 변동성이 큰 결과가 도출되었으며, 최근 10년 사이에 NDVI가 급격히 낮아지고, 변동성이 올라가는 것을 확인할 수 있다.

---

149) <https://ecocast.arc.nasa.gov/>

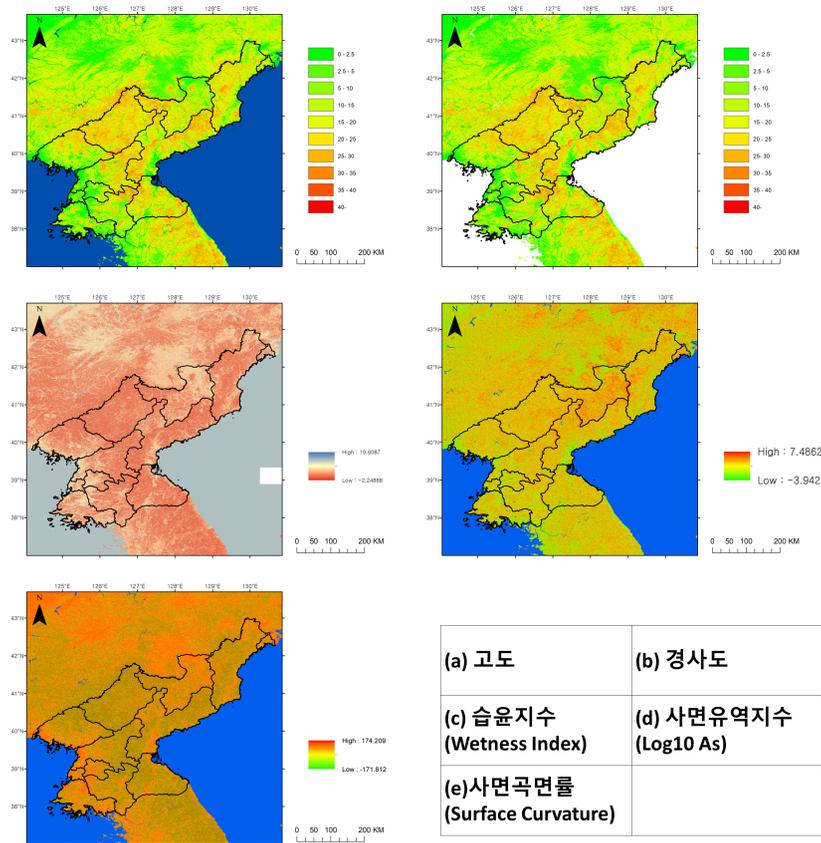


부록 그림-1. AVHRR GIMMS NDVI  
2001년 평균 예시



부록 그림-2. AVHRR GIMMS NDVI 북한지역 정보  
요약(평균 및 변동계수)

## 2. 지형 위성영상 자료



부록 그림-3. 북한의 SRTM 고도자료(a)와 지형분석 자료(b~e)

미국 항공우주국(NASA)에서 우주왕복선을 이용하여 촬영한 약 30m의 공간해상도를 가진 SRTM(Shuttle Radar Terrain Model) 수치고도모형을 사용하였다. 미국 지질정보국(USGS)을 통해 고도자료로 제공되며, 경사도, 사면유역지수, 사면곡면률 등으로 계산한 2차 자료로 변환하였으며 주로 SAGA GIS 2.3.2를 사용하였다(Conrad *et al.*, 2015). 특히 사면유역지수와 습윤지수의 경우 Freeman의 다중흐름법(multiple flow algorithm)방법을 활용하였다. 사면곡면률은 Park *et al.*(2001)에서 제시한 Surface Curvature 계산 프로그램을 활용하였다(부록 그림-3).

### 3. 기상자료

기후 및 기상정보는 토지황폐화와 식량문제의 직접적인 지표로 작용하지는 않지만, 토지이용 및 토지의 생산성에 영향을 끼치는 간접적인 지표로서 그 의미가 있다. 특히 1990년대 중반 북한의 대기근이 일어나기 전 가뭄, 홍수, 폭염과 같은 극한기상사태가 발생하였다는 점에서, 북한의 토지황폐화와 대기근에 있어서 핵심적인 지표라고 할 수 있다.

기상청에서는 기상자료개방포털<sup>150)</sup>을 통해 1973년 1월 1일(13개 지점), 또는 1981년 1월 1일(14개 지점)부터 최근까지의 북한기후 자료를 서비스하고 있다(총 27개 지점, 부록 표-3과 부록 그림-4~6 참조). 기상청에 따르면 해당 자료는 북한이 세계기상기구(World Meteorological Organization)의 기상통신망(GTS)을 통해 보낸 공개 자료를 기상청에서 정리한 것이기 때문에, 1차 자료에 가깝다고 할 수 있다. 해당 자료는 시작 지점부터 현재까지 하루 단위로 기온, 시정, 바람, 구름, 기압, 강수, 습도 등의 정보가 제공된다. 그 중 이 연구에서는 토지황폐화 및 식량문제와 관계가 있다고 여겨지는 기온정보(평균기온, 최고기온, 최저기온)와 강수 정보를 활용하였다. 자료는 1일 단위로 제공되는데, 기상자료 외의 구독 자료는 하루 단위의 자료가 존재하지 않으므로, 식생지수와 같은 15일 단위, 1개월 단위, 1년 단위로 자료의 가공을 진행하였다. 일예로 기온정보는 해당 단위의 평균, 최대, 최소값을 활용하여 평균기온, 최고기온, 최저기온을 추출하였으며, 강수정보는 해당 단위의 동안의 강수의 누적 수치를 활용하였다. 단, 위성영상 자료와는 달리 점 단위의 자료이기 때문에 북한의 특정 행정구역 대푯값이나 북한 전체 대푯값을 도출해 낼 수는 없었다.

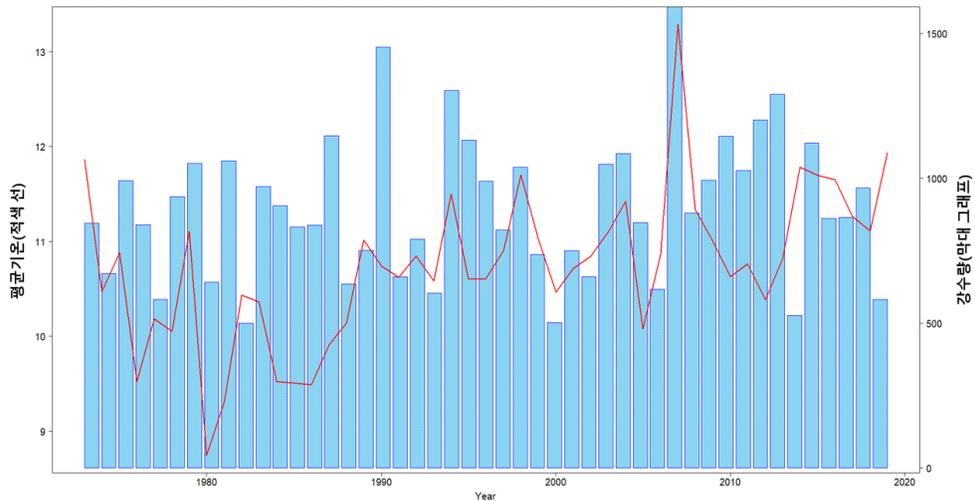
---

150) <https://data.kma.go.kr>

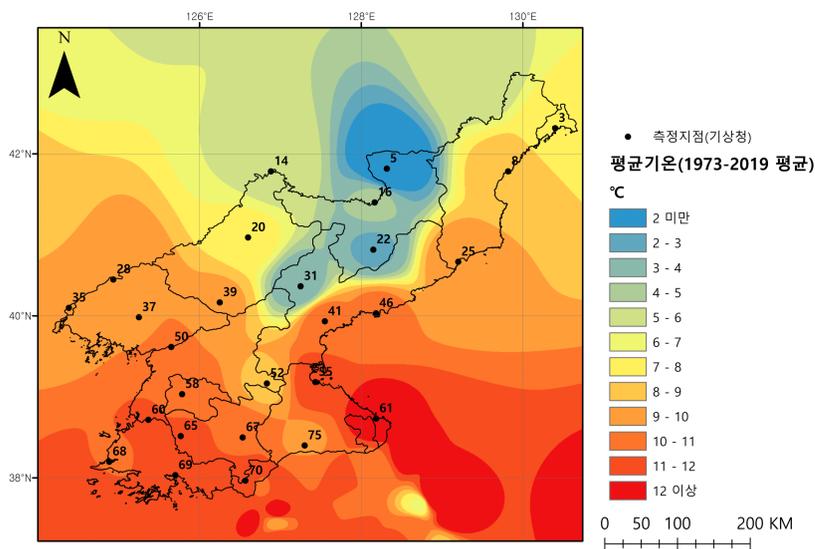
부록 표-2. 북한기후 자료 정보

지역구분	행정구역 (북한)	지역명	지역 코드	위치정보			자료구축 연도
				위도 (N°)	경도 (E°)	고도 (m)	
관서지방 (평안남·북 도,자강도)	자강도	증강	14	41.78	126.88	332	1973-2019
	자강도	강계	20	40.97	126.60	306	1973-2019
	평안북도	수풍	28	40.45	124.93	83	1981-2019
	평안북도	신의주	35	40.10	124.38	7	1973-2019
	평안북도	구성	37	39.98	125.25	99	1981-2019
	평안북도	안주	50	39.62	125.65	27	1981-2019
	평안남도	양덕	52	39.17	126.83	279	1981-2019
	평양직할시	평양	58	39.03	125.78	38	1973-2019
관북지방 (함경남·북 도,양강도, 원산일대)	남포특별시	남포	60	38.72	125.37	47	1981-2019
	나선특별시	선봉	3	42.32	130.40	3	1973-2019
	양강도	삼지연	5	41.82	128.32	1386	1981-2019
	함경북도	청진	8	41.78	129.82	43	1973-2019
	양강도	혜산	16	41.40	128.17	714	1973-2019
	양강도	풍산	22	40.82	128.15	1206	1981-2019
	함경북도	김책	25	40.67	129.20	23	1973-2019
	함경남도	장진	31	40.37	127.25	1081	1981-2019
	함경남도	희천	39	40.17	126.25	155	1981-2019
	함경남도	함흥	41	39.93	127.55	38	1973-2019
	함경남도	신포	46	40.03	128.18	19	1981-2019
휴전선 일원(황해 남·북도, 강원도)	강원도	원산	55	39.18	127.43	36	1973-2019
	강원도	장전	61	38.73	128.18	35	1981-2019
	황해북도	사리원	65	38.52	125.77	52	1973-2019
	황해북도	신계	67	38.50	126.53	100	1981-2019
	황해남도	용연	68	38.20	124.88	5	1981-2019
	황해남도	해주	69	38.03	125.70	81	1973-2019
	황해북도	개성	70	37.97	126.57	70	1973-2019
강원도	평강	75	38.40	127.30	371	1981-2019	

\* 출처 : 기상청 기상자료개방포털(<https://data.kma.go.kr>)

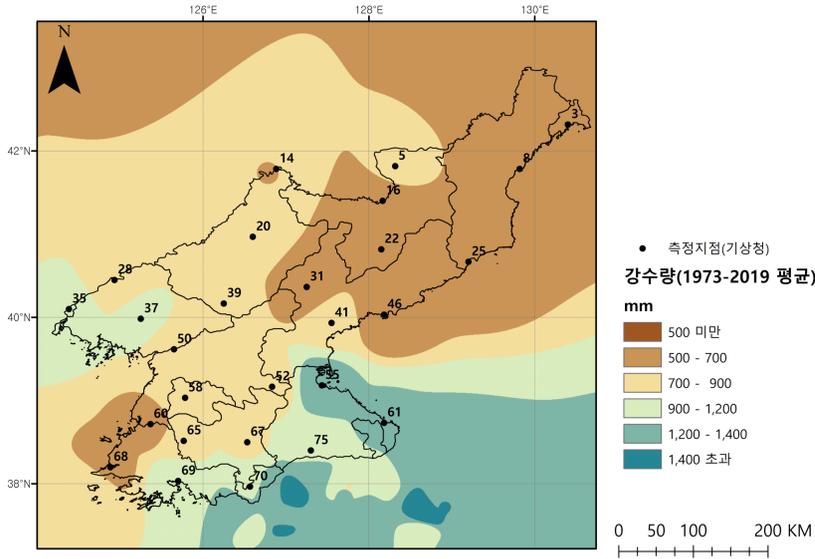


부록 그림-4. 평양 일대의 기상정보(1973-2019)에서 : 평균기온과 강수량



부록 그림-5. 북한기후 측정지점과 자료예시 : 평균기온 (1973-2019 평균)

\* 주 : 측정지점 정보는 부록 표-2 참조. 배경은 기상청의 북한경기도·강원도, 중국 기상청(<https://data.cma.cn/en/>)의 라오닝-지린성 측정지점 자료 활용. QGIS 3.10.0을 이용하여 IDW(Inverse Distance Weighted) 보간 기법을 적용하였음.



부록 그림-6. 북한기후 측정지점과 자료예시 : 연강수량 (1973-2019 평균)

\* 주 : 부록 그림-5의 제작방법과 같음

#### 4. 북한 토지황폐화와 식량생산 감소 문제 관련 사회·경제 자료

북한의 통계자료는 주로 국제기구의 공개자료, 또는 이와 연계된 북한이 공개한 자료, 그리고 대한민국 정부가 공개한 정보 등이 존재한다. 이 자료들은 출처와 무관하게 대부분 신뢰성의 문제가 제기되지만, 다른 대안 또한 존재하지 않는 것이 현실이다. 따라서 이 연구에서는 북한의 토지황폐화와 식량문제와 관련된 통계자료를 가능한 한 모두 수집하는 것을 원칙으로 하였고, 그중에서 북한 식량문제가 발생하였던 1990년대, 그리고 직접적인 작용이 발생하였다고 추정할 수 있는 1980년대가 포함되지 않는 경우 우선 제외하였다. 이는 식량생산과 소비 관련자료, 에너지 관련자료, 인구 및 기타 관련자료로 구분할 수 있으며, 구체적인 정보와 출처는 부록 표-4와 같다.

부록 표-3. 북한의 토지황폐화와 식량생산 감소 문제 관련 통계자료 목록

자료구분	자료제목	출처*	데이터 가용기간
식량생산과 소비 관련자료	식량생산량(톤)	FAOSTAT	1961-2018
	식량수입량(톤)	FAOSTAT	1961-2018
	식량생산량+수입량(톤)**	FAOSTAT	1961-2018
	1인당 식량생산량+수입량(KG)**	FAOSTAT	1961-2018
	단위면적당 식량생산량(Kg/ha)	Worldbank	1961-2018
	단위면적당 옥수수 생산량(100g/ha)	FAOSTAT	1961-2018
	단위면적당 감자 생산량(100g/ha)	FAOSTAT	1961-2018
	단위면적당 쌀 생산량(100g/ha)	FAOSTAT	1961-2018
에너지 관련자료	재생에너지생산량(QuadBTU)	USEIA	1980-2014
	총에너지소비량(QuadBTU)	USEIA	1980-2015
	석탄소비량(QuadBTU)	USEIA	1980-2016
	석유소비량(QuadBTU)	USEIA	1980-2017
	재생에너지소비량(QuadBTU)	USEIA	1980-2018
	발전용량(10억kwh)	USEIA	1980-2019
	전기소비량(10억kwh)	USEIA	1980-2020
	1인당 에너지 강도(백만BTU)	USEIA	1980-2021
	화석연료 에너지 소비비율(%)	Worldbank	1971-2013
인구 및 기타 관련자료	총인구(명)	Worldbank	1960-2018
	인구 중 여성의 비율(%)	Worldbank	1960-2018
	인구 중 남성의 비율(%)	Worldbank	1960-2018
	농어촌 인구비율(%)	Worldbank	1960-2018
	도시 인구비율(%)	Worldbank	1960-2018
	총 연령 부양비	Worldbank	1960-2018
	노인 부양비	Worldbank	1960-2018
	유·청소년 부양비	Worldbank	1960-2018
	인구밀도(sqkm)	Worldbank	1960-2018
	인구성장률(%)	Worldbank	1960-2018
	기대 수명(세)	Worldbank	1960-2018
	여성 1인당 출산율	Worldbank	1960-2018
	1000명당 합계출산율	Worldbank	1960-2018
	1000명당 합계사망률	Worldbank	1960-2018
무기수입량	Worldbank	1960-2010	

\* 세부 출처 정보

- ① FAOSTAT(<http://www.fao.org/faostat/en/>) : 유엔식량농업기구의 통계정보시스템, 농업관련 각국 및 유관 국제기구의 통계가 수집, 정리되어 있음
- ② Worldbank Open Data(<https://data.worldbank.org/>) : 세계은행의 데이터 공개 정보 시스템, 주로 공개개발원조 및 이와 관련된 기초정보가 수집, 정리되어 있음
- ③ USEIA(<https://www.eia.gov/>) : 미 연방정부 에너지부(Department of Energy)산하 에너지정보관리청(Energy Information Administration)의 국제통계에 북한 에너지 관련 정보가 정리되어 있음

\*\*기본통계를 바탕으로 단순 합산한 자료임

## 부록 2. AVHRR GIMMS 식생지수를 활용한 북한 토지황폐화의 경향과 공간적 취약지도출

토지황폐화와 관련된 기존 통계자료, 문헌 기반 연구에서는 산림지황폐화를 중심으로 연구가 진행되어왔다. 이 연구를 바탕으로 1990년대를 전후로 진행된 연료목과 산지 개간을 위한 광범위하고 큰 규모의 산림지황폐화 경향을 확인하였으며, 이는 2000년대 정체를 거쳐 2010년대에는 회복 추세에 있다는 것이 일반적인 정리 결과였다. 그러나, 대부분의 연구는 산림면적과 산림의 질적 변화에 치우쳐져 있었으며, 산림을 벗어나는 부분과 산림을 포괄한 전체에 대한 토지황폐화 경향에는 소홀했다는 공통적인 한계가 있었다.

### 1. 식생지수를 활용한 북한의 포괄적 토지황폐화 경향 도출

이전 내용에서 확인하였듯, 기존 북한 토지황폐화 연구는 토지피복변화 추출 연구가 주를 이루며, 산림황폐화 연구에 집중됐다. 산림황폐화 연구는 북한 토지황폐화 경향에 큰 의미가 있지만, 이 연구에서 목표로 하는 식량생산 감소와 직접 연결되기보다는 간접적으로 영향을 받는 관계에 가깝다고 볼 수 있다. 또는 산림황폐화가 식량생산 감소와 연관성이 있더라도 산림에 집중된 연구는 본 연구의 목적에 부합하기에는 편향성이 크다. 그뿐만 아니라, 산림황폐화 연구는 산림청이나 농촌진흥청과 같은 국가기관에서 충분한 자원을 투입하여 연구를 진행하고 있으므로 개인 연구자의 연구 주제로 삼기에는 양적·질적 한계가 뚜렷하다.

그러나 농업에 한정되었거나 농업을 포괄한 북한 토지황폐화 연구는 그 수가 많지 않다. 따라서 이 연구에서는 문헌연구에 그치지 않고 북한의 토지황폐화 경향 파악을 보충할 수 있는 기초적인 분석을 진행하기로 하였다. 최대한 간단한 방법으로 북한의 토지황폐화의 시간 변화를 확인할 수 있는 방안에 대해서 모색하고자 하였다.

식생지수(NDVI)는 농경지와 산림, 기타 생태 지역의 식생의 분광정보를

활용하여 식생의 양과 질을 수량적으로 평가할 수 있는 지표이며, 특히 식생이 생산하는 총일차생산량(NPP; Net Primary Product)와 밀접한 연관이 있다(Jensen, 2005; Le *et al.*, 2012). 토지황폐화는 식생의 양과 질의 저하를 포괄하는 것이기 때문에, 식생지수는 어떤 토지이용이더라도 토지황폐화의 경향을 대표하고 포괄하는 지표라 할 수 있다. 때문에 북한의 토지황폐화(산림황폐화) 일부 연구에서 중요한 지표로 적용된 바 있다(e.g. Lv *et al.*, 2019). 그뿐만 아니라, 자원과 여건의 한계로 연구에 많은 장애가 있는 아프리카 지역에 대한 연구나(e.g. Le *et al.*, 2012), 미국, 호주와 같이 인구 대비 국토면적이 광대한 지역의 연구(e.g. Holm *et al.*, 2003), 전 세계를 대상으로 한 연구(e.g. Bai *et al.*, 2003) 에 활용하는 경우가 많다.

이 연구에서는 북한과 한반도 대상 식생지수 연구 중 극히 최근 진행되었으며 단순·명확한 속성이 있는 Lv *et al.*(2019)의 연구와, 아프리카 지역을 대상으로 하였으며 최근 토지황폐화 관련 문헌에서 결과로 자주 인용되는 독일 ZEF연구(Vlek *et al.*, 2008; Le *et al.*, 2012; Le *et al.*, 2016)를 참고하여 북한의 토지황폐화 경향을 식생지수를 바탕으로 시간변화에 따른 포괄적인 북한의 토지황폐화의 경향을 파악하고자 하였다. 단, 연구목적, 연구의 시공간적 범위를 고려해서 이를 최대한 단순화하였다. 식생지수 자료는 AVHRR GIMMS NDVI를 활용하였으며 이에 대한 세부 정보는 부록 2에서 확인할 수 있다.

## 1) 식생지수 시간변화에 따른 토지황폐화 경향 도출방법

이 연구에서는 식생지수를 사용하여 시간에 따른 북한의 포괄적 토지황폐화 경향을 추정하기 위해 크게 네 가지 단계를 거쳤다(부록 그림-1). 이는 연도별 요약, 공간별 요약, 평균변화 확인, 기울기를 통한 추세 확인이다.

연도별 요약 단계에서는 식생지수의 공간 단위를 연 단위로 요약하는 처리 과정을 거친다. 이 연구에서 사용한 AVHRR GIMMS NDVI 식생지수는 15일 단위의 자료로, 이를 그대로 사용할 경우 잡음이 많고 계절변화

기 있어 복잡성이 과도해지고 해석이 되지 않는다. 그러나 평균, 최대값 등으로 요약하면 이 연구에서 관찰하려는 현상까지 요약되어버릴 수 있다는 우려 또한 무시할 수 없다. 따라서 이 연구에서는 하나의 연 대푯값을 설정하지 않고 연 평균<sup>151)</sup>, 연 최대값<sup>152)</sup>, 연 합계<sup>153)</sup>와 같은 토지황폐화의 강도를 대표할 수 있는 지표와, 토지황폐화의 변동성을 나타낼 수 있는 지표인 변동계수<sup>154)</sup>를 사용하였다. 해당 자료의 시작 시점은 1981년 7월 1일이고, 종료 시점은 2015년 12월 15일인데, 1981년의 경우 제외하고 1982년부터 계산하였으며, 2015년까지 연 단위로 계산하였다<sup>155)</sup>.

지역별 요약 단계에서는 연도별 요약에 거친 결과를 북한 전역 또는 관심 지역으로 요약하는 단계로, 복잡성을 최소화하기 위해 지역 요약은 평균으로 계산하였다. AVHRR GIMMS는 저해상도의 영상으로 도 단위의 행정구역보다는 큰 구역으로 북한을 구분하는 것이 타당하다는 판단에 따라 관서(평안남·북도과 자강도, 평양시, 남포시 일원), 관북(함경남·북도과 양강도), 휴전선 일원(황해남·북도과 강원도)로 구분하였다. 고도의 경우 Dong *et al.*(2020)의 연구에서 분석한 산림지황폐화 경향의 고도와 비교하기 위해, 0-100m, 100-300m, 300-1,000m로 나누었다. 경사도의 경우 부경생 등(2001)이 말하는 논과 밭의 기준인 경사도 5°, 박종화(2008)와 남종우(2016)이 언급하는 다락밭의 기준 경사도인 15°로 나누었다. 토지이용의 경우 토지이용 자료의 신뢰성 문제와 해상도 문제를 고려했을 때 타당하다고 판단하지 않아 적용하지 않았다.

연도별, 지역별로 요약한 결과에 대해서는 해당 값과 표준편차를 연도별 도표로 표현하였다. 그러나 결과 대부분은 요약 과정을 거쳤음에도 복잡한 증감의 패턴이 확인되어 의미있는 결과 해석이 어려웠다. 따라서 변화가

151) 북한 식생지수 연구 중 김란희 등(2016)과 Lv *et al.*(2019)이 식생지수의 평균을 사용하며, Le *et al.*(2012)의 연구도 평균값을 사용한다.

152) 북한식생지수 연구 중 염종민 등 (2010)이 식생지수의 평균값을 사용한다. 이는 위성 영상 가공 시 구름 등의 이상치(대개 낮은 값으로 표현)를 제거하기 위한 방법에서 차용한 것으로 보인다.

153) 식생지수가 식생이만들어내는 총일차생산량의 합계라고 보는 관점에 따르면, 식생지수의 연 합계가 식생의 총일차생산량의 정의에 가장 잘 부합한다고 볼 수 있다.

154) coefficient of variation. 표준편차를 산술 평균으로 나눈 값으로 평균이 달라 비교하기 어려운 표준편차를 산술 평균으로 표준화함으로써 비교할 수 있게 만드는 방법이다.

155) 물론 “1990년대 북한 대기근”이 주요 연구 대상으로 1995년이나 2000년을 조사 범위로 설정하는 것이 좋겠으나, 2000년 이후의 자료 또한 참고자료로 활용 가능하기 때문에, 자료가 가지고 있는 모든 시간 범위를 사용하였다.

어느 정도로, 어떤 강도로 이루어졌는지로 변환할 필요가 있었다.

변화의 강도를 확인하기 위해 이 연구에서 채택한 방법은 특정 시간 동안의 기울기(slope)를 구하는 방법이다<sup>156)</sup>. 여러 가지 방법 중<sup>157)</sup>, 특정 기간의 시간변화(연, 독립변수)와 식생지수 결과(종속변수)의 단순회귀분석 결과 도출되는 회귀방정식의 기울기를 구하는 방법을 사용하였다. Lv *et al.*(2019)와 Le *et al.*(2012)는 토지황폐화의 정도를 파악할 때 이 방법을 사용하였다. 이 두 연구는 10년 이상의 넓은 시기를 대상으로 해당 방법을 진행함으로써, 해당 시기 동안의 토지황폐화 경향이 증가(-)였는지 아니면 감소(+)-였는지를 파악하는 연구로 거시적인 차원의 토지황폐화 경향을 측정하는 연구다. 다만, 이 연구에서는 이보다 더 작은 범위에서의 변화 경향을 확인하고자 하였다. 이를 위해 먼저 3년<sup>158)</sup>~10년<sup>159)</sup>의 다양한 시간 창(time window)을 설정하고, 자료의 시작 시점부터 종료 시점까지의 해당 범위만큼의 기울기를 구하였다<sup>160)</sup>. 연 평균, 최대값, 합계의 기울기가 음의 값이고 변동계수 기울기가 양의 값인 경우, 토지황폐화 취약성이 높아진다고 보았고, 그 반대인 경우에는 낮아진다고 보았다(부록 그림-7).

---

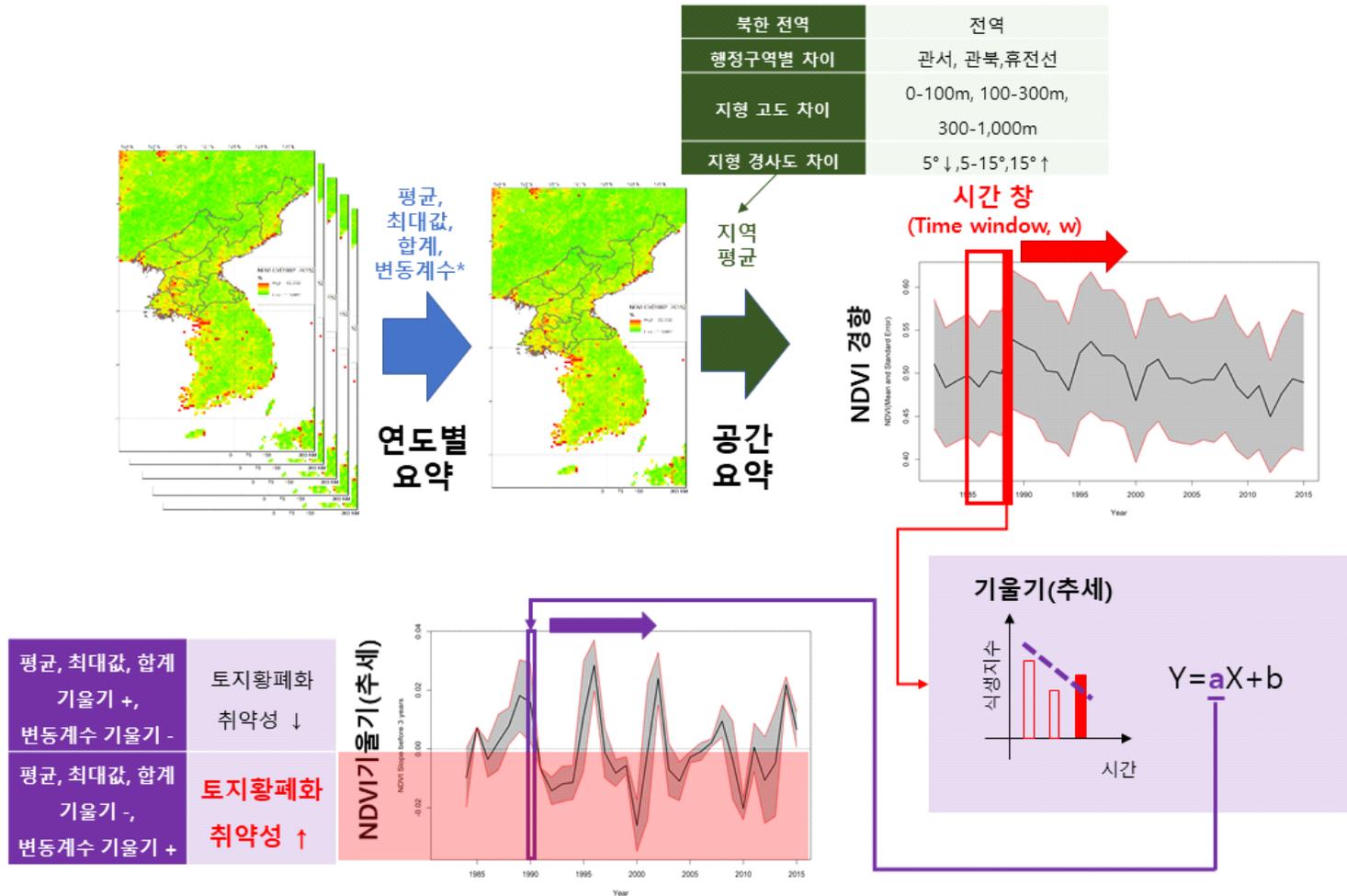
156) 앞 뒤 시간간의 차나 변화율을 이용하는 방법도 대안으로 제시될 수 있다. 그러나, 이 방법들은 전년도 또는 다음 해와의 비교 시에는 변화를 확인할 수 있는 유용한 방법이겠지만, 식생지수 자료의 높은 변위를 고려하였을 때 마찬가지로 해석에 어려움이 있을 것이라 보았다. 3년 이상의 차이를 확인할 때 이 두 방법은 중간 연도의 경향이 반영되지 않는다는 한계 또한 고려하였다.

157) 미분을 통해 기울기를 구할 수 있지만, 결과값에 맞는 수식을 추정해야 하는 문제가 있고 방법에 따라 뒤이은 방법이나 차이 계산과 큰 차이가 없을 것으로 추정되어 사용하지 않았다.

158) 회귀분석의 방법을 차용하기 때문에 3보다 크기를 줄이는 것은 불가능했다.

159) 자료의 시작 시점(1982년)과 대기근 발생시점(1995년)의 격차(13년)을 고려해서, 그것보다는 다소 작은 정도로 시간 창을 한정해야 한다는 판단에 의한 결정이다.

160) 시간의 창이  $w$ , 연도가  $y$ 라면,  $y$  연도의 기울기는  $y-(w-1)$ 에서부터  $y$ 년까지의 기울기로 계산이 된다. 예를 들어, 시간 창이 5년이라면 기울기 결과는 1986년(1982년부터 1986년 사이 자료에 대한 기울기)부터 2015년(2011년부터 2015년 사이 자료에 대한 기울기)까지 연 단위로 도출된다.



부록 그림-7. 식생지수 시간변화에 따른 토지황폐화 경향 도출방법 모식도

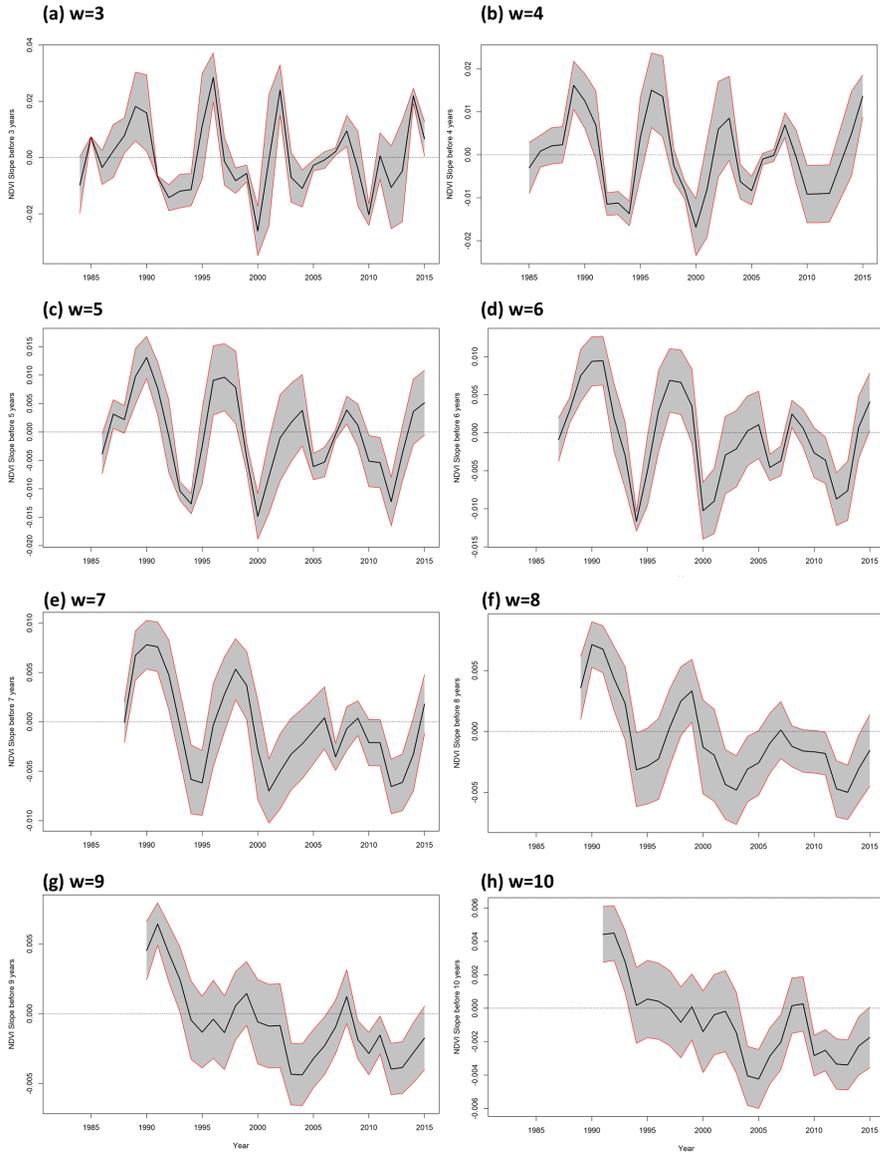
## 2) 최적 시간 창·대푯값 설정과 북한 전체의 토지황폐화 경향 확인

먼저 분석 결과 중 결과를 분명하게 드러낼 수 있는 효과적인 시간 창을 확인하고자 하였다. 이를 위해 각 지표별로 어떤 시간 창이 토지황폐화의 증감을 분명하게 드러내고 있는지를 확인하고자 하였다. 부록 그림-2는 그중 한 사례로, 북한 전체 식생지수 연평균의 시간 창을 달리 한 기울기 변화 사례이다. 대체로 시간 창이 넓어질수록 기울기 값이 평탄화되고 따라서 시기 전체의 경향성을 파악하기 용이해진다. 반면에 시간 창이 좁아질수록 복잡성이 높아지지만, 어떤 시기에 토지황폐화가 더 분명하게 나타났는지를 확인할 수 있다. 따라서 어떤 시간 창이 토지황폐화 경향 탐지에 효과적인지는 목적에 따라 달라진다고 생각할 수 있다. 단, 식생지수 연 자료의 시작시점인 1982년과 기근이 발생한 1995년 사이에 격차가 13년 정도인 만큼 시간 창을 최대한 작게 설정하고자 하였다. 시간 창이 3년(부록 그림-8 a)인 경우 다소 복잡성이 있지만 해석에 무리가 없다고 판단하였고, 이를 채택하여 해석을 진행하였다.

다음은 여러 대푯값 중 어떤 자료가 북한의 토지황폐화 경향을 잘 대표하는지를 한 전역의 식생지수의 경향과 기울기를 확인하였다(부록 그림-3). 그 결과 연평균, 연최대값, 연합계가 거의 똑같은 경향을 보이고, 변동계수는 다소 다른 경향을 보였다. 다만 크기를 나타내는 지표 중 연합계 결과가 지표(부록 그림-8e)나 기울기(부록 그림-8f)에서 가장 분명한 경향을 보였다.

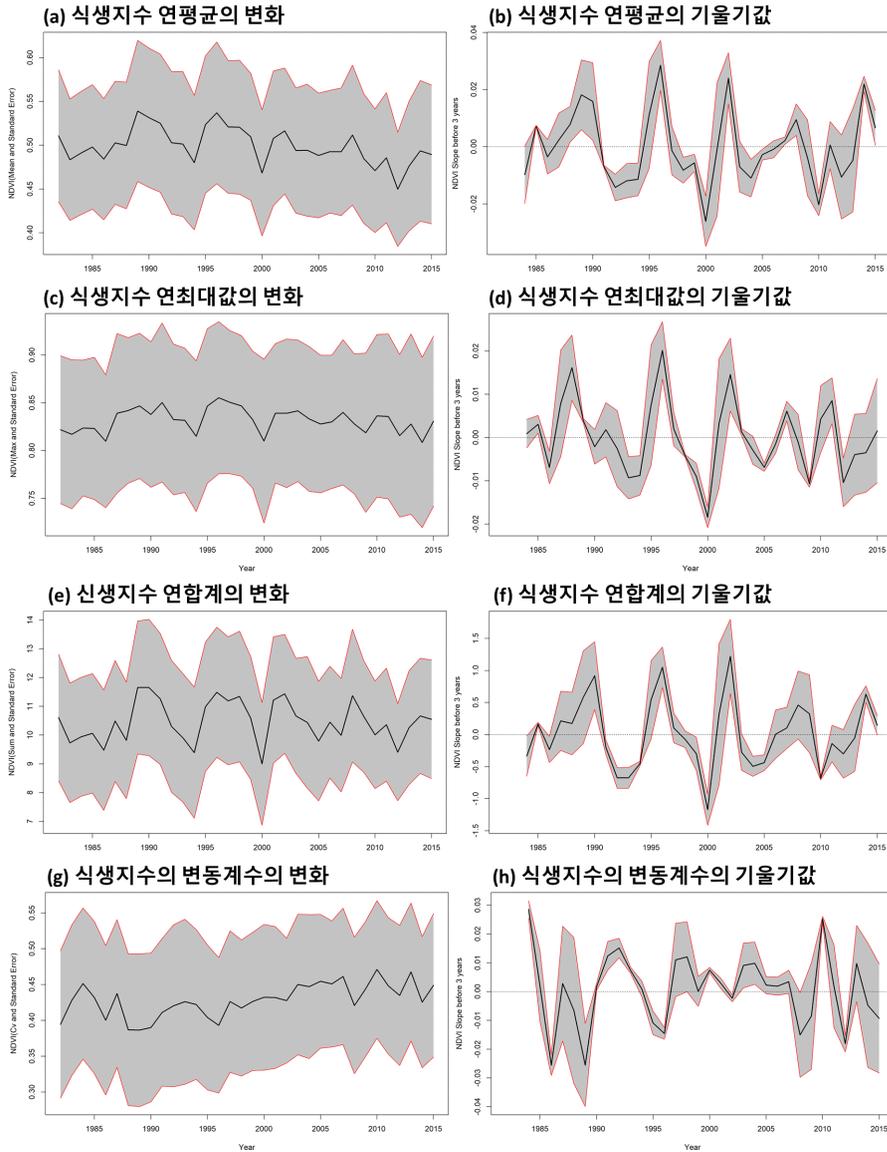
부록 그림-9를 바탕으로 북한 전체 토지황폐화 경향을 소개하면 대기근 직전인 1990년대 초반(1990-1994년)과, 대기근 막바지인 2000년대 초의 경향을 중심으로 설명할 수 있다. 이 두 시기에 연평균, 연최대값, 연합계 기울기가 감소하는 경향을 보이며, 변동성의 기울기는 반대로 이 시기 증가하는 경향을 보인다. 즉 이 시기 식생지수의 값이 어떤 대푯값으로도 감소하는 추세였고, 변동성이 커지는 추세였음이 확인된다. 즉 해당 시기 토지황폐화의 발생이 높아졌고(식생지수 감소), 토지황폐화를 일으키는 토지의 불안정성(변동 폭 증대)이 늘어났다고 해석할 수 있다.

이후 각 지역별 요약에 대한 설명에서는 위와 마찬가지로 3년의 시간 창을 설정하여 해석하기로 한다. 대푯값은 변동성을 나타내는 지표인 변동계수를 포함하되, 정도를 나타내는 지표는 북한 전체를 대상으로 하였을 때 가장 분명하였던 연합계를 사용하여 해석하도록 한다.



부록 그림-8. 시간 창(Time window)의 크기에 따른 정규화식생지수-시간 흐름 단순회귀식 기울기 결과 차이 예시 : 연평균 식생지수의 북한 전역 평균

\*  $w$  는 시간 창(Time Window), 단위는 연(year)이며, 특정연도( $n$ )의  $w$ 개 연도 이전( $n-w$ )의 자료까지의 기울기를 구하는 것임. 회귀분석방법을 차용하는 본 방법의 한계상  $w$ 는 3 이상으로 지정함. 음영은 결과의 표준 오차의 범위임.



부록 그림-9. 북한 전역의 식생지수 지표의 시간 변화

각 지표에 대한 북한 전체 연평균을 도출하는 형태로 계산(a,c,e,f), 기울기 값(b,d,f,h)의 시간창(w)의 크기는 3이며 이는 이후 그래프에서도 동일

### 3) 지역구분에 따른 식생지수 차이와 토지황폐화의 지역격차

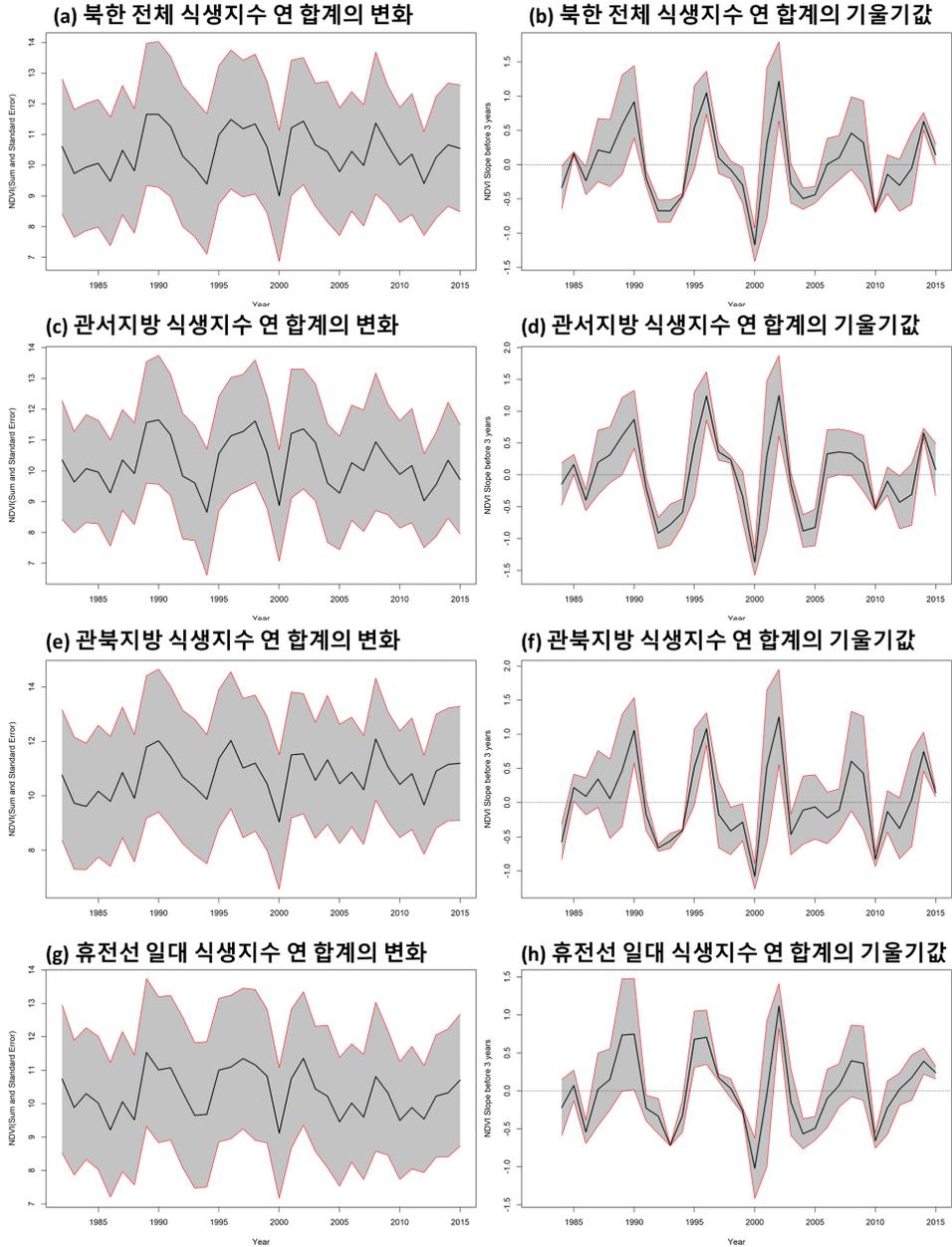
부록 그림-10은 식생지수의 연 합계 값과 기울기 변화의 지역별 차이<sup>161)</sup>에 대한 도표다. 부록 그림-11는 식생지수의 연 변동계수 값과 기울기 변화에 대해서 마찬가지로 지역별 차이를 나타낸 도표다. 두 결과 모두 북한 전체와 같은 결과가 도출되었다. 단, 평양 일대를 나타내는 관서지방의 토지황폐화 위험이 다른 지역에 비해서 두드러지며, 휴전선 일대가 차이가 작았다. 이러한 지역별 차이는 1990년대 초에 두드러지고, 2000년대는 대체로 지역별로 유사하다.

부록 그림-12은 식생지수의 연 합계 값과 기울기 변화의 고도별 차이 도표이며, 부록 그림-13는 변동계수에 대한 고도별 차이 도표이다. 북한 전역의 결과와 모든 고도에서 유사한 경향이 도출된다. 단, 고도 100m 이하에서 연 합계 값의 변화와 기울기가 다른 고도에 비해 현저하게 적은 편이며, 반대로 변동계수는 다른 고도에 비해 더 컸다. 이는 해당 고도에서 인간의 활동이 가장 활발한 데에서 기인한 것으로 보인다. 낮은 고도에서는 토지황폐화의 형태가 다양하게 나타나기 때문에 식생지수의 변화폭은 크고, 평균이나 합계에서 다양성은 상쇄되기 때문에 값 자체의 변화는 적은 것으로 보인다.

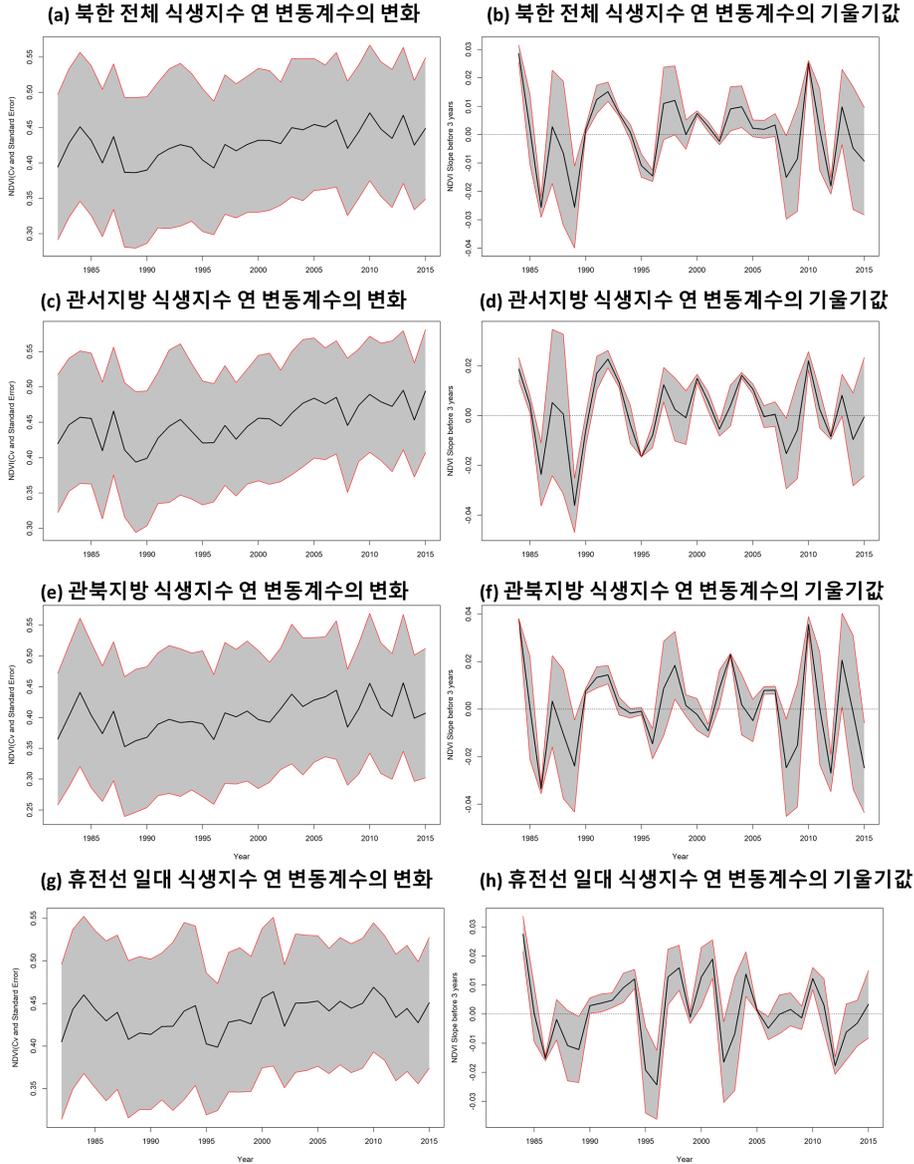
부록 그림-14은 식생지수의 연 합계 값과 기울기 변화의 경사도별 차이 도표이며, 부록 그림-15은 변동계수에 대한 경사도별 차이 도표이다. 토지황폐화의 강도를 나타내는 부록 그림-14은 경사도별로 큰 차이를 보여주지 않았다. 반면 부록 그림-15에서 나타내는 토지황폐화의 변동성은 경사도가 낮은 경우 변동성이 크고, 높아질수록 변동성이 낮아지는 결과가 도출되었다. 이는 고도 구분 결과와 유사하다고 생각할 수 있다.

---

161) 지역구분은 1장 참조

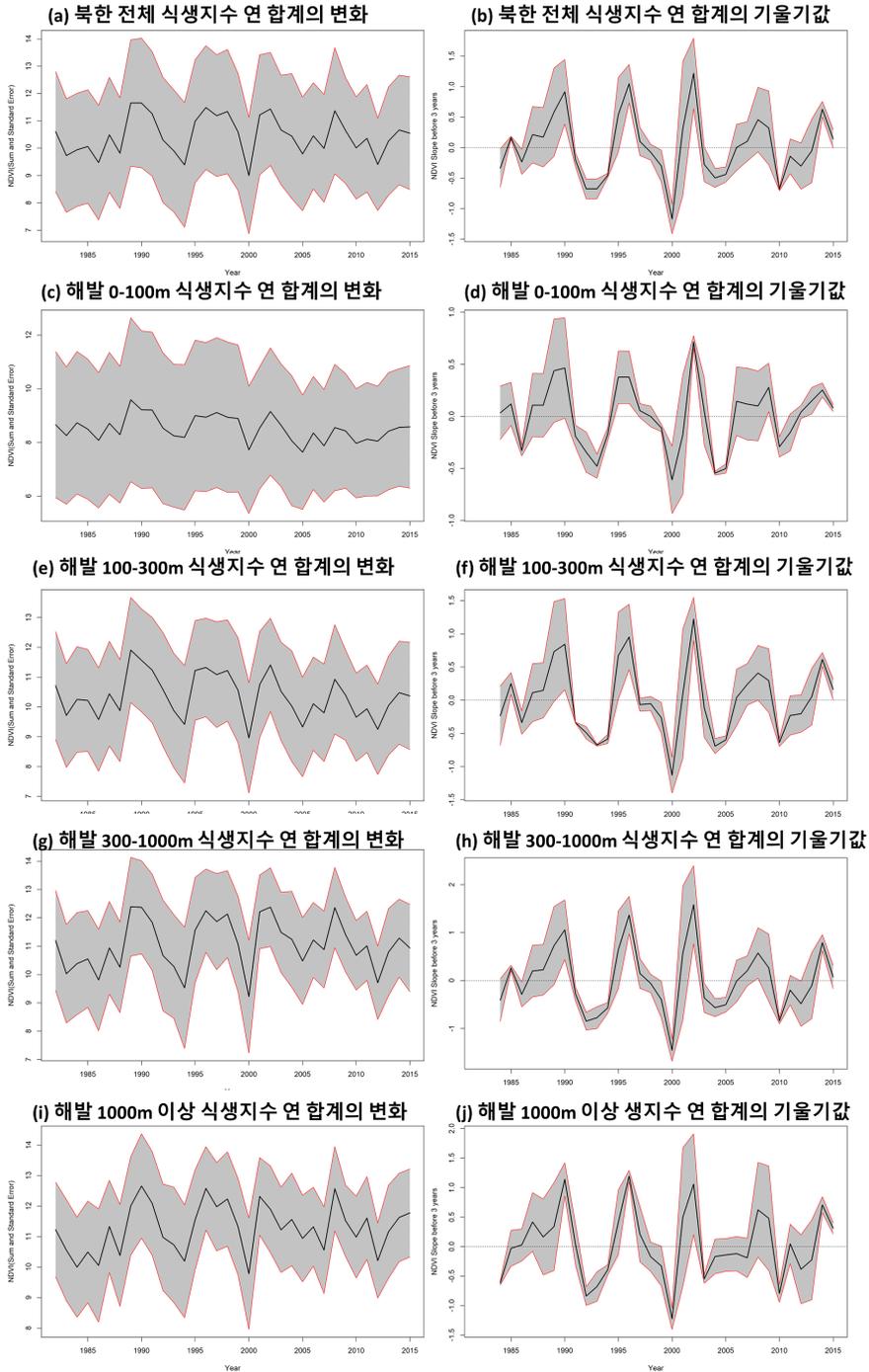


부록 그림-10. 지역 구분에 따른 식생지수 연 합계 지표의 시간 변화  
 \* 지역구분 설명(북한 현행 행정구역 기준) : (a,b) 북한 전역, (c,d) 관서지방 - 평안남·북도, 자강도, 평양시, 남포시, (e,f) 관북지방 - 함경남·북도, 양강도, (g,h) 휴전선 일대 - 황해남·북도, 강원도(원산 일대 포함), 개성시

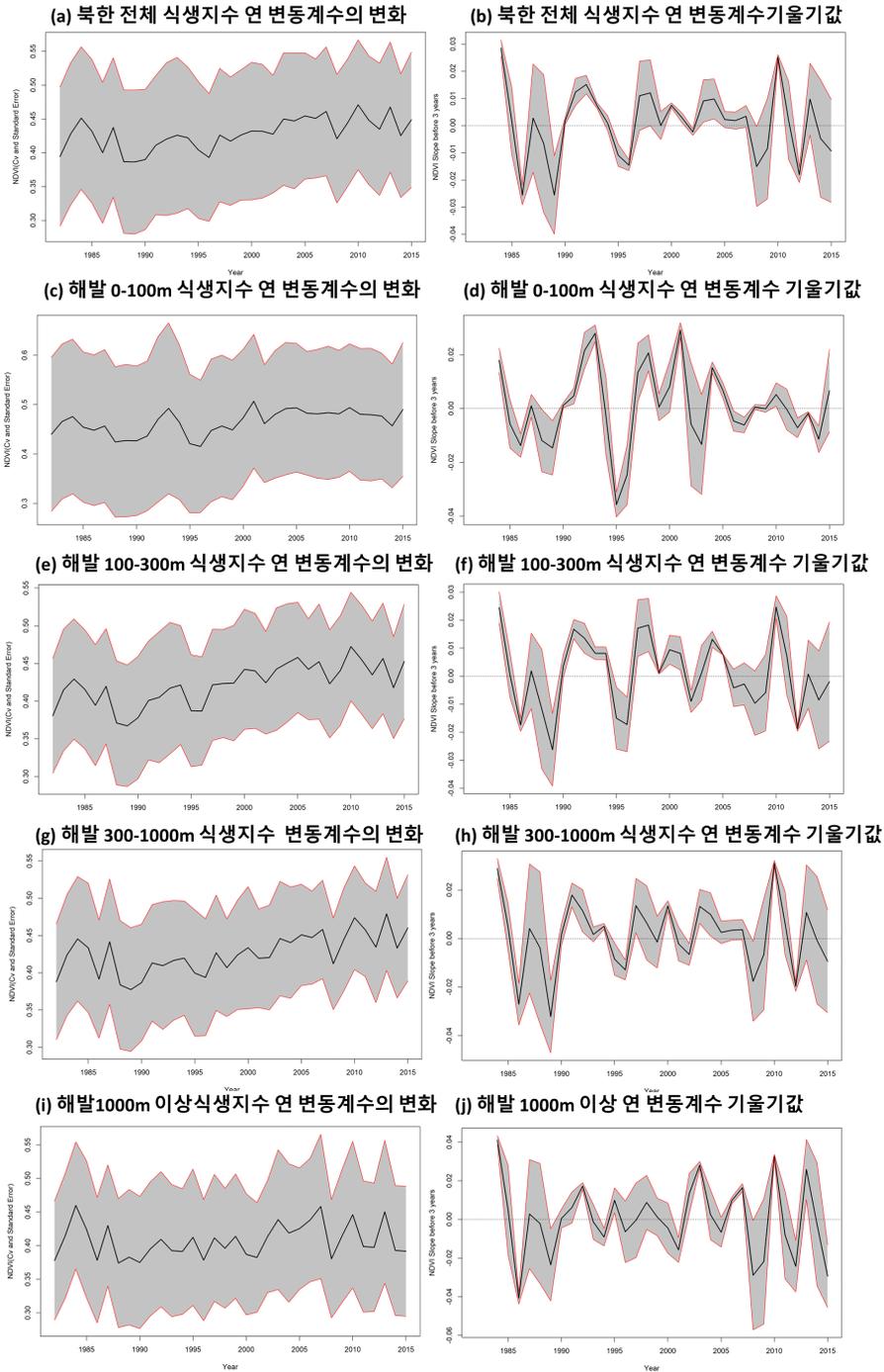


부록 그림-11. 지역 구분에 따른 식생지수 연 변동계수 지표의 시간 변화

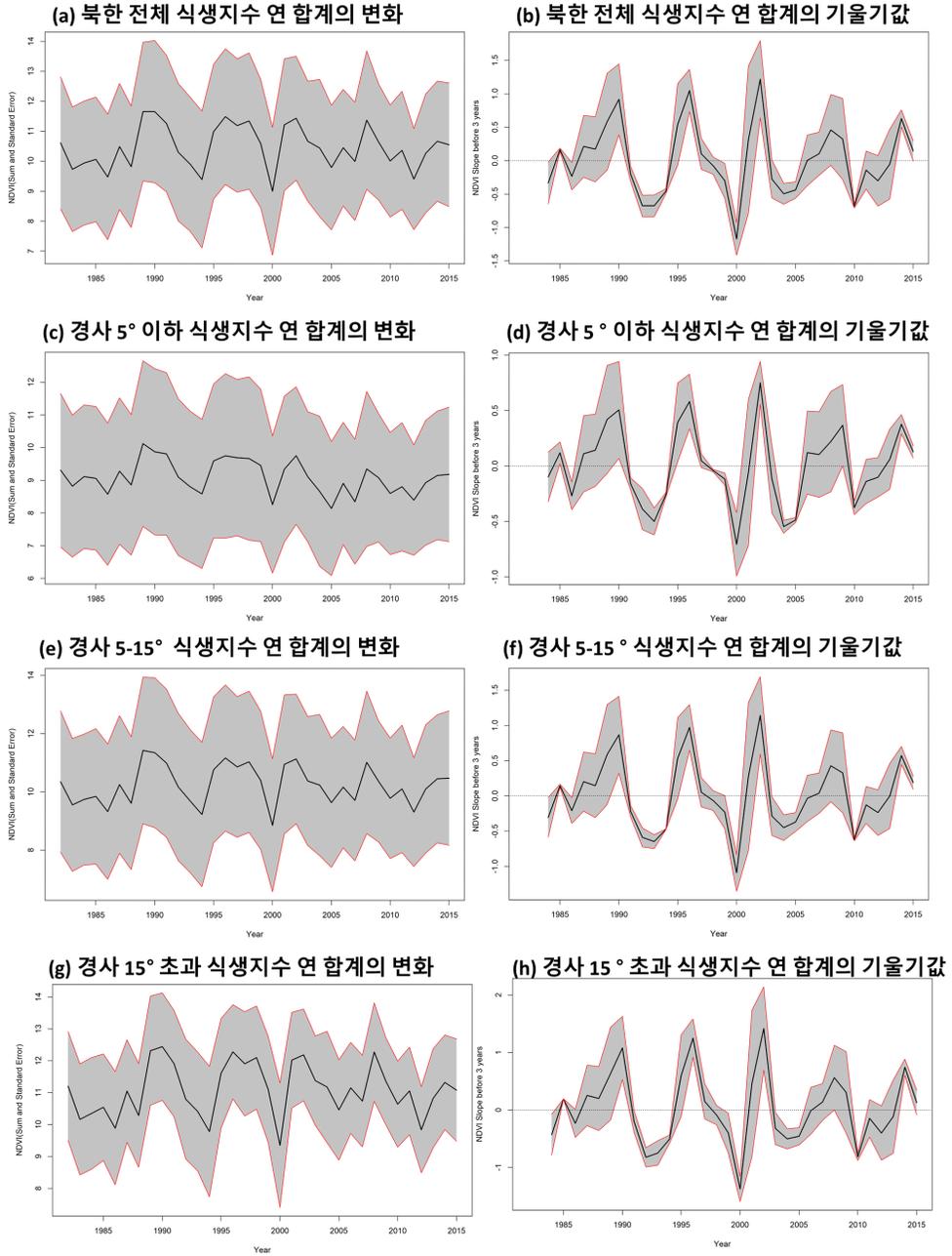
\* 지역구분 설명(북한 현행 행정구역 기준) : (a,b) 북한 전역, (c,d) 관서지방 - 평안남·북도, 자강도, 평양시, 남포시, (e,f) 관북지방 - 함경남·북도, 양강도, (g,h) 휴전선 일대 - 황해남·북도, 강원도(원산 일대 포함), 개성시



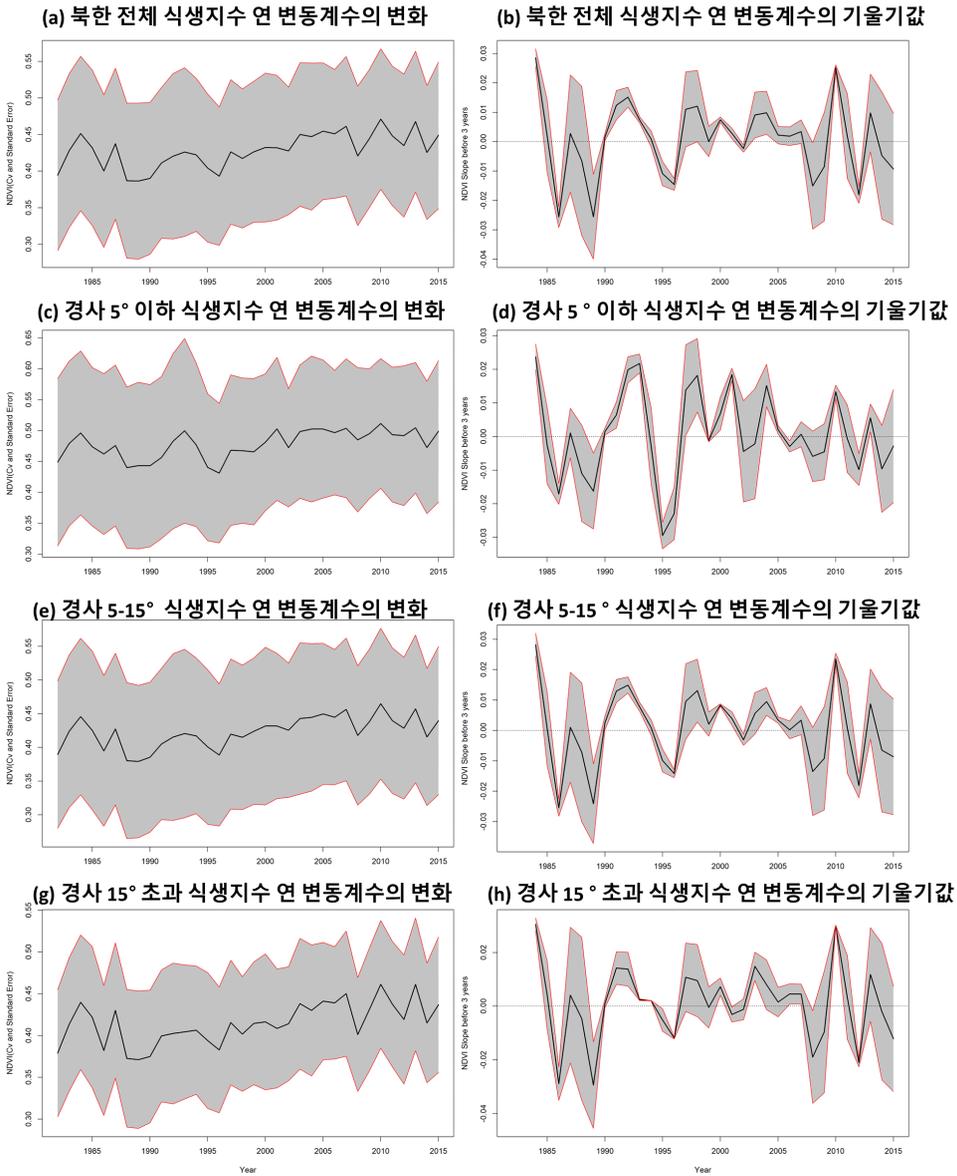
부록 그림-12. 고도에 따른 식생지수 연 합계 지표의 변화



부록 그림-13. 고도에 따른 식생지수 연 합계 지표의 변화



부록 그림-14. 경사도에 따른 식생지수 연 합계 지표의 변화



부록 그림-15. 경사도에 따른 식생지수 연 변동계수 지표의 변화

#### 4) 식생지수를 이용한 북한의 포괄적 토지황폐화 경향 종합 해석

이 결과를 종합해 보면, 공통적으로 추정되는 1990년대 초반과 2000년대 전후로 식생지수의 값은 감소 추세였으며, 변동성은 높아졌다. 이를 토지황폐화 맥락으로 해석해 보면, 식생지수가 나타내는 토지황폐화 추세는 1990년대 대기근 직전에 강하게 나타나고, 그 변동성도 컸다고 해석할 수 있다(부록 표-4).

특히 1990년대 대기근 직전의 추세를 지역 구분과 비교해 보면, 지역 측면에서는 평양을 중심으로 한 관서지방이, 고도 측면에서는 저고도가, 경사도 측면에서는 경사가 낮은 지역이 토지황폐화가 강하게 도출되었고 그 변동성이 컸다. 지역적 측면에서 취약하다고 여겨지는 관서지방 일대는, 평양 주변을 제외하고는 식량 위기시에 주요 피해 지역으로 알려졌을 정도로 피해가 심했으며, 이것이 1990년대 초반 관서지방의 식생지수 감소, 즉 생·물리적 생산성의 감소로 나타났을 것으로 보인다.

고도 측면에서는 1990년대 저지대의 식생지수 감소 경향과 감소 폭의 증가가 두드러진 것으로 미루어 보았을 때, Dong *et al.*(2020)이 언급한 대로 해당 시기 저지대의 산림 및 농지 파괴가 적극적으로 이루어졌을 것으로 보인다. 이 연구의 관점에서는 다소 벗어나지만, 2000년대 이후 경향에서 고도간 차이가 크지 않은 것은 동일 연구에서 지적하였던 산림 파괴의 고지대로의 확산을 상징하는 결과라고 볼 수 있다.

경사도의 경우 변동계수 부분에서 차이가 있었는데, 다락밭·비탈밭의 개발과 연료목 채취가 적극적으로 이루어졌다고 예상되는 5-15도의 경사도가 아닌 논으로 사용 가능한 5도 이내의 토지의 식생지수 변동성이 높은 것은 의외의 결과라고 할 수 있다. 위성영상이 제공되는 1981년 7월 이전 경사지 파괴가 충분히 이루어졌기 때문에 도출된 결과일 수도 있으나, 더 토지이용이 변한 토지에 여전히 더 활발한 토지이용 변화가 이루어지기 때문에 식생지수의 변동성이 높은 것으로도 해석해 볼 수 있다.

이 결과는 분석 자료의 시계열과 표본의 수가 충분하지 않고, 검증자료가 마련되지 않기 때문에, 통계분석을 통한 가설검증을 따로 수행하지 않았으며, 경향의 변화만 가지고 결과를 기술하였다는 한계가 있다. 따라서 자료가 추가, 보충됨에 따라 결과는 얼마든지 바뀔 수 있다는 것을 유의할 필요가 있다. 또한, 각 조건별 결과가 큰 차이가 나지 않게 도출되었다는 것은, 전통적인 통계와 가설 검증, 데이터 경향 확인에서 노출되지 않는 숨은 정보에 대해서 끊임 없이 확인해야 할 필요성을 부각시켜 준다.

부록 표-4. 식생지수를 활용한 시간에 따른 토지황폐화 경향 종합

구분	토지황폐화 강도 관련 지표 (연 합계, 평균, 최대값)	토지황폐화 변동성 관련 지표(변동계수)	종합
북한 전역	<ul style="list-style-type: none"> <li>1990년대 초(1990-1994)와 2000년 전후에 식생지수 감소 경향이 모든 지표에서 확인됨</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1990년대 초(1990-1994)와 2000년 전후에 식생지수의 변동성이 높아 지는 경향을 보임</li> <li>2000년부터 1990년대 초가 분명한 경향을 보임</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1990년대 초(1990-1994)와 2000년 전후에 토지황폐화 경향 관찰</li> <li>특히 1990년대 초에는 변동성이 강해지는 형태로 발생</li> </ul>
행정구역 별 차이	<ul style="list-style-type: none"> <li>북한전체와 다른 지역 대비 관서 지방의 1990년대 초 식생지수 감소 경향(기울기)이 미세하게 더 큼</li> <li>2000년 전후 등 그 외 시기는 지역별로 유사함</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>북한전체와 다른 지역 대비 관서 지방의 1990년대 초 식생지수 변동성이 더 분명하게 확인됨</li> <li>2000년 전후 등 그 외 시기는 지역별로 유사함</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1990년대 초 황폐화 경향은 관서 지방에서 보다 분명하게 드러남</li> <li>대기근의 파급효과는 평양과 그 주변에서 보다 더 분명하게 나타났다는 것을 암시</li> </ul>
지형 고도 차이	<ul style="list-style-type: none"> <li>모든 고도에서 1990년대 초, 2000년대 감소 경향이 북한 전역 결과와 유사</li> <li>고도가 높아질수록 절대값 증가, 단 300m 이상인 경우 증가폭은 크지 않음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>고도가 높아질수록 1990년대 초의 변동계수 증가 폭이 낮아짐</li> <li>변동계수가 높은 다른시기(2000년대 초)는 고도별 차이가 없음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1990년대 대기근과 관련된 식생지수 저하와 변동성 증가는 주로 100m 이상의 낮은 고도에서 발생하였음</li> </ul>
지형 경사도 차이	<ul style="list-style-type: none"> <li>식생지수 증가 시에는 지형 경사도가 높은 지역의 식생지수가 더 크게 증가</li> <li>식생지수 감소 시(특히 1990년대 초) 지형 경사와 상관없는 감소경향을 보임</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>경사도가 낮은 지역이 식생지수의 변동성의 변화가 비교적 더 크게 나타나고, 경사도가 높으면 변동성의 변화가 작게 나타남</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1990년대 초반의 토지황폐화의 전체적인 경향은 경사도별로 차별없이 발생</li> <li>해당 시기 토지황폐화의 변동성은 경사도가 낮은 지역이 다소 높음</li> </ul>

## 2. 식생지수를 이용한 북한 토지황폐화의 공간적 변화와 취약지 도출

지금까지 살펴본 방법은 식생지수를 북한 전역 또는 관심 지역으로 요약해서 시계열적인 경향을 살펴본 것이다. 그러나 식생지수는 공간적인 자료로, 시계열적인 토지황폐화 변화 경향 뿐만 아니라, 공간적인 경향을 살펴보는 데에도 활용할 수 있다. 특히 앞서 설명한 ZEF의 연구(Vlek *et al.*, 2008; Le *et al.*, 2012; Le *et al.*, 2016)에서는 토지황폐화 취약지(hotspot)을 식생지수를 이용하여 도출하였으며 2010년대 토지황폐화와 관련된 많은 문헌에서 인용된 바 있다. 이 연구에서는 이를 응용하여 식생지수를 이용한 북한 토지황폐화의 공간적 변화와 취약지를 도출하는 방법을 기술하고, 간단하게 결과를 도출하고자 한다.

### 1) 식생지수를 이용한 시공간적 토지황폐화 경향 분석방법

앞서 토지황폐화의 시간 경향을 설명하는 방법이 되었던 시간흐름에 따른 식생지수 기울기(slope)값을 공간적으로 확장하여, 식생지수를 이용하여 토지황폐화의 취약지(hotspot)을 도출하고자 하는 연구가 있었다. 이 중 대표적인 것은 아프리카 대륙 스케일에서 열대-건조-온대지역 전체의 토지황폐화 경향을 확인하는 독일 연구진들의 연구가 대표적이다(Vlek *et al.*, 2008; Le *et al.*, 2012; Le *et al.*, 2016). 이 연구들에서는 일차 생산량으로서의 식생지수와, 기후요소로서의 강수량 자료를 토지황폐화의 지표(proxy)라고 가정하고 이를 통해 토지황폐화지를 도출하고자 하였다. 연구 자료는 본 연구에서 사용하는 AVHRR GIMMS를 사용하였다.

이 방법은 크게 세 개의 단계를 거친다. 첫째, 모든 화소의 식생지수 증감에 대해서 계산한다. 이는 앞서 언급하였던 기울기 계산을 각각의 화소를 대상으로 진행하는 것을 의미한다. 이 연구들에서는 각 기울기의 신뢰도를 평가하기 위해 기울기 계산을 위한 회귀분석의 유의성 검정결과(계수의 p값)를 반영한다. 둘째, 식생지수의 경향성이 감소하는 지역을 선정한다. 이 연구에서는 경향성이 감소한다는 것의 정의를 앞서 시계열적인 경향 연구와 마찬가지로, 회귀분석 기울기 값을 통해서 확인하였다. 단, 기

울기 값(회귀계수)의 유의성 검정을 통해 값이 유의미한지를 분별해 내었으며<sup>162)</sup>, 연구기간 중 10% 이상의 변화가 있는 지역으로 문턱을 설정하였다. 셋째, 식생지수 경향성이 감소하는 지역과 강우량을 비교하여, 상관관계가 양의 관계가 아니거나, 상관관계가 없는 지역을 인간에 의한 토지황폐화 취약지로 정의하였다. 이는 열대-건조-온대지역 등 다양한 기후지역이 존재하고, 기후에 의해 토지황폐화의 경향이 분명하게 다른 아프리카 일원에는 타당한 방법으로 여겨졌다.

그러나, 이를 북한에 여러 방향으로 시험 적용한 결과, 다르게 적용할 필요성을 확인하였다. 먼저, 식생지수 경향성을 검토하기 위한 여러 가지 문턱값을 재검토할 필요가 있었다. 비록 같은 자료를 사용한다고 하더라도, 북한과 아프리카의 스케일은 분명한 차이가 나기 때문에, 아프리카와 같이 큰 문턱값을 설정하면 북한의 토지황폐화 지역 선정이 불가능해지는 결과가 초래되었다. 그래서 기울기 값의 유의성 검정 결과를 제외한 다른 문턱은 제외하였으며, 유의성 검정도 유연하게 적용하고자 하였다. 둘째, 북한에서는 식생지수와 강우량의 상관관계 여부와 상관없이 결과가 거의 동일하게 도출되었다. 아프리카와는 달리 세계적인 스케일에서 동일한 기후 지역으로 분류될 수 있는 북한 일대에는 강우량 자체가 결과에 큰 영향을 미치지 못했다.

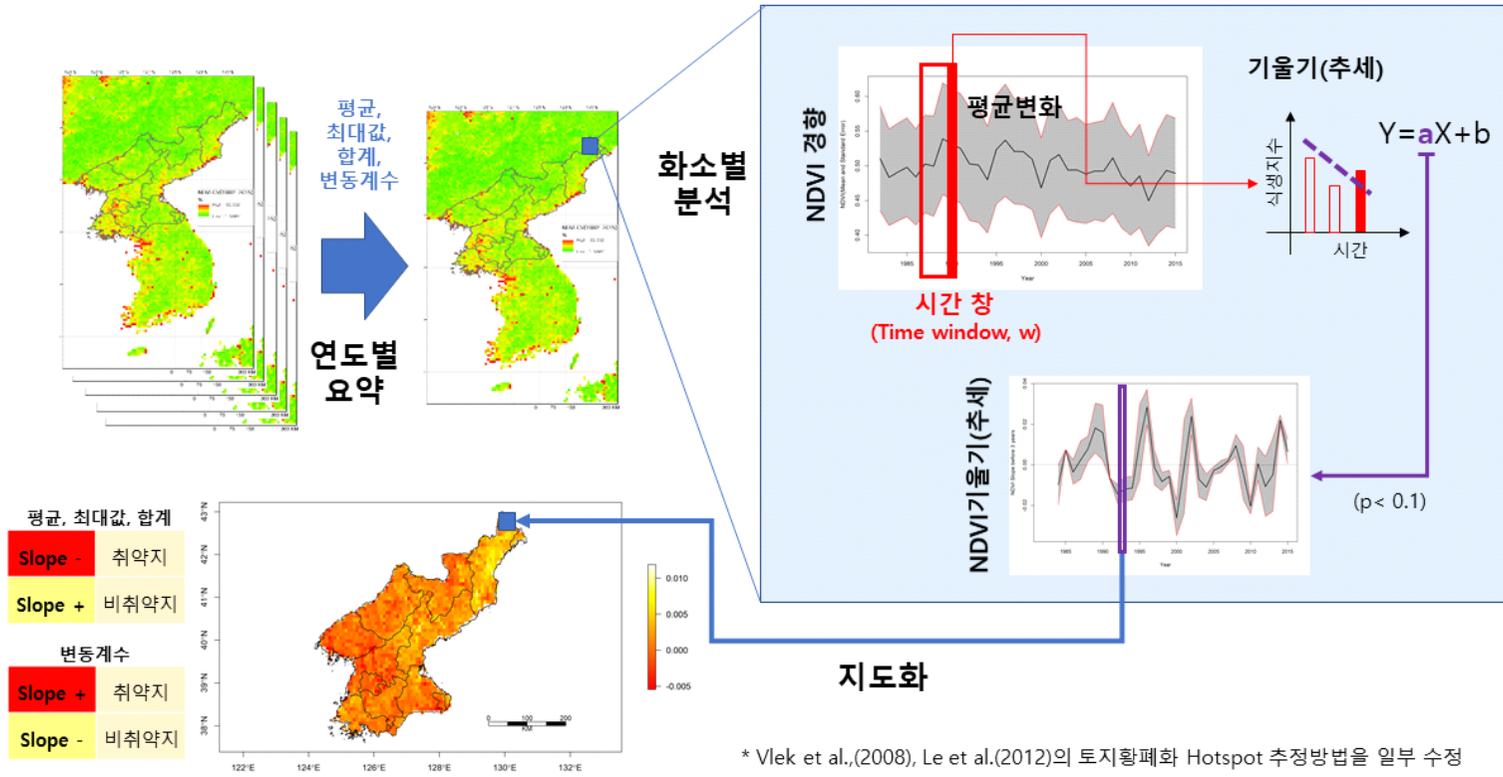
그래서 전체 화소의 식생지수의 기울기를 구하여 증감을 파악하는 형태로 단순화하고, 기울기 값의 문턱값을 정하지 않았으며, 유의도는 참고자료로만 활용하였다. 앞서 식생지수의 시간 변화와 마찬가지로 토지황폐화의 강도 관련 지표와 변동성 관련 지표로 나누어 계산하였다. 이 결과를 토대로 각 화소별로 계산한 식생지수의 기울기가 토지황폐화 취약지에 해당하는지 여부를 분류하였다. 그 후 이들의 빈도를 확인하고, 지도화함으로써 시공간적인 토지황폐화의 경향을 확인하였다(부록 그림-16). 유의수준은 앞선 연구에 따라 계산하였으며, 유의수준에 미치지 못한 지역을 제외한 자료와( $p < 0.1$ ) 유의수준을 고려하지 않은 자료 모두를 제시하여 유의미한 자료까지 제거되지 않도록 하였다.

시간 창의 크기는 두 가지 형태로 구성하였다. 첫째, 대기근 전후의 취

---

162) 일반적인 연구에 비해서 문턱을 낮추어 유의확률 90% 이내( $p$ -value  $< 0.1$ )(Le et al., 2012), 또는 80%이내( $p$ -value $<0.2$ )(Vlek et al., 2012)으로 맞추었다.

약지의 빈도와 분포를 파악하기 위한 “큰 시간 창”을 설정하여 이를 비교하였다. 대기근 발생 전(1982-1995년), 대기근 발생 후(1995-2015년)시기를 하나의 큰 시간 창으로 설정하고, 비교를 위해 자료 전체(1982-2015년)의 시간 창을 설정하였다. 각자의 시간 창에서 계산된 기울기를 바탕으로 해당 시기 동안의 전체적인 식생지수의 경향이 어떠했는지 확인하고, 어떤 시기가 거시적인 차원에서 토지황폐화의 경향이 강했는지에 대해서 해석하였다. 둘째, 앞서 시간에 따른 토지황폐화의 경향 파악과 마찬가지로의 시간 창 조정 방법을 각 화소별로 계산하는 형태다. 시간 창을 3년에서 10년까지 조정하여 움직이는 형태로 진행하였다. 결과는 각각의 연도로 정리하거나, 또는 앞서 언급하였던 대기근 발생 전과 후로 요약해서 토지황폐화 취약지의 빈도를 확인하고, 지도화를 진행하였다. 이를 토대로 각각의 시간 스케일에 따라 공간적 취약지의 분포가 어떻게 변화하는지를 확인하였다.



부록 그림-16. 식생지수 기반 토지황폐화 시공간 기반 분석기법 모식도

## 2) 대기근 전후 토지황폐화 취약지 빈도와 분포 파악

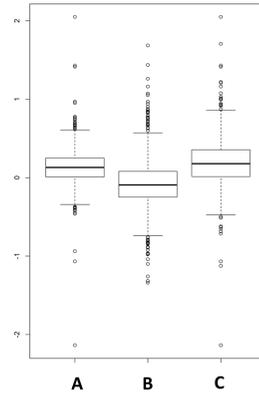
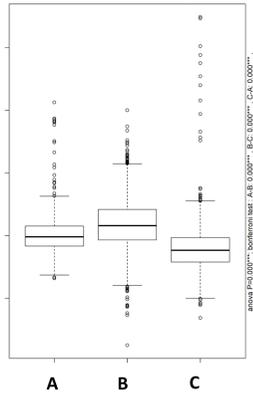
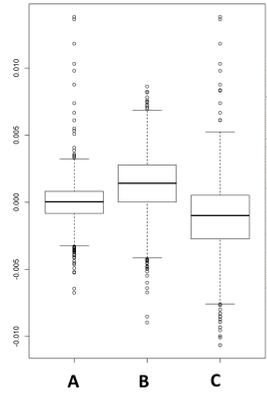
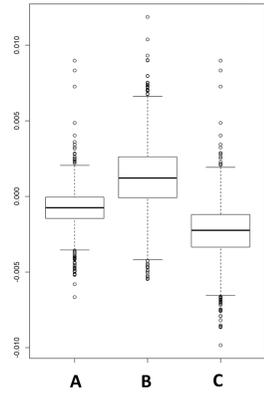
앞서 언급한대로 자료 전체(1982-2015년), 대기근 발생 전(1982-1995년), 대기근 발생 후(1995-2015년) 해당 시기 전체의 식생지수 값의 기울기로 산출한 토지황폐화 취약지의 빈도를 파악하였다. 이를 통해 어느 시기에 토지황폐화 취약지가 상대적으로 더 많았는지를 파악하고자 하였다. 그리고 지도화를 통해 취약지 분포를 파악하고자 하였다.

부록 그림-17은 연평균, 연 최대값, 연 합계, 연 변동계수의 기울기 계산 결과에 대한 상자 도표다. 이 도표에서는 각 시기별로 차이가 있는지 없는지를 시각적으로 알 수 있으며, 일원분산분석(ANOVA)와 사후분석 결과가 표현되어 있어 차이 유무를 수치로도 파악할 수 있다. 앞서 방법에서 소개한 대로 경사도 계산에 사용한 회귀분석의 유의도 검정을 고려하지 않은(부록 그림-17 “All”) 결과와 고려한(부록 그림-17 “Slope P-value < 0.1”) 결과에 대해서도 따로 확인하였다.

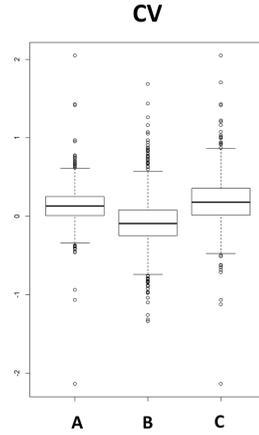
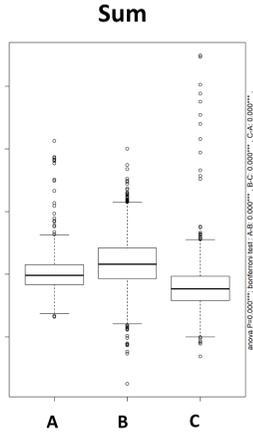
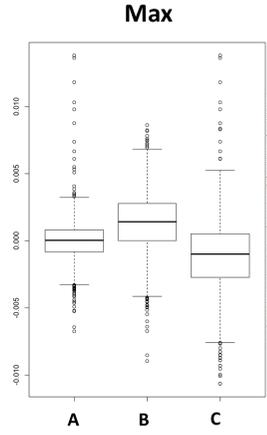
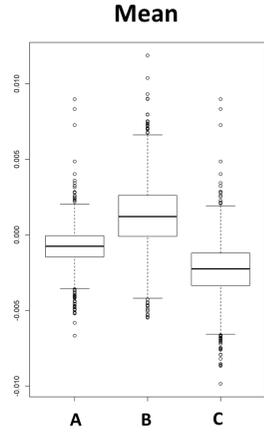
부록 그림-17의 모든 상자 도표와 일원분산분석, 사후분석 결과에서 확인할 수 있는 것은 모든 지수, 모든 조건에서 각각의 시기가 통계적으로 유의미한 차이가 있다는 사실이다. 수치 측면에서는 1982년부터 1995년까지(부록 그림-17, B)의 식생지수 연평균, 연최대값, 연합계의 경사도의 중앙값과 분포가 가장 높았고, 그 다음이 1982년부터 2015년(A), 가장 낮은 것이 1996년부터 2015년(C) 순이었다. 이는 대기근 발생 전인 1982년과 1995년이 토지황폐화가 가장 심각했을 것이라는 이 연구의 전제와는 전혀 다른 결과다. 해석하기 어렵지만, 기후적인 요인으로 1980년대 동북아시아의 식생지수는 증가 추세였다는 Lv *et al.*,(2019)의 연구 결과와 부합하는 결과라 할 수 있다. 그 중에서 특히 식생지수의 평균은 가장 차이가 크고, 변동계수는 식생지수의 시계열 변화에서 확인한 대로 나머지 지표와 반대 경향을 보인다. 연 평균의 결과가 가장 명확했기 때문에 이후 분석에서 토지황폐화의 강도 관련한 공간적 특성은 연평균을 위주로 설명하기로 한다.

변동계수는 평균과 정 반대 경향을 보였으며, 이는 식생지수의 시간 변화에서도 그대로 나타나는 결과였다.

Slope P-value < 0.1



All



부록 그림-17. 관심 시  
기(A, B, C) 내 식  
생지수 경사도의 차  
이

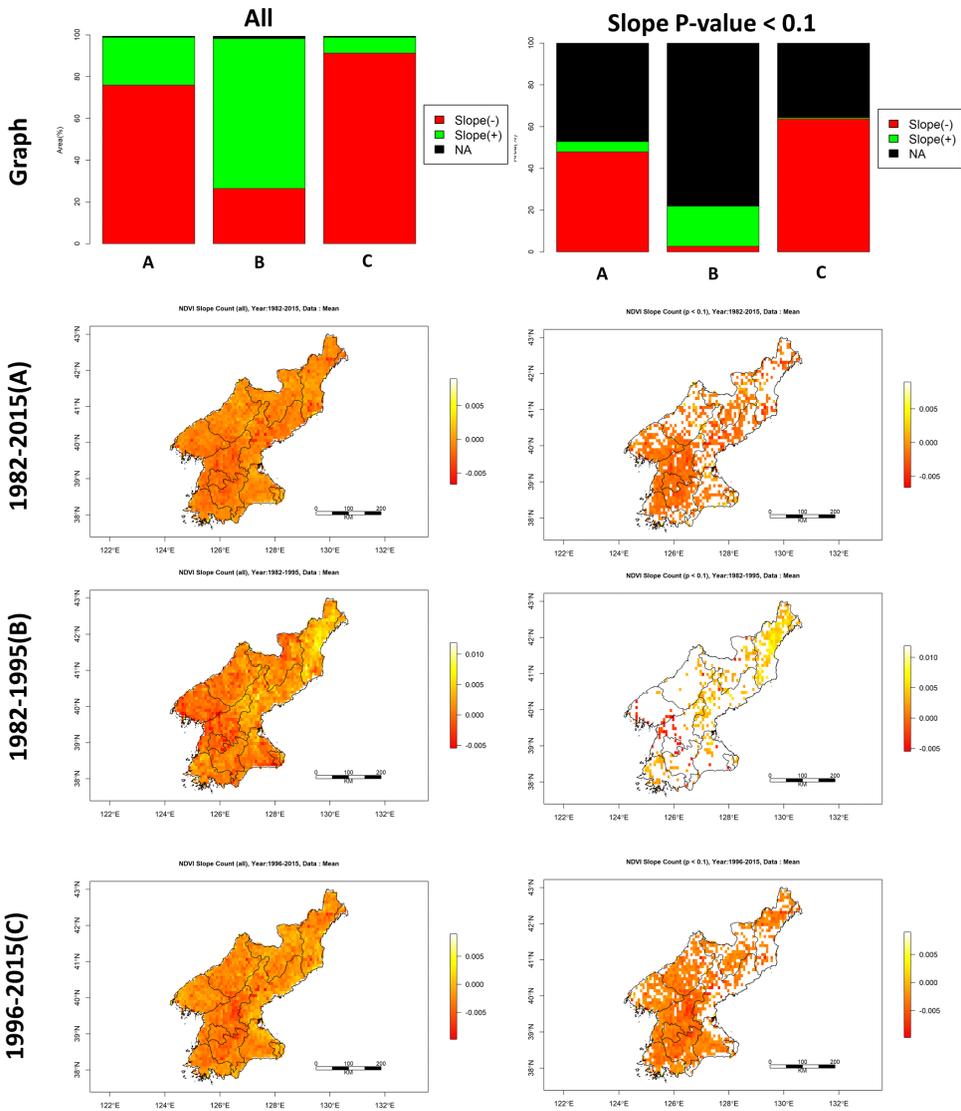
A: 1982-2015

B: 1982-1995

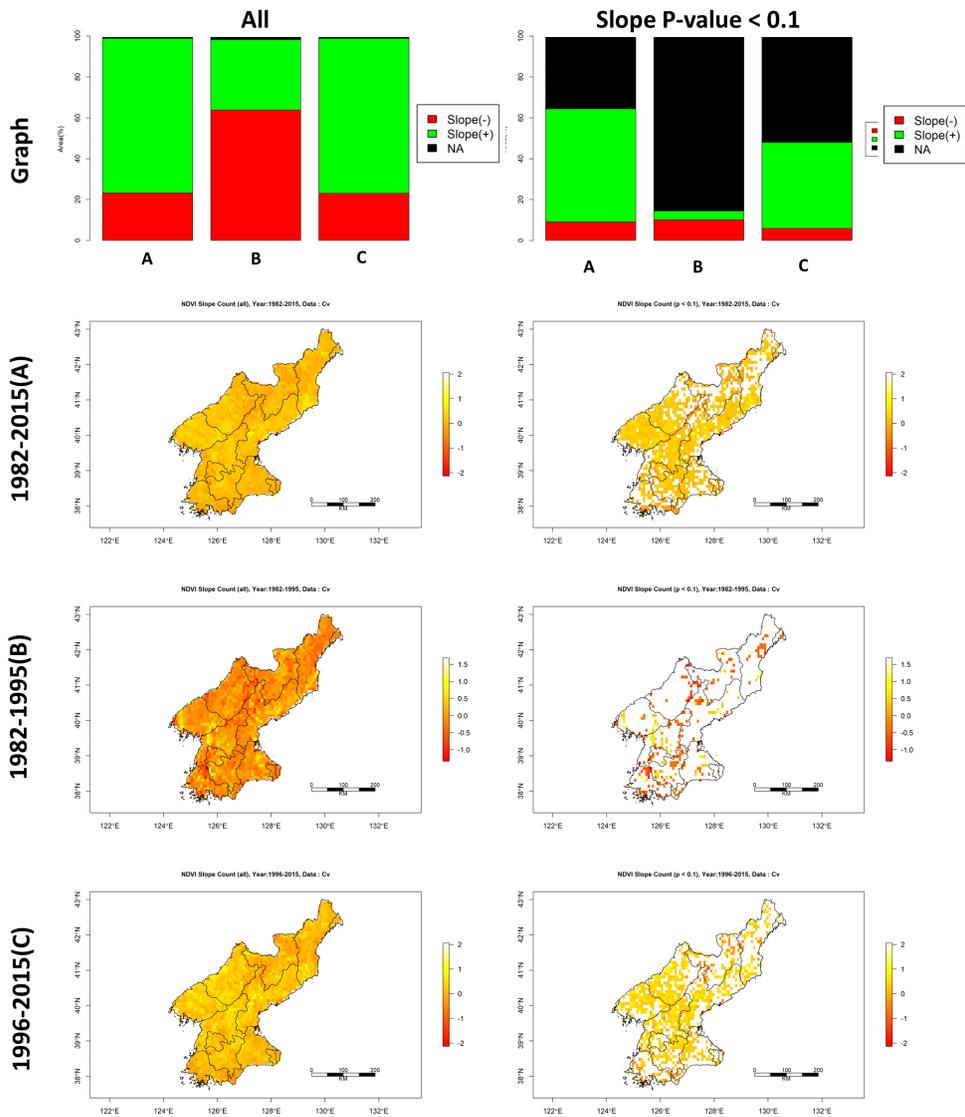
C: 1996-2015

부록 그림-18는 관심 시기 내 식생지수 평균의 경사도 빈도와 지역별 분포도를 나타낸 것이다. 상자 도표(부록 그림-11)에서 확인한 것과 전체적인 경향성은 큰 차이가 없다. 분포의 특성에서는 유의도 검정을 고려한 그림에서는 분포 특성을 파악하기 어렵지만, 유의도 검정을 고려하였을 때 (Slope P-value<0.1)는 분포 특성을 비교적 쉽게 파악할 수 있다. 먼저 어떤 시기에든 평양을 중심으로 한 관서지방에 토지황폐화 지역이 집중하고 있는 것을 확인할 수 있었으며, 토지황폐화 취약지가 많이 도출되지 않은 1982-1995년간에도 평양 주변과 청천강 일원, 신의주 일대에서 취약지가 도출된 것을 확인할 수 있다. 식생지수가 늘어난 지역(토지황폐화의 coldspot)은 같은 1982-1995년간의 지도에서 확인할 수 있는데, 관북지방, 특히 함경북도 일대에서 증가하는 지역이 집중 분포되는 것을 확인할 수 있다.

부록 그림-19은 관심 시기 내 식생지수 변동계수의 경사도 빈도와 지역별 분포도를 나타낸 것이다. 앞서의 시계열 분포 결과와 마찬가지로 변동계수의 분포는 시·공간적으로 다른 지표와 반대의 형태를 보인다. 특히 부록 그림-18와 마찬가지로 1982-1995년 결과에서 토지황폐화의 경향이 관찰되는 평양과 관서 지방의 변동계수 증가가 두드러졌다.



부록 그림-18. 관심 시기 내 식생지수 평균의 경사도 빈도(+,-)와 지역별 분포도

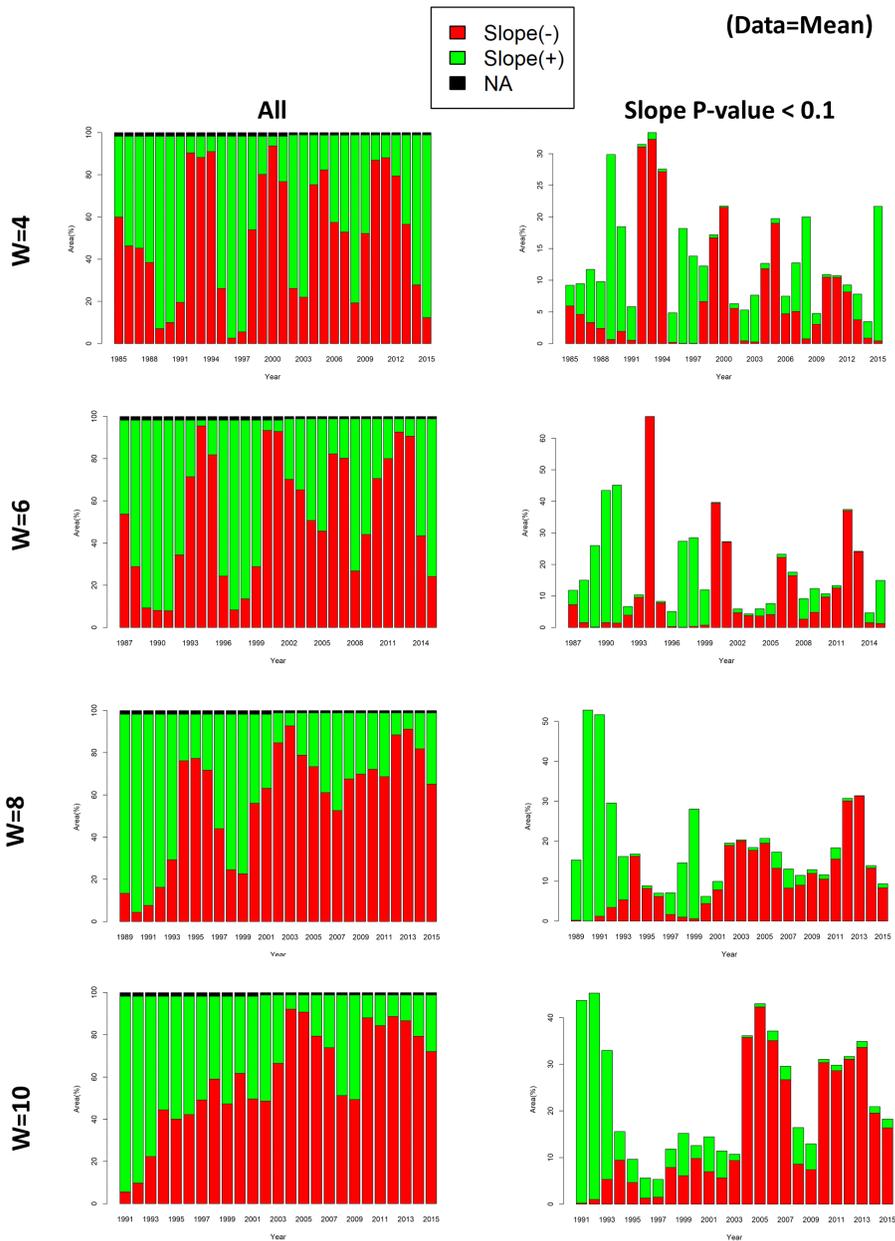


부록 그림-19. 설정 시기 내 식생지수 변동계수의 경사도 빈도(+,-)와 지역별 분포도

### 3) 토지황폐화 취약지 공간분포의 미시적 변화 현황

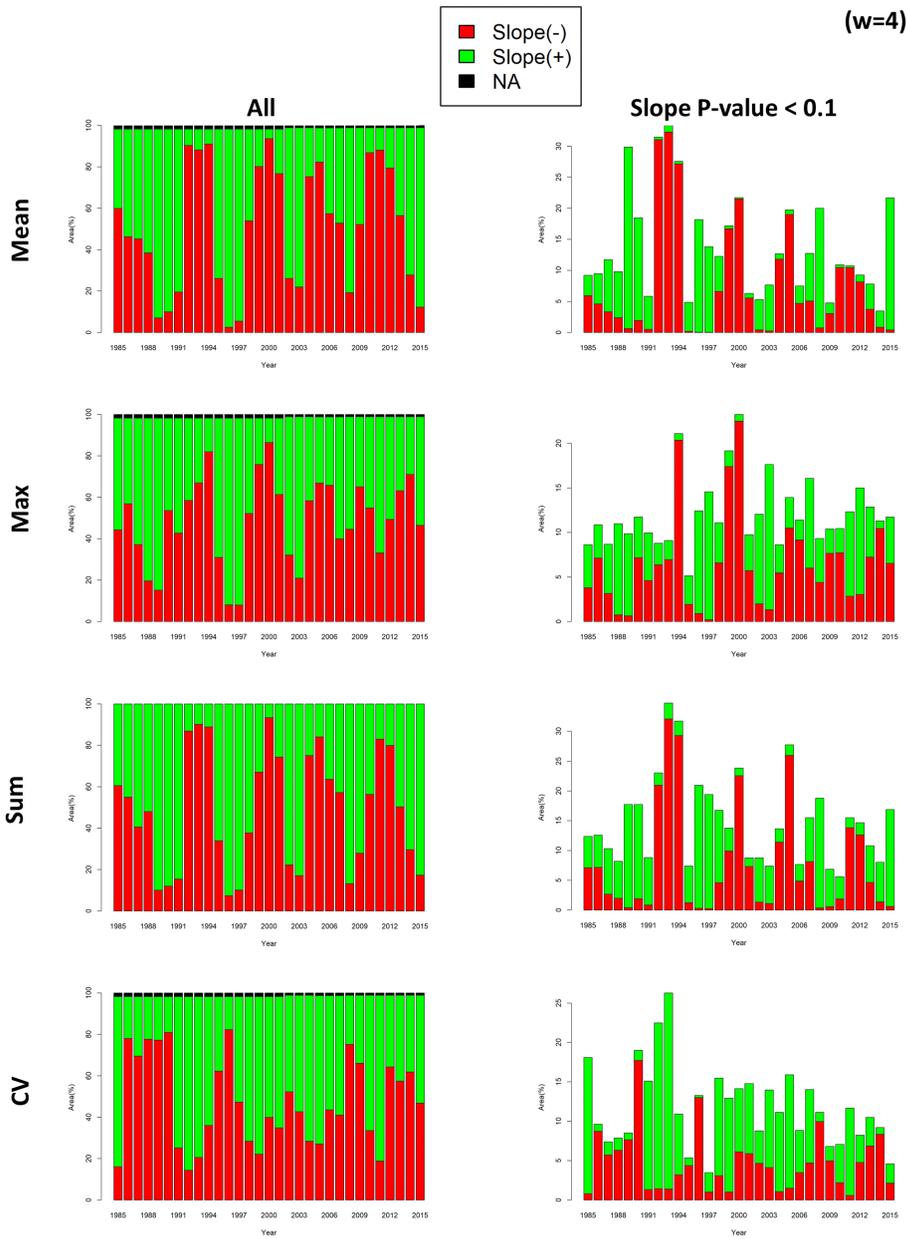
앞서 언급하였듯, 시계열 생물리적 황폐화의 경향 연구방법에 착안하여, 시간 창을 조정하는 방식으로, 토지황폐화 경향이 시기별로 어떻게 변화하는지 확인하고자 하였다. 먼저 시간 창의 크기에 따라 식생지수 기울기 값의 빈도가 어떻게 달라지는지를 확인하였다(부록 그림-20). 그 결과 창의 크기가 커질수록, 결과가 앞 시계열을 중심으로 평탄화가 되는 결과가 나타났다. 이는 앞선 시계열 분석결과와 유사한 것이었다. 이 연구에서 특히 관심을 가지고 있는 시기는 1990년대 북한의 대기근 전후이기 때문에, 마찬가지로 이 시기의 변화가 다소 명확하게 드러는 것이 좋은 결과라고 판단하였고, 1990년대 분포가 명확하게 들어나는 4년( $w=4$ , 4년 전부터 현재까지)의 시간 창을 설정하여 연 평균, 연 최대값, 연 합계, 연 변동계수의 시간 창 동안의 기울기의 빈도를 계산하였으며, 취약지 분포를 지도화하였다.

부록 그림-21은 각 지표별로 경사도가 음의 값인 결과와 양의 값인 결과를 나타낸 그림이다. 연 평균, 연 최대값, 연 합계의 경우 대기근이 벌어지기 직전인 1991년에서 1994년 사이, 그리고 2000년대 전후가 가장 식생지수가 감소하는 지역이 많은 것으로 확인된다. 반면 변동계수의 경우 전혀 반대 경향을 보인다. 이는 앞부분의 식생지수의 시간 변화에 따른 토지황폐화 경향 추정과 거의 같은 결과라고 볼 수 있다. 토지황폐화의 강도를 나타내는 지표 중 연 평균이 비교적 더 분명한 것으로 보이기 때문에, 이후의 자료는 연 평균과 변동계수를 이용하여 살펴보기로 하였다.



부록 그림-20. 시간 창(Time Window)에 따른 식생지수 평균 경사도의 시기별 빈도 변화(+,-)

\* 경사도는  $n-(w+1)$ ~ $n$ 년 간의 데이터로 계산됨, 일례로,  $w=4$ 인 경우, 1995년의 경사도는 1992,1993,1994,1995년의 데이터로 계산



부록 그림-21. 식생지수 경사도(w=4)의 지표별, 시기별 빈도 변화(+,-)

\* 경사도는  $n-(w+1) \sim n$ 년 간의 데이터로 계산됨, 일례로, w=4인 경우, 1995년의 경사도는 1992,1993,1994,1995년의 데이터로 계산

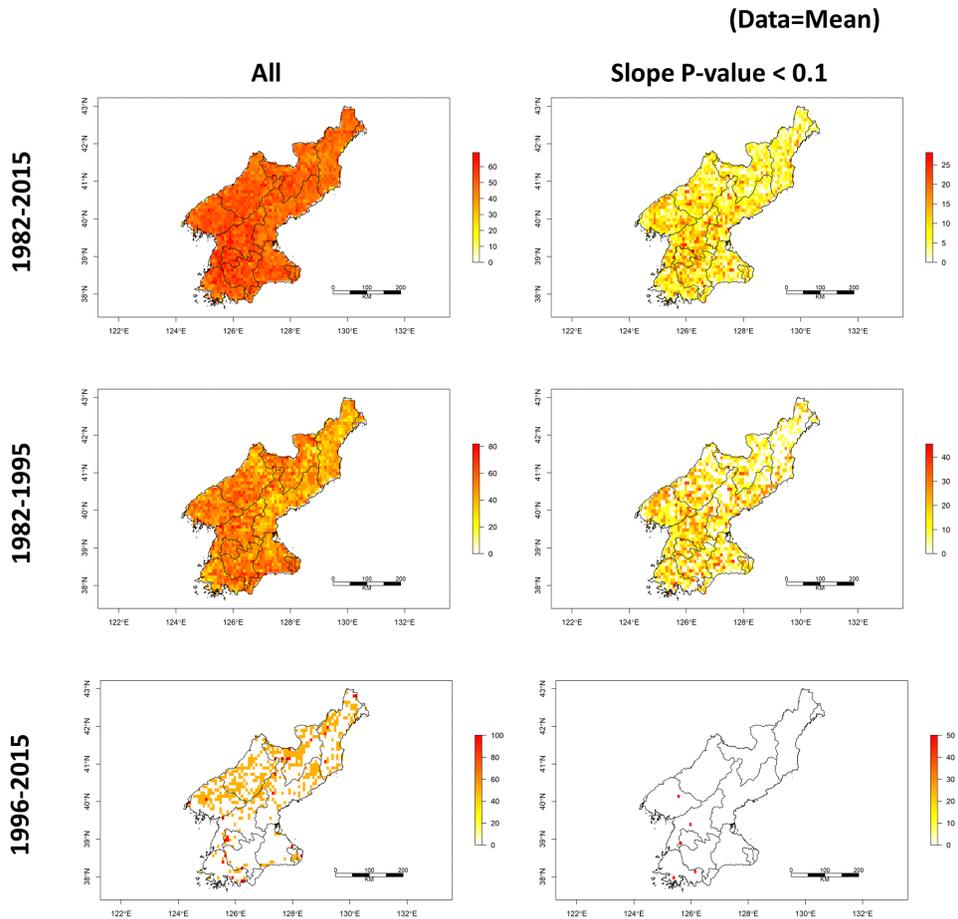
부록 그림-22는 각 화소별로 시간 창을 4년으로 두었을 때 식생지수 연 평균 경사도가 음의 값을 띄는 빈도<sup>163</sup>)를 지도화한 결과로, 토지황폐화 취약지로 도출된 빈도를 표현한 것이다. 각 연도별로 그릴 경우 복잡성이 높아지기 때문에 앞서 “대기근 전후 토지황폐화 빈도 파악”의 시기 구분을 그대로 사용하여 전체시기, 대기근 전, 후로 합쳐서 표현하였다. 유의도를 고려하지 않은 경우, 북한 대부분에서 전체 시기(1982-2015) 중 절반 이상이 토지황폐화 취약지역(식생지수 저하 지역)으로 분류되었음을 볼 수 있다.

단, 앞서 대기근 전후의 식생지수 전체 경사도의 경향(부록 그림-12)과는 반대로, 1982-1995년 사이에 시간 창을 4년을 적용했을 때의 토지황폐화 취약지 도출 빈도수가 1996-2015년에 비해서 훨씬 많았다(부록 그림-13). 1982-1995년 사이의 변화만 살펴보면, 이 시기의 식생지수의 전체 경향은 완만한 증가 추세였지만, 미시적인 시간 스케일로 보면 급격한 증감의 형태를 보여 주었다. 따라서 대기근이 일어나기 전 식생지수에서 보이는 토지황폐화의 취약성은 전체적인 시간 스케일에서는 잘 나타나지 않지만, 3~4년 단위에서는 분명하게 드러난다는 사실을 확인할 수 있었다. Lv *et al.*(2019)이 지적한 대로 거시적으로는 동북아시아 지역이 기후에 의한 녹색화로 식생이 증가하여 식생지수가 증가하였지만, 당시 북한의 산지개간과 에너지의 부족으로 인한 황폐화가 미시적으로는 지속적으로 발생하고 있었다고 해석할 수 있다. 후속 연구를 통해 조금 더 확인해 볼 필요가 있어 조심스럽지만, 이 결과 차이는 Lv *et al.*(2019)와 Le *et al.*(2012)의 방법을 시간 창의 크기를 작게 조절하는 형태로 변형한 이 연구 방법이, 식생지수를 이용한 북한의 토지황폐화와 식량생산량 감소 문제에 더 적절하다는 것을 뒷받침해주는 결과라고 생각할 수 있다.

부록 그림-23는 식생지수 연 변동계수가 음의 값을 띄는, 즉 토지황폐화 변동성이 줄어드는 시기가 지역별로 어느 정도 비율을 띄는지를 지도로 표현한 결과이다. 전체적으로 변동성은 감소 추세이며, 변동성이 높은 지역은 부록 그림-23의 토지황폐화 지역과 거의 일치하는 경향을 보인다.

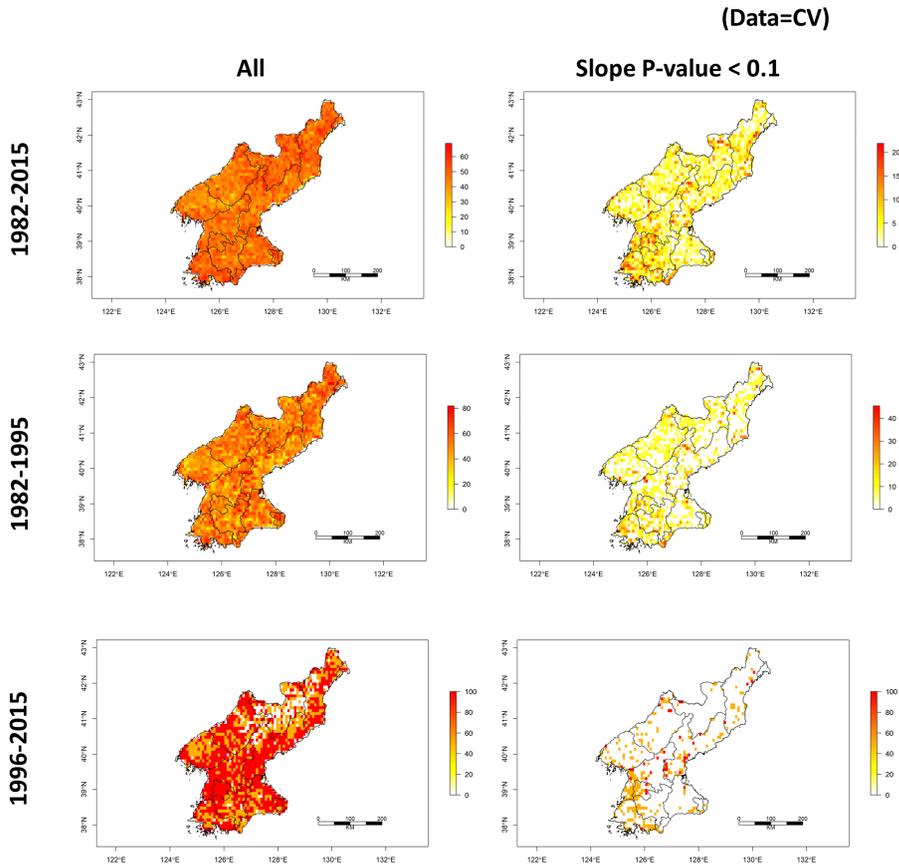
---

163) 경사도를 구한 전체 시기(연도) 대비 경사도가 음수가 나온 시기(연도)의 비율(%)로 표현하였다.



부록 그림-22. 식생지수 연평균 경사도 음의 값(-, 토지황폐화 지역)이 차지하는 비율(%)의 관심시기별 공간분포 차이(w=4)

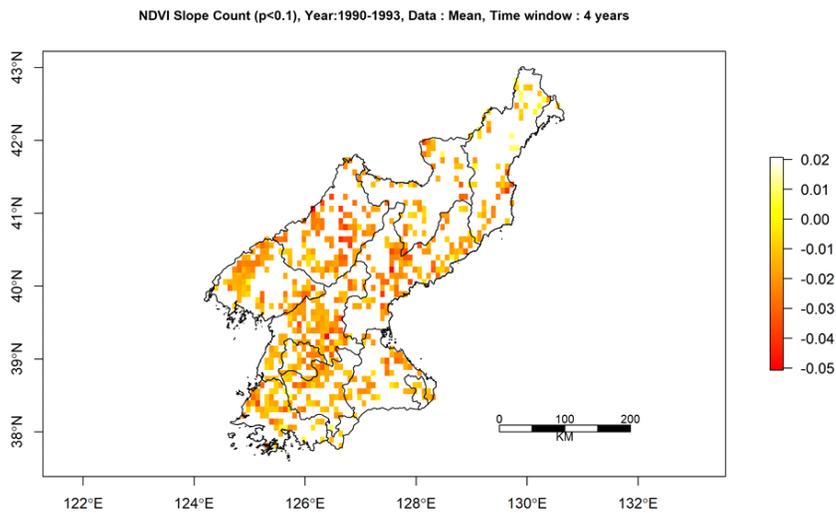
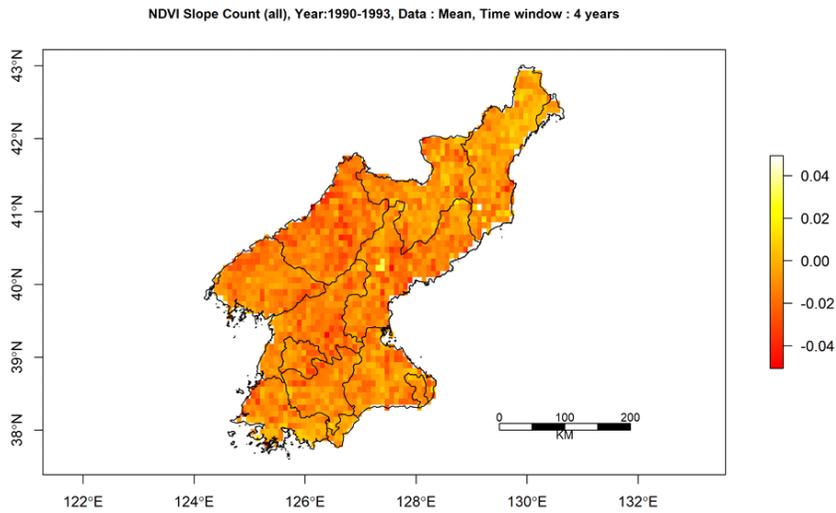
\* 경사도는  $n-(w+1년) \sim n년$  간의 데이터로 계산됨. 일례로,  $w=4$ 인 경우, 1995년의 경사도는 1992,1993,1994,1995년의 데이터로 계산



부록 그림-23. 식생지수 변동계수 경사도 음의 값(-, 변동성이 줄어드는 지역) 이 차지하는 비율(%)의 관심시기별 공간분포 차이(w=4)

\* 경사도는  $n-(w+1)$ 년~ $n$ 년 간의 데이터로 계산됨, 일예로,  $w=4$ 인 경우, 1995년의 경사도는 1992,1993,1994,1995년의 데이터로 계산

부록 그림-24는 앞서 여러 결과에서 가장 토지황폐화가 심각하다고 판단하였던 1993년을 사례로, 1993년 이전 4개년간의 식생지수 기울기를 구한 결과이다. 대체로 우리가 백두대간이라고 이야기하는 함경-남림-태백산맥과 개마고원 일대가 식생지수 감소가 유의미하게 도출되지 않으며, 평야 및 해안지역 일대에서 차이가 유의미하게 나타남을 확인할 수 있다. 즉, 이 당시의 토지황폐화 경향은 분명히 인간이 거주하는 지역에서 나타나는 것을 이 지도를 통해 확인할 수 있다.



부록 그림-24. 1991-1993년의 식생지수 평균의 경사도 값(위 : 유의확률 기준 미적용, 아래 : 유의확률 기준 적용)

\* 경사도는  $n-(w+1)$ ~ $n$ 년 간의 데이터로 계산됨, 일례로,  $w=4$ 인 경우, 1995년의 경사도는 1992,1993,1994,1995년의 데이터로 계산

### 3. 종합

이 연구에서는 산림황폐화 추정 중심의 인공위성 기반 토지황폐화 연구를 극복하고자, 토지황폐화 경향을 추정하는데 광범위하게 활용될 수 있는 식생지수를 사용하였으며, 특히 1980년대 자료를 충분히 포함한 AVHRR GIMMS NDVI 식생지수를 사용하여 분석을 진행하였다. 그러나 이 자료는 해상도가 낮고, 시계열 자료의 특성상 데이터가 가지고 있는 계절성과 그 외 주기성의 문제로 해석이 어려운 부분이 있었다. 이에 시계열 자료는 경향 탐지 기법(경사도를 통한 변화 정도 확인) 살펴봄으로써 어떤 변화가 있었는지를 확인하고자 하였고, 시공간 자료에 확대 적용함으로써 공간적으로 어떤 식의 변화가 있었는지, 그리고 취약지가 어디인지 확인하고자 하였다.

그 결과 대기근이 발생한 전후인 1990년대 초반과 2000년 전후의 시점에서 공통적으로 식생지수가 급격하게 감소하고, 변동성이 급격하게 늘어나는 경향이 관찰되었으며, 이는 평양을 중심으로 한 관서지방에서, 그 외에는 해안 지역에서 주로 관찰되었다. 다만 전체적인 수치 변화는 2000년대 이후에도 극심하였을 것으로 추정되나, 감소의 빈도와 변동성 측면에서는 1990년대 초가 가장 심했을 것으로 추정된다.

그러나 이 결과는 자료가 가지고 있는 극히 일부 속성에 관하여 해석한 것으로서, 분간하기 쉬운 결과만을 도출하였다는 한계를 가진다. 이 연구의 범위와 관계가 약해 세부적으로 확인하지 않았지만, 1990년대 초반과 2000년대 초반과는 달리 2000년대 이후 자료는 북한의 자연환경·사회경제적 상황과 밀접한 연관이 없어 보인다. 이 부분은 추후 연구를 통해 보완할 필요가 있다. 그리고 극복하기 어려운 한계지만 1982년이라는 자료의 시점 측면, 자료의 해상도 측면의 문제도 고려해야 한다. 1990년대가 아닌 다른 시기, 특히 1960-70년대에는 어떤 형태로 토지황폐화가 일어났는지, 그리고 이것이 1990년대 대기근과는 어떤 관계가 있는지에 대해서 다른 자료들과 다른 방법을 이용한 검토가 필요하다.

### 부록 3. 모형기반 조기경보신호 탐지 기법을 통한 연도별 토지황폐화와 식량생산 감소 조기경보신호 탐지

3장에서 설명하였듯, 모형기반 분석은 측정기반 분석과는 달리 임계전이 조기경보신호가 언제 발생하였는지를 확인하였는지 용이하다. 모형기반 분석에서 임계전이 조기경보신호가 도출된 시기<sup>164)</sup>를 각 자료별로 종합한 것이 부록 표-5와 같다. 부록 표-5의 내용을 10년 단위로 해석하면 다음과 같다.

먼저 1973년까지는 일부 사회경제 자료들의 결과만 확인할 수 있어 해석이 어렵다. 1970년대에는 대부분의 모형에서 간헐적으로만 조기경보신호가 도출되어, 특별히 조기경보신호가 도출된 시기라고 볼 수 없다.

1980년대에는 그 양상이 달라진다. 1980년대 초반에는 정규화식생지수와 기후자료에서 작은 변화에 대한 조기경보신호(C, Conditional Variance; T, Total Variance)와 중간 단위에 대한 조기경보신호(D, Diffusion)이 주로 도출되는 것을 확인할 수 있다. 그러나, 1980년대 중반에는 해당 빈도가 증가하고, 이전에 보이지 않던 큰 변화를 나타내는(J, Jump Intensity) 사전예방지표가 등장하기 시작하였다. 특히 1985, 1986, 1988, 1989년에 대부분의 지표에서 사전예방지표가 폭증하는 결과가 도출되었다.

1990년대 초반에는 식량과 관련된 사회경제지표에서 갑작스러운 조기경보신호가 도출되었고, 이는 이당시 급격한 식량생산량의 감소와 연관되어 있다고 본다. 정규화식생지수와 기후자료의 경향은 이후 다소 달라지는데, 정규화식생지수의 사전예방지표의 빈도는 최근을 제외하고는 다소 줄어들거나 임의로 나타나는 경우가 생겼지만, 기후자료는 빈도가 늘어나고, 해석하기 어려울 만큼 기후의 사전예방지표가 임의로 도출되었다.

---

164) DDJ Model의 경우 조건부 분산(Conditional Variance), 총 분산(Total Variance), 확산(Diffusion), 도약 밀도(Jump Intensity)의 지표가 극대값을 보이는 시점(연도)이 조기경보신호의 지점이며, 시간가변성 자기회귀모형의 경우 유사고유치가 1을 넘을 경우 조기경보신호의 시점이라 할 수 있다.

부록 표-5. 모형기반 분석을 종합한 연도별 토지황폐화와 식량생산 감소 조기경보 신호 시점 정리

\* 약어 설명 : 표시된 경우 각 신호(C,T,D,J)가 극값을 보인 연도 또는 시간가변성모형 유사고유치가 1 이상인 연도

C : 조건부 분산(Conditional Variance), T: 총 분산(Total Variance), D : 확산(Diffusion), J : 도약 밀도(Jump Intensity), A : 시간가변성모형

\*\* 사회경제지표

① 1인당 식량생산량과 수입량, ② 옥수수 총 생산량, ③ 감자 총 생산량, ④ 총에너지소비량, ⑤ 화석연료사용비용

▨: 없는 데이터

연도	정규화식생지수				기후-평균기온				기후-강수량				기후-최고기온				기후-최저기온				사회경제지표				
	전역	관서	관북	중부	전역	관서	관북	중부	전역	관서	관북	중부	전역	관서	관북	중부	전역	관서	관북	중부	①	②	③	④	⑤
1961	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨
1962	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨
1963	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	A
1964	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	A	▨	▨	▨	A
1965	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	CA	A	▨	▨	A
1966	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	A	A	▨	▨	A
1967	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	A	A	▨	▨	A
1968	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	CA	A	▨	▨	A
1969	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	A	▨	▨	▨	A
1970	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	A	▨	▨	▨	A
1971	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	A	▨	▨	▨	A
1972	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	A	▨	▨	A
1973	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	T	▨	▨	▨	A
1974	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	A
1975	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	▨	A

\* 약어 설명 : 표시된 경우 각 신호(C,T,D,J)가 극값을 보인 연도 또는 시간가변성모형 유사고유치가 1 이상인 연도  
 C : 조건부 분산(Conditional Variance), T: 총 분산(Total Variance), D : 확산(Diffusion), J : 도약 밀도(Jump Intensity), A : 시간가변성모형

\*\* 사회경제지표

① 1인당 식량생산량과 수입량, ② 옥수수 총 생산량, ③ 감자 총 생산량, ④ 총에너지소비량, ⑤ 화석연료사용비율

▨: 없는 데이터

연도	정규화식생지수				기후-평균기온				기후-강수량				기후-최고기온				기후-최저기온				사회경제지표				
	전역	관서	관북	중부	전역	관서	관북	중부	전역	관서	관북	중부	전역	관서	관북	중부	전역	관서	관북	중부	①	②	③	④	⑤
1976	▨	▨	▨	▨											DJ	DJ				C				▨	A
1977	▨	▨	▨	▨							D													▨	DA
1978	▨	▨	▨	▨																				▨	DA
1979	▨	▨	▨	▨							C											A		▨	D
1980	▨	▨	▨	▨				T			C									T		A			D
1981					D	T		T										DJ				A			D
1982								C					D		T			T				CA			D
1983	D		D										D	T			D					C			D
1984					D	T	T	T		T												CA			D
1985	D	D	D		D	T		T	D	T							T	CDJ	C			CA			D
1986	CD	CTD	CT		D	T	T									D	TJ	DJ				CA	J		D
1987													TJ	DJ								CJ	J		D
1988	CTJ	CTDJ	CTDJ	CTJ											C							CJ	J		D
1989	J	J		J					C	C		C	D	J	T	T		C		DJ		CJA	J		D
1990		J							CTJ	CD		CDJ							J		A	CJA	J		D
1991						C															TJA	CJA	J		

\* 약어 설명 : 표시된 경우 각 신호(C,T,D,J)가 극값을 보인 연도 또는 시간가변성모형 유사고유치가 1 이상인 연도  
**C** : 조건부 분산(Conditional Variance), **T**: 총 분산(Total Variance), **D** : 확산(Diffusion), **J** : 도약 밀도(Jump Intensity), **A** : 시간가변성모형

\*\* 사회경제지표

① 1인당 식량생산량과 수입량, ② 옥수수 총 생산량, ③ 감자 총 생산량, ④ 총에너지소비량, ⑤ 화석연료사용비율

▨: 없는 데이터

연도	정규화식생지수				기후-평균기온				기후-강수량				기후-최고기온				기후-최저기온				사회경제지표				
	전역	관서	관북	중부	전역	관서	관북	중부	전역	관서	관북	중부	전역	관서	관북	중부	전역	관서	관북	중부	①	②	③	④	⑤
1992								D	T	T					C			D		TJA	CJ	CTJ			
1993							C	D		T	T	TJ	D	DJ	DJ		C			TJA	CJ				
1994									D					T		D		T				CJ			
1995	J			TJ		C						TJ	DJ			C		C							
1996											T	J	D	DJ					DJ	D	TD				
1997			J		CJ	DJ	CD	CDJ	TJ	T	DJ		C	C									J		
1998					TJ	DJ	DJ	DJ	C		C	T				C		TDJ	C	C		CT			
1999					TJ	DJ	J																		
2000	CT	CT		CT					TJ		D	CDJ		C	C		C	C		C		A		A	
2001					C	C								T			TJ	DJ		DJ	C		D	A	
2002								C	C					T							C				
2003							C			C						DJ	D	T	T		C				
2004										C		C	C								C				
2005								D		T											C	A			
2006					C	C	C	C		J			D			T				C		A			
2007					TJ	DJ	DJ	DJ		D	T						TJ		DJ			A		C	

\* 약어 설명 : 표시된 경우 각 신호(C,T,D,J)가 극값을 보인 연도 또는 시간가변성모형 유사고유치가 1 이상인 연도  
 C : 조건부 분산(Conditional Variance), T: 총 분산(Total Variance), D : 확산(Diffusion), J : 도약 밀도(Jump Intensity), A : 시간가변성모형

\*\* 사회경제지표

① 1인당 식량생산량과 수입량, ② 옥수수 총 생산량, ③ 감자 총 생산량, ④ 총에너지소비량, ⑤ 화석연료사용비율

▨: 없는 데이터

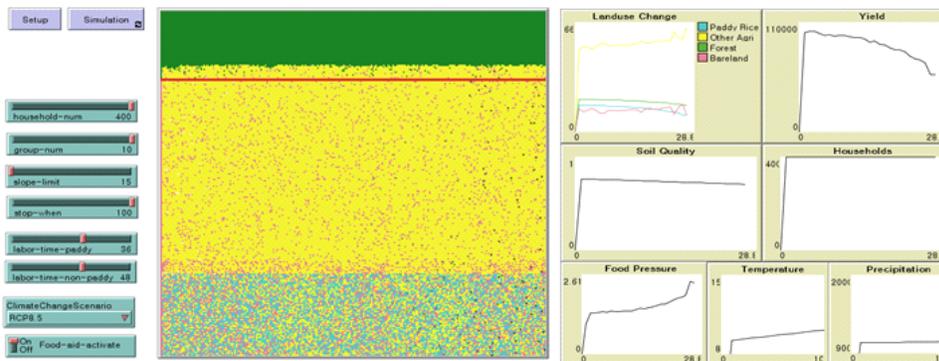
연도	정규화식생지수				기후-평균기온				기후-강수량				기후-최고기온				기후-최저기온				사회경제지표				
	전역	관서	관북	중부	전역	관서	관북	중부	전역	관서	관북	중부	전역	관서	관북	중부	전역	관서	관북	중부	①	②	③	④	⑤
2008												T							DJ			A			C
2009					C																	A		J	CA
2010										J										T		A		CTJ	CA
2011						C						CDJ								T					
2012	T		CTJ	CD												T			T		C				CA
2013	A	A	A	DA						DJ				T			D	T			C			D	TJA
2014	A	A	A	DA					TJ	J	DJ	DJ					C		C		C			D	TJA
2015	A	A	A	A							J				T						C				▨
2016	▨	▨	▨	▨							J				C	T							D	▨	▨
2017	▨	▨	▨	▨									C	C		C								▨	▨
2018	▨	▨	▨	▨									T	J	DJ	J	J				▨		D	▨	▨
2019	▨	▨	▨	▨			T						C	C		C					▨	▨	▨	▨	▨

## 부록 4. 다행위자시스템 모형 인터페이스와 코드

부록 6에서는 4장에서 구축한 다행위자시스템 모형이 실제로는 어떠한 구조로 설계되었는지를 기록하고자 한다. 인터페이스를 소개하고, 실제 모형의 소스 코드를 제시한다. 참고로 본 모형은 Netlogo 6.0.4에서 작성하였으며, 논문이 출판되는 시기 기준 Windows 10 및 리눅스(Ubuntu 20.04 LTS) 기반의 Netlogo 6.0.4에서 정상적으로 구동되는 것이 확인되었다<sup>165)</sup>.

### 1. 다행위자시스템 모형 인터페이스

다행위자시스템 모형 인터페이스는 아래 부록 그림-25와 같이 설계하였다. 가운데 초록-빨강과 노랑-연두색의 그림은 모형 내 “가상의 북한 협동농장”의 토지이용 결과다. 왼쪽의 스위치와 슬라이더는 모형 구동과 시나리오 설계를 위한 구동 옵션 메뉴다. 오른쪽은 결과에 대한 도표로, 파일 등으로 출력이 가능하다.



부록 그림-25. 모형의 인터페이스와 구동 캡처화면

165) 단 시스템에 R이 설치되어 있어야 하고, R extension이 구동될 수 있는 조치가 취해져야 한다.

## 2. 다행위자시스템 모형 소스 코드

```
extensions[r]
globals
[ whole-yield-estimation
  whole-yield
  whole-population
  whole-food-per-captia
  whole-food-per-captia-estimation
  whole-food-pressure
  whole-food-pressure-estimation
  mean-soil-quality
  simulation-percent
  lchange-count
  lchange-count-on-tick
  growth-rate-of-population
  gov-yield
  gov-food
  gov-food-a-man
  food-aid
  ndvi_M3
  ndvi_M5
  ndvi_M7
  yield_M3
  yield_M5
  yield_M7
  soil-quality_M3
  soil-quality_M5
  soil-quality_M7
]

patches-own
[ p_cover-type
  p_elevation
  p_slope
  p_rainfall
  p_temp
  p_as
  p_cur
  p_ndvi
  p_yield
  p_yield-potential
  p_yield-estimation
  p_sigun
  p_kfactor
  p_rfactor
  p_cfactor
  p_lsfactor
  p_pfactor
  p_usle
```

```

p_usle_es
p_ndvi2010
p_soil-quality
p_soil-potential
p_soil-physical-point
p_labor
p_redundancy
p_stratgy_changeable
P_abandon-year
p_agri-usable
p_luchange_log
p_biomass
p_turtleown
p_group
p_dummy
p_farmer_id
p_time
p_sq
]

turtles-own
[
  h_people
  h_labor_pop
  h_non_labor_pop
  h_group
  h_labor
  h_whole-food
  h_food-per-captia
  h_regional-food-pressure
  h_food-pressure
  h_whole-food-estimation
  h_food-per-captia-estimation
  h_regional-food-pressure-estimation
  h_food-pressure-estimation
  h_xcor
  h_ycor
  h_time
  h_redundancy

  h_yield
  h_yield_gov
  h_yield_mine
  h_food_gov
  h_food
  h_food-houshold
  h_hunger-time
  h_hunger
]

to setup
ca

```

```

reset-ticks
crt household-num [set color black set size 2]
setup-environment
setup-human-agent
r:eval "library(raster)"
r:eval "library(zoo)"
r:eval "library(earlywarnings)"
end

to setup-environment
  ask patches[set p_dummy 1]
  ask patches with[pycor < 60] [set p_cover-type 210 set p_elevation 0 set
p_slope 0 set pcolor cyan];paddy rice field
  ask patches with[pycor >= 60 and pycor < 200] [set p_cover-type 220 set
pcolor yellow set p_slope (pycor - 59) *(10 / 140) + (random-float 0.05)];other
farm field
  ask patches with[pycor >= 200 and pycor < 202] [set p_cover-type 100 set
pcolor red ];urban
  ask patches with[pycor >= 202][set p_cover-type 300 set pcolor 63]; forest

  ask patches with[pycor >= 200]
  [set p_slope ((pycor - 199) * (20 / 50)) + (10 * (1 + random-float 0.05))]
  ask patches
  [
    set p_elevation 10 * tan (p_slope)
    set p_elevation p_elevation * 10
  ] ; slope gradient - 0 to 30(bottom to top), elevation is calculated by slope
angle and cell size, except paddy rice field

  ;setting geomorphic parameter(dummy)
  ask patches[set p_as count neighbors with[p_elevation > [p_elevation] of myself]
* 0.1]
  foreach sort-on [(- p_elevation)] patches
  [the-patch -> ask the-patch
  [ifelse count neighbors with [p_elevation > [p_elevation] of myself] > 0[set
p_as [p_as] of max-one-of neighbors4[p_elevation] + 0.1][set p_as 0.1]]]
  ;setting lsfactor
  ask patches
  [let lfactor 1.4 * ((p_as / 22.13) ^ 0.4)
  let sfactor (((sin p_slope) / 0.0896) ^ 1.3)
  set p_lsfactor lfactor * sfactor
  ]

  ;setting group living land
  let group-set 1
  while[group-set < group-num + 1]
  [ask patches with[p_group = 0 and pxcor <= ((max-pxcor / group-num) *
group-set) and pxcor > ((max-pxcor / group-num) * (group-set - 1))] [set
p_group group-set set pcolor (pcolor + 4) - ( group-set / 2)]
  set group-set group-set + 1
  ; if count patches with[p_group = [p_group] of myself] >= (count patches /
group-num) [set group-set group-set + 1]]

```

```

;setting cur
ifelse SurfaceCurvature = true
[ask patches
[let curcount count patches with[pxcor >= ([pxcor] of myself - 3) and pxcor <=
([pxcor] of myself + 3) and pycor >= ([pycor] of myself - 3) and pycor <=
([pycor] of myself + 3)]
set p_cur (sum [p_elevation] of patches with[pxcor >= ([pxcor] of myself - 3)
and pxcor <= ([pxcor] of myself + 3) and pycor >= ([pycor] of myself - 3) and
pycor <= ([pycor] of myself + 3)] - p_elevation ) / (curcount * 10)
]
[ask patches[set p_cur random-normal 1.6438894181869679
1.8382822415347304]]
; setting initial environmental state
ask patches
[ set p_rainfall random-normal 1046 83
set p_temp random-normal 9.19 1.30
set p_kfactor random-normal 0.25 0.02
if p_lsfactor < 0 [set p_lsfactor 0]
]
end

to setup-human-agent

; setting agricultural group
let group-set 1
ask turtles with[h_group = 0]
[set h_group group-set
if (count turtles with[h_group = [h_group] of myself]) >= (household-num /
group-num ) [set group-set group-set + 1]
]
ask turtles[set color scale-color black h_group group-num 1]

; setting group living land
ask turtles
[move-to one-of patches with[p_cover-type = 100 and count turtles-here = 0
and p_group = [h_group] of myself]
set h_labor_pop 2 set h_non_labor_pop 2 + random 2 set h_people
h_labor_pop + h_non_labor_pop ;setting population
]
set whole-population sum [h_people] of turtles

end

To show-dem
let max-z max [p_elevation] of patches
let min-z min [p_elevation] of patches with [p_elevation > -9999]
ask patches with [ p_elevation > -9999]
[ set pcolor scale-color orange p_elevation max-z min-z]
End

To show-slope
let max-z max [p_slope] of patches

```

```

let min-z min [p_slope] of patches with [p_slope > -9999]
ask patches with [ p_slope > -9999]
  [ set pcolor scale-color red p_slope max-z min-z]
End

to go
  if ticks > 0 [update-scenario]
  environmental-model
  human-decision
  calculate-moran-i
  tick
  if ticks >= stop-when [stop]
  if count turtles < household-num / 2
    [stop]
end

to update-scenario
  ;climate change scenario
  ;initial set
  ask patches
  [ set p_rainfall random-normal 1046 83
    set p_temp random-normal 9.19 1.30]
  ;land-usable change caused by climate change

  ;climate change
  if ClimateChangeScenario = "RCP2.6"
  [ask patches
    [let temp_increase ((random-normal 1 0.3) / 20) * ticks
      let precipitation_increase_rate ((temp_increase * 0.04) / 20) * ticks
      set p_temp p_temp + temp_increase
      set p_rainfall p_rainfall * (1 + precipitation_increase_rate) ]
    ]
  ask patches with[p_agri-usable = 210][if p_slope < 5 and p_elevation < 100
and p_temp > (10 - (random-float 1)) [set p_agri-usable 2]]
  ask patches with[p_agri-usable = 220][if p_temp < (10 - (random-float 1))
[set p_agri-usable 21]]

  if ClimateChangeScenario = "RCP4.5"
  [ask patches
    [let temp_increase ((random-normal 1.4 0.3) / 20) * ticks
      let precipitation_increase_rate ((temp_increase * 0.04) / 20) * ticks
      set p_temp p_temp + temp_increase
      set p_rainfall p_rainfall * (1 + precipitation_increase_rate) ]
    ]
  ask patches with[p_agri-usable = 210][if p_slope < 5 and p_elevation < 100
and p_temp > (10 - (random-float 1)) [set p_agri-usable 2]]
  ask patches with[p_agri-usable = 220][if p_temp < (10 - (random-float 1))
[set p_agri-usable 21]]

  if ClimateChangeScenario = "RCP6.0"
  [ask patches
    [let temp_increase ((random-normal 1.3 0.3) / 20) * ticks
      let precipitation_increase_rate ((temp_increase * 0.04) / 20) * ticks
      set p_temp p_temp + temp_increase

```

```

    set p_rainfall p_rainfall * (1 + precipitation_increase_rate) ]
  ]
  ask patches with[p_agri-usable = 210][if p_slope < 5 and p_elevation < 100
and p_temp > (10 - (random-float 1)) [set p_agri-usable 2]]
  ask patches with[p_agri-usable = 220][if p_temp < (10 - (random-float 1))
[set p_agri-usable 21]]

  if ClimateChangeScenario = "RCP8.5"
[ask patches
[let temp_increase ((random-normal 2 0.3) / 20) * ticks
let precipitation_increase_rate ((temp_increase * 0.04) / 20) * ticks
set p_temp p_temp + temp_increase
set p_rainfall p_rainfall * (1 + precipitation_increase_rate) ]
]
ask patches with[p_agri-usable = 210][if p_slope < 5 and p_elevation < 100
and p_temp > (10 - (random-float 1)) [set p_agri-usable 2]]
ask patches with[p_agri-usable = 220][if p_temp < (10 - (random-float 1))
[set p_agri-usable 21]]

;abandon year of bare land
ask patches with[p_slope > -9999][ifelse p_cover-type = 600 [set
P_abandon-year P_abandon-year + 1][set P_abandon-year 0] ]
;ask patches with[p_cover-type = 210 or p_cover-type = 220][set p_labor 0.9 +
((random 10) * 0.01)]

end

to environmental-model
calc-usle
calc-ndvi
calc-soil-quality
calc-yield-potential
calc-yield-estimation
end

to calc-usle
ask patches with[p_slope > -9999]
[
set p_rfactor (p_rainfall * 0.35) + 38.5
if p_cover-type = 100 [set p_cfactor 0 set p_pfactor 0 ]
if p_cover-type = 210 [set p_cfactor 0.1 set p_pfactor 0.1]
if p_cover-type = 220 [set p_cfactor 0.2 set p_pfactor 0.5]
if p_cover-type = 300 [set p_cfactor 0.001 set p_pfactor 1]
if p_cover-type = 400 [set p_cfactor 0.013 set p_pfactor 1 ]
if p_cover-type = 500 [set p_cfactor 0 set p_pfactor 0 ]
if p_cover-type = 600 [set p_cfactor 1 set p_pfactor 1 ]
if p_cover-type = 700 [set p_cfactor 0 set p_pfactor 0 ]
set p_usle p_rfactor * p_kfactor * p_lsfactor * p_cfactor * p_pfactor
set p_usle p_usle * 100]
show-usle
end

to calc-ndvi

```

```

ask patches with[p_cover-type = 210]
[let non-random 0
  if p_slope = 0 [set p_slope 0.0001]
  if p_elevation = 0 [set p_elevation 0.0001]
  if p_rainfall = 0 [set p_rainfall 0.0001]
  set non-random 1.464 + (-0.019 * (ln p_slope)) + (-0.026 * (ln p_elevation)) +
(0.215 * (ln p_rainfall)) + (-0.023 * p_temp)
  set non-random ln non-random
  set p_ndvi (non-random * 0.158) + (0.842 * (0.6 + random-float 0.3))
]

ask patches with[p_cover-type = 220]
[let non-random 0
  if p_elevation = 0 [set p_elevation 0.0001]
  set non-random 2.115 + (0.005 * p_slope) + (-0.01 * p_as) + (0.02 * (ln
p_elevation)) + (0.002 * p_temp)
  set non-random ln non-random
  set p_ndvi (non-random * 0.142) + (0.858 * (0.6 + random-float 0.3))
]

ask patches with[p_cover-type = 300 or p_cover-type = 400 or p_cover-type =
500]
[let non-random 0
  if p_slope = 0 [set p_slope 0.0001]
  if p_elevation = 0 [set p_elevation 0.0001]
  if p_rainfall = 0 [set p_rainfall 0.0001]
  set non-random 7111.178 + (-30.361 * p_as) + (83.839 * (ln p_slope)) +
(213.554 * (ln p_elevation)) + (36.004 * p_temp) + (-1.107 * (ln p_rainfall))
  set non-random non-random / 10000
  set p_ndvi (non-random * 0.289) + (0.711 * (0.8 + random-float 0.2))
]

ask patches with[p_cover-type = 100 or p_cover-type = 600 or p_cover-type =
700]
[set p_ndvi 0]

  ask patches with[p_cover-type = -9999]
[set p_ndvi -9999]

show-ndvi

end

to calc-soil-quality
ask patches with[p_slope > -9999]
[if ticks = 0 [set p_soil-potential 0.3 + (random 2 * random-float 0.2) -
(random 2 * random 2 * random-float 0.2)];(((random 3) - 1) * random-float 0.2)]
  if p_usle < 100 [ set p_soil-physical-point 0.5 ]
  if p_usle >= 100 and p_usle < 500 [ set p_soil-physical-point 0.45]
  if p_usle >= 500 and p_usle < 1000 [set p_soil-physical-point 0.4]
  if p_usle >= 1000 [set p_soil-physical-point 0.35 ]
  set p_soil-quality p_soil-physical-point + p_soil-potential]

```

```

    ask patches with[p_slope = -9999]
    [set p_soil-quality -9999]
    set mean-soil-quality mean [p_soil-quality] of patches with[p_slope > -9999]
end

to calc-yield-potential ; Hong et al.(2009)
    ask patches with[p_cover-type = 210 or p_agri-usable = 2]
    [let random_num 0.6 + random-float 0.3
     set p_yield-potential (0.449 * (((1137.209 * p_ndvi) - 601.416) * 62.5)) +
    (0.551 * (0.449 * (((1137.209 * random_num) - 601.416) * 62.5)))
     if p_yield-potential < 0 [set p_yield-potential 0.0000001]
    ]
    ask patches with[p_cover-type = 220 or p_agri-usable = 21]
    [let random_num 0.6 + random-float 0.3
     set p_yield-potential (0.555 * (((0.66 * p_ndvi) - 0.641) * 6.25 * 1000)) +
    (0.445 * (0.449 * (((0.66 * random_num) - 0.641) * 6.25 * 1000)))
     if p_yield-potential < 0 [set p_yield-potential 0.0000001]
    ]

    ask patches with[p_agri-usable = -9999]
    [set p_yield-potential 0]
    ask patches with[p_slope = -9999]
    [set p_yield-potential -9999]

    ask patches[set p_yield-potential (p_yield-potential / 100)]

end

to calc-yield-estimation
    ask patches
    [ifelse p_cover-type = 210 or p_cover-type = 220
     [set p_yield-estimation p_yield-potential * p_labor * p_soil-quality ] [set
    p_yield-estimation 0]
     if p_yield-potential < 0 [set p_yield-estimation 0]]
    set whole-yield-estimation sum [p_yield-estimation] of patches with[p_yield > 0]
end

to human-decision
    ask turtles[set h_time 8 * 300 * h_labor_pop] ; 8 hours per day, 300 days per
    year and labor population
    if ticks = 0 [food-pressure-estimation]
    land-allocation
    labor-Strategy
    land-use-decision
    calc-yield
    if ticks != 0[food-pressure]
    show-landuse
    ask patches with[p_cover-type = 210 or p_cover-type = 220][ifelse p_yield >
    p_yield-potential [set p_soil-potential p_soil-potential - (0.5 * (p_labor -
    p_soil-quality))][set p_soil-potential p_soil-potential]]
    ask turtles with[h_food-pressure > 4 + ((random-float 0.2) - 0.1) and h_hunger
    = 0]
    [set h_hunger 1 set h_hunger-time h_hunger]

```

```

ask turtles with[h_food-pressure > 4 + ((random-float 0.2) - 0.1) and h_hunger
= 1]
[set h_hunger-time h_hunger-time + 1]
ask turtles with[h_food-pressure <= 4 + ((random-float 0.2) - 0.1) and h_hunger
= 0]
[set h_hunger 0 set h_hunger-time h_hunger]
ask turtles with[h_hunger-time > 3][die]
end

to food-pressure-estimation
ask turtles
[let yield_mean 34179.98 * 0.001 ; faostat(180619)
let yield_std 8090.841 * 0.001 ; faostat(180619)
let a count patches with[(p_cover-type = 210 or p_cover-type = 220) and
p_group = [h_group] of myself]
let b count turtles with[h_group = [h_group] of myself]
set h_yield (a * random-normal yield_mean yield_std) / b
set h_yield_gov (h_yield * 0.2) + (h_yield * (0.3 + random-float 0.1)) + (0.2 +
random-float 0.1)
set h_yield_mine h_yield - h_yield_gov]

set gov-yield sum [h_yield_gov] of turtles
set gov-food gov-yield + (food-aid * 1000 * 0.3)
set gov-food-a-man gov-food / whole-population
ask turtles
[set h_food_gov gov-food-a-man * h_people
set h_food h_food_gov + h_yield_mine
set h_food-houshold h_food / h_people
set h_food-pressure (164.25 * h_people) / h_food-houshold]
set whole-food-pressure mean [h_food-pressure] of turtles

end

to land-allocation
ask patches[set p_farmer_id -1]
let loopnum 1
while [loopnum <= group-num]
[ while [count turtles with[h_group = loopnum] < count patches with[p_group
= loopnum and p_cover-type >= 200 and p_cover-type < 300 and p_farmer_id =
-1]]
[ask turtles with[h_group = loopnum]
[move-to one-of patches with[p_group = loopnum and p_cover-type >=
200 and p_cover-type < 300 and p_farmer_id = -1]
ask patch-here[set p_farmer_id [who] of myself
]
]]
if count patches with[p_group = loopnum and p_cover-type >= 200 and
p_cover-type < 300 and p_farmer_id = -1] > 0
[ask patches with[p_group = loopnum and p_cover-type >= 200 and
p_cover-type < 300 and p_farmer_id = -1][set p_farmer_id [who] of one-of turtles
with[h_group = loopnum]]]

```

```

    set loopnum loopnum + 1
  ]
end

to labor-strategy
  let paddy-labor-time labor-time-paddy + ((random 3 - 1) * (random-float 0.5))
  let non-paddy-labor-time labor-time-non-paddy + ((random 3 - 1) *
(random-float 2))
  ask turtles with[h_time > 0]
  [foreach sort-on [p_soil-quality] patches with[p_farmer_id =[who] of myself]
    [the-patch -> move-to the-patch

      if [p_cover-type] of patch-here = 210 and h_time > paddy-labor-time
[ask patch-here[set p_time paddy-labor-time] set h_time h_time -
paddy-labor-time]
      if [p_cover-type] of patch-here = 210 and h_time <= paddy-labor-time
[ask patch-here[set p_time [h_time] of myself] set h_time 0]
      if [p_cover-type] of patch-here = 220 and h_time > paddy-labor-time
[ask patch-here[set p_time non-paddy-labor-time] set h_time h_time -
non-paddy-labor-time]
      if [p_cover-type] of patch-here = 220 and h_time <= paddy-labor-time
[ask patch-here[set p_time [h_time] of myself] set h_time 0]
    ]
  ]

  ask turtles with[h_time = 0 and h_food-pressure > 1]
  [ let st-criteria0 0.5 + ((random 3 - 1) * random-float 0.05)
    let st-criteria1 0.6 + ((random 3 - 1) * random-float 0.05)
    let st-criteria2 0.7 + ((random 3 - 1) * random-float 0.05)
    let st-criteria3 0.8 + ((random 3 - 1) * random-float 0.05)
    let st-criteria4 0.9 + ((random 3 - 1) * random-float 0.05)

    let labor-criteria1 0.1 + ((random 3 - 1) * random-float 0.05)
    let labor-criteria2 0.2 + ((random 3 - 1) * random-float 0.05)

    if count patches with[p_farmer_id =[who] of myself and p_soil-quality <
st-criteria0] > 0
    [set h_time h_time + sum [p_time] of patches with[p_farmer_id =[who] of
myself and p_soil-quality < st-criteria0]
    ask patches with[p_farmer_id =[who] of myself and p_soil-quality <
st-criteria0][set p_time 0]
    ]
    if count patches with[p_farmer_id =[who] of myself and p_soil-quality >=
st-criteria0 and p_soil-quality < st-criteria1] > 0
    [set h_time h_time + (sum [p_time] of patches with[p_farmer_id =[who] of
myself and p_soil-quality >= st-criteria0 and p_soil-quality < st-criteria1)) *
labor-criteria2
    ask patches with[p_farmer_id =[who] of myself and p_soil-quality >=
st-criteria0 and p_soil-quality < st-criteria1][set p_time p_time * (1 -
labor-criteria2)]
    ]
    if count patches with[p_farmer_id =[who] of myself and p_soil-quality >=
st-criteria1 and p_soil-quality < st-criteria2] > 0

```

```

    [set h_time h_time + (sum [p_time] of patches with[p_farmer_id =[who] of
myself and p_soil-quality >= st-criteria1 and p_soil-quality < st-criteria2)) *
labor-criteria1
    ask patches with[p_farmer_id =[who] of myself and p_soil-quality >=
st-criteria1 and p_soil-quality < st-criteria2][set p_time p_time * (1 -
labor-criteria1)]
  ]
  if h_time > 0[
    foreach sort-on [(- p_soil-quality)] patches with[p_farmer_id =[who] of myself
and st-criteria4 >= 0.9]
    [the-patch -> move-to the-patch
      ifelse h_time > [p_time] of patch-here * (1 + labor-criteria2)
      [set h_time h_time - ([p_time] of patch-here * (1 + labor-criteria2)) ask
patch-here[set p_time p_time * (1 + labor-criteria2)]]
      [ask patch-here[set p_time p_time + [h_time] of myself] set h_time 0]
    ]
  ]
]
ask patches with[(p_cover-type = 210 or p_cover-type = 220) and p_time = 0][set
p_cover-type 600 set p_luchange_log p_luchange_log + 1]

```

end

to land-use-decision

```

  let paddy-labor-time labor-time-paddy + ((random 3 - 1) * (random-float 0.5))
  let non-paddy-labor-time labor-time-non-paddy + ((random 3 - 1) *
(random-float 2))
  calc-yield-estimation
  ifelse ticks = 0 [food-pressure-estimation][food-pressure]
  let ignore-slope-limit 3.5 + ((random-float 0.2) - 0.1)
  ;land-use change procedure(non-agri->agri) when agent's food pressure is
higher than 1.
  ask turtles with[h_food-pressure > 1 and h_time > 0][
    ask patches with[p_group = [h_group] of myself]
    [ if (p_cover-type = 300 or p_cover-type = 400 or p_cover-type = 600) and
p_slope < slope-limit and p_soil-quality >= 0.5 [set p_stratgy_changeable 1] ]
    if h_food-pressure > ignore-slope-limit
    [ ask patches with[p_group = [h_group] of myself]
      [ if (p_cover-type = 300 or p_cover-type = 400 or p_cover-type = 600) and
p_soil-quality >= 0.5 [set p_stratgy_changeable 1] ]]
    let endwhile count patches with[p_stratgy_changeable = 1 and p_group =
[h_group] of myself]
    let loopnum 1
    let sum-time-myself sum [p_time] of patches with [p_group = [h_group] of
myself]
    let endloop (h_food-pressure + ((random-float 0.2) - 0.1)) ^ 3.5)
    while [ h_time > 0 and endwhile > 0 and loopnum < endloop]
    [if (count patches with[p_stratgy_changeable = 1 and p_group = [h_group] of
myself and count neighbors with[p_cover-type = 210 or p_cover-type = 220 or

```

```

p_cover-type = 100] > 0]) != 0
  [ask one-of patches with[p_stratgy_changeable = 1 and p_group = [h_group]
of myself and count neighbors with[p_cover-type = 210 or p_cover-type = 220 or
p_cover-type = 100] > 0]
  [ifelse p_agri-usable = 2 [set p_cover-type 210 set p_farmer_id [who] of
myself set p_time (paddy-labor-time * 0.5) set p_stratgy_changeable 0 set
p_luchange_log p_luchange_log + 1 ]
  [set p_cover-type 220 set p_farmer_id [who] of myself set p_time
(non-paddy-labor-time * 0.5) set p_stratgy_changeable 0 set p_luchange_log
p_luchange_log + 1 ]]]
  set h_redundancy (h_redundancy + sum [p_redundancy] of patches
with[p_farmer_id = [who] of myself])
  ask patches with[p_group = [h_group] of myself] [set p_redundancy 0]
  set endwhile count patches with[p_stratgy_changeable = 1 and p_group =
[h_group] of myself]

  set loopnum loopnum + 1
]
ask patches with[p_group = [h_group] of myself][set p_redundancy 0 set
p_stratgy_changeable 0] ]
end

to food-pressure
  if Food-aid-activate = true [set food-aid (164.25 * 400 * 4) * (Food-aid-percent
/ 100) ]
ask turtles
[set h_yield sum [p_yield] of patches with[p_farmer_id = [who] of myself]
set h_yield_gov (h_yield * 0.2) + (h_yield * (0.3 + random-float 0.1)) + (0.2 +
random-float 0.1)
set h_yield_mine h_yield - h_yield_gov]

set gov-yield sum [h_yield_gov] of turtles
set gov-food gov-yield + food-aid
set gov-food-a-man gov-food / whole-population
ask turtles
[set h_food_gov gov-food-a-man * h_people
set h_food h_food_gov + h_yield_mine
set h_food-houshold h_food / h_people
set h_food-pressure (164.25 * h_people) / h_food-houshold
if h_food-pressure < 0[set h_food-pressure 0]]
set whole-food-pressure mean [h_food-pressure] of turtles
end

to calc-yield
  let paddy-labor-time labor-time-paddy + ((random 3 - 1) * (random-float 0.5))
  let non-paddy-labor-time labor-time-non-paddy + ((random 3 - 1) *
(random-float 2))

  ask patches with[p_cover-type > -9999]
  [if p_cover-type = 210[set p_labor p_time / paddy-labor-time]
  if p_cover-type = 220[set p_labor p_time / non-paddy-labor-time]
  ifelse p_cover-type = 210 or p_cover-type = 220
  [set p_yield p_yield-potential * p_labor * p_soil-quality] [set p_yield 0]

```

```

    if p_yield-potential < 0 [set p_yield 0]
    ask patches with[p_rainfall > (2000 + random 100)] [set p_yield 0]
    set whole-yield sum [p_yield] of patches with[p_yield > 0]

end

to show-ndvi
ask patches with [ p_ndvi > -9999]
[ if p_ndvi < 0 [ set pcolor white ]
  if p_ndvi >= 0 and p_ndvi < 0.6 [ set pcolor 69]
  if p_ndvi >= 0.6 and p_ndvi < 0.65 [set pcolor 67]
  if p_ndvi >= 0.65 and p_ndvi < 0.7 [set pcolor 66]
  if p_ndvi >= 0.7 and p_ndvi < 0.75 [set pcolor 65]
  if p_ndvi >= 0.75 and p_ndvi < 0.8[set pcolor 64]
  if p_ndvi >= 0.8 and p_ndvi < 0.85[set pcolor 63]
  if p_ndvi >= 0.85 and p_ndvi < 0.9[set pcolor 62]
  if p_ndvi >= 0.9 [set pcolor 61]
]
ask patches with [ p_ndvi = -9999][set pcolor black]
end

to show-usle
ask patches with [ p_usle > -9999]
[ if p_usle < 100 [ set pcolor white ]
  if p_usle >= 100 and p_usle < 500 [ set pcolor yellow]
  if p_usle >= 500 and p_usle < 1000 [set pcolor orange]
  if p_usle >= 1000 [set pcolor red]]
;[ set pcolor scale-color green p_ndvi -1 1]
end

To show-landuse
ask patches with [ p_cover-type > -9999]
[ if p_cover-type = 100 [set pcolor red] ; urban areas

  if p_cover-type = 210 [set pcolor cyan] ; Paddy rice fields
  if p_cover-type = 220 [set pcolor yellow] ; Ppland crop fields
  if p_cover-type = 230 [set pcolor orange] ; 'Green-house' farms
  if p_cover-type = 240 [set pcolor violet] ; Orchards
  if p_cover-type = 250 [set pcolor grey] ; Other agriculture

  if p_cover-type = 300 [set pcolor 63] ; Forested land (dark green)

  if p_cover-type = 400 [set pcolor 67] ; Grassland (light green)

  if p_cover-type = 500 [set pcolor sky] ; Wetland

  if p_cover-type = 600 [set pcolor pink] ; Bare land

  if p_cover-type = 700 [set pcolor blue] ; Water surface
]
End

```



## Abstract

# A Study on Land Degradation and Declining Food Production based on the Concept of Complex Adaptive System - Focusing on the North Korean Famine in the 1990s

Yoosoon AN

Department of Geography

The Graduate School

Seoul National University

The North Korean Famine, which is occurred in the mid-1990s, resulted in hundreds of thousands of people's death or the agony of starvation. More than 20 years later, the famine has left many adverse sequelae on the North Korean economy, society, and public health. The series of natural disasters in the early 1990s, economic isolation caused by the soviet bloc collapses, and inefficiency of the agro-economic system are

commonly acknowledged as causes of this famine. However, land degradation, the decline in land productivity resulted from these factors, and declining food production, caused by land degradation, are the fundamental causes of this famine. The land degradation and declining food production issues are crucial not only for North Korea's well-being but also for humankind in terms of about a billion people experiences the risk of hunger stemming from these issues.

The land degradation issue considers a social-ecological system (SES), which consists of biophysical components of the soil ecosystem and dynamics of socio-economical land-use change. The social-ecological system is a typical example of the complex adaptive system (CAS) resulting from a complex interaction among components. Moreover, the relationship between land degradation and declining food production is a feedback loop regarding their circular causality. The feedback loop of these issues can amplify the nonlinearity of unpredictable effects. Besides, a lack of data and ignorance of the interrelationship of the social-ecological system in North Korea make their problem more complex and uncertain. Consequently, the process of land degradation and declining food production in North Korea could interpret as a complex adaptive social-ecological system.

This study aims to develop a precautionary approach to mitigate the risk of land degradation and food shortage in North Korea, applying the social-ecological system perspective and complex adaptive systems methodologies. Chapter 2 attempts to reinterpret previous studies and data on these issues in a

social-ecological system perspective and reconstruct these issues as a social-ecological process model. Chapter 3 apply the methods for detecting early warning signal of critical transition(EWS) of the complex adaptive system to find the threshold from land degradation to famine in North Korea. Finally, chapter 4 sets a conceptual model representing the agricultural social-ecological system of North Korea and builds a multi-agent system for land-use and cover change(MAS-LUCC) for emulating conceptual models and the 1990's North Korean famine.

The results of this study are summarized as follows :

Firstly, Social-ecological reinterpreting and reconstructing the land degradation and declining food production in North Korea can reveal relations between social-ecological components and distinguish Whitebox-like and Blackbox-like features. By reassessing the studies of North Korea in a social-ecological context, it was possible to understand the gap among disciplinaries of land degradation and declining food production research. The lack of information on the interrelation between these issues could be partially recognized by analogy in literature's historical and political background. However, the statistical analysis was not easy to interpret for quantifying these interrelations, especially the human decision-making process and Blackbox-like natural processes. It implies that translating this social-ecological system needs a complex adaptive system approach.

Secondly, I discovered a wide range of evidence of early warning signals from many spatio-temporal data before the North Korea famine occurred. These spatio-temporal data consists of land degradation indices (e.g. NDVI), food production statistics, etc. In the early 1980s, patterns of these data, mainly land degradation data, show critical slowing down patterns inferred to decrease in resilience gradually. In the late 1980s, another early warning signal pattern was added to existing signals that imply flickering or approaching bifurcation and thresholds. In the early 1990s, food production data dramatically started to show early warning signals. These processes Increasing early warnings from the 1980s imply that the transition of North Korean famine had been complex adaptive emergence. And These results provide the reasoning for the North Korean famine process, such as feedback loops among factors, to interpret the simulation data of chapter 4. Moreover, about five years' time gaps between detecting early warnings imply that North Korean authorities could have time for preventing this disaster. Some papers reviewed in chapter 2 pointed out their perception of risk. Despite evidence of their awareness and action, it is not enough time or strategy to avoid the risk of famine.

Thirdly, the conceptual model reflects the social-ecological system of North Korean agriculture, defined as an abstract (artificial) cooperative farm. And I made this conceptual model build an MAS-LUCC model to imitate the 1990s famine in North Korea in terms of complexity perspective. The simulation results of the test model, which set AD 1960 to the initial year, indicates that the famine could occur about 35 years later, AD 1995 in the

real world. Moreover, these results show the tipping point suggests critical transition(20 and 30 years later from the initial), and different tipping point patterns of model data imply processing like a feedback loop. The simulation result, which assumes the change of amount food import or aid from foreign countries, shows that increasing the external food supply could delay the famine's time. However, these scenarios could not remove the risk of famine and land degradation, which suggests the need for another essential and alternative solution such as mitigation of ecological pressure.

This study could provide some lessons for the sustainability of North Korea, the Korean Peninsula, and the world. First, for making strategy to the resilience of the social-ecological system of North Korea, decision-makers should be aware of the time gap of early warning or process and surprising due to complexity. Therefore, they should build a long-term holistic approach to deal with problems. Second, decision-makers and researchers should use MAS-LUCC based decision support systems to handle complex adaptive components in the social-ecological system. Third, North Korea always has to aim "open system" to delay famine risk. Fourth, We all have to reduce ecological pressure so far as our ability to eliminate land degradation and risk of hunger worldwide.

As this study finally aims to a precautionary approach to the worldwide risk of land degradation and food shortage risk, this study may apply to other regions or other social-ecological issues. Moreover, as this study may be one of the first studies

on North Korea deal with the complexity, this study could be one of the models of interdisciplinary research of North Korea issues. Additional research is needed to expand for sustainability North Korea, Koreana Peninsula, and the world.

**keywords : Land Degradation, Declining Food Production,  
Complex Adaptive System, Early Warning Signal,  
Multi-Agent System for Land-Use and Cover  
Change(MAS-LUCC)**

*Student Number : 2015-30075*