



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](#)

도시계획학 석사학위 논문

기후변화에 기인한 유기오염물질의 환경
동태변화에 배출조건과 토지 특성이
끼치는 영향

2014 년 2 월

서울대학교 환경대학원
환경계획학과
이 지 선

기후변화에 기인한 유기오염물질의 환경 동태변화에 배출조건과 토지 특성이 끼치는 영향

지도교수 이 동 수

이 논문을 도시계획학 석사학위 논문으로 제출함
2014년 02월

서울대학교 환경대학원
환경계획학과
이 지 선

이지선의 도시계획학 석사 학위논문을 인준함
2013년 12월

위 원 장 _____(인)

부위원장 _____(인)

위 원 _____(인)

국문 초록

다매체모형인 KPOP-CC에 A1B 기후변화 시나리오를 적용하여 기후변화에 기인한 오염물질의 환경 동태 변화에 끼치는 배출조건과 토양 환경인자의 영향정도를 분석하였다. VOCs 4종, PAHs 5종, PCDDs/DFs 4종을 대상으로 기후변화에 따른 농도변화에 미치는 배출원의 영향을 분석하기 위해 내부배출과 외부배출의 상대적인 비중을 달리하여 모형을 실행하였다. 토양 환경인자의 영향정도를 분석하기 위해, 토양 경사와 길이를 포함하는 토양 환경인자가 확연히 다른 서울과 강원도 정선, 전라남도 구례 지역을 선택하여 결과를 비교하였다.

한 지역 내에서 기후변화로 인한 대기 오염물질의 농도변화 양상은 내부배출원이 있을 때와 내부배출원이 전혀 없이 외부배출원만 있을 때의 조건으로 나뉘었다. 내부배출이 존재한다면, 그 양이 전체 배출량에 비해 낮은 비율일지라도 기후변화로 인한 대기 오염물질의 농도변화 양상이 모두 동일하게 나타났다. 외부배출원일 때 기후변화로 인한 대기 중 오염물질의 농도 감소폭이 컸다. 외부배출된 오염물질은 분석지역으로의 이동과정에서 기후변화로 인해 증가된 대기 중 제거 플렉스를 거치게 되므로 분석지역으로의 유입량이 감소된다. 내부와 외부배출원 모두 분석지역 내에서 기후변화로 인해 증가된 제거기작을 거치게 되는데, 현재 실험조건에서 내부배출원은 기후변화로 인한 대기 중 오염물질 유입량에 변화가 없지만, 외부배출원은 기후변화로 인해 분석지역으로의 대기 중 오염물질 유입 자체가 감소하기 때문에 대기 중 오염물질의 농도 감소폭이 더 크다. 한편, 현재 분석 조건에서는 기후변화로 인한 대기 중 오염물질 농도 변화는 토양 환경인자의 영향 보다는 기상인자의 영향을 받는 것으로 나타났다.

기후변화로 인한 대기 농도 감소폭이 외부배출일 때 가장 크기 때문에, 외부배출일 때 하부 매질로의 플렉스 감소폭이 가장 크거나 증가폭이 가장 작다. 즉, 기후변화로 인한 토양 농도 감소폭이 가장 크거나 농도 증가폭이 가장 작게 나타났다. 또한 비교적 무거운 물질들의 농도 변화는 기상인자보다

토양 환경인자의 영향을 받는 것으로 나타났는데, 특히 PCDDs/DFs는 토지 경사도를 포함하는 토양 환경인자의 차이에 따라 기후변화로 인한 농도 변화의 형태가 크게 달라졌다.

주요어: 기후변화 영향, 오염물질 동태, 배출조건, 토양환경인자, 다매체 모형
학번: 2012-22054

<목차>

I. 서론	1
1. 연구의 배경과 목적	1
2. 연구의 범위와 방법	3
3. KPOP-CC모형	9
II. 기존연구의 고찰	13
1. 기후변화가 POPs의 동태변화에 미치는 영향	13
2. A1B 시나리오에 따른 기상인자 변화	15
III. 결과와 고찰	19
1. 대기	19
1) 농도	19
2) 기후변화에 따른 농도변화	21
2. 토양	32
1) 농도	32
2) 기후변화에 따른 농도변화	35
3. 수체	45
1) 농도	45
2) 기후변화에 따른 농도변화	48
IV. 결론	54
■ 참고문헌	56
<부록1> 분석 대상물질의 물리적 화학적 특성	59
<부록2> 인접지역 기상인자	61
<부록3> 대기 TSP 비율	65
<부록4> NCC 토양 제거속도상수비교	66

<표 차례>

표 1 분석 지역의 토지피복면적과 토양특성 비교	7
표 2 배출조건	7
표 3 통계분석 방법	8
표 4 서울지역 NCC 수체 제거속도상수 [단위: 1/hour]	47

<그림 차례>

그림 1 분석 대상지역	6
그림 2 2000년~2050년 서울 지역 기상인자(NIMR, 2006)	17
그림 3 2000년~2050년 정선 지역 기상인자(NIMR, 2006)	18
그림 4 서울지역, NCC 대기 중 오염물질 농도 [2041~2050년 평균, 단위: mol/m ³]	20
그림 5 서울지역, NCC 이류와 난류확산, 지표로부터의 휘발로 유입되는 대기 중 총 오염물질 [2041~2050년 누적, 단위: mol]	20
그림 6 기후변화로 인한 대기에서의 오염물질 농도 변화 (C_{A1B}/C_{NCC})	22
그림 7 서울지역 기후변화로 인한 대기에서의 오염물질 농도 변화 (C_{A1B}/C_{NCC})	23
그림 8 서울지역 대기 오염물질 총 유입량 중 이류와 난류확산에 의한 유입 비율 [단위 : %]	26
그림 9 서울지역 내부배출, 분석 지역 내에서 일어나는 기후변화로 인한 손실 플럭스 변화량 (A1B-NCC) [2041~2050년 누적, 단위: mol]	26
그림 10 기후변화로 인한 대기 농도 변화 (C_{A1B}/C_{NCC})	29
그림 11 배출원 크기에 따른 기후변화로 인한 서울 지역 대기 농도 변화 (C_{A1B}/C_{NCC})	31
그림 12 서울지역, NCC 나대지 오염물질 농도 [2041~2050년 평균, 단위: mol/m ³]	33
그림 13 서울지역, NCC 나대지 유입 총량, [2041~2050년 누적, 단위: mol/m ²] (왼쪽 축: VOCs, Nap, Phe, 오른쪽 축: Chr, BaP, BghiP, PCDDs/DFs)	33
그림 14 서울지역, NCC, 유입량 대비 손실량 비	34
그림 15 기후변화로 인한 토양에서의 오염물질 농도 변화 (C_{A1B}/C_{NCC})	36
그림 16 서울지역 기후변화로 인한 나대지에서의 오염물질 농도 변화 (C_{A1B}/C_{NCC})	37
그림 17 정선지역 기후변화로 인한 나대지에서의 오염물질 농도 변화 (C_{A1B}/C_{NCC})	38

그림 18 기후변화로 인한 나대지 유입총량 변화 (A1B/NCC)	40
.....	
그림 19 NCC, 토양 총 제거속도 상수 중 각 제거속도상수가 차지하는 비율 [단위: %]	43
.....	
그림 20 NCC 토사유출에 의한 제거속도상수 [단위: 1/hour]	43
.....	
그림 21 기후변화로 인한 토양 플럭스 변화량 (A1B-NCC) [50년 누적, 단위: mol/m ²]	44
.....	
그림 22 기후변화로 인한 나대지농도 변화 (C_{A1B}/C_{NCC})	44
.....	
그림 23 서울지역, NCC 수체 오염물질 농도 [2041~2050년 평균, 단위: mol/m ³]	46
.....	
그림 24 서울지역, NCC 수체 유입 총량 [2041~2050년 누적, 단위: mol] (왼쪽 축: VOCs, Nap, Phe, 오른쪽 축: Chr, BaP, BghiP, PCDDs/DFs)	46
.....	
그림 25 기후변화로 인한 수체에서의 오염물질 농도 변화 (C_{A1B}/C_{NCC})	49
.....	
그림 26 서울지역 기후변화로 인한 수체에서의 오염물질 농도 변화 (C_{A1B}/C_{NCC})	50
.....	
그림 27 정선지역 기후변화로 인한 수체에서의 오염물질 농도 변화 (C_{A1B}/C_{NCC})	51
.....	
그림 28 기후변화로 인한 수체로의 유입 플럭스 변화율 (A1B/NCC)	53

I. 서론

1. 연구의 배경과 목적

기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 4차 보고서에 따르면 전 지구적으로 기후변화가 명백하게 일어나고 있다(IPCC, 2007). 기후변화로 기온이 변함에 따라 화학물질 자체의 특성 값이 변하기도 하고, 수문순환, 기상 현상 등이 변함에 따라 화학물질의 이동과 분포에 변화가 일어난다(Lohmann et al., 2007; Noyes et al., 2009). 결과적으로 환경 중 오염물질의 동태변화는 대기, 토양, 수질 등의 환경 매질에 존재하는 오염물질의 양을 변화시킴으로써 사람과 생태계에 대한 노출변화를 가져올 것이다(Gouin et al., 2013). 따라서 기후변화에 의해 변하는 오염물질의 환경 중 동태에 대한 정량적인 이해와 예측이 필요하다.

기후변화가 환경 중 오염물질 동태에 미치는 영향을 이해하기 위해서는 가설적으로 설정한 조건에서 일어날 수 있는 미래의 변화에 대해 예측할 수 있게 해주는 도구인 수학적 모델이 필요하다(Gouin et al., 2013). 국외의 경우, 전 지구적 혹은 반 지구적인 범위를 대상으로 정상상태의 다매체 모델을 사용하여 기후변화로 유도되는 환경 중 오염물질의 농도와 분포의 변화에 대해 정성적으로 분석한 연구(Lamon et al., 2009; Gouin et al., 2013)와 잔류성유기오염물질(Persistent Organic Pollutants, POPs)의 대기과 지표에서의 동태변화에 대해 연구한 것이 있으며(Ma and Cao, 2010) 기후변화가 북극의 POPs 농도 변화에 미치는 영향에 대해 분석한 것이 있다(Wöhrnschimmel et al., 2013).

한편, 국내에서 다매체 모델을 이용하여 남한지역을 대상으로 기후변화로 인한 화학물질의 동태변화에 대한 연구는 아직 초기 단계이다. Benzo[a]Pyrene을 대상으로 다매체 동태 평가한 연구가 있으며(김선아, 2011), 서울지역을 대상으로 기후변화로 인한 오염물의 동태 변화를 화학물

질의 물성과 기온, 강수량, 풍속을 포함하는 기상인자간의 상관관계를 통해 정량적으로 분석한 연구가 있다(장리아, 2013; Cai et al., 2013). Cai 외 (2013)는 서로 다른 지역에 대해 화학물질의 물성과 기상인자의 상관관계를 분석하는 과정에서 내부배출원의 유무에 따라 기후변화가 오염물질의 환경 매질 내 농도 변화에 미치는 영향이 달라짐을 발견하였다. 따라서 물성과 기상인자의 영향 외에도 내부 혹은 외부배출원의 유무가 기후변화에 따른 오염물질 동태에 미치는 영향을 정량적으로 분석할 필요가 있는 것으로 나타났다.

한편 대기나 토양 등으로 배출된 오염물질의 동태는 토지 특성이나 대기 중 입자상 부유물질 등을 포함하는 환경인자의 영향을 받는다(Breivik et al., 2007; Hassanin et al., 2004). 따라서 기후변화의 영향은 환경 조건이 다른 지역에 따라 다르게 나타날 수 있다. 기존에는 이와 같은 배출조건과 지리적인 환경 특성의 차이가 기후변화에 의한 영향을 어떻게 다르게 만드는 지에 대해 연구된 바가 없다.

따라서 이 연구에서는 토지피복형태와 토지경사도가 서로 다른 지역을 대상으로, 기후변화에 기인한 오염물질의 동태변화에 미치는 배출원의 영향과 환경 인자의 영향을 비교 분석하는 것을 목표로 한다. 배출조건의 영향을 분석하기 위해, 내부배출원과 주변 지역의 배출원의 배출량의 상대적인 비중을 변화시켜가면서 그러한 배출조건의 차이가 환경 중 오염물질의 동태와 오염도 변화에 미치는 영향을 분석하였으며, 또한 토양 환경인자의 영향을 분석하기 위해 토지피복, 토양 성질과 경사도 등을 반영하여 토지의 특성이 뚜렷하게 차이가 나는 두 지역을 대상으로 각 지역에서 배출조건의 차이의 영향이 환경인자들에 따라 어떻게 다르게 나타나는 지를 비교 평가하였다.

2. 연구의 범위와 방법

IPCC 4차 보고서를 위한 SRES A1B 시나리오를 반영하여 생산된 남한 규모의 2000~2050년까지의 기상예측자료(NIMR, 2006)를 사용하였다. A1B 시나리오는 이 연구에서 사용하는 Persistent Organic Pollutants under Climate Change Conditions in Korea모형(KPOP-CC모형) 개발 시 남한 규모에 가장 적합한 시나리오로 여겨졌고 그에 따라 모형에 A1B 시나리오를 적용하였다. 이 연구에서는 A1B 시나리오를 반영하여 생산된 기상예측자료에서 2000년의 자료를 기후변화가 없는 조건(No Climate Change, NCC)로 사용하였다.

대상 화학물질은 기존에 관심을 받아왔던 인체에 유해한 화학물질 중에서 다양한 물성(부록 1 참조)을 포함하여 분석하기 위해 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs), 다환성방향족탄화수소(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs) 다이옥신 또는 퓨란 2,3,4,7-치환 동질체(Polychlorinated dibenzo dioxins/dibenzo furans, PCDDs/DFs)를 선정하였다. VOCs 중에서는 벤젠계열인 BTEX (Benzene, Toluene, *o*-Xylene, Ethylbenzene) 4종, PAHs는 고리의 개수별로 Naphthalene, Phenanthrene, Chrysene, Benzo[a]Pyrene, Benzo[g,h,i]Perylene 5종, PCDDs/DFs 중에서는 TCDD, HpCDD, PeCDF, OCDF 4종을 대상물질로 선정하였다.

분석 지역은 기존 연구(장리아, 2013; Cai 외, 2013)와의 비교를 위해 서울을 포함하는 지역(0503격자)을 선정했다. 기존의 연구에서 토양에서의 오염물질의 동태변화는 입자상 흡착침적과 토사유출에 의한다고 밝혀졌으므로 그러한 기작에 미치는 지리적 환경의 영향을 평가하기 위해 토지피복비율이나 경사도가 대조적인 강원도 정선을 포함하는 지역(0508격자)를 비교지로 선정하였다(표 1, 그림 1 참조). 특히 토양 내 오염물질의 기후변화로 인한 동태와 오염도의 변화가 토지의 특성에 따라 어떻게 달라지는 지 확인하기 위하여 전라남도 구례지역을 포함하는 지역(1305격자)를 추가적으로 선정하

였다. 서울지역은 시멘트 피복의 비율이 높은 데 반해, 정선지역과 구례지역은 대부분 숲으로 피복되어있고, 정선지역과 구례지역의 토지 경사도는 서울지역에 비해 3배정도 크다. 이를 통하여 토지피복의 형태와 토지경사가 다른 지역에서, 기후변화에 따른 오염물질의 동태 변화에 배출조건이 미치는 영향이 지역의 특성에 따라 어떻게 달라질 수 있는지를 분석하였다.

분석 대상 물질들이 주로 대기로 배출되는 특성이 있으므로 배출은 대기로서만 할당하며, 모든 매질에 초기 농도는 할당하지 않았다. 배출시나리오의 외부배출과 내부배출의 비중을 달리하여 할당하였으며 그러한 배출조건 차이가 기후변화로 인한 농도변화에 어떻게 영향을 미치는지 분석하였다. 이를 위해 내부배출의 비중이 100%인 조건(scenario 0_1), 외부배출과 내부배출이 비슷한 비중일 때의 조건(scenario 1_1), 외부배출의 비중이 내부배출의 비중보다 큰 조건(scenario 5_1), 외부배출의 비중이 100%인 조건(scenario 1_0)으로 나누었으며(표 2 참조), 이 조건들은 현실의 내부배출과 외부배출의 비중을 포함한다. 한편, 외부배출일 경우 주풍향인 편서풍을 고려하여 분석지역의 서쪽 격자에 배출을 할당하였다. 대상 오염물질의 배출량 정보가 불확실성을 가지고 있기 때문에 현재 배출량과 비슷한 수준에서 고려된 $1 \times 10^{-3} \text{ mol/h}$ 을 적용하였다(이동수 외, 2012).

모형 실행 기간은 2000에서 2050년이며 모든 매질의 오염물질의 평균 농도가 유사정상상태(quasi-steady state)¹⁾에 도달한 것으로 판단되는 마지막 10년(2041~2050년)까지의 모형 예측 결과를 분석에 사용하였다. 모형을 통해 얻은 3시간 단위의 출력값을 월평균하여 분석에 사용하였다.

한 가지 배출조건 내 기후변화로 인한 농도 변화를 분석하기 위해, 마지막 10년 평균 농도 값의 비(C_{A1B}/C_{NCC})를 사용하였다. 또한 기후변화 전과 후 농도에 대한 통계적 유의성 분석은 각 기상시나리오의 마지막 10년의 월 평균 농도의 값(120개의 값)들에 대해 t-test를 시행하였다(신뢰도 95%수준).

기후변화로 인한 농도변화에 대한 배출조건 간 통계적 유의성 분석은 각

1) 유사정상상태(quasi steady state): 일정한 속도의 배출량조건 하에서 모형을 실행했을 때, 모든 매질에 포함된 오염물의 양이 전년도 대비 1%이내의 변화 범위를 나타내는 시점을 유사정상상태에 도달한 것으로 한다.

배출조건 의 마지막 10년 월별 평균 농도비(C_{A1B}/C_{NCC} , 120개의 값)에 대해 시행하였다. 두 가지 배출조건 사이의 유의성을 분석할 경우에는 분산도 테스트 후 t-test를 하였고, 세 가지 이상 배출조건 사이의 유의성을 분석할 경우에는 anova를 실행하였다(신뢰도 95%수준, 표 3 참조).

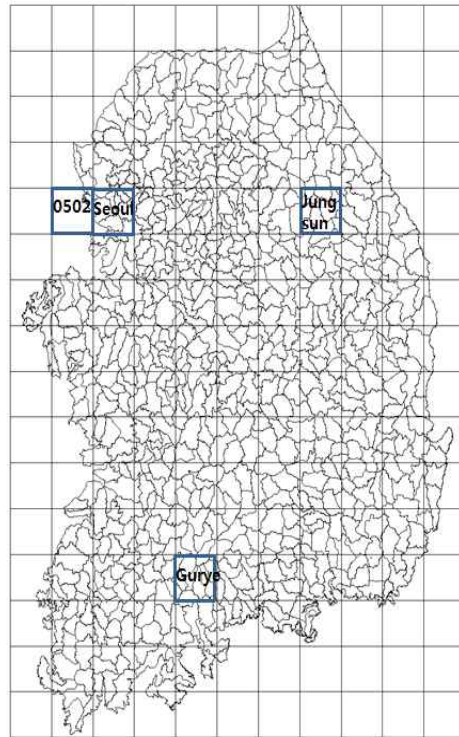


그림 1 분석 대상지역 (Seoul: 서울을 포함하는 분석 대상격자(0503cell), 0502: 서울격자가 분석 대상격자일 경우 외부배출을 적용하는 격자(0502cell), Kangwon: 강원도 정선을 포함하는 분석 대상격자(0508cell), Gurye: 전라남도 구례를 포함하는 분석대상격자(1305cell))

표 1 분석 지역의 토지피복면적과 토지 특성 비교

	서울 지역	정선 지역	구례 지역
토지피복종류 비율			
Urban	30.2 %	0.2 %	6.7 %
Forest	30.9 %	89.9 %	85.2 %
Bare soil	5.8 %	0.7 %	0.5 %
Crop-grass	22.2 %	8.9 %	12.5 %
Water	10.9 %	0.3 %	0.98 %
토지특성			
토지 경사 (degree)	3.77	23.95	24.7
토지 길이 (km)	8.50	17.67	8.85

표 2 배출조건

	emission at 0502	emission at Seoul	$\frac{\text{외부 배출}}{\text{자체 배출}}$	
scenario 0_1	none	$1 \times 10^{-3} \text{ mol/h}$	0	내부배출>>외부배출
scenario 1_1	$1 \times 10^{-3} \text{ mol/h}$	$1 \times 10^{-3} \text{ mol/h}$	1	내부배출 \approx 외부배출
scenario 5_1	$5 \times 10^{-3} \text{ mol/h}$	$1 \times 10^{-3} \text{ mol/h}$	5	내부배출<<외부배출
scenario 1_0	$1 \times 10^{-3} \text{ mol/h}$	none	∞	내부배출<<외부배출

표 3 통계분석 방법

통계분석을 시행하는 배출 시나리오 갯수	비교대상		방법	신뢰수준
1	한 기상 시나리오 하 마지막 10년의 월평균 C_{AIB} 120개	한 기상시나리오 하 마지막 10년의 월평균 C_{NCC} 120개	t-test	95%
2	한 배출시나리오 하 마지막 10년의 월평균 비 C_{AIB}/C_{NCC} , 120개의 값	한 배출시나리오 하 마지막 10년의 월평균 비 C_{AIB}/C_{NCC} , 120개의 값	t-test	95%
3~4	각 배출시나리오 하 마지막 10년의 월평균 비 C_{AIB}/C_{NCC} , 120개의 값		anova	95%

3. KPOP-CC모형

KPOP-CC모형은 3차원 모형으로서 남한 지역을 대상으로 하며, 30km x 30km, 고도는 2000m인 대기 격자 176개와 703개의 하천과 유역으로 지표가 구분되어 연결되어 있다(그림 1 참조). 또한 모형은 기후변화의 조건을 반영하여 기온, 태양단파복사량, 풍속과 풍향, 강수 패턴 등의 기상인자 변화에 따른 화학물질의 농도 변화를 예측할 수 있도록 개발되었다. 개발된 모형의 예측력은 최종적으로 각 매질에서 대상물질의 농도가 실측치와 얼마나 비슷한가에 의해 평가 되었다. 예측력 평가 시 모형의 입력 자료로서 대상물질의 배출량과 배출모드에 대한 정확한 정보가 있어야 하는데, 대상물질의 배출량과 배출모드에 대한 정보는 거의 없기 때문에 매질 간 상대 농도를 비교하여 다매체 모형의 선형성으로 인하여 배출량이 많고 적음의 불확실성에 관계없이 모형의 예측력을 평가 하였다(이동수 외, 2012). 따라서 이 연구를 위한 모형을 사용한 실행 결과를 타당하다고 간주하고 분석에 사용하였다.

KPOP-CC모형의 각 환경 매질에 대한 물질수지 방정식은 아래와 같이 배출조건의 영향을 받는 부분과 기상인자, 환경인자, 물성인자의 함수로 구성되는 부분으로 나뉜다(이동수 외, 2012).

$$\frac{dC_{medium,i}}{dt} = Inflow - k_{Total\ removal, medium,i} \cdot C_{medium,i}$$

----식 (1)

i ; 환경 매질인 대기, 토양, 수체, 저토

C_{medium} ; 각 환경 매질 중 오염물질 농도, [mol/m³]

Inflow ; 각 환경 매질로 유입되는 오염물질, [mol/m³/hour]

$k_{Total\ removal, medium}$; 각 환경 매질 총 제거 속도상수, [hour⁻¹]

식 (1)의 우변에서 배출조건과 기후변화에 영향을 받는 항은 유입(Inflow)

이다. 대기 매질로의 유입에는 배출, 이류와 난류확산에 의한 유입, 재취발이 있다. 토양으로의 유입에는 대기로부터의 입자상 건식, 습식 침적과 가스상 건식, 습식 흡착이 있다. 수체로의 유입에는 이류에 의한 유입, 대기로부터의 입자상 건식, 습식 침적과 가스상 건식, 습식 흡착에 의한 유입, 토양으로부터의 토사유출, 강우유출에 의한 유입, 저토로부터의 재부유되거나 확산되는 기작을 통한 유입이 있다. 대기와 수체는 인접 지역으로부터의 이류에 의한 유입이 있지만, 토양은 인접 지역으로부터 유입되는 기작이 없다.

위 식의 우변의 두 번째 항은 대기 오염물질 제거속도를 나타낸다. 이 항은 유사일차반응 속도상수(pseudo first order rate constant)인 총 제거속도상수와 오염물질의 농도의 함수로 구성된다. 대기 총 제거 속도상수($k_{\text{Total removal,air}}$)는 다음과 같은 개별의 제거 기작속도상수로 구성된다.

$$k_{\text{total removal,air}} = k_{\text{Advective and diffusive outflow}} + k_{\text{photodegradation}} + k_{\text{wet particle deposition}} + k_{\text{wet gas deposition}} + k_{\text{dry particle deposition}} + k_{\text{dry gas deposition}}$$

-----식 (2)

$k_{\text{Advective and diffusive outflow}}$: 이류와 난류확산에 의한 오염물 제거속도 상수, [hour⁻¹]

$k_{\text{photodegradation}}$: 광분해반응에 의한 오염물 제거속도 상수, [hour⁻¹]

$k_{\text{wet particle deposition}}$: 입자상 습식침적에 의한 오염물질 제거속도 상수, [hour⁻¹]

$k_{\text{wet gas deposition}}$: 가스상 습식침적에 의한 오염물질 제거속도 상수, [hour⁻¹]

$k_{\text{dry particle deposition}}$: 입자상 건식침적에 의한 오염물질 제거속도 상수, [hour⁻¹]

$k_{\text{dry gas deposition}}$: 지표로 흡착에 의한 오염물질 제거속도 상수, [hour⁻¹]

토양 총 제거 속도상수($k_{\text{Total removal,soil}}$)는 다음과 같은 개별의 제거 기작속

도상수로 구성된다.

$$k_{Total\ removal,\ soil} = k_{degradation,\ s} + k_{SRO} + k_{WRO} + k_{Leach} + k_{vol,\ s} \quad \text{-----식 (3)}$$

$k_{degradation,\ s}$: 토양 내 분해반응에 의한 오염물질 제거 속도 상수, [hour⁻¹]

k_{WRO} : 강우유출에 의한 오염물질 제거 속도 상수, [hour⁻¹]

k_{SRO} : 토사유출에 의한 오염물질 제거 속도 상수, [hour⁻¹]

k_{Leach} : 침출에 의한 오염물질 제거 속도 상수, [hour⁻¹]

$k_{vol,\ s}$: ; 대기로 휘발에 의한 오염물질 제거 속도 상수, [hour⁻¹]

수체 총 제거 속도상수($k_{Total\ removal,\ water}$)는 다음과 같은 개별의 제거 기작 속도상수로 구성된다.

$$k_{Total\ removal,\ water} = k_{vol,\ w} + k_{degradation,\ w} + k_{diffusion\ to\ sediment} + k_{ss\ deposition} + k_{advection\ out} \quad \text{-----식 (4)}$$

$k_{vol,\ w}$: 대기로 휘발에 의한 오염물질 제거 속도 상수, [hour⁻¹]

$k_{degradation,\ w}$: 수체 내 분해반응에 의한 오염물질 제거 속도 상수, [hour⁻¹]

$k_{diffusion\ to\ sed}$: 저토로의 확산에 의한 오염물질 제거 속도 상수, [hour⁻¹]

$k_{ss\ deposition}$: 부유입자의 침적에 의한 오염물질 제거 속도 상수, [hour⁻¹]

$k_{advection\ out}$: 이류에 의한 오염물질 제거 속도 상수, [hour⁻¹]

각각의 개별 제거 기작은 물성, 기상인자와 지역 환경인자의 함수로 구성되며 이 값들은 배출조건과는 무관하다. 예를 들어 대기 제거 속도 상수 중 입자상 습식침적에 의한 제거는 지역의 강수량과 강수빈도 등의 기상조건을 포함하며, 입자상 비율을 포함하는데 이 값은 지역마다 다른 대기 중 총 부유물질(TSP)과 증기압, 용해도 등의 물성의 함수로 구성된다. 토양 제거 속도 상수 중 토사유출(solid runoff)에 의한 제거는 물성인 토양-토양입자 분

배평형상수 외에도, 토지이용에 따른 토양의 유기물 함량(f_{oc}) 등의 지역 내 환경 인자의 함수로 구성된다. 또한 토사유출 속도²⁾는 토지의 특성(토지피복, 토지 경사도, 토양 성질) 등의 지형적 요소를 반영한다. 각 매질의 총 제거속도 상수인 $k_{Total\ removal,medium}$ 역시 물성, 기상인자 그리고 환경인자의 조합에 의해 이루어진 변수이다. 배출조건과는 무관한 값이므로 동일 지역 내에서는 배출조건이 달라져도 $k_{Total\ removal,medium}$ 값이 달라지지 않는다. 우변 두 번째 항의 C_{medium} 은 배출조건에 따라 달라지는 값이다. 각 매질이 유사 정상상태에 도달하면 좌변 항이 0되며, $k_{Total\ removal,medium} \cdot C_{medium}$ 은 Inflow와 같아지고, 동일한 시나리오 하 동일한 물질에 대한 $k_{removal,medium}$ 는 상수이므로 C_{medium} 은 Inflow에 비례한다. 즉, 배출조건 간 제거속도상수 ($k_{removal,medium}$)는 동일하지만 제거속도($k_{Total\ removal,medium} \cdot C_{medium}$)에는 차이가 생긴다.

2) 토양유출속도를 구하는 식은 rain erosivity, soil erodibility, soil slope and degree, soil cover, soil practice의 항을 포함한다.

II. 기존 연구의 고찰

1. 기후변화가 오염물질의 동태에 미치는 영향

기후변화는 온도의 상승뿐 아니라 강우 강도와 빈도의 변화, 풍속과 풍향의 변화를 수반하는데, 이러한 변화는 환경 중 화학물질의 동태에 영향을 주어 오염물질 분포의 변화를 가져온다(Dalla Valle et al., 2007). 상승된 기온은 직접적으로 오염물질의 증기압과 용해도, 즉 물성에 영향을 줌으로써 오염물질의 동태에 영향을 미친다. 상승된 기온은 오염물질을 가스 상으로 더 분배시키며 이것은 오염물질의 이동성을 증가시킬 것이다(Kallenborn et al., 2012). 또한 기온의 상승은 대기 중 히드록시라디칼(OH·)의 농도를 증가시켜 오염물질의 광분해 속도를 증가시키는 결과를 가져온다(Dalla Valle et al., 2007; Noyes et al., 2009; Macdonald et al., 2005). 온도의 상승은 오염물질의 물성에만 영향을 주는 것이 아니라 환경에도 영향을 주는데, 해빙의 용해는 증발 속도의 증가를 수반할 것이며, 이것은 해양의 염도를 증가시킴으로서 오염물질의 용해도에 영향을 줄 수 있다(Schwarzenbach et al., 2003). 기후변화로 인한 강우 강도와 빈도의 변화는 오염물질의 습식침적의 분포를 변화시킨다(Breivik et al., 2006). 또한 풍향과 풍속의 변화는 대기의 이류와 난류 확산에 크게 영향을 미치므로 대기 중 오염물질의 이동 속도와 방향을 변화시킨다(Boxall et al., 2009).

Gouin 외(2013)는 BETR 모형을 이용하여 HCH (Hexachlorocyclohexane)와 PCB (Polychlorinated Biphenyl)를 대상으로 전 지구적인 범위의 매질 농도의 변화에 대해 분석하였다. 기후변화로 인해 대기 농도는 감소하고 해양에 용존된 오염물질이 변함으로서 북극지역이 기후변화에 민감하다는 것을 밝혔으며 Lamon 외(2009)는 BETR모형 이용하여 PCB를 대상으로 전 지구적인 범위의 A2 기후변화 시나리오에 의한 환경 매질 농도변화를 예측하였다. Wöhrnschimmel 외(2013)는 BETR모형을 이용하여 PCB와 HCH 대상으로 A2 기후변화 시나리오에 의한 북극지역

의 농도변화를 분석하였으며, 온도와 해양 흐름이 기후변화로 인한 농도 변화에 영향을 주는 중요한 변수라고 밝혔다.

장리아(2013)는 KPOP-CC모형을 이용하여 VOCs와 PCDDs/DFs를 대상으로 서울 지역의 매질 간 플럭스 변화량을 정량적으로 분석하고 기상인자와의 상관관계를 물성에 차이에 따라 분석하였다. 배출은 대기를 통해서 서울지역에만 할당하였는데 VOCs에 대해서는 풍속증가에 의한 이류반응 증가와 광분해반응의 증가를 VOCs의 주요 손실기작으로 밝혔고, PCDDs/DFs에 대해서는 강수빈도 변화에 의한 입자상 흡착침적의 변화와 강수량 변화에 의한 토사유출의 변화를 기후변화로 인한 오염물질 분포 변화의 주요 원인으로 밝혔다. Cai 외(2013)는 KoEFT-PBTs 모형을 이용하여 PAHs를 대상으로 서울지역과 강원도 지역의 기후변화로 인한 동태변화를 정량적으로 비교분석하였다. 측정된 자료값을 토대로 토양에 초기 농도를 할당하였고, 대기를 통한 오염물질의 배출을 지역에 따라 달리 할당하였다. 이 연구에서도 기후변화로 인한 오염물질의 동태변화는 온도의 변화보다는 풍속이나 강우 변화에 더 영향을 받는 것으로 나타났다. 즉, 풍속의 변화에 따른 이류의 변화나 강우 형태의 변화로 인한 대기로부터의 흡착침적, 지표유출의 변화를 기후변화로 인해 환경 중 오염물질의 농도를 변화시키는 주된 기작으로 밝혔다. 이 연구에서 배출조건이 달라지면 기후변화로 인한 농도변화에 미치는 영향이 달라질 수 있음이 밝혀졌다.

국외의 경우, 지역적인 범위 내 기후변화로 인한 오염물질의 이동량과 농도 변화를 정량적으로 분석한 연구가 많지 않으며 국내의 경우, 지역적인 범위에서 기후변화로 인한 오염물질의 동태변화에 대한 몇몇 연구가 진행되었지만 다양한 가정과 조건 하의 분석은 아직 많이 이루어지지 않았다. 따라서 이 연구에서는 지역적인 범위를 대상으로 배출조건과의 차이와 지리적 차이에 따른 기후변화로 인한 오염물질의 동태 변화에 대해 모형을 사용하여 정량적으로 분석하였다.

2. A1B 시나리오에 따른 기상인자 변화

기상자료는 기상연구소에서 생산한 SRES Markers A1B 시나리오를 반영하여 생산된 기상예측자료(NIMR, 2006)를 사용하였다. 우리나라 현재 연강수량이 약 1300mm 이상으로 연강수량의 50%가 6월부터 9월에 집중되는 특징을 가지고 있을 때, 이 기상자료는 현재의 강수 패턴 특징과는 다소 차이가 있다. 하지만 제시된 기상조건에 따른 오염물질의 환경 중 동태를 분석하는 것이 목적이므로 주어진 기상인자의 특징을 중심으로 환경 중 동태를 분석하였다. <그림 2>와 <그림 3>은 기상연구소에서 생산한 기상예측자료를 토대로 각각 서울지역과 강원지역의 2000년부터 2050년까지의 연평균 기온, 연평균 풍속, 연평균 강수량, 강수빈도 변화를 나타내었다. 기후변화에 따른 A1B 시나리오를 반영하여 생산된 기상예측자료 중에서 2000년의 기온, 풍속, 강수량을 NCC 기상 값으로 사용하였으므로 각 그림에서 2000년의 기상 값이 NCC 자료이다.

A1B 기후변화 시나리오를 적용 시, 50년 후 서울지역의 연평균 기온은 NCC의 연평균 기온에 비해 약 2.5°C 증가하며 마지막 10년 평균 온도는 NCC에 비해 1.2배 정도 증가한다. 연평균 풍속은 NCC에 비해 약 0.08 m/s 증가하며 마지막 10년 평균 풍속은 NCC에 비해 1.04배 증가한다. 연평균 강수량은 50년 동안 1000mm이상의 변이 폭을 가지며 증감하는데, NCC에 비해 약 250mm/year 증가를 보인다. NCC 대비 마지막 10년 평균 강수량은 1.1배정도 증가한다. 특히 기후변화 시나리오 적용 후 0.25~2mm/hour의 낮은 강수속도의 빈도가 증가한다(그림 2 참조).

강원도 정선지역은 A1B 기후변화 시나리오를 적용 시, 50년 후 서울지역의 연평균 기온은 NCC의 연평균 기온에 비해 약 1.3°C 증가하며 마지막 10년 평균 온도는 NCC에 비해 1.2배 정도 증가한다. 연평균 풍속은 약 0.01m/s 증가로 거의 변화가 없이 일정한 값을 나타낸다. 연평균 강수량은 50년 동안 1000mm이상의 변이 폭을 가지며 증감하는데, NCC에 비해 약 220mm/year 증가를 보인다. NCC 대비 마지막 10년 평균 강수량은 1.2배

정도 증가한다. 특히 기후변화 시나리오 적용 후 0.25~2mm/hour의 낮은 강수속도의 빈도가 증가한다(그림 3 참조).

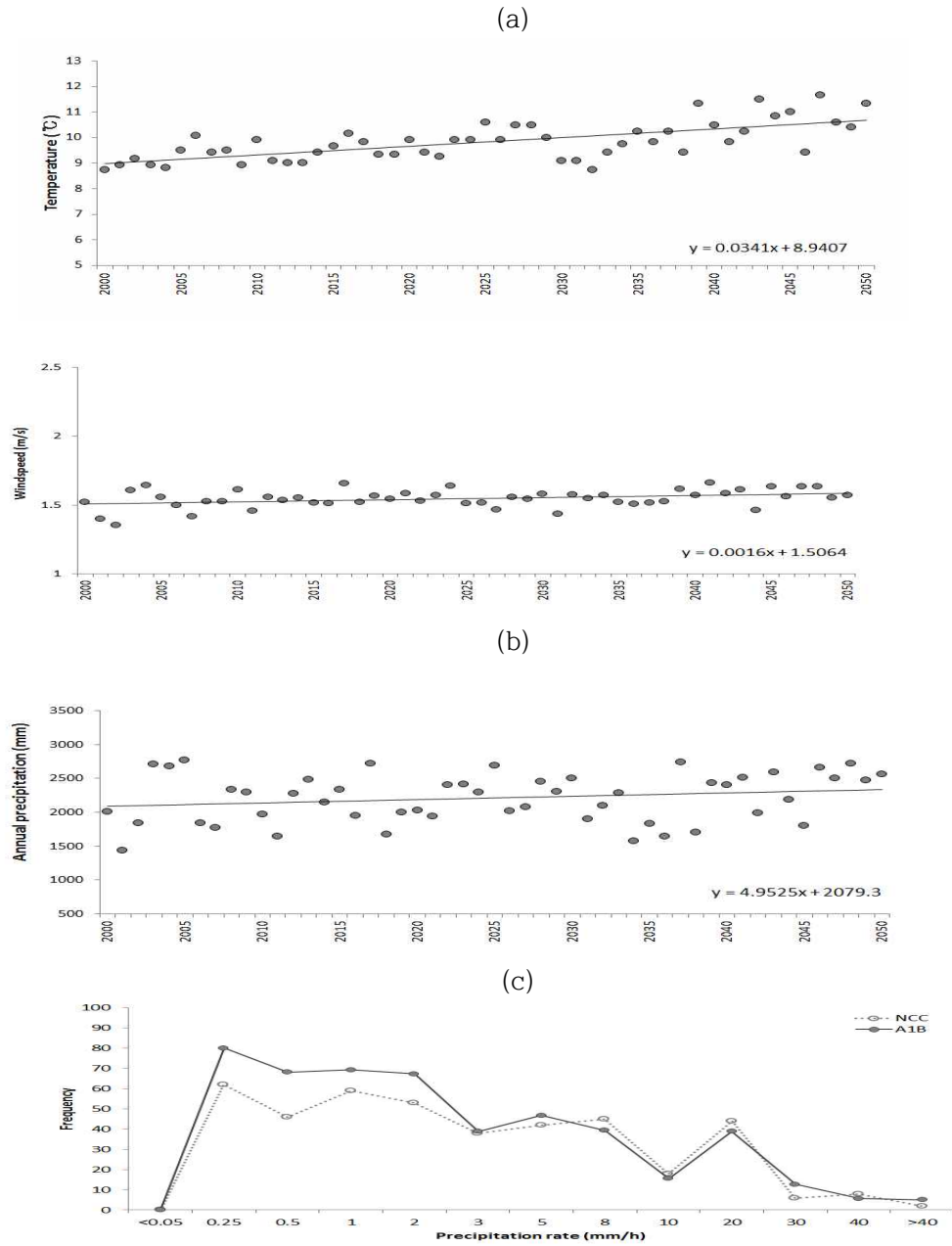
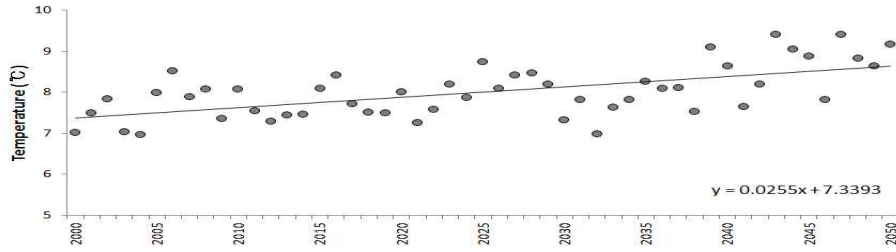
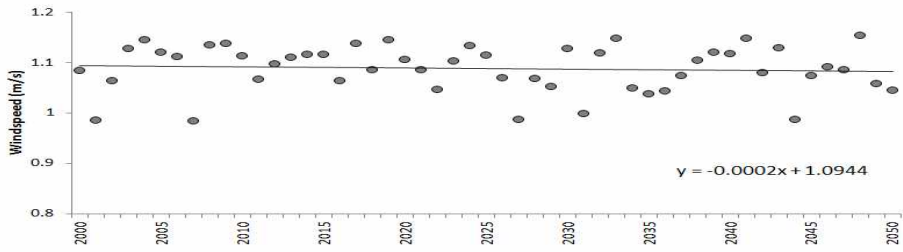


그림 2 2000년~2050년 서울 지역 기상인자(NIMR, 2006) (a) 연평균 기온 [단위: °C] (b) 연평균 풍속 [단위: m/s] (c) 연평균 강수량 [단위: mm/year] (d) 누적 강수빈도

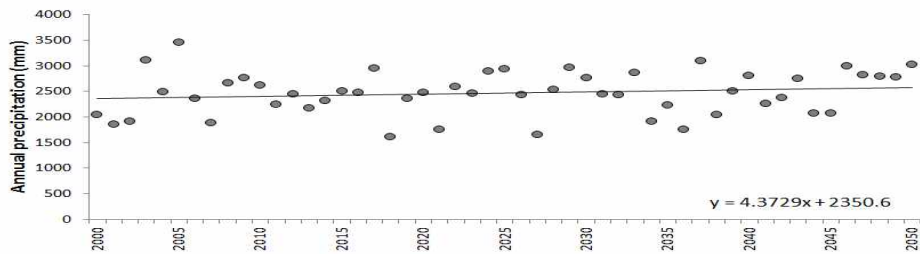
(a)



(b)



(c)



(d)

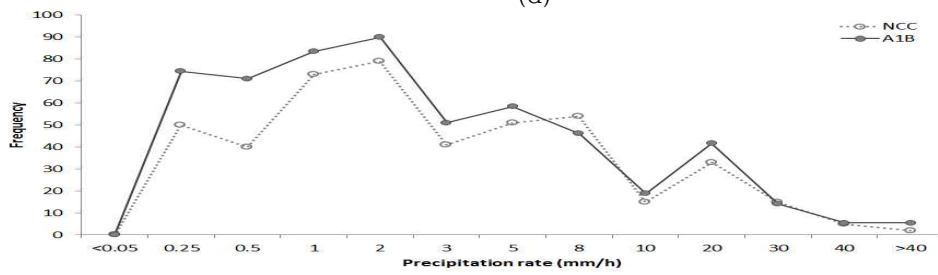


그림 3 2000년~2050년 강원도 정선 지역 기상인자(NIMR, 2006) (a) 연평균 기온 [단위: °C] (b) 연평균 풍속 [단위: m/s] (c) 연평균 강수량 [단위: mm/year] (d) 누적 강수빈도

Ⅲ. 결과와 고찰

1. 대기

1) 농도

서울지역을 대상으로 NCC 조건의 농도에 대해 분석하였다. 분석 기간인 2000년에서 2050년 중에서 유사정상상태에 도달했다고 판단되는 2041년에서 2050년까지 3시간단위로 출력된 농도 값을 기하평균 하였다.

내부배출이 $1 \times 10^{-3} mol/hour$ 있고 인접 지역에서의 배출이 내부배출보다 5배 큰 조건(이하 scenario 5_1)일 때 분석 지역에 유입되는 오염물질의 농도가 가장 높다. 내부배출은 전혀 없고 인접 지역에서만 배출이 있는 조건(이하 scenario 1_0)의 농도가 가장 낮다(그림 4 참조).

<그림 5>는 배출, 이류와 난류확산, 재회발에 의해 분석 지역에 유입되는 오염물질의 양을 나타낸 것이다. 외부배출이 내부배출보다 5배 큰 scenario 5_1일 때는 분석 기간인 51년 동안 총 $10^3 mol$ 단위의 오염물질이 발생되는 반면, 내부배출 없이 외부에서 $1 \times 10^{-3} mol/hour$ 이 배출되는 scenario 1_0은 51년 동안 이류와 난류확산에 의해 총 $10^2 mol$ 단위의 양이 분석 지역으로 유입된다. 그렇기 때문에 두 조건 사이의 대기 농도 차이가 가장 크다. scenario 0_1과 scenario 1_0 모두 시간당 $1 \times 10^{-3} mol/hour$ 의 오염물질이 배출되지만, 분석 기간 동안 배출, 이류와 난류확산, 재회발에 의한 대기 오염물질 총 유입량이 scenario 0_1이 더 높고, 그에 따라 대기 농도 역시 scenario 0_1이 scenario 1_0에 비해 더 높다.

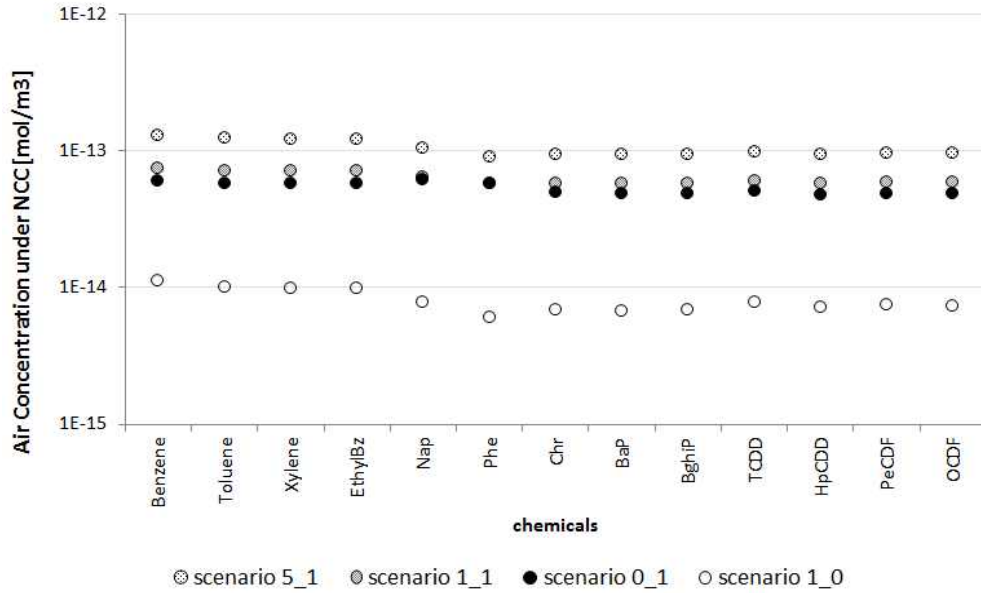


그림 4 서울지역, NCC 대기 중 오염물질 농도 [2041~2050년 평균, 단위: mol/m³]

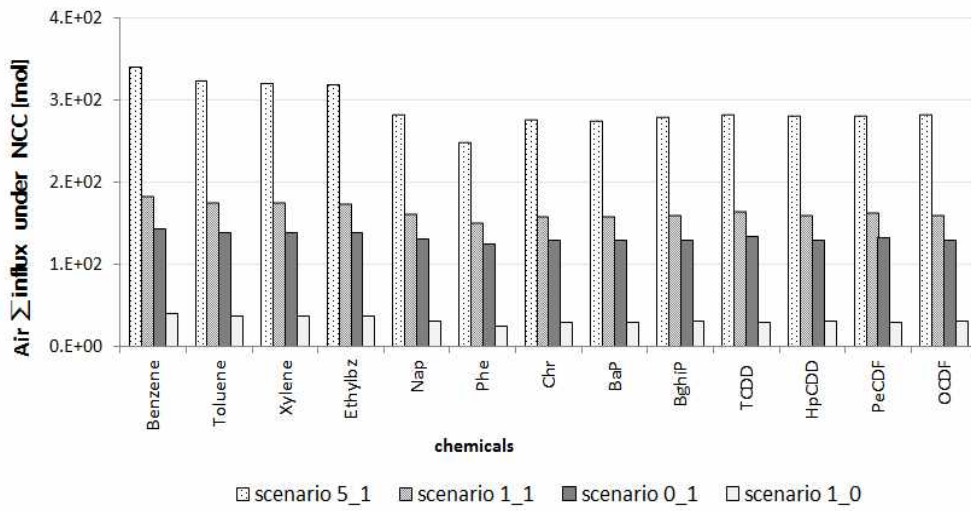


그림 5 서울지역, NCC 배출, 이류와 난류확산, 지표로부터의 휘발로 유입되는 대기 중 총 오염물질 [2041~2050년 누적, 단위: mol]

2) 기상시나리오에 따른 농도 변화

토양 환경인자와 기상인자 중 매질 별 기후변화로 인한 오염물질의 농도 변화에 영향을 주는 인자를 확인하기 위해 서울지역 환경 조건에 정선지역의 기상조건을 적용('서울환경 정선기상')한 모형 설정과 정선지역에 서울기상을 적용('정선환경 서울기상')한 모형 설정을 추가적으로 실행하였다.

대기 매질에서는 토양 환경인자가 달라도 기상인자가 동일하면 기후변화로 인한 농도 변화가 동일하게 나타났다(그림 6 참조). 즉 서울과 정선지역의 대기농도변화의 차이는 기상인자 변화의 차이(그림 2 참조)에 의하며, 대기 오염물질의 동태는 지표 환경보다는 바람, 강수량, 강우빈도를 포함하는 기상인자로 인한 이류, 습식침적, 광분해 기작의 영향을 주로 받는다는 것을 알 수 있다. 이 연구의 목적이 배출조건과 토양 환경인자의 영향을 분석하는데 있고 대기의 농도 변화는 토양 환경인자에는 무관하므로 지리적 차이를 가진 지역 분석은 하지 않고 서울지역의 배출조건을 대표적으로 분석해 보았다.

서울지역의 대기 매질에서는 모든 물질에 대해 모든 배출조건에서 기후변화로 인해 농도가 감소한다. 모든 배출조건에서 기후변화 전과 후 농도에 통계적으로 유의한 차이를 나타내었다(t-test, $p < 0.05$).

서울지역에서는 scenario 0_1, scenario 1_1, scenario 5_1을 포함하는 그룹과 scenario 1_0로 농도변화 양상이 나뉘어 나타났다(같은 그룹에 속하는 배출 조건 사이에는 기후변화로 인한 대기 농도비에 대해 유의한 차이를 나타내지 않는다). 두 그룹 사이에 기후변화로 인한 대기 농도비에 대해서 통계적으로 유의한 차이를 나타내었다(t-test, $p < 0.05$, 그림 7 참조). 현재 실험조건에서는 전체 배출량 대비 낮은 양이라도 자체배출이 있는 경우에는 기후변화로 인한 대기 오염물질의 농도변화 양상이 모두 동일하게 나타났다. 오염물질이 매시간 지속적으로 공급되는 내부배출원이 있으면, 바람에 의한 이류와 난류확산에 의하여 유입되는 외부배출원의 영향이 나타나지 않았다.

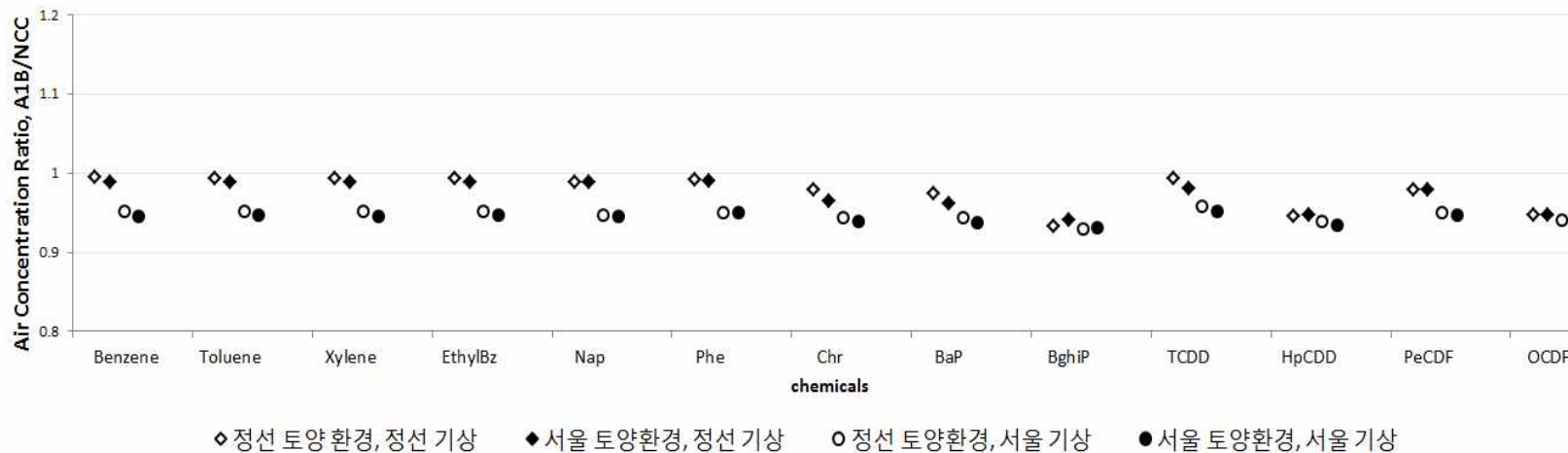


그림 6 기후변화로 인한 대기에서의 오염물질 농도 변화 (C_{A1B}/C_{NCC}) ('정선 토양환경, 정선 기상': 기존 정선지역 분석과 동일한 조건, '서울 토양환경, 정선 기상': 기존 서울지역에 기상인자만 정선지역과 동일하게 적용, '정선 토양환경, 서울 기상': 기존 정선지역에 기상인자만 서울지역과 동일하게 적용, '서울 토양환경, 서울 기상': 기존 서울지역 분석과 동일한 조건, 같은 모양의 표식은 동일한 기상, 같은 색의 표식은 동일한 환경을 갖는 조건)

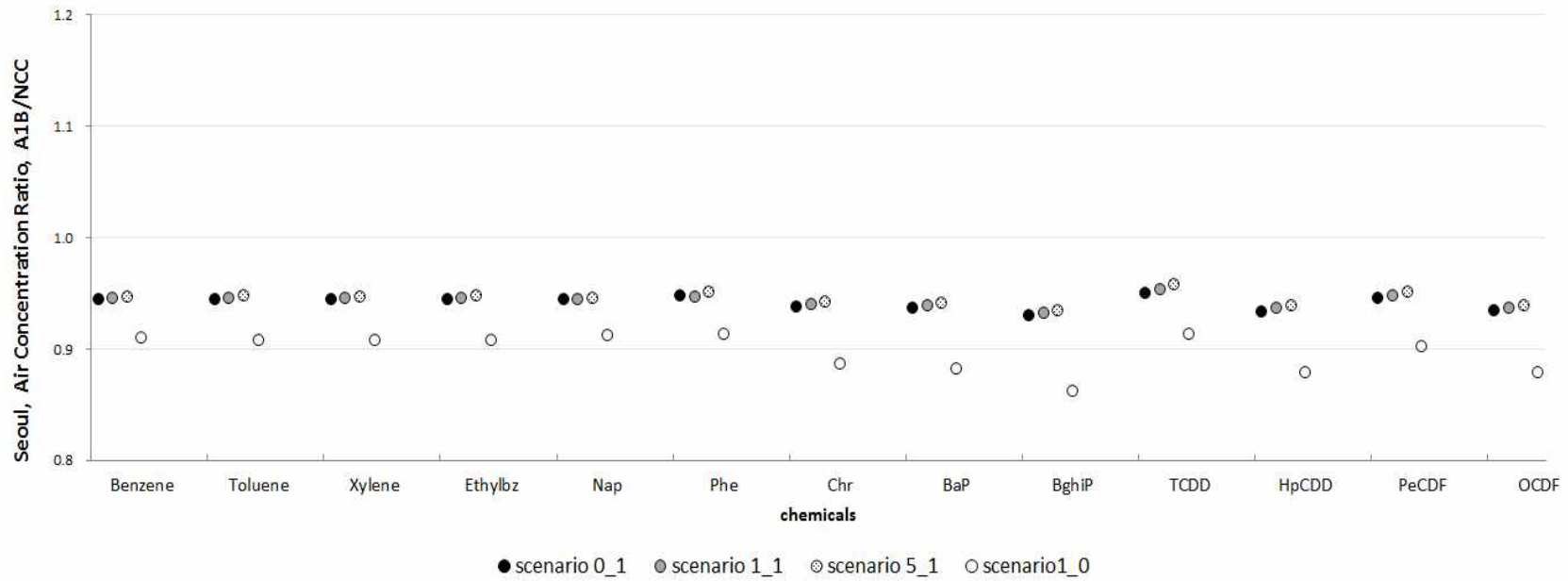


그림 7 서울지역 기후변화로 인한 대기에서의 오염물질 농도 변화 (C_{A1B}/C_{NCC})

scenario 0_1은 내부배출만 있고 scenario 1_0은 외부배출만 있는 조건에 반해 scenario 1_1이나 scenario 5_1은 내부배출과 외부배출이 동시에 있는 조건인데, 이 두 조건의 내부배출 대비 외부배출 비율은 앞의 두 배출조건의 내부배출 대비 외부배출 비율에 포함되므로 scenario 0_1과 scenario 1_0을 중심으로 대기 중 오염물질의 농도변화 양상의 원인을 분석하였다.

<그림 8>은 서울지역에서 내부배출된 오염물질의 기후변화에 의한 하부 매질로 이동(transport to land surface media), 외부지역으로의 유출(advective and eddy diffusive outflow), 광분해반응(photodegradation)의 변화량을 나타낸 것이다. 서울지역에서 VOCs, Nap, Phe을 포함하는 비교적 가벼운 물질들은 광분해반응 양이 증가하였고, Chr, BaP, BghiP, PCDDs/DFs을 포함하는 비교적 무거운 물질들은 하부 매질로 침적되는 양이 증가하였다. 모든 물질이 기후변화로 인해 외부로 유출되는 오염물질의 양은 감소하였다.

외부배출이 100%인 scenario 1_0일 때 기후변화로 인해 분석 지역으로 넘어오는 오염물질의 양의 변화를 분석하였다. 인접지역인 0502지역에서 VOCs, Nap, Phe은 기후변화로 인해 광분해 반응이 증가하였고, 분석 대상 지역으로 넘어가는 오염물질의 양이 감소하였다. Chr, BaP, BghiP, PCDDs/DFs는 기후변화로 인해 강수량과 강수빈도가 증가하면서 입자상 흡착물질 플럭스가 증가하였고 분석 대상지역으로 넘어가는 오염물질의 양이 감소하였다(그림 9 참조).

내부배출만 있는 scenario 0_1의 경우에는 오염물질의 유입량은 기후변화의 영향을 받지 않으며 제거 기작만 기후변화의 영향을 받지만, 외부배출만 있는 scenario 1_0 조건의 경우에는 오염물질들이 배출된 지역에서 이미 기후변화의 영향을 받은 뒤에 분석 지역 내로 유입되며 분석 지역에서도 배출된 지역에서 겪는 것과 동일한 제거 기작을 다시 거치게 된다. 그에 따라 외부배출일 경우 기후변화로 인한 농도 감소폭이 내부배출 조건에 비해 크다. 즉, 외부에서 배출되어 분석 지역으로 유입되는 경우에는, 오염물질이

대기 중 기후변화로 인해 증가된 제거기작을 겪는 시간과 거리가 내부배출된 오염물질이 겪는 것보다 길기 때문에 내부배출보다 기후변화의 영향을 더 받는 것으로 분석되었다.

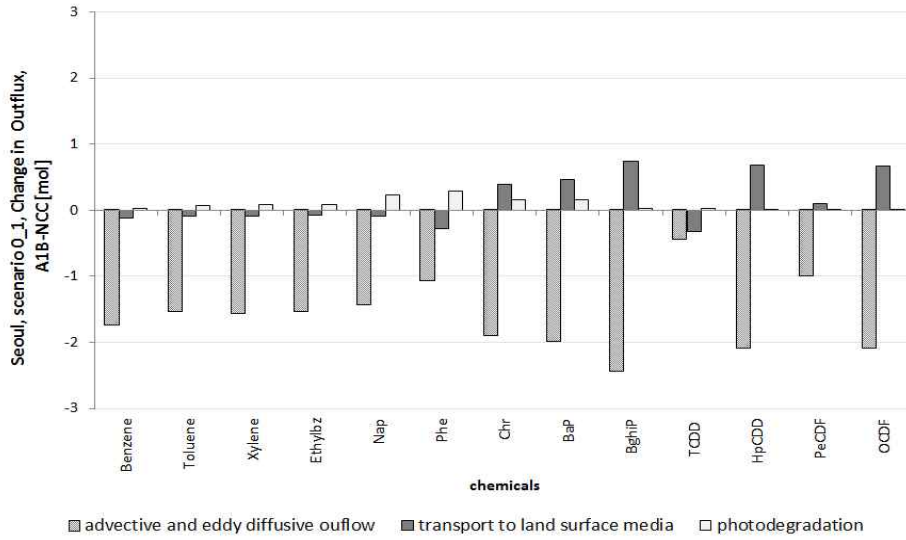


그림 8 서울지역 내부배출, 분석 지역 내에서 일어나는 기후변화로 인한 손실 플럭스 변화량 (A1B-NCC) [2041~2050년 누적, 단위: mol]

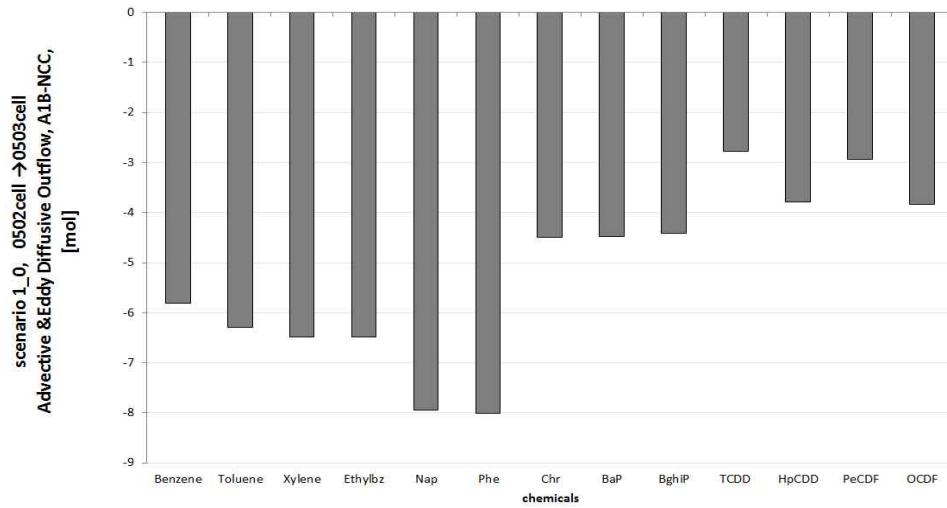


그림 9 0502지역 배출(scenario 1_0) 후 서울 지역으로 유입되는 오염물질 변화량 (A1B-NCC), [2041~2050년 누적, 단위: mol]

배출원으로부터 분석 지역으로 이동해오는 시간과 거리가 길어질수록 분석 대상지의 기후변화로 인한 농도 변화폭이 커지는 것을 확인하기 위하여 추가적으로 모형을 실행 하였다. KPOP-CC모형에 적용되는 공간적 범위 중, 분석 지역으로부터 현재 외부배출을 시키는 지역인 0502(그림 1에서 위에서 부터 5번째, 왼쪽에서 2번째 격자)격자보다 풍상거리로 먼 격자는 0501이지만, 이 격자는 바다만 포함하는 지역이다. 바다에서의 오염물질의 거동은 육지와 큰 차이를 나타낼 수 있으므로 정선지역에서 분석을 진행하였다.

분석 지역인 정선을 포함하여, 풍상방향의 격자들인 0507, 0506, 0505에서 1mol/hour 의 오염물질을 각각 배출시킨 후, 정선지역에서 관찰되는 기후변화로 인한 대기 중 오염물질의 농도 변화를 분석하였다.

정선지역은 기후변화로 인한 풍속의 변화가 약하기 때문에(부록 2 참조) 이류에 의한 제거속도상수가 큰 VOCs, Nap, Phe를 포함하는 비교적 가벼운 물질들은 기후변화로 인한 농도 변화가 뚜렷하게 나타나지 않는다. 따라서 분석의 목적을 위해서 Chr 이후의 고분자 물질만 분석하였다.

<그림 10>은 Chr이후의 물질을 대상으로 내부배출, 인접 지역에서 배출된 조건, 가장 멀리서 배출된 왼쪽 3번째 격자 배출 조건 하에서 정선지역에서의 기후변화로 인한 대기 중 오염물질의 농도 변화를 나타낸 것이다. 분석 물질 중 TCDD를 제외한 나머지 물질들은 배출원을 포함하는 지역으로부터 분석 지역이 멀수록 기후변화로 인한 대기 중 오염물질의 농도 감소폭이 커졌다. TCDD는 기후변화로 인한 농도비에 대해 네 가지 배출조건 간 유의한 차이를 보이지 않았다. TCDD는 입자상 비율이 낮아서(부록 4 참조) 입자상 습식침적으로 제거되는 양이 작고 이류와 난류확산으로 제거되는 양이 비교적 높은 편인데 정선을 포함한 인근 지역들은 기후변화로 인한 풍속의 변화가 작기 때문에(부록 2 참조) 기후변화 전과 후 대기 오염물질의 농도에 유의한 차이를 보이지 않고, 외부에서 유입되는 조건일 때도 기후변화 전과 후 농도에 유의한 차이를 보이지 않는다.

앞서 분석된 것처럼 현재 모형 실행 조건에서는 기후변화로 인해 각 지역에서 제거 기작이 증가하게 되므로 배출된 오염물질의 대기 중 이동거리가

길어질수록 제거 기작의 영향을 받는 시간이 길어지면서, 분석 지역 내 기후 변화로 인한 대기 중 오염물질 농도 감소폭이 커진다는 것을 확인하였다.

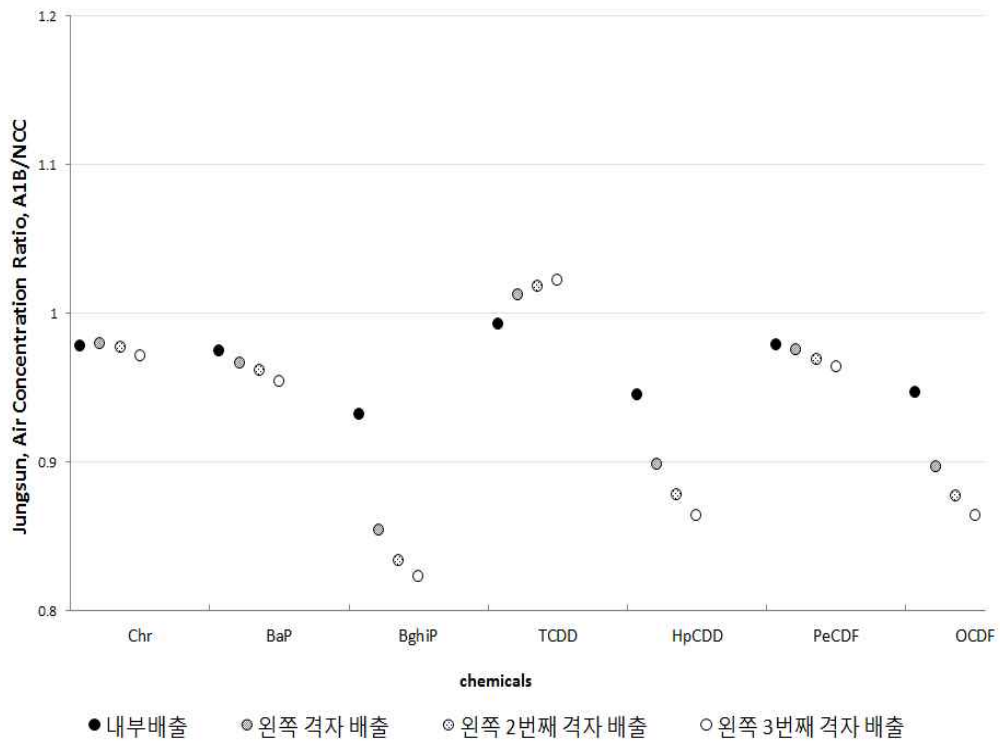


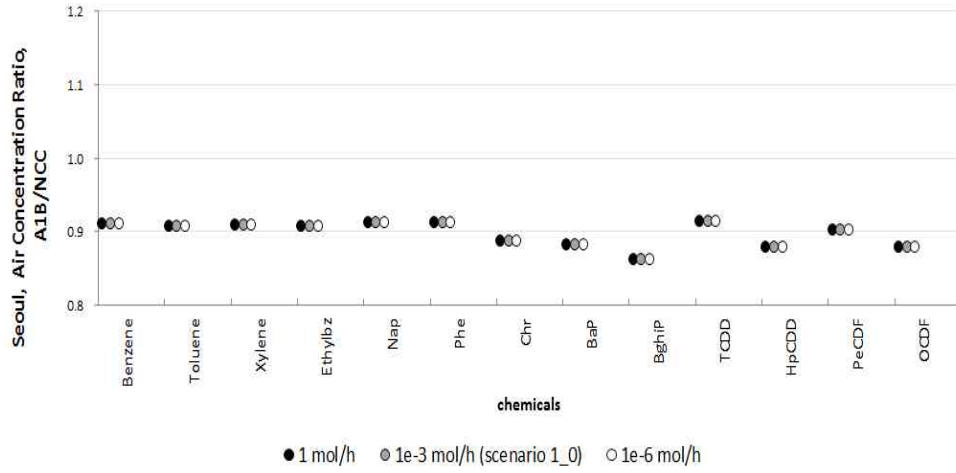
그림 10 기후변화로 인한 대기 농도 변화 (C_{A1B}/C_{NCC})

한편, 분석 지역 내 농도 변화에 외부배출원의 크기가 미치는 영향을 판단하기 위해 외부배출원의 크기를 현재의 $\frac{1}{1000}$, 1000배로 축소·증가시켜 추가적으로 모형을 실행 하였다. 현재와 같이 분석 인접지역에 $1 \times 10^{-3} mol/hour$ 을 배출시킬 때(scenario 1_0)와, $1 \times 10^{-6} mol/hour$ 을 배출시킬 때, 그리고 $1 mol/hour$ 배출시킬 때 모두 분석 지역에 유입되는 오염물질 중에서 이류와 난류에 의한 유입량이 차지하는 비율이 100%로 나타났고, 이때 기후변화로 인한 농도 감소폭이 모두 동일하였다. 따라서 외부배출원의 크기는 분석 지역 내 농도 변화에 무관하고, 분석 지역의 대기 중 오염물질 유입 중 외부배출이 차지하는 비중만 농도감소폭에 영향을 주는 것이 확인되었다(그림 11-(a) 참조).

또한 분석 지역의 농도 변화에 내부배출원의 크기가 미치는 영향을 판단하기 위해 내부배출원의 크기를 현재의 1000배로 증가시켜 추가적으로 모형을 실행 하였다. 현재와 같이 분석 지역에 $1 \times 10^{-3} mol/hour$ 을 배출시킬 때와 $1 mol/hour$ 배출시킬 때의 기후변화로 인한 농도 감소폭이 동일하였다(그림 11-(b) 참조).

즉, 배출량의 절대적인 크기는 기후변화로 인한 농도 변화정도에 영향을 주지 않고, 한 지역에 나타나는 내부배출원과 외부배출원의 상대적인 비중에 의해서 기후변화로 인한 농도 변화폭이 달라지는 것으로 분석되었다.

(a)



(b)

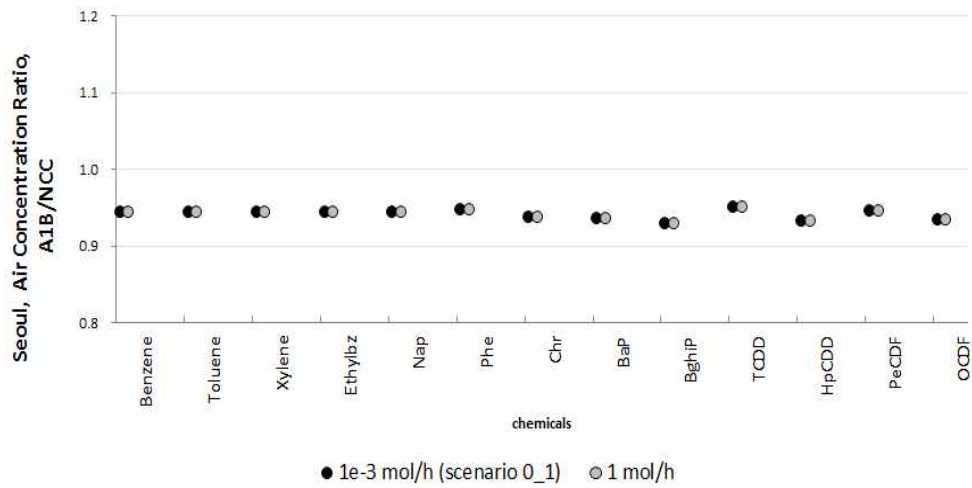


그림 11 배출원 크기에 따른 기후변화로 인한 서울 지역 대기 농도 변화 (C_{A1B}/C_{NCC}) (a) 외배배출원 크기 영향 (b) 내부배출원 크기 영향

2. 토양

1) 농도

서울지역에 대해 NCC 조건의 토양 농도에 대해 분석하였다. 모형 실행 조건에 토양의 배출원이 없기 때문에 대기와 식생으로부터 토양으로 유입되는 오염물질의 양이 농도 변화에 중요한 영향을 미친다. 대기 중 총 오염물질 유입량이 scenario 5_1이 가장 크기 때문에 대기 농도와 토양으로의 유입량이 가장 높고, 토양 농도가 scenario 5_1에서 가장 높게 나타난다(그림 12, 그림 13 참조).

Chr, BaP, BghiP, PCDD/DFs를 포함하는 고분자 물질은 대기로부터의 침적량이 많고 토양 내 분해가 잘 일어나지 않아 정상상태에 도달하는 과정에서 축적되며 토양에서의 농도가 높다. 반면 VOCs나 Nap, Phe은 대기에서 광분해와 이류에 의한 손실량이 많고 토양으로의 유입량이 작으며 토양에서의 손실량은 크기 때문에 축적되지 않고 농도가 낮게 나타난다(그림 14 참조).

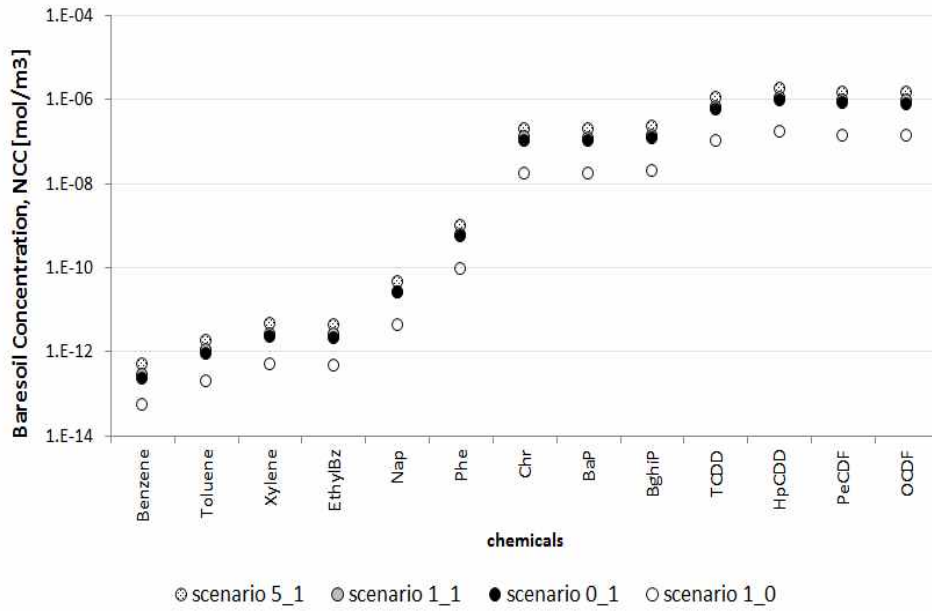


그림 12 서울지역, NCC 나대지 오염물질 농도 [2041~2050년 평균, 단위: mol/m³]

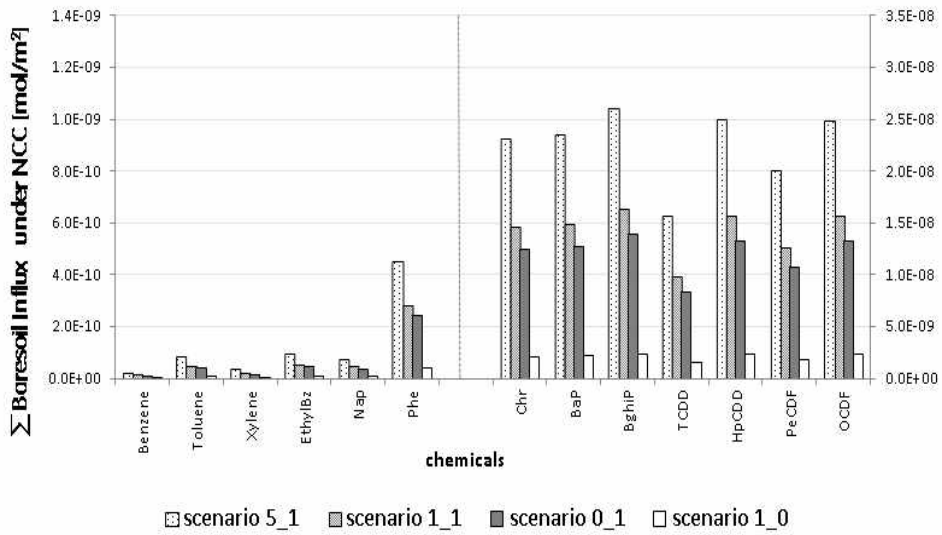


그림 13 서울지역, NCC 나대지 유입 총량, [2041~2050년 누적, 단위: mol/m²] (왼쪽 축: VOCs, Nap, Phe, 오른쪽 축: Chr, BaP, BghiP, PCDDs/DFs)

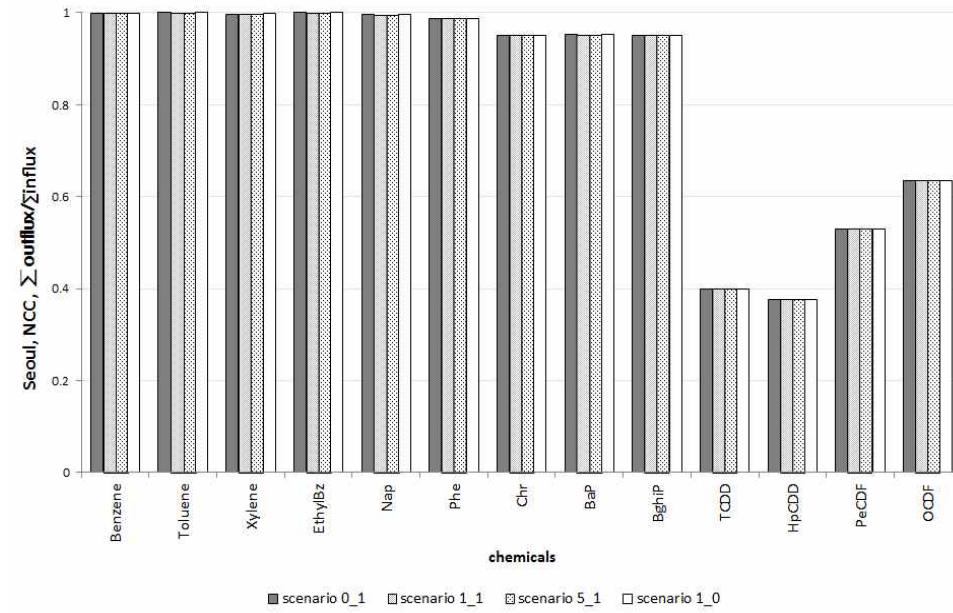


그림 14 서울지역, NCC, 유입량 대비 손실량 비

2) 기후변화에 따른 농도 변화

VOCs, Nap, Phe을 포함하는 비교적 가벼운 물질은 토양 환경인자가 달라도 기상인자가 동일하면 기후변화로 인한 농도 변화가 동일하게 나타났다(그림 15 참조). Chr, BaP, BghiP, PCDDs/DFs은 주로 토양 환경인자에 따라 기후변화로 인한 농도 변화의 패턴이 크게 나뉘었다.

서울과 정선 두 지역에서, VOCs는 기후변화로 인한 농도 변화에 대해 배출조건 간 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않았으나(anova, $p > 0.05$) PAHs, PCDDs/DFs는 기후변화로 인한 농도 변화에 대해 배출조건 간 통계적으로 유의한 차이를 나타내었다(anova, $p < 0.05$, 그림 16, 그림 17 참조).

서울지역과 정선지역 내 토양에서의 오염물질 농도 변화는 오염물질의 유입과 제거속도에 의해 결정되는데 기후변화에 의한 제거 속도 상수의 변화는 배출조건과 무관하다. VOCs의 경우 분해와 재휘발에 의한 제거 속도 상수가 크기 때문에 총 토양 제거속도상수가 PAHs, PCDDs/DFs에 비해 10~100배 크다(부록 5 참조). 따라서 기후변화로 인한 유입량 변화에 대해서는 배출조건 간 차이가 있더라도, 기후변화 전과 후 모두 제거속도상수가 크고 제거율이 약 99%인 VOCs는 유사정상상태에 이르는 과정에서 유입된 대부분의 오염물질이 손실되고 농도가 축적되지 않으며 기후변화에 따른 농도 변화에 배출조건 간 통계적으로 유의한 차이가 없다. 반면 PAHs, PCDDs/DFs의 경우 제거율이 낮고, 기후변화로 인한 대기로부터의 유입량의 변화에 배출조건 간 차이를 보이면서 토양 내 축적되므로 기후변화로 인한 농도 변화에 대해 배출조건 간 통계적으로 유의한 차이를 나타낸다.

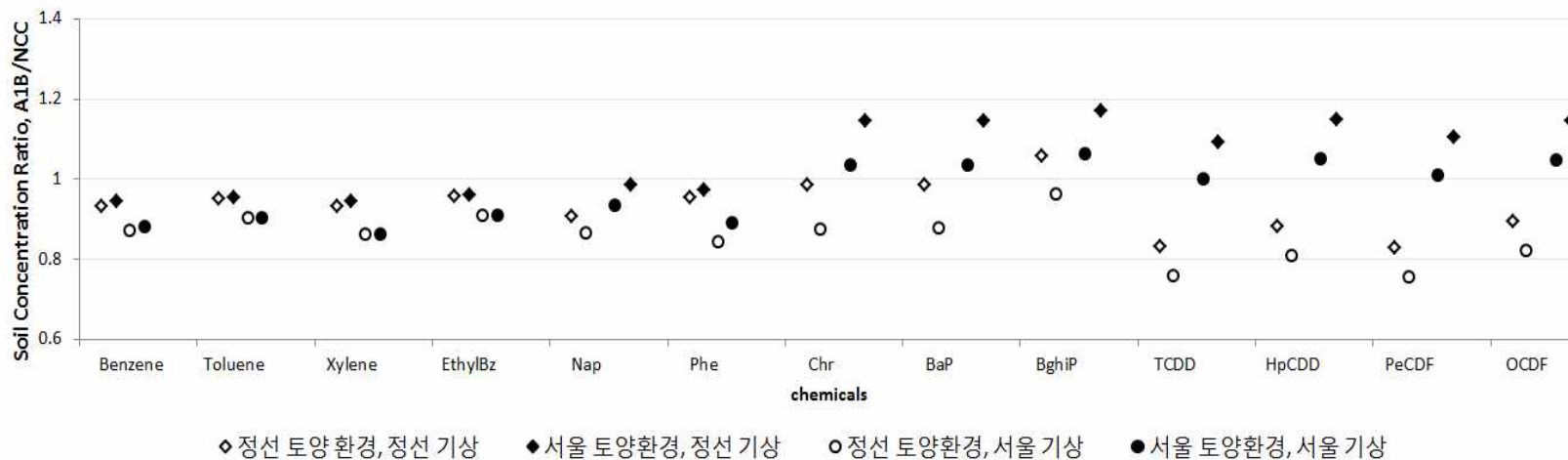


그림 15 기후변화로 인한 토양에서의 오염물질 농도 변화 (C_{A1B}/C_{NCC}) ('정선 토양환경, 정선 기상': 기존 정선지역 분석과 동일한 조건, '서울 토양환경, 정선 기상': 기존 서울지역에 기상인자만 정선지역과 동일하게 적용, '정선 토양환경, 서울 기상': 기존 정선지역에 기상인자만 서울지역과 동일하게 적용, '서울 토양환경, 서울 기상': 기존 서울지역 분석과 동일한 조건, 같은 모양의 표식은 동일한 기상, 같은 색의 표식은 동일한 환경을 갖는 조건)

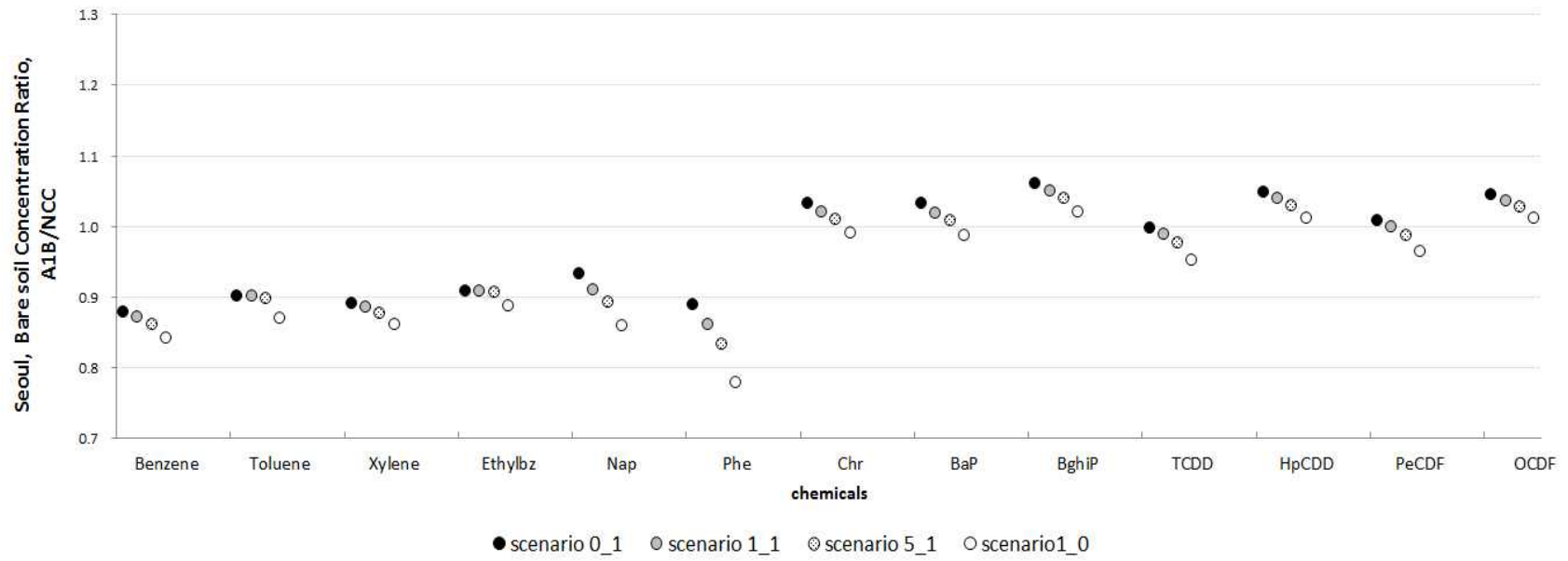


그림 16 서울지역 기후변화로 인한 나대지에서의 오염물질 농도 변화 (C_{A1B}/C_{NCC})

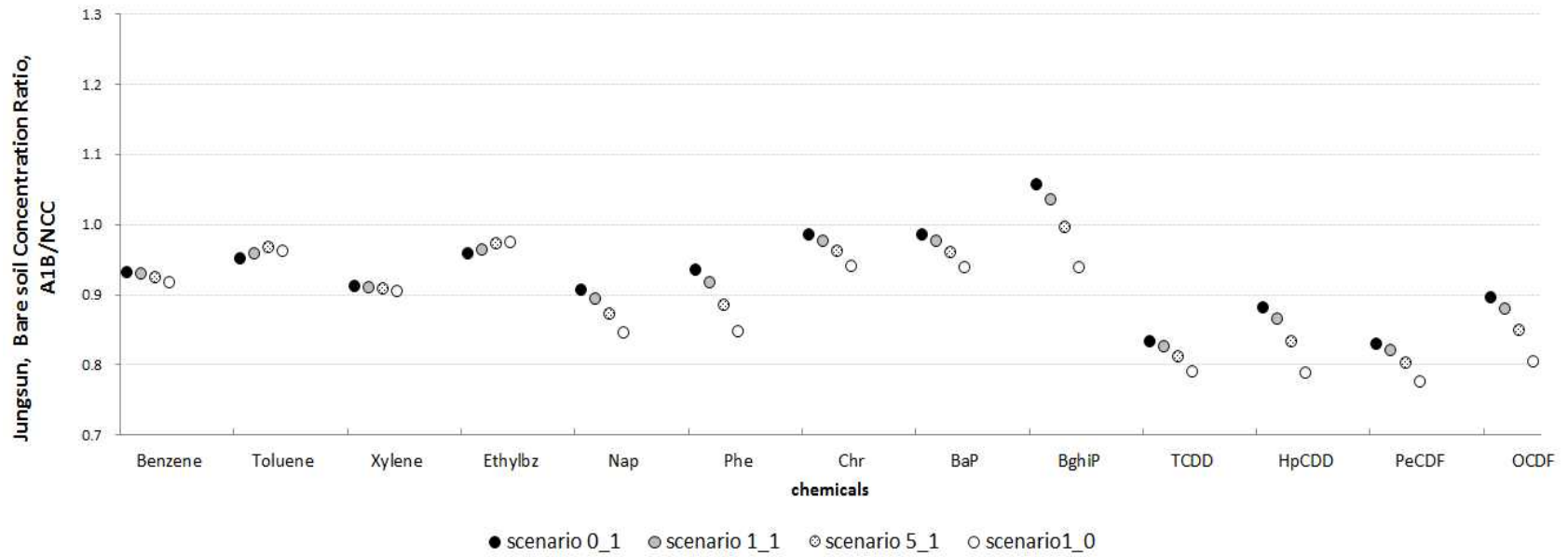


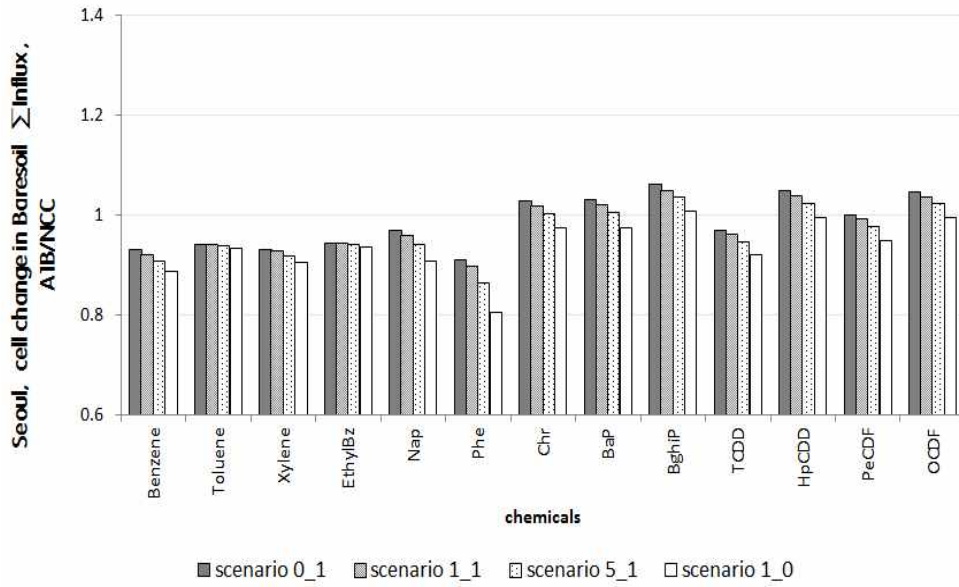
그림 17 정선지역 기후변화로 인한 나대지에서의 오염물질 농도 변화 (C_{A1B}/C_{NCC})

한편 한 지역 내 기후변화로 인한 토양 농도 변화의 배출조건 간 차이는 오염물질 유입량 변화에 대한 배출조건 간 차이에 의해서 발생되며, 이것은 대기 오염물질 유입량 변화의 배출조건에 따른 차이에 의해 발생된다. 대기 매질 분석에서 밝혔듯이, 외부배출원의 영향이 클수록 기후변화로 인한 대기 중 오염물질 유입량의 감소가 크게 나타나며 하부 매질로의 플럭스 감소가 크거나 증가가 작게 나타난다.

기후변화로 인해 VOCs와 Nap, Phe는 대기 중 광분해반응이 증가함에 따라 하부 매질로의 유입량이 감소하는데, 외부배출원이 100%인 scenario 1_0의 기후변화로 인한 유입량 감소폭이 다른 배출조건의 감소폭에 비해 가장 크고 기후변화로 인한 농도 감소폭이 가장 크다. 비교적 가벼운 물질의 경우, 서울과 정선 두 지역에서 모두 기후변화로 인해 대기로부터의 유입량이 감소하기 때문에 손실프로세스의 변화량 차이는 농도변화에 큰 영향을 미치지 못한다.

반면 Chr, BaP, BghiP, PCDDs/DFs의 고분자 물질이 토양으로 유입되는 주된 기작은 대기로부터의 입자상 흡착침적이며 기후변화로 인해 강수빈도가 증가함으로써 입자상 흡착침적의 플럭스가 증가하는데, 외부배출 100%인 scenario 1_0의 기후변화로 인한 증가폭이 다른 배출조건에 비해 가장 작다(그림 18 참조). 비교적 무거운 물질의 경우, 서울과 정선 두 지역에서 모두 기후변화로 인해 대기로부터의 유입량이 증가하였는데, 손실프로세스의 변화량에 따라서 두 지역에서 농도변화 양상이 다르게 나타났다.

(a)



(b)

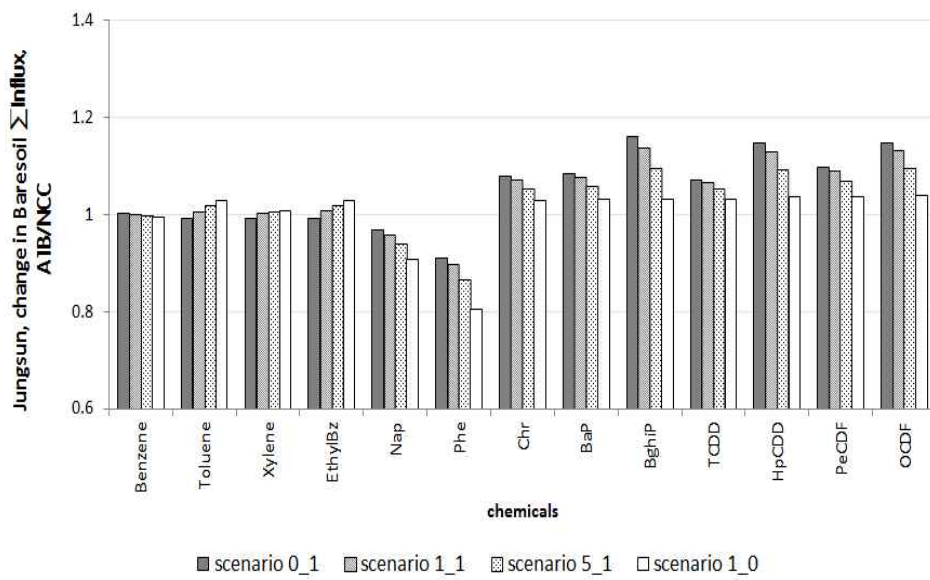


그림 18 기후변화로 인한 나대지 유입총량 변화 (A1B/NCC) (a) 서울지역 (b) 정선지역

기후변화로 인한 오염물질의 토양 농도 변화에 미치는 토양 환경인자의 영향에 대해 분석하였다. PCDDs/DFs는 두 지역에서 뚜렷한 토양 농도 변화 양상에 차이를 보였다. 앞서 서술했듯이 토양 농도 변화는 유입과 제거속도에 의해 결정되는데, 대기 중 입자상 비율이 높은 PCDDs/DFs의 환경 중 동태는 습식침적과 토사유출에 의해 가장 크게 영향을 받으므로 703개의 유역들 중에서 강수인자와 토지 경사와 길이가 서울지역과 확연히 다른 구례지역에 대해서 기존의 정선지역과 함께 비교분석하였다(각 지역의 토지 특성과 기상인자에 대해서는 표1, 그림 2, 그림3, 부록 2 참조).

구례지역과 정선지역의 경우 토양 총 제거속도상수 중 토사유출에 의한 제거속도상수가 차지하는 비율이 약 80%인데 서울지역에서는 그 비율이 30%정도이며, 토사유출에 의한 제거속도상수 값이 구례지역은 서울지역의 약 3배, 정선지역은 서울지역의 약 10배 크다(그림 19, 그림 20 참조).

PCDDs/DFs의 경우 입자상 습식침적이 토양으로의 주된 유입 기작이고, 이것은 강수량보다 강수빈도에 더 영향을 받는 것으로 연구되었다(장리아, 2013). 구례지역에서는 2000년 대비 마지막 10년의 강수빈도가 1.3배 증가하였고 정선지역에서는 1.2배, 서울지역에서는 1.1배 증가하였으며 세 지역에서 모두 토양으로의 유입 플렉스가 증가하였는데, 정선지역과 구례지역의 경우 유입 플렉스의 증가량보다 손실 플렉스의 증가량이 더 크게 나타났다(그림 21 참조). 정선지역은 세 지역 중 유입 플렉스의 증가량과 손실 플렉스의 증가량의 차이가 가장 크게 나타났다.

기후변화로 인해 서울지역의 농도는 증가하였지만 구례지역과 정선지역의 PCDDs/DFs의 토양 농도가 감소하였다(그림 22 참조). PCDDs/Fs의 기후변화로 인한 토양 농도 변화는 제거 플렉스의 변화량과 유입 플렉스의 변화량의 상대적인 크기 차이에 의해 형성되는 것으로 분석되었다. 서로 다른 지역에서는 토양 환경인자나 강우를 포함한 기상인자가 달라짐에 따라서 유입 플렉스 변화량과 손실 플렉스 변화량의 상대적인 크기 차이가 달라지며, 기후변화로 인한 토양 농도 변화의 양상이 달라지지만, 공통적으로 입자상 습식침적이 주된 유입 기작이고 토사유출이 주된 제거 기작임이 밝혀졌다. 유

입 플럭스의 변화량과 손실 플럭스의 변화량의 상대적 크기가 중요한 비교적 무거운 물질의 경우, 기후변화로 인한 농도 변화에 기상인자에 따른 습식 침적 플럭스의 차이보다 토양 환경인자에 따른 토사유출 플럭스의 차이가 더 큰 영향을 끼치는 것으로 분석된다.

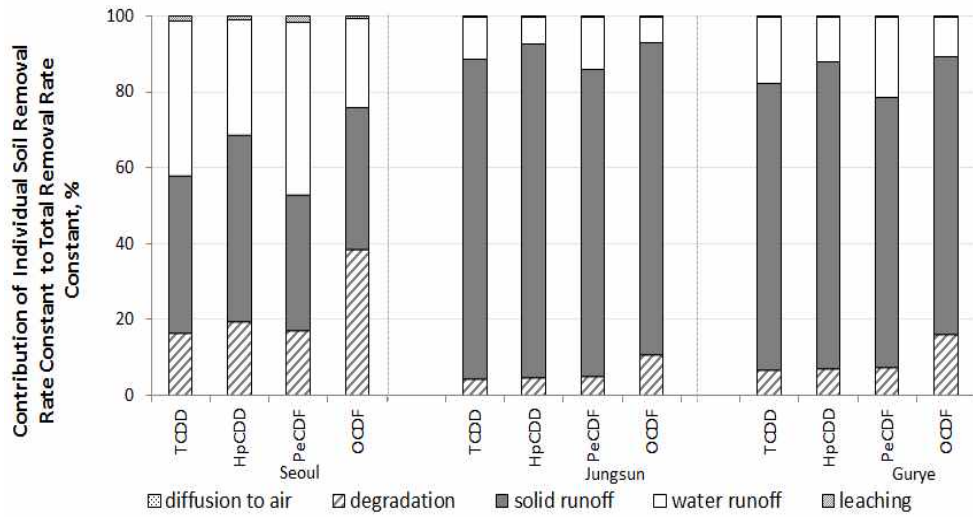


그림 19 NCC, 토양 총 제거속도 상수 중 각 제거속도상수가 차지하는 비율 [단위: %]

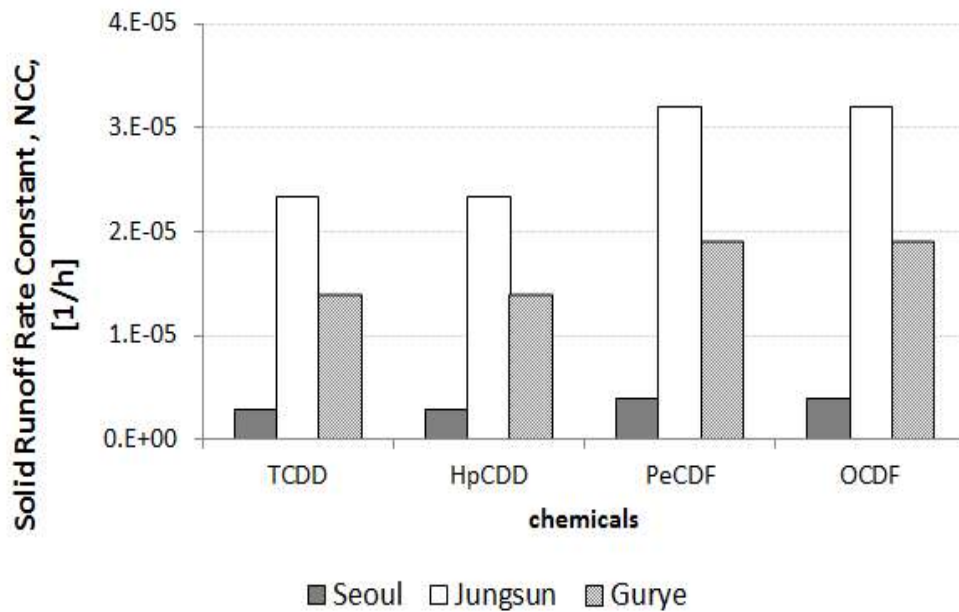


그림 20 NCC 토사유출에 의한 제거속도상수 [단위: 1/hour]

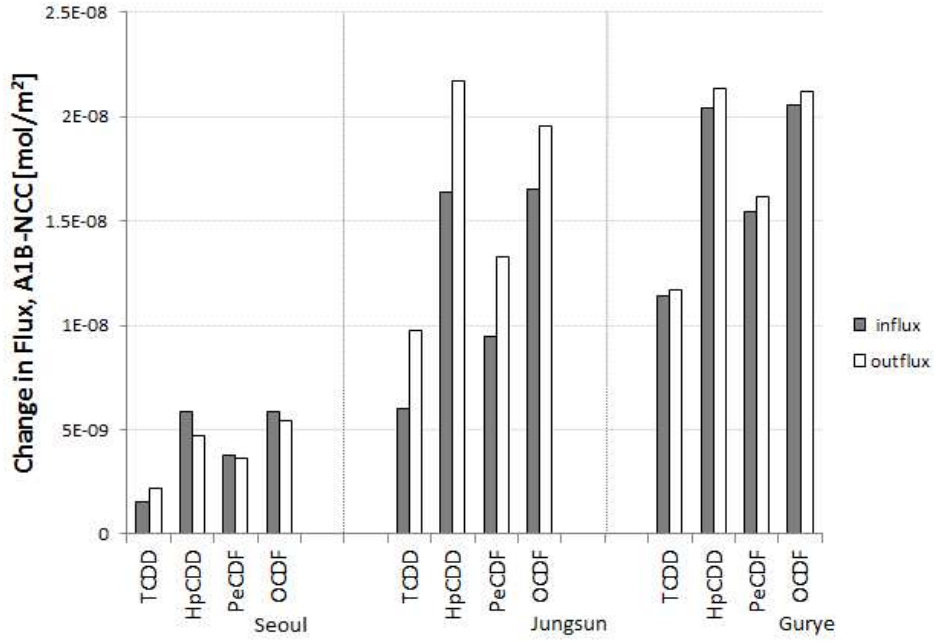


그림 21 기후변화로 인한 토양 플럭스 변화량 (A1B-NCC) [50년 누적, 단위: mol/m²]

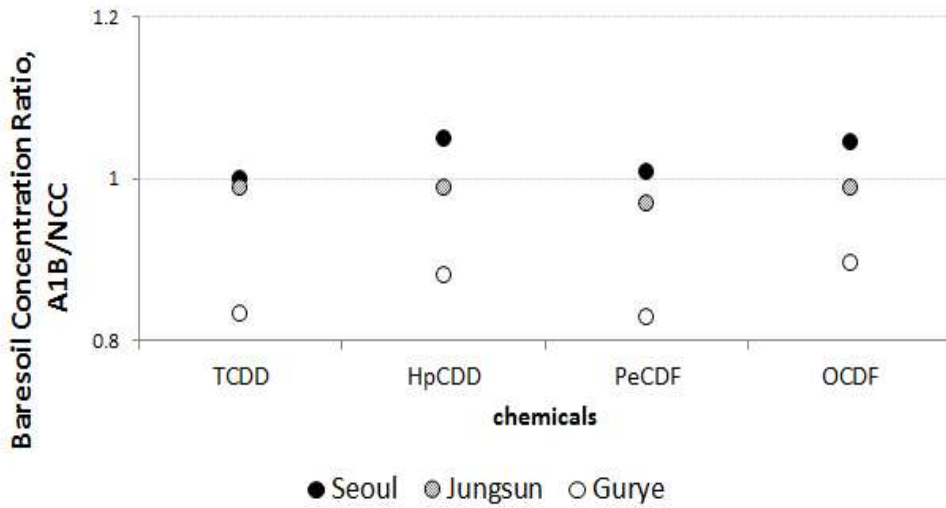


그림 22 기후변화로 인한 나대지농도 변화 (C_{A1B}/C_{NCC})

3. 수체

1) 농도

서울지역 NCC 조건의 수체 농도에 대해 분석하였다(그림 23 참조). 수체로의 오염물질 유입은 가스상 오염물의 흡착과 가스상 습식침적, 입자상 습식침적, 입자상 건식침적, 그리고 토양으로부터의 토사유출과 강우유출에 의한 것이다. 저분자 물질은 주로 가스상 흡착(dry gas deposition)이나 강우유출에 의해 유입되는데, 저분자 물질들은 유입량은 낮은 데 반해 제거량이 많아서 농도가 낮게 나타난다. <그림 24>에서 볼 수 있듯이 Chr, BaP, BghiP, PCDDs/DFs의 무거운 물질들의 유입량이 월등히 큰데, 고분자 물질들은 습식침적에 의해 수체로 직접 유입되는 양이 많고, 또한 이 물질들은 토양 내 많이 축적되어 있으므로 토사유출 또는 강우유출에 의해 유입되는 양이 높다.

수체 내 제거기작 속도상수는 배출조건에 따른 차이가 없으며, 이류에 의해 지배적으로 결정되어 대부분의 화합물에서 유사한 값을 나타낸다(표 4 참조). 따라서 수체의 농도는 대기과 토양으로부터의 오염물질 유입량과 유사한 패턴을 보인다.

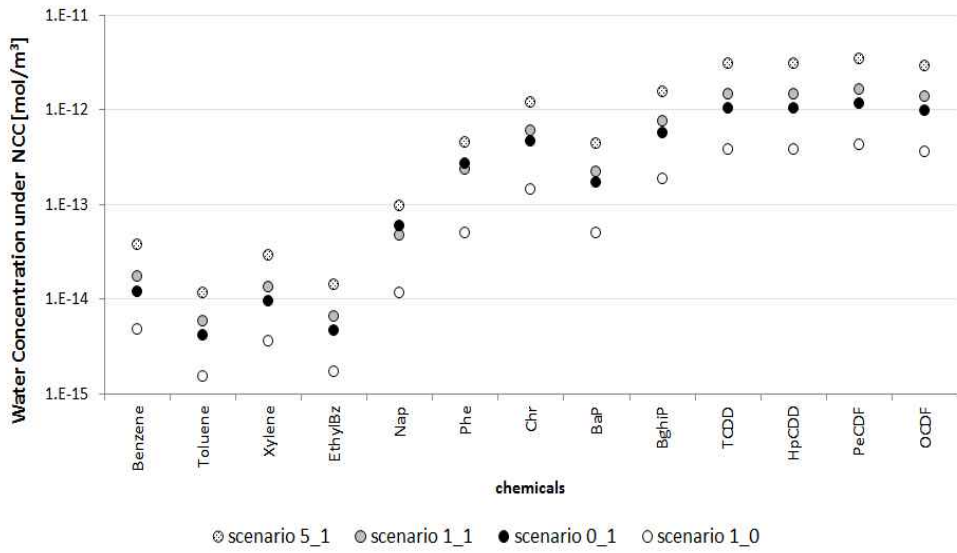


그림 23 서울지역, NCC 수체 오염물질 농도 [2041~2050년 평균, 단위: mol/m³]

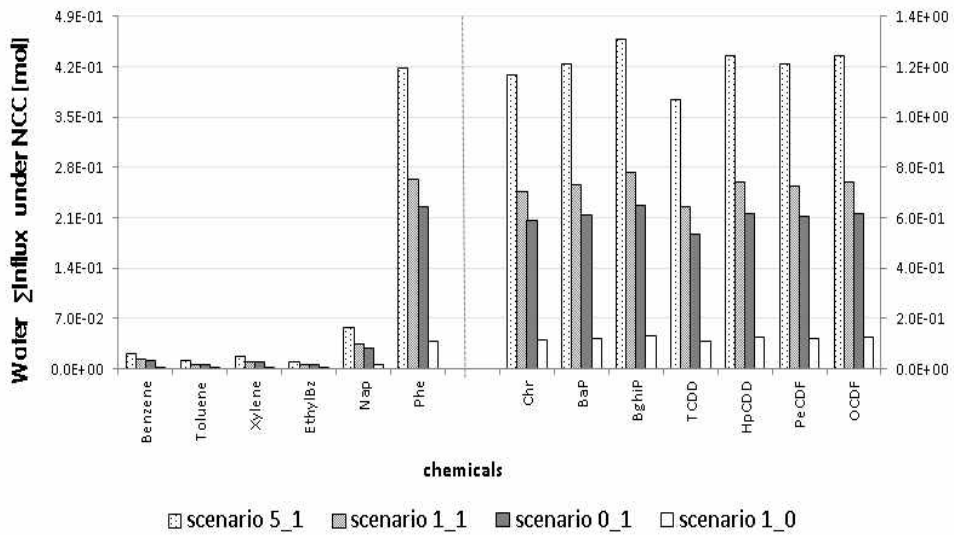


그림 24 서울지역, NCC 수체 유입 총량 [2041~2050년 누적, 단위: mol] (왼쪽 축: VOCs, Nap, Phe, 오른쪽 축: Chr, BaP, BghiP, PCDDs/DFs)

표 4 서울지역 NCC 수체 제거속도상수 [단위: 1/hour] (advection out: 수체 이류, degradation: 수체 내 분해반응, diffusion to sediment: 저토로의 확산, deposition: 저토로의 침적, revolatilization: 대기로의 재휘발)

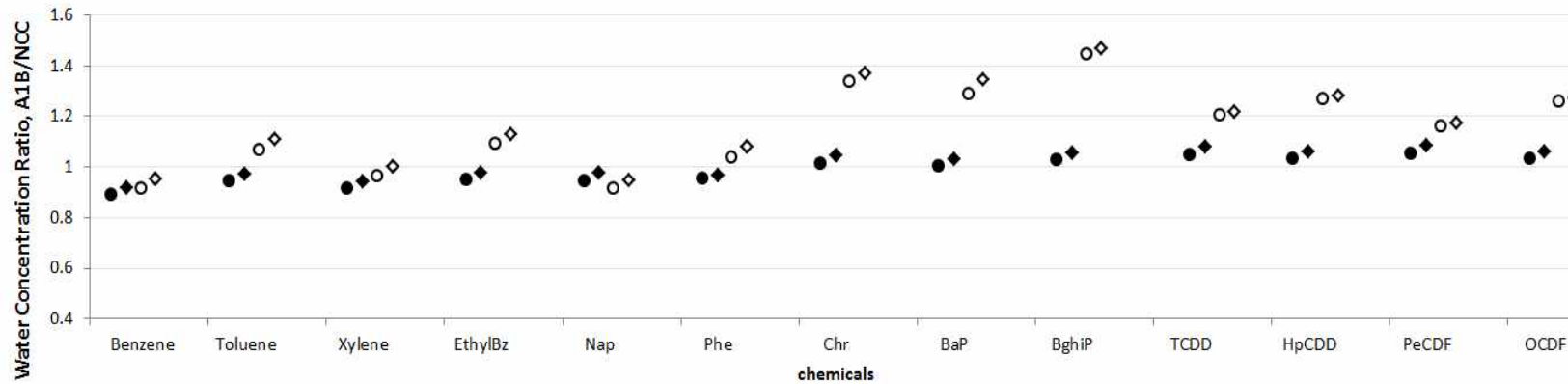
chemicals	advection out	degradation	diffusion to sediment	deposition	revolatilization	total water removal rate constant [1/h]
Benzene	0.2	1.E-03	3.E-05	4.E-08	1.E-03	0.20
Toluene	0.2	3.E-02	8.E-05	2.E-07	6.E-04	0.23
Xylene	0.2	1.E-03	1.E-04	4.E-07	1.E-03	0.20
Ethylbz	0.2	1.E-02	2.E-04	4.E-07	6.E-04	0.21
Nap	0.2	6.E-03	3.E-04	1.E-06	4.E-03	0.21
Phe	0.2	5.E-02	2.E-03	8.E-06	3.E-02	0.28
Chr	0.2	8.E-02	4.E-03	3.E-04	7.E-03	0.29
BaP	0.2	4.E-01	4.E-03	2.E-04	9.E-03	0.61
BghiP	0.2	6.E-02	4.E-03	4.E-04	4.E-04	0.26
TCDD	0.2	2.E-04	3.E-03	2.E-03	3.E-02	0.24
HpCDD	0.2	4.E-05	4.E-04	3.E-02	5.E-03	0.24
PeCDF	0.2	6.E-06	4.E-03	1.E-03	2.E-02	0.23
OCDF	0.2	7.E-06	4.E-04	3.E-02	9.E-03	0.24

2) 기후변화에 따른 농도 변화

수체에서는 모든 분석물질이 토양 환경인자에 따라 기후변화로 인한 농도 변화 패턴이 나뉘었다(그림 25 참조). 수체로 유입되는 오염물질은, 대기에서 직접 유입되는 기작들보다 토양을 거쳐서 강우유출이나 토사유출을 통해 유입되는 기작의 영향이 크기 때문에 기상인자가 달라도 환경인자가 동일하면 기후변화로 인한 농도 변화의 양상에 차이를 보이지 않았다.

서울지역과 정선지역에서 모든 분석 물질의 기후변화로 인한 농도 변화는 배출조건 간 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않았다(anova, $p>0.05$, 그림 26, 그림 27 참조).

수체 농도 변화도 유입과 제거속도에 의해 결정되는데, 한 지역 내 제거기작의 속도상수는 기후변화에 의해서만 변화되며 배출조건에는 무관한 값이다. 표 4에서 보인 것처럼, 수체에서는 모든 물질에 대해 이류에 의한 제거가 지배적으로 작용하며 유입된 오염물질의 약 100%가 모두 이류에 의해 손실된다. 기후변화로 인한 유입 플럭스의 변화폭에 배출조건 간 유의한 차이를 가지고 수체로 유입되더라도, 모든 물질에 대해 다른 제거기작 속도상수보다 $10\sim 10^6$ 배 큰 이류에 의해 분석 지역 내 오염물질이 계속 손실된다. 수체에서는 기후변화 전과 후 모두 오염물질의 농도 축적의 개념이 없으며 기후변화로 인한 농도 변화에 대해 배출조건 간 유의한 차이를 나타내지 않았다.



● 서울 토양환경, 서울 기상 ◆ 서울 토양환경, 정선 기상 ○ 정선 토양환경, 서울 기상 ◇ 정선 토양환경, 정선 기상

그림 25 기후변화로 인한 수체에서의 오염물질 농도 변화 (C_{A1B}/C_{NCC}) ('정선 토양환경, 정선 기상': 기존 정선지역 분석과 동일한 조건, '서울 토양환경, 정선 기상': 기존 서울지역에 기상인자만 정선지역과 동일하게 적용, '정선 토양환경, 서울 기상': 기존 정선지역에 기상인자만 서울지역과 동일하게 적용, '서울 토양환경, 서울 기상': 기존 서울지역 분석과 동일한 조건, 같은 모양의 표식은 동일한 기상, 같은 색의 표식은 동일한 환경을 갖는 조건)

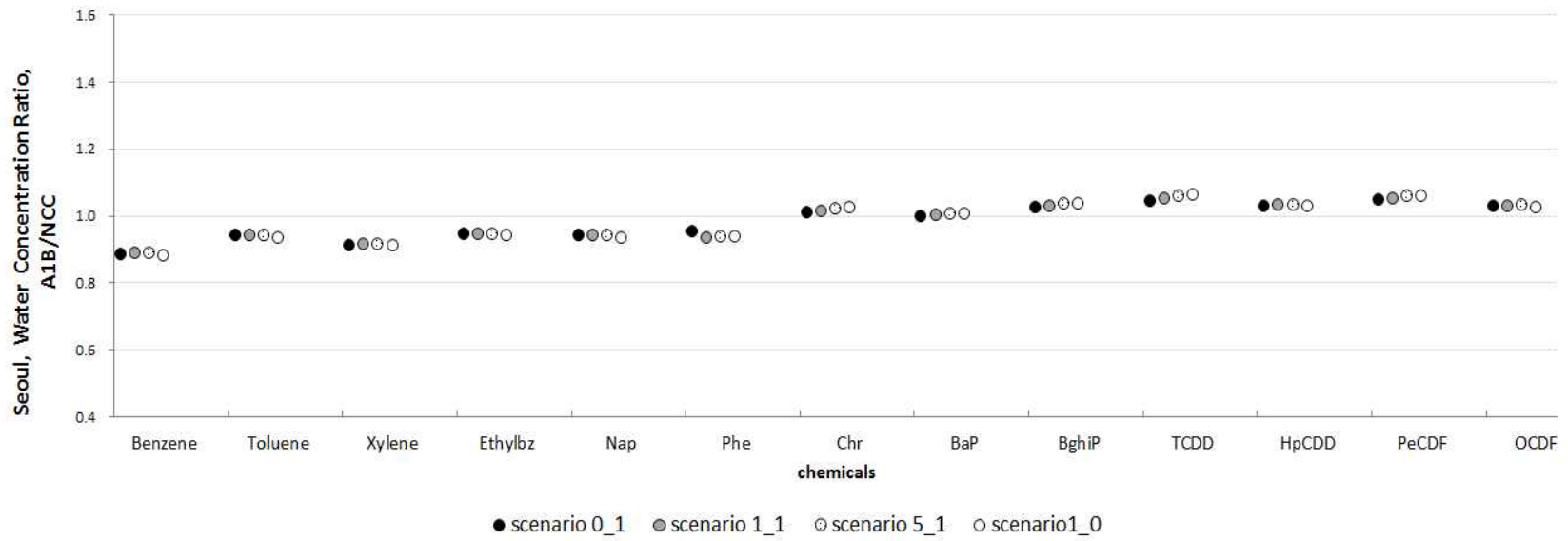


그림 26 서울지역 기후변화로 인한 수체에서의 오염물질 농도 변화 (C_{A1B}/C_{NCC})

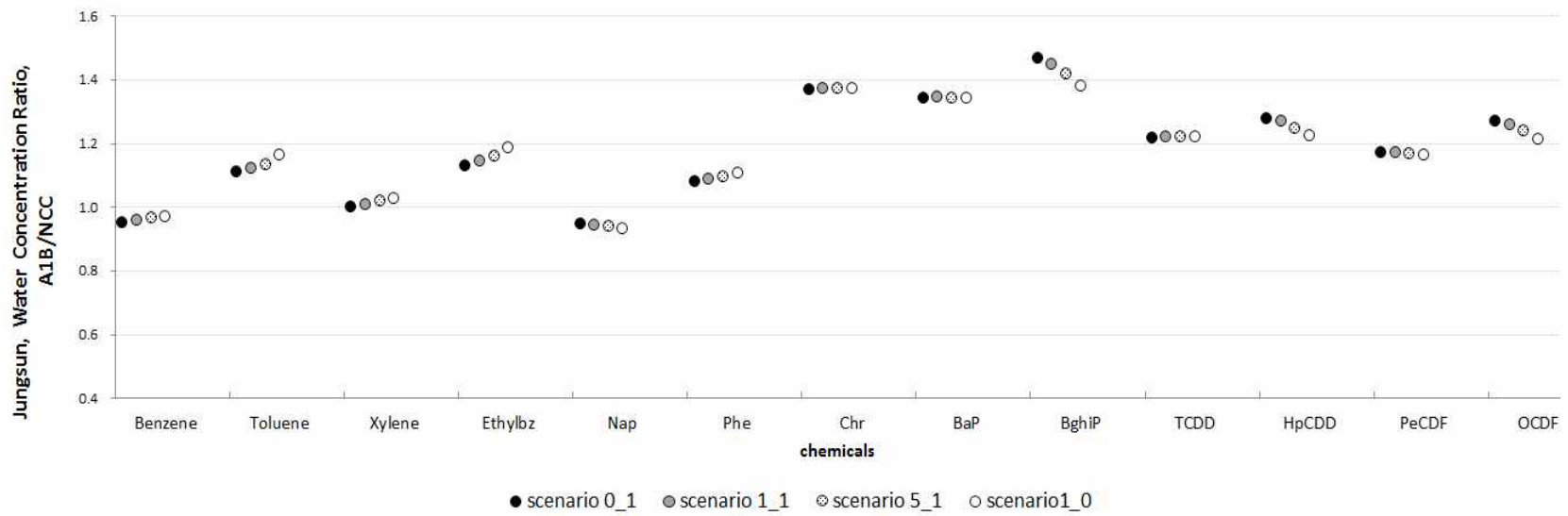


그림 27 정선지역 기후변화로 인한 수체에서의 오염물질 농도 변화 (C_{A1B}/C_{NCC})

한 지역 내 수체농도의 변화에 대해 배출조건 간 유의한 차이를 나타내지 않기 때문에, 네 가지 배출 시나리오 중 대표적으로 두 지역의 scenario 0_1의 유입 플럭스의 변화폭을 비교하였다(그림 28 참조).

두 지역 모두 대기 중 광분해반응과 이류 속도상수의 증가로 VOCs, Nap, Phe의 농도가 감소함으로써, 대기로부터 수체로의 직접 유입되는 가스상 건식 흡착이나 가스상 습식 침적의 플럭스는 감소한다. 하지만 기후변화로 인한 강수량의 증가가 정선지역이 서울지역에 비해 크고, 강수증가와 함께 토지 특성의 차이로 강우유출의 증가폭이 정선지역이 서울지역에 비해 더 크게 되며 정선지역의 기후변화로 인한 수체 농도의 감소폭이 서울지역에 비해 작게 나타났다.

Chr, BaP, BghiP, PCDDs/DFs를 포함하는 비교적 무거운 물질은 입자상 습식침적과 토양으로부터의 토사유출이 주된 유입 기작이다. 서울과 정선지역 모두 강수량과 강수빈도의 증가로 인해 입자상 습식침적과 토사유출 플럭스가 증가하였다. 토양에서 분석한 것처럼 기후변화로 인한 강수빈도와 강수량의 증가가 정선지역이 서울지역에 비해 크고, 정선지역의 토사유출이 더 크게 증가하므로 정선지역의 기후변화로 인한 수체 농도의 증가폭이 서울지역에 비해 크다.

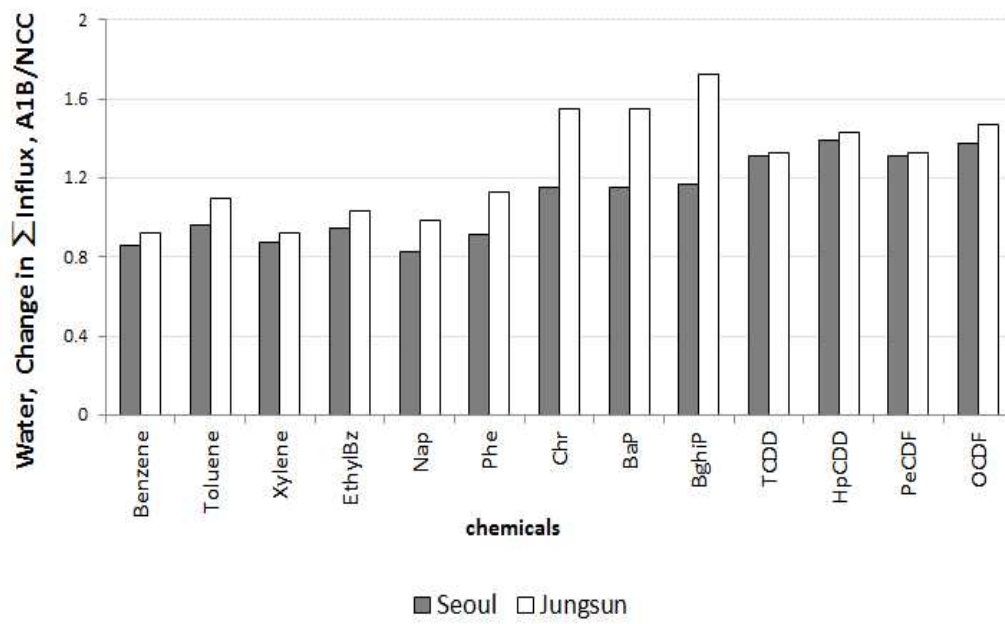


그림 28 기후변화로 인한 수체로의 유입 플럭스 변화율 (A1B/NCC)

IV. 결론

환경 매질 내 오염물질의 동태를 변화시키는 요인에는 기상인자, 오염물질의 물리적 화학적 성질, 환경인자, 배출조건 등이 있다. 이 중 기후변화에 기인한 오염물질의 환경 동태 변화에 끼치는 배출조건과 토양 환경인자의 영향정도를 분석하였다.

대기 중 오염물질은 배출, 이류와 난류확산, 지표로부터의 재취발에 의해 유입되는데, 한 지역 내 기후변화에 따른 오염물질 농도변화에 미치는 배출원의 영향을 분석하기 위해 내부배출원과 외부배출원의 상대적인 비중을 달리하여 모형을 실행하였다. 한 지역 내에서 기후변화로 인한 대기 오염물질의 농도변화 양상은 내부배출원이 있을 때와 내부배출원이 전혀 없이 외부배출원만 있을 때의 조건으로 나뉘었다. 내부배출이 존재한다면, 그 양이 전체 배출량에 비해 낮은 비율일지라도 기후변화로 인한 대기 오염물질의 농도변화 양상이 모두 동일하게 나타났다. 외부배출원일 때 기후변화로 인한 대기 중 오염물질의 농도 감소폭이 더 컸다. VOCs, Nap, Phe는 온도의 상승으로 인해 대기 중 광분해반응이 증가하며, Chr, BaP, BghiP, PCDDs/DFs는 강수빈도의 증가로 인해 하부매질로의 입자상 흡착침적 플럭스가 증가하는데, 외부배출된 오염물질은 분석지역으로의 이동 과정에서도 기후변화로 인해 증가된 대기 중 제거 플럭스를 거치게 되므로 분석지역으로의 유입량이 감소된다. 두 배출원 모두 분석지역 내에서 기후변화로 인해 증가된 제거기작을 거치게 되는데, 현재 실험조건에서 내부배출원은 기후변화로 인한 대기 중 오염물질 유입량에 변화가 없지만, 외부배출원은 기후변화로 인해 분석지역으로의 대기 중 오염물질 유입 자체가 감소하기 때문에 대기 중 오염물질의 농도 감소폭이 더 크다. 한편, 현재 분석 조건에서는 기후변화로 인한 대기 중 오염물질 농도 변화는 환경인자의 영향 보다는 기상인자의 영향이 큰 것으로 나타났다.

토양의 농도는 대기로부터의 오염물질 유입과 토양 내 제거 속도에 의해 결정된다. VOCs, Nap, Phe의 저분자 물질은 대기 중 광분해반응에 의한

손실량이 증가함에 따라 하부 매질로의 이동량이 감소하고 토양 농도가 감소한다. Chr, BaP, BghiP, PCDDs/DFs의 고분자 물질은 강수량과 강수빈도가 증가함에 따라 대기로부터의 입자상 습식침적 플럭스가 증가하면서 하부 매질로의 이동량이 증가한다. 이때, 외부배출일 경우에는 기후변화로 인한 대기 농도 감소폭이 가장 크기 때문에 하부 매질로의 플럭스 감소폭이 가장 크거나 증가폭이 가장 작으며 그로인해 저분자 물질의 농도 감소폭이 가장 크거나 고분자 물질의 농도 증가폭이 가장 작게 나타났다. 또한 비교적 무거운 물질들의 농도는 기상인자보다 토양 환경인자의 영향을 받는 것으로 나타났는데, 특히 PCDDs/DFs는 토지 경사도를 포함하는 토양 환경인자의 차이에 따라 기후변화로 인한 농도 변화의 형태가 달라졌다. 경사가 크고 경사길이가 긴 지역에서는 기후변화로 인해 농도가 감소하였다.

한편 기후변화로 인한 수체 농도 변화에 대해 배출조건 간 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않았는데, 현재 모형 실행 조건에서는 기후변화 전과 후 모두 수체로 유입된 오염물질이 누적되지 않고 대부분이 이류로 손실되기 때문에 배출조건의 영향을 받지 않는 것으로 보인다.

지리적인 차이의 영향을 보기 위해 토지의 특성이 확연히 다른 지역을 대상으로는 비교분석 하였지만, 강우특성이 확연히 다른 지역을 대상으로 비교하지 못한 한계가 있다. 현재 연구는 대기로 오염물질이 배출되는 경우에 대해 분석하였으나, 토양이나 수체 매질로 오염물질이 배출되면 오염물질의 이동 경로에서 만나는 기상조건이나 환경조건에 따라 현재와 다른 변화 양상이 발생할 수 있으므로 다른 매질에 배출을 주는 경우에 대한 분석이 필요하다.


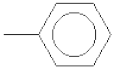
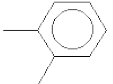
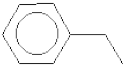





■ 참고문헌

- 김선아(2011), 기후변화의 영향을 고려한 Benzo[a]Pyrene 의 국가규모
다매체 동태의 평가, 서울대학교 환경대학원 석사학위논문.
- 이동수, 이윤아, 김희석, 송하나(2012), 기후변화에 따른 화학물질 거동 및
위해성 평가·적응기술 개발, 2차년도 보고서, 환경부
- 장리아(2013), 기후변화에 따른 PCDDs/DFs와 휘발성유기화합물의
동태변화의 비교분석, 서울대학교 환경대학원 석사학위논문.
- Boxall, A., Hardy, A., Beulke, S., Boucard, T., Burgin, L., Falloon, P.
(2009), Impacts of climate change on indirect human exposure to
pathogens and chemicals from agriculture, *Environ Health
Perspect* 117, 508-514.
- Breivik, K., Wania, F., Muir, D., Alaee, M., Bakus, S., Pacepavicius, G.
2006), Impacts of climate change on the fate and behavior of
persticides in surface and ground water—a UK perspective. *Science
of the Total Environment* 369, 163-177.
- Breivik, K., Sweetman, A., Pacyna, J., Jones, K. (2007), Towards a global
historical emission inventory for selected PCB congeners—A mass
balance approach-3, *Science of Total Environment* 377, 296-307.
- Cai, J.J., Song, J.H., Lee, Y.A., Lee, D.S. (2013), Assessment of climate change
impact on the fates of polycyclic aromatic hydrocarbons in the
multimedia environment based on model prediction, *Science of Total
environment* 470. 1526-1536.
- Dalla Valle, M., Codato, E., Marcomini, A. (2007), Climate change influence
on POPs distributionand fate: A case study , *Chemosphere* 67, 1287-
1295.
- Gouin, T., Armitage, J., Cousins, I. (2013), Influence of Global Climate
Change on Chemical Fate and Bioaccumulation: The Role of
Multimedia Models, *environmental toxicology and chemistry* 32,

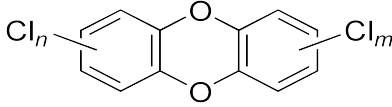
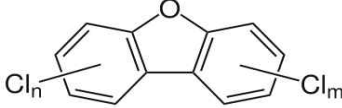
- Hassanin, A., Breivik, K., Meijer, S., Steinnes, E. (2004), PBDEs in European Background Soils: Levels and Factors Controlling Their Distribution, *Environ.Sci.Technol.* 38, 738-745.
- IPCC (2007), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, In: Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller(eds), contribution of Working Group to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996.
- Kallenborn, R., Halsall, C., Dellong, M., Calsson, P.(2012), The Influence of Climate Change Impacts on the Global Distribution and Fate Processes of Anthropogenic Persistence Organic Pollutants. *J. Environ. Monit.* 14, 2854-2869.
- Lamon, L., Dalla Valle, M., Marcomini, A. (2009), Introducing an integrated climate change perspective in POPs modelling, monitoring and regulation, *Environmental Pollution* 157, 1971-1980.
- Lamon, L., Waldow. V, Macleod. M, Scheringer. M, Marcomini. A, Hungerbuhler. K. (2009), Modeling the Global Levels and Distribution of Polychlorinated Biphenyls in Air under a Climate Change Scenario, *Environmental Science and Technology* 43, 5818-5824.
- Lee, Y.A. (2005), *Regional Scale Assessment of Assessment of Environmental Fate and Transport of dioxins by a Multimedia Model (KoEFT-PBTs)*, Doctoral Thesis, Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University.
- Lohmann, R., Breivik, K., Dachs, J., Muir, D. (2007), Global fate of POPs: Current and future research directions, Rainer Lohmann et al.,

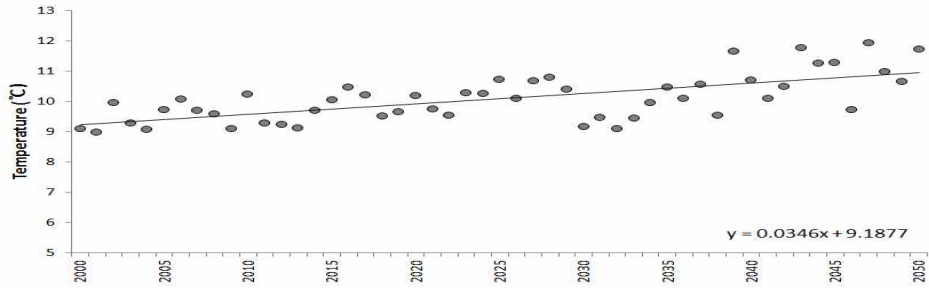
- Environmental Pollution 150, 150-165.
- Macdonald, R., Harner, T., Fyfe, J. (2005), Recent climate change in the Arctic and its Impact on contaminant pathways and interpretation of temporal trend data, *Science of the Total Environment* 342, 5-86.
- Mackay, D. (2000), *Illustrated Handbook of Physical-chemical Properties and Environmental Fate for Organic Chemicals* CRC Press LLC.
- Ma, J., Cao, Z. (2010), Quantifying the perturbations of persistent organic pollutants induced by climate change, *Environmental Science Technology* 44(22), 8567-8573.
- NIMR. The application of regional climate change scenario for the national climate change report (II). Seoul: National Institute of Meteorological Research; 2006.
- Noyes, P., MacElwee, M., Miller, H., Clar, B. (2009), The toxicology of climate change : Environmental contaminants in a warming world, *Environment International* 35, 971-986.
- Pennington, D., Margni, M., Ammann, C., Jolliet, O. (2005), Chemical Emissions in Western Europe, *Environmental Science and Technology* 39, 1119-1128.
- Schwarzenbach, P., Gschwend, M., Imboden, M. (2003), *Environmental Organic Chemistry*. Wiley Interscience, New Jersey.
- Wöhrschimmel, H., MacLeod, M., Hungerbühler, K. (2013), Emission, Fate and Transport of Persistent Organic Pollutants to the Arctic in a Changing Global Climate, *Environmental Science and Technology* 47, 2323-2330.

<부록 1> 대상물질의 물리화학적 성질 (1)

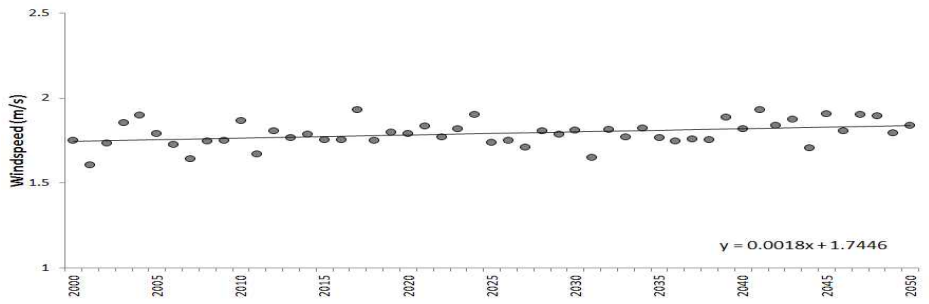
Chemical	Chemical Formula		Molecular weight g/mol	Boiling point °C	Molar Volume cm ³ /mol
VOCs					
Benzene	C ₆ H ₆		78.11	80.1	96
Toluene	C ₇ H ₈		92.13	110.6	118
o-Xylene	C ₈ H ₁₀		106.2	144	140.4
Ethylbenzene	C ₈ H ₁₀		106.2	136.2	140.4
PAHs					
Naphthalene	C ₁₀ H ₈		128.18	218	148
Phenanthrene	C ₁₄ H ₁₀		178.21	339	199
Chrysene	C ₁₈ H ₁₂		228.27	448	251
Benzo[a]pyrene	C ₂₀ H ₁₂		252.29	495	263
Benzo[ghi]perylene	C ₂₂ H ₁₂		268.33	542	277

<부록 1> 대상물질의 물리화학적 성질 (2)

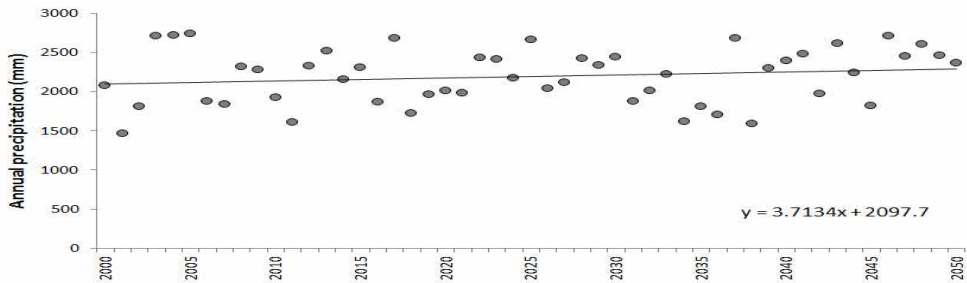
Chemical	Chemical Formula	Molecular weight	Boiling point	Molar Volume
		g/mol	°C	cm ³ /mol
PCDD				
2,3,7,8TCDD	C ₁₂ H ₄ Cl ₄ O ₂	3.22E+02	446.5	275.6
1,2,3,4,6,7,8HpCDD	C ₁₂ HCl ₇ O ₂	4.25E+02	507.2	338.3
PCDF				
2,3,4,7,8PeCDF	C ₁₂ H ₃ Cl ₅ O	3.40E+02	464.7	281.2
1,2,3,4,6,7,8,9OCDF	C ₁₂ Cl ₈ O	4.44E+02	537	343.9



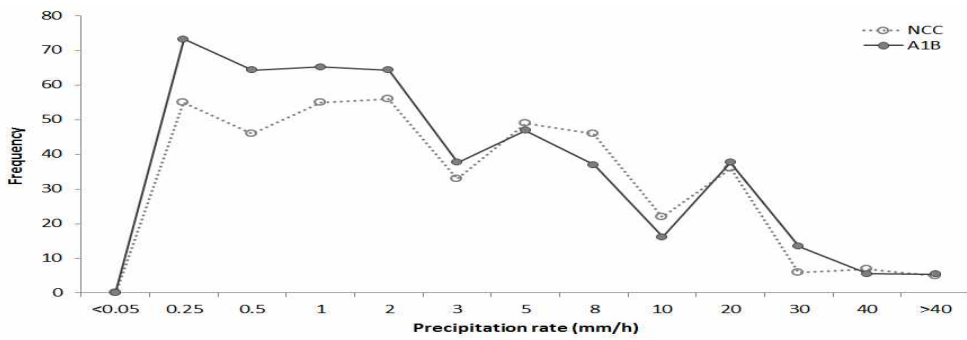
(a) 연평균 기온 [단위: °C]



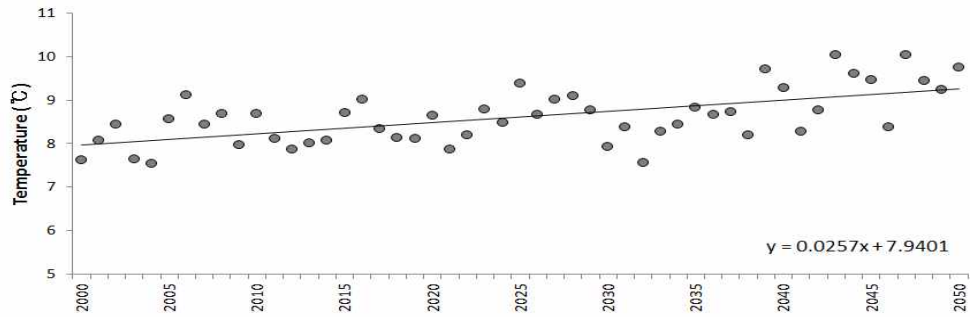
(b) 연평균 풍속 [단위: m/s]



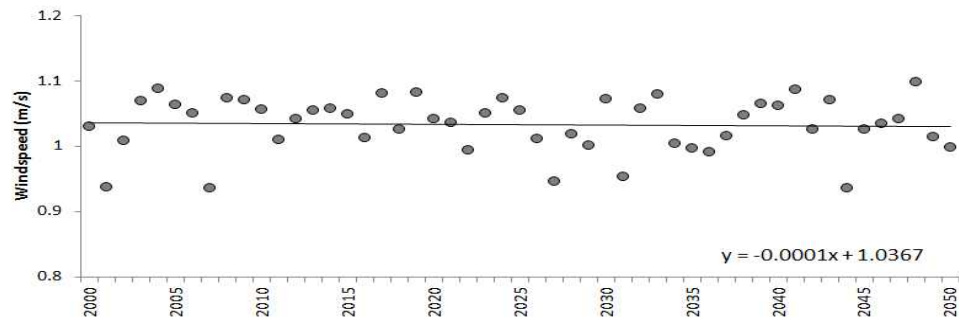
(c) 연평균 강수량 [단위: mm/year]



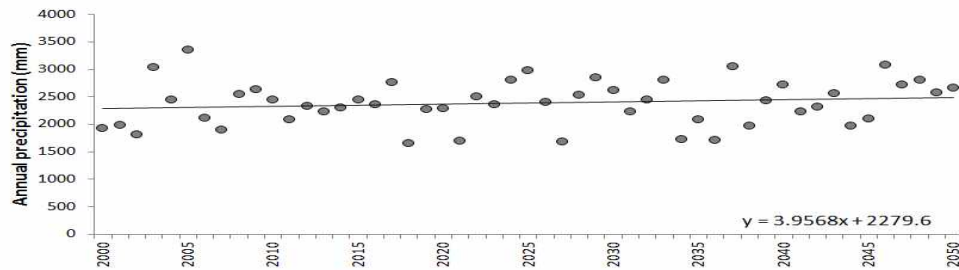
<부록 2> 2000년~2050년 0502지역 기상인자 (d) 누적 강수빈도(NIMR, 2006)



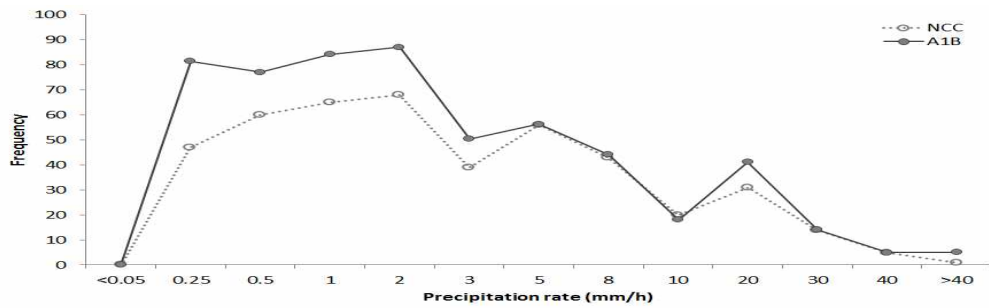
(a) 연평균 기온 [단위: °C]



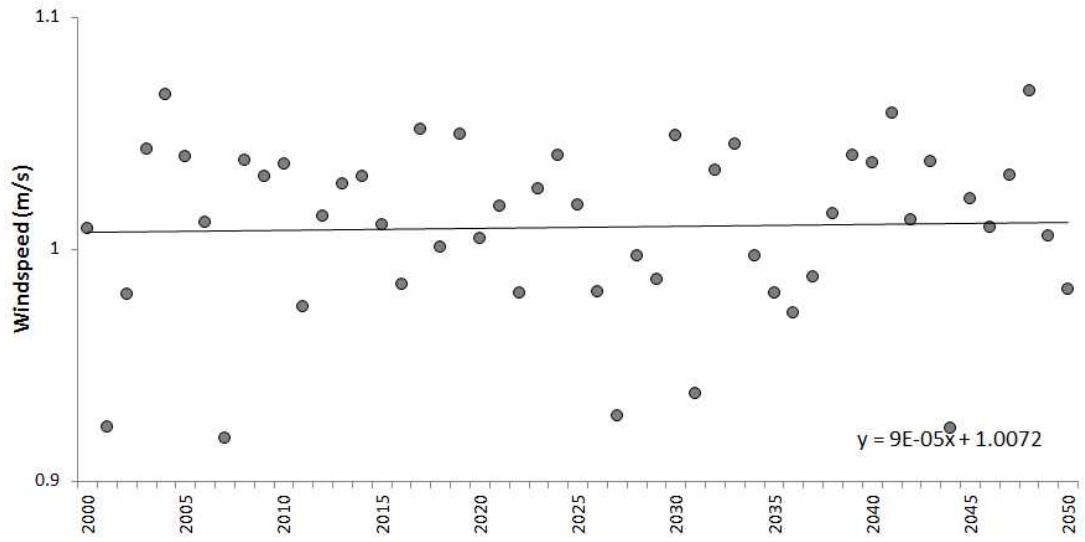
(b) 연평균 풍속 [단위: m/s]



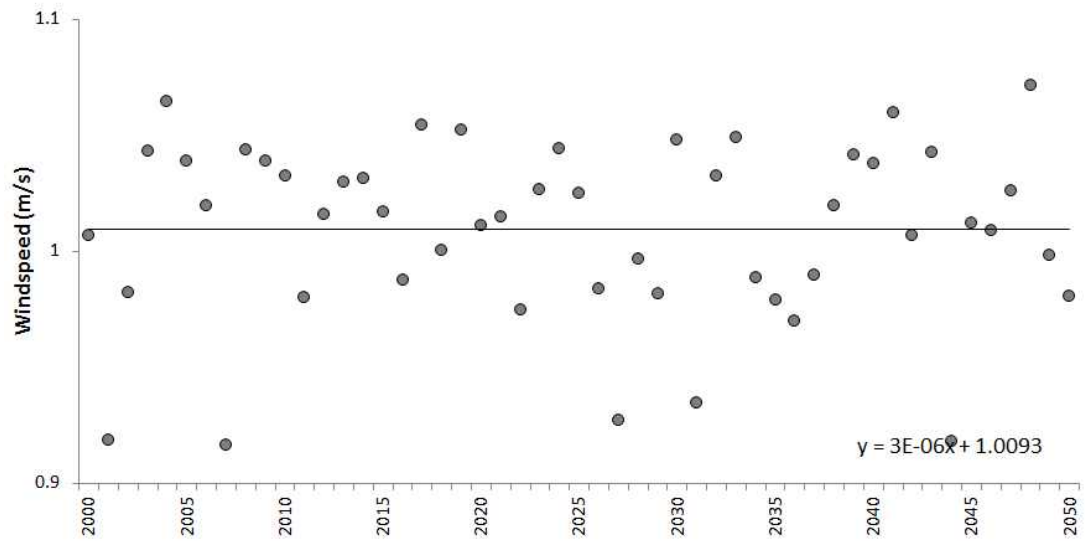
(c) 연평균 강수량 [단위: mm/year]



<부록 2> 2000년~2050년 0507지역 기상인자 (d) 누적 강수빈도(NIMR, 2006)

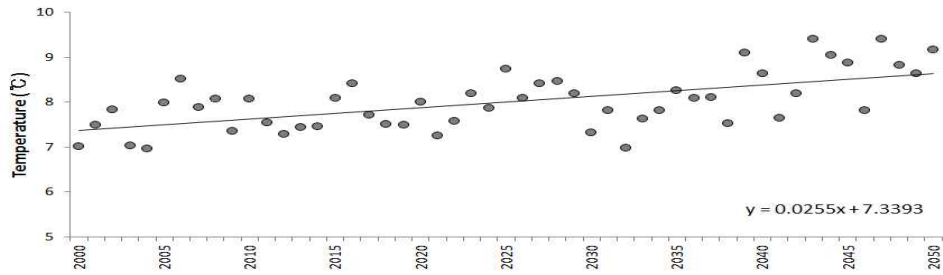


(a) 0505지역 풍속변화

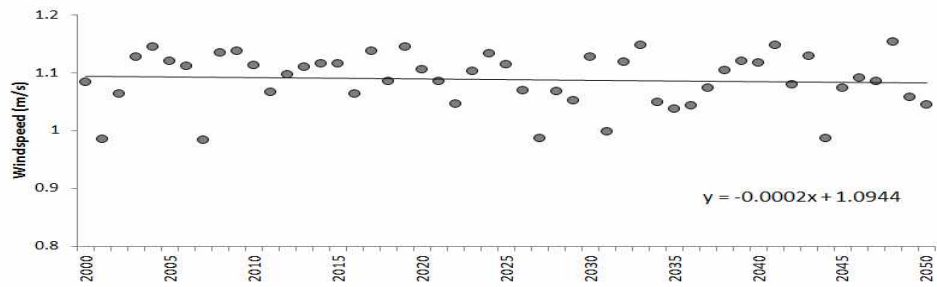


(b) 0506지역 풍속변화

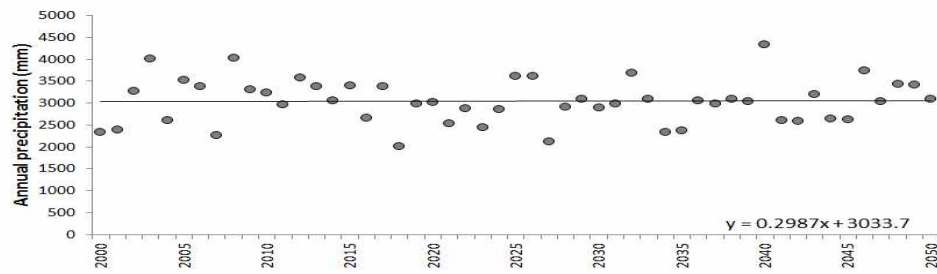
<부록 2> 2000년~2050년 인접지역 기상인자(NIMR, 2006)



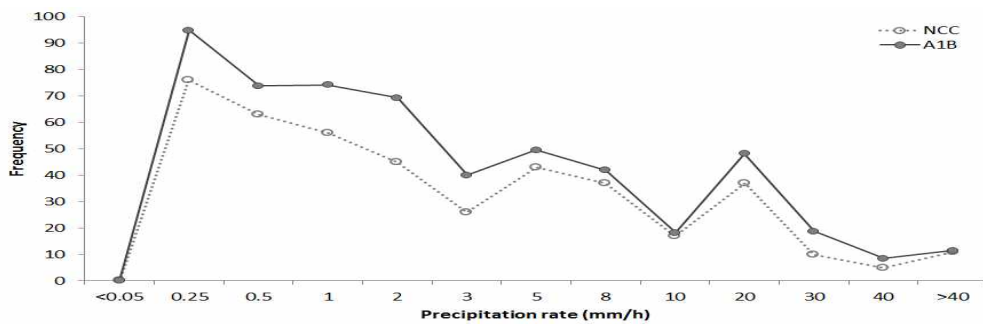
(a) 연평균 기온 [단위: °C]



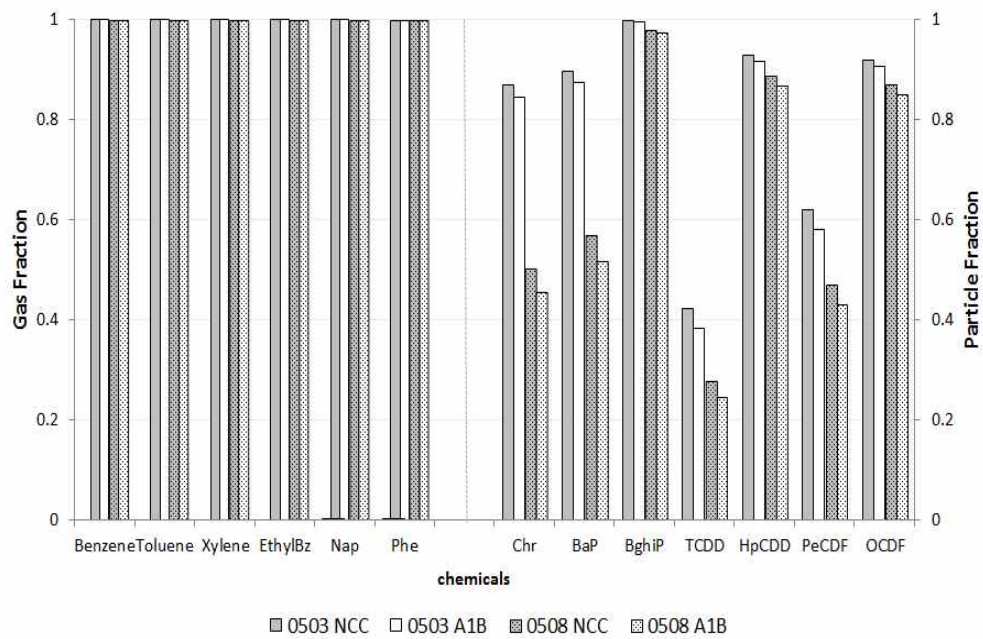
(b) 연평균 풍속 [단위: m/s]



(c) 연평균 강수량 [단위: mm/year]



<부록 2> 2000년~2050년 구례지역 기상인자 (d) 누적 강수빈도(NIMR, 2006)



<부록 3> 분석 지역의 대기 환경인자 TSP 차이에 의한 입자상 비율 비교 (왼쪽축: VOCs, Nap, Phe 가스상 오염물질 비율, 오른쪽 축: Chr, BaP, BghiP, PCDDs/DFs 입자상 오염물질 비율)

<부록 4> NCC 토양 제거속도상수비교 [단위: 1/hour] (revolatilization: 대기로의 재휘발, degradation: 토양 내 분해, solid runoff: 토사유출, water runoff: 강우유출, leaching: 침출)

chemicals	revolatilization		degaradation		solid runoff		water runoff		leaching		total soil removal rate constant [1/h]	
	서울	정선	서울	정선	서울	정선	서울	정선	서울	정선	서울	정선
Benzene	2.E-04	2.E-04	8.E-04	8.E-04	4.E-07	3.E-06	4.E-03	5.E-03	2.E-04	2.E-04	5.E-03	6.E-03
Toluene	4.E-03	4.E-03	7.E-03	7.E-03	3.E-06	2.E-05	8.E-03	8.E-03	3.E-04	3.E-04	2.E-02	2.E-02
Xylene	2.E-04	1.E-04	4.E-04	4.E-04	1.E-06	9.E-06	1.E-03	1.E-03	5.E-05	6.E-05	2.E-03	2.E-03
EthylBz	2.E-03	2.E-03	4.E-03	4.E-03	4.E-06	3.E-05	4.E-03	4.E-03	2.E-04	2.E-04	1.E-02	1.E-02
Nap	7.E-05	6.E-05	1.E-04	1.E-04	3.E-06	2.E-05	1.E-03	1.E-03	5.E-05	5.E-05	1.E-03	2.E-03
Phe	1.E-06	1.E-06	1.E-04	1.E-04	4.E-06	3.E-05	3.E-04	3.E-04	1.E-05	1.E-05	4.E-04	4.E-04
Chr	2.E-08	1.E-08	4.E-05	4.E-05	4.E-06	3.E-05	2.E-05	2.E-05	6.E-07	7.E-07	6.E-05	9.E-05
BaP	2.E-08	1.E-08	4.E-05	4.E-05	4.E-06	3.E-05	2.E-05	2.E-05	8.E-07	1.E-06	7.E-05	1.E-04
BghiP	4.E-09	4.E-09	4.E-05	4.E-05	4.E-06	3.E-05	1.E-05	2.E-05	5.E-07	6.E-07	6.E-05	9.E-05
TCDD	7.E-10	6.E-10	1.E-06	1.E-06	3.E-06	2.E-05	3.E-06	3.E-06	1.E-07	1.E-07	7.E-06	3.E-05
HpCDD	2.E-11	2.E-11	1.E-06	1.E-06	3.E-06	2.E-05	2.E-06	2.E-06	7.E-08	8.E-08	6.E-06	3.E-05
PeCDF	2.E-09	2.E-09	2.E-06	2.E-06	4.E-06	3.E-05	5.E-06	5.E-06	2.E-07	2.E-07	1.E-05	4.E-05
OCDF	5.E-11	5.E-11	4.E-06	4.E-06	4.E-06	3.E-05	2.E-06	3.E-06	9.E-08	1.E-07	1.E-05	4.E-05

Abstract

The Effect of emission condition and soil environmental factors on
Change in Environmental fate and transportation by Climate change

Lee, Jisun

Department of Environmental Planning
Graduate School of Environmental Studies
Seoul National University

The object of this study was to assess the effect of emission condition and soil environmental factors on change in environmental fate and transportation due to climate change using multimedia model, KPOP-CC, with A1B climate change scenario. To analyze the effect of emission condition, the model was conducted by several different emission scenario, varying internal and external emission ratio with 4 types of VOCs, 5 types of PAHs, 4 types of PCDDs/DFs. Seoul, Jungsun, and Gurye, where soil environmental factors are different from each other, were selected to assess the effect of soil characters.

The change in concentration of pollutants in air shows the same pattern in all emission scenarios which have internal emission source. When there is only external emission, climate change-induced decrease of air concentration is bigger than that of emission scenarios which have internal emission source. The external emitted pollutants met increased loss mechanism due to climate change during the transport to the site, so inflow amount

of the external emitted pollutants to the site is decreased. On the other hand, inflow amount of internal emitted pollutants due to climate change is not changed in this model simulation condition. Moreover, both external and internal emitted pollutants undergo increased loss mechanism in the site. Therefore, climate change-induced decrease of concentration of external emitted pollutants is bigger than that of internal emitted pollutants. Pollutants in air are not affected by soil environmental factors.

Because climate change-induced decrease of concentration of external emitted pollutants in air are the biggest among the emission scenarios, climate change-induced decrease of the concentration of external emitted pollutants in soil is the biggest or climate change-induced increase of the concentration of external emitted pollutants is the smallest in soil. On the other hand, PCDDs/DFs show totally different result according to the sites where soil environmental factors are different from each other. PCDDs/DFs in soil are affected by soil environmental factors such as soil degree and length.

Keyword: Climate Change Impact, Fate and transport of pollutant, Emission condition, Soil environmental factors, Multi-media model

Student Number: 2012-22054