



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](#)

지리학석사 학위논문

사면에서 자연토양과 인위토양의
특성 비교

- 경기도 수원시 지역을 사례로

2021년 2월

서울대학교 대학원

지리학과

이 승 진

사면에서 자연토양과 인위토양의 특성 비교

지도교수 박 수 진

이 논문을 지리학석사 학위논문으로 제출함

2021년 1월

서울대학교 대학원

지 리 학 과

이 승 진

이승진의 석사 학위논문을 인준함

2021년 2월

위 원 장	박 정재	(인)
부 위 원 장	김 대현	(인)
위 원	박 수진	(인)

국문초록

인위토양(Anthrosols)은 기후, 지질 및 지형 등 기존의 자연환경조건에 의해 발생하는 자연토양에 집약적 토지이용, 대규모 피복 변화 등 인간 주도적 현상이 더해져 형성되는 토양으로 규정된다. 인위토양의 형성은 도시화 전개를 통해 공간적으로 확산하며 토양 이용가치를 저하시키고 회복과정에 소요되는 비용 증가를 초래한다. 따라서 지속가능한 토지이용을 달성키 위해서는 시가화 지역과 교외 점이지대에 형성될 수 있는 인위토양에 대한 연구가 필수적이다. 이에 본 연구에서는 기존의 자연토양과 인위토양이 소유역이라는 특정한 공간단위에서 분화하는 양상과 토양 특성의 차이점, 그리고 그것이 관찰되는 위치적 차별성에 대하여 분석하였다.

자연적 토양형성 우세 - 인위적 토양형성 우세로 간주되는 2개 소유역을 선정하고 토양형성의 지형적 연속성을 근거로 한 Catena 개념에 기초하여 두 유역을 6개 사면단위로 분류하여 토양의 특성들을 상호 비교하여 도출한 연구결과는 다음과 같다.

첫째, 연구대상인 용인-수원시 일대 자연유역과 인위유역에서 나타나는 토양특성은 공간적으로 차별적인 분포를 보였다. 조사된 토양특성을 수분함량과 강열감량은 Footslope-Toeslope 등 사면하부를 중심으로 높게 나타났으며 수평적으로 넓게 분포한 반면 pH와 EC의 분포는 다소 과편화된 분포를 보이고 있었다. CEC의 분포 또한 수분함량과 강열감량의 분포와 유사하게 나타났다. 이러한 결과는 각 토양특성간의 상관관계로부터 토양 내 수분이 강열감량($r=0.63, 0.25$), CEC($r=0.34, 0.54$)와 높은 상관관계를 가짐을 감안할 때 Footslope 사면단위를 기점으로 변화하는 유역 사면굴곡의 요철(concavity)와 그에 따른 물질의 확산작용(diffusive processes)에 민

감하게 분포하는 경향을 보였다. 이를 통해 일정한 수문학적 프로세스를 규정하는 소유역 공간스케일과 지표면 물질흐름특성을 지표형태 구분을 통해 반영한 Catena 사면유역단위에서 토양특성이 서로 다르게 나타남을 확인하였다.

둘째, 각 비교기준을 통한 토양특성의 차이를 살펴보면 주로 수분함량과 강열감량, CEC에 대해 유의한 설명력(19-28%)을 보였었고, pH와 EC의 경우 전체적으로 유의한 결과가 나타나지 않았다. 설명력이 낮았던 이유는 토양특성비교를 위해 분류과정에서 채택한 공간스케일과 관련된 문제 그리고 지형변수의 측선 토양의 변이성과 연속성을 고려하지 못했던 점을 거론할 수 있다.

셋째, 인위토양특성의 분포 차이를 유역별, 측선별 구분과 Catena 사면단위 분류 중 가장 잘 설명할 수 있는 기준을 탐색하였다. 유역구분에 의한 비교는 수분함량과 CEC에 대해 유의한 설명력(21-23%)을 보였고, 측선별 비교는 강열감량과 CEC에서 유의한 결과(19-28%)가 나타났다. 사면단위에 따른 구분에 있어서는 EC를 제외한 모든 특성에서 유의한 결과가 산출되었다(15-26%). 즉 토양특성 형성의 지형적 연속성의 개념을 적용한 Catena 사면단위분류방식을 고려한 비교에서 토양의 분포가 가장 잘 설명되었다. 하지만 각 토양특성에 따라 상관계수와 변이도에서 차이가 드러났으며 공간적 분포의 특징에서 어려움이 있다. pH와 EC 등 일부 토양특성의 차별적 발생을 규명하기 위해서는 이산적 공간단위 범주와 토양형성과 관련된 연속적인 환경변수를 종합적으로 고려하는 방식이 필요하다.

본 연구에서는 소유역범위에서 추출하여 조사된 토양자료를 통제된 공간명목범주를 통해 비교하여 인위토양이 드러내는 토양특성의 차이를 평가하였다. 연구지역의 토양에 대해 소유역의 특징과 지형분류기법을 이용하여 비교의 공간범주를 구체화할 수 있었고 각 토

양특성의 차이가 어떠한 비교기준에서 고려되었을 때 보다 분명한 변화를 나타내는가의 결과를 제시하였다. 해당 결과를 통해 불연속적 토양경관 또는 특정 용도지역과 같은 사례단위 연구로 이루어지던 기존 인위토양 연구방식에서 더 나아가 소유역과 그 사면단위 등 보다 일반적으로 적용 가능한 지형분류결과상의 연구지역에서 나타나는 인위토양특성의 공간적 분포특성과 토양특성이 갖는 차이를 밝힐 수 있다. 이를 통해 국토 전반에 공통적으로 사용될 수 있는, 소유역 사면에 대한 지형분류 결과를 이용하여 시가화 진행지역이나 개발예정지와 같은 관심지역에서 나타나는 인위토양특성의 분석에 적합한 절차를 제시할 수 있을 것이다. 나아가 산지전용 부담이 증가하는 국토관리와 산지토양관리에서 인위토양의 분포와 특성을 이해하고 적절한 관리방안 수립의 기초자료로서 기여할 것으로 기대한다.

주요어 : 인위토양(Anthrosols), 토양형성과정(Soil formation process), 토양의 지형연속성(toposequence), 카테나 분석(Catena analysis), 사면유역도출(watershed delineation)

학 번 : 2015-22548

목 차

I. 서론	1
1. 연구 배경	1
2. 인위토양의 규정	3
3. 인위토양 관련 연구동향	4
1) 토양학적 관점에서의 인위토양연구	6
2) 농업자원 관점에서의 인위토양연구	8
3) 기존연구범위의 한계와 개선방안	10
4. 연구 목적	11
5. 연구내용과 논문의 구성	12
II. 연구지역과 연구방법	14
1. 연구지역	14
2. 연구방법	17
1) 토양형성의 기본단위로서 유역이 갖는 의미	17
2) 소유역 사면단위의 분류방법	18
3) 토양 전처리과정과 이화학적 특성 조사방법	26
4) 조사된 토양특성의 공간단위 비교와 평가	29
III. 자연토양대비 인위토양의 토양특성차이	32
1. 자연-인위 유역단위 토양특성의 비교	32
1) 유역단위 토양특성의 기술통계	32
2) 유역단위 토양특성 사이의 상관관계	35

3) 유역별 토양특성의 공간적 분포	37
2. 축선별 토양특성차이 비교평가	45
1) 시료채취 축선별 토양단면의 변화	46
2) 시료채취 축선별 토성	49
3) 시료채취 축선별 토양 특성의 비교	51
3. 사면단위별 토양특성차이 비교평가	54
1) 사면단위별 토양특성차이 분석	54
2) 토양특성차이 소결	61
4. 토양특성 비교방식에 따른 인위토양 특성차이 평가	63
1) 사면단위별 토양특성차이 분석	54
2) 토양특성차이 소결	61
IV. 결론	66
참고문헌	70
Abstract	79
부록	81
A. 상관분석표	82
B. 토양특성표 개괄	83

표 차례

표 2-1. 연구지역 토양형성조건	15
표 2-2. 연구지역 토양분포특징	16
표 2-3. 카테나 지형분류의 사면유역지수, 사면곡면률 기준자	20
표 3-1 자연유역의 토양특성 기술통계	33
표 3-2 인위유역의 토양특성 기술통계	33
표 3-3 자연유역의 토양특성 상관관계	36
표 3-4 인위유역의 토양특성 상관관계	36
표 3-5. 연구유역의 세미베리오그램 모델	38
표 3-5. 자연유역 축선별 토양단면 기술	47
표 3-6. 인위유역 축선별 토양단면 기술	48
표 3-7 연구유역 축선별 Moist, LOI 비교	52
표 3-8 연구유역 축선별 pH, EC, CEC 비교	53
표 3-8 각 축선의 사면단위별 토양특성 통계량	55
표 3-9 연구지역 전체에 대한 Catena 사면단위별 토양특성	62
표 3-10 각 토양비교방식의 토양특성 설명력(결정계수)	64

그림 차례

그림 1-1. 국제토양학계의 주요 국가별 문헌에서 인위토양 연구의 증가추이	5
그림 1-2. 본 연구의 진행도	13
그림 2-1. 용인-수원 일대 연구지역 영상과 위치	16
그림 2-2. 사면유역지수(As)와 사면곡면률(Cs)의 조합에 따른 지형분류	20
그림 2-3. 연구지역 수치고도모형(1:10,000)과 연구대상유역 표시	21
그림 2-4. 연구지역의 지형특성화지수 TCI와 Upslope Contributing Area	22
그림 2-5. 연구유역의 사면경사도와 Catena 사면단위 구분결과	23
그림 2-6. 사면단위를 연결한 측선에 따른 토양시료채취 모식도	24
그림 2-7. 연구지역 사면단위 지형분류상 표본채취지점	25
그림 3-1. 조사된 토양특성의 세미베리오그램 예시	39
그림 3-2. 유역별 Moist의 공간분포	40
그림 3-3. 유역별 LOI의 공간분포	41
그림 3-4. 유역별 pH의 공간분포	42
그림 3-5. 유역별 EC의 공간분포	43
그림 3-6. 유역별 CEC의 공간분포	44
그림 3-7. 자연유역 측선 N1(좌), N2(우)의 토양단면	47
그림 3-8. 인위유역 측선 A1(좌), A2(우)의 토양단면	48
그림 3-9. 연구지역 토성의 분포	50
그림 3-10. 토양조사 측선 사면단위에 따른 수분함량의 거동	58
그림 3-10. 토양조사 측선 사면단위에 따른 LOI의 거동	58
그림 3-12. 토양조사 측선 사면단위에 따른 pH의 거동	59
그림 3-13. 토양조사 측선 사면단위에 따른 EC의 거동	60
그림 3-14. 토양조사 측선 사면단위에 따른 CEC의 거동	60

I. 서론

1. 연구배경

지질학적 시대구분 기준으로서 인류의 역할을 강조하며 부상한 인류세(Anthropocene)와 관련한 논의는 최근 토양학에서 인위토양(Anthrosols)¹⁾의 연구로 확장하고 있다. 전통적인 토양학에서는 토양의 형성에 모재, 기후, 지형, 식생, 시간 등 다섯 가지 요인이 주로 작용한다고 설명하며, 인간 활동을 부수적인 잠재변수로 간주하였다(Jenny, 1941). 그러나 지역환경의 변화에 자연적 요소보다 인간 활동이 더 우세한 인류세의 도래가 학계 전반에 인정됨에 따라 토양형성의 대표 요인으로서 인간 활동이 강조되었다(Crutzen P., 2002; Steffen W., 2007; Zalasiewicz J., 2010). 그리고 인간 활동이 토양환경조성의 주요 동인으로 부상하면서 그 결과물인 인위토양에 대한 연구적 관심이 증가하였다.

인위토양은 시가화 지역 내외의 집약적 토지이용, 대규모 피복변화 등 인간 주도적 현상(Human-driven)의 결과로서 형성되는 토양으로, 도시화의 전개를 통해 공간적으로 확산한다(Capra *et al.*, 2015). 오늘날 세계 육상피복의 3% 가량이 시가화 지역으로 분류되며 전 세계적 도시화의 진전에 따라 이 비중은 지속적으로 증가하고 있다(Lie *et al.*, 2014; Schneider *et al.*, 2009).

인위토양은 30-40년이라는 비교적 단기간에 토양분류 형태가 가시적으로 드러날 수 있다는 특징을 가지고 있다는 점에서 주목받는

1) 본 연구에서는 '인위토양'에 대응하는 영문학술용어로 'Anthrosols'를 사용한다. 인위적 동인에 의해 형성된 토양형으로서 제시된 인위토양 관련 용어는 'Anthrosols', 'Anthropogenic Soil', 'Technosols' 등으로 통일되지 않았다. 그러나 도시토양, 산업오염토양에 편중된 Technosols와 고기후연구, 초기인류정착문화연구 등 장기적 시계열을 가진 연구에 주로 사용되는 Anthropogenic Soil과 달리 본 연구에서 목표하는 토양형성과정에서의 차이로부터 자연토양과의 구분을 정의하는 Anthrosols가 가장 연구목적과 부합한다고 판단하였다.

다(Scalenghe *et al.*, 2008). 통상 자연계에서 토양형과 토양층위의 발달은 수백에서 수천 년 단위의 시간을 요구한다. 그러나 이 과정이 인간 개발행위 또는 인공물의 매립으로 급격히 가속될 수 있음이 여러 연구로부터 보고된 바 있다(Tugel *et al.*, 2005; Richter, 2007). 이는 인위토양이 인간 한 세대의 생애주기와 밀접한 시간 범위에서 서로 영향을 주고받을 수 있다는 점에서 중요하게 여겨질 필요가 있다.

우리나라의 경우 고밀도 인구거주와 높은 도시화율 달성으로 인해 다른 나라보다 인위토양 형성에 대한 연구가 절실하다. 특히 이러한 필요성은 점차 늘어나는 산지토양이용과 그 관리 수요에 그 원인을 두고 있다. 국토의 과반이 산지로 구성된 우리나라에서 국토개발과 도시화 진전과정은 필연적으로 산지의 도시경계 내부화를 수반한다. 과거에는 산지 사면의 농업적 토지이용이 주를 이루었으나 최근에는 자연인접성을 중시한 택지개발 또는 관광휴양지 조성 등을 목표로 산지전용허가 건수가 늘어나고 있다. 일반적으로 인위토양의 형성은 토양이용 가치를 저하시키고 그 회복과정(reclamation process)에 들어가는 비용이 높은 것으로 알려져 있다, 따라서 보다 효율적이고 지속가능한 국토개발과 토지이용형태를 달성하기 위해서는 시가화 지역과 도시 근교 점이지대에 형성될 수 있는 인위토양에 대한 연구가 필수적이다.

이러한 맥락에서 본 연구는 주요 토양형성요인으로서 인간 활동에 의해 형성된 인위토양이 갖는 차별적 토양특성에 대한 조사를 목표로 하였다. 특정 토양이 갖는 특성의 차이를 규명하기 위해서는 복수의 토양집단을 대상으로 한 특성의 조사와 그를 바탕으로 한 비교 대조가 이루어질 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 실지 토양시료 조사를 통한 비교를 계획함에 있어 일정한 토양형성 조건이 갖추어진 지역에서 자연적으로 발생하는 토양과 인위적 영향이 가

해진 토양의 토양특성 차이에 대한 비교연구를 계획하고 인위토양이 갖는 특성을 평가하고자 하였다. 또한 인위토양의 분류와 토양특성을 조사한 선행연구의 연구결과와의 비교를 통해 연구결과를 평가하고자 하였다. 이를 위해 먼저 인위토양의 개념규정 사례를 바탕으로 관련 연구동향을 분석한 뒤 구체적인 연구목적과 연구지역, 방법을 설정하고자 한다.

2. 인위토양의 규정

인위 토양의 정의와 그에 따른 분류는 각각의 분류 체계마다 기준이 다르지만 통상, Anthropic soils (Hewitt, 1993), Anthroposols (AFES, 1995; Florea *et al.*, 2000; Isbell, 1996), Anthrosols (WRB, 2014), Anthropogenic soils (ICOMANTH, 2003) 등이 현재까지 제시되었다. 대표적으로 FAO/UNESCO 분류에서는 인위토양을 Anthrosols로 분류하고 대표적인 특징에 따라 Hortic, Hydragric, Irragric, Plaggic, Pretic, Terric으로 구분하고 있다(WRB, 2014). 중국 등에서는 자국 내의 토양분류에 도시토양 등을 모두 포함시켜 수행하고 있으며, 러시아 일본, 영국 등 자국내의 분류기준을 마련하여 수행하고 있다. 유럽에서는 WRB(World Reference Base for Soil Resource)를 통하여 지속적으로 인위토양의 분류와 관련한 연구를 발전시켜 나가고 있으며, 32개 목중 Anthrosols, Technosols 등에 대하여 2006년부터 새롭게 분류에 추가하여 수행하고 있다. 미국에서는 인위토양에 대하여 Anthrosols등을 Soil Taxonomy에 추가하기 위한 작업을 국제인위토양위원회(ICOMANTH; International Committee on Anthropogenic Soils)에서 추진 중에 있으며, 2011년부터 전 세계 토양에 산재되어 있는 50여개의 분류체계 간 장단점을 모두 포괄 가능한 분류체계 통일안을 추진 중에 있다.

정식 토양목(Soil order)으로의 분류로는 Anthropic soils (Hewitt,

1993), Anthroposols(AFES, 1995; Florea *et al.*, 2000; Isbell, 1996), Anthrosols(WRB, 2014), Anthropogenic soils (ICOMANTH, 2003) 등이 제시되고 있다. 가장 대표적인 토양분류체계 중 하나인 FAO 분류에서는 인위토양을 Anthrosols로 분류하고 있다. Anthrosols는 부분적 제거, 토층절단, 폐기물 매립과 관개농업 등 인간의 활동이 주도적으로 작용한 토양으로서 상기한 여러 분류 가운데 국제 체계에 보다 널리 도입되었다. 호주 토양분류체계(Australian system)와 중국 토양분류체계(Genetic Soil Classification of China; GSCC) 등은 인위토양의 분류로 Anthrosols를 표기하고 있다(Isbell, 1996).

3. 인위토양 관련 연구동향

현재까지 출간되어 확인할 수 있는 근현대 인위토양 관련 연구는 1940년대 무렵부터 전 세계 64개국 등지에서 이루어졌다. 특히 미국을 비롯하여 독일과 영국, 프랑스 및 러시아 등 유럽 국가들에서 그 연구가 활발하게 진행되고 있다(Capra *et al.*, 2014).

Capra(2014)는 인위토양 연구 수요가 증가한 구체적인 시점을 알아보기 위해 지난 70여 년간(1945-2015) 국제토양학계의 7개 주요 국가에서 발표된, 인위토양 또는 그와 관련된 용어²⁾를 연구주제로 채택하여 표제에 밝힌 연구들을 조사하였다. 그 결과 인위토양 관련 연구는 미국의 주도로 1960년대 중반부터 가시적인 증가추세를 보였다. 이러한 추이가 관찰된 것은 당시 미국 내 광산, 시추공 등 지하자원개발과 산업용지 확대의 과정에서 토양오염이 심화된 것과 그 맥락을 같이한다. 이에 인위토양 연구의 초기 저작은 주로 광업지 내 토양(minefield soils), 산업토양(Industrial soils) 등의 용어를 주제로 다루어졌으며, 해당 지역의 토양을 회복하는 것을 주요 연구

2) Anthropogenic soils, Anthrosols, Human-driven soils, Man-made soils, Technosols 등

목적으로 하였다. 그리고 1970년대부터 인위토양 관련 연구는 개발 행위에 의한 토양연구로부터 인간활동(man-made, Anthro-)에 의한 토양의 변화를 탐구하는 것을 목적으로 하는 연구가 크게 증가하여 연구적 분류를 보다 명확히 하였다. 그리고 국제토양학계에서 인위 토양에 대한 독립적인 분류를 인정하게 된 1990년대부터 2000년대에 이르는 기간에 급격한 증가추세를 보이는 것으로 조사되었다. 상기한 연구추세로부터 향후 토양학계 내 인위토양의 연구가 지속적으로 증대할 것임을 예측할 수 있다.

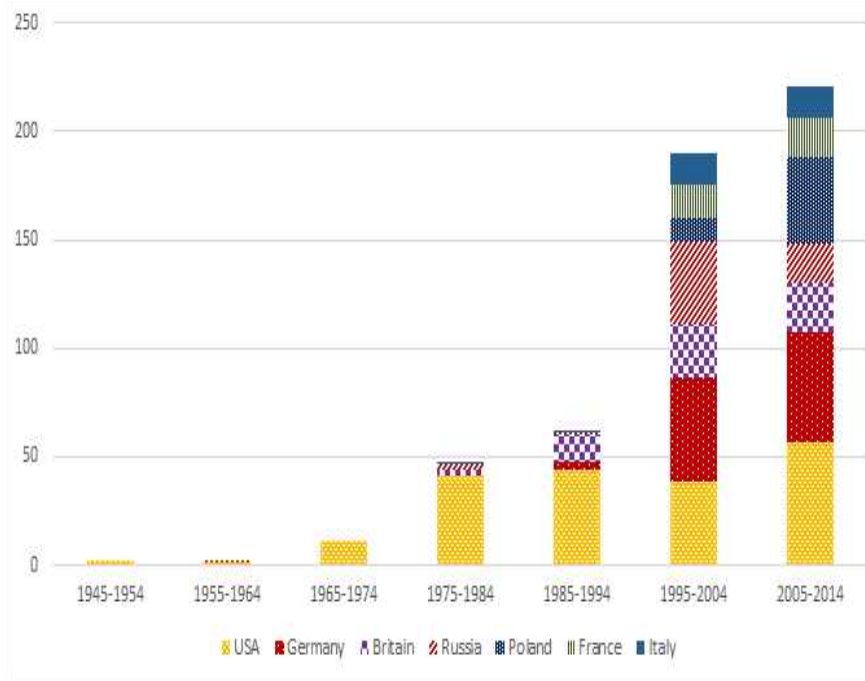


그림 1-1. 국제토양학계의 주요 국가별 문헌에서 인위토양 연구의 증가추이 (Capra et al., 2015의 연구결과를 도식으로 재구성)

이러한 인위토양 관련 연구는 크게 토양학 분류계통에 인위토양의 유형을 내부화하려는 토양학적 관점에서의 연구와, 토양의 농업적 이용에 입각한 농경학적 연구로 구분될 수 있다. 따라서 기존 연

구들로부터 인위토양을 정의하는 방법과 연구의 관점에 유의하여 인위토양연구의 동향을 살펴볼 필요가 있다.

1) 토양학적 관점에서의 인위토양 연구

인위토양에 대한 정의는 해당 토양의 발생원인과 발생결과를 보는 주요 연구의 시각에 따라 조금씩 차이를 드러낸다. 먼저 형성과 정상에서의 차이에 대한 대표적 정의에 의하면, 인위토양은 토양생성에서 그 생성과정에 관한 원인이기에 인간의 활동이 주된 요소로 작용한 결과임을 말한다(Dercon *et al.*, 2005; Zhang and Gong, 2003). Certini and Scalenghe(2006)은 이들 인위토양에 작용하는 인간의 영향을 1) 표토 교란(topsoil disturbance) 2) 토양 교란(bulk soil disturbance) 3) 새로운 모재의 입지(emplacement of new parent material) 4) 토지표면 포장(soil sealing)의 네 가지 분류단위로 규정한 바 있다. 한편 토양층위에 따른 변화를 중시하는 연구에서 인위토양이라 함은 인간의 인위적 영향을 받아 단기간에 형성된 토양으로 자연상태의 연속적인 토양층위들과 달리 불연속적인 층위를 보이는 토양을 일컫는다(Dudal *et al.*, 2002).

이렇듯 인위토양의 다양한 개념적 접근을 수용하기 위해 Jabiol *et al.*(2013)은 기존의 인위토양 분류를 WRB체계 내부에서 더욱 세분화하자는 주장을 제기하였으며. 우리나라에서는 정연태(1998)가 보다 세부적인 국내 인위토양 분류방식을 제시한 바 있다. 정연태(1998)의 연구는 인위 토양을 크게 적토형, 절토형, 교란형, 퇴화형, 광미형 인위 토양으로 분류하였는데, 적토형 인위토는 원토양의 토심이 50cm 이상이면서 적토심이 50cm 이상인 토양이고, 절토형 인위토는 구릉지의 잔적토를 1m 이상 절토하여 토양의 특성이 변형된 인위토양이다. 시설재배 시 염류의 과다집적이나 경반층으로 인해 투수가 불량한 교란형 인위토, 화학비료나 퇴비 등을 과잉 시비하여

토양 특성이 퇴화된 퇴화형 인위토, 광산 주변에서 생성되는 광미형 인위토로 분류한다.

현재 우리나라는 세계적으로 가장 많이 쓰이는 분류체계인 미국 농무부(USDA)의 Soil Taxonomy에 근거하고 있으나, Soil Taxonomy로는 인위토양을 실용적인 측면에서 판단하기 어렵다는 지적이 있었다(Sonn *et al.*, 2013). 이후 Hyun *et al.*,(2014)의 연구에서는 우리나라 토양을 FAO(Food and Agricultural Organization) 분류 체계에 따라 재분류하였다. 그 결과 우리나라 토양은 Anthrosols > Alisols > Cambisols > Andosols > Luvisols > Regosols > Umbrisols ≒ Fluvisols > Arenosols > Phaeozems > Leptosols > Histosols 순으로 12개 주군 가운데 Anthrosols이 가장 많았으며 그 이유로 집약적 농업 토지이용을 지적하였다(Hyun *et al.*, 2014). 이와 유사하게 전국단위 인위토양에 대한 분류를 목적으로 한 국립농업과학원(2016)의 연구에서는 면적이 조사되어 있는 매립 적토형 인위토양을 대상으로 인위적 영향으로 형성되었음을 뜻하는 접두어 인을 포함한 인가, 인곡, 인관, 인동, 인상, 인생, 인옥, 인월, 인지 그리고 인창통 등 10개의 토양통을 신규 설정하였다.

한편 인위토양의 형성과 분류가 어떠한 공간단위에서 이루어지고 논의되어야 하는가에 대한 국내 연구로는 김명숙(2005)이 있다. 그는 토양에 대한 인간영향 정도를 평가하기 위한 경관단위로서 인위경관(Anthroscapes)의 개념을 제안하였다. 인위경관은 자연토지경관과 달리 의도적으로 변형이 가해진 지형과 토지피복으로 구성된 연속적인 경관을 일컫는데, 그에 따르면 가시적으로 확인 가능한 인위경관에 대한 분석은 2.5ha 이하의 미시적인 면적으로부터 그룹화를 통해 토양관리 공간단위인 자원관리지구와 토지관리지구 등 토지행정 관리지역의 기본단위로 작용할 수 있다고 주장하였다.

2) 농경학적 관점에서의 인위토양 연구

농경학 연구에서 규정하는 인위토양은 자연토양에 객토, 복토 등의 행위를 통해 유효토양층을 더하는 수준의 인위적 영향이 있는 경우를 말한다. 이러한 형태의 인위토양은 국내외 연구에서 대부분 도시근교의 도시농업과 그에 사용되는 도시농업 토양(urban agriculture soils)에 관련한 논의와 주로 혼용되고 있다.

도시인구의 집중이 인구부양부담을 지속적으로 증대시키면서 이를 해결하기 위한 목적으로 도시 배후지 뿐 아니라 도시 근교의 농업지역이 증가하고 있다. 이미 영국의 얼랏먼트 가든(Allotment garden)이나 독일의 클라인 가르텐(Klein garten) 등이 알려져 있다. FAO(1999)에서는 도시농업을 도시와 도시 주변의 농업활동으로 정의하고 있으며, 유엔개발기구(1996)에서는 도시와 도시 인근 지역의 토양에서 작물과 가축을 생산하기 위해 자연자원 혹은 도시의 폐자원을 활용하는 집약적 행위라고 정의하였다. 또한, 도시농업은 도시 또는 그 인근에서 농산물을 생산하고, 재배하며, 거래하는 농업의 한 형태이며(Pearson *et al.*, 2010), 도시의 먹거리 안전성과 밀접한 연관이 있다고 보고되었다 (Badami *et al.*, 2015; Eigenbrod *et al.*, 2015). 대부분 도시 또는 도시지역 인근이라는 공간적 개념이 공통적으로 포함되었다. 우리나라에서는 주로 지방자치단체의 조례에서 언급되고 있으며, 도시농업 관련법에서 개념을 살펴보면 강동구 조례에서 도시에 있는 다양한 공간과 토지 등을 활용하여 농산물을 재배, 생산하기 위한 농사활동으로 언급하였다. 또한, 도시농업의 육성 및 지원에 관한 법률에서는 도시지역 내 토지 등 생활공간을 활용해 농작물을 경작하는 행위라고 정의하였다.

도시 농업의 개념 구체화와 함께 도시 농업에 사용되는 토양에 대한 논의 또한 진보하였다. 국제토양학회연합 IUSS (The International Union of Soil Science)에서는 1998년 자연 토양과 다

른 도시토양의 기능, 물리·화학적 특징 등을 조사하기 위한 조직으로, SUITMA(Soils of Urban, Industrial, Traffic, Mining and Military Areas)를 발족한 바 있다. 그에 따르면 도시농업 토양은 자연 토양과 달리 표층의 유기물 함입, 비료 투여 그리고 경운의 빈도 등이 높아 토양의 구조와 기능에 차이를 보인다고 보고하였다.

이렇듯 도시농업 토양은 오랜 기간 경작된 일반 농경지 토양과 달리 외부에서 여러 가지 물질이 유입된 토양일 가능성이 있으며(Kim *et al.*, 2011), 도시환경 특성상 건축 구조물, 기계, 콘크리트, 기타 산업폐기물들의 유입에 따른 오염을 주요 특징으로 갖는다. 이에 주목해 도시농업 토양의 연구는 주로 작물 생육 적합여부를 알아보기 위한 중금속 함량과 비옥도에 대한 연구가 주로 수행되었다(Cho *et al.*, 2016). 일례로 Kahle(2000)는 도시농업 토양의 중금속 전함량이 일반 농경지 토양에 비해 두 배 이상 많다고 보고하였으며, 산업발전도와 광산활동, 교통량에 따른 오염 유입을 지적한 연구(Chen *et al.*, 1997)가 대표적으로 이루어졌다.

국내연구에서 도시농업 토양이 인위토양으로서 분류될 때는 크게 매립형과 적토형으로 논의의 범주를 구분할 수 있다(Sonn *et al.*, 2013). 매립형이란 토양을 걷어낸 후 준설토를 아래에 쌓고 그 위에 다시 본래의 토양을 쌓는 형태이며, 적토형은 토양 위에 준설토를 그대로 쌓은 형태를 일컫는다. 이런 인위토양은 토양이 각 층별로 교란을 일으켜 고질적 배수불량이나 경반생성³⁾ 문제를 일으키므로 토양관리에 차별을 두어야 한다는 연구보고가 이루어지고 있다. 매립적토형 인위토양이 미생물과 작물에 미치는 영향 등에 대한 연구가 진행 되어왔다(Renison *et al.*, 2004; Liang *et al.*, 2003), 한편

3) plow pan으로 지칭되는 경반층은 쟁기질과 같은 농기구 사용으로 발생한 압력에 의해 생긴 치밀토층을 말한다. 공극률이 낮고 높은 경도를 띤 판상구조로 구성되며, 투수성을 나쁘게 하여 작물생육을 해롭게 한다.

인위토양의 물리·화학적 특성들을 통계적 방법을 통한 해석을 수행하는 연구들도 진행되어 왔으며, 그중 연구되었던 분야는 주로 공간변이분포를 해석하여 영농 측면의 차이점에 대한 연구와, Variogram을 통한 크리깅(kriging) 값을 계산하여 Sill과 Nugget의 효과와 공간의존성을 Range를 통한 해석을 진행하기도 하여 인위토양의 표면적 특성의 불규칙성을 해석하기도 하였다(Jung *et al.*, 2010; Sonn *et al.*, 2012).

3) 기존연구범위의 한계와 개선방안

대다수의 기존 인위토양 관련연구는 농업, 산업활동에 의한 집중오염지역 또는 도시오염 확산의 맥락에서 인위토양이 갖는 토양특성의 차이를 기술하였다(Gong *et al.*, 1997; Olson *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2007). 그러나 지금까지 국내외에서 이루어진 토양조사와 토양관리방안은 인위토양 연구 필요성에 부응하는 데 다음과 같은 한계점을 드러내고 있다. 첫째, 기존의 인위토양 연구는 대다수가 상이한 지역과 토양형성조건을 바탕으로 한 개별 사례연구로서 비교연구를 위한 통제의 고려가 부족하다. 둘째, 인위토양이 자연토양과 비교하여 가지는 차별적인 특징을 정성적 또는 정량적으로 평가하지 못하고 있다. 셋째, 인위토양의 분포와 토양특성의 차이가 나타나는 공간의 범주가 구체적으로 제시되지 않고 있다. 이상의 연구한계를 해소하기 위해서는 동일한 토양형성조건이 전제된 일정한 공간 범주 안에서 일반적으로 형성되는 자연적인 토양과의 차이가 토양조사를 통한 실질적인 비교가 필요하다고 사료된다.

4. 연구목적

본 연구는 경기 남부지역 화성-수원-용인시 일대를 연구지역으로

삼아 토양형성과정상 동일 조건을 갖춘 2개 소유역을 시가화 피복의 비율로 자연-인위유역으로 구분하여 비교연구를 진행하고 인위 토양이 갖는 특성을 평가하였다. 보다 세부적으로는 토양의 지형연속성이론에 기초하여 각 유역을 6개 사면단위로 나누어 상호 비교함으로써 양자 간의 특성 차이를 밝힘을 주된 목적으로 하였다.

이러한 연구목적의 달성을 위해 기존연구의 한계를 고려하여 다음과 같은 세부 연구목표를 설정하였다.

첫째, 인위토양 발생의 공간스케일을 일정한 토양형성과정이 전제된 소유역 단위로 규정하고 대상 소유역을 사면단위로 세분하여 토양특성의 공간적 분포와 토양 특성 간 상관관계를 파악한다.

둘째, 자연유역과 인위유역 각각의 사면특성을 대표하는 축선별, 사면단위별 비교를 실시하여 자연토양에 비하여 인위토양이 갖는 가시적, 이화학적 특성을 조사한다.

셋째, 인위토양특성의 비교 결과를 통해 차별적 특성이 가장 두드러지게 나타나는 비교범주를 평가하고 그것이 갖는 함의를 모색한다.

본 연구를 통해 불연속적 토양경관 또는 특정 용도지역과 같은 사례단위 연구로 이루어지던 기존 인위토양 연구방식에서 더 나아가 소유역과 그 사면단위 등 보다 일반적으로 적용 가능한 지형분류결과상의 연구지역에서 나타나는 인위토양특성의 공간적 분포특성과 토양특성이 갖는 차이를 밝힐 수 있다. 이를 통해 국토 전반에 공통적으로 사용될 수 있는, 소유역 사면에 대한 지형분류 결과를 이용하여 시가화 진행지역이나 개발예정지와 같은 관심지역에서 나타나는 인위토양특성의 분석에 적합한 절차를 제시할 수 있을 것이다. 이러한 결과는 인위토양이 갖는 특성에 대한 이해를 넓히고 지역에서 발생 가능한 인위토양특성에 대한 예측가능성을 높일 수 있을 것이다. 나아가 산지전용 부담이 증가하는 국토관리와 산지토양

관리에서 인위토양의 분포와 특성을 이해하고 적절한 관리방안 수립의 기초자료로서 기여하는 것을 목표로 한다.

5. 연구내용과 논문의 구성

본 논문은 총 4장으로 구성되었다. 제 1장은 인위토양에 대한 토양학계 전반의 연구관심이 고조된 배경과 우리나라에서 인위토양이 갖는 중요성을 검토하고, 토양학술적, 농업자원적 관점에서 진행된 지금까지의 인위토양 관련 연구를 조명하였다.

제 2장에서는 연구대상지역 선정방식과 비교연구의 공간단위로서 소유역 도출방법, 유역의 사면단위 분류를 위한 Catena 개념과 토양자료구축 방법 등 연구 설계 전반에 걸친 내용을 기술한다.

제 3장은 조사된 지점에서의 토양자료를 바탕으로 유역단위에서의 공간분포를 내삽하여 제시하고, 토양조사 축선과 사면단위에서 나타나는 특성의 차이에 대한 분산분석을 수행하여 자연토양 대비 인위토양이 갖는 차이를 파악한다.

제 4장에서는 기존에 수행되었던 인위토양의 분포와 특성에 관한 선행연구의 결과와 본 연구에서 도출된 결과를 비교하고 그것이 갖는 함의와 시사점을 살펴본다.

마지막으로 제5장 결론부에서는 앞서 제시된 연구내용을 종합적으로 서술하고 연구가 기여하는 바와 한계점을 제시한다.

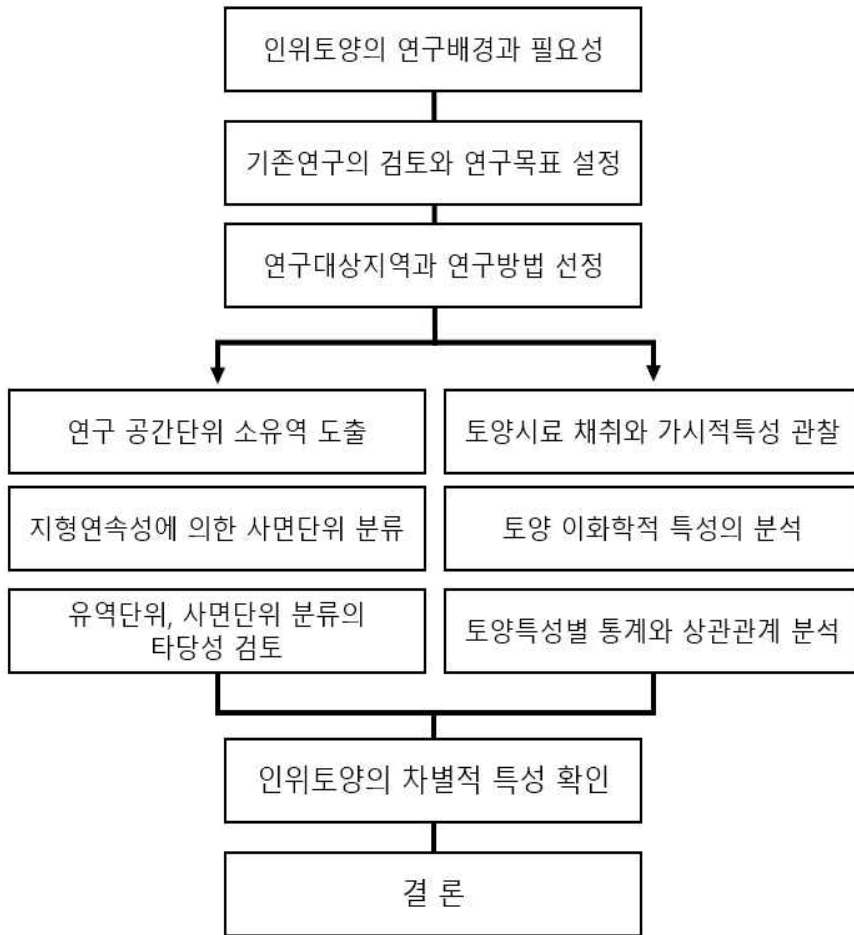


그림 1-2. 본 연구의 진행도

II. 연구지역과 연구방법

1. 연구지역

본 연구에서는 자연토양과 인위토양의 차이를 토양형성이 발생하는 일정한 공간단위 간 비교를 통해 규명하고자 두 개의 소유역을 세부 연구지역으로 선정하였다. 유역은 하천에 의해 물이 흘러나가는 지역을 총칭하는 개념으로, 지표면에서 물의 흐름을 결정하고 지형연구에 있어 기초 분석 스케일로 활용되고 있다(Chorley, 1969). 또한 토양학적 관점에서 유역은 자연환경의 구조 요소, 순환 요소 및 생물 요소가 동적 상호작용을 하는 범위로서, 일정한 토양형성프로세스가 등질적으로 점유하는 공간단위로 간주할 수 있다(Gregory and Walling, 1973; Costanza *et al.*, 1997; Steiner *et al.*, 2000; Paul and David, 2014; Flotemersch *et al.*, 2016). 이와 같은 토양형성에서 유역이 갖는 의미에 기초하여 본 연구는 자연적 토양형성프로세스에 더해진 인간영향만을 유리시키기 위해 공통의 자연토양형성프로세스를 전제하는, 즉 동일한 토양형성요소를 공유하는 상호 이웃한 두 유역을 모색하였다. 그리고 그와 동시에 두 유역 가운데 차별적으로 인간영향을 수용한 유역이 있을 것을 조건으로 하였다.

인위토양과 자연토양을 비교하기 위해서는 토양에 가해지는 인위적인 영향을 조작변인으로 한 나머지 토양형성요인들을 일정하게 통제할 필요가 있다. 따라서 본 연구는 Jenny(1941)의 토양형성 모형 변수에 의거 자연적인 토양형성 조건인 모재, 기후, 식생, 지형 그리고 형성기간을 공유하는 지역으로부터 소유역 공간범위를 도출, 도출된 소유역들 가운데 연결하는 한편으로 환경부(2016) 토지피복도상 시가화/건조지역 비중에서 분명한 차이를 드러내는 두 유역을 선정하여 연구지역으로 삼았다.

본 연구가 수행된 범위는 수원-화성-용인시 일대 지역으로, 동경

127°08' 40" - 126° 59' 40", 북위 37°21' 10" - 37°14' 10" 의 범위에 속한다. 연평균기온은 13.2℃ 정도이며, 1월 평균최고 4.9℃ 평균최저 -6.3℃, 8월 평균최고 31.5℃ 평균최저 23.1℃의 기온분포를 보였다. 연평균강우량은 915mm가량으로 상대적인 강우량은 적으나 비교적 계절적 차이가 분명한 기후양상을 보인다. 지형적으로는 도심지역으로 이어지는 평지로부터 구릉지와 산지가 경사 2-30% 사이로 넓게 분포하고 있으며, 산지의 식생은 신갈나무와 아카시아목으로 대부분 균일하다. 연구지역의 토양형성조건 상세는 표 2-2와 같다.

표 2-1 연구지역 토양형성조건

토양형성요소		자연유역	인위유역
지역 기후 (cl)	연평균온	13.2℃	
	연평균강우	915.8mm	
지역 생물상(o)		신갈나무, 산벚나무, 아카시아목 군락	
지형 기복(r)	평균고도	141m	
	평균경사	8.6	
	사면곡률	8.26	
모재(p)		화강암, 화강편마암	
토지피복도상 시가화건조지역의 비중		10.2%	48.3%

출처: 수원시 통계(2018), 환경부 토지피복자료(2016)

연구지역은 경기육괴 지체구조의 화강암, 화강편마암을 모재로 하는 지역으로서 토양목상 Entisols과 Ultisols, 그리고 일부 Inceptisols가 관찰된다. 토양통 구분으로는 OnD3, YaC2, EgC 그리고 SoC2 등 4가지 상이한 토양통이 주로 발견된다(농촌진흥청 토양 특성정보, 2016). OnD3은 완만한 경사지에 주로 분포하는 양질조사 토 내지 사양토로 유효토심이 30-50cm로 보통이며, 주로 임야지에

서 분포한다. YaC2 또한 상대적으로 낮은 경사의 구릉지를 위주로 분포하는 사양토로서 양호한 갈색에서 황적색을 주로 나타내는 특징을 갖는다. EgC는 YaC2와 유사하게 분포하는 사양토로 유효토심이 50~60cm 정도이다. SoC2은 구릉지의 적황색토로서 자갈함량이 35% 이상으로 세사양토, 양토 수준의 토성을 가진다. 유효토심은 30~50cm로 보통이다.

표 2-2 연구지역 토양분포특징

토양명	토성	배수등급	지형	유효토심(cm)	자갈함량(%)
OnD3(오산)	사양토	매우 양호	산악지	30~50	10~35
YaC2(예산)	사양토	양호	구릉지	30~50	>35
EgC(은곡)	사양토	양호	곡간지	50~60	10~35
SoC2(송정)	사양토	매우 양호	구릉지	30~50	>35

출처 : 한국토양환경정보시스템(2006)

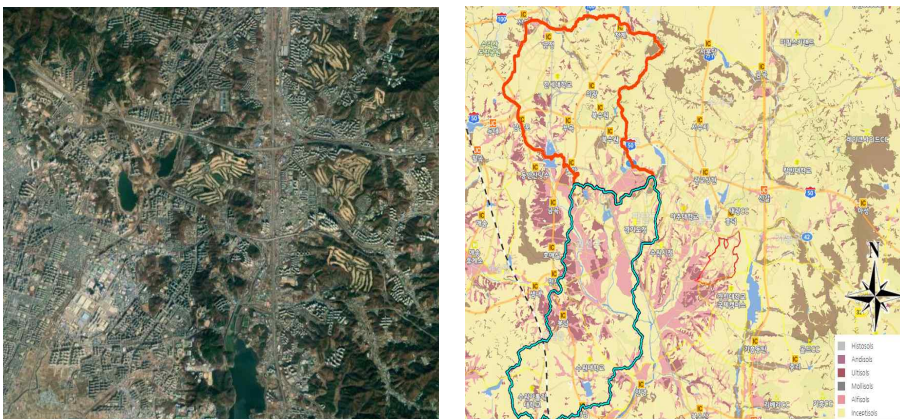


그림 2-1. 용인-수원 일대 연구지역 영상과 위치 (출처: 구글어스, 휴토람)

2. 연구방법

1) 토양형성의 기본단위로서 유역이 갖는 의미

토양은 다양한 환경요인과의 상호작용을 통해 이루어진다. 토양 형성인자로 일컬어지는 이들 환경요인은 토양이 발생하는 배경으로서의 토양 경관(soil landscape)을 구성하며, 토양학계에서는 토양경관과 토양형성 간 상관관계에 대한 규명을 지속적으로 시도해왔다.

이와 같은 시도의 초기 단계에서 Jenny(1941)가 기후, 생물, 지형, 모재, 시간 등의 5가지 형성요인을 거론한 이래 물질의 유입 유출과 이동으로 토양형성을 설명한 Simonson(1959)의 연구 등을 통해 점차 토양경관은 지표의 형태와 풍화전선(weathering front), 그리고 유역분수계(drainage divides)를 경계로 한 3차원의 시스템(system)으로 구성된 개념으로서 구체화되었다.

이를 바탕으로 Huggett(1975)는 기본 토양단위로서 토양경관의 시스템을 이루는 유역(valley basin)의 중요성을 강조하였다. 시스템으로서 유역은 다음과 같은 세 가지 이유에서 중요성을 갖는다. 첫째로 내부에서 에너지의 흐름은 있지만 물질의 유출입이 없는 폐쇄계(closed system)로서 독립적인 공간단위로 해석이 가능하다. 그리고 침식-운반-퇴적의 물질/에너지 이동 프로세스가 하나의 유역 내에서 공존하는 자급계(self-sufficient system)이며, 인접 지역에서 공간적으로 연계되어 있으면서 유역과 유역사이에서 서로 다른 토양형성의 기능을 수행하는 다양계(diverse system)로서 면모를 가진다. 이렇듯 유역은 물과 물질, 공간적인 흐름이 동적으로 연계되는 하나의 시스템이기 때문에, 형성된 토양형태의 설명과 그 차이에 관한 분석은 유역단위로 구분하여 이루어질 필요가 있다.

2) 유역 사면단위의 분류기법으로서 Catena 방법론

상기한 유역단위 토양형성 이론에 기초하여 본 연구에서 적용하고자 하는 방법론은 경관구분법(Landscape Delineation)에 기반을 둔 Catena 토양 경관분석법이다. 이는 지표에서의 물질과 에너지 순환과 특성을 고려하여, 지형경관에서 나타나는 프로세스에 따라 토양 특성을 예측하는 방법으로, 토양형성과 관련된 일반법칙을 추출할 수 있다. 또한 통계적인 의존도가 낮은 방법으로 넓은 지역을 대상으로 하는 토양 조사나 가용자원 및 데이터가 부족한 지역에서 사용이 가능하다(Park and Vlek, 2002).

1930년대 영국 토양학자 Milne는 경사면의 정상부에서 인접한 계곡의 바닥까지 반복되는 연속적인 토양의 속성을 설명하기 위해 카테나(Catena)라는 개념을 주창하였다(Conacher and Darlymple, 1977). 즉, 카테나는 토양의 속성에 영향을 미치는 지형학적 조건과 수문학적 조건들 사이의 상호작용이 서로 다르게 나타나는 사면을 경관단위로 유형화하는 개념으로서 다수의 연구(Dan and Yaalon, 1964; Walker and Ruhe, 1968; Huggett, 1975; Pennock and Vreeken, 1986; Pennock and Acton, 1989)를 통해 다양한 기후대와 경관에서 토양과 지형 사이의 관계 개념으로서 확인되었다.

이러한 관계를 이용하여 자연 사면을 유형화하는 많은 방법이 개발되어 왔다. 그 가운데 Ruhe(1960)은 이러한 2차원적 사면 요소를 토양경관 연구에 수정·응용하였고, Ruhe and Walker(1968)는 카테나의 주요사면유형을 Summit, Shoulder, Backslope, Footslope, Toeslope으로 정의하였다.

다섯 가지의 대표 사면유형은 지표수의 수렴과 발산, 그리고 퇴적물의 이동을 기반으로 분류되었으며 대표 사면유형에 대한 특징은 다음과 같다. Summit은 사면의 단면도 상 정상부에 위치하고 지형적으로 가장 안정적인 사면으로 토양 침식이 가장 적게 나타난다.

강우 등으로 인한 물은 토양을 따라 침투되기 때문에 퇴적물의 이동은 적고 토양의 단면이 가장 잘 형성되는 사면이다. Shoulder는 Summit 사면아래에 위치하며 볼록한 형태를 보인다. Summit와 Shoulder 사면은 경사도의 증가여부로 판단할 수 있으며 토양침식이 활발하고 지표 유출이 가장 크다. 물의 흐름 방향은 침투 등의 수직방향이 아니며 그에 따라 토양 단면은 Summit보다 얇다. Backslope은 직선사면으로 Shoulder 사면 아래에 위치한다. 경사도가 Shoulder 사면보다 낮아 물과 퇴적물의 운반능력이 부족하여 퇴적물 축적이 나타나기 시작하는 사면이다. Footslope는 아래의 Toeslope사면과 같이 사면 하부를 구성하는 단위로 오목한 형태를 띠며 경사도가 낮아 토양의 퇴적현상이 두드러지는 사면이다. Toeslope 사면은 주로 선형이거나 약간 오목한 형태를 보인다. 낮은 경사도와 위치적 특성으로 사면에서 내려오는 퇴적물과 인접 하천에서 범람하는 퇴적물로 인해 충적 과정이 우세한 사면으로 토양은 깊고 습하며 충적 퇴적물로 구성된다.

본 연구는 이상의 5개 단위에 더하여 사면 최하단부로 사면과 평지가 마주하며 사면을 따라 흘러내려온 유수가 집적되는 토양단위 Channel을 포함한 6개 지형분류단위로 유역 사면을 분리하였다. 전체 지형분류 과정은 크게 두 단계로 구분할 수 있다. 첫 번째 단계에서는 Freeman(1991)에 의해 개발된 다중흐름법(multiple flow algorithm)을 이용한 사면유역지수(upslope contribution area)와 3차원적 지형형태의 요철(凹凸)정도와 지표의 경사를 동시에 파악 가능한 사면곡면률(Cs, 격자 방형구 5×5)을 이용하여 지형을 구분한다. 이 과정에서 이용되는 지형분류의 구분자들은 표 2-3과 같다. 두 번째 단계는 산록완사면과 평탄지 등 사면의 경사급변점이 탁월한 한국 지형의 특징을 반영하기 위해, 지형을 경사도가 급변하는 지점을 기준하여 평탄지와 산지로 구분하고 이를 앞서 분류한 지형단위와

결합하여 최종적으로 앞서와 같은 총 6개 지형단위로 분류하였다(표 2-3, 그림 2-2).

표 2-3. 카테나 지형분류의 사면유역지수, 사면곡면률 기준자
(박수진, 2004를 재인용)

	Upslope Contribution Area (A_s)	Surface curvature(C_s)
Summit	$A_{s_{i,j}} \leq A_{s_i}$	$C_{s_{i,j}} > C_{s_i}$
Shoulder	$A_{s_{i,j}} < A_{s_{i,j}} \leq A_{s_t}$	$C_{s_{i,j}} > C_{s_i}$
Backslope	$A_{s_{i,j}} < A_{s_{i,j}} \leq A_{s_t}$	$C_{s_{-i}} < C_{s_{i,j}} \leq C_{s_i}$
Footslope	$A_{s_{i,j}} < A_{s_{i,j}} \leq A_{s_t}$	$C_{s_{i,j}} \leq C_{s_{-i}}$
Toeslope	$A_{s_{i,j}} > A_{s_t}$	$C_{s_{-i}} < C_{s_{i,j}} \leq C_{s_i}$
Channel	$A_{s_{i,j}} \geq A_{s_t}$	

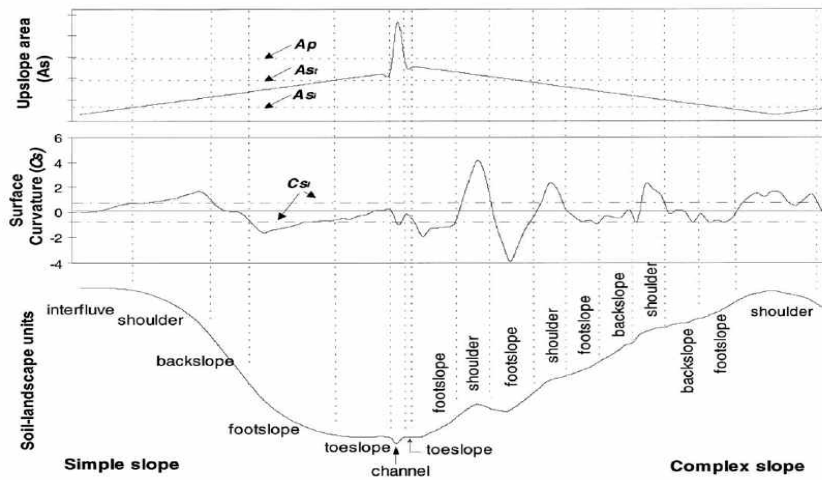


그림 2-2. 사면유역지수(A_s)와 사면곡면률(C_s)의 조합에 따른 지형 분류 모식도(박수진, 2004를 재인용)

이상의 소유역추출 방법과 카테나 지형분류의 방법을 토대로 하여 연구대상지역 내 유역 스케일과 카테나 사면단위(slope profile) 포괄을 동시에 만족하는 유역들 가운데 상호 이웃하면서 토지피복 중 시가화지역의 비중으로 대표되는 인간영향의 정도가 서로 상이한 유역인 연구유역 2개소를 선정하였다.

① 수치고도모형 구축

연구지역의 지형변수를 산출하기 위해 지역 고도자료인 수치고도모형(Digital Elevation Model; DEM)를 먼저 구축하였다. 연구대상인 화성-수원-용인 일대 지역의 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission) DEM 30m arcsec-1의 2016년, 2017년 도면을 USGS 데이터베이스로부터 구득하여 정사보정 후 2개년 측정치의 상호대조를 통해 결측치를 보완하여 최종자료를 구축하였다.

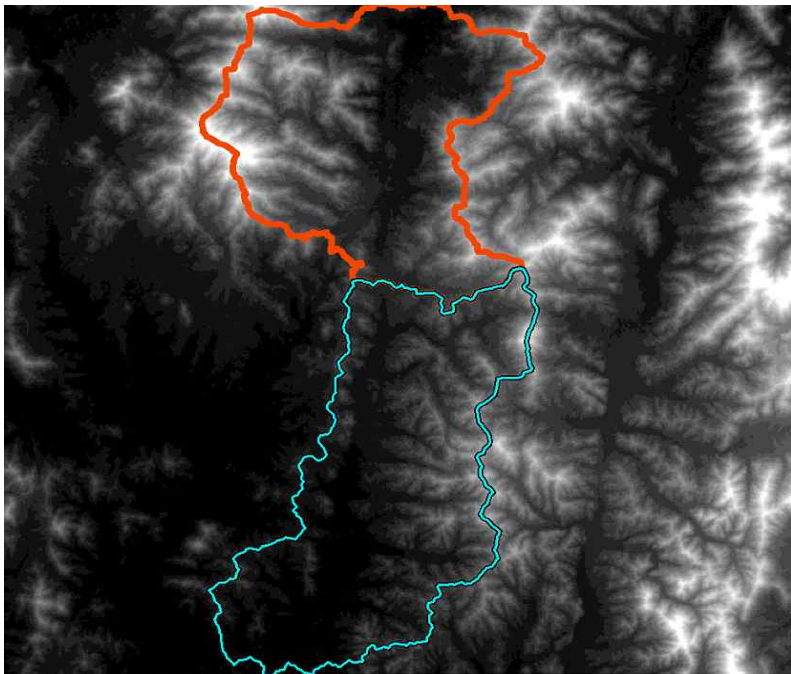


그림 2-3. 연구지역 수치고도모형(1:10,000)과 인위유역(상), 자연유역(하)

② 지형변수에 따른 토양연속성 사면단위 도출

연구에 사용되는 지형변수는 지표면에서 나타나는 수문학적, 지하학적, 생태학적 과정을 담고 있는 토양형성에 중요한 요인이다. 지형변수는 DEM 자료를 통해 고도(elevation), 경사(Slope), 사면곡면률(surface curvature), 단면곡률(plan curvature), 사면유역지수(upslope contributing area) 등을 산출하여 사면단위 구분의 기준 변수로 활용하였다.

고도는 위치가 높아지면서 나타나는 기후 차이를 대변하는 한편으로 토양특성에 영향을 주는 지하수위의 깊이를 정의한다. 경사도는 지표상에서 나타나는 물질흐름의 상대적 빠르기를 결정한다. 그리고 단면곡률은 등고선 수직방향에 대한 사면의 요철을, 사면곡면률은 3차원적 사면형태의 기복을 고려하는 변수로서 도입되었다. 마지막으로 사면유역지수는 사면상의 한 지점으로 유입되는 상부사면의 면적을 합한 것으로 물의 흐름을 추정하는 지형변수이다(Carson and Kirkby, 1972; Moore and Wilson, 1992).

경사도와 단면곡률은 ArcGIS 10.5를 사용하였고 사면곡면률은 Park *et al.*(2001)에 의해 제작 배포된 파이선 툴을 이용하여 분석하였다. 그리고 사면유역지수는 Conrad(1998)이 제작 배포한 DiGem을 사용하여 산출하였다.

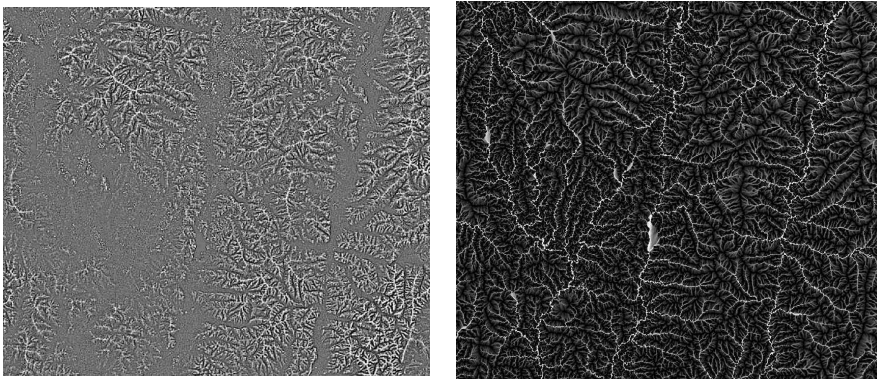


그림 2-4. 연구지역의 지형특성화지수 TCI와 Upslope Contributing Area

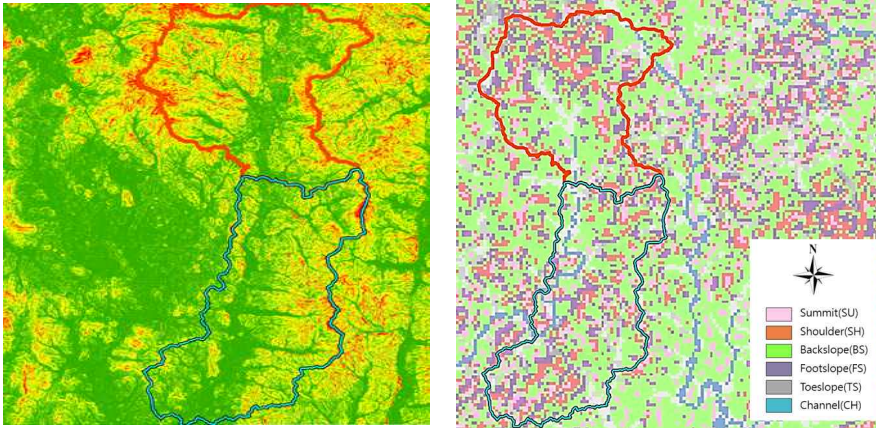


그림 2-5. 연구구역의 사면경사도와 Catena 사면단위 구분결과

③ 사면단위에 따른 시료지점 배치 및 취득

본 연구에서는 토양시료채취의 방법으로 일반적으로 사용되는 격자채취 방법 대신 측선(transect)에 따른 무작위 채취법을 채택하였다. 격자에 따른 시료채취는 임의의 크기를 가진 격자로 연구지역을 분할하여 각 격자의 중심점에서 시료를 포집하는 방식으로, 연구지역의 토양특성을 전반적으로 균일하게 파악할 수 있는 방법이다. 이 방법은 채취 간격의 일정함을 토대로 토양특성자료의 공간적 상관과 대표성을 파악하기 용이하다는 장점이 있다.

그러나 본 연구에서는 토양형성 공간단위인 유역을 사면단위로 세분화하여 비교 평가하는 것을 연구목적으로 한다. 이를 위해서는 산지의 사면 상부부터 하부에 걸쳐 연속적으로 구분되는 Catena 사면단위 각각으로부터 동등한 규모의 시료를 채취할 필요가 있다. 따라서 시료를 채취함에 있어 6개 사면단위를 순차적으로 연결하는 임의의 측선을 그려 채취의 기준을 삼았다. 이때 각 유역 토양특성에 대한 대표성을 확보하기 위해 단일 측선이 아닌 2개의 측선을 설정하였다.

연구대상지로 선정한 양 소유역의 면적은 약 30km²이며, 2개 유역

을 각각 6개 catena 사면단위(summit, shoulder, backslope, footslope, toeslope)로 분류 후 각 구역에서 Catena 지형분류가 상하 연속적으로 포함된 임의의 측선을 2개씩 그려 해당 측선과 연결한 사면 단위 6개에서 각각 채취지점을 5지점을 무작위로 선정하여 시료를 채취하였다.

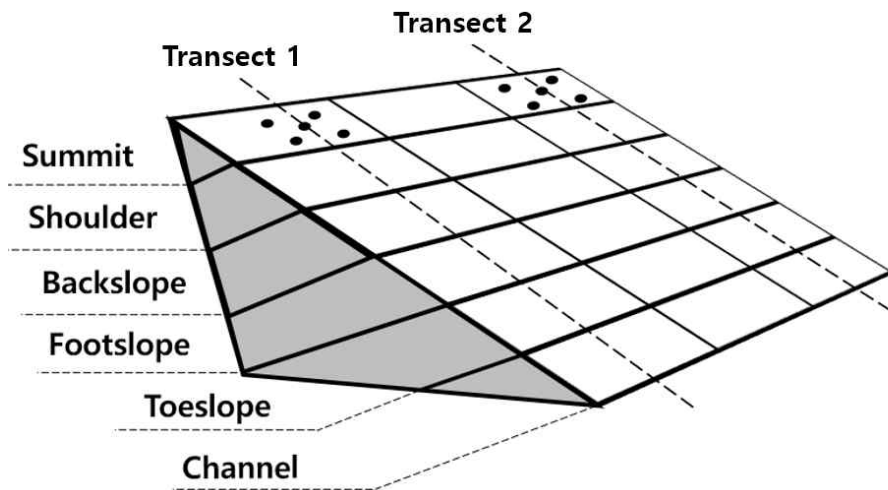


그림 2-6. 사면단위를 연결한 측선에 따른 토양시료채취 모식도

토양시료의 채취는 우천일 이후 최소 일주일 이상 지난 시기에 한정하여 실시하였으며, 2020년 9월에서 10월까지 10회에 걸쳐 수행되었다. 지도상 측선에서 30m 이내의 거리에 위치한 각 사면단위의 무작위 지점으로부터 표토층을 필요에 따라 0~15cm 깊이로 토양시료를 채취하였으며, 토양시료 채취시 토양표면의 초본식생 또는 유기물 등을 제거한 후 토양시료채취기(sampler)와 삽을 이용하여 약 500g의 토양시료를 각각 채취하였다. 지형분류결과의 반영을 위해 선별적으로 6개 사면단위 각각에 대하여 가능한 유사한 채취지점을 안배하도록 하였고, 각 채취지점 사이의 거리는 최소 5m 이상이 되

도록 하였다. 각 채취지점은 SOKKIA社의 DGPS(Differential Global Positioning System)장비를 이용하여 위치를 기록하였다. 최종적으로 측선당 30점씩 120개 지점의 시료를 채취하여 연구자료로 활용하였다(그림 2-6, 그림 2-7).

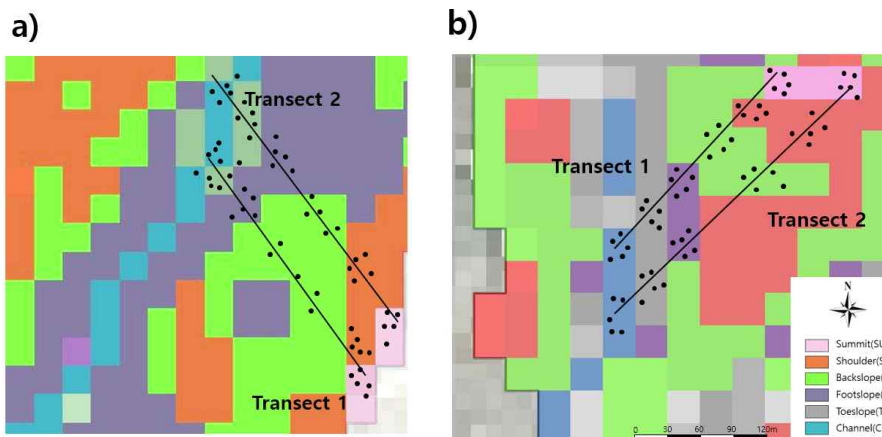
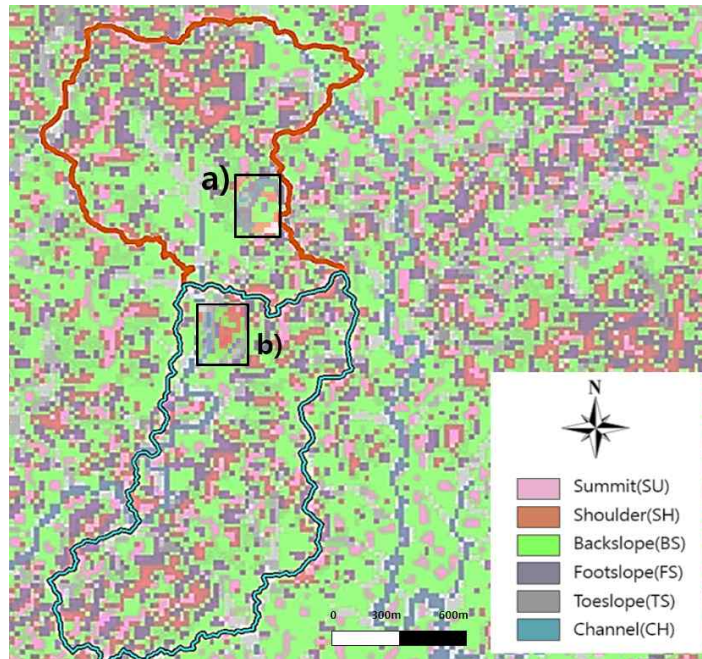


그림 2-7. 연구지역 사면단위 지형분류상 표본채취지점
a) 인위구역 b) 자연구역

3) 토양 전처리과정과 이화학적 특성 조사방법

채취한 토양에 대한 전처리는 온실에서 풍건 후 고무망치로 파쇄하여 2mm 체를 사용하였다. 이후 토양 특성 조사를 위해 토성, 토양 내 수분함량, pH, EC (Electric Conductivity), 유기물 함량, 양이온치환능(Cation exchange capacity; CEC) 등을 분석하였다. pH와 EC, CEC 등 토양 이화학적 특성의 분석은 미 토양과학협회 토양화학분석법(SSSA, Methods of Soil analysis)에 의거하여 서울대학교 지리학과 실험실에서 진행되었다. 조사대상인 토양 특성 가운데 양이온치환능 CEC의 경우 서울대학교 농생명과학공동기기원(The National Instrumentation Center for Environmental Management; NICEM)에 건조시료를 위탁하여 분석을 의뢰하였다.

① 토성 Soil texture

토성은 micro pipette 법 (Miller and Miller, 1987)으로 분석하였다. 풍건 후 2mm 체거름한 토양 2g을 취하여 50 mL centrifuge tube에 넣고 분산제(1N NaOH + 5% $\text{Na}_6 [(\text{PO}_3)_6]$) 40 mL를 넣고 혼합하였다. 이후 진탕기에서 30 °C로 유지시키며 일정 시간 후 micro-pipette으로 2.5 cm 깊이에서 현탁액 2.5mL를 취하여 미리 무게를 달아놓은 도가니에 옮긴 후, 건조기에서 105 °C로 건조시킨 뒤 무게를 재 점토 함량을 구하였다. 남은 현탁액은 53 μm 체에 거르고 증류수로 씻은 후 남아있는 입자를 미리 무게를 달아놓은 알루미늄 용기에 옮겨 건조기에서 105 °C로 건조한 후 무게를 측정하여 모래의 함량을 구하였다. 함량을 구한 후 모래, 미사, 점토의 비율을 구하여 USDA 분류 기준에 따라 토성을 분류하였다.

② 토양 수분함량 Moist

토양 내 수분함량은 식물과 토양 미생물의 생장에 직접적인 영향을 주는 중요한 요소이다. 식물이 이용 가능한 토양 내 수분의 양

은 토양 수분 포텐셜과 관련이 있으나 이를 측정하기가 매우 어렵기 때문에 흔히 토양 내 수분 함량이 이 지표로서 사용된다. 본 연구에서는 5일 이상 그늘진 곳에 풍건시킨 습윤시료 중 106.5g을 다시 105°C의 온도에서 24시간 동안 건조시킨 후 무게를 측정하여 수분함량을 측정하였다.

$$Moist(\%) = \frac{Weight_{wet} - Weight_{dry}}{Weight_{dry}} \times 100 \quad (\text{식2-3})$$

③ 강열감량 LOI

강열감량은 토양 내 휘발성 유기물 비중을 판단하기 위하여 측정하였다. 토양 내 유기물은 식물 성장 영양의 원천이 되며, 토양의 치환성 양이온과 수분의 함유 능력과 밀접한 연관을 갖는다. 강열감량 측정을 위해 105°C의 온도에서 24시간 건조시킨 30g~40g의 시료를 도가니에 넣고 이를 600°C의 온도의 고온 전기로에서 6시간 동안 작열시킨 후 30분간 식혀 무게를 측정하였다. 유기물 함량 산출식은 다음과 같이 건조시료의 무게에서 강열시료의 무게만큼 감소한 수치를 총 시료무게의 백분율로 나타내었다.

$$LOI(\%) = \frac{Weight_{105} - Weight_{600}}{Weight_{105}} \times 100 \quad (\text{식2-4})$$

③ 수소이온농도 pH, 전기전도도 EC

전처리한 토양 시료 5g과 증류수 25mL를 진탕기를 이용하여 30분간 혼합하여 pH 미터를 이용하여 측정하였다. 각 시료를 측정 한 이후에 증류수를 이용하여 pH 미터 측정부의 중성을 유지하였으며, 표준용액 두 가지를 이용하여 각각 4.0과 7.0으로 기준을 맞춘

후 pH 측정을 실시하였다.

전기전도도 EC의 경우 pH와 유사하게 전처리한 토양 시료 5g과 증류수 50mL를 30분간 진탕하여 EC 표준용액 1414 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 시약을 적용 후 EC 테스터를 이용하여 측정하였다.

④ 양이온치환능 CEC

토양의 양이온 치환 능력은 토양 내 교환 가능한 양이온의 양을 측정하는 것으로, 본 연구에서는 Amrhein & Suarez(1990)의 방법을 적용하였다. 5g의 토양시료를 계량하여 30ml 용량의 원심분리 튜브에 넣고 pH 8.2의 0.2M CaCl₂/0.0125M CaSO₄ 포화용액 20ml를 더하여 5분간 혼합-침전-상층액을 분리하는 과정을 4회 반복한다. 4회 반복하여 분리된 상층액을 100ml 플라스크에 옮겨담아 교환 가능한 Mg, K, Na 이온의 용량확인에 사용한다. 이후 20ml의 0.025M CaCl₂로 희석한 뒤 5분간 혼합하고, 원심분리와 상층액 분리과정을 4회 반복하여 Ca, SO₄, Cl, HCO₃ 이온의 판정에 사용한다. 이후 0.5M Mg(NO₃)₂로 추출하는 과정을 포함한다. 이렇게 추출된 Ca, Mg, K 그리고 Na 등 4종류의 양이온은 원자흡수분광광도계(AAS; Atomic Absorption Spectrophotometer)에 투입하여 시료 내 조성을 파악하게 된다.

$$CEC = 10 \times T_{Ca} - T_{HCO_3} - T_{SO_4} + V([HCO_3] + [SO_4] - [Ca]) - (T_{Cl} - V[Cl]) - [SO_4](T_{Cl} - V[Cl])/[Cl] - [HCO_3](T_{Cl} - V[Cl])/[Cl]$$

(식2-5)

이때 T는 Mg(NO₃)₂ 추출용액 내 충전된 kg 당 양이온수를 표현하며, []은 희석 포화용액의 최종상태에서 리터당 양이온수, V는 투입된 용액의 부피 또는 1리터 용액 중 토양시료 무게의 kg당량을 그리고 CEC는 양이온치환용량을 cmol/kg로 표현한 변수를 의미한다.

4) 조사된 토양특성의 공간단위 비교와 평가

① 토양특성의 공간상관과 분포도

연구대상지역인 두 유역 내에서 조사된 토양특성의 공간 상관성을 살펴보기 위하여 세미베리오그램(semivariogram) 분석과 토양특성의 분포도를 도출하였다. 세미베리오그램의 도출은 TIBCO SoftwareInc.의 S-Plus6.2를 사용하였으며, 크리깅 공간 내삽을 활용한 유역토양특성의 토양 분포도는 ESRI사의 ArcGIS 10.5을 이용하여 분석하였다. 본 연구에서 사용한 베리오그램과 크리깅에 관한 내용은 다음과 같다.

베리오그램은 일정한 거리에 있는 자료들의 유사성을 나타내는 척도로 일정거리(h)만큼 떨어진 두 자료 등간의 차이를 제공한 것의 기댓값이다. 거리가 근접한 만큼 그 값이 유사하므로 베리오그램이 작게 나타나고 거리가 멀어질수록 그 값이 크게 나타난다. 베리오그램의 반에 해당하는 값을 세미베리오그램이라 일컫는다.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [(Z(x_i) - Z(x_i+h))^2] \quad (\text{식2-6})$$

세미베리오그램 분석의 목적은 표본지점들에서 측정된 변수들간의 공간 상관성을 파악하여 공간정보자료의 분포에 관한 최적함수를 제시하는 것이다(Journel and Huijbregts, 1978). 세미베리오그램에서 관측값의 공간상관성을 설명하는 인자들은 크게 문턱값(Sill), 상관거리(range), 너깃(nugget) 등의 3가지로 구성되어 있다. 분리거리가 증가하면서 일정한 거리가 되면 자료 값들은 아무런 관계를 나타내지 않게 되어 베리오그램이 일정한 값을 나타내는데 이를 문턱값이라 한다. 상관거리는 상관성을 관찰할 수 있는 최대거리를 의

미한다. 따라서 상관거리 이상이 되면 자료들 간의 공간적 상관성이 없다고 간주할 수 있다. 이론적으로 상관거리가 0이면 베리오그램의 정의에 의해 그 값이 0이지만, 실제 계산된 실험적 베리오그램을 이용하여 이론적 베리오그램을 찾아내는 경우에는 분리거리 0에서도 베리오그램이 상수값을 나타내는데 이를 너깃이라 표현한다.

도출된 세미베리오그램을 통해 수행되는 크리깅(Kriging)은 특정 지점에서 특성값을 알기 위해 이미 값을 알고 있는 주변 특성값들의 선형조합을 이용하여 그 값을 예측하는 공간통계기법이다.

$$Z^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i \quad (\text{식2-7})$$

해당 수식에서 Z^* 는 알려진 위치 지점에서 크리깅으로 도출한 예측치, Z_i 는 주위의 자료값, λ_i 는 자료별 가중치, 그리고 n 은 크리깅 예측을 위해 사용한 자료의 총 개수이다.

② 토양특성 비교의 통계처리

토양특성이 소유역별, 측선별, 사면단위별로 어떻게 분포하는지 파악하고 상관관계를 파악하기 위해 조사된 토양특성자료를 상기한 각각의 비교 변수에 따라 추출하였다. 추출된 토양함수율(Moist), 수소이온농도(pH), 강열감량(LOI), 전기전도도(EC), 양이온치환능(CEC) 등의 토양특성 변수들에 대한 통계분석 과정에는 SPSS 26(SPSS Inc., 2016)을 이용하였다. 먼저 조사된 각 토양특성들의 상호작용과 영향관계를 파악하기 위해 상관관계 분석을 실시하였다. 그리고 그 결과를 피어슨 상관계수(pearson's r)로 평가하여 도표를 통해 제시하였다. 소유역, 측선 그리고 사면단위로 대표되는 비교를 위한 변수들을 도입함에 있어서 각 변수가 유효한가를 판단하기 위

해서는 토양특성과 비교 변수간의 연속적인 관련성을 검토할 필요가 있다.

이를 위해 각 토양특성과 유역간, 4개 측선간 그리고 사면단위간 비교에 대한 개별 분산분석(ANOVA)을 실시하여 비교변수의 집단 차이를 검정하였다. 이후 각 특성 집단의 표본이 동일한 규모이며 정규성을 따른다는 점을 감안하여 Tukey's HSD(honest significant difference) test($p < 0.05$) 사후검증을 사용해 각 집단의 다중비교 차이를 조명하였다. 그리고 각 토양특성이 어떠한 비교 기준에 가장 큰 영향을 받는가를 세 기준 사이에서 알아보기 위해 일반화 선형 모형에 의한 분산분석(GLM; Generalized Linear Model)을 실시하였다.

Ⅲ. 자연토양대비 인위토양의 토양특성차이

이 장에서는 인위토양의 특성을 이해하기 위해 자연유역과 인위유역으로 구분한 각 연구대상유역으로부터 조사된 토양특성을 비교하고 그 상관관계를 살펴본다. 이 과정에서 시가화 건조지역 비중을 기준하여 임의로 선정한 두 유역의 구분이 어느 정도의 차이를 드러내는가를 구체화한다. 이를 위해 먼저 채취된 토양표본의 자료를 이용해 두 개 연구유역 토양의 기술통계를 바탕으로 각 토양특성의 차이를 탐색하고 해석한다. 그리고 두 유역에서 조사된 토양특성들이 상호간 맺는 상관관계를 조사하여 각 특성들이 서로에게 미치는 영향을 파악한다. 또한 유역별 토양특성의 조사지점에 기초하여 토양특성의 공간적 분포를 제시하고 그것이 갖는 차이에 대하여 평가한다.

1. 자연-인위 유역단위 토양특성의 비교

1) 유역단위 토양특성의 기술통계

자연유역, 인위유역으로 나뉘어진 용인-수원 일대 토양의 토양특성에 대한 기술통계량(descriptive statistics)은 표 3-1과 3-2와 같다. 자료의 평균과 표준편차, 정규성기준과 범위에 더하여 상이한 단위를 가진 각 토양특성변수의 변동성을 비교하기 위한 변동계수를 산출하였다. 각 유역에서 60개 조사지점에서 파악된 개별 토양특성들은 Kolmogorov-Smirnov 검정(유의수준 자연유역 0.12, 인위유역 0.08)과 Shapiro-Wilk 검정(유의수준 자연유역 0.23, 인위유역 0.11) 양쪽에 대하여 모두 $p > 0.05$ 를 만족하여 정규성을 가정할 수 있었다.

표 3-1 자연유역의 토양특성 기술통계

관측수 N=60	평균	표준편차	변동계수 (%)	왜도	첨도	최소값	최대값
Moist(%)	29.59	2.73	9.23	-0.03	-0.61	24.38	35.29
LOI(%)	13.86	1.67	12.05	0.11	-0.14	10.00	17.78
pH	5.78	0.59	10.20	-0.22	-0.43	4.23	6.78
EC(mS/m)	100.65	37.53	37.29	0.14	0.28	43.52	173.22
CEC (cmol/kg)	7.93	0.64	8.07	0.24	-0.31	6.81	9.54

* 변동 계수(coefficient of variation, CV)는 표준 편차를 산술 평균으로 나눈 백분율

표 3-2 인위유역의 토양특성 기술통계

관측수 N=60	평균	표준편차	변동계수 (%)	왜도	첨도	최소값	최대값
Moist(%)	27.99	2.32	8.29	0.19	-1.14	24.01	32.18
LOI(%)	10.78	1.59	14.75	0.40	-0.87	8.27	14.21
pH	5.73	0.54	9.42	-0.19	-0.43	4.25	6.78
EC(mS/m)	99.93	18.72	18.73	0.38	-0.80	70.89	139.80
CEC (cmol/kg)	7.88	0.56	7.10	0.39	0.51	6.72	10.01

자연유역의 경우 토양 수분함량(Moist)은 평균적으로 29.59% 내외의 수분함량을 보였으며 변동계수가 9.23%로 낮아 변이성이 적은 것으로 나타났다. 인위유역의 수분함량 또한 평균 27.99%, 변동계수 8.29%로 큰 차이를 드러내지 않았다. 토양특성 중 수분함량의 경우 지형변수와 특히 높은 상관관계를 가지며, 그 가운데 지표면의 거칠기, 기복 등과 주요한 양의 상관관계를 보이는 것으로 알려져 있다(정광용, 2011). 토양특성자료의 표본이 유역 사면의 상하부를 연하는 측선을 따라 채집되었음을 고려할 때, 양 유역에서 나타난 수분함량의 낮은 변이성은 후술할 사면단위에서의 국지적인 차이에 앞서 그보다 큰 유역 단위 스케일에서는 기복의 차이가 크지 않았음을 시사한다. 또한 연구지역 토양의 전반적으로 양호한 배수속성으

로 인해 안정적인 수분함량 수치가 드러났다고 판단된다.

강열감량(LOD)은 평균이 13.86%이며 변동계수 12.05 %로 나타났다. 한편 인위구역의 경우 토양 수분함량의 평균이 27.99%, 변동계수 8.29%로 비교적 낮은 평균수치와 변이정도를 보였으며 강열감량 또한 평균 10.86%과 변동계수 14.75 %로 유사한 차이를 보였다. 박남창 외(2008)은 한국 중부지방의 낙엽송 임분의 산림토양을 대상으로 조사한 토양 이화학적 특성의 연구결과를 도출한 바 있다. 해당 연구에서 산림토양의 상부층위 유기물량은 최소 0.30에서 최대 9.76의 범위를 가졌으며 pH는 최소 4.7에서 최대 6.1의 범위를 가진 것으로 결론지어졌다. 이를 감안하였을 때 토양 내 유기물 함량을 대표하는 강열감량의 평균이 자연구역에서 13.86%, 인위구역에서 10.78% 수준으로 조사된 것은 비교적 높은 수준인 것을 알 수 있다.

토양의 강열감량은 시료에 대한 강열 시 손실되는 수분과 주로 유기물로 구성된 휘발성물질의 총량으로 구성되어 토양특성 가운데 수분함량의 거동과 밀접한 연관을 갖는다. 따라서 연구지역에서 드러난 강열감량 역시 앞서 제시된 수분함량과 마찬가지로 사면상의 기복과 토양침식 수준이 낮아 부식질 등 복합체의 세탈이 크게 발생하지 않았기 때문으로 사료된다.

자연구역의 토양 pH는 일반적으로 식생의 양이온 흡수 중 수소이온 방출이나 식생 뿌리로부터 방출되는 유기산 증가 그리고 유기물의 분해과정 동안 유입되는 부식산으로 인해 상대적으로 낮은 수치를 나타낸다고 알려져 있다. 그러나 두 구역의 pH의 평균은 각각 5.78, 5.73이며 변동계수는 10.20%, 9.42%로 통계량적 측면에서는 큰 차이를 보이지 않았다.

반면 EC의 경우 자연구역과 인위구역에서 평균이 100.65mS/m, 인위구역에서 99.93mS/m으로 유사한 수치를 보였으나 변동계수가 각각 37.29%, 18.73%로 여타 토양특성에 비해 극심한 변이성을 보

이고 있다. Wilding(1983)은 토양특성의 변동계수에 따른 구분을 크게 정적 토양특성(변동계수 15% 미만), 동적 토양특성(35% 초과) 그리고 일반적 토양특성(15% 초과 35% 미만)의 세 가지로 제시하였다. 그에 의하면 주로 변이성이 크게 나타나는 수분함량과 유기물량, CEC와 같은 동적 토양특성은 경사와 기복을 비롯한 지형요소와 더불어 다양한 환경요인의 영향에 민감하게 변화하는 특성을 지녔다. 해당 내용을 바탕으로 다른 토양특성들이 전반적으로 15% 미만의 변동계수를 가지는 안정화된 정적 특성인데 반하여 EC가 변이성이 높은 동적 특성으로 드러난 것은 지형요인과 식생 등 환경요인에 대한 EC의 높은 민감성으로 인해 비롯된 것으로 생각된다. 또한 EC의 높은 변이성은 유역 내 공간적 분포에서 높은 불규칙성으로 나타날 것으로 예상해 볼 수 있다.

박남창 외(2008)에서 제시된 양이온치환능 CEC는 5.5cmol/kg에서 15.40cmol/kg의 범위로 분포하는 것으로 나타났다. 이에 비교하여 본 연구에서 조사된 양이온치환능은 자연유역에서 7.93cmol/kg, 인위유역에서 7.88cmol/kg 등 전반적으로 낮게 나타났다. 다만 변동계수는 각각 8.07%, 7.10%로 크지 않았다. 이것은 연구대상지역의 토양이 운모와 장석의 비중이 높은 조립질 산성모재인 화강암과 화강편마암에서 유래되어 일반적으로 규소함량이 높고 알칼리 토금속 함량이 적어 양분의 용탈가능성이 높은 특성을 감안할 필요가 있다 (Cho *et al.*, 2003; Jeong *et al.*, 2003).

2) 유역단위 토양특성 사이의 상관관계

자연유역과 인위유역의 피어슨 상관관계(Pearson's correlation coefficient)를 살펴본 결과는 표 3-3과 3-4의 내용과 같다. 대부분의 토양 특성들이 $p > 0.05$ 의 유의수준에서 상관관계를 드러내고 있다. 수분함량 Moist의 경우 양 유역에서 전반적으로 타 토양특성과 높

은 상관관계를 보인다. 수분함량은 유역사면의 지형굴곡을 따라 물질의 흐름을 대표하는 변수로서 특히 강열감량($r=0.63, 0.25$), EC($r=0.35, 0.42$), CEC($r=0.34, 0.54$) 등에서 높은 상관관계를 보이고 있다.

표 3-3 자연유역의 토양특성 상관관계

	Moist	LOI	pH	EC	CEC
Moist	1.00				
LOI	0.63**	1.00			
pH	0.18*	-0.40**	1.00		
EC	0.35**	0.16	-0.21	1.00	
CEC	0.34**	0.44**	-0.11	0.37**	1.00

* 상관계수는 0.05수준에서 양쪽으로 유의

** 상관계수는 0.01수준에서 양쪽으로 유의

표 3-4 인위유역의 토양특성 상관관계

	Moist	LOI	pH	EC	CEC
Moist	1.00				
LOI	0.25*	1.00			
pH	-0.13	-0.11	1.00		
EC	0.42**	0.47**	-0.10	1.00	
CEC	0.54**	0.35**	0.10	0.27	1.00

* 상관계수는 0.05수준에서 양쪽으로 유의

** 상관계수는 0.01수준에서 양쪽으로 유의

이것은 강열감량이 대표하는 토양 내 유기물의 치환성 양이온 흡착능력을 방증하는 것으로 사료되며, 일반적으로 유기물량이 높은 지역의 비옥도가 높게 나타난다는 연구결과와 부합한다(Park, 2008).

여기에 더해 자연유역에서 CEC는 감열감량, EC 등과의 사이에서 0.44와 0.37로 양의 상관관계를 보였으며 인위유역에서도 0.47, 0.35로 상관관계를 보였다. 이를 통해 자연유역에서 개별 토양특성들이 대부분 공간적으로 유사한 분포패턴을 나타낼 것이라 예상 가능하다.

반면 인위유역의 경우 pH와 다른 토양특성의 상관성이 나타나지 않는 특이한 관계를 보인다. 인위유역의 pH는 수분함량(-0.13), 강열감량(-0.11), EC(-0.10), CEC(0.10) 등에 대하여 낮은 상관관계를 보였으며 자연유역에서 pH가 수분함량(0.18)과 강열감량(-0.40)에 대해 나타내는 유의성과는 상반되는 경향을 나타낸다. 이것은 인위적 물질의 유입에 의해 쉽게 교란이 일어날 수 있는 pH의 특성이 시가 지역 비중이 높은 인위유역에서 드러난 것으로 판단할 수 있다.

3) 유역별 토양특성의 공간적 상관과 분포

각 유역의 토양표본 채집지점들에서 조사된 토양특성들이 갖는 공간 분포양상을 알아보고자 구형모델(spherical model)의 세미베리오그램(semivariogram)을 조사하고 정규 크리깅(ordinary kriging)으로 토양특성의 분포를 시각화하여 차이를 드러내었다. 조사된 토양특성의 세미베리오그램 모형 결과는 표 3-5와 같다. 한편 그림 3-1은 일부 토양특성에 대해 대표적인 세미베리오그램 모형을 도식화하여 나타낸 것이다. 개별 토양특성에 대하여 구해진 상관거리는 대부분 특성에서 대략 60-200m 가량의 범위를 보였으며 EC의 경우 사용된 DEM자료의 격자 30m 이하의 상관거리를 나타내어 타 토양특성에 비해 낮은 공간상관성을 보였다. 그리고 자연유역에서보다 인위유역의 토양특성에서 상대적으로 높은 문턱값이 관찰되어 인위유역에서 높게 나타나는 토양특성 분산의 증가를 파악할 수 있다.

표 3-5 연구구역의 세미베리오그램 모델(spherical)

Variables	자연구역	인위구역
Moist	177.213	129.063
	0.802	1.211
	0.421	0.345
LOI	100.422	133.723
	0.526	0.677
	0.000	0.000
pH	87.303	61.482
	0.253	0.428
	0.000	0.000
EC	23.423	11.345
	7.424	9.682
	2.213	2.138
CEC	181.237	208.627
	0.238	0.366
	0.031	0.104

* 각 토양특성에 대해 range(m), sill, nugget 순으로 기재

이상의 분석결과 제시에서 유의할 점은 일반적으로 세미베리오그램 분석에서 두 지점 간의 자료의 차이에 대한 반분산의 통계적 유의성을 확보하기 위해서는 많은 지점들의 계측치가 필요하다는 것이다(박수진 외, 2004). 이와 관련하여 국지단위 조사자료의 세미베리오그램 분석 적정규모를 조사한 Webster *et al.*,(1993)의 연구에 따르면 95%신뢰구간의 만족을 위해 50지점 미만의 규모는 사용될 수 없으며 100지점 이상이 권장된다. 또한 정규분포를 만족하는 비등방성 변수에 대해서는 150지점 이상의 규모가 전제되어야 함을 주장하였다. 비록 본 연구에서 조사된 토양특성들은 정규성 검정을 만족하였으나, 그 규모가 각 구역에 대해 60지점씩 조사되어 Webster *et al.*,(1993)의 연구결과에 미치지 못한다는 한계를 감안하

여 결과해석에 주의를 요한다.

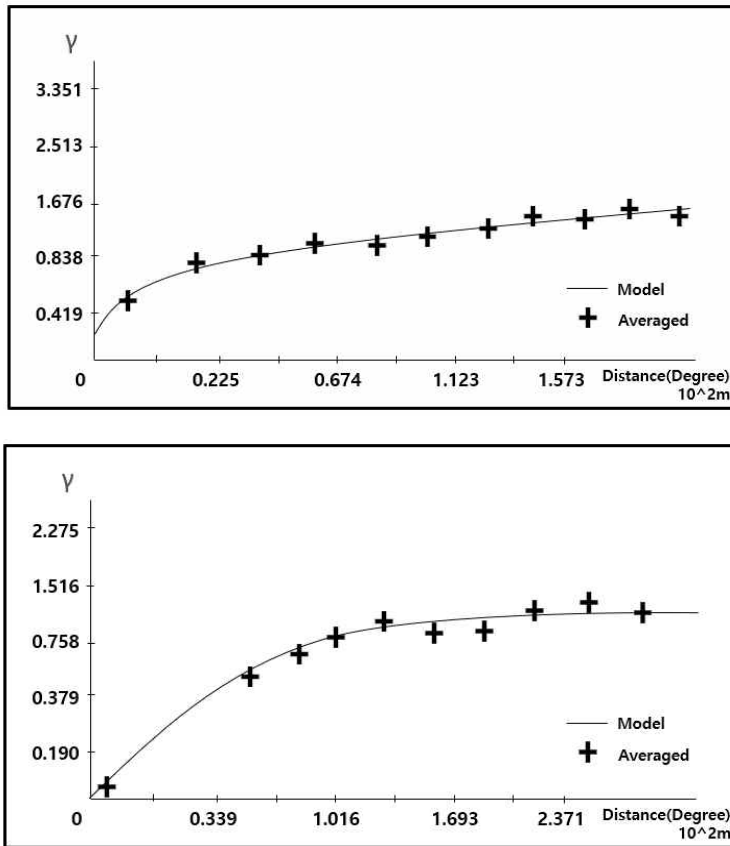


그림 3-1. 조사된 토양특성의 세미베리로그래프 예시 상) Moist 하) LOI

한편 이하 서술할 정규 크리깅에 의한 토양특성의 관찰에서는 전반적으로 토양분포의 연속성이 다소 불연속적이고 규칙성이 떨어지는 경향을 관찰할 수 있었다. 이것은 본 연구에 적용된 토양표본 조사방법, 즉 측선에 따른 무작위 채취지점에 의해 토양조사시점이 사면단위에 소규모 단위로 균등하게 분포함에 따라 발생한 것으로 추정된다. 이에 따라 공간분포의 해석은 단순내삽을 통해 사면의 전체적인 공간패턴을 제시하고 그 차이를 파악하는 데 중점을 두었다.

① 수분함량

토양특성중 수분함량 Moist은 공간적으로 유의하게 차이를 드러내었다(그림 3-1). 수분함량의 분포 패턴이 양 유역에서 FS를 기준하여 사면 상부와 하부 사이의 분포가 명확하게 분리되어있는 것을 볼 수 있다. 이러한 수분함량의 분포패턴은 경사와 사면곡면률 등 지형변수에 민감하게 변화하는 수분의 특성을 잘 반영한 것이다.

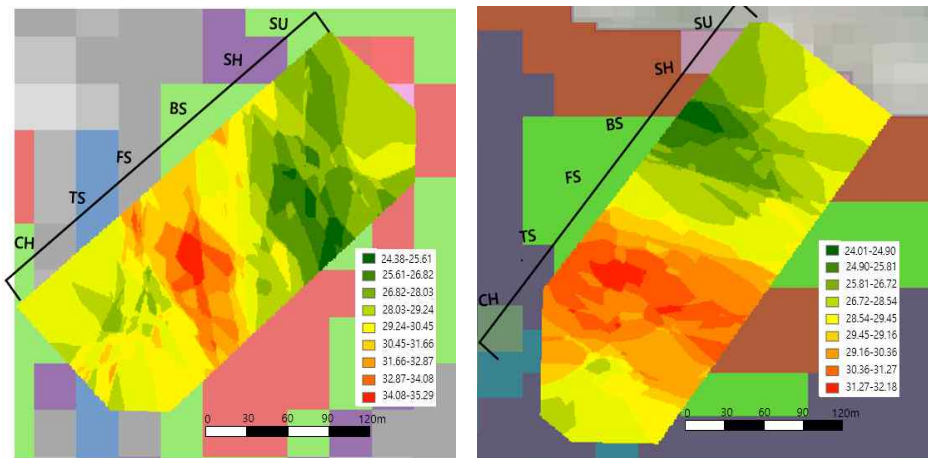


그림 3-2 유역별 Moist의 공간분포 (좌) 자연유역사면 (우) 인위유역사면

② 강열감량

강열감량 LOI 또한 수분함량과 유사하게 공간적으로 유의한 차이를 드러내었다(그림 3-2). 주로 유역 하부의 사면단위인 FS와 TS 구간에 집중적으로 높게 분포함을 확인할 수 있다. 이러한 공간적 패턴은 자연유역과 인위유역 양쪽으로 유사하게 나타나며, 사면단위와 높은 상관관계를 보이고 있다는 것을 시각적으로 확인 가능하다. 강열감량이 SH-BS 구간에서 상대적으로 적게 나타나고 FS-TS구간에서 높게 나타나는 경향은 사면위 물질흐름과 식생의 영향 등에 관련이 있다.

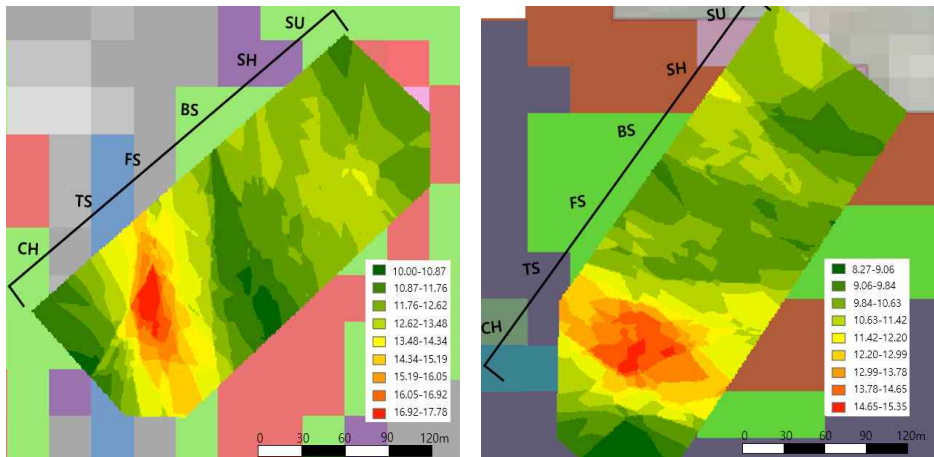


그림 3-3. 유역별 LOI의 공간분포 좌) 자연유역사면 우) 인위유역사면

정상부인 SU와 SH는 식생의 분포가 상대적으로 적어 유기물의 생산량이 상대적으로 적으며, 수분에 의한 침식 프로세스가 우세한 BS사면을 따라 유기물의 이동에 따른 축적이 이루어지는 퇴적우세 완사면인 FS-TS에서 강열감량을 구성하는 휘발성 유기물질과 식질 등이 높은 LOI를 결정하였을 것으로 생각된다. 완사면에 주로 분포한 낙엽송 등의 분포 또한 영향요인으로 작용하였을 것으로 예상된다.

③ pH

pH는 식생의 유기물 공급과 그로부터 발생하는 유기산의 존재와 밀접한 상관성을 가진 것으로 알려져 있다(그림 3-3). 조사된 자연 유역에서 pH는 사면상부인 SU-SH에서 높은 수치를 보이고 BS이하의 사면 하부에서부터 낮은 수치를 보이는 명확한 사면단위 차이를 보이고 있다. 이와 다르게 인위유역사면에서 pH는 사면상부에서 하부에 걸쳐 전반적으로 높은 수치로 수직적으로 균등하나 BS 이하의 사면단위에서 능선을 따라 수평적으로 불균등하게 분포하고 있

다. 이것은 인위유역에서 FS 사면단위까지 주택지 등 시가화 구역 진출과 식생의 감소, 그리고 그에 따른 유기산의 토양 상층부 유입 감소가 영향을 미친 결과로 해석할 수 있다.

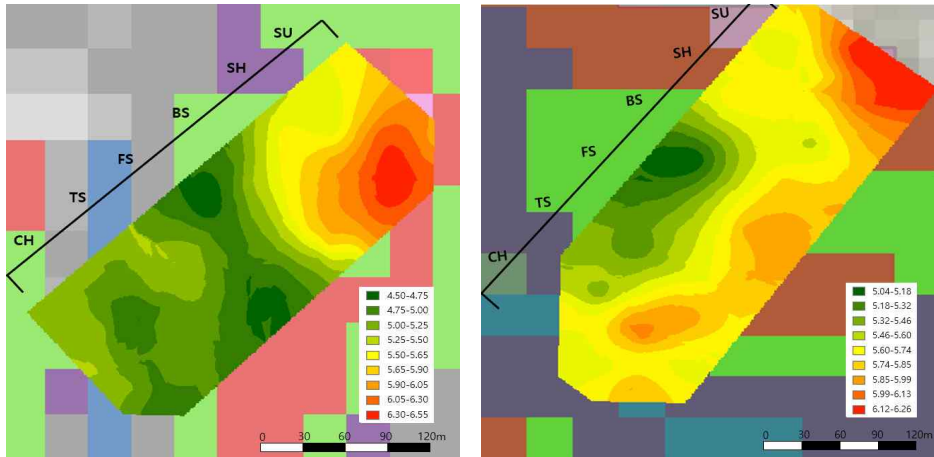


그림 3-4. 유역별 pH의 공간분포 좌) 자연유역사면 우) 인위유역사면

④ 전기전도도 EC

김유학 외(2005)는 토양의 EC에 따른 pH변화에 대한 연구에서 토양의 EC에 따른 토양 pH 양상을 파악하기 위하여 사양토에 대해 토양의 이화학적 특성을 분석하였다. 그에 의하면 사양토의 pH 양상은 토양에 첨가된 양이온 함량에 비례하여 pH가 올라갔으며 양분이 축적된 시설토양의 pH 양상은 양분함량이 많을수록 pH가 낮아졌다. 따라서 토양 EC가 높아질 때 토양 알루미늄의 수소이온 완충력이 높은 상태에서는 토양의 pH는 양이온의 양에 비례하여 올라가지만 토양 알루미늄의 수소이온 완충력이 저하된 상태에서는 토양의 음이온의 양에 비례하여 pH가 낮아지는 것으로 나타났다. 즉 토양 양이온에 의하여 알루미늄의 수소이온 완충기능이 저하되면 토양 pH 양상이 달라지므로 토양 pH 양상과 토양 EC는 상호 밀접한 연관성을 가진다는 것이다(김유학 외, 2005).

그러나 조사된 유역에서 앞서 관찰된 pH의 분포와 EC의 분포는 다른 서로 다른 양상을 나타냈다(그림3-3). EC는 토양 내 염류의 역하부의 사면단위인 사면 상하부 전반에 걸쳐 파편화된 형태로 나타난 것을 볼 수 있었다. 이러한 공간적 패턴은 자연유역과 인위유역 양쪽으로 유사하게 나타나며, 앞서 기술통계분석에서 드러난 높은 변동계수와 그 맥락을 같이한다.

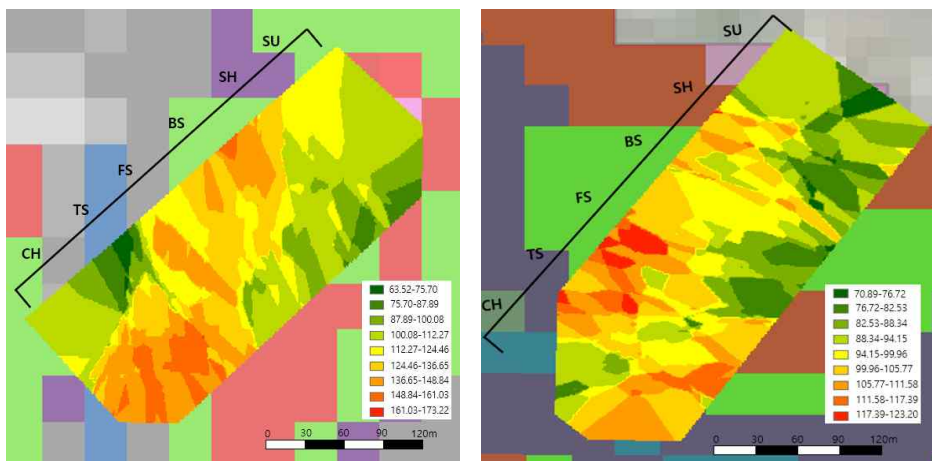


그림 3-5. 유역별 EC의 공간분포 좌) 자연유역사면 우) 인위유역사면

⑤ 양이온치환능 CEC

양이온치환능 CEC은 수분의 움직임에 의한 용탈의 경향으로 그 분포의 규칙성이 상대적으로 높다. 그러나 전반적인 경향은 토양 내 수분함량과 유사한 분포를 보이며 사면하부에 주로 집중하는 것으로 알려져 있다. 자연유역의 CEC 공간분포는 EC의 공간분포와 매우 유사한 형태를 보였다. Domingos *et al.*,(2012)은 농경지 표토와 심토 양 층위에서 토양의 EC와 여타 주요 토양 이화학적 특성 분포의 상관성에 대한 연구를 진행하였다. 해당 연구에서 EC와 가장 높은 피어슨 상관계수를 보인 것은 토양 내 잔류인산

(0.427)>Mn(0.377)>염기포화도(0.375)>CEC(0.352)>Ca²⁺(0.346)>기타 순으로 치환성 이온의 총량으로서 CEC와 토양수 내 용해된 이온총량에 비례한 EC의 분포의 관련성을 입증하였다. 자연유역에서 보이는 EC와 CEC 분포의 유사성은 이와 같은 선행 연구의 결과에 부합하며, 두 특성간 상관계수 또한 0.352와 0.37로 유사하였다.

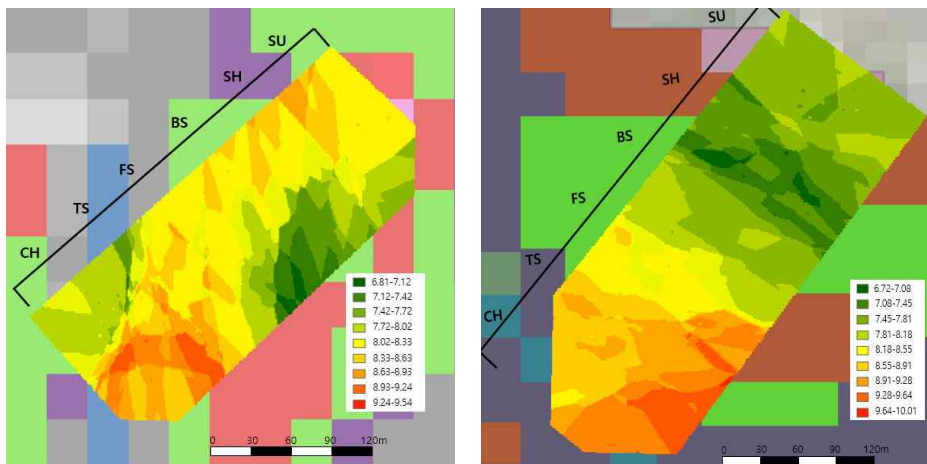


그림 3-6. 유역별 CEC의 공간분포 좌) 자연유역사면 우) 인위유역사면

이와 달리 인위유역사면에서는 사면 최하단부인 TS와 CH에서 가장 높은 값으로 편중되는 경향을 보여 자연유역과 상반된 분포 차이를 나타내었다(그림 3-5). 이렇듯 인위유역에서 CEC가 다른 패턴을 보이는 이유는 자연유역에 비해 사면하부에서 국지적 경관의 차이가 교환성양이온의 혹은 배수에 의한 용탈의 가속으로 사면 하부에 집중되는 것으로 설명할 수 있다.

이상과 같이 토양특성의 공간적 분포는 EC를 제외한 나머지 토양특성은 동일한 사면단위에서 수평적으로 등질적이며 사면의 상부에서 하부로 이어지는 사면단위의 변화에 따른 차이가 크게 나타났다. 이러한 경향은 상호간 높은 상관관계를 보인 토양특성인 수분함

량과 강열감량, EC와 CEC 등의 공간 분포 패턴에 상응하였다. 특히 사면하부에서 퇴적사면으로 분류된 FS, TS에서의 물질 집적도가 대단히 높으며, 사면 지형을 따라 이동하는 수분의 영향이 토양특성의 분포에 미치는 영향을 파악할 수 있다. 이렇듯 각 토양특성들의 공간적인 분포는 유역단위의 구분에 대하여 비교적 일관적으로 나타나는 한편으로 pH와 CEC의 분포에 있어서 상반된 패턴을 보이는 차이가 부각되었다.

2. 측선별 토양특성차이 비교평가

선행 절에서는 유역단위에서 나타나는 토양특성의 통계와 상관관계, 유역 위에서 각 토양특성의 분포를 알아보았다. 그 결과로 연구 지역에서 조사된 토양특성이 상호 밀접한 관련성을 가지고 있음과 더불어 연구유역 사이에서 나타나는 분포 간에 분명한 차이가 존재한다는 것을 파악할 수 있었다. 그러나 앞서 유역 사면에서 제시된 토양특성의 분포는 시료 채취 지점 사이를 보간(interpolation)한 결과로서 일반화하기가 어려우며 일정 범주 내에서 정량적 차이를 특정하는 데 한계가 있다. 일정 지형변수들의 집합으로 분류된 Catena 사면단위는 개별적인 토양형성프로세스와 그 결과로 나타나는 개별적 토양특성을 전제하며, 이들 사면단위를 연결한 단위로서 측선의 상호 비교를 통해 보다 일반화된 토양특성의 정량적 설명이 가능하다.

본 절에서는 인위토양의 특성차이를 보다 세부적으로 비교 평가하기 위해 먼저 연구지역의 사면 상하부를 수직으로 연결하는 측선별 특성에 대한 분석을 실시하고 해당 결과를 토대로 4개 측선 각각에서 나타나는 토양특성의 차이를 알아보도록 한다. 이를 위하여 먼저 측선별 가지적으로 드러나는 토양구조와 토색, 토성 등의 차이를 검토하고 이화학적 특성의 차이를 분산분석(ANOVA)을 실시하

여 분석하였다.

1) 시료채취 축선별 토양단면의 변화

각 유역에서 나타나는 토양형태의 가시적 차이를 알아보기 위해 토양조사 축선 상에서 대표단면을 선정해 형태적 특성을 조사하였다. 토양단면 조사의 구체적인 방법은 미 농림부 국립토양조사센터(The National Soil Survey Center; NSSC)의 Field book manual에 의거하여 수행되었다. 대표단면의 추출은 유역의 물질과 에너지 흐름이 주요하게 변화하여 각 유역 형성토양의 차이를 가장 극명하게 드러낼 것으로 예상되는 사면 상-하부의 변곡점에서 임의로 이루어졌다. 그리고 추출된 축선별 대표단면을 토대로 비교를 수행하였다.

먼저 자연유역의 시료채취 기준인 축선 1(이하 N1)과 축선 2(이하 N2)상에서 각각 토양 단면을 조사하여 층위 발달상태와 토색, 토양 구조 및 풍화특성 등 가시적 특성을 비교 평가하였다(그림2-1, 표 3-1). N1의 단면은 5.6° 경사의 산록 경사지에서 관찰되었으며, 4개 층위(0-10, 10-30, 30-100, 100-150cm)로 구분되었다. 토색은 유기물이 많은 A 층이 10YR 4/3(Brown)로 가장 어둡게 나타났으며 나머지 B-C층에 연하여 갈색-암갈색의 광물질층 특징을 보였다. 각 층의 토양 구조는 A층에서 개별 입상구조가 관찰되었으며 이하 아각괴상이 분포하였다. N2의 단면은 3.8%의 경사를 가진 산록 경사지에 위치했으며 N1과 마찬가지로 4개 층위로 구분되었다. 표층의 구조는 입상과 아각괴상으로 나타났으며, 유효토심은 약 30cm로 나타났다. N2의 토색은 A층 이후 10R 5/3에서 10R 3/3까지 적색에서 암적색으로 분포하여 산림산성토양풍화의 특성을 보였다. 토양구조적으로는 N1과 유사하게 표층의 구형 입단 구조와 더불어 전체 층위에서 아각괴상 구조가 관찰되었다. 이상의 특징은 주로 지형변이가 적은 산지와 구릉지에 분포하는 갈색산림토양아군과 적색풍화현

상을 겪은 적색계갈색산림토양아군의 특징을 대변한다.

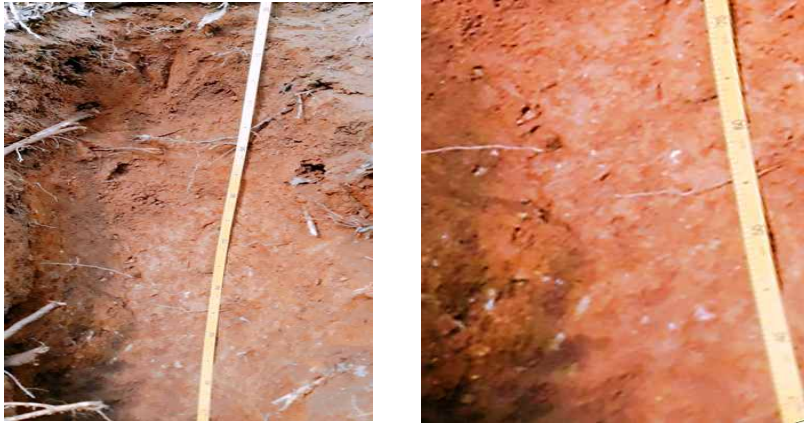


그림 3-7. 자연유역 측선 N1(좌), N2(우)의 토양단면

표 3-5. 자연유역 측선별 토양단면 기술

N1				
Layer	Depth(cm)	Color	Structure	Type
Ah	10	Brown (7.5YR 4/3)	single grained	Sandy loam
B1	30	Brown (7.5YR4/4)	subangular bulky	
B2	100	Brown (7.5YR5/4)	subangular bulky	
BC	150	Brown (7.5YR4/2)	subangular bulky	
N2				
Layer	Depth(cm)	Color	Structure	Type
Ai	15	Brown (10YR 4/3)	single grained	Sandy loam
B1	40	Weak red (10R 5/3)	subangular bulky	
B2	120	Red (10R 5/6)	subangular bulky	
BC	150	Dusky Red (10R 3/3)	subangular bulky	

인위유역의 측선 1(이하 A1)에서는 단면의 발달이 관찰되지 않아 토색 등을 바탕으로 층위를 구분하였으며 수직적인 압력을 받은 과상과 환상 구조가 일부 나타났다. 5YR 4/2(적회색)에서 5YR 5/1

(회색)에 달하는 어두운색의 환원층이 관찰되었다. 이는 하방압력이 강하게 작용함으로써 상대적으로 배수가 불량한 데에서 드러나는 특징으로 파악된다. A1은 3 %의 경사를 가진 산록 경사지에 위치했으며, 표층의 구조는 입상과 아각괴상으로 나타났으며, 유효토심은 약 30cm로 나타났다.



그림 3-8. 인위유역 측선 A1(좌), A2(우)의 토양단면

표 3-6. 인위유역 측선별 토양단면 기술

A1				
Layer	Depth(cm)	Color	Structure	Type
A	10	Brown (7.5YR 4/3)	subangular bulky	Loamy sand
B1	30	Brown (7.5YR 4/4)	subangular bulky	
B2	70	Dark reddish gray (5YR 4/2)	subangular bulky	
BC	100	Gray (5YR 5/1)	subangular bulky	
A2				
Ap	10	Brown (7.5YR 4/3)	subangular platy	Loamy sand
Bt	30	Dark gray (5YR 4/1)	subangular bulky	
B2	60	Dark reddish gray (5YR 4/2)	Angular bulky	
B3	100	Dark Gray (5YR 4/1)	Angular bulky	

인위유역의 측선 2(이하 A2)는 4개의 층위(0-10, 10-30, 30-60,

60-100cm)로 구분되었으며, A1과 마찬가지로 3 %의 산록 경사지에 위치하였고, 토색은 7.5Y 4/3에서 5YR 4/4까지 관측되었다. 인근 통행로와 평탄화의 압력에서 발생한 표층의 판상 구조가 관찰되었다. 두 단면에서 가장 마지막 층위에서 외부에서 유입된 물질이 일부 관찰되었으며 토색이 상대적으로 옅어 albic, salic으로 추정되는 일부 혼입층이 B-C층에서 관찰되었다.

이상의 관찰결과로 각 유역의 토양형태를 USDA Soil Taxonomy 토양분류체계상에서 토양분류를 구체화하면 토양목상 자연유역은 Ultisols, 인위유역지역에서는 Inceptisols로 분류할 수 있다. 자연유역 토양의 경우 비교적 습윤한 토양수분상을 보유하고 있으므로 Udults의 특징을 띠며 최소한의 토양층위 발달수준을 보이므로 Hapludults의 분류조건을 충족시키고 있다. 인위유역의 토양에서는 명확한 anthropic horizon이 관찰되지는 않았으나 회색조의 토색으로 미루어 교환성 양이온 등의 용탈로 낮은 염기포화수준을 보일 것으로 관찰되어 Dystrudepts의 분류에 부합한다. 양 유역 모두 사양질 토성을 가지며 평균기온 13.2℃의 온대기후에 속하는 mesic 온도상이므로 자연유역의 토양속은 Loamy Sand, mesic family of Typic Hapludults로, 인위유역의 토양속은 Loamy sand, mesic family of Typic Dystrudepts로 분류되어야 할 것으로 판단된다.

2) 시료채취 축선별 토성

한편 각 축선별로 나타나는 토성(soil texture)은 서로 주목할 만한 차이를 보이지 않았다. 토성은 보수력과 통기성, 유기물 보유능력에 영향을 주어 산림의 식생성장에 영향을 주므로 중요하게 여겨지는 토양특성이다. 각 축선이 갖는 토성을 살펴보기 위하여 토양의 입도 분석을 실시한 분석결과, 자연유역지역 30개 시료 내 토양에 함유된 모래는 64.5~82.5%(평균 67.6%), 미사는 12.5~30.0%

(19.3%), 점토는 3.0~10.0%(8.1%)였다. 입도는 대체적으로 2.53~5.40 ϕ (평균 4.19 ϕ)로 조립한 사질이고 분급도는 1.97~4.73 ϕ (평균 3.43 ϕ)로 불량한 값을 보였다. 반면 인위유역 지역의 60개의 토양시료의 입도 분석을 실시한 결과 모래는 63.0~82.0% (평균 68.4%), 미사는 10.0~25.4% (14.4%),점토는 2.5~14.5% (7.1%)였다. 입도는 대체적으로 조립질과 세립질이 폭넓게 분포하며 0.33~7.13 ϕ (평균 4.66 ϕ)로 나타났으며, 3.80~4.69 ϕ (평균 4.28 ϕ)로 매우 불량하였다. 결과적으로 조사된 모든 지점에서 토양은 사양토(sandy loam)-양질사토(loamy sand)로 구분되었으며 유역과 축선의 구분을 막론하고 유사한 양상을 드러내었다.

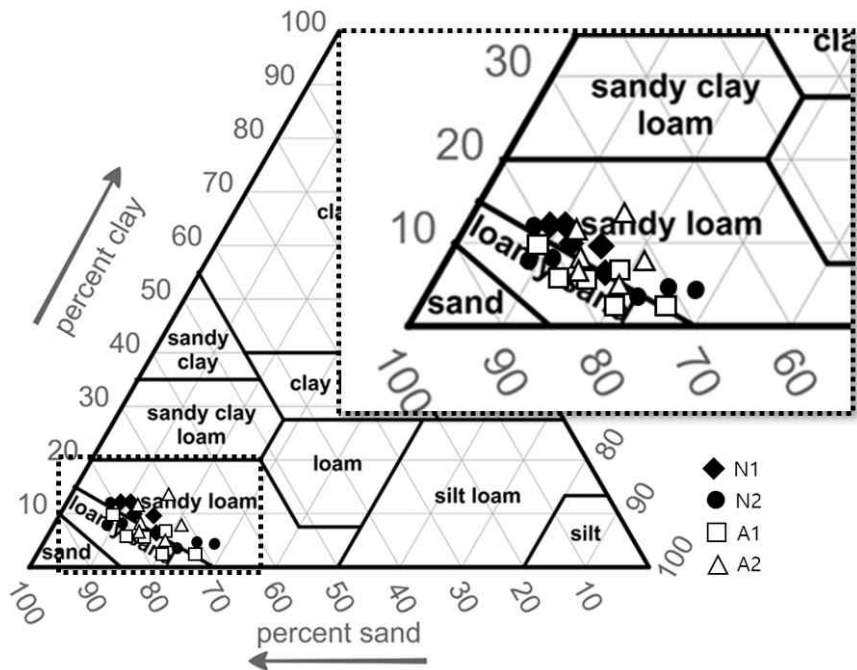


그림 3-9. 연구지역 토성의 분포

3) 시료채취 측선별 토양 특성의 비교

2개 구역에서 각각 2개의 측선에 기준하여 조사된 시료의 토양특성들을 4개 측선(N1, N2, A1, A2)으로 구분하여 분산분석을 실시한 결과 모든 측선은 상호간에 유의한 차이를 보였다. 측선에 따른 각 토양특성의 집단차이 유의확률은 수분함량(.017), pH(.016), EC(.022) 그리고 LOI와 CEC에서 <.001의 수치를 보여 평균의 차이를 확인할 수 있었으며, 이는 곧 측선이 대표하는 구역의 구분에 따라 나타나는 차이를 방증한다. 한편 자연구역과 인위구역 사이에서 측선별 토양특성의 유의성 차이를 가장 극명하게 드러낸 것은 LOI, CEC로 나타났다. 이는 후술할 각 토양특성별 비교에서 상세하게 살펴본다.

먼저 4개 측선의 토양 수분함량은 평균적으로 27~30% 내외의 수치를 보였다. 자연측선 N1과 N2의 평균은 각각 29.25%, 29.95%로 인위구역 측선 A1(28.23%), A2(27.77%)에 비하여 1.04에서 1.08배 범위에서 크게 나타났으며 전체 측선의 평균차이 유의수준이 0.05보다 작은 0.017로 나타나 각 측선 간 유의미한 차이가 있는 것으로 나타났다(표 3-7). 측선 집단 간 차이를 규명하기 위한 Tukey 사후검정의 결과 N2과 A2사이의 평균차이가 -2.19로 $p < 0.05$ 수준에서 가장 유의하게 드러났다.

반면 N1를 기준으로 N2(-0.70), A1(1.02) 그리고 A2(1.48)로 차이가 없었다. A1을 기준으로 할 경우에도 나머지 N2(-1.73), A2(0.46)와는 유의한 차이가 관찰되지 않았다. 인위구역의 토양은 자연구역에 비해 사면하부에서 마사토의 주기적인 개토가 이루어지고 있으므로 토양 내 수분 유출이 활발하여 자연구역 토양 내 수분함량이 인위구역보다 높은 것으로 추측된다. 그러나 두 측선이 기반한 구역이 같은 강우조건하에 있으며 동일한 지형변동성 또한 크지 않아 수분의 유입 유출관계가 다소 유사한 영역에 속한 것이 측선

차이의 유의성을 감소시킨 요인으로 판단할 수 있다.

전체 측선별 강열감량의 차이는 $p < 0.01$ 수준에서 유의하게 드러났다. 한편 자연유역 측선 차이의 유의수준은 0.70, 인위유역에서는 0.156으로 각각 차이가 없음이 드러났다. 이를 토대로 사후검증의 등질적 부분집합이 자연유역 측선 N1(13.85)와 N2(13.41), 인위유역 측선 A1(11.21)와 A2(10.37)로 각각 구분되어 유역의 구분에 의한 차이를 유의하게 드러내었다.

표 3-7 연구유역 측선별 Moist, LOI 비교

Transect (N=30)	Moist (%)			
	Mean	SD	F	p
N1	29.25ab	2.20	3.55**	.017
N2	29.95b	4.15		
A1	28.23ab	2.53		
A2	27.77a	2.96		

Transect (N=30)	LOI (%)			
	Mean	SD	F	p
N1	13.85b	1.54	36.58***	<.001
N2	13.42b	1.48		
A1	11.20a	1.55		
A2	10.37a	1.54		

** $p < 0.05$ *** $p < 0.01$

Tukey HSD 사후검증 결과에 따라 동일한 알파벳 문자는 .05 수준에서 차이가 없음

양 유역의 측선간 차이의 범위는 2.21에서 3.47로 비교적 넓게 나타났다. 최대치는 자연유역의 경우 N1에서 15.75%, 인위유역의 경우 A1에서 13.32%를 보였으며 최저치를 보인 N2와 A2에서 각각

13.22%, 9.21%로 약 1.43배 정도의 차이를 보였다. 이는 자연유역에서 유기물이 충족이 되고 침식이 덜 일어나며, 인위유역은 산지사면의 전용과 택지조성에 따른 거주활동 확산으로 우세한 침식과 유기물 공급의 높은 변이성이 낮은 강열감량으로 이어진 것으로 유추할 수 있다.

표 3-8 연구유역 측선별 pH, EC, CEC 비교

Transect (N=30)	pH			
	Mean	SD	F	p
N1	5.43a	0.49	3.32**	.022
N2	5.83b	0.54		
A1	5.77ab	0.60		
A2	5.69ab	0.48		

Transect (N=30)	EC (mS/cm)			
	Mean	SD	F	p
N1	113.13a	43.49	3.584**	.016
N2	89.08a	25.52		
A1	100.69ab	20.11		
A2	99.18ab	17.54		

Transect (N=30)	CEC (cmol/kg)			
	Mean	SD	F	p
N1	8.43b	0.62	12.93***	<.001
N2	8.59b	0.47		
A1	7.89a	0.70		
A2	8.20a	0.64		

** p<0.05 *** p<0.01

Tukey HSD 사후검증 결과에 따라 동일한 알파벳 문자는 .05 수준에서 차이가 없음

측선에 따른 pH의 변화를 분석한 결과는 N1-N2의 평균차이(-0.40)가 유의한 한편 나머지 측선 사이에서 나타나는 차이는 통계적으로 유의미하지 않다고 분석되었다. pH의 토양 공급과 밀접한 연관을 갖는 LOI의 집단간 차이와 pH의 분산분석결과가 상반되는 것은 연구지역에서 동일한 토양형성프로세스를 전제한 소유역 내에 pH의 차이를 야기하는 환경적, 인공적 요소가 다양하게 작용하고 있음을 의미한다. 한편 EC의 경우 전체 측선의 차이는 유의확률 0.016으로 나타났으나 각 유역에 속한 두 측선 사이에서는 분명한 차이가 없는 것으로 드러났다.

측선별로 나타난 양이온치환능 CEC는 LOI와 유사하게 자연유역과 인위유역에 속한 각 2개 측선에서 유의한 차이를 드러내었다. 이는 앞서 유역별 토양특성간 상관관계분석에서 CEC와 LOI의 상관관계 수준이 0.44, 0.47 등으로 강한 상관관계를 보였음을 감안할 때, CEC과 강하게 연관된 유기물량의 준동을 따른 결과로 설명할 수 있다. 이렇듯 측선별 토양특성의 유의성 차이를 가장 극명하게 드러낸 것은 LOI와 CEC로 나타났으며, N1/N2 - A1/A2 측선간 가장 유의한 차이($P < 0.01$ 수준)를 보였다. 다시 말해 해당 두 특성은 소유역 공간스케일에서 발생한 자연토양과 인위토양이 가장 대표적으로 차이를 보일 수 있는 토양특성으로 간주될 수 있다.

3. 사면단위별 토양특성차이 비교평가

1) 사면단위별 토양특성차이 분석

본 절에서는 인위토양의 특성차이 비교를 지형연속성에 근거한 사면단위에 따라 토양특성의 분석을 실시하였다. 본 연구의 비교대상으로서 자연유역과 인위유역의 각 지형단위가 갖는 토양이 갖는 토양특성의 통계량은 표 3-11과 같다. 토양조사가 실시된 각 측선

의 60개 지점은 6개 사면단위에 균등한 비중으로 나뉘어졌으며 (n=10), 각 토양조사 측선 사면단위에 따른 특성 평균의 거동 추세는 그림 3-9와 같다. 이를 살펴보면 유역과 측선의 구분을 막론하고 사면단위에 따른 변화는 각 토양특성이 서로 고유한 추세를 나타내고 있다. 먼저 토양 내 수분함량의 경우 강우 우천의 사면 상 움직임의 시작으로서 정상부인 Summit에서 27.10-30.08% 수준으로 높게 나타났다가 Shoulder-Backslope을 거치며 감소세를 보인 이후 Footslope-Toeslope 사면단위에서 다시 높게 나타났다가 Channel에서 감소하는 추세를 보인다.

표 3-11. 각 측선의 사면단위별 토양특성 통계량

N1										
Catena (N=10)	Moist(%)		LOI(%)		pH		EC (mS/cm)		CEC (cmol/kg)	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
SU	30.08	2.20	13.87	0.83	6.04	0.29	108.98	22.13	8.36	0.31
SH	28.58	2.15	14.21	0.63	5.90	0.34	84.88	17.22	8.28	0.28
BS	27.80	2.53	12.58	1.05	5.42	0.30	73.37	18.21	8.52	0.35
FS	30.98	2.11	13.30	0.47	5.09	0.28	107.34	17.53	8.41	0.32
TS	30.05	2.13	15.73	0.51	4.97	0.32	136.64	22.31	8.43	0.24
CH	28.04	3.43	13.39	0.63	5.17	0.48	167.55	23.57	8.61	0.22

N2										
Catena (N=10)	Moist(%)		LOI(%)		pH		EC (mS/cm)		CEC (cmol/kg)	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
SU	27.30	2.12	12.06	0.78	6.05	0.28	58.91	20.28	8.83	0.28
SH	29.44	1.95	13.09	0.63	6.15	0.27	86.65	21.29	8.43	0.29
BS	24.46	2.12	13.18	0.88	5.51	0.31	78.11	19.31	8.42	0.37
FS	31.10	1.45	13.62	0.39	5.34	0.30	73.19	17.23	8.87	0.22
TS	32.02	2.20	14.37	0.45	5.30	0.38	117.47	28.44	8.77	0.24
CH	29.81	2.71	13.57	0.53	5.41	0.39	120.14	31.51	8.21	0.25

A1										
Catena (N=10)	Moist(%)		LOI(%)		pH		EC (mS/cm)		CEC (cmol/kg)	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
SU	27.12	2.31	10.76	0.79	5.98	0.33	86.34	20.73	7.89	0.28
SH	28.51	2.25	12.25	0.88	6.06	0.31	80.12	21.92	7.45	0.38
BS	27.98	2.44	10.35	0.98	5.64	0.27	85.34	16.75	7.45	0.25
FS	29.73	1.89	11.24	0.44	5.49	0.31	115.06	17.87	8.14	0.22
TS	28.11	2.34	13.19	0.34	5.50	0.37	113.50	26.21	8.30	0.34
CH	27.93	3.70	9.44	0.74	5.97	0.67	123.76	33.31	8.10	0.32

A2

Catena (N=10)	Moist(%)		LOI(%)		pH		EC (mS/cm)		CEC (cmol/kg)	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
SU	30.03	2.64	10.42	0.69	6.08	0.19	78.86	20.54	7.28	0.22
SH	26.41	2.13	10.55	0.58	6.12	0.29	84.28	21.27	8.02	0.18
BS	26.95	2.35	10.61	0.77	5.49	0.33	93.72	19.84	7.52	0.32
FS	29.40	2.53	9.87	0.54	5.39	0.32	120.24	17.92	7.77	0.33
TS	27.45	2.41	11.52	0.46	5.34	0.30	109.81	28.43	7.95	0.26
CH	26.37	2.81	9.26	0.64	5.71	0.27	108.21	31.77	7.80	0.35

*약어설명 SU:Summit, SH:Shoulder, BS:Backslope, FS:Footslope, TS:Toeslope, CH:Channel

토양 내 유기물함량을 포괄하는 강열감량은 직선사면부인 BS에서 10.35-13.18%로 가장 작게 나타났으며 유역사면의 상부와 하부인 SH와 TS에서 각각 높은 함량을 보였다. pH은 footslope과 toeslope에서 낮게 나타나고 사면상부인 summit-shoulder에서 전반적으로 높게 나타났다. 특히 다른 토양특성과는 달리 pH는 shoulder에서 가장 높은 수치를 보였다. EC는 칠형인 shoulder에서 가장 낮고 요형인 toeslope에서 높게 나타났다. Summit-Shoulder와 Channel은 통계적으로 유의한 차이(p<0.05)를 보였다. EC도 유사한 결과가 나타났지만 통계적 차이는 나타나지 않았다. 계곡부를 중심으로 나타나는 toeslope은 양이온치환능이 높아 상대적으로 비옥한 토양이 나타나고 있다.

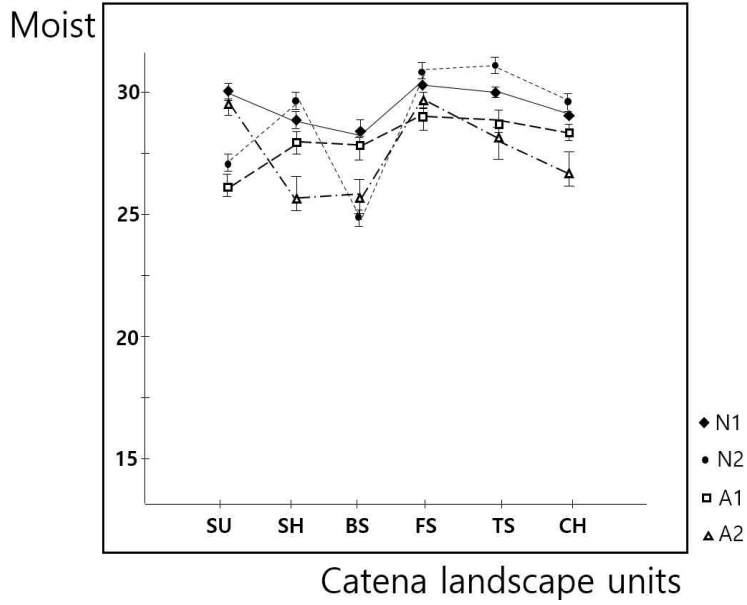


그림 3-10. 토양조사 측선 사면단위에 따른 수분함량의 거동

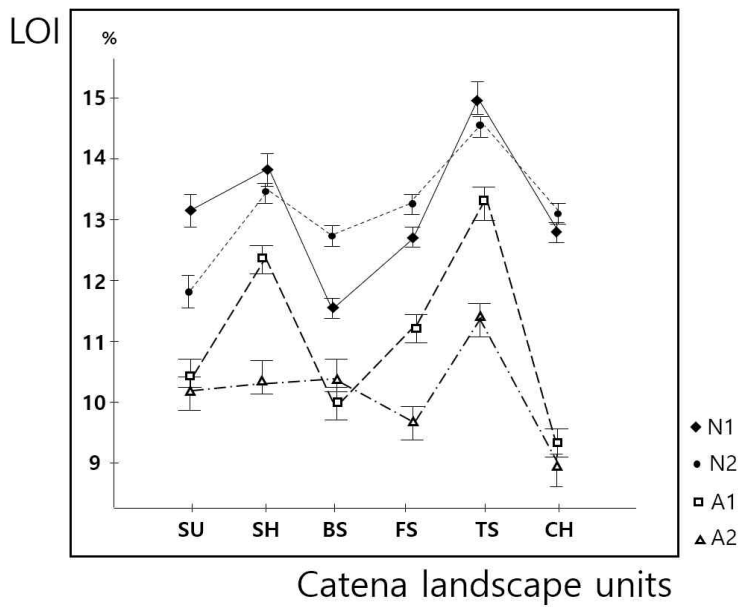


그림 3-11. 토양조사 측선 사면단위에 따른 LOI 함량의 거동

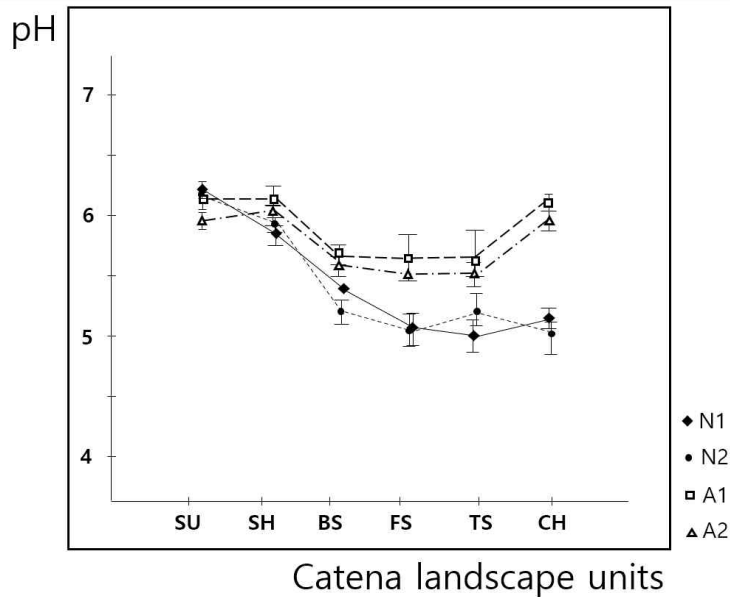


그림 3-12. 토양조사 측선 사면단위에 따른 pH의 거동

유기물함량은 자연토양과 인위구역의 정상부인 Summit에서 11.38%, 10.60%의 비중을 가져 가장 큰 차이를 드러내었으며, 환경사가 시작되어 유기물이 집적되는 Toeslope 지형단위에서 각각 NA(11.39%), AS(10.96%)의 비중으로 가장 낮은 격차를 가지는 특징을 보였다.

한편 양이온치환능 CEC를 보면 자연구역의 Footslope와 Channel를 제외한 지점은 각 사면단위에서 거의 유사한 변화 추이를 관찰할 수 있었다. 양이온교환용량인 경우 자연구역의 Summit에서 평균 8.40 cmol/kg, 인위구역에서 7.39 cmol/kg 등으로 LOI와 마찬가지로 인위구역보다 자연구역에서 약 2배정도 높았다. 따라서 토양비옥도를 나타내는 지표라 할 수 있는 양이온교환용량이 인위구역 내 사면단위보다 자연구역 내에서 전반적으로 높게 나타나 서로 다른 차이를 나타냈다.

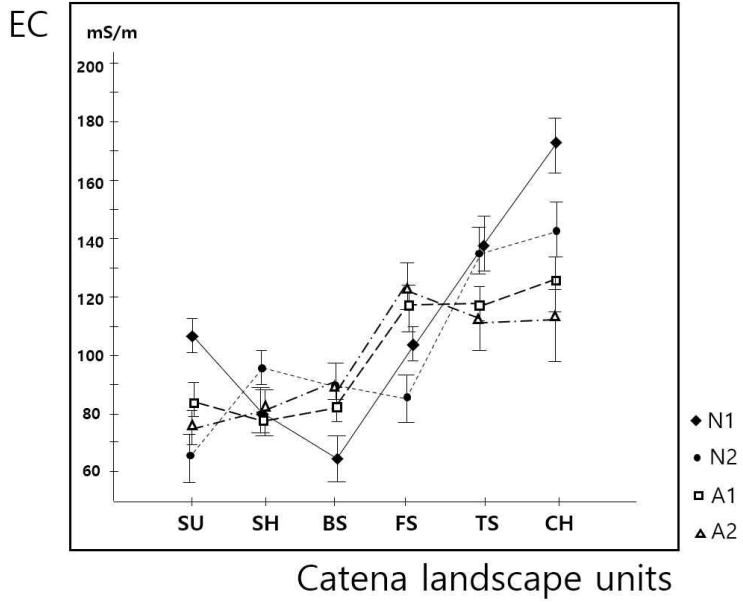


그림 3-13. 토양조사 측선 사면단위에 따른 EC의 거동

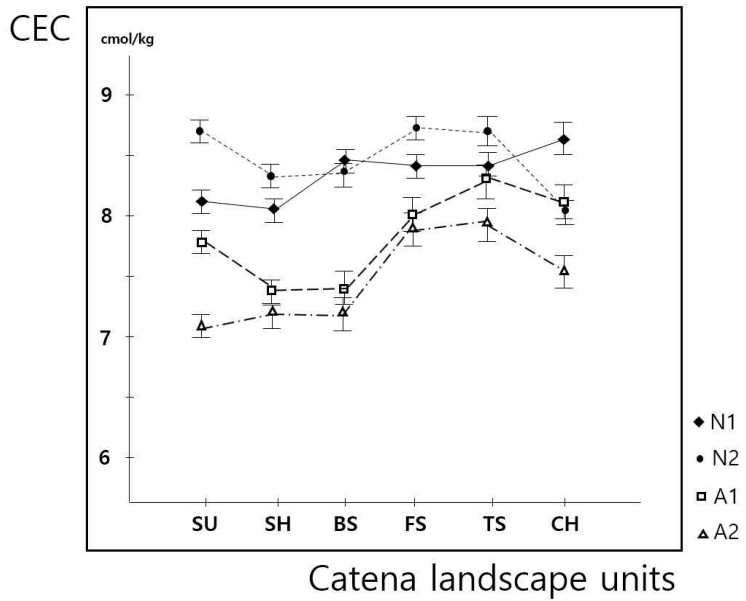


그림 3-14. 토양조사 측선 사면단위에 따른 CEC의 거동

N1에서 8.37 molc kg⁻¹, N2(8.29 cmol/kg)등으로 높게 나타났으며, 동일한 지형단위에 대하여 인위유역에서는 A1-Shoulder(7.26 cmol/kg), A2-Channel(7.45 cmol/kg) 순으로 낮게 나타났다. 인위유역의 토양 pH는 Summit(6.68), Shoulder(6.27), Backslope(5.31), Footslope(6.24), Toeslope(6.21), Channel(5.43)으로 자연유역에 비해 유의적으로 높았다. 인위유역의 토양 pH가 상대적으로 높은 것은 1) 표토층 유기물 제거에 따른 유기산의 유입감소, 2) 식생의 양이온 흡수 감소에 따른 토양 내 수소 이온 방출 감소, 3) 표토에 비해 염기성 양이온 함량이 높은 토양 모재 노출 등 다양한 원인에 의한 것으로 사료된다(Weil and Brady, 2017; Binkley and Fisher, 2020). 특히 Footslope에서 8cmolc/kg, Backslope에서 7cmolc/kg로 Backslope이 Footslope에 비해 유의적으로 낮았다. Backslope의 CEC가 낮은 것은 강우시 표면으로부터 세탈이나 용탈이 발생하였기 때문으로 사료된다.

2) 토양특성차이 소결

이상과 같이 기술된 사면단위에 따른 전반적인 토양특성 변화는 큰 맥락에서 사면의 물질이동모델인 Catena 사면단위의 성격을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 대부분의 토양특성은 사면상부에서 물질이 이동하는 철형 포행사면인 Backslope과 상반되는 사면곡면을 가지는 요형사면(concave slope)으로서 Footslope의 단계에 집중되는 경향을 보인다. 수문학적 이동과 상관관계가 높은 토양특성들이 상부의 토양지형면으로부터 Footslope에 집적되는 현상을 보인다. 그리고 Toeslope은 사면물질이동과 하천에 의한 물질이동이 퇴적되어 형성된 지형면으로서 다수 토양특성의 집중이 사면물질 Footslope 하천부인 Channel의 물질이동 영향을 동시에 받아 토양특성의 전반

적인 함량에서 분명한 차이를 보여준다.

표 3-8 연구지역 전체에 대한 Catena 사면단위별 토양특성

Variables	Catena	Mean	SD	F	p
Moist	SU	28.63b	2.10	5.126**	<.001
	SH	28.24ab	3.13		
	BS	26.79a	2.53		
	FS	30.30c	1.93		
	TS	29.41bc	2.10		
	CH	28.04ab	3.13		
LOI	SU	11.78a	0.54	4.05**	.002
	SH	12.53ab	0.48		
	BS	11.68a	0.38		
	FS	12.01a	0.54		
	TS	13.86b	0.25		
	CH	11.41a	0.98		
pH	SU	6.03a	0.49	13.52**	<.001
	SH	6.06ab	0.54		
	BS	5.52ab	0.60		
	FS	5.33ab	0.48		
	TS	5.28b	0.44		
	CH	5.56b	0.72		
EC	SU	83.27a	43.49	15.94**	<.001
	SH	83.98ab	25.52		
	BS	82.64ab	20.11		
	FS	103.96abc	17.54		
	TS	119.26bc	23.12		
	CH	129.91bc	23.11		
CEC	SU	8.08a	0.62	3.98**	<.001
	SH	8.04a	0.47		
	BS	7.98a	0.70		
	FS	8.29ab	0.64		
	TS	8.36b	0.46		
	CH	8.18b	0.71		

** p<0.05

Tukey HSD 사후검증 결과에 따라 동일한 알파벳 문자는 .05 수준에서 차이가 없음

4. 토양특성 비교방식에 따른 인위토양특성차이 평가

본 연구에서는 인위토양이 자연토양과 비교하여 갖는 특성의 차이를 비교하기 위한 여러 비교명목을 구역별, 축선별 그리고 Catena 사면단위별로 구분하여 수행하였다. 이러한 비교연구의 준거가 각각 얼마나 토양 특성의 차이를 드러내는가를 평가할 필요성이 있다. 여기에 적합한 방법으로 일반선형모형(Generalized Linear Model; GLM)을 도입하였다. 이 모형은 명목변수와 연속변수를 동시에 사용하여 토양특성과 관계를 파악할 수 있는 대표적인 기법이다 (McKenzie and Austin, 1993).

이에 3가지 토양특성비교 방식의 설명력을 GLM를 이용하여 분산분석을 실시해 평가하였다. 구역단위 분류의 설명력은 3-24%로 분포하고 있으며, Moist와 CEC에서 유의하게 나타났다. 하지만 pH와 EC에서는 유의한 결과를 보이지 않았다. 축선별 구분의 결과에서는 LOI와 CEC에서 유의한 결과가 나타났고 전체적으로 6-28%의 설명력을 보인다. LOI에서는 전체 비교방식 가운데 가장 높은 설명력($r^2=0.28$)을 보이고 있고 CEC에서도 19%로 높은 설명력을 나타냈다. 하지만 구역별 구분의 결과와 마찬가지로 pH와 EC에서는 유의하지 않았고, 설명력도 6-8%로 낮았다. 사면단위별 비교의 결과에서도 위의 두 방식과 마찬가지로 LOI(17%)와 CEC(21%)에서 유의한 결과가 나타났다. 전체 비교방식 중에서 비교적 낮은 설명력을 보였던 pH는 유일하게 사면단위별 비교에서 유의한 결과($r^2=0.15$)가 나타났다. 그리고 전체 비교방식에서 EC의 경우 유의한 관계가 나타나지 않았다.

각 토양특성비교방식을 살펴보면 전체적으로 토양특성에 대해 3-28%의 설명력을 보였다. 이것은 연구지역 전반에서 나타난 토양 특성간의 상관관계분석 결과와 비교했을 때 전체적으로 낮은 수치이다. 특히 pH의 경우 두 구역에서 수분함량과 LOI 등과 상관계수

최대 0.23, 0.40을 보인 것과 비교했을 때, 지형분류의 통계기반 방식에서 17%의 설명력으로 낮았다. 교환성양이온에서도 15-28%로 30-45%의 설명력을 보였던 상관분석의 결과와 대비되었다. 이것은 유역, 측선으로 대표된 단일 사면 그리고 해당 사면을 구분한 사면 단위라는 세 가지 공간적 스케일에서 토양특성의 영향요인이 달라 질 수 있음을 시사한다.

표 3-9 각 토양비교방식의 토양특성 설명력(결정계수)

비교방식	유역별(n=60)	측선별(n=30)		사면단위별(n=20)
		r ² (F)		
Moist	0.23** (2.65)	0.14 (1.74)	0.26** (2.65)	
LOI	0.13 (2.11)	0.28** (1.65)	0.24** (1.35)	
pH	0.04 (0.82)	0.08 (1.03)	0.15* (0.44)	
EC	0.03 (31.32)	0.06 (30.87)	0.10 (25.23)	
CEC	0.21** (0.70)	0.19* (3.91)	0.24** (0.85)	

* 상관계수는 0.05수준에서 양쪽으로 유의

** 상관계수는 0.01수준에서 양쪽으로 유의

전체 비교방식에서 pH와 EC의 설명력이 낮았던 이유는 크게 3가지로 판단할 수 있다. 먼저 첫 번째는 연구에 사용된 공간스케일 상에서 지형변수에 대한 토양특성의 연속적 변화 민감성의 문제를 고려하지 못한 점이다. 본 연구에서 선정된 유역과 사면단위의 분류는 사용된 수치고도모형의 30x30m 해상도에 근거한 것으로 지형변수

를 선택하고 계산을 하게 된다. 이때 지형변수의 속성값에 영향을 주고 그 영향으로 지형분류의 결과는 달라지며 결국 토양특성의 분포에도 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 조사의 대상인 토양특성에 따라 적절한 공간해상도를 적용할 경우 토양특성의 분포와 비교기준과의 관계에 대한 보다 나은 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

두 번째는 변동계수가 높은 동적인 토양특성에 대해 일정한 공간 단위를 사용한 비교가 갖는 한계점으로 이산적인 지형단위 안에서 나타나는 연속적인 변화에 대하여 제한적인 대푯값만을 제시하는데 따른 것이다. 자연적으로 나타나는 토양은 연속된 환경조건에 따라 점진적으로 변화하지만 이산적 지형단위 사이의 비교에서는 같은 토양형성 프로세스를 전제하는 단위와 단위 사이에서 급격하게 변하는 토양특성의 대푯값의 차이로 특성분포를 설명하는 형태를 보인다. 따라서 동적인 변이성을 보이는 토양특성을 보다 적절히 표현하기 위해서는 토양특성 지형단위를 이용하여 토양의 변이성을 표현하는 이산모델의 대표적 방식인 지형분류와 연속적으로 나타나는 토양형성변수와의 상관관계를 이용하여 차이를 드러내는 방식을 함께 고려할 필요가 있다는 것이다.

IV. 결론

본 연구에서는 용인-수원시 일대에서 자연토양과 인위토양의 토양특성 차이에 대한 비교연구를 진행하고 인위토양이 갖는 특성을 평가하였다. 비교연구를 위한 공간단위로 소유역 단위를 이용하였으며, 자연적 토양형성작용 우세 - 인위적 토양형성작용 우세로 간주되는 2개 소유역을 비교 대상으로 선정하였다. 각 소유역의 일부 사면을 토양형성의 지형연속성을 근거로 한 Catena 개념에 의거해 6개 사면단위로 분류하여 토양자료를 조사하고 해당 결과를 토대로 토양특성들의 공간적 분포와 특성차이를 비교, 평가하였다. 그리고 해당 분석결과들에 기초하여 인위토양의 차별적 특성차이가 가장 두드러지는 기준을 제시하였다. 이를 통해 도출한 연구결과는 다음과 같다.

첫째, 연구대상인 용인-수원시 일대 자연유역과 인위유역에서 나타나는 토양특성은 공간적으로 차별적인 분포를 보였다. 조사된 토양특성을 수분함량과 강열감량은 Footslope-Toeslope 등 사면하부를 중심으로 높게 나타났으며 수평적으로 넓게 분포한 반면 pH와 EC의 분포는 다소 파편화된 분포를 보이고 있었다. CEC의 분포 또한 수분함량과 강열감량의 분포와 유사하게 나타났다. 이러한 결과는 각 토양특성간의 상관관계로부터 토양 내 수분이 강열감량($r=0.63, 0.25$), CEC($r=0.34, 0.54$)와 높은 상관관계를 가짐을 감안할 때 Footslope 사면단위를 기점으로 변화하는 유역 사면굴곡의 요철(concavity)와 그에 따른 물질의 확산작용(diffusive processes)에 민감하게 분포하는 경향을 보였다. 이를 통해 일정한 수문학적 프로세스를 규정하는 소유역 공간스케일과 지표면 물질흐름특성을 지표형태 구분을 통해 반영한 Catena 사면유역단위에서 토양특성이 서로 다르게 나타남을 확인하였다.

둘째, 각 비교기준을 통한 자연토양 대비 인위토양의 특성차이를 살펴보면 주로 강열감량 LOI, 양이온치환능 CEC에 대해 유의한 차이를 보였고, pH와 EC의 경우 전체적으로 유의한 결과가 나타나지 않았다. 측선별로 나타난 양이온치환능 CEC는 LOI와 유사하게 자연유역과 인위유역에 속한 각 2개 측선에서 유의한 차이를 드러내었다. 이는 앞서 유역별 토양특성간 상관관계분석에서 CEC와 LOI의 상관관계 수준이 0.44, 0.47 등으로 강한 상관관계를 보였음을 감안할 때, CEC과 강하게 연관된 유기물량의 준동을 따른 결과로 설명할 수 있다. 이렇듯 측선별 토양특성의 유의성 차이를 가장 극명하게 드러낸 것은 LOI와 CEC로 나타났으며, N1/N2 - A1/A2 측선간 가장 유의한 차이($P < 0.01$ 수준)를 보였다. 한편 pH와 EC의 유의성이 낮았던 이유는 토양특성비교를 위해 분류과정에서 채택한 공간스케일과 관련된 문제 그리고 지형변수의 측선 토양의 변이성과 연속성을 고려하지 못했던 점을 거론할 수 있다. 6개 사면단위를 전부 포함하는 임의의 측선을 기준하여 유역별로 2개의 측선만을 추출하였기에 대표성의 문제가 거론될 수 있다. 한편 Catena 사면단위분류는 사면이 갖는 경관에서 연속적으로 토양특성이 변화한다는 가정을 담고 있다. 토양의 발생과 그가 갖는 특성은 점진적으로 변화하지만 서로 다른 지형변수의 조합인 사면단위가 변하면서 다른 프로세스가 전제되었으므로 급격하게 변화하는 모습을 보인다. 이 가운데 pH와 EC의 경우 다른 토양특성과 비교했을 때 변동계수가 상대적으로 커 변이성이 심하게 드러났고 다양한 형성요인에 영향을 받기 때문이라고 판단하였다.

셋째, 인위토양특성의 분포 차이를 유역별, 측선별 구분과 Catena 사면단위 분류 중 가장 잘 설명할 수 있는 기준을 탐색하였다. 유역 구분에 의한 비교는 수분함량과 CEC에 대해 유의한 설명력(21-23%)을 보였고, 측선별 비교는 강열감량과 CEC에서 유의한 결

과(19-28%)가 나타났다. 사면단위에 따른 구분에 있어서는 EC를 제외한 모든 특성에서 유의한 결과가 산출되었다(15-26%). 즉 토양 특성 형성의 지형적 연속성의 개념을 적용한 Catena 사면단위분류 방식을 고려한 비교에서 토양의 분포가 가장 잘 설명되었다고 판단할 수 있다. 하지만 각 토양특성에 따라 상관계수와 변이 정도에서 차이가 드러났으며 공간적 분포의 특정에서 어려움이 있다. pH와 EC 등 일부 토양특성의 차별적 발생을 구체화하기 위해서는 이산적 공간단위 범주와 토양형성과 관련된 연속적인 환경변수를 종합적으로 고려하는 방식이 필요하다.

본 연구에서는 유역 범위에서 추출하여 조사된 토양자료를 통제된 공간명목범주를 통해 비교하여 인위토양이 드러내는 토양특성의 차이를 평가하였다. 연구지역 내에서 토양이 형성되는 공간단위로서 소유역의 획정기법과 지형분류기법을 이용하여 토양특성차이 비교의 기준을 확립할 수 있었고 해당 기준 하에서 토양특성의 차이가 유의미하게 드러날 수 있다는 점을 제시하였다.

이와 같은 연구결과는 기존의 인위토양 연구에서 실행되었던 인위적인 요소들로 구성된 불연속적이고 확정되지 않은 경관단위를 이용한 비교를 탈피하여 일정한 지형분류에 따른 비교를 시도하였다는 점에서 시사하는 바가 있다. 인위토양과 같이 명백한 가시적 차이를 드러내는 토양특성 간 비교에 대하여 지형의 형태적 분류에 따른 토양형성과정과의 관계와 그에 따른 분포차이에 대한 주목을 의도하였다. 이와 같은 방법은 수치고도모형을 사용해 보다 광범위한 지역에 일괄적으로 적용하여 일반화된 결과를 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있다. 도시화 접이지대 내 산지토양의 관리와 이용에 있어서 인위토양의 조사와 그 발생에 관여하는 각종 수문 및 토양 환경의 파악에 대한 기본자료의 체계를 제공할 수 있을 것으로 예상된다.

그러나 한편으로 이 연구의 진행 과정상에서의 한계로 인해 연구에 사용되는 토양특성을 보다 다양하게 고려하지 못하였다. 또한 사용되는 수치지도의 격자크기에 따른 분류기준의 변화를 야기하는 공간 스케일의 문제, 연구의 결과로 제시된 인위토양의 차별적인 토양특성과 실제 인간영향권역의 연결 등에 있어 보다 체계적인 연구가 이루어져야 할 것이다. 특히 본 연구에서 인위토양은 50년 미만의 단기간에 유역단위에서 분화된 결과로 간주되었는데, 유역 사이에서 공통된 토양형성요소와 각종 지형요소들이 오랜 기간에 걸쳐 관계를 형성하였다는 점을 고려한다면 보다 큰 시간대에서 이들이 어떻게 연결되는 지에 대해서도 보다 세부적인 연구가 필요하다. 그리고 연구결과의 진전된 일반화를 위해서는 본 연구에서 임의로 설정한 통제된 지역을 벗어나 보다 다양한 지역의 환경에 적용할 필요가 있으며 더 많은 토양자료를 이용한 평가가 요구된다.

참 고 문 헌

- 김명숙, 2005, 인위경관(Anthrosapes) 토지체계에서 인류의 영향 평가를 위한 경관단위, 한국토양비료학회지 24(3), 51-69
- 손연규, 장용선, 박찬원, 문용희, 현병근, 송관철, 전현정, 2012, 적토형 인위토양의 공간변이 비교 연구, 한국토양비료학회지 45(6) 897 - 899
- 박남창, 이광수, 박문섭, 신현철, 전권석, 정수영, 산림 토양의 이화학적 성질과 낙엽송 임분의 지위지수와의 관계, 2008, 한국임학회지 97(6), 589-896
- 박수진, 2004, 생태환경 특성 파악을 위한 지형분류기법의 개발. 대한지리학회지, 39(4): 495-513.
- 박수진, 안유순, 김추홍, 심우진, 이승진, 2018, 북한 토양정보 예측기법의 개발 - 북한 토양정보의 중요성과 토양형 추정, 대한지리학회지 53(5), 2018.10, 649-668
- 손학기, 강미나, 최혁재, 최수, 배유진, 이동근, 권용석. 2011. 자연 친화적 산지관리 계획 수립방안 연구. 국토연구원.
- 이삼수, 정다운, 정연우, 2012, 국토계획법상 용도지역과 개별법상 농지, 산지와 관계정립에 관한 연구, 국토계획 47(4)
- 장재훈, 1980, 산지지형 <한국지지 총론>, 건설부 국립지리원
- 정관용, 2011, 지형분류를 통한 산지토양특성의 예측가능성, 서울대학교 대학원 석사학위 논문
- 정연태, 1996, 미국 Soil Taxonomy의 장단점과 활용방향, 한국토양비료학회지 29(2), 207-210
- 정연태, 1998, Soil Taxonomy의 New Order 소개, 한국토양비료학회지 31(3), 309-313

- 최정선, 장효진, 심우진, 안유순, 신혜섭, 이승진, 박수진, 2018, 산지 경계 추출을 위한 지형학적 변수 선정과 알고리즘 개발. 한국 지형학회지, 25(3), 1-18.
- 탁한명, 손일, 2013, 지형학적 산지의 공간적 특성과 통합적 산지관리단위 설정을 위한 연구. 대한지리학회 학술대회논문집, 415-419
- 허승오, 전상호, 한경화, 조희래, 손연규, 하상건, 김정규, 김남원, 2012, 인위적으로 변경된 토양에서의 수분보유특성 해석 모형의 적용, 한국토양비료학회지 43(6)
- Aytenew, M., 2015. Effect of Slope Gradient on Selected Soil Physicochemical Properties of Dawja Watershed in Enebse Sar Midir District, Amhara National Regional State. AMERICAN JOURNAL OF SCIENTIFIC AND INDUSTRIAL RESEARCH.
- Barsch, D., Caine, N., 1984, The nature of mountain geomorphology, Mountain Research and Development, 4(4), 287-298.
- Bernard Jabiol, Augusto Zanella, Jean-François Ponge, Giacomo Sartori, Michael Englisch, Bas van Delft, Rein de Waal, Renée-Claire Le Bayon, 2013, A proposal for including humus forms in the World Reference Base for Soil Resources (WRB-FAO), Geoderma 192, 286-294.
- Bishop, M., Shroder, J. F., 2004, Geographic information science and mountain geomorphology. Springer Science & Business Media
- Bockheim, J.G., Gennadiyev, A.N., 2000, The role of soil-forming

- processes in the definition of taxa in Soil Taxonomy and the World Soil Reference Base, *Geoderma* 95, 53:72
- Capra, G.F., Ganga, A., Grilli, E., 2015, A review on anthropogenic soils from a worldwide perspective, *Journal of Soils Sediments*, 15. 1602-1618
- Certini, G. and Scalenghe, R. 2006. *Soils. Basic Concepts and Future Challenges*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, EU. 328pp
- Crutzen, P.J., 2002, *Geology of mankind*, *Nature* 415, 23
- Deng, Y. and Wilson, J., 2006, The Role of Attribute Selection in GIS Representations of the Biophysical Environment, *Annals of the Association of American Geographers*, 96(1), 47-63
- Domingos Sárvio Magalhães Valente, Daniel Marçal de Queiroz, Francisco de Assis de Carvalho Pinto, Nerilson Terra Santos, Fábio Lúcio Santos, 2012, The relationship between apparent soil electrical conductivity and soil properties, *Revista Ciência Agronômica*, 43(4)
- Dudal, R., F.O. Nachtergaele, and M.F. Purnell. 2002. The human factor of soil formation, 14-21.
- Evans, I.S., 1972, General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. *Spatial analysis in geomorphology*, 17-90.
- Falkengren-Grerup, U., Brink, D., Brunet, J., 2006. Land use effects on soil N, P, C and pH persist over 40 - 80 years of forest growth on agricultural soils. *Forest Ecology and Management* 225 pp.74 - 81.
- Florinsky, I., Eilers, R.G., Manning, G.R., Fuller, L.G., 2002,

- Prediction of soil properties by digital terrain modelling, *Environmental Modelling & Software*, 17(3), 295-311.
- Gerçek, D., 2010, Object-based Classification of Landforms based on Their Local Geometry and Geomorphometric Context, Ph. D. Thesis Middle East Technical Univerisyt(Turkey)
- Giani, L., Chertov, O., Gebhardt, C., Kalinina, O., Nadporozhskaya, M. and Tolkdorf-Lienemann, E. 2004. Plagganthrepts in northwest Russia? Genesis, properties and classification. *Geoderma*. 121(1 - 2): 113 - 122.
- Gong, Z. T., Zhang, X. P., Luo, G. B., Shan H. and Spaargaren, O. 1997. Extractable phosphorus in soils with a fimic epipedon. *Geoderma*. 75(3 - 4): 289 - 296
- Hancock, G.R., 2005, The use of digital elevation models in the identification and characterization of catchments over different grid scales, *Hydrological Processes*, 19, 1727-1749.
- Hayes, S.M., Root, R.A., Perdrial, N., Maier, R.M., Chorover, J., 2014. Surficial weathering of iron sulfide mine tailings under semi-arid climate. *Geochim. Cosmochim. Acta* 141, 240 - 257.
- Hendershot, W.H., Courchesne, F. and Schemenauer, R.S. 1992. Soil acidification along a topographic gradient on roundtop Mountain, Quebec, Canada. *Water, Air, and Soil Pollution*, 61(3-4): 235-242.
- Hoosbeek, M.R., Bryant, R.B., 1992, Towards the quantitative modeling of pedogenesis - a review, *Geoderma* 55, 183:210
- Huggett, R.J., 1975, Soil landscape systems: a model of soil genesis, *Geoderma* 13, 1:22
- Huggett, R.J., 1976, Conceptual models in pedogenesis-a

- discussion, *Geoderma* 16, 261:262
- Irvin, B. J., Ventura, S. J., and Slater, B. K., 1997, Fuzzy and Isodata Classification of Landform Elements from Digital Terrain Data in Pleasant Valley, Wisconsin, *Geoderma*, 77(2-4), 137-154
- Jenny, H., 1941, Factors of soil formation: a system of quantitative pedology. Courier Corporation.
- Kim, J. S., Sparovek, G., Longo, R. M., De Melo, W. J., Crowley, D. (2007): Bacterial diversity of Terra Preta and pristine forest soil from the Western Amazon. *Soil Biology & Biochemistry* 39: 684 - 690.
- Kirkby, M.J., 1978, Hillslope hydrology (Vol. 2). Wiley-Blackwell.
- Kirkby, M.J., 1985, Hillslope hydrology, In: *Hydrological Forecasting*, Wiley, Chichester, 37-75.
- Miller, B.A., Schaeztl, R. J., 2015, Digital classification of hillslope position, *Soil Science Society of America Journal*, 79(1), 132-145.
- Minar, J. and Evans, I. S., 2008, Elementary Forms for Land Surface Segmentation : the Theoretical Basis of Terrain Analysis and Geomorphological Mapping, *Geomorphology*, 95(3-4), 236-259
- Nega, E., Heluf, G., 2013. Effect of land use changes and soil depth on soil organic matter, total nitrogen and available phosphorus contents of soils in senbat Watershed, Western Ethiopia. *Asian Research Publishing Network Journal of Agricultural and Biological science*, 8(3): 206-212.
- Olson, K. R., Jones, R. L., Gennadiyev, A. N., Chernyanskii, S.,

- Woods, W. I. and Lang, J. M., 2005, Tillage induced erosion on a mound at Cahokia archaeological site. *Soil Survey Horizons Journal* 46: 146 - 160
- Park, S.J., K. McSweeney and B. Lowery. 2001. Prediction of soils using a process based terrain characterisation, *Geoderma*, 103, 249-272.
- Park, S.J., van de Giesen, N., 2004, Delineation of soil-landscape units along hillslopes to identify the spatial domains of hydrological processes, *Journal of Hydrology*, 295, 28-46.
- Park, C.S., S.C. Yang, G.J. Lee, J.T. Lee, H.M. Kim, S.H. Park, D.H. Kim, A. Y. Jung, and S.W. Hwang. 2006. Spatial variability of soil moisture content, soil penetration resistance and crop yield on the leveled upland in the reclaimed highland. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 39(3):123-135.
- Park, M.E. 1987. Spatial variation analysis of soil characteristics and crop growth. Seoul National Univ. pH. D. Thesis. (In Korean)
- Park, M.E. and S.H. Yoo. 1989. Spatial variation analysis of soil characteristics and crop growth across the land-partitioned boundary. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 22(3):163-172.
- Pennock, D.J., Zebarth, B.J., de Jong, E., 1987, Landform classification and soil distribution in hummocky terrain, Saskatchewan, Canada. *Geoderma*, 40(3-4), 297-315.
- Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P. and Planchon, O., 1991, The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models, *Hydrological Processes*, 5, 59-79.

- Ruhe, R.V., 1960, Elements of the soil landscape. Transactions 7th International Congress Soil Science, 4, 165-170.
- Ruhe, R.V., 1975, Climatic geomorphology and fully developed slopes, *Catena*, 2, 309-320.
- Ruhe, R.V., Walker, P.H., 1968, Hillslope models and soil formation I - Open systems, *International Society Soil Science*, 551-560.
- Schmidt, J. and Hewitt, A., 2004, Fuzzy Land Element Classification form DTMs based on Geometry and Terrain Position, *Geoderma*, 121(3-4), 243-256
- Sohn, Y.M., G.Y. Jeon, J.D. Song, J.H. Lee, and M.E. Park. 2009. Effect of spatial salinity variation on the emergence of soiling and forage crops seeded at the newly reclaimed tidal lands in Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 42(3):172-178.
- Sonn, Y.K., M.C. Seo, C.W. Park, B.K. Hyun, and Y.S. Zhang. 2008. The classification and interpretation of Korean soils derived from sedimentary rocks using multidimensional scaling. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 41(6):387-392.
- Sonn, Y.K., Y.S. Zhang, C.W. Park, Y.H. Moon, B.K. Hyun, K.C. Song, and H.C. Chun. 2012. A Comparison of spatial variation on anthropogenic soils. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45(6):897-899
- Scalenghe, R., Ferraris, S., 2009, "The First Forty Years of a Technosol", *Pedosphere*, 19(1), pp 40-52.
- Tugel, A.J., Herrick, J.E., Brown, J.R., Mausbach, M.J., Puckett, W., Hipple, K., 2005. Soil change, soil survey, and natural resources decision making: a blueprint for action. *Soil Sci.*

Soc. Am. J. 69, 738 - 747.

Webster R., Oliver M.A., 1993 How large a sample is needed to estimate the regional variogram adequately?. In: Soares A. (eds) Geostatistics Tróia '92. Quantitative Geology and Geostatistics, vol 5. Springer, Dordrecht.

Yaalon, D.H., 1975, Conceptual models in pedogenesis: can soil forming functions be solved?, Geoderma 14, 189:205

Zhang, G. L. and Gong, Z. T. 2003. Pedogenic evolution of paddy soils in different soil landscapes. Geoderma. 115(1 - 2): 15 - 29.

Abstract

Soil Characteristics on Slope in the Comparison of Natural Soils and Anthrosols : A case of Suwon city, Gyeonggi-do Province.

Lee Seung-jin

Geography

The Graduate School

Seoul National University

A soil type referred as ‘anthrosols’ is defined, in general, to be formed under heavy modification to given pedogenic conditions such as climate, parent material and landscape, mainly due to an addition of human-driven activities that include intensive land uses or land cover changes to natural soils.

Formation of anthrosols proliferates with geographic spread of urbanization, deteriorates soil value and inflates soil reclamation cost. Thus, it is crucial to scrutinize issues related to anthrosols that could potentially be produced in urban areas and

suburb-urban transitional areas for sustainable land use.

This study intended to analyse diversion and spatial distribution of natural soil and anthrosols soil characteristics in certain spatial unit - subwatershed slope. Two separate subwatersheds are selected from study area, each represents natural pedogenesis dominant and anthropogenic pedogenesis dominant, then classified into 6 slope units based on the concept of Catena for detailed comparisons. Results of the study are as follows:

Firstly, research indicates that in study area vicinity of Suwon regions, studied soil characteristics demonstrate distinctive spatial distribution. Soil moist and loss on ignition(LOI) show evident concentration in down slope areas throughout Footslope-Toeslope units. On contrary, distributions of soil pH and electrical conductivity(EC) show fragmented patterns.

Secondly, natural-anthrosols soil comparisons of the slope classifications and transects show statistical significance, explain 19-28% of the variance in soil characteristics between natural soils and anthrosols, except pH and EC. The cause of this low statistical significnace shown in pH and EC requires further extensive study.

Lastly it is estimated that each of spatial unit utilized to compare anthrosols' properties varies in characteristics. subwatershed approach explain 21-23% of soil moist and cation exchange capacity(CEC), while transect approach shows 19-28% of variance of LOI and CEC. The catena approach shows statistical significance in most of properties by 15-26%. In summary, the result shows that the statistical significance of Catena slope classification units for turn out to be higher than

other spatial units.

keywords : Anthrosols, Subwatershed, Soil
landscape analysis, Catena,
Soil Characteristics, Slope Unit

Student Number : 2015-22548

APPENDICES

부록A: 토양특성 상관분석표

		Moist	LOI	pH	EC	CEC
Moist	Pearson 상관	1	.237**	-.128	.217*	.049
	유의확률 (양측)		.009	.164	.017	.598
	N	120	120	120	120	120
LOI	Pearson 상관	.237**	1	-.224*	.111	.341**
	유의확률 (양측)	.009		.014	.226	.000
	N	120	120	120	120	120
pH	Pearson 상관	-.128	-.224*	1	-.353**	-.155
	유의확률 (양측)	.164	.014		.000	.091
	N	120	120	120	120	120
EC	Pearson 상관	.217*	.111	-.353**	1	.005
	유의확률 (양측)	.017	.226	.000		.957
	N	120	120	120	120	120
CEC	Pearson 상관	.049	.341**	-.155	.005	1
	유의확률 (양측)	.598	.000	.091	.957	
	N	120	120	120	120	120

** . 상관관계가 0.01 수준에서 유의합니다(양측).

* . 상관관계가 0.05 수준에서 유의합니다(양측).

부록B: 토양특성표 개괄

Transect	Catena Unit	Soil Moist	LOI	pH	EC	CEC
		%	%		mS/cm	cmol/kg
N1	Summit	30.32	11.58	5.56	127.35	7.90
N1	Shoulder	27.12	12.49	5.01	83.46	8.87
N1	Backslope	25.99	11.63	5.48	76.82	9.04
N1	Footslope	28.92	13.50	5.02	88.12	9.02
N1	Toeslope	30.78	13.41	4.98	158.66	9.35
N1	Channel	32.51	12.21	4.91	231.41	8.45
N1	Summit	30.09	14.48	6.01	142.32	9.35
N1	Shoulder	26.63	14.53	5.97	96.33	9.13
N1	Backslope	25.76	12.40	5.59	43.52	8.09
N1	Footslope	30.95	13.02	5.30	132.45	7.83
N1	Toeslope	27.35	17.78	5.20	162.43	8.50
N1	Channel	27.58	13.26	4.85	173.22	7.69
N1	Summit	29.60	15.22	6.06	96.32	7.77
N1	Shoulder	31.26	15.61	6.03	85.25	6.88
N1	Backslope	28.34	14.65	5.57	88.33	8.20
N1	Footslope	31.66	12.36	5.08	130.21	7.82
N1	Toeslope	31.66	16.13	4.81	154.23	7.29
N1	Channel	29.22	13.90	5.10	221.67	8.60
N1	Summit	29.45	14.26	6.38	94.72	8.38
N1	Shoulder	27.08	13.79	6.23	71.49	8.17

N1	Backslope	31.66	11.56	5.17	97.24	8.12
N1	Footslope	31.78	13.41	4.93	95.41	8.93
N1	Toeslope	31.30	15.94	4.95	110.62	8.54
N1	Channel	25.77	15.58	5.55	116.06	9.54
N1	Summit	30.94	13.81	6.21	84.21	8.38
N1	Shoulder	30.80	14.64	6.26	87.87	8.33
N1	Backslope	27.26	12.64	5.29	60.97	9.14
N1	Footslope	31.57	14.20	5.11	90.51	8.46
N1	Toeslope	29.18	15.40	4.91	97.24	8.49
N1	Channel	25.10	12.01	5.44	95.41	8.77
N2	Summit	30.87	11.71	6.36	58.16	8.49
N2	Shoulder	32.33	13.23	6.34	84.46	8.43
N2	Backslope	26.02	15.93	5.14	83.02	8.24
N2	Footslope	30.28	15.03	5.17	76.14	8.28
N2	Toeslope	27.85	15.01	5.35	122.42	8.87
N2	Channel	27.12	13.97	5.73	103.57	8.76
N2	Summit	24.38	13.15	6.41	71.39	8.91
N2	Shoulder	30.44	13.81	6.63	99.76	8.04
N2	Backslope	24.46	13.56	6.06	63.90	8.41
N2	Footslope	34.84	14.27	5.56	57.32	8.90
N2	Toeslope	35.29	15.00	5.39	98.34	8.40
N2	Channel	31.64	14.78	5.29	131.83	7.41
N2	Summit	24.38	11.15	6.41	58.79	8.28
N2	Shoulder	30.44	11.81	6.63	87.62	8.41

N2	Backslope	24.46	11.56	5.56	78.45	8.09
N2	Footslope	34.84	14.27	5.06	93.48	8.75
N2	Toeslope	35.29	15.00	5.79	104.13	8.61
N2	Channel	31.64	10.78	5.29	125.84	8.70
N2	Summit	24.38	11.15	6.41	50.89	9.65
N2	Shoulder	30.44	12.81	6.63	74.53	8.38
N2	Backslope	24.46	11.27	6.01	89.90	8.90
N2	Footslope	34.84	13.25	5.87	85.30	9.35
N2	Toeslope	35.29	15.00	5.79	131.76	9.13
N2	Channel	31.64	14.78	5.29	125.55	7.50
N2	Summit	24.38	13.15	6.41	55.32	8.81
N2	Shoulder	30.44	13.81	6.63	86.89	8.90
N2	Backslope	24.46	13.56	5.06	75.28	8.46
N2	Footslope	34.84	11.27	5.56	53.73	9.06
N2	Toeslope	35.29	15.00	5.79	130.71	8.83
N2	Channel	31.64	13.52	5.29	113.93	8.66
A1	Summit	29.29	10.19	6.34	92.24	8.78
A1	Shoulder	28.28	13.42	6.56	87.44	7.24
A1	Backslope	31.66	10.41	6.45	81.93	8.11
A1	Footslope	31.94	13.26	5.47	114.07	9.01
A1	Toeslope	28.41	14.21	6.18	100.15	9.24
A1	Channel	28.61	9.57	6.42	121.41	7.63
A1	Summit	24.18	11.65	5.77	73.83	7.31
A1	Shoulder	31.48	11.30	5.25	72.99	8.01

A1	Backslope	27.67	10.96	4.25	86.00	8.23
A1	Footslope	32.00	9.58	5.12	94.14	8.36
A1	Toeslope	26.99	11.80	5.34	113.99	8.15
A1	Channel	26.30	10.59	6.15	132.82	9.54
A1	Summit	27.47	9.74	5.47	75.76	8.47
A1	Shoulder	31.10	12.15	6.78	74.77	7.33
A1	Backslope	30.14	9.13	5.69	87.46	7.08
A1	Footslope	31.50	11.11	6.42	117.63	7.29
A1	Toeslope	28.95	13.67	5.77	113.51	7.89
A1	Channel	26.33	9.95	6.21	120.29	7.44
A1	Summit	30.65	10.28	5.76	95.50	6.97
A1	Shoulder	26.24	11.61	5.32	82.24	6.81
A1	Backslope	24.65	10.01	6.15	86.33	6.96
A1	Footslope	27.14	10.38	5.24	112.06	8.45
A1	Toeslope	24.78	13.58	4.78	100.06	7.91
A1	Channel	29.88	8.70	5.33	131.32	7.70
A1	Summit	24.01	11.96	6.56	94.39	7.93
A1	Shoulder	25.47	12.78	6.39	83.14	7.86
A1	Backslope	25.79	11.24	5.67	84.99	6.86
A1	Footslope	26.05	11.86	5.21	137.42	7.59
A1	Toeslope	31.43	12.68	5.45	139.80	8.32
A1	Channel	28.52	8.38	5.75	112.98	8.19
A2	Summit	30.72	12.10	6.13	78.88	7.41
A2	Shoulder	27.24	10.74	6.44	75.87	8.55

A2	Backslope	30.79	12.88	5.48	99.51	7.67
A2	Footslope	28.98	11.20	5.44	98.81	7.46
A2	Toeslope	26.09	13.29	5.53	124.88	7.86
A2	Channel	25.98	10.47	5.48	100.08	7.54
A2	Summit	29.70	11.13	5.81	72.56	7.20
A2	Shoulder	26.90	13.20	5.95	70.89	8.33
A2	Backslope	25.78	11.15	4.89	95.12	8.00
A2	Footslope	26.62	9.09	5.33	129.05	8.23
A2	Toeslope	30.57	13.24	4.81	123.20	7.98
A2	Channel	25.67	9.79	5.19	107.31	7.69
A2	Summit	30.70	9.79	5.81	83.83	7.20
A2	Shoulder	25.65	9.99	5.82	91.29	8.33
A2	Backslope	25.12	10.44	5.04	95.04	8.00
A2	Footslope	32.18	10.78	5.23	117.05	8.23
A2	Toeslope	24.65	13.05	5.12	91.62	7.98
A2	Channel	27.24	8.27	5.28	115.96	7.69
A2	Summit	29.60	9.95	6.42	84.93	7.20
A2	Shoulder	25.16	9.82	6.12	95.70	8.33
A2	Backslope	26.38	9.69	5.93	89.02	8.00
A2	Footslope	30.46	9.55	5.46	119.93	8.23
A2	Toeslope	28.66	9.42	5.95	106.46	7.98
A2	Channel	27.63	9.28	6.15	113.22	7.69
A2	Summit	29.45	9.15	6.21	74.08	7.20
A2	Shoulder	27.08	9.01	6.26	87.64	8.33

A2	Backslope	26.66	8.88	6.11	89.93	8.00
A2	Footslope	28.78	8.75	5.47	136.37	8.23
A2	Toeslope	27.30	8.61	5.29	102.90	7.98
A2	Channel	25.32	8.48	6.44	104.46	7.69
