

연구보고서 2014-22

전력수급기본계획에 따른 미래 대기질 영향과 대응을 위한 국제공동연구 (I)

The Impact of National Plan for Future Electric Energy Production
on Ambient Air Quality of Korea

심창섭 외



한국환경정책·평가연구원
Korea Environment Institute

연구진

연구책임자 심창섭 (한국환경정책·평가연구원 부연구위원)
참여연구원 홍지연 (한국환경정책·평가연구원 위촉연구원)

산학연정 연구자문위원

강광규 (한국환경정책·평가연구원 선임연구위원)
심상규 (한국과학기술연구원 책임연구원)
이창훈 (한국환경정책·평가연구원 연구위원)
조석연 (인하대학교 환경공학과 교수)
최한창 (환경부 대기정책과 사무관)
추장민 (한국환경정책·평가연구원 연구위원)

© 2014 한국환경정책·평가연구원

발행인 박광국

발행처 한국환경정책·평가연구원
 세종특별자치시 시청대로 370 세종국책연구단지
 B동(과학·인프라동) (우편번호) 339-007
 전화 044)415-7777 팩스 044)415-7799
 <http://www.kei.re.kr>

인쇄 2014년 12월 26일

발행 2014년 12월 31일

출판등록 제17-254호

ISBN 978-89-8464-893-7 93530

이 보고서를 인용 및 활용 시 아래와 같이 출처 표시해 주십시오.
심창섭 외, 2014, 「전력수급기본계획에 따른 미래 대기질 영향과 대응을 위한
국제공동연구(I)」, 한국환경정책·평가연구원.

값 7,000원

서 언

2013년 발표된 제6차 전력수급기본 계획은 2027년까지 2013년 대비 연 2.4%에 달하는 전력수요 증가 예측을 바탕으로 수립되었다. 증가한 전체 전력의 에너지 구성 중 석탄, 천연가스 등 전통적 화석연료가 차지하는 비중은 여전히 높아, 향후 국내 대기질 악화의 잠재적 위험성이 있다. 본 연구는 증가하는 전력수요 대응을 위해 증설되는 발전소로부터의 대기오염 배출량과 중국 등 주변국의 배출량 변화로 인한 미래 국내 대기질 변화에 대해 전망하고, 이에 대한 정책이슈를 제안하는 것을 주요 목적으로 추진되었다. 중국의 영향뿐 아니라 국내의 증설되는 주요 발전시설은 석탄과 천연가스가 주를 이루기 때문에 질산화물 및 황산화물, 유기화합물 등의 증가가 예상되며 이로 인한 건강영향을 파악하고 대응해야 할 필요가 있다. 오존과 미세먼지는 정확한 예측에 한계가 있으나, 고농도 현상에 대한 예측과 사전 예보가 매우 중요하다. 국내 전력 발전 증설에 의한 미세먼지 증가가 심각하지 않을 것으로 예상되나, 본 연구에서 다루지 않은 초미세먼지의 잠재적 위험에 대한 정량적 평가는 더욱 중요하다고 할 수 있다. 연구결과가 나오기까지 본 연구를 맡아 수행한 한국환경정책·평가연구원의 연구자들과 자료 구축에 협조해주신 건국대학교 우정현 교수 및 국립환경과학원 진형아 박사, 그리고 국외 전문 기관 관계자에게 감사를 드린다.

2014년 12월

한국환경정책·평가연구원

원장 박 광 국

국문 요약

2013년 발표된 정부의 제6차 전력수급기본 계획은 2027년까지 2013년 대비 총 약 60%에 달하는 전력수요 증가 예측을 기반으로 수립되었다. 이를 충족할 전체 전력의 에너지 구성 중 석탄, 석유, 천연가스 등 전통적 화석연료가 차지하는 비중은 여전히 높아, 향후 국내 대기질 악화에 대한 정량적 전망이 필요하다. 2009년 관측자료를 기준으로 같은 기간의 대기화학-수송 모형을 이용하여 모형의 대기질의 재현 여부를 분석한 후, 미래의 대기오염 배출 물질 변화를 적용하여 2027년의 대기질을 전망해 보았다. 중국의 배출량 전망은 중국의 에너지 수요 전망을 기준으로 기존의 배출목록을 비례 조정한 시나리오(BAU)와, 중국의 한층 강화된 저감정책이 성공한 시나리오(PC)에 근거한 배출 전망을 사용하여 수치모의를 수행하였다. 그 결과 2027년 전력설비 증설에 따른 국내의 주요 지역의 대기질은 O_3 , PM_{10} 보다는 수도권 일부지역의 NO_2 농도 증가에 따른 산성비 및 이차 오염물질 증가의 위험성이 있는 것으로 나타났다. 수도권 등 고농도 NO_x 배출 지역은 주로 오존 titration의 영향으로 지표의 오존 연평균 농도는 증가하지 않을 것으로 예상되었다. 중국이 대기오염 배출량을 저감하였을 때보다는 (PC) 대기오염 물질 배출이 증가하였을 때의 (BAU) 국내의 주요 오염물질의 환경기준치 초과 일수가 더 민감한 것으로 나타났다. 이는 중국의 배출량을 현재 수준 이하로 억제하는 것이 국내 대기질 보존을 위한 매우 중요한 요소임이 확인되었다. 중국 및 국내의 증설되는 주요 발전시설은 화석연료, 특히 석탄의 연소에 의한 배출이 중요한 부분을 차지하기 때문에 현재 관리되는 대기오염 물질들과 함께, 중금속 및 유해물질 등 부차적 미량 오염물질에 대한 건강 영향평가와 대책 수립이 시급하다고 할 수 있다.

주제어: 전력수급기본계획, 대기질, 대기오염 배출, 장거리 이동, 오존

| 차례 |

제1장 · 서론	1
1. 연구의 배경 및 필요성	1
2. 연구의 목적	4
3. 연구의 주요 내용	4
제2장 · 제6차 전력 수급 기본계획을 반영한 국내 대기오염 물질 배출량	5
1. 제6차 전력수급기본계획 개요	5
2. 제6차 전력수급 기본계획을 반영한 국내 대기오염 배출량 추정	8
가. 물질별 대기오염물질 배출량 변화 산정	9
나. 지역별 대기오염물질 배출량 변화 산정	13
제3장 · 동아시아 지역의 미래 대기오염 배출 시나리오	21
1. 동아시아 배출량 자료 인벤토리	21
2. 국제 에너지 기구(IEA)의 미래 에너지 소비 시나리오(BAU 시나리오)	22
가. 주요 에너지 수요	22
3. 동아시아의 저감 정책을 고려한 중국의 미래 배출 시나리오(PC 시나리오)	25
제4장 · 대기화학-수송 모형을 활용한 대기질 영향 분석	29
1. GEOS-Chem 모형의 개요와 활용	29
2. GEOS-Chem 수치모의 평가	31
가. 수치모의 평가	32
3. 주요 대기오염 물질의 수치모의 결과	35
가. Baseline 수치모의(2009년, INTEX-B Street 배출량 목록 사용)	35
나. 환경기준 초과일 수	41

다. 6차 전력수급계획에 따른 미래 대기질 변화(2027년)	43
라. 중국의 BAU 배출 시나리오(IEA)에 따른 2027년 국내 대기오염 전망 ..	45
마. 중국의 저감 시나리오(PC)에 따른 2027년 국내 대기오염 전망	48
바. 장거리 이동의 영향	50
사. 분석의 불확실성과 요인 및 추가 연구 사항	58
4. 소결	59
제5장 · 전력수급 기본계획의 환경적 평가	61
1. 전력 수급계획의 잠재적 대기질 영향	61
2. 배출량 및 인구를 고려한 대기영향 지표	63
3. 미국의 청정 발전 계획에 따른 감축 계획	72
제6장 · 결론 및 정책 제언	75
참고문헌	79
〈부록 1〉 전력 발전소 목록(2010 vs 2027)	83
〈부록 2〉 GEOS-Chem 의 Full chemistry에서 다루는 화학물질(tracer)	
목록	89
Abstract	95

| 표 차례 |

〈표 2-1〉 2010년 전국 주요 대기오염 배출원별 대기오염 물질 배출량	10
〈표 2-2〉 2010년과 2027년의 자자체별 종합 전력 통계량 비교	18
〈표 2-3〉 2011년 대비 2027년 지자체별 대기오염물질의 변화량	20
〈표 2-4〉 2011년 대비 2027년 지자체별 대기오염물질의 변화량	20
〈표 3-1〉 Wang, S. et al.(2014)에서의 에너지 및 배출 시나리오 대분류	26
〈표 3-2〉 본 연구에서 정의한 에너지 및 배출 시나리오 분류	28
〈표 3-3〉 본 연구의 PC 시나리오에 따른 2010년 대비 2027년 중국의 주요 대기오염 배출량 및 저감률	28
〈표 4-1〉 국내 대기환경기준	33
〈표 4-2〉 대기오염 측정망 설치현황	33
〈표 4-3〉 수치모의 검증에 위해 사용된 측정소 정보	34
〈표 4-4〉 2009년의 주요 연구 대상지역 연평균 농도	42
〈표 4-5〉 제6차 전력수급 기본계획에 의한 연구대상 지역의 연평균 농도 변화	44
〈표 4-6〉 IEA의 BAU 중국의 배출 시나리오에 따른 국내 주요 지역의 연평균 대기질 농도 변화량 추정	46
〈표 4-7〉 중국의 배출 저감 시나리오(PC)에 따른 국내 주요 지역의 연평균 대기질 농도 변화량 추정	49
〈표 5-1〉 석탄화력발전으로부터 배출되는 오염물질과 건강피해	62
〈표 5-2〉 미국의 청정 발전소 계획에 따른 (Clean Power Plan) 대기오염 물질 저감 계획(2030년까지)	73

| 그림차례 |

〈그림 1-1〉 서울과 세계 주요 대도시의 대기질 비교	1
〈그림 1-2〉 서울지역의 대기오염 기준 초과 일수 및 시간당 최대 농도	2
〈그림 1-3〉 2002년과 2012년의 전력 발전량 및 에너지원 구성 비율 변화 ..	3
〈그림 2-1〉 제6차 전력수요계획에 따른 전원구성비 전망	6
〈그림 2-2〉 제6차 전력수요계획에 따른 현재 및 신규 발전시설 발전량	7
〈그림 2-3〉 제6차 전력수요계획에 따른 전국 전원구성비 변화 전망	8
〈그림 2-4〉 CAPSS 2010의 전국 주요 대기 오염 배출원의 대기오염 물질 배출량 기여율(대분류기준)	10
〈그림 2-5〉 석탄, LNG, 석유의 대기오염물질별 배출량 비교	11
〈그림 2-6〉 제6차 전력수급 정책을 고려한 2010년 대비 2027년의 에너지산업 연소 부문의 대기오염물질별 배출량 및 증가율(배수)	12
〈그림 2-7〉 제6차 전력수급 정책에 의한 연간 대기오염물질별 배출총량 증가율	12
〈그림 2-8〉 전력수급기본계획에 따른 현재와 미래의 발전량 비교- 석탄 ..	15
〈그림 2-9〉 전력수급기본계획에 따른 현재와 미래의 발전량 비교- 석유 ..	16
〈그림 2-10〉 전력수급기본계획에 따른 현재와 미래의 발전량 비교- LNG ..	17
〈그림 2-11〉 국내 석유, 석탄, LNG의 단위발전량당 배출량 산정(kg/MW) ..	18
〈그림 3-1〉 IEA 신정책시나리오의 비 OECD 지역별 주요 에너지 수요	24
〈그림 3-2〉 IEA 신정책시나리오의 전 세계 주요지역 석탄화력 발전 ..	24
〈그림 3-3〉 Wang et al.(2014) 연구의 중국의 각 주요 부문별, 대기오염 물질별 배출량 전망(2005-2030)	27
〈그림 4-1〉 GEOS-Chem의 아시아 지역 중규모 대기질 모의의 지역범위와	

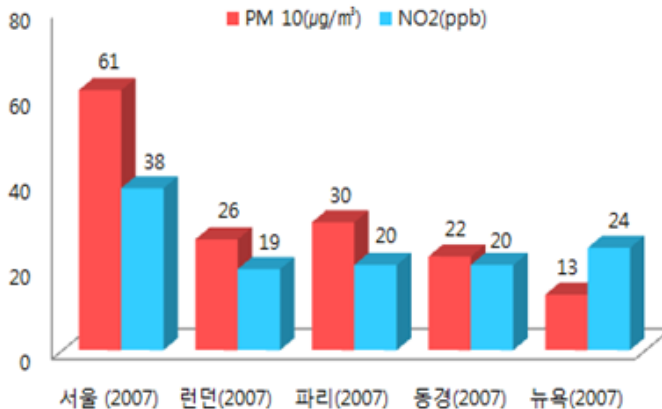
본 연구에서 국내 대기질 영향 분석을 위해 추출된 지역	31
<그림 4-2> 국내 4개 지역에 대한 GEOS-Chem 수치모의와 지표 농도 관측 값의 비교	37
<그림 4-3> <그림 4-2>와 같으며 이산화질소(NO_2)에 관한 결과	38
<그림 4-4> <그림 4-2>와 같으며 오존(O_3)에 관한 결과	39
<그림 4-5> <그림 4-2>와 같으며 미세먼지(PM_{10})에 관한 결과	40
<그림 4-6> 2009년 연구 대상 지역의 환경기준치(시간단위) 초과 일수	43
<그림 4-7> 전력 수급 기본계획에 따른 연구대상 지역의 환경기준치 초과 일수 증가	45
<그림 4-8> 중국의 배출량 증가 시나리오(BAU)에 따른 연구대상 지역의 환경 기준치 초과 일수	47
<그림 4-9> 중국의 배출량 저감 시나리오(PC)에 따른 연구대상 지역의 환경 기준치 초과 일수	49
<그림 4-10> 중국의 배출량 시나리오에 따른 동아시아 CO 농도의 비교	51
<그림 4-11> <그림 4-10>과 같음, 고도 약 4km 부근에서의 CO 농도	52
<그림 4-12> GEOS-Chem 모의로 계산한 2009년 동아시아 지역 CO의 컬럼 농도 중 중국의 배출이 차지하는 비율	54
<그림 4-13> GEOS-Chem 모의로 계산한 2009년 동아시아 지역 CO의 컬럼 농도 중 한국의 배출이 차지하는 비율	55
<그림 4-14> GEOS-Chem 모의로 계산한 2009년 동아시아 지역 지표 부근 CO 농도 중 중국의 배출이 차지하는 비율	56
<그림 4-15> GEOS-Chem 모의로 계산한 2009년 동아시아 지역 지표 부근 CO 농도 중 한국의 배출이 차지하는 비율	57
<그림 5-1> 2010년 일산화탄소(CO)의 광역지자체별 인구가중치 배출지수 (PWEI) 값	64

〈그림 5-2〉 2010년 질산화물(NO_x)의 광역지자체별 인구가중치 배출지수 (PWEI) 값	65
〈그림 5-3〉 2010년 미세먼지(PM_{10})의 광역지자체별 인구가중치 배출지수 (PWEI) 값	66
〈그림 5-4〉 2010년 황산화물(SO_x)의 광역지자체별 인구가중치 배출지수 (PWEI) 값	67
〈그림 5-5〉 2010년대비 2027년 전력발전 변화에 따른 일산화탄소(CO)의 광역지자체별 인구가중치 배출지수 변화값 (ΔPWEI) 값	68
〈그림 5-6〉 〈그림 5-5〉와 동일하나, 질산화물 (NO_x)의 ΔPWEI 값	69
〈그림 5-7〉 〈그림 5-5〉와 동일하나, 총먼지 (TSP)의 ΔPWEI 값	70
〈그림 5-8〉 〈그림 5-5〉와 동일하나, 황산화물(SO_x)의 ΔPWEI 값	71

| 제1장 · 서론 |

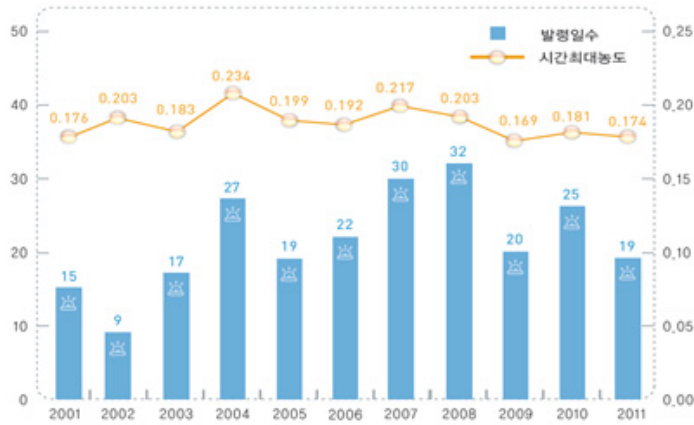
1. 연구의 배경 및 필요성

우리나라 수도권의 대기오염은 질산화물 및 미세먼지(particulate matter, PM) 등의 대기 오염물질을 기준으로 했을 때, 타 대륙의 주요 대도시의 2~3배를 초과하는 수준이며(OECD, 2008), 그 동안 작업장 배출저감 기술 및 청정에너지의 도입, 그리고 자동차 배출저감 기술 개발 및 보급 등에 의해 지난 10년간 CO, SO₂ 등의 일부 일차 대기오염 물질 농도의 뚜렷한 개선을 달성하였다(환경부, 2012). 그간에 노력에도 불구하고 국내 자동차 대수의 꾸준한 증가 및 에너지 수요 증가에 따른 발전 설비의 증가에 따라 질산화물(NO_x), 미세먼지 등의 농도는 뚜렷한 개선이 이뤄지지 않고 있으며, 오존 농도 역시 개선되고 있지 않은 실정이다(환경부, 2012).



자료: OECD(2008)를 재인용: 환경부(2011).

〈그림 1-1〉 서울과 세계 주요 대도시의 대기질 비교



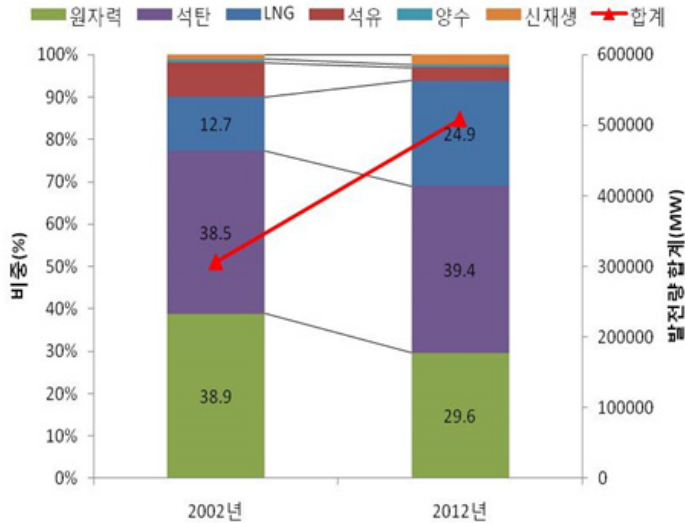
자료: 환경부(2013).

〈그림 1-2〉 서울지역의 대기오염 기준 초과 일수 및 시간당 최대 농도

대기오염물질 배출 중 에너지 산업연소 부분은 질산화물(NO_x), 황화물(SO_x) 등에 비교적 높게 기여하고 있으며, 탄소화합물 및 미세먼지 배출에도 관여하고 있다(국립환경과학원, 2011).

우리나라는 지난 약 10년간 전력 발전량이 급증하였다. 2011년의 국내 총 전력 소비량은 약 45만GWh로 2002년의 약 28만GWh 대비 약 60% 가량 증가하였다. 이는 세계 8위의 규모이다(지식경제부, 2013). 우리나라의 전력 소비량은 온실가스 배출과도 무관하지 않으며, 한국은 2012년 이후 세계 7위의 이산화탄소 배출국이다(Le Quéré et al., 2014).

우리나라는 그동안 전력 소비량 증가를 충당하기 위하여 원자력을 포함하여 석탄과 천연가스 등을 원료로 하는 발전소를 증설하였다. 특히 석탄과 천연가스(LNG)를 원료로 하는 전력 발전이 크게 증가하여, 지난 10년간 전체 전력 수급 에너지원 중에서 화석연료인 석탄과 LNG의 비중이 2002년 약 51%에서 2012년 64%로 증가하였다(지식경제부, 2013, 그림 1-3 참조). 그러나 이러한 전력수급을 위한 화석연료를 사용한 발전량의 증가는 각종 대기오염 저감 정책에도 불구하고 국내 대기질을 악화시킬 가능성이 있다.



자료: 지식경제부(2013).

〈그림 1-3〉 2002년과 2012년의 전력 발전량 및 에너지원 구성 비율 변화

2013년 2월, 정부는 제6차 전력 수급 기본계획(2013-2027)을 발표하였다. 이 계획에 따르면 2027년에 전력수요가 약 77만GWh로 2012년 대비 약 60% 이상 증가할 것으로 예상된다. 또한 전력수급의 에너지원 구성 중 여전히 석탄과 천연가스의 비중이 높기 때문에 향후 배출량과 함께 발전소 위치 변화에 따른 국내 대기질 영향을 정량적으로 파악할 필요가 있다.

2013년 9월에 공표된 상위 계획인 정부의 제2차 국가 에너지 기본계획에 따르면, 2035년까지 우리나라는 총 에너지 수요가 2011년 대비 약 21% 증가할 것으로 전망되었으며, 특히 전력 수요는 약 80%로 눈에 띄는 증가가 예상되었다(산업통상자원부 민관합동 워킹그룹, 2013). 이러한 전기에너지 의존도 심화는 에너지 산업연소에 따른 대기오염 배출량에 영향을 줄 것이다.

또한 우리나라는 중국에서 배출되는 다양한 1차, 2차 대기오염물질의 장거리 이동에 의한 영향을 받기 때문에, 미래 국내 대기질의 예측을 위해서는 중국과 같은

인접국의 배출량 변화 전망을 고려하여 전력 수급 대책에 따른 대기 환경 전망을 수행할 필요가 있다.

2. 연구의 목적

본 연구는 우리나라의 급증하는 미래 전력 수급 증가에 따른 전력산업에서의 배출량 증가와 함께, 미래 인접국인 중국의 배출량 변화를 함께 고려한 미래 수도권 중심의 대기질 변화를 예측해 보고 이에 대한 에너지 및 대기환경 정책에 대한 논의를 하고자 한다. 특히 오존 및 오존 전구물질과 미세먼지의 변화를 시공간적으로 정량 분석함으로써 미래 주요 발전설비 증가에 따른 대기질 전망과 함께 미래 에너지 수급 정책에 따른 환경 정책의 방향에 대해 논의하는 것에 목적을 두었다고 할 수 있다.

3. 연구의 주요 내용

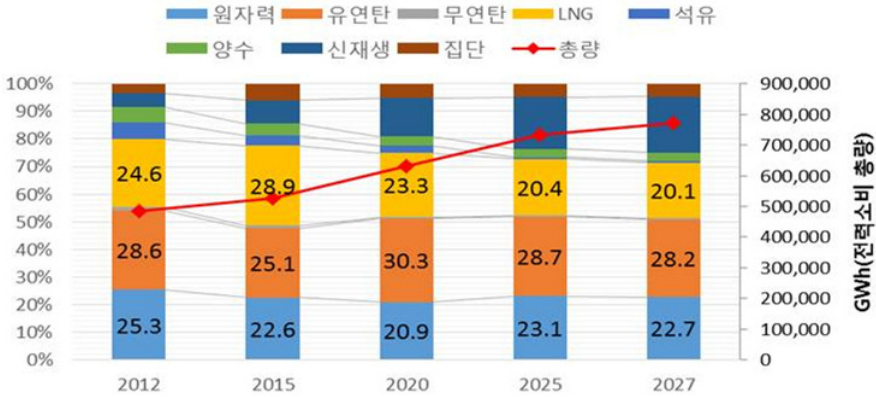
2장에서는 제6차 전력수급 기본계획에 따른 전력발전량 변화를 국내 대기 오염물질 배출량과 비교하여 제6차 기본계획의 마지막 연도인 2027년의 대기오염 배출량 변화를 지자체별로 산정하였다. 제3장에서는 중국의 미래 배출량변화가 국내 대기질에 미치는 영향을 파악하기 위하여 국제에너지기구(IEA)의 미래 에너지 사용에 따른 배출 시나리오와 최근 중국과 유럽 중심의 공동 프로젝트가 작성한 미래 에너지 시나리오를 각각 분석하였다. 제4장에서는 대기화학 수송모형인 GEOS-Chem에 각각의 배출량 시나리오를 도입하여 수치모의한 결과를 중심으로 보고하였다. 그리고 수치 모델의 검증과 함께, 2027년 제6차 전력수급 기본계획에 따른 국내 주요 지역의 대기오염 실태 변화, 그리고 중국의 배출량 변화에 따른 국내 주요 지역의 대기환경 기준치 초과일수 변화 등을 살펴보았다. 제5장에서는 제6차 전력수급 기본계획과 관련된 오염물질의 노출인구를 고려한 영향을 중심으로 살펴보았다. 이를 통한 주요 정책 추진 시 고려사항과 미국 등 주요국의 청정에너지 발전 계획에 대한 현황도 함께 소개하였다.

| 제2장 · 제6차 전력 수급 기본계획을 반영한 국내 대기오염 물질 배출량 |

1. 제6차 전력수급기본계획 개요

산업통상부(전 지식경제부)에서는 전력수급 안정을 위해(「전기사업법」 제25조) 기본계획은 15년을 기준으로 2년 단위로 수립·이행하여 목표계획 및 실행계획을 세우고 있다(「전기사업법 시행령」 제15조). 2013년 2월 산업통상부는 제6차 전력수급기본계획(2013~2027년)을 확정·발표하였으며 수요계획 및 설비계획 2개 소위원회를 중심으로 2027년까지의 전력수요전망, 수요관리목표, 적정 예비율, 전원믹스, 신재생비중, 발전소 건설계획 등을 제시하였다. 6차 전력수급기본계획에 따르면 우리나라의 전력수요는 연평균 4%의 증가율로 2027년에 약 77만GWh로 현재보다 약 60% 증가할 것으로 예상하였다(그림 2-1 참조).

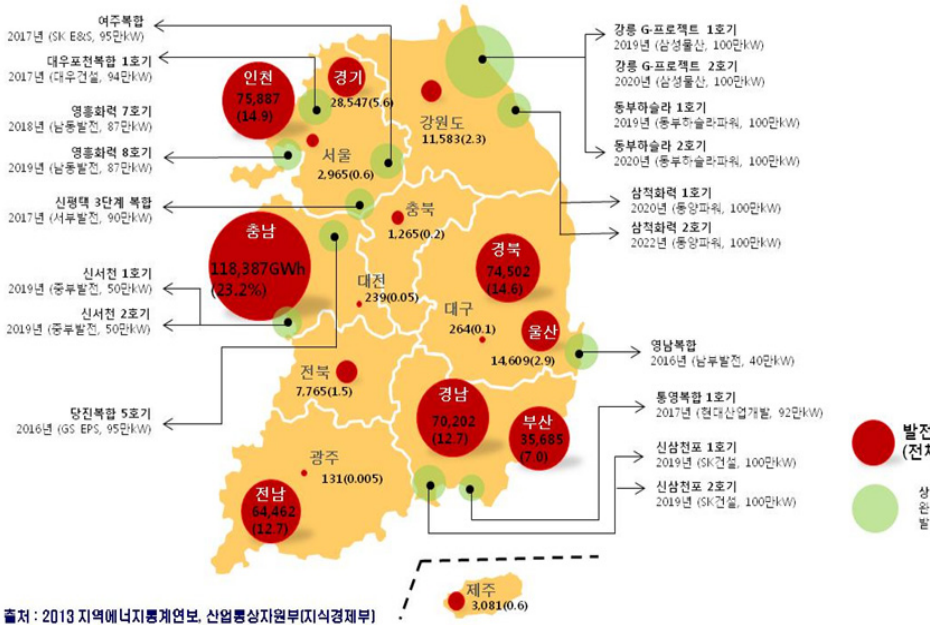
<그림 2-1>에서 보여주는 것처럼 현재에 비해 향후 전력수급은 점차 신재생에너지의 비율(2027년 12.6%)이 높아질 것으로 예상되고 있다. 그러나 석탄, LNG, 석유를 포함하는 화석연료의 의존도는 전체 에너지 구성 중 2012년 약 60%에서 2027년에는 약 50%로 소폭 줄어들 전망이나, 전체 전력소비량이 크게 증가하기 때문에 2027년의 화석에너지 사용량은 2012년 대비 약 58% 증가하게 될 전망이다(지식경제부, 2013). 이는 정부의 온실가스 저감 목표에 배치되는 전망이며, 정부의 제2차 국가 에너지 기본계획에서 전기 에너지 사용이 크게 증가하는 것과 맥락을 같이한다. 대기오염 및 온실가스를 배출하지 않는 원자력 발전량은 그 비중이 2027년에 22.7%로 다소 감소할 전망이나, 총 발전용량은 2027년 약 3만 6천MW로 2012년 보다 약 73% 늘어날 전망이어서 우리나라의 전력수요 급증에 따른 모든 전원구성의 부담이 증가하는 것으로 나타났다(지식경제부, 2013).



자료: 지식경제부(2013)에서 재구성.

〈그림 2-1〉 제6차 전력수요계획에 따른 전원구성비 전망

정부는 전력수요를 만족시키기 위해 2027년까지 화력설비 18기(총 1,580만kW)를 신규로 증설할 계획이다. 신규 발전시설은 공기업 4개사에서 총 6기(404만kW)와 민간발전사 8개사에서 총 12기(1,176만kW)를 증설할 예정이다. 전력수급기본계획(2013)에 따르면 현재 충남지역의 발전량이 118,387GWh(23.2%)로 가장 높은 발전량을 가지고 있으며, 이 계획대로라면 2027년까지 강원도, 충청남도, 인천, 경기도 지역에 발전소의 증설이 집중될 것으로 예상된다(그림 2-2 참조).

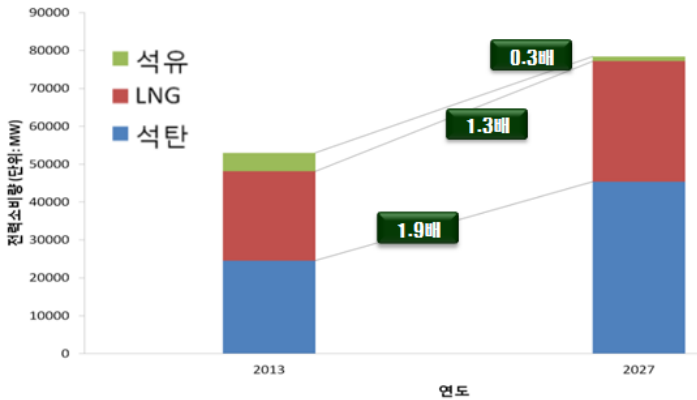


자료: 지역에너지통계연보(2014)에서 저자 재구성.

<그림 2-2> 제6차 전력수요계획에 따른 현재 및 신규 발전시설 발전량(총 18기)

2. 제6차 전력수급 기본계획을 반영한 국내 대기오염 배출량 추정

본 연구에서는 정부의 미래 전력수급 기본계획에 따라서 전력 발전소에서 전력공급원으로 사용되는 석탄, 석유, LNG의 연료 사용 변화량을 산정하여 2027년의 전원구성비 변화에 따라서 미래의 대기 중의 오염물질별 농도 변화를 평가할 것이다. 제6차 전력수급계획에 따르면 2027년까지 전국 단위의 전원구성비는 석탄과 LNG의 경우 1.9배(20,860ton), 1.3배(8,220ton) 증가하며, 석유는 0.3배(3,641ton) 감소할 것으로 전망되었다(그림 2-3 참조)(지식경제부, 2013). 즉, 석탄과 LNG의 의존도가 증가하며, 특히 석탄화력의 증가가 두드러지는 것으로 나타났다.



자료: 지식경제부(2013)에서 저자 재구성.

〈그림 2-3〉 제6차 전력수요계획에 따른 전국 전원구성비 변화 전망(석탄, LNG, 석유)

가. 물질별 대기오염물질 배출량 변화 산정

국립환경과학원에서는 1999년부터 대기오염물질을 대상으로 배출량을 산정하는 국가대기오염물질 배출량 대기정책지원시스템(Clenal Air Policy Support System, CAPSS)을 운영하고 있다. 대기오염물질은 주로 CO(일산화탄소), NO_x(질산화물), SO_x(황산화물), TSP(먼지총량), PM₁₀(직경 10 μ m 이하의 미세먼지), VOC(휘발성 유기 화합물)를 대상으로 하며, 2011년 PM_{2.5}(직경 2.5 μ m 이하의 초미세먼지)를 추가로 산정하였다. 국립환경과학원(2013)에서는 오염물질별 배출원의 구성을 목록화하였다. 물질별로는 우리나라에서 NO_x의 배출이 100만 톤을 넘어 가장 많은 배출량을 기록하고 있다(표 2-1 참조). 이는 자료조사 이후 꾸준히 감소하였으나, 그 저감 폭이 뚜렷하지 않다. 그 다음으로는 CO와 VOC가 각각 76만 톤, 86만 톤을 배출하고 있다.

<그림 2-4>에서는 배출원별 배출량 비율을 보여주고 있다. 대기 중 오존의 형성에 영향을 줄 수 있는, 물질의 지표가 되는 NO_x와 CO는 자동차 연소 등에서 배출되는 도로이동오염원에서 각각 68%, 36%로 압도적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 건강 영향에 지표가 될 수 있는 물질 중 하나인 PM₁₀의 배출은 제조업 연소에서 가장 큰 비중(65%, 그림 2-4 참조)을 차지하고 있는 것으로 나타났다. 본 연구와 직접 관련이 있는 에너지 산업연소의 경우, 황산화물의 배출 기여가 가장 컸으며(20%), 질산화물(14%), 일산화탄소(7%), 그리고 PM₁₀(2%)의 순서로 나타났다(그림 2-4 참조). CAPSS 자료에 따르면 연료별 대기오염 구성 물질은 석탄 및 석유의 경우 NO_x, SO_x, CO의 배출이 상대적으로 많으며, LNG의 경우 NO_x, CO가 대부분을 차지하였다. 에너지 산업 연소 부문에서의 먼지의 배출은 크지 않았다(그림 2-5 참조).

상기의 배출원별, 연료별 배출량에 전력수급기본계획의 전원 구성 비율의 변화를 적용 시키면 미래(2027년)의 전국의 주요 대기오염 배출량의 변화를 추정할 수 있다.

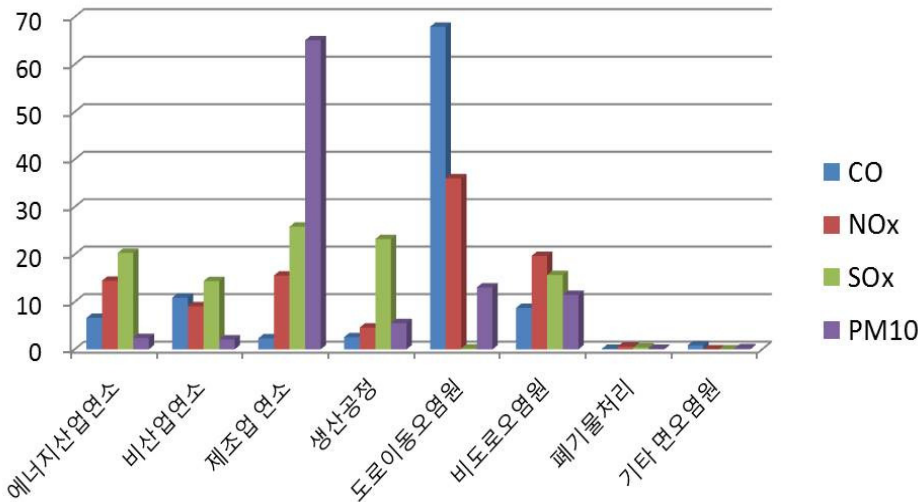
〈표 2-1〉 2010년 전국 주요 대기오염 배출원별 대기오염 물질 배출량(대분류기준)

(단위: ton)

2010	CO	NOx	SOx	PM10
에너지산업연소	50,629	153,441	81,589	2,816
비산업연소	83,435	96,480	57,810	2,421
제조업 연소	17,706	164,942	103,733	76,011
생산공정	19,719	49,022	93,365	6,451
도로이동오염원	520,386	382,226	798	15,255
비도로오염원	66,793	208,878	62,919	13,401
폐기물처리	955	6,062	1,528	165
기타 면오염원	6,645	158	0	288
합계	766,268	1,061,209	401,742	116,808

자료: 국립환경과학원(2013)에서 저자 재구성.

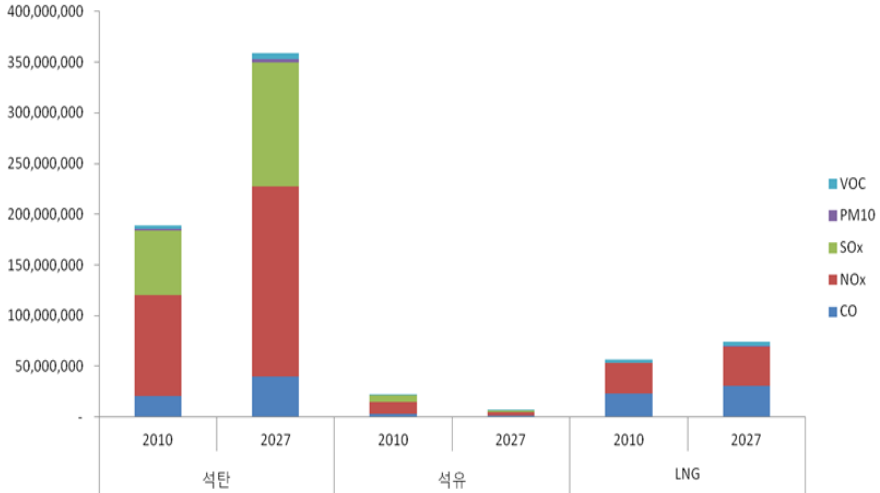
(단위: %)



자료: 국립환경과학원(2013)에서 저자 재구성.

〈그림 2-4〉 CAPSS 2010의 전국 주요 대기 오염 배출원의 대기오염 물질 배출량 기여율(대분류기준)

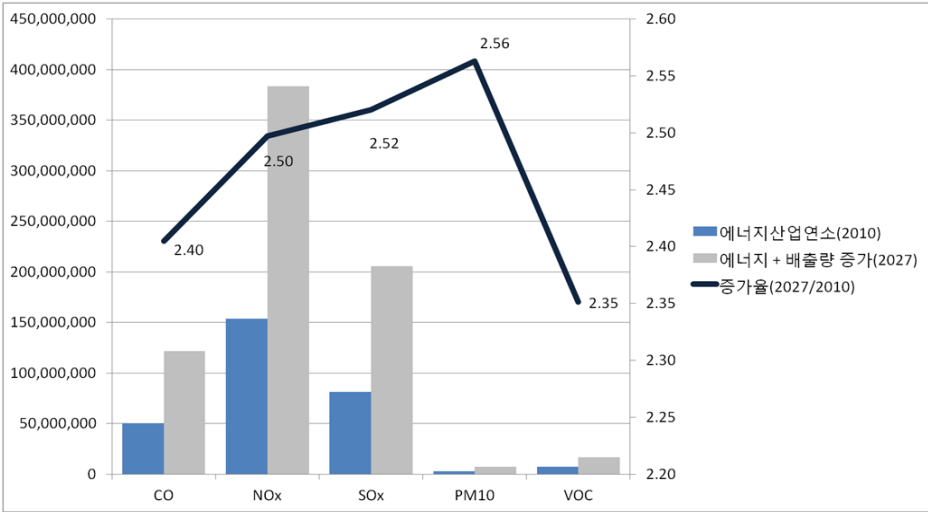
(단위: kg)



자료: 국립환경과학원(2013)에서 저자 재구성.

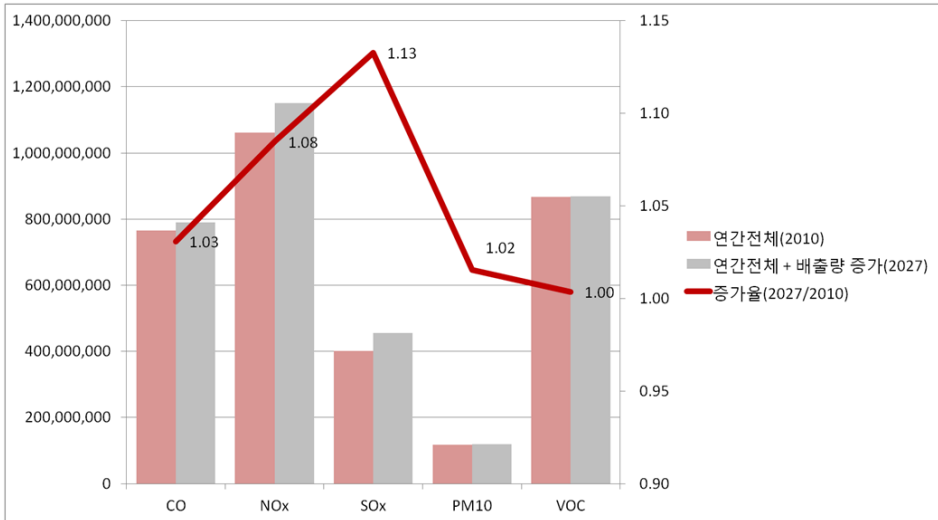
〈그림 2-5〉 석탄, LNG, 석유의 대기오염물질별 배출량 비교

앞서 설명한 바와 같이 전력 연료구성을 고려한 계산한 결과, 제6차 전력수요를 고려한 2027년에는 에너지산업 부문에서 2010년 대비 2027년 대기오염 배출량의 증가율은 모든 물질에서 2배 이상으로 늘어나며, 특히 석탄 연소에 직접 영향을 미치는 NO_x, SO_x, CO의 비중이 가장 높게 나타났다(그림 2-6 참조). 물질별 전국 배출 총량기준으로 보면, SO_x와 NO_x는 각각 1.13배, 1.08배 증가할 것으로 예상되며, CO, PM₁₀, VOC는 그 변화의 폭이 각각 3%, 2%, 1% 이하로 상대적으로 적을 것으로 전망되었다(그림 2-7 참조). 국가 전체 대기오염 배출량을 기준으로 했을 때 약 1.05배(5%) 증가할 것으로 추정되었다.



자료: 저자 작성.

〈그림 2-6〉 제6차 전력수급 정책을 고려한 2010년 대비 2027년의 에너지산업 연소 부문의 대기오염물질별 배출량 및 증가율(배수)



자료: 저자 작성.

〈그림 2-7〉 제6차 전력수급 정책에 의한 연간 대기오염물질별 배출총량 증가율(배수)

나. 지역별 대기오염물질 배출량 변화 산정

본 연구에서는 제6차 전력수급기본계획의 미래 지역별 배출량 변화가 대기질에 미치는 영향을 평가하기 위해 대기화학-수송 모델의 입력 자료를 산정하였다. 입력자료 산정은 지역별 대기오염 배출량 변화를 고려해야 하며, 중해상도 규모의 대기화학 수송 모형(GEOS-Chem)의 격자 단위크기(약 50×60km)를 고려하여 우리나라의 광역 지자체 수준으로 산정하였다. 이를 위해 2011년 대기오염물질 배출량을 기준으로 2027년의 지역별 대기오염물질 배출량 변화를 산정하였다. 먼저 전력수급기본계획에 따라 2027년의 전력 발전사용량을 광역 지자체별로 예상하였다. 현재 운영 중인 전국 발전량 현황은 전력통계정보시스템(<https://epsis.kpx.or.kr>)에서 모든 지역별로 조사하였으며, 2011년의 발전소 현황을 조사하였다. 현재 주요 발전 원료에 대한 대기오염물질 배출량은 2011년의 CAPSS를 기준으로 석탄, 석유, LNG의 기준 전력 설비용량당 배출량을 산정하였다(국립환경과학원, 2013).

<그림 2-7>부터 <그림 2-10>까지 지역별 석탄, 석유, LNG의 전력설비 현황과 변화를 보여주고 있다. 각 그림에서 왼쪽은 2011년의 석탄, 석유, LNG 에너지원의 지역별 분포를 보여주며, 오른쪽은 전력수급기본계획에 따른 2027년의 폐기 및 신설되는 발전소를 나타내었다. <표 2-2>에서는 광역 지자체별 2011년과 2027년의 전력 발전량을 대조하였으며, 모든 발전소에 대한 정보는 부록에 정리·수록하였다.

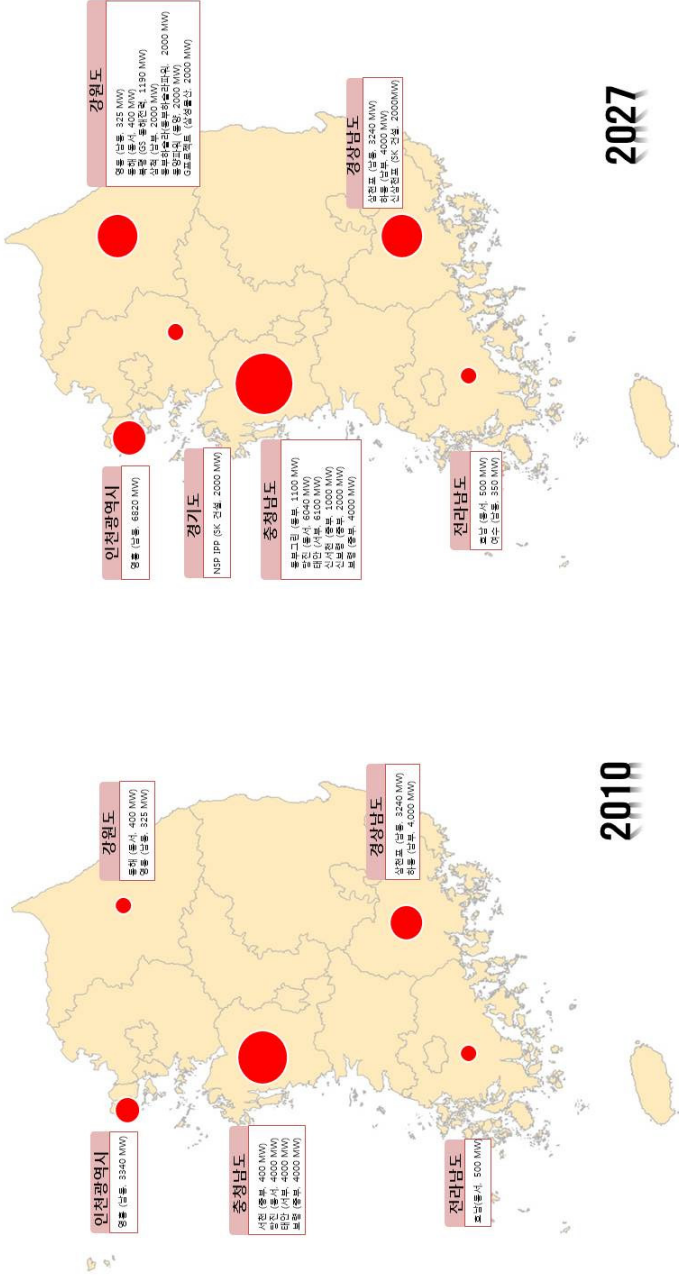
대기오염물질 배출량(CO, NO_x, SO_x, TSP) 중에서 석탄, 석유, LNG 원료에 대한 광역 지자체별 단위 발전량당 배출량(배출계수)을 산정하기 위해 현재의 발전량과 CAPSS 배출량 중 에너지 산업부문의 배출목록을 대조·분석하였다. 전력량당 배출계수는 단위 발전량(MW = 1,000,000Watt)에 해당하는 대기오염물질 배출량(kg)을 산정하였다(단위: kg/MW).

미래의 전력설비는 지자체별로 상이하게 될 것이므로 적용될 단위 발전량당 연료별 배출계수는 전국 평균값을 사용하였다. 그리고 현재 각 지역별 발전설비 시설이 상이하기 때문에 배출계수 값의 차이가 많이 나므로, 적용될 배출계수는 각 지자체 배출계수 중

중간값(median)을 선택하였다. <그림 2-11>에서는 주요 화석연료의 단위 발전량 (MW)당 대기오염 배출량을 나타내고 있다. 석탄의 경우 배출계수가 일반적으로 가장 높게 평가되었으며, NO_x와 SO_x에서 각각 4,961kg/MW, 1,657kg/MW을 나타내었다.

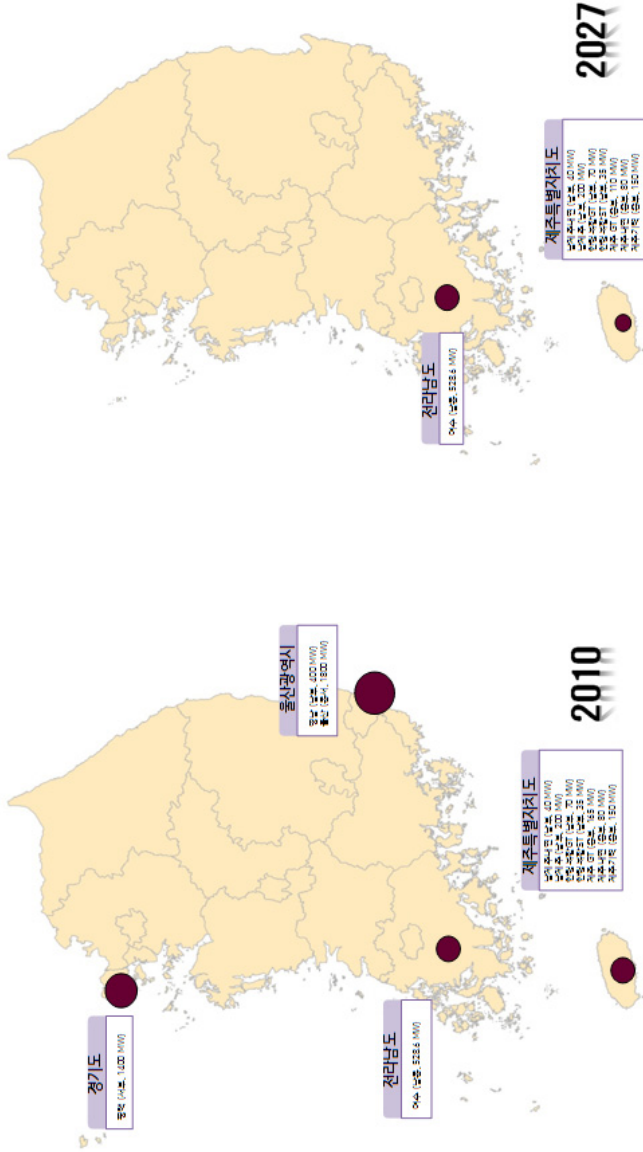
지역별로 전력수급 계획에 따른 배출량 변화를 살펴보면 다음과 같다. 강원도는 주로 삼척과 동해시에 석탄화력 중심으로 증설이 계획되어 있다(부록 참조). 이는 2011년 대비 약 9,000MW에 상당하는 석탄화력 발전시설이며, 연간 배출량은 CO, NO_x, SO_x, TSP는 각각 약 8,000톤, 45,000톤, 27,000톤, 1,300톤의 증가가 예상된다(표 2-3 참조). 이는 강원지역의 배출량 증가에 큰 영향을 미칠 것으로 예상되며 2011년 대비 CO는 27%, NO_x는 47%, SO_x는 50%, TSP는 2% 증가에 해당되는 것이다. 강원도는 시멘트 산업 등에서 이미 전국에서 가장 높은 수준의 TSP를 배출하고 있으므로 1,300톤의 먼지 증가에도 불구하고 그 비율 변화는 높지 않은 것으로 나타났다(표 2-3 참조). 인천은 주로 영흥도의 석탄화력 중심으로 계획되어 있다(부록 참조). 이는 2011년 대비 약 3,500MW에 상당하는 발전설비 증가이나, 인천지역은 포스코 LNG 복합 발전소의 퇴역이 예상되어 있어 이로 인한 약 2,000MW의 감소분이 있다. 따라서 연간 배출량은 CO, NO_x, SO_x, TSP가 각각 약 270톤, 14,000톤, 10,000톤, 440톤의 증가가 예상된다(표 2-3 참조). 이는 수도권 지역의 NO_x와 SO_x의 배출량 증가에 따른 환경영향을 초래할 가능성을 내포하고 있다. 현재와 비교한 배출량 비율로는 2011년 대비 CO는 유사한 수준이며, NO_x는 30%, SO_x는 57%, TSP는 17%에 해당되는 것이다.

경기도는 수도권의 인구를 고려하여 석탄화력 증설이 계획되어 있지 않지만, 여주, 포천, 평택 지역에 LNG 중심의 복합 발전이 신규로 계획되어 있다(부록 참조). 이는 2011년 대비 약 9,000MW에 증가된 발전시설이다.



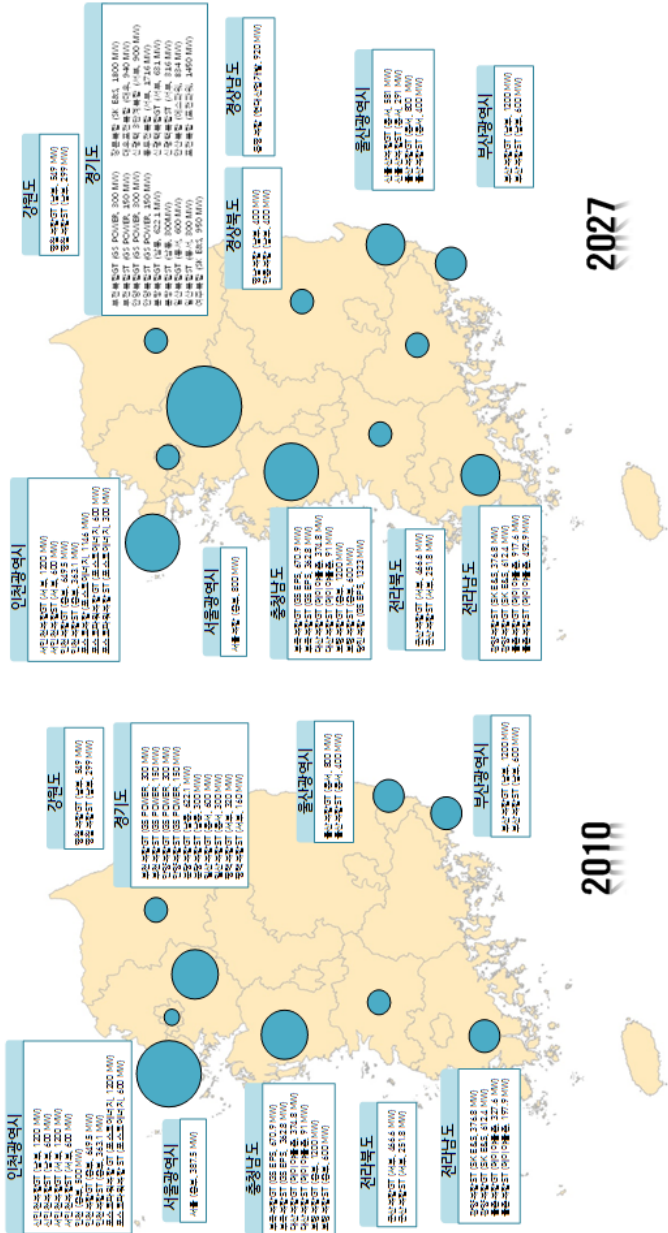
자료: 지식경제부(2013)를 바탕으로 저자 재구성.

〈그림 2-8〉 전력수급기본계획에 따른 현재와 미래의 발전량 비교 - 석탄



자료: 지식경제부(2018)를 바탕으로 저자 재구성.

〈그림 2-9〉 전력수급기본계획에 따른 현재와 미래의 발전량 비교 - 석유



자료: 지식경제부(2013)를 바탕으로 저자 재구성.

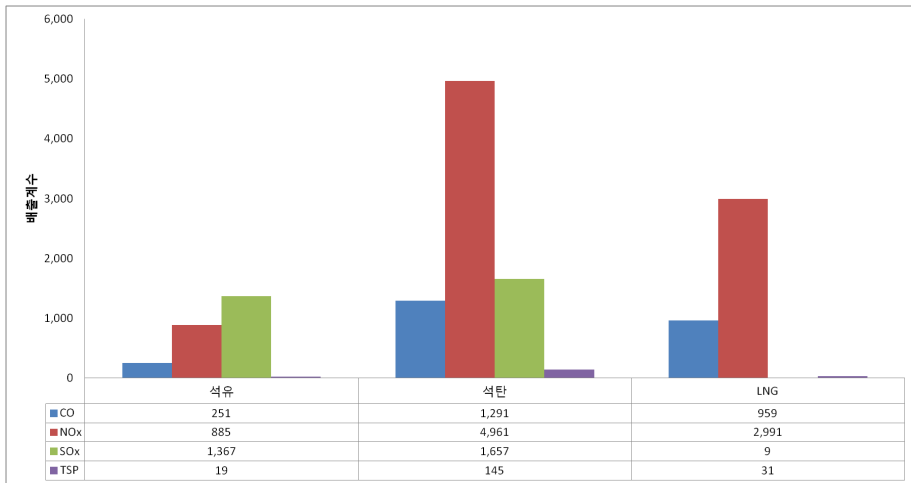
〈그림 2-10〉 전력수급기본계획에 따른 현재와 미래의 발전량 비교 - LNG

〈표 2-2〉 2010년과 2027년의 자자체별 종합 전력 통계량 비교

(단위: MW)

지역	2010			2027		
	석탄	석유	LNG	석탄	석유	LNG
강원	725.0	-	848.0	9,915.0	-	848.0
경기	-	1,400.0	3,202.1	-	폐기	12,259.1
경남	7,240.0	-	-	9,240.0	-	920.0
경북	-	-	-	-	-	800.0
부산	-	-	1,800.0	-	-	1,800.0
서울	-	-	387.5	-	-	800.0
울산	-	2,200.0	1,200.0	-	폐기	2,072.0
인천	3,340.0	-	6,912.4	6,820.0	-	4,858.4
전남	500.0	528.6	1,514.7	850.0	528.6	2,399.7
전북	-	-	718.4	-	-	718.4
제주	-	740.0	-	-	685.0	-
충남	12,400.0	-	3,299.6	20,240.0	-	4,622.6

자료: 지식경제부(2013)에 근거하여 저자 재구성.



자료: 저자 작성.

〈그림 2-11〉 국내 석유, 석탄, LNG의 단위발전량당 배출량 산정(kg/MW)

경기도는 약 1,400MW의 석유 발전용량 시설을 폐기할 계획이다. 이를 모두 고려한 경기도의 연간 배출량은 CO, NO_x, SO_x, TSP가 각각 약 12,000톤, 13,000톤, -1,200톤, 250톤의 증가가 예상된다(표 2-3 참조). 이런 증가는 SO_x의 감소 예상에도 불구하고 이미 교통부분 등의 배출량이 많은 수도권 지역의 NO_x 배출량을 가중시킬 것으로 우려된다. 경기도의 전력수급 계획에 따른 배출량 변화는 2010년 대비 CO는 10%, NO_x는 9%, SO_x는 -8%, TSP는 4%에 해당된다.

충청남도는 석탄화력과 LNG 복합발전이 모두 증설될 것으로 예상되며 당진, 태안지역의 석탄화력 중심의 증설의 영향을 받을 것으로 예상된다(부록 참조). 이는 2010년 대비 약 9,000MW에 상당하는 발전시설 증가이며, 연간 배출량은 CO, NO_x, SO_x, TSP가 각각 약 9,000톤, 41,000톤, 23,000톤, 1,200톤의 증가가 예상된다(표 2-3 참조). 이는 충남지역의 기존 배출량 증가에 상당한 영향을 미칠 것으로 예상되며 2010년 대비 CO는 16%, NO_x는 33%, SO_x는 41%, TSP는 19%에 해당되는 것이다.

전력수급기본계획에 따른 2011년과 2027년의 광역 지자체별 배출량 변화와 그 비율 증감(%)에 대한 정보를 <표 2-3>과 <표 2-4>에 설명하였다. 이와 같은 광역 지자체별 배출량 변화비율은 대기화학-수송 모형의 각 지자체에 해당되는 그리드의 배출량 변화에 적용되어 대기질 모의를 통한 미래 주요 대기질 농도변화를 예측하는 데에 활용되었다. 제4장에 이를 반영한 결과를 설명할 것이다.

〈표 2-3〉 2011년 대비 2027년 지자체별 대기오염물질의 변화량

(단위: ton/yr)

광역지자체	CO			NOx			SOx			TSP		
	2011	2027	'27-'11	2011	2027	'27-'11	2011	2027	'27-'11	2011	2027	'27-'11
서울특별시	113,309	113,874	565	62,067	62,751	684	5,124	5,128	4	1,805	1,818	13
부산광역시	37,743	37,743	0	52,764	52,764	0	32,615	32,615	0	3,244	3,244	0
대구광역시	33,058	33,058	0	22,529	22,529	0	4,226	4,226	0	1,559	1,559	0
인천광역시	41,491	41,764	273	45,315	59,176	13,861	18,516	28,906	10,390	2,502	2,943	441
광주광역시	14,487	14,487	0	11,077	11,077	0	932	932	0	454	454	0
대전광역시	19,709	19,709	0	14,617	14,617	0	1,610	1,610	0	619	619	0
울산광역시	31,094	31,733	639	54,463	53,068	-1,395	60,621	58,518	-2,103	4,484	4,469	-15
경기도	121,171	133,199	12,028	156,612	169,815	13,203	16,959	15,695	-1,264	6,268	6,521	253
강원도	30,618	38,752	8,134	96,365	141,959	45,594	54,695	82,182	27,487	79,180	80,513	1,333
충청북도	32,187	32,187	0	59,680	59,680	0	12,946	12,946	0	7,847	7,847	0
충청남도	52,307	61,055	8,748	125,981	167,070	41,089	57,312	80,773	23,461	6,270	7,448	1,178
전라북도	29,872	29,872	0	38,919	38,919	0	9,569	9,569	0	4,892	4,892	0
전라남도	39,535	41,054	1,519	103,861	107,064	3,203	89,198	90,253	1,055	48,274	48,352	78
경상북도	59,616	60,710	1,094	90,745	92,071	1,326	36,205	36,212	7	29,250	29,275	25
경상남도	50,823	53,851	3,028	90,671	102,119	11,448	30,954	36,944	5,990	4,542	4,860	318
제주도	11,324	11,310	-14	14,549	14,478	-71	2,477	2,424	-53	620	619	-1

자료: 저자 작성.

〈표 2-4〉 2011년 대비 2027년 지자체별 대기오염물질의 변화량

(단위: 백분율 %)

지역	CO				NOx				SOx				TSP			
	석유	석탄	LNG	종합	석유	석탄	LNG	종합	석유	석탄	LNG	종합	석유	석탄	LNG	종합
서울	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-	1	1
부산	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
대구	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
인천	-	7	(-7)	0	-	38	(-8)	30	-	56	1	57	-	20	(-3)	17
광주	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
대전	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
울산	(-2)	-	4	2	(-5)	-	3	(-2)	(-3)	-	-	(-3)	(-1)	-	1	-
경기	-	-	10	10	(-1)	-	10	9	(-8)	-	-	(-8)	-	-	4	4
강원	-	27	-	27	-	47	-	47	-	50	-	50	-	2	-	2
충북	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
충남	-	13	3	16	-	31	2	33	-	41	-	41	-	18	1	19
전북	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
전남	-	1	3	4	-	2	1	3	-	1	-	1	-	-	-	-
경북	-	-	2	2	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-
경남	-	4	2	6	-	10	2	12	-	19	-	19	-	6	1	7
제주	-	-	-	-	-	-	-	-	(-2)	-	-	(-2)	-	-	-	-

자료: 저자 재구성, 음수는 괄호로 표시함.

| 제3장 · 동아시아 지역의 미래 대기오염 배출 시나리오 |

1. 동아시아 배출량 자료 인벤토리

최근 중국이 주도하고 있는 동아시아의 대기오염 배출은 유럽과 미국을 크게 능가하는 수준으로, 전 세계 SO₂, NO_x, PM_{2.5} 배출량의 36%, 29%, 36%를 각각 차지하고 있는 실정이다(Cofala. et al., 2012). 미래의 국내 대기질을 예측하기 위해서는 비단 국내 배출량의 변화뿐만 아니라 인접국인 동시에 현재 세계에서 대기오염물질을 가장 많이 배출하고 있는 중국의 배출량 추이를 고려하는 것이 필요하다. 이는 중국의 배출량 증감에 따라 국내 대기질의 민감도(sensitivity)를 사전에 조사함으로써 대기환경을 관리하기 위한 국내 대기질 관리 정책을 논의하는 데 매우 중요한 작업이라고 할 수 있다. 본 장에서는 대기질 모의에 활용된 동아시아(중국)의 배출 인벤토리에 대한 설명과 동시에, 미래 배출량 변화를 전망한 시나리오에 대한 설명을 하도록 하겠다.

본 연구는 GEOS-Chem 수치모의를 위해 동아시아 지역의 대기오염 배출량으로 INTEX-B(Intercontinental Chemical Transport Experiment Phase B) 프로젝트를 통해 추정된 Zhang, Q. et al.(2009)의 배출 인벤토리를 동아시아 지역에 적용하였다(Street 인벤토리). Street 인벤토리는 미국과 중국의 공동 연구로 북태평양 지역의 대류권의 대기질 항공기 관측과 위성자료를 중심으로 대기오염 물질의 장거리 수송현상을 물리적으로 역추정하여 동아시아의 대기오염 물질을 추정한 것이다(Zhang, H. et al, 2012; 나유경 외, 2013). 이 프로젝트의 대상 오염물질은 총 8가지(SO₂, NO_x, CO, PM_{2.5}, PM₁₀, NMVOC, BC, OC)이고, 구축된 공간해상도는 약 0.5°×0.5° 이며 한,중,일을 포함한 동남아시아 지역을 포함하고 있다. 대기오염 배출량은 인위적 배출원(Anthropogenic emission)으로 총 4가지 부문(Power, Industry, Residential, Transportation)이 포함되었고, 자연적 배출원(예, 산림화재 및 생물연소)에 대한 부분은 포함되지 않았다. 본

연구에서는 이 배출량 데이터를 GEOS-Chem 대기화학수송 모델의 입력 자료로 만들기 위하여 해상도 $0.5^{\circ} \times 0.666^{\circ}$ 로 샘플링하여 재구축된 자료를 모델링에 적용하였다.

2. 국제 에너지 기구(IEA)의 미래 에너지 소비 시나리오(BAU 시나리오)

Street 인벤토리를 현재의 대기질을 검증하기 위해서 활용하였다면, 미래의 중국의 배출량 변화를 추정하기 위해서 국제적으로 공개된 연구 자료를 활용하는 것이 타당하다. 본 연구에서는 국제에너지기구(International Energy Agency, IEA)에서 발표한 2012 세계 에너지전망(World Energy Outlook 2012)자료를 참고하였다. IEA 자료는 향후 25년간의 에너지 수요추이를 전망하여 에너지 안보, 환경 및 경제발전 등에 미치는 영향을 고려해 작성되었다. IEA 자료는 정부 정책을 가정하여 네 가지 에너지 소비 시나리오에 대한 추정을 제시하고 있다. 이 중에서 신정책시나리오(New Policies Scenario)는 발표된 정책들뿐만 아니라, 이미 시행중인 폭넓은 에너지 관련 정책적 약속과 계획을 고려한 시나리오로서 현재 약속과 계획의 점진적인 시행을 가정한다(IEA, 2012; 심창섭 외, 2013). 본 연구에서는 국제에너지기구(2012)에서 현실성이 높다고 인정한 신정책시나리오를 근거로 2027년 미래 중국 등의 에너지 소비전망을 바탕으로 배출량을 가정, 적용하였다(이하 BAU 시나리오).

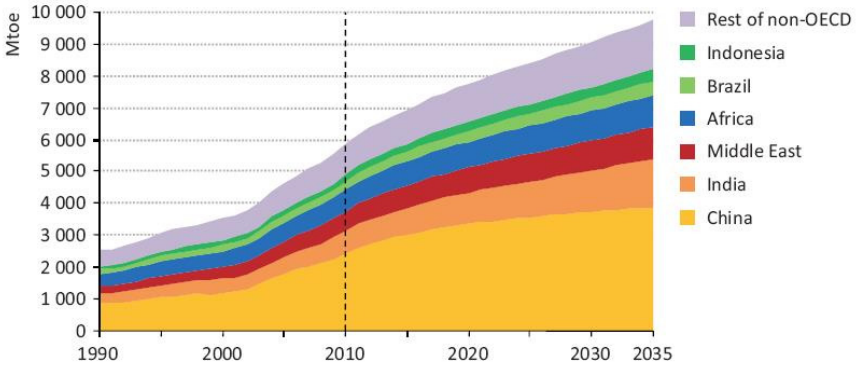
가. 주요 에너지 수요

신정책시나리오에 따르면 전 세계의 1차 에너지원 수요는 2010년 13,000Mtoe(million tonnes of oil equivalent)에서 2035년 17,000Mtoe로 약 35% 증가할 전망이다. 화석연료는 전체 수요 증가의 59%를 차지하며 여전히 전 세계 주요 에너지원이다. 석유 수요는 2020년 94.2mb/d(million barrels per day), 2035년 99.7mb/d에 도달할 것으로 전망되며 현재 32%에서 2035년 27%로 그 비중이 줄어들 것으로 전망된다(IEA, 2012). 석탄은 과거에 에너지 수요 증가의 45%를 차지하였으며 빠른 성장속도를 보여주었다. 석탄 수요는 2020년 이후에 증가속도가 점점 느려지고 2035년에 2010년 대비 21% 증가하여

6,000Mtce(million tonnes of carbon equivalent)에 달할 것으로 전망된다(IEA, 2012). 천연가스 수요는 IEA 시나리오에 따르면 2010년 3.3tcm(trillion cubic metres)에서 2035년 50tcm으로 증가할 것으로 예측되었으며, 천연가스의 전 세계 에너지믹스 비율이 2010년 22%에서 2035년 24%로 증가할 것으로 전망되었다(IEA, 2012).

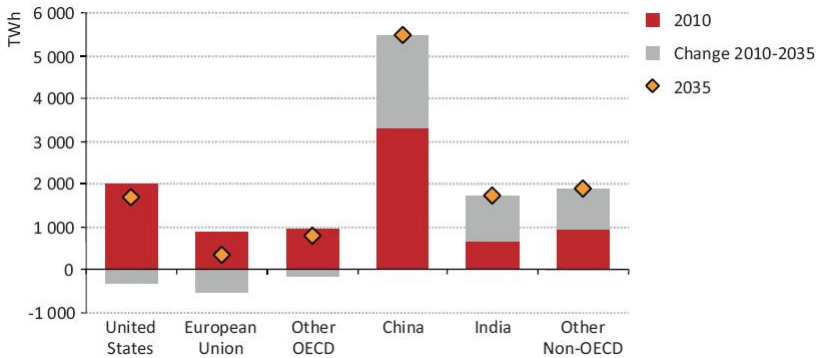
신정책시나리오는 2010~2035년 중국의 에너지 전망에 대해서 중국의 12번째 5개년 계획(12th Five-Year Plan)의 GDP 단위당 에너지 소비 감소 (2010~2015년 사이 16%까지 감소 목표) 목표를 실현시키는 것을 반영하여 전망되었다(IEA, 2012). 그러나 이 시나리오는 근본적인 에너지 저감을 위한 기술 혹은 새로운 정책이 도입, 실현되는 것을 전제로 하지 않는다는 점에서 BAU(Business as usual) 시나리오로 분류될 수 있다. 중국은 IEA 시나리오에서 2010~2035년 기간 전 세계 에너지 수요 성장과 모든 종류의 주요 연료에 대한 수요 증가를 주도할 것으로 예측되었다(석탄 49%, 천연가스 27%, 원자력 57%, 신재생에너지 14%)(IEA, 2012, 그림 3-1 참조).

신정책시나리오에서 전 세계 석탄화력 발전은 2010년 8,687TWh에서 2035년 11,900TWh로 증가하는 반면, 석탄화력 발전 비율은 41%에서 33%로 감소하는 것으로 전망되었다. 비 OECD 국가에서는 석탄화력 발전량이 크게 증가하며, 특히 중국은 예측 기간에 걸쳐 전 세계 석탄화력 발전 증가의 2/3을 차지하며 지속적으로 큰 기여를 하여, 2035년까지 전 세계 석탄화력 발전의 46%를 차지할 것으로 예상되었다(그림 3-2 참조). 비 OECD 국가에서는 석탄화력 발전이 경제적 성장이 가장 크게 나타나는 2020년 전까지 가장 빠르게 증가할 것으로 예측되었다.



자료: IEA(2012).

〈그림 3-1〉 IEA 신정책시나리오의 비 OECD 지역별 주요 에너지 수요



자료: IEA(2012).

〈그림 3-2〉 IEA 신정책시나리오의 전 세계 주요지역 석탄화력 발전

본 연구에서는 BAU 설정과 관련하여 중국의 대기오염 배출량 전망을 에너지 수요 증가(Mtce 기준)와 비례관계에 있다고 가정하였다. 이에 따라 2010년과 2035년 사이의 증가율을 2027년에 맞춰 외삽하여 중국의 배출량을 설정하였다. 이에 따라 CO, NO_x, SO_x, PM과 주요 VOCs에 대한 중국의 인위적 배출량 2010년 대비 2027년에 약 58% 증가하는 것으로 물질별 일괄적으로 가정하였다(BAU 시나리오).

3. 동아시아의 저감 정책을 고려한 중국의 미래 배출 시나리오(PC 시나리오)

중국 정부는 최근 GDP 당 CO₂ 저감 목표를 설정하여 2005년 대비 2020년까지 GDP 당 CO₂ 배출을 40~45%까지 감축하기로 결정하였다(Wang and Hao, 2012). 또한 중국 국무원 자료에 따르면 2006년 GDP당 에너지 사용과 SO₂ 배출을 각각 20%와 10%로 감축할 것과 2011년에 추가로 에너지 사용과 NO_x 배출, 그리고 SO₂ 배출을 각각, 16%, 10%, 8%로 감축할 것을 결정하였다(The State Council of the People's Republic of China, 2006; 2011). 이런 노력의 일환으로 2005년부터 2010년 사이에 중국의 SO₂와 PM_{2.5}의 배출은 약 15%와 12% 감소하는 성과를 거둘 수 있었다(Wang, S. et al., 2014). 최근 중국이 설정한 에너지 및 기후변화 대응정책과 연계된 대기오염 배출 저감정책을 고려한 포괄적 대기오염물질 배출 전망을 고려할 필요가 있다.

본 연구는 중국 칭화대학과 유럽 IIASA(International Institute of Applied System Analysis)가 중심이 되어 공동연구를 통해 최근 발표된(2014년 7월) 동아시아의 미래 대기오염배출 전망자료(Wang. et al., 2014)를 입수하여 모델링에 활용하였다(PC (Pollution Control) 시나리오로 지칭함). 이 자료는 국제사회의 아시아의 대기 질 모델링 상호비교 프로그램(MICS-Asia)에 채택되어 활용될 전망이다. PC 시나리오의 특징은 동아시아 차원의 포괄적인 대기오염 저감 정책을 리뷰하였고, 이를 다양한 오염물질(SO₂, NO_x, VOCs, PM)에 동시 적용하였다는 점이다(Wang, S. et al., 2014). PC 시나리오에서는 저감대책에 에너지 효율 증가를 통한 에너지 절약 정책, 대체 에너지 사용, 그리고 탈황장치 및 먼지제거 장치의 도입과 같은 “end-of-pipe” 대책과 같은 대기오염 저감 대책을 모두 포함하고 있다. Wang et al.(2014)에서는 이를 바탕으로 크게 두 가지 시나리오 방향을 설정하였다. 하나는 현재 2010년의 정책과 이행 자료를 바탕으로 한 2030년까지의 대기오염 배출 전망(Business as usual, BAU) 시나리오와 다른 하나는 더욱 강력한 저감정책의 도입과 이행을 가정한 새로운 차원의 저감 정책을 바탕으로 한 저감시나리오(Alternative policy, PC)다(표 3-1 참조). Wang, S. et al.(2014)에서 전망한 다양한 물질별 배출

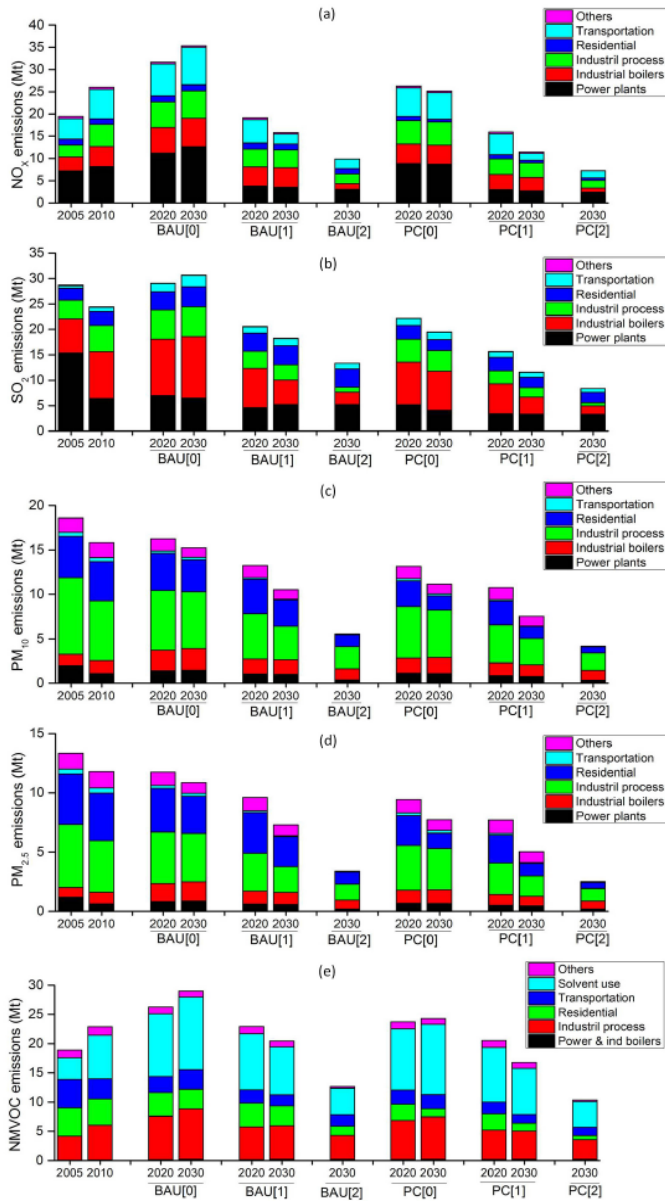
시나리오 전망에 대한 결과(2020, 2030년)를 <그림 3-3>에 나타내었다.

<표 3-1> Wang, S. et al.(2014)에서의 에너지 및 배출 시나리오 대분류(PC 시나리오)

시나리오 분류	개념 및 정의
Business-as-usual (BAU)	현재(2010년) 도입된 정책과 이행상태를 기준으로 미래 배출을 전망
Alternative policy (PC)	라이프스타일, 구조적 개혁과 에너지 효율이 향상되는 등 새로운 차원의 강화된 에너지 저감 정책이 도입되는 것을 가정한 미래 배출 전망

자료: Wang et al.(2014)에서 저자 재구성.

본 연구에서 활용한 PC 시나리오는 Wang et al.(2014)의 저감 시나리오(PC, 표 3-1 참조) 중 새로운 저감 정책이 도입, 이행되고, 향후 환경 보호를 위한 진보가 반영되는 것을 가정한(end-of-pipe 저감 전략도 포함) 시나리오인 “PC 1” 시나리오를 선택, 반영하였다. 이것은 PC 시나리오의 저감 시나리오 중 낙관적이면서도 실현 가능성이 높은 시나리오이다. 본 연구는 Wang et al.(2014)의 저감 시나리오 중 PC1 시나리오가 중국에서만 적용될 경우를 가상하여 우리나라에 어떠한 영향을 미치게 되는지를 수치모의를 통해 파악하고자 하였다(PC 시나리오). <표 3-2>에서는 본 연구에서 정의한 BAU 및 PC 시나리오에 대해 정리하였다.



주: 부문별 분류중 Other는 주로 산림화재에 의한 연소를 포함하고 있다.
 자료: Wang et al.(2014).

〈그림 3-3〉 Wang et al.(2014) 연구의 중국의 각 주요 부문별, 대기오염 물질별 배출량 전망(2005-2030). 위 패널부터 NO_x(a), SO₂(b), PM₁₀(c), PM_{2.5}(d), VOCs(e).

〈표 3-2〉 본 연구에서 정의한 에너지 및 배출 시나리오 분류

시나리오 분류	개념 및 정의
Business-as-usual (BAU)	국제 에너지 기구 (IEA)의 신정책 시나리오(IEA, 2012)를 도입 (탄소 배출량을 기준으로 하였으며, end-of-pipe 저감 대책을 반영하지 않음). 중국에 대해서만 적용
Alternative policy (PC)	최근의 정책방향과 포괄적인 에너지 및 대기오염 정책을 반영하였으며, 그 중, 새로운 차원의 저감 정책이 도입, 이행되는 Wang et al. (2014)의 PC 1 시나리오를 도입. 중국에 대해서만 적용

자료: 저자 작성.

본 연구에서는 <표 3-2>를 바탕으로 대기화학-수송모형(GEOS-Chem)의 중국 배출시나리오를 적용하였다. 앞서 설명한 바와 같이 BAU 시나리오는 IEA의 에너지 수요를 배출량에 비례한다고 가정하고 대기오염 물질에 같은 비율로 중국에 한하여 적용하였다(58% 증가). PC 시나리오는 Wang et al.(2014)의 저감 시나리오 중 새롭고 적극적인 정책이행이 실현되었을 경우를 가정한(PC1) 시나리오를 바탕으로 가정하여 중국에 한하여 적용하였다. PC 시나리오의 2010년 대비 2027년의 저감률을 <표 3-3>에 나타내었다. 이러한 저감률은 본 연구의 모델링에 활용될 Street 인벤토리에 적용하였으며, 중국의 지방정부별 저감률 차이는 각 시나리오가 서로 일치하지 않기 때문에 전 중국에 동일하게 적용하였다.

〈표 3-3〉 본 연구의 PC 시나리오에 따른 2010년 대비 2027년 중국의 주요 대기오염 배출량 및 저감률

(단위: 백만 톤/년)

물질	2010	2027	저감률	비고
NO _x	26.05	12.84	51%	
SO ₂	24.42	12.92	47%	
PM ₁₀	15.81	8.54	46%	
VOCs	22.86	18.0	21%	CO 배출량은 VOCs 가 산화되었을 것을 가정하여 같은 저감률 적용

자료: 저자 작성.

| 제4장 · 대기화학-수송 모형을 활용한 대기질 영향 분석 |

1. GEOS-Chem 모형의 개요와 활용

인위적, 자연적 대기오염 배출물질의 생성과 대기 중 이동과 변환, 그리고 소멸에 대한 최신의 정보를 활용하여 대기질의 영향을 파악하기 위해서는 현재의 물리·화학·지구과학 분야의 지식을 최대한 망라한 대기화학-수송 모델이 필요하다. 비록 모형이 유기적인 자연계 시스템에서 일어나는 물리·화학적 현상을 포괄적으로 정확하게 설명하는 것은 불가능하지만, 모형의 응용을 통해서 현재의 지식을 검증하고 특정 화학물질의 농도 분포뿐 아니라 배출의 영향에 대한 이해 및 인위적 오염에 대한 환경영향을 파악하는 것은 매우 유용하다. 본 연구는 미국 항공우주국(NASA)과 함께 하버드 대학에서 개발한 3차원적 지구 대기화학-수송 모델(Goddard Earth Observing System-Chemistry, GEOS-Chem)을 활용하였다. GEOS-Chem은 오일러리안(Eulerian) 방식의 모델이며, NASA의 Global Modeling Assimilation Office(GMAO)에서 자료 동화된(assimilated) 기상자료를 사용하며, 오존-질산화물-유기 화합물 및 에어로졸의 약 300가지의 광화학 반응 메커니즘을 온라인으로 실시간 계산에 사용할 수 있다(Bey et al., 2001). 현재는 약 70개의 주요 대기 구성물질의 3차원적 분포를 다양한 공간해상도에 대하여 시간 단위로 계산할 수 있으며 전 세계적인 모델링 커뮤니티를 통해 자료와 모델링의 업데이트를 꾸준히 수행하고 있다(<http://wiki.seas.harvard.edu/geos-chem/index.php>).

본 연구에 활용된 모델은 NASA GEOS 프로젝트의 자료 동화된 GEOS-5의 기상장($0.5^\circ \times 0.667^\circ$)을 사용하였으며, 기상장(meteorological field)은 47개의 연직층(vertical layer)이 지상으로부터 약 80km(0.01hPa) 고도까지 농도를 모의할 수 있다(<http://wiki.seas.harvard.edu/geos-chem/index.php>). 본 연구를 위한 대기질의 수치

모의는 전구규모의 $2^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 격자 규모의 계산을 선행한 후(모델 버전 v9-03-01) 그 결과 중 아시아 지역의 경계조건을 활용, 상세화 작업 모듈을 재수행하여 중규모의 대기질 모델링(격자크기: $0.5^{\circ} \times 0.667^{\circ}$)을 수행하였다(그림 4-1 참조).

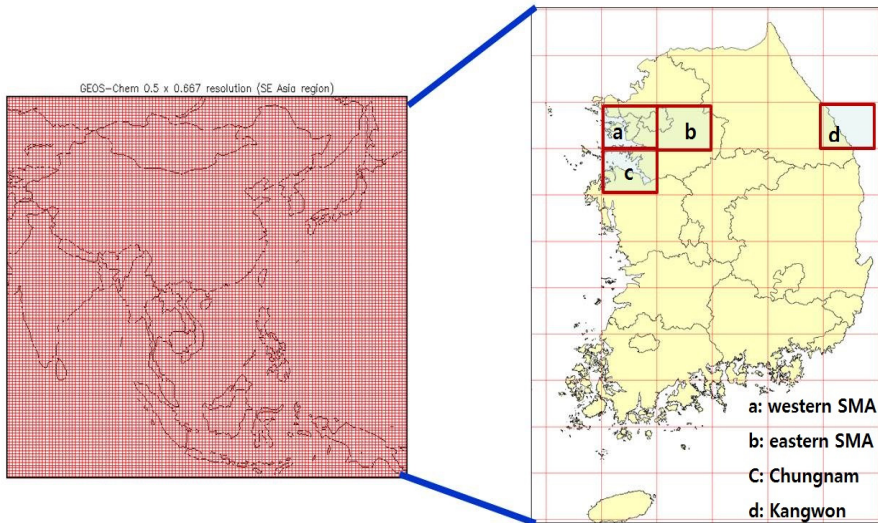
GEOS-Chem의 수치연산은 포트란 언어(Fortran 90)로 개발 및 활용되고 있으며, 본 연구에서는 리눅스(Linux) operating system에서 Intel fortran compiler를 사용하여 수치모의를 수행하였다. 중앙 연산장치(CPU)는 Quad Core X5550 2.66 Ghz 프로세서를 16개의 병렬 연산(parallel computing)하여 계산하였다. 부록에 GEOS-Chem 모의에 대한 추가사항을 정리하였다.¹⁾

앞서 설명하였듯이 본 수치모형에서는 중국 등 동아시아 지역에 대한 배출량 자료로 Street 배출량 자료를 사용하였다(Zhang, Q. et al, 2009). 이 배출량 자료는 CO, NO_x, SO₂, NH₃, VOC (9종)의 자료를 해상도에 맞게 적용한 후 2006년 자료 (Street et al., 2006)를 기준으로 그 이후의 자료는 에너지 사용 변화에 맞춰, scaling factor를 적용하여 환산하였다.¹⁾ 이외에도 GEOS-Chem 모형은 자연화재, 생물연소 등 자연적 배출량 자료를 기본적으로 함께 사용하고 있으며 각종 에어로졸 배출과 형성에 관한 알고리즘을 포함하고 있다. 본 연구에서는 PM₁₀의 결과를 산출하기 위해서 직경 10 μ m에 근접하는 먼지(dust)와 큰 사이즈의 해염 에어로솔(sea salt aerosol) 등의 조합을 활용하여 PM₁₀의 시공간적 농도를 산출하였다.

이러한 최신 기법의 대기화학-수송모델의 응용은 그 동안 수많은 지구차원 혹은 대륙 및 지역차원의 연구에 활용되었다. 이런 모델의 응용을 통해 현재의 대기환경에 관련된 지식을 관측 자료와 함께 검증하고 모델의 물리·화학적 주요 변수들의 대기 오염물질과 온실가스 등 주요 화합물의 농도와 변수들에 대한 민감도를 이해함으로써 대기 구성물질의 변화와 흐름을 이해하고 그 영향과 관련된 정책을 지원하는 데 활용될 수 있다(심창섭 외 2010).

1) GEOS-Chem 모델의 User's Guide

(<http://acmg.seas.harvard.edu/geos/doc/archive/man.v9-01-03/index.html>) 및 심창섭 외(2010) 참조.



자료: 저자 직접 작성.

〈그림 4-1〉 GEOS-Chem의 아시아 지역 중규모 대기질 모의의 지역범위(왼쪽)와 본 연구에서 국내 대기질 영향 분석을 위해 추출된 지역(a: 서수도권, b: 서수도권, c: 충남지역, d: 강원지역). 충남, 강원지역은 주요 전력발전시설이 포함된 지역임.

2. GEOS-Chem 수치모의 평가

수치모의 결과는 관측 자료를 통해 검증받을 수 있으며 동시에 관측자료에 대한 해석을 할 수 있다. 본 연구는 2009년의 GEOS-Chem의 수치모의 결과를 국내 주요지역의 관측 자료와 비교하여 평가하였다. 2009년은 GEOS-Chem 동아시아 배출량 목록이 비교적 정확하게 scaling된 최근의 연도이기에 기준으로 삼았으며, 이에 상응하는(약 50 x 60 km 공간해상도) 국내 지상관측 자료를 수집하여 비교하였다. 이를 아래에 설명하였다. 국내 대기질 평가는 제2장에서 분석한 제6차 전력수급기본계획에 따라 비교적 큰 영향을 받을 것으로 예상되는 4개의 지역(서수도권, 동수도권, 충청남도, 강원도, 그림 4-1 참조)을 대상으로 하였으며 이를 4-2-나절에 소개하였다.

가. 수치모의 평가

수치모의의 평가를 위해서는 지상관측망의 관측 자료를 선택, 비교하는 과정이 필요하다. 아래 서술은 수치모의 평가를 위한 환경부의 대기 관측망에 대한 설명을 포함하고 있다. 「대기환경보전법」에서 지정한 대기오염물질의 종류에는 이산화황(SO₂), 일산화황(CO), 이산화질소(NO₂) 등 총 61종으로, 이 중에서 카드뮴, 납 등을 포함한 35종은 특정대기유해물질로 지정하여 관리되고 있다.

우리나라의 대기환경기준은 생활환경을 개선하기 위한 대기오염의 척도를 정량적으로 판단하기 위해 「환경정책기본법」(제10조)에 따라 단기목표와 장기목표의 기준을 설정하였고, 1978년 이산화황에 대한 기준 목표를 설정한 이래로 현재까지 5회에 걸쳐 수정, 강화되어왔다(표 2-1 참조)(국립환경과학원, 2013b).

1) 대기오염측정망 현황

최근 환경부 및 지방자치단체에서는 2012년 12월 말을 기준으로 대기오염물질의 항목 및 목적에 따라 총 11개 종류의 측정망을 설치하여 연속적으로 자료를 수집하고 있다(표 2-3 참조). 대기오염측정망은 97개 시·군에 총 477개의 측정소를 설치하여 관리하고 있다(국립환경과학원, 2013b).

〈표 4-1〉 국내 대기환경기준

항목	이산화황 (ppm)	일산화탄소 (ppm)	먼지 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
			총먼지	미세먼지 (PM-10)	미세먼지 (PM-2.5)
2012년	0.02/년 0.05/일 0.15/시간	9/8시간 25/시간	-	50/년 100일	25/년 50/일
항목	이산화질소 (ppm)	오존 (ppm)	납 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	탄화수소 (ppm)	벤젠 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
2012년	0.03/년 0.06/일 0.1/시간	0.06/8시간 0.1/시간	0.5/년	-	5/년

자료: 국립환경과학원(2013b).

〈표 4-2〉 대기오염 측정망 설치현황

항목	설치현황 (2012년 12월 말 기준)	
측정망	<ul style="list-style-type: none"> • 도시대기측정망(250개) • 도로변대기측정망(38개) • 산성강하물측정망(40개) • 국가배경농도측정망(3개) • 교외대기측정망(19개) • 대기중금속측정망(52개) 	<ul style="list-style-type: none"> • 유해대기물질측정망(31개) • 광화학오염물질 측정망(27개) • 지구대기측정망(1개) • PM-2.5 측정망(11개) • 집중측정망(5개)

자료: 국립환경과학원(2013b).

각 측정소에서 1차 검색과정을 거쳐 측정된 자료들은 국가대기오염 관리시스템(NAMIS)으로 전송되며, 국립환경과학원에서는 최종 통계처리 작업을 거쳐 최종 데이터의 형태로 저장, 관리하고 있다. 국립환경과학원은 2001년 1월부터 측정 자료의 신뢰성 제고를 위해 해당기간 중 75% 이상의 자료가 확보된 경우에만 유효한 자료로 처리하는 방법을 적용하였다(국립환경과학원, 2013b).

2) 대기오염 측정방법

일반 대기오염물질에 해당하는 이산화황, 일산화탄소 등은 「환경정책기본법」에 따라 대기오염공정시험방법으로 측정된다. 이산화황(SO₂)은 자외선 형광법(Pulse U.V. Fluorescence Method), 일산화탄소(CO)는 비분산 적외선법(Non-Dispersive Infrared Method), 이산화질소(NO₂)는 화학 발광법(Chemiluminescent Method), 그리고 오존(O₃)은 자외선 광도법(U.V. Photometric Method)으로 측정된다. 또한 미세먼지(PM-10)는 베타선 흡수법(β -Ray Absorption Method), 미세먼지(PM-2.5)는 중량 농도법(또는 이에 준하는 자동측정법), 그리고 납(Pb)은 원자 흡광도법(Atomic Absorption Spectrophotometry)으로 측정된다(국립환경과학원, 2013b).

3) 모델 결과 검증을 위한 측정소의 관측치 표본 추출

국내 대기질 분석을 위한 GEOS-Chem 수치모형의 결과의 평가는 제2장에서 분석한 제6차 전력수급기본계획에서 미래 발전소 증설에 따라 비교적 큰 대기질 영향을 받을 것으로 예상되는 4개의 지역(서수도권, 동수도권, 충청남도, 강원도)을 대상으로 하였으며 <그림 4-1>에서와 같이 해당 GEOS-Chem의 공간해상도와 위치를 고려하여 관측소를 선정하였다. 그 결과를 <표 4-3>에 나타내었다.

〈표 4-3〉 수치모의 검증을 위해 사용된 측정소 정보¹⁾

비교 지역	선정 관측소 위치	선정 관측소 개수
서수도권	서부 서울, 인천시, 부천시, 안양시, 광명시, 군포시, 김포시 등	42
동수도권	동부 서울, 구리시, 광주시, 남양주시, 여주, 양평, 가평, 이천 등	21
충청남도	당진, 서산, 아산 (신규 발전소 부근)	5
강원도	강릉, 동해, 삼척 (신규 발전소 부근)	3

자료: 저자 작성.

3. 주요 대기오염 물질의 수치모의 결과

가. Baseline 수치모의(2009년, INTEX-B Street 배출량 목록 사용)

본 연구는 동아시아 배출량 자료를 INTEX-B 미션을 수행하면서 작성된 Street 인벤토리를 기준으로 2009년의 모델링 결과를 우리나라 4개의 지역(서수도권(W. SMA), 동수도권(E. SMA), 충남, 강원 지역에 대하여 지상관측자료를 샘플링하여 비교, 검증하였다(그림 4-1 참조). <그림 4-2>부터 <그림 4-5>는 4개의 지역의 CO, NO₂, O₃, CO 농도에 대한 관측값과 모델값의 비교를 보여주고 있다. SO₂는 자료가 있지만, 관측 결과 일 최대값이 환경 기준치(150ppbv/시간)를 초과하는 경우가 드물기 때문에 분석에서 제외하였다.

일산화탄소(CO)는 관측값이 네 개 지역 모두 연평균 550ppbv를 상회하고 있다(그림 4-2 참조). 일산화탄소 농도가 자연적 화재(biomass burning) 혹은 인위적 대기오염의 지표로 사용되고 있고, 청정지역의 일산화탄소 농도가 100ppbv 이하인 것을 감안하면 이는 매우 높은 농도이며, 인위적 배출영향을 크게 받는 것을 알 수 있다. 또한 일산화탄소는 비교적 긴 대기 중 잔존시간 때문에(약 한달) 장거리 이동 등의 영향이 매우 커, 중국을 포함한 동아시아 전반 대기오염의 질이 크게 떨어져 있음을 보여주는 것이다.

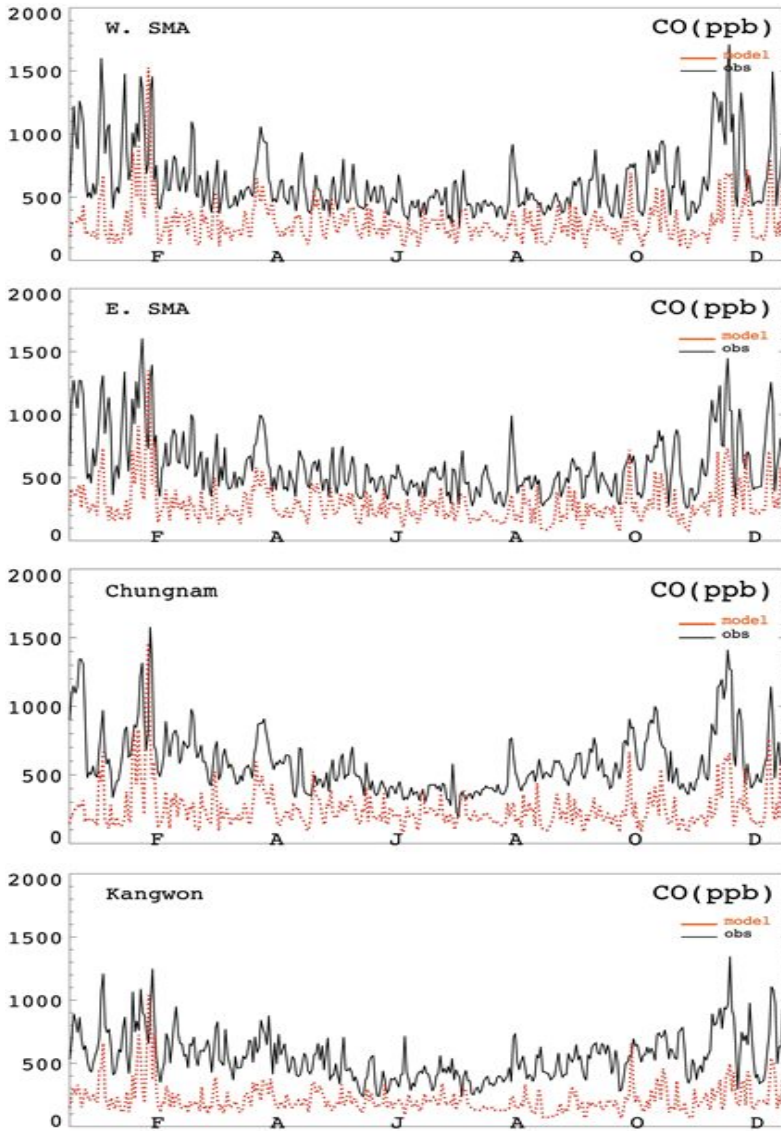
GEOS-Chem 수치모의는 일평균 자료에 대해 상대적으로 높은 상관관계(R: 0.5~0.6)를 보여주고 있다(그림 4-2 참조). 특히, 수도권 지역에서 가을~겨울철 고농도 현상을 잘 재현하고 있으며 여름철의 광화학반응 활성화로 인하여 농도가 떨어지는 현상도 재현하고 있다(그림 4-2 참조). 그러나 수치모의 결과 연평균값이 관측값에 크게 미치지 못하고 있다(약 1/2 수준). 이는 Street 배출량의 과소평가 및 지표 부근의 연직 경계조건 이하의 확산 알고리즘의 불확도가 그 원인일 것으로 추정된다.

NO₂는 대기 중 잔존시간이 분석 대상 물질 중 가장 짧다(1~2일). 따라서 지역차원의 오염물질 배출에 가장 큰 영향을 받는다고 할 수 있다. <그림 4-3>은 이러한 지역편차(수도권과 비수도권)의 차이를 잘 보여주고 있다. 이것은 주로 수도권에 집중되어 있는 차량운행에 따른 NO_x 배출과 연관성이 있다고 추정된다(그림 2-4 참조). 수도권 지역은

모든 관측지점의 연평균 값이 30ppbv를 상회하고 있어 높은 수준의 농도를 보여주고 있으며 일 최고 농도값은 약 70ppbv 이상으로 같은 기준의 도쿄의 도로 부근 농도의 일 최대값(약 50ppbv)을 훨씬 상회하는 수준이다(Kodama et al., 2002). 충청남도 및 강원도 지역은 수도권에 비해 적은 차량운행 등의 영향으로 상대적으로 깨끗한 NO₂ 농도값을 보이고 있다(연평균 20 ppbv 미만, 그림 4-3 참조). GEOS-Chem의 NO₂ 수치 모의는 CO의 경우처럼 수도권 지역의 고농도 현상을 잘 반영하지 못하고 있으며 약 50%~60% 수준의 연평균 NO₂ 농도를 보이고 있다(그림 4-3의 모델값은 연평균 bias를 보정한 그림임). 또한 일별 변화량을 잘 재현하고 있지 못하는데(R: 0.25~0.3), 이것은 Street 배출인벤토리의 시공간적 변화량이 과소평가되었으며 상세지역의 상태를 정밀하게 재현하는 데에 일정 부분의 한계를 갖고 있음을 암시하고 있다.

대기질의 척도 중 하나인 오존에 대한 관측자료와 모델값의 비교를 <그림 4-4>에 나타내었다. 오존은 여름철 고농도 현상에 대한 수준을 비교적 잘 모의하고 있지만 전반적으로 광화학반응이 저조한 늦가을~겨울의 농도를 과대평가하는 경향이 있다(그림 4-4 참조). 이 영향으로 GEOS-Chem 모델은 지표 부근에서 관측값을 연평균 약 9ppbv 정도 과대평가하고 있다. 이는 일조시간이 짧은 계절에 광화학 반응을 유발하는 광량(actinic flux) 및 반응속도를 모델이 과대평가하였을 가능성이 있다(상관관계 R: 0.25~0.5). 지상관측 자료 결과에 의하면 수도권 지역은 오존농도가 연평균 약 21~23ppbv 수준인 반면, 오존 전구물질 농도가 상대적으로 적은 충남과 강원지역은 연평균 약 30ppbv 정도를 보이고 있다. 이는 NO_x 배출이 매우 높은 수도권 지역의 지표 부근에서 일산화질소(NO)가 대기 중의 O₃과 직접 반응하여 O₃을 소멸시키는 O₃ titration 현상이 영향을 미쳤을 가능성을 암시한다(김순태, 2011).

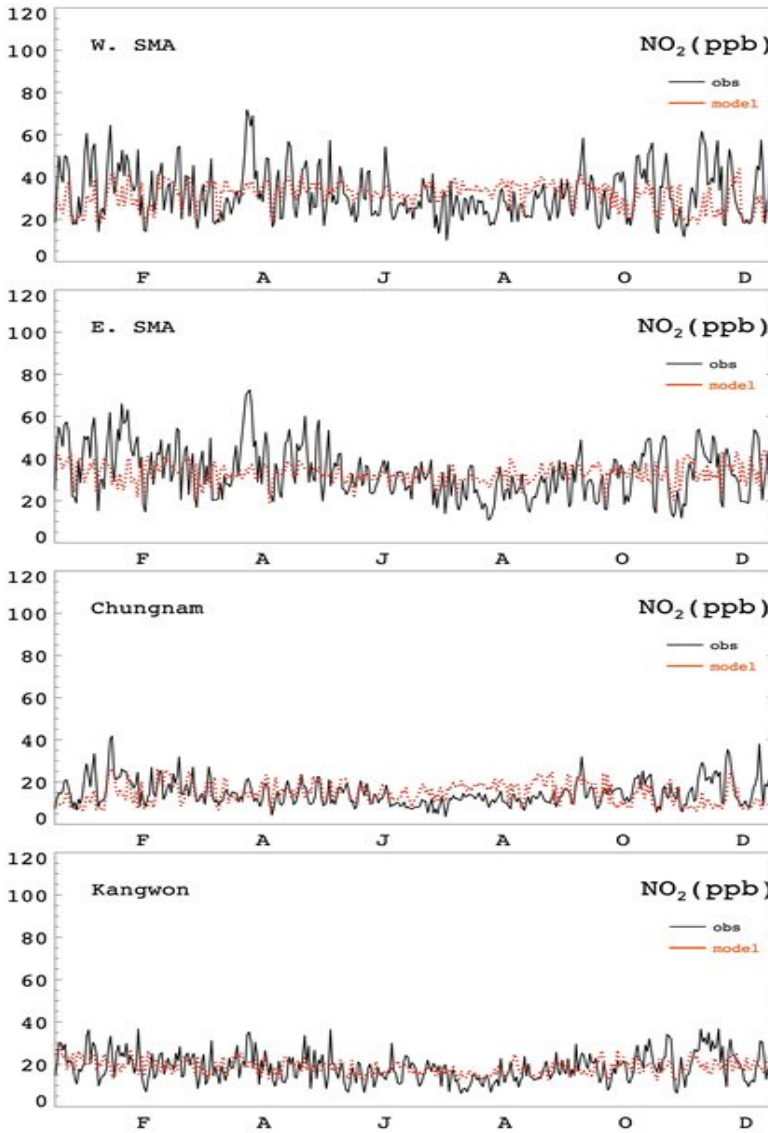
(단위: ppb)



자료: 저자 작성.

〈그림 4-2〉 국내 4개 지역(위부터: 서수도권, 동수도권, 충남, 강원)에 대한 GEOS-Chem 수치모의와 지표 농도 관측 값의 비교(일 평균값, 2009년 기준). 검정색 실선은 관측 값 (해당지역 평균)이며 적색 점선은 모델 값임

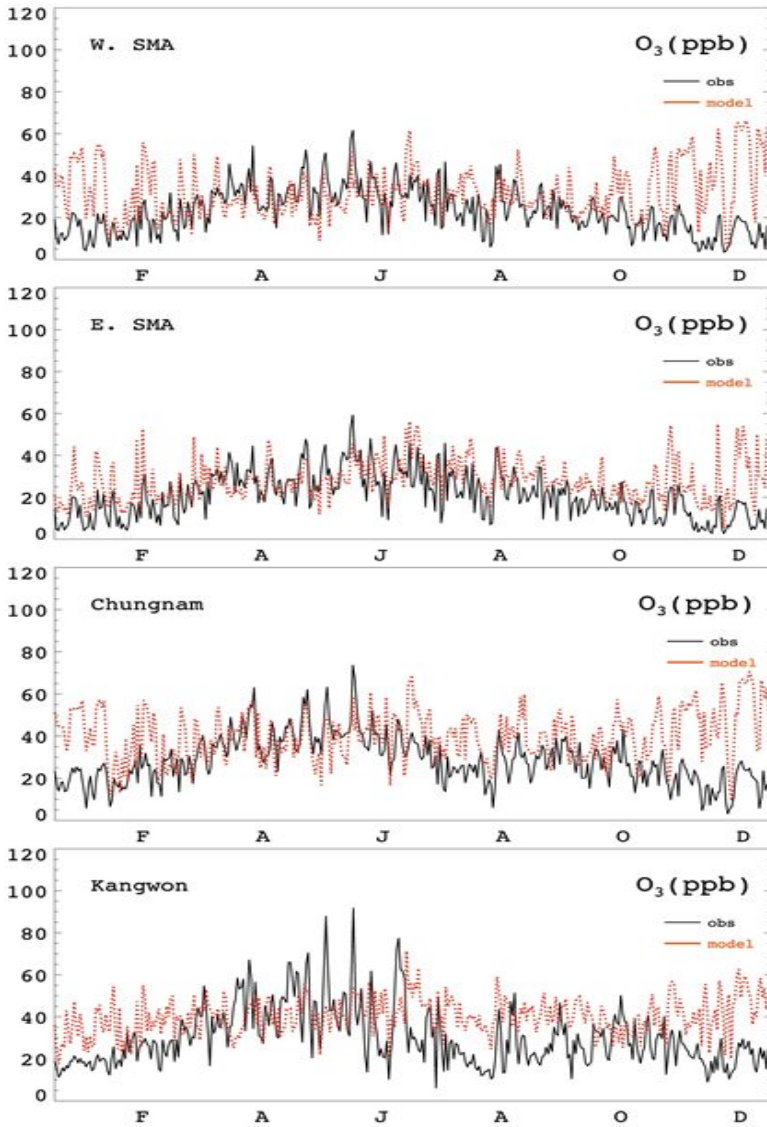
(단위: ppb)



자료: 저자 작성.

〈그림 4-3〉 〈그림 4-2〉와 같으며 이산화질소(NO₂)에 관한 결과

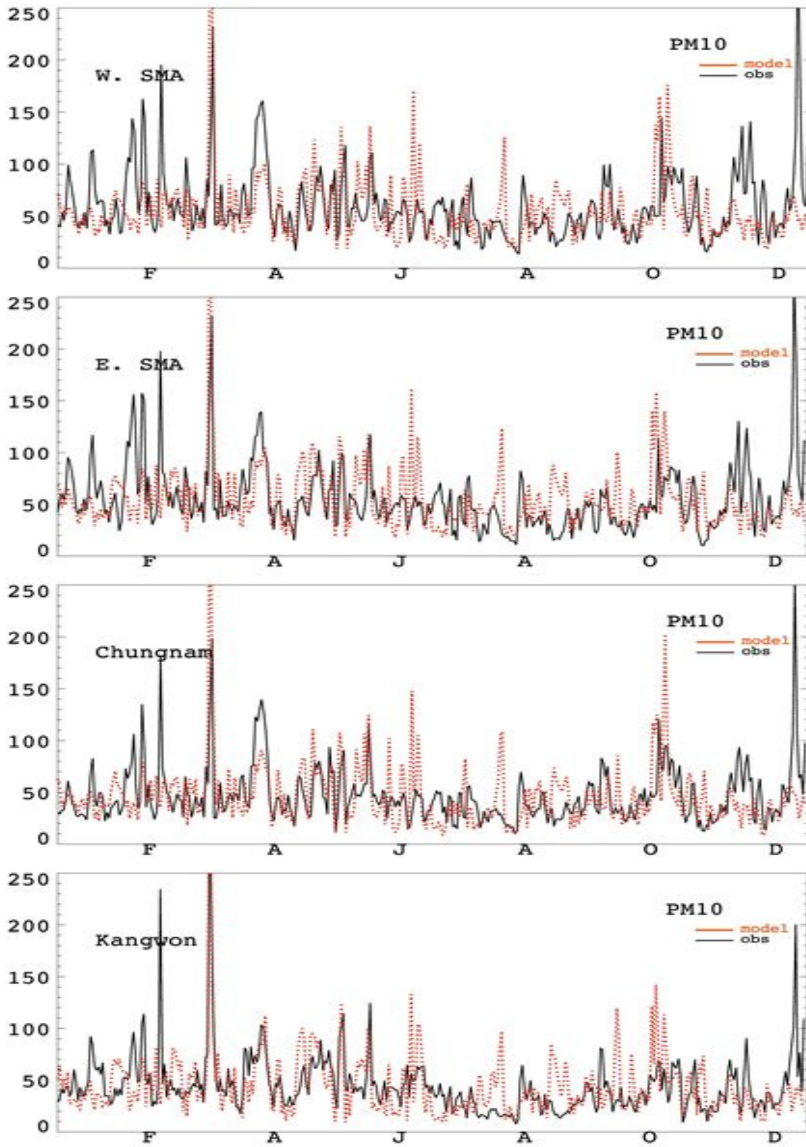
(단위: ppb)



자료: 저자 작성.

〈그림 4-4〉 〈그림 4-2〉와 같으며 오존(O₃)에 관한 결과

(단위: ppb)



자료: 저자 작성.

〈그림 4-5〉 〈그림 4-2〉와 같으며 미세먼지(PM₁₀)에 관한 결과

미세먼지 농도(PM_{10})는 4개의 지역에서 모두 높은 수준을 보이고 있으며 연평균 농도가 수도권 지역($55\sim 60\mu\text{g}/\text{m}^3$)이 충남, 강원지역보다 다소 높다($\sim 45\mu\text{g}/\text{m}^3$). 수도권 지역은 상대적으로 높은 제조업, 교통 부문의 PM_{10} 의 배출이 높는데다 중국 등 장거리 이동의 영향이 충남, 강원지역보다 상대적으로 다소 크기 때문일 것으로 사료된다. 강원지역은 시멘트 제조업 등에서의 많은 미세먼지 배출에도 불구하고, 영동지방의 사업장의 위치가 내륙의 영향을 덜 받고, 장거리 영향도 평균적으로 수도권 지역에 비해 적기 때문에 다소 낮은 평균 농도를 보여주는 것으로 판단된다(그림 4-5 참조). 그러나 네 지역 모두 강한 고농도 현상을 모두 보이는데(2, 3, 4월, 및 10월 12월), 특히 2~4월의 환경기준치인 $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 훨씬 상회하는 고농도 현상은 중국으로부터의 황사 영향과 관련이 있다(국립기상연구소, 2010).

이와 같이 미세먼지는 지역배출량 및 장거리 이동의 영향에 모두 민감하므로 정확한 수치모의가 쉽지 않다. GEOS-Chem은 일평균 값을 약 $R = 0.3\sim 0.5$ 수준으로 모의하고 있으며 연평균 농도를 약 $8\sim 20\mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도 저평가하고 있다. 그러나 장거리 이동으로 추정되는 3, 4월 및 10월의 고농도 현상은 일정 부분 재현하고 있는 것을 보여주고 있다(그림 4-5 참조). 본 연구에서 상관관계가 매우 높지 않은 것은 많은 양의 배출량과 관계있는 점오염원을 중해상도 규모의 모델링에서 자세히 표현하고 있지 못하는 한계와도 관련이 있다.

나. 환경기준 초과일 수

본 연구에서 분석한 네 개의 지역은 CO와 PM_{10} 의 경우 모두 연평균 농도가 상당히 높은 수준을 보이고 있다(표 4-4 참조). 또한 앞서 일평균 농도 변화를 모델의 비교평가에 활용하였으나, 대기질의 환경영향을 고려하여 <표 4-1> 대기질의 환경 기준치 초과 일수를 분석하였다. 관측 자료인 경우, 대기오염물질의 농도 중 시간단위의 환경 기준치를 초과하는 경우가 있는 날의 수를 파악하였다. 특히, 본 연구는 <표 4-3>에서 보여주듯이 4개의 연구대상지역이 포함하는 관측소의 개수가 다수이므로, 하루 중 관측소의 시간당 환경 기준치를 초과하는 관측소의 개수가 하나라도 있으면 환경 기준치를 초과하는

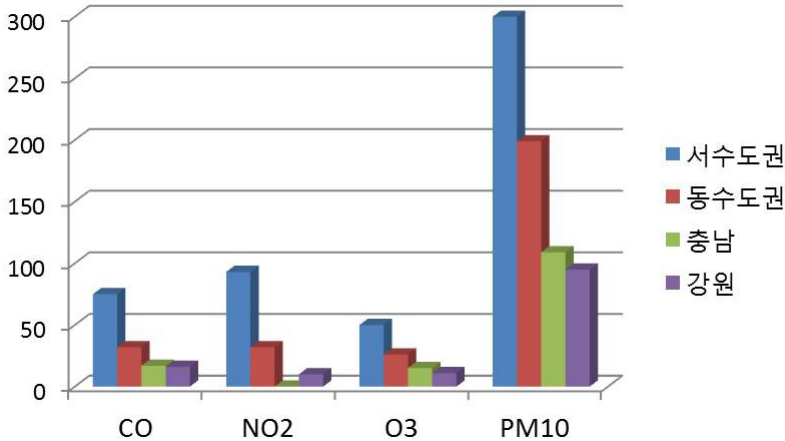
날로 간주하였다. 따라서 이러한 환경 기준치 초과 일수의 계산방식으로 수도권 PM₁₀의 환경 기준치 초과일수가 200일을 상회하는 것으로 계산되었다(그림 4-6 참조). 오존의 경우도 수도권 경우 연평균 오존농도는 높지 않으나(23ppbv, 표 4-4 참조), 대기환경 기준을 초과하는 날의 개수는 약 50일에 달하는 것으로 나타났다(그림 4-6 참조). 이것은 수도권 지역의 지표 부근이 연중 운행차량에서의 높은 NO_x 배출이 오존과 직접 반응하여 오존을 소멸시키는 O₃ titration 현상의 영향을 받다가도, 여름철 등에 전구물질과 광화학반응의 조건이 갖춰지면 오존농도가 크게 높아지는 현상이 반영된 것이다. 매우 높은 NO_x의 배출은 수도권 NO₂ 환경기준 초과일수(100ppbv/hour)가 80일을 초과함과 관련이 있다(그림 4-6 참조).

일산화탄소는 일반적으로 100ppbv가 넘으면 대기질이 인위적 혹은 자연적 오염의 영향을 받는 것으로 간주되고 있으나, 건강에 직접 영향을 미치기 위해서는 상당히 높은 농도가 필요하다. 일산화탄소의 시간당 환경 기준치는 2500ppbv에 달한다. 그럼에도 불구하고 수도권 연간 환경 기준치 초과 일수가 약 70일에 달하는 것은 중국 및 국내에서의 높은 화석연료의 사용에 따른 배출을 반증하고 있다.

〈표 4-4〉 2009년의 주요 연구 대상지역 연평균 농도

2009년	CO	NO ₂	O ₃	PM ₁₀
	ppbv	ppbv	ppbv	Δμg/m ³
수도권	619	32.3	23	60
동수도권	600	33.5	20.9	54.6
충남	589	15	28.9	46.9
강원	553	19	30	44.7

자료: 저자 작성.



자료: 저자 작성.

〈그림 4-6〉 2009년 연구 대상 지역의 환경기준치(시간단위) 초과 일수

다. 6차 전력수급계획에 따른 미래 대기질 변화(2027년)

앞에서 살펴본 바와 같이 본 연구는 전력수급기본계획에 따라 2027년의 발전시설 증설에 따른 대기질 변화를 파악하기 위하여 GEOS-Chem의 격자 수준에 맞춰서 광역 지자체 수준으로 배출량 변화를 산정하였다(표 2-4 참조). 이를 GEOS-Chem의 입력 자료로 사용하여 대기질 변화를 관찰하였다. 배출량 변화는 기존의 INTEX-B 배출량자료에 scaling factor를 곱하는 방식으로 반영하였다.

또한 본 연구에서는 전력수급기본계획에 의해 배출량 변화가 비교적 큰 지역을 선정하여 대기질 변화를 관찰하였다(표 4-3 참조). CO는 수도권에서 연평균 농도가 더 크게 상승하였다(6~8ppbv, 표 4-5 참조). 그러나 이미 CO 농도수준은 매우 높기 때문에 상승폭은 5% 미만의 수준이다. NO₂의 경우는 동수도권의 상승폭이 비교적 큰데, 이것은 인천지역과 경기지역의 석탄 및 LNG 발전소 증설의 영향을 동시에 받는 것이 원인일 것으로 사료된다(표 4-5 참조). 약 10%를 상회하는 NO₂ 농도의 상승은 연평균 오존농도에 대해 소폭 감소를 유발하는 것으로 나타났는데(약 -2ppbv 내외), 이것은 지표에서의 NO_x 농도 상승에 의한 오존 titration 현상과 관련

이 있을 것으로 생각된다. PM₁₀의 연평균 농도 변화는 크지 않았는데, 이것은 PM₁₀의 고농도 현상이 주로 장거리 이동의 영향을 많이 받는 것과 연관성이 있는 것으로 판단된다.

〈표 4-5〉 제6차 전력수급 기본계획에 의한 연구대상 지역의 연평균 농도 변화

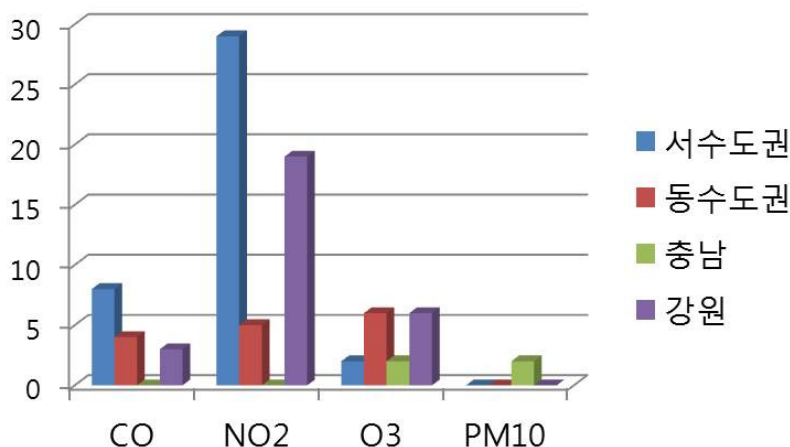
Δ2027	CO	NO ₂	O ₃	PM ₁₀
6차 전력계획	Δppbv	Δppbv	Δppbv	Δμg/m ³
서수도권	6	1.8	-2	0.7
동수도권	8.2	3.5	-3.2	0.5
충남	2.1	1.1	-1.4	0.45
강원	2.3	1.2	-1.6	0.1

자료: 저자 작성.

본 연구에서 초점을 맞춘 결과 중 하나는 환경 기준치 초과일수의 변화이다. 오존의 경우 연평균 농도의 소폭 감소에도 불구하고 환경 기준치 초과일수는 5일 내외로 소폭 상승하였다(그림 4-7 참조). 이것은 광화학반응이 활발하고 오존생성 요건이 갖추어진 경우 NO_x 및 VOC 농도의 증가가 고농도 현상을 더 유발할 수 있음을 보여준다고 생각할 수 있다. PM₁₀의 경우 환경 기준치 초과일수 변화에 큰 영향을 미치지 않으나, 국내의 대기환경이 이미 가장 높은 수준의 환경 기준치 초과 일수를 보이고 있는 점을 주목해야 한다(그림 4-6 참조).

결론적으로 환경위해성이 가장 높은 편인 O₃과 PM₁₀은 전력수급기본계획에 의해 직접적 영향이 크지 않는 것으로 전망되었다. 그러나 이것이 대기질에 뚜렷한 영향이 없다는 것을 의미하지는 않다는 것을 주지할 필요가 있다. 특히 서수도권과 강원도에서 NO₂의 환경기준 초과일수가 비교적 뚜렷하게 증가한 점은 주목할 만하다(그림 4-7 참조). 이것은 인천, 충남, 경기도 지역에서의 석탄 및 LNG 발전의 영향을 동시에 받을 가능성이 있다. 또한 강원도에서도 석탄화력 위주의 발전설비가 상대적으로 크게 증가하였으므로 이에 대한 영향이 있는 것을 보여주고 있다. NO₂의

직접적 인체 위해성은 아직 뚜렷하게 검증되지 않은 실정이나, 수도권에서의 NO₂ 환경기준치 초과일의 상승은 향후 산성비 문제와 함께 질소 배출에 기인하는 PM_{2.5} 등 다양한 2차 오염물질의 발생을 촉진할 가능성이 있으므로 이에 대해 보다 자세한 환경 및 인체 영향 평가가 시급하다고 할 수 있다.



자료: 저자 작성.

**〈그림 4-7〉 전력 수급 기본계획에 따른 연구대상 지역의 환경기준치 초과 일수 증가
(시간당 환경기준치)**

또한 본 연구에서 수행한 수치모의를 위한 배출량 산정에 신규 발전시설에 대한 저감 계획 및 배출량 계획을 직접 반영할 수 없어, 2010년 전국의 발전시설에 대한 평균 개념의 단위 전력용량당 배출계수를 산정한 것에 대한 잠재적 오차 요인이 존재한다.

라. 중국의 BAU 배출 시나리오(IEA)에 따른 2027년 국내 대기오염 전망

앞서 설명한 바와 같이 중국의 배출량 변화에 따른 국내 대기질 변화를 미리 파악하는 것은 대기환경 정책을 위해서 중요한 고려사항이다. 본 연구에서는 IEA(2012)의 보고서에서 현실성 있는 중국의 에너지 수요 BAU 시나리오를 배출량 증가와 비례한다고

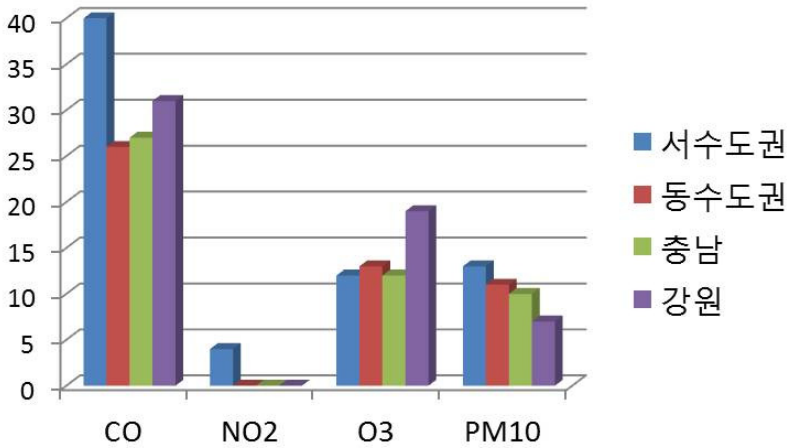
가정하고, 2027년 중국의 주요 대기오염 물질의 배출량을 2010년 대비 58% 증가하는 것으로 가정하여 대기질을 모의하였다. 여기에 기후변화 등의 미래 기상요소의 영향은 배제하였다.

<표 4-6>에서 보여주는 것처럼, 대기 중 잔존시간이 가장 긴 일산화탄소(약 한달)는 중국의 영향이 가장 큰 것으로 나타난 반면, 대기 중 잔존시간이 가장 짧은 이산화질소(1~2일 이내)는 장거리 수송의 영향이 상대적으로 미미하였다. 오존의 증가는 연평균 약 1ppbv를 상회할 것으로 예상되었는데, 전구물질의 증가에 의한 생성과 함께 이미 중국에서 발생된 오존의 영향을 받을 가능성도 있을 것으로 사료된다. PM₁₀ 또한 현재의 수준을 약간 웃도는 수준의 영향이 있을 것으로 예상되며, 장거리 수송의 영향이 상대적으로 적은 강원도 지역의 농도 상승이 가장 낮을 것으로 예측되었다(표 4-6 참조).

<표 4-6> IEA의 BAU 중국의 배출 시나리오에 따른 국내 주요 지역의 연평균 대기질 농도 변화량 추정

	CO	NO ₂	O ₃	PM ₁₀
	Δppbv	Δppbv	Δppbv	Δμg/m ³
서수도권	52	0.3	1.5	3.2
동수도권	48	0.1	1.2	3
충남	50	0.12	1.3	3.6
강원	40	0.02	0.9	1.9

자료: 저자 작성.



자료: 저자 작성.

**〈그림 4-8〉 중국의 배출량 증가 시나리오(BAU)에 따른 연구대상 지역의
환경기준치 초과 일수(시간당 환경기준치)**

중국 BAU 시나리오에 따른 환경 기준 초과일수 변화를 <그림 4-8>에서 보여주고 있다. CO의 경우는 높은 환경 기준농도에도 불구하고, 가장 많은 환경 기준 초과일수 증가를 나타내, 중국의 영향이 가장 큼을 잘 보여 주고 있다. 이로 인한 다른 VOC의 증가 및 유기 에어로졸의 증가 영향에 대하여도 향후 추가적으로 파악할 필요가 있을 것으로 사료된다. 장거리 이동 영향이 가장 적은 NO₂의 환경기준 초과일수 변화는 크지 않은 것으로 나타났다. 오존은 전구물질의 증가 및 생성된 오존의 장거리 이동이 모두 영향을 미칠 수 있어 모두 10일 이상의 환경기준 초과일수 변화를 보여주었다. PM₁₀ 역시 환경기준 초과일수가 증가하는 것으로 나타나 중국 BAU 시나리오의 경우, 미래 국내 대기 환경보존에 부담이 가중될 것으로 판단된다.

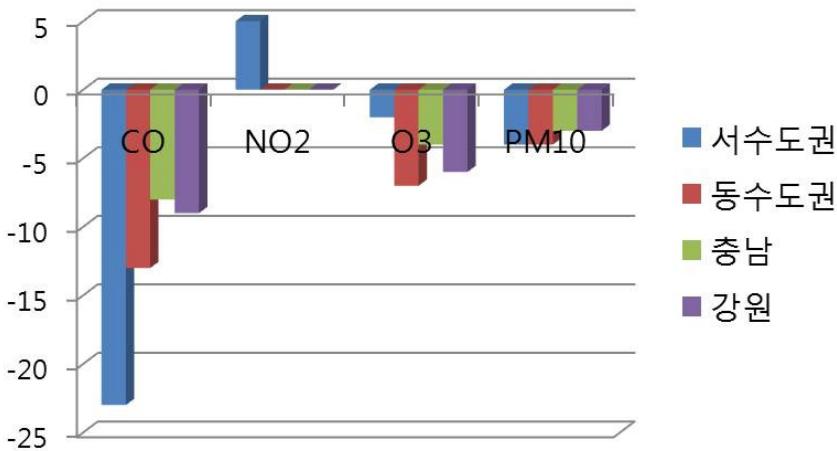
마. 중국의 저감 시나리오(PC)에 따른 2027년 국내 대기오염 전망

중국은 앞 장에서 설명한 바와 같이 최근 들어 적극적인 대기오염 저감 정책을 추진하고 있다. Wang et al.(2014)의 연구에서는 유럽의 IIASA 연구소와 함께, MICS-ASIA 프로젝트의 일환으로 최근 이러한 중국 및 동아시아의 정책방향이 미래 대기오염 배출량을 어떻게 변화시킬지를 예측하였다. <표 3-3>에서 볼 수 있듯, PC 시나리오에 따르면 2027년에는 NO_x, SO_x, PM의 배출이 2010년 대비 약 50% 수준으로 감소하고, 유기물질(CO, VOC)은 약 21% 수준으로 감소할 것으로 전망하였다. 본 연구에서는 이런 배출량 변화를 INTEX-B의 현재의 배출량에 배출량 감소 비율을 적용하여 수치모의를 수행하였다. PC 시나리오는 중국이 보다 새로운 차원의 대기오염 저감정책을 추진하고 이를 이행하는 것을 전제로 하고 있다 (Wang et al., 2014).

저감 시나리오를 적용하여 수치모의를 수행한 결과에 대한 각 대기질 연평균 농도 변화(2009년 대비)를 <표 4-7>에서 보여주고 있다. BAU 시나리오 모의결과와 마찬가지로 대기 중 잔존시간이 가장 긴 일산화탄소의 국내 저감효과가 가장 컸다(약 13~17일 감소). 반대로 대기 중 잔존시간이 가장 짧은 이산화질소는 저감효과가 미미하였다(표 4-7 참조). 오존의 경우도 연평균 농도변화가 크지 않았는데, 이것은 NO_x 농도 변화당 오존생성의 민감도의 상승효과(O₃ 생성)와 하락효과(O₃ titration)가 모두 영향을 미쳤을 가능성이 있다. 그러나 오존의 고농도 현상은 소폭 줄어들 것으로 전망되어 대부분의 지역에서 약 5일 정도의 환경 기준치 초과일수 감소가 예상된다(그림 4-9 참조). 이것은 오존 자체의 장거리 이동 효과 감소도 작용했을 가능성이 있다. PM₁₀은 장거리 수송 효과가 있으므로 연평균 약 5% 정도의 감소 효과가 있을 것으로 예상되며 이로 인한 고농도 일수(환경 기준치 초과일수) 감소가 있을 것으로 예상되었다(그림 4-9 참조).

〈표 4-7〉 중국의 배출 저감 시나리오(PC)에 따른 국내 주요 지역의 연평균 대기질 농도 변화량 추정

	CO	NO ₂	O ₃	PM ₁₀
	Δppbv	Δppbv	Δppbv	Δμg/m ³
서수도권	-17.6	0.2	0.2	-1.7
동수도권	-16.4	0.6	0	-1.6
충남	-17.2	0.2	-0.1	-1.8
강원	-13.4	0.17	-0.1	-1.4



자료: 저자 작성.

〈그림 4-9〉 중국의 배출량 저감 시나리오(PC)에 따른 연구대상 지역의 환경기준치 초과 일수(시간당 환경기준치)

바. 장거리 이동의 영향

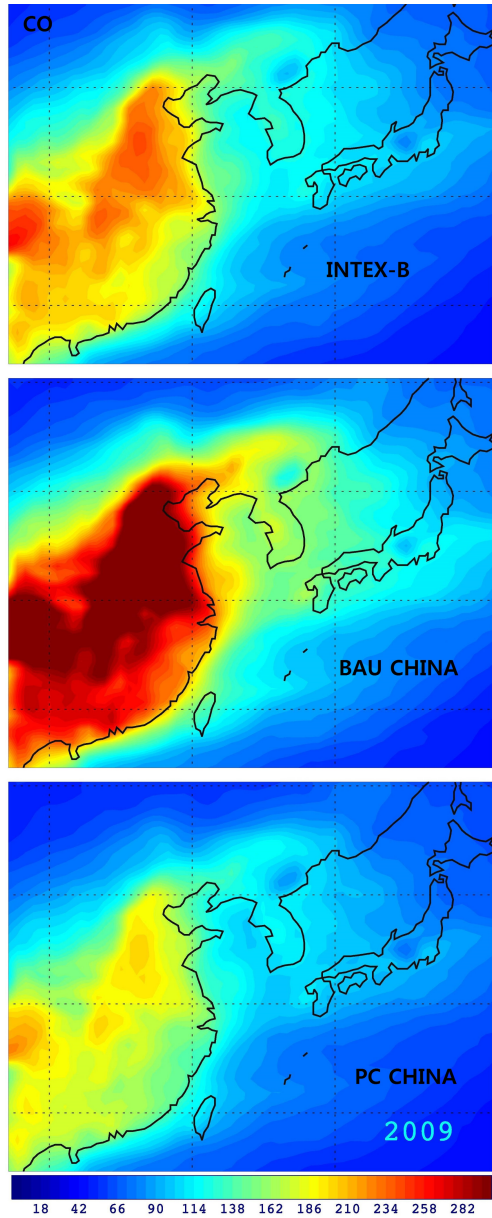
1) 중국의 배출 시나리오별 농도 분포 변화

일산화탄소는 일반적으로 인위적 유기물질의 배출량 정도를 나타내는 좋은 척도이다. 동시에 일산화탄소는 대기 중 잔존시간이 약 한 달 가량 되기 때문에 장거리 이동의 효과가 크다. 따라서 본 연구에서 적용한 미래(2027년)의 중국의 상반된 배출 시나리오(BAU, PC)에 의한 한-중-일 동아시아 지역에서의 농도 분포를 각각 비교해 보고자 한다.

<그림 4-10>에서는 중국의 배출량 변화 시나리오가 동아시아 CO의 대기질에 어떤 변화를 주는지를 보여주고 있다. 첫 번째 그림은 2009년 4월 고도 약 2km 부근의 CO 농도를 모의한 그림이다. 중국의 높은 CO 배출에 의해 약 250 ppbv에 육박하는 높은 CO 농도를 보여주고 있다. <그림 4-10>의 가운데 그림은 BAU 시나리오(약 58%의 배출량 증가)를 가정했을 때의 CO 농도이다. 2009년 기준 농도보다 약 40% 가량 높게 나타나고 있으며 중국에서는 약 300 ppbv를 웃도는 높은 농도를 보여주고 있다. 한국의 영향도 상당하여, 2009년 기준 농도(그림 4-10의 첫 번째 그림)에 비해 약 25% 가까이 증가한 것을 볼 수 있다(그림 4-10 참조). 특히 중국의 영향에 의해 서해와 한반도의 서쪽지방의 농도 변화가 다소 높은 것을 볼 수 있다(그림 4-10 참조). PC(저감) 시나리오(약 21% 감소)로 인해 기준 모의 농도에 비해 약 15% 이상 CO 농도가 감소한 것을 볼 수 있다(대부분 200 ppb 이하). 이러한 영향은 국내의 CO 농도역시 전반적으로 감소시키는 것을 확인할 수 있다(그림 4-10 참조).

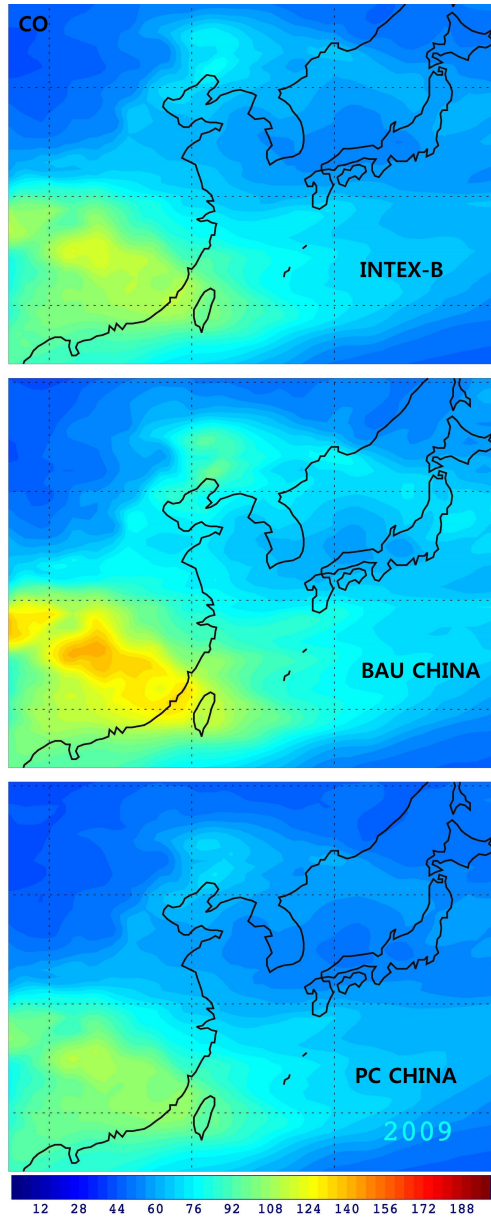
<그림 4-11>은 <그림 4-10>과 같은 설명을 하고 있으나, 고도 약 4km 부근의 농도 차이를 설명하고 있다. 지상 배출량이 많은 지역에서는 고도가 상승할수록 CO의 농도가 급격하기 상승하기 때문에 농도 범위가 확연히 작은 것을 알 수 있다(그림 4-11 참조).

또한 고도가 높은 지역에서는 농도의 패턴이 지상에서의 배출정보보다는 장거리 이동 등을 설명할 수 있는 대기 대순환 현상을 더 잘 설명하고 있기 때문에 고농도 CO 분포가 상이한 것을 확인할 수 있다. 즉, 중간 대류권의 고도에서는 남중국과 한반도 남쪽 해상을 통해 대륙의 배출된 일산화탄소가 서태평양을 통해 이동하는 것을 보여주고 있다. 이러한 정보는 대기오염의 대륙 간 이동에 대한 정량적 정보를 제공할 수 있는 단서가 된다.



자료: 저자 작성.

〈그림 4-10〉 중국의 배출량 시나리오에 따른 동아시아 CO 농도의 비교. 2009년 4월 평균의 고도 약 2km에서의 CO 농도(위), BAU 시나리오에 따른 CO 농도(가운데), 그리고 저감(PC) 시나리오에 따른 CO 농도(아래)



자료: 저자 작성.

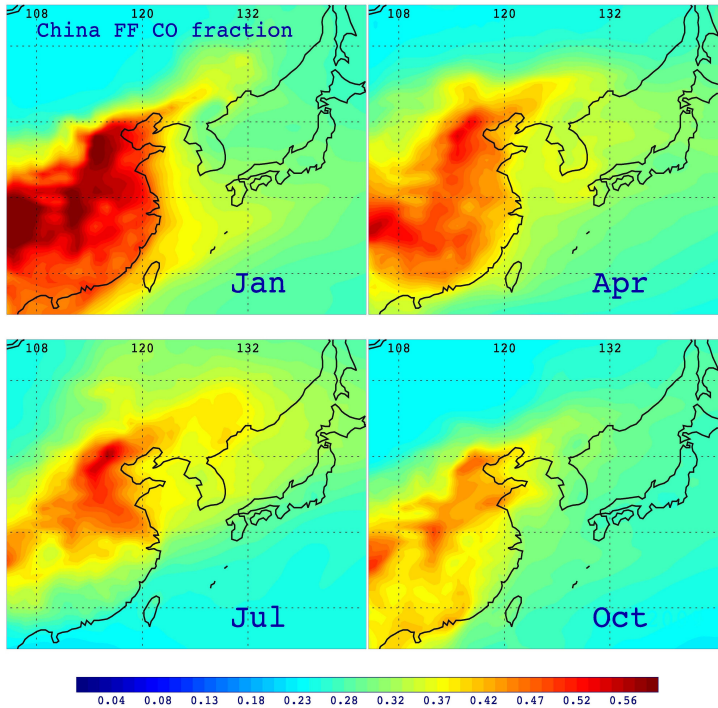
〈그림 4-11〉 〈그림 4-10〉과 같음, 고도 약 4km 부근에서의 CO 농도

앞 절에서 설명한 것처럼, NO_x 의 장거리 수송의 효과는 한반도 서쪽을 제외하고 크지 않을 것으로 전망되며, 오존의 경우는 NO_x 변화에 따른 오존 생성변화가 농도 및 지역에 따라 복잡하기 때문에 단순히 오존에 대한 영향을 설명하기는 어렵다. 그러나 중국에서 고농도의 오존이 한국에 영향을 주어 고농도 사례 증가를 유발할 가능성이 있다(그림 4-8 참조).

2) 국가별 인위적 대기오염 배출에 의한 농도 기여율

앞 절에서 살펴본 바와 같이, 중국의 배출 시나리오 차이에 따른 동아시아 대기질 농도 변화의 예측은 동아시아 대기정책을 준비하는 데 중요한 정보가 된다. 또한 현재의 대기 중 농도의 국가별 배출 기여율을 분석할 수 있다면, 대기오염의 기여에 관련된 국가들의 책임과 정책방향에 대한 정보를 제공할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에선 GEOS-Chem 모형의 일산화탄소의 요인별 추적 모의(tagging simulation) 모듈을 활용하여, 중국에서 발생하는 인위적 CO 배출 (1), 남한 중심의 한반도에서 발생하는 인위적 CO 배출 (2)을 각각 계산하여 두 가지 요인이 전체 CO 농도에 미치는 농도 비율을 계산하였다.

<그림 4-12>는 GEOS-Chem으로 모의한 중국에서의 일산화탄소 배출이 2009년 계절별 동아시아 CO 킬럼 농도(지상 - 대기층 끝까지의 농도 합)에 미치는 비율을 보여주고 있다. 중국의 인위적인 CO 배출은 이 지역의 대기 전체 CO 농도의 약 50%를 차지하는 것으로 나타났다. 지구 전체의 일산화탄소 기여는 인위적 배출 이외에도 자연화재, CH_4 의 산화(배경농도 영향) 및 다양한 유기화합물의 산화의 영향을 받기 때문에 <그림 4-12>에서 보여주는 높은 기여 비율은 이 지역의 매우 높은 배출량을 암시하는 것이다.



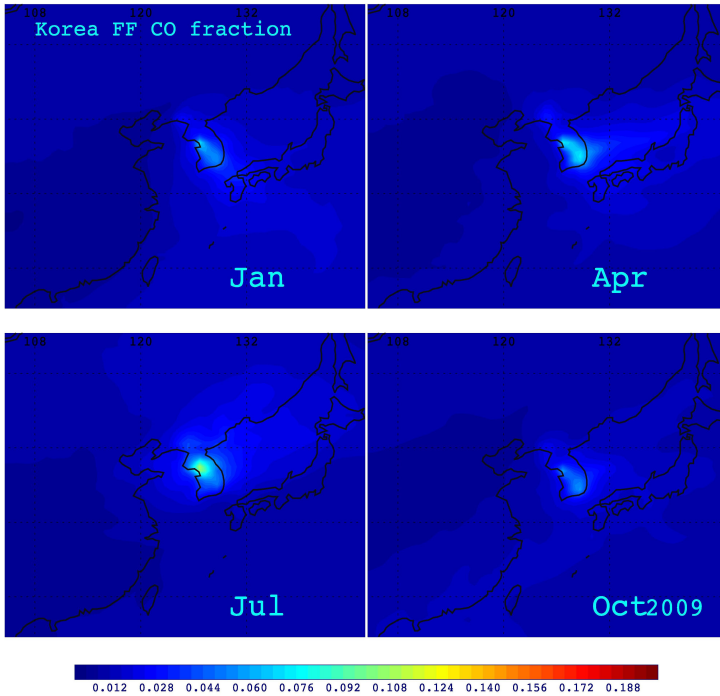
자료: 저자 작성.

<그림 4-12> GEOS-Chem 모의로 계산한 2009년 동아시아 지역 CO의 컬럼농도 중 중국의 배출이 차지하는 비율(0.0 - 0.6)

또한 중국의 CO 배출량은 중국 이외의 동아시아 전체적으로도 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다(그림 4-12 참조). 우리나라는 대기 전체의 CO 농도 중 약 30% 이상을 중국의 인위적 배출에 직접 영향을 받고 있는 것으로 분석되었으며, 일본의 영향은 25~30% 수준인 것으로 분석되었다(그림 4-12 참조). 따라서 동아시아 전체적으로 중국의 CO 배출은 그 영향이 지배적이라고 할 수 있다.

<그림 4-12>는 한국 중심의 한반도에서 일산화탄소의 인위적 배출이 동아시아에 미치는 영향을 보여주고 있다. 한반도에서 유기화합물의 배출량은 2010년을 기준으로 하였을 때, 중국의 약 1/20 수준이다(Wang et al., 2014). 따라서 한국에서 대기 전체의 CO 컬럼농도에 미치는 영향은 최대 10% 미만이며, 수도권 등 배출량이

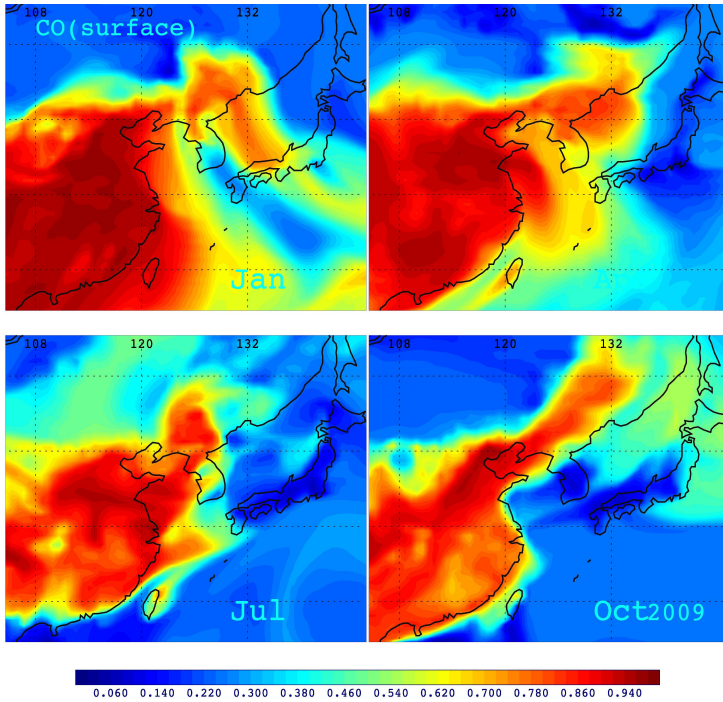
많은 한국 일부 지역에서만 유의미한 기여율을 확인할 수 있다(그림 4-13 참조).



자료: 저자 작성.

〈그림 4-13〉 GEOS-Chem 모의로 계산한 2009년 동아시아 지역 CO의 컬럼농도 중 한국의 배출이 차지하는 비율(0.0 - 0.2)

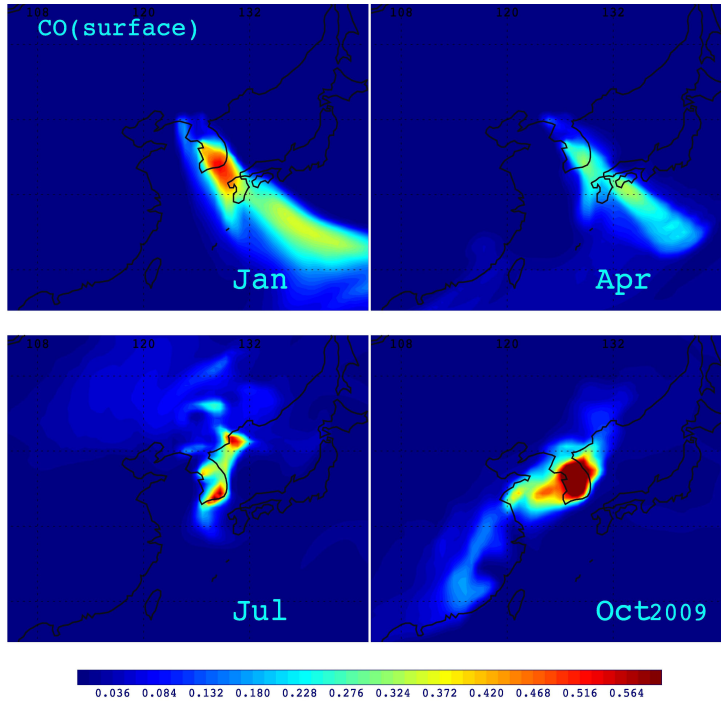
지금까지 CO의 배경농도 기여요소 등 다양한 CO 농도의 기여요소를 포함하여 중국과 한국의 동아시아 차원의 컬럼농도 기여율을 분석해 보았다. <그림 4-14>는 지표 부근의 CO 농도에 한하여 그 기여율을 계산한 것으로서 주로 1차 및 2차 대기오염 및 보건영향과 관계가 있는 잠재적 영향을 보여 준다고 할 수 있다. <그림 4-14>는 동아시아 지역의 중국으로부터의 인위적 CO 배출의 영향을 보여주고 있다. 발원지인 중국 대륙은 거의 대부분 지역에서 농도의 90% 이상의 높은 기여율을 나타내고 있다. 또한 대기의 흐름에 따라 동남 중국해 등 연안지역에도 고농도가 확산되는 것을 보여 준다(그림 4-14 참조).



자료: 저자 작성.

〈그림 4-14〉 GEOS-Chem 모의로 계산한 2009년 동아시아 지역 지표 부근 CO 농도 중 중국의 배출이 차지하는 분율(0.0 - 1.0)

또한 본 연구에서 tagging 기법에 의한 수치모의로 지표 부근의 CO 농도에 대한 한국의 인위적 CO 배출의 기여를 살펴보았다. <그림 4-15>는 동아시아 지역에서 남한 등 한반도에서의 인위적 CO 배출의 기여율을 보여주는 그림이다. <그림 4-13>과 달리 지표 부근에서의 기여율은 배출원의 공간적 분포연관성을 더욱 뚜렷하게 보여주고 있다(그림 4-13 참조). 겨울과 봄철에는 북서풍의 영향이 커 남한지역에서의 고농도 일산화탄소 배출이 남부지방을 지나 일본 큐슈지방과 아래 서태평양 일부 지역에 영향을 미치는 것으로 나타났다(그림 4-15 참조).



자료: 저자 작성.

〈그림 4-15〉 GEOS-Chem 모의로 계산한 2009년 동아시아 지역 지표 부근 CO 농도
중 한국의 배출이 차지하는 분율(0.0 - 1.0)

여름철은 짧은 CO의 대기 중 잔존시간의 영향으로 한국에서의 배출이 다른 국가의 영향이 크지 않음을 보여주고 있다(그림 4-15 참조). 또한 2009년 가을철(10월)에는 대기흐름의 영향이 크지 않아서 한국 지표 부근의 CO 농도는 중국의 영향보다 국내의 영향이 지배적인 것으로 분석되었다(그림 4-15 참조). 따라서 이러한 배출량 및 배출지역의 분포뿐 아니라 시공간적인 대기의 흐름에 따라 그 기여율에 큰 차이를 보이고 있어, 관측 농도의 발원지, 수용지 간 정량적 연관성을 일반화하기에는 다양한 변수가 있기 때문에 간단하지 않다.

사. 분석의 불확실성과 요인 및 추가 연구 사항

본 연구는 글로벌 커뮤니티 대기질 모형 중 하나인 GEOS-Chem의 중규모 해상도의 최신 버전의 모듈을 사용하여 수행하였으나, 방법론적으로, 분석 결과적으로 몇 가지 불확실성과 제한 요인들이 있어, 본 연구 결과의 해석에 참고해야 한다.

첫째, 국내뿐 아니라 동아시아 차원의 대기오염 배출량 자료가 여전히 불확실하다. 본 연구에서 활용한 INTEX-B (Street) 배출량 자료는 태평양의 항공기 대기관측 자료에 근거하여 배출량을 검증하였으나, 지표 부근의 CO 및 NO₂ 등 일차대기오염 물질에 대해 과소평가하는 경향이 뚜렷하다. 환경부에서 작성한 배출량 인벤토리인 CAPSS 자료의 배출목록이 지속적으로 개선되고 있지만, 일본 국립환경연구소(NIES)에서 작성한 배출목록과 비교하였을 때에 한국 내의 지역 간 차이가 컸다(Kim et al., 2013). 따라서 지역별로 정확한 관측 자료를 표준으로 MICS 프로젝트처럼 다양한 모델링에 의한 검증 작업이 지속되어야 한다.

둘째, 오존 및 PM에 의한 한국의 복잡한 대기화학적 환경을 재현하고 설명할 수 있어야 한다. 본 연구에서도 NO₂ 농도 변화에 따른 오존의 증감현상이 복합적으로 나타나고 있다. 따라서 일차 오염물질의 증가에 따라 모든 지역의 오존농도 증가를 단정할 수 없다. 본 연구 결과에서도 추론하게 되는 O₃ titration 현상이 대표적인 경우이다(오존 생성 민감도, Itahashi, Uno, Kim et al., 2013). 이를 위해서 수도권과 주요 배출 시설 중심으로 한 삼차원적인 대기질 관측이 필요하다.

셋째, 본 연구는 장거리 이동의 효과를 포함한 동아시아 차원의 대기질 평가를 위해 중규모 해상도의 GEOS-Chem 모형을 사용하였다. 그러나 상대적으로 큰 격자규모(약 50 x 60km)때문에 기초지자체 수준과 개별 대기관측소를 비교할 수 있는 수준의 분석에 한계가 존재한다. 또한 점오염원이 주가 되는 발전소의 위치 및 이동에 대한 소지역에 대한 효과를 정밀하게 분석하는 데에 한계점이 있다.

넷째, 본 연구에서는 증설되는 개별 전력발전소에 대한 배출량 정보 등에 한계가 있어 2010년 전국의 전력발전량당 발전 연료별 대기오염 배출량을 직접 추정하는 방식을

사용하여 이를 일괄 적용, 미래의 신규/폐기 발전량에 대한 물질별 배출량의 증감을 산정하였다. 따라서 실제 건설될 발전설비의 배출량과 차이를 보일 수 있다.

이밖에도 본 연구에서 다루지 않은 초미세먼지(PM_{2.5})는 인체 유해성이 크에도 불구하고 매우 다양한 발생원인, 배출량의 불확실성 및 소멸 메커니즘을 포함하고 있어 정확한 대기질 모의가 쉽지 않다(Heald et al., 2005). 초미세먼지는 일반적으로 PM₁₀에 비해 장거리 이동 효과가 더욱 크기 때문에 이에 대한 국가 간 영향을 파악하는 것이 상당히 중요하다. 또한 국내 전력 수급 계획에서 초미세먼지의 배출계수 등에 대한 정확한 정보들을 산출하여 이를 향후 환경영향 평가에 반영하여야 한다. 마지막으로 중국뿐 아니라 국내에서도 석탄화력 발전의 증설이 가장 큰 부분을 차지하는 만큼, 석탄화력에 의해 발생하는 미량 유해물질(예, HAPs)의 배출량 및 위해성 평가를 지속적으로 실시하여 이에 대한 정책방안을 마련해야 된다고 판단된다. 이와 관련된 논의는 제5장에 추가하였다.

4. 소결

본 연구에서는 제6차 전력 수급 기본계획에 따라 현재 대비 향후 2027년의 전력발전소 증가에 따른 지자체 수준에서의 대기오염 물질 배출량 변화를 계산하였다. 전력설비 연료별 단위 발전량당 대기오염 물질별 배출량은 2010년의 전국 전력설비용량 대비 환경부의 CAPSS자료의 공공부문 에너지 산업연소 부분을 대조하여 전국 평균 개념의 연료별 단위 발전량(MW)당 대기오염 물질을 계산하였다.

그 결과 2027년에는 인천, 경기, 강원, 충남, 경남 지역의 CO, NO_x, SO_x, PM의 배출량 증가가 유의미하게 나타났다. 특히, 인천, 강원, 충남 지역의 CO, NO_x, SO_x의 배출량 증가가 현재 대비 약 20%~50% 수준으로 상대적으로 크게 나타났다. GEOS-Chem 수치모의가 현재의 지상관측소의 관측결과를 약 0.2~0.6 수준의(일평균 일단위의 2009년 간 시계열 기준) 상관관계(R)를 보이고 있으며, 수치모의 결과, 모든 지역에서 오존과 미세먼지는 시간단위의 환경부 대기 환경 기준치 초과 증가 일수가 약 5일

정도에 머물러 심각한 수준을 보이지는 않았다. 그러나 서부 수도권(인천, 서부경기, 서부서울)에서 NO₂의 환경 기준치 초과일수가 약 25일 이상 증가할 것으로 예측되어 산성비 및 초미세먼지 생성의 영향 등의 추가적 환경영향 연구가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구는 INTEX-B(Street) 배출량 자료를 동아시아 지역에 사용하였으며, 미래 중국의 대기오염 물질 배출량 증가 시나리오(BAU, 일차 대기오염 물질의 배출량이 2027년에 약 58% 증가) 및 대기오염 물질 배출량 감축 시나리오(PC, 유기물질 (21% 감소)을 제외한 대기오염 물질 약 50% 감축)를 중국에 적용한 결과, 2009년 대비 BAU 시나리오는 O₃ 및 PM₁₀의 환경 기준치 초과일수가 약 10일 정도 증가할 것으로 나타난 반면, PC 시나리오는 약 5일 정도 환경기준치 초과 일수 감소가 예상되었다. 이것은 중국의 상당량의 대기오염 물질 감축보다는 중국이 현재의 배출량 수준에서 더 이상 배출량을 증가하지 않도록 억제를 유도하는 정책이 더 효과적일 수 있음을 암시하고 있다.

현재 한국 및 중국의 주요 에너지원은 주로 석탄 화력이다. 이는 경제성을 이유로 선택되었지만 화석연료 중 가장 다양한 대기오염 물질을 배출하고 있다. 따라서 우리나라에서 현재 주로 관리되고 있는 O₃, PM, NO₂, SO₂ 중심의 대기 오염물질뿐 아니라, 석탄화력에 의해 발생하는 다양한 미량 유해물질(PAHs) 및 중금속 등에 대한 연구와 관리가 필요하다고 판단된다.

| 제5장 · 전력수급 기본계획의 환경적 평가 |

1. 전력 수급계획의 잠재적 대기질 영향

앞서 언급하였듯이, 전력 수급 기본계획에 따른 2027년까지의 신규 화력발전설비 중 약 2/3 정도가 석탄화력 발전으로 계획되어 있다. 이는 경기도를 제외한 전국의 신규 화력발전소에 해당된다(약 1070만kW). 본 연구에서는 단위 발전용량 당 NO_x, CO, TSP, SO_x 등에 대한 배출량만을 고려하여 환경부에서 측정, 관리하고 있는 대기오염 물질에 대한 영향 평가를 수행하였다. 그러나 유럽의 환경 보건 기관인 HEAL(Health and Environment Alliance)의 보고서에 따르면 석탄 화력발전은 온실가스 등 주요 대기오염 이외에도 환경호르몬들과 각종 유해 물질(PAHs), 그리고 포름알데히드 등 다양한 유기화합물질을 함께 배출하고, 중금속 등의 미량 유해금속 또한 배출하여 그 잠재적 위해성이 매우 크다고 할 수 있다. 그러나 현재 정부의 전력발전소 건설에는 이러한 미량 유해물질 등에 대한 환경비용 및 영향평가가 포함되어 있지 않다. 따라서 향후 이러한 유해물질들의 위해성에 관한 연구 등을 통해 분석함으로써 정책결정에 활용될 수 있도록 유도할 필요가 있다. <표 5-1>에 HEAL(2013)에서 공개한 석탄 화력으로 부터 배출되는 오염물질과 잠재적 건강영향에 대한 정보를 수록하였다.

〈표 5-1〉 석탄화력발전으로부터 배출되는 오염물질과 건강피해

오염물질	관련 건강 피해
Carbon dioxide(CO ₂)	기후변화로 인한 간접적 영향
High volume hazardous air pollutants	
Sulphur dioxide(SO ₂)	호흡기관, 폐기능, 천식의 악화와 만성 기관지염에 영향을 끼칠 수 있음; 눈 자극; 심장병 악화; 허혈성 뇌졸중 위험
Nitrous oxides(NO ₂)	천식발달 및 악화, 만성폐쇄성 폐질환; 심부정맥, 허혈성 뇌졸중 VOCs의 햇빛과의 반응으로 인한 O ₃ 생성
Particular matter; PM10, PM2.5	호흡기관: 천식발달 및 악화, 만성 폐쇄성 폐질환, 폐암 심혈관: 심부정맥, 급성 심근경색증, 울혈성심부전 신경기관: 허혈성 뇌졸중
Ammonia(NH ₃)	호흡기 자극, 피부 및 눈 화상, 이차입자 전구물질
Hydrogen Chloride and Fluoride(HCl, HF)	피부, 눈, 코, 목, 호흡경로의 급성 자극
Organic pollutants	
Dioxins and furans	잠재적 발암물질; 생식기, 내분비 및 면역체계 영향 다이옥신은 먹이사슬 안에서 축적
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons(PAHs)	잠재적 발암물질; 간, 신장 및 교환 이상반응; 정자 손상 및 생식 악화
Non-Methane Volatile Organic Compounds (VOCs)	
Aromatic hydrocarbons	피부, 눈, 코, 목 자극; 호흡곤란; 폐기능 장애; 시각자극의 지연반응; 장애 메모리; 위장 장애; 간과 신장에 영향; 신경기관 이상반응 벤젠은 강력한 발암물질
Aldehydes including formaldehyde	발암의심물질; 눈, 코, 목 자극; 호흡기관 증상
Heavy metals	
Mercury, in food as Methylmercury	뇌, 신경기관, 신장 및 간 손상
Lead (Pb)	어린이 신경기관 손상; 배움, 기억 및 행동 이상반응; 간 손상 의심물질; 심혈관질환, 빈혈증 원인
Antimony (Sb), Arsenic (As), Beryllium (Be), Cadmium (Cd), Chromium (Cr), Nickel (Ni), Selenium (Se), Manganese (Mn)	발암물질; 신경, 심혈관, 피부, 호흡 및 면역체계 이상반응 국제암연구기관은 arsenic과 그 화합물을 발암물질 제1그룹으로 지정
Radioisotopes	
Radium (Ra)	발암물질; 기관지폐렴, 빈혈증, 뇌농양
Uranium (Ur)	발암물질; 신장질환

자료: HEAL(2013)의 자료를 재인용: 심창섭 외(2013).

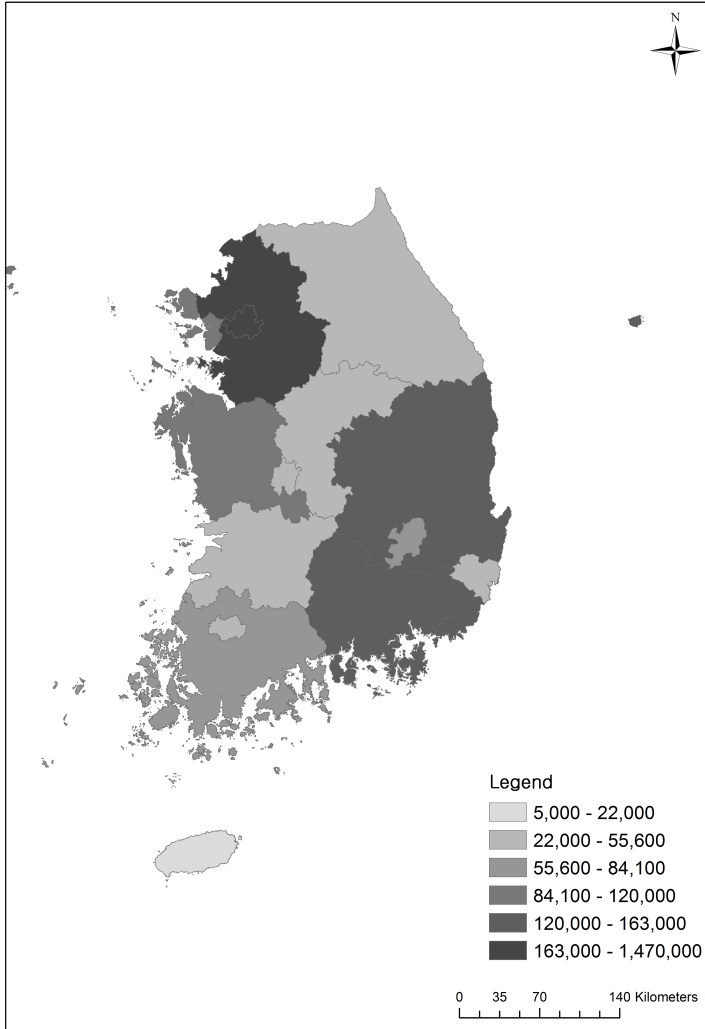
2. 배출량 및 인구를 고려한 대기영향 지표

유럽에서는 현재 대기오염의 환경영향을 평가할 때, 오염물질의 배출량 뿐 아니라 배출되는 지역의 인구를 고려하여 환경비용을 산정한다. 특히 인구 50만 이상의 지역에 대한 추가 가중치를 적용하고 있다(Holland and Watkiss, 2002; Holland, M. et al., 2005). 또한 미국 EPA에서는 특정 지역의 대기환경 관리에 배출량에 인구가중치를 적용하는 “인구가중 배출 지수”, 즉, Population Weighted Emission Index(PWEI)를 적용, 대기오염 관리와 측정망의 위치 및 운영의 지침으로 삼고 있다(예, SO_x 배출량 관리, EPA, 2010). PWEI는 특정 지역의 연간 배출총량(ton/year)에 해당 지역의 총 인구를 곱하고 그것을 인구 수 백만으로 나눈 값이다(EPA, 2010).

본 연구에서는 국립환경과학원의 CAPSS 2010 자료와 통계청의 인구자료를 활용하여 광역지자체 단위의 CO, NO_x, PM₁₀, SO_x의 PWEI 값을 산출하였다. <그림 5-1>에서 <그림 5-4>까지 CO, NO_x, PM₁₀, SO_x의 PWEI 분포를 보여주고 있다. PWEI를 시행하고 있는 미국의 경우, 캘리포니아의 LA 지역과 오렌지카운티 지역(총인구 수: 1,280만 명)은 SO_x의 PWEI 값이 약 170million persons-tpy을 기록하여 캘리포니아 주에서 가장 높은 값을 보이고 있어, 현재 약 2개의 SO₂ 측정소의 증설을 요구하고 있는 실정이다(CEPA, 2013). SO_x의 경우 우리나라는 1990년대부터 탈황장치의 보급 및 교통부분의 청정에너지 전환정책으로 배출량이 크게 감소하였고, 대기 중 농도도 눈에 띄게 감소하여 현재는 대기환경 기준치를 크게 밑돌고 있는 실정이다(국립환경과학원, 2013). 그러나 <그림 5-4>에서 보여주듯이, 경기도와 전라남도의 SO_x의 PWEI 값은 캘리포니아 주의 LA-Orange County 지역을 초과하고 있는 수준이어서, SO_x의 꾸준한 감축에 의해 SO₂의 농도가 크게 낮아졌음에도 불구하고, 인구 가중치를 적용하였을 때에 우리나라도 이에 대한 지속적인 감축노력이 여전히 필요하다고 판단된다.

본 연구에서 계산한 전력수급기본계획에 따른 2027년 전력 발전부분의 배출량 변화를 반영한 지자체별 배출량의 변화량에 따라 2010년 대비, PWEI 증감에 대한 그림을 <그림 5-5>에서 <그림 5-8>까지 나타내었다.

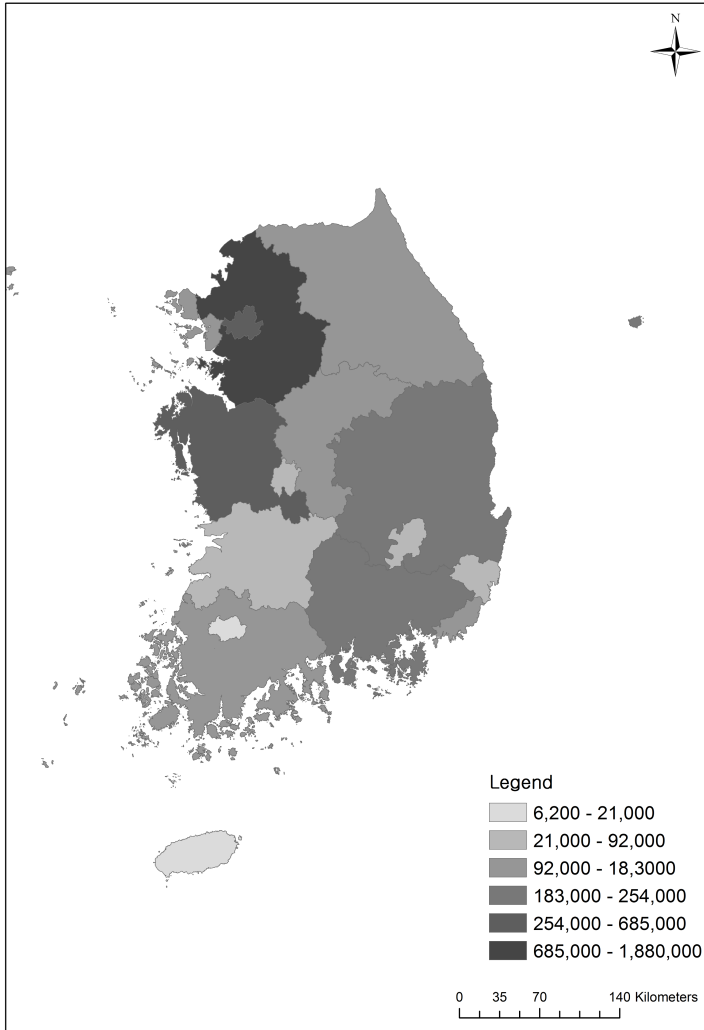
(단위: milion persons-tpy)



자료: 저자 작성.

〈그림 5-1〉 2010년 일산화탄소(CO)의 광역지자체별 인구가중치 배출지수(PWEI) 값

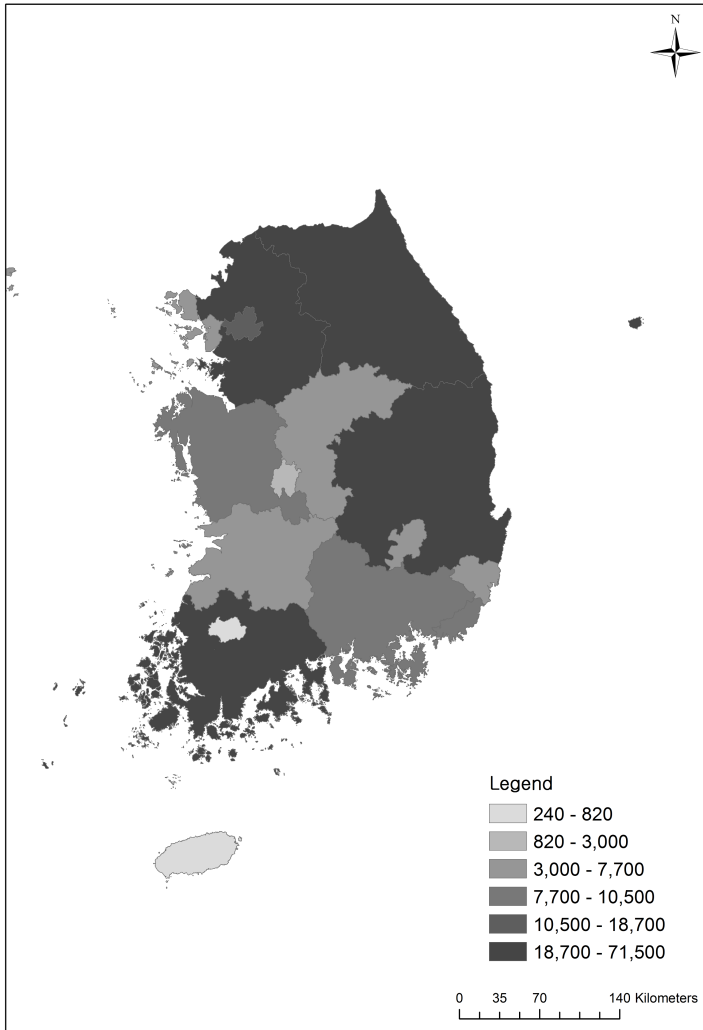
(단위: ton/(year·백만인구수))



자료: 저자 작성.

〈그림 5-2〉 2010년 질산화물(NO_x)의 광역지자체별 인구가중치 배출지수(PWEI) 값

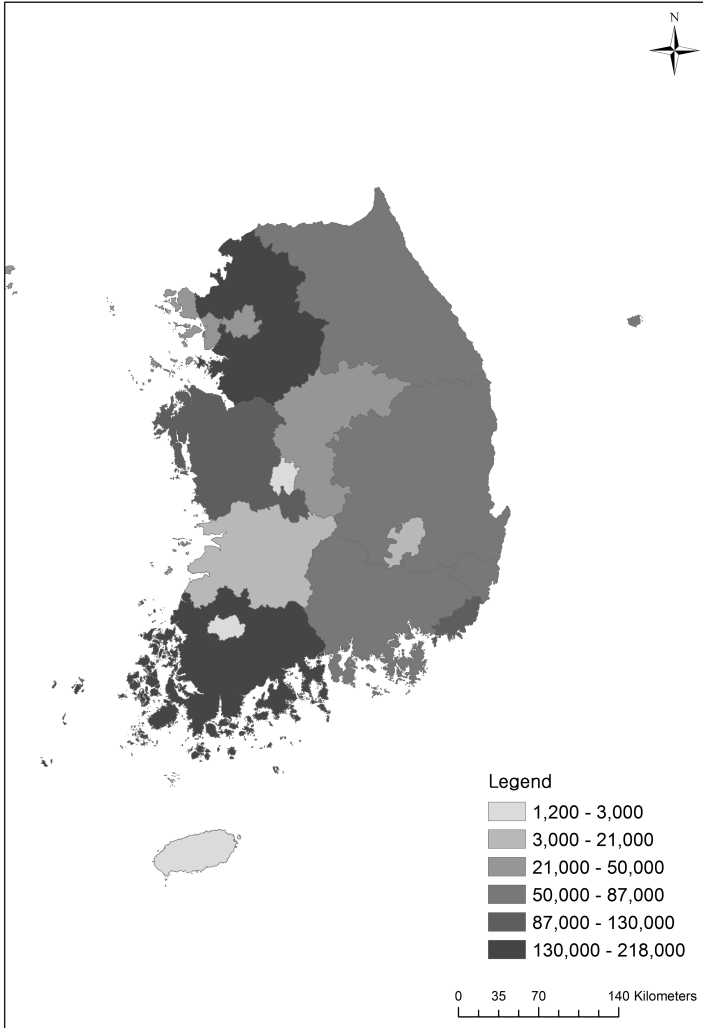
(단위: ton/(year·백만인구수))



자료: 저자 작성.

〈그림 5-3〉 2010년 미세먼지(PM₁₀)의 광역지자체별 인구가중치 배출지수(PWEI) 값

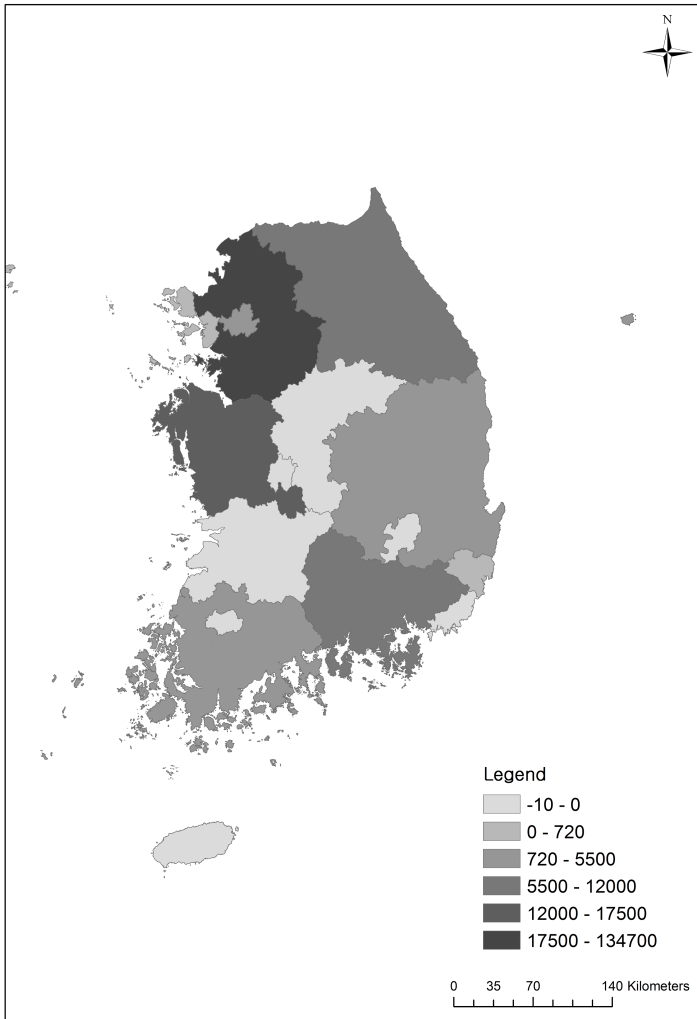
(단위: ton/(year·백만인구수))



자료: 저자 작성.

〈그림 5-4〉 2010년 황산화물(SO_x)의 광역지자체별 인구가중치 배출지수(PWEI) 값

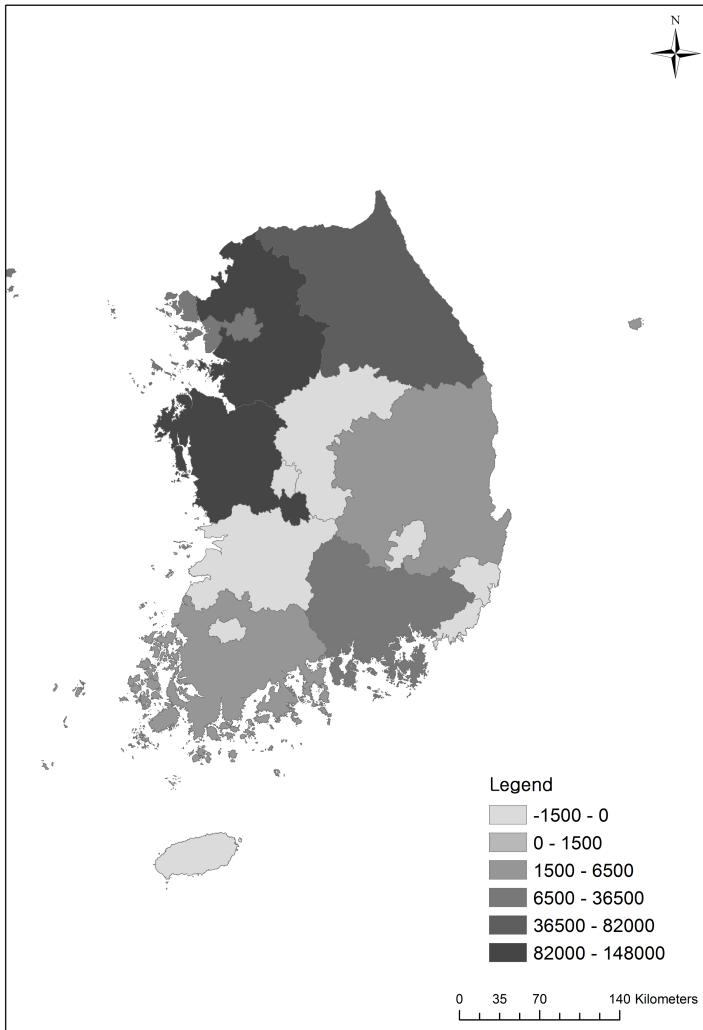
(단위: ton/(year·백만인구수))



자료: 저자 작성.

〈그림 5-5〉 2010년대비 2027년 전력발전 변화에 따른 일산화탄소(CO)의
광역지자체별 인구가중치 배출지수 변화값 ($\Delta PWEI$) 값

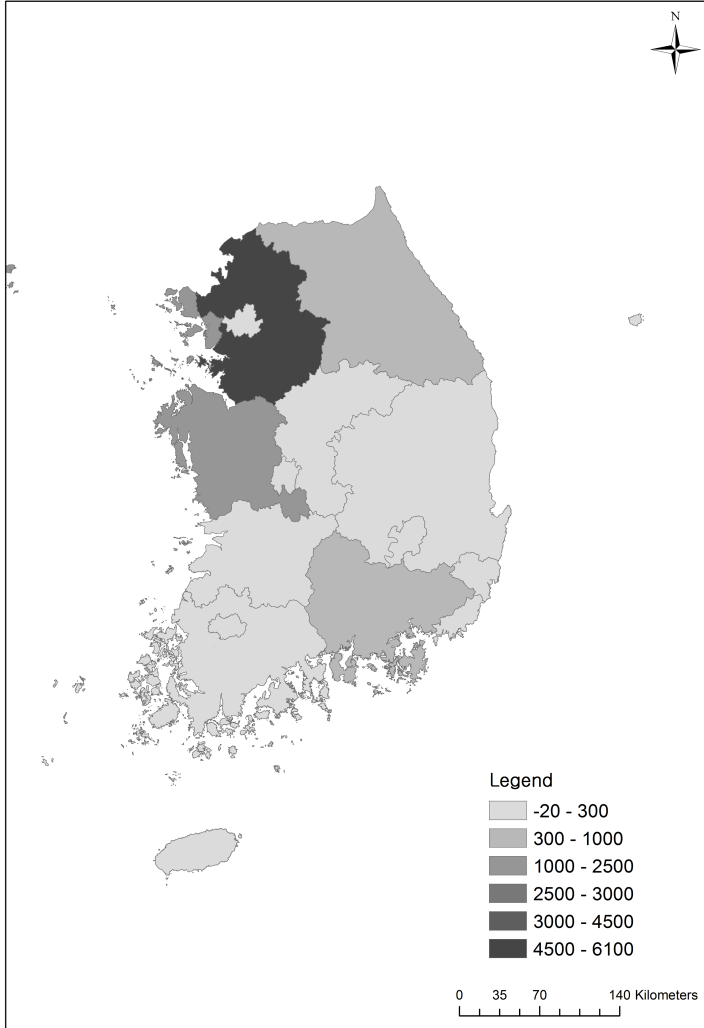
(단위: ton/(year·백만인구수))



자료: 저자 작성.

〈그림 5-6〉 〈그림 5-5〉와 동일하나, 질산화물 (NO_x)의 ΔPWEI 값

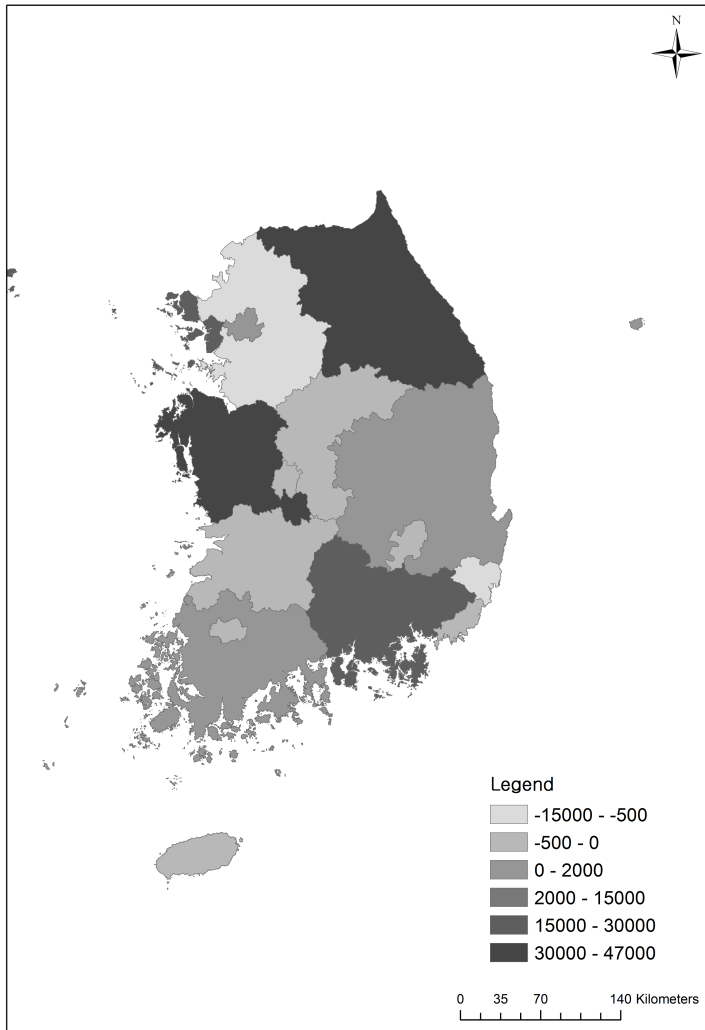
(단위: ton/(year·백만인구수))



자료: 저자 작성.

〈그림 5-7〉 〈그림 5-5〉와 동일하나, 총먼지 (TSP)의 Δ PWEI 값

(단위: ton/(year·백만인구수))



자료: 저자 작성.

〈그림 5-8〉 〈그림 5-5〉와 동일하나, 황산화물(SO_x)의 ΔPWEI 값

2027년 CO에 대한 Δ PWEI 값(PWEI 변화량)은 2010년의 PWEI 값에 비해 강원지역의 변화가 눈에 띈다(그림 5-5 참조). 상대적으로 탄소배출이 큰 석탄화력 발전소의 영향 때문이다. NO_x에 대한 Δ PWEI 값은 수도권 및 충남지역은 인천, 경기, 충남 지역의 석탄 및 LNG 발전 설비 증가와 높은 인구밀도에 의해 압도적으로 높은 값을 보여주고 있다(그림 5-6 참조). 먼지(TSP)는 단위 전력발전량당 배출량이 크지 않기 때문에 대부분 지역에서 상대적으로 작은 값을 보여주고 있으나, 석탄 화력에 비해 소량의 배출에도 불구하고 경기지역의 LNG 발전은 높은 인구 수(약 천백만 명) 때문에 상대적으로 큰 PWEI 변화량을 보이고 있다(그림 5-7 참조). 이는 발전소 건설 시 건강영향 등 환경비용 등을 고려할 때에 노출인구 수를 고려해야 함을 의미한다. SO_x는 주로 석탄 화력발전에 의존하기 때문에 먼지와 달리 경기지역의 영향은 크지 않았다(그림 5-8 참조). 대신 인천, 강원, 충남, 경남의 변화량이 상대적으로 높았다. 이는 본 연구에서 계산한 전력설비 증가에 따른 배출량 변화량(표 2-3 참조)을 그대로 반영한 것으로 볼 수 있다.

3. 미국의 청정 발전 계획에 따른 감축 계획

미국은 오바마 정부의 “기후 액션 플랜(Climote Action Plan)”의 일환으로 2014년 현존하는 전력 발전소의 탄소 오염 감축 계획의 최초 가이드라인을 발표하였다(Clean Power Plan, 이하 CPP)(EPA, 2014a). EPA의 이 발표에 따르면 기후변화와 대기오염을 유발하는 미국 내 발전소의 배출량을 감축하고 이로 인해 기후변화와 대기오염으로부터의 환경개선과 보건 및 경제 활력을 증진하는 데에 초점을 두었다(EPA, 2014b). 이 CPP에 의하면 발전소로부터의 배출량 감축은 기후변화 및 환경보전에 있어 가장 편익이 큰 것으로 나타났다(EPA, 2014b). 즉, 미국은 2030년까지 탄소오염물질의 배출을 2005년보다 약 30% 감축할 것을 목표로 하였다. 이것은 약 7억 3천만 톤에 해당하는 것으로, 약 1억 5천대의 일 년간 자동차에서 발생하는 탄소배출과 맞먹는 것이며, 전 미국의 가정배출량의 약 절반에 해당하는 공격적인 감축 목표라고 할 수 있다(EPA, 2014b). 이 계획이 실현될 경우 미국은 조기 사망률,

아동천식, 심장마비, 입원율과 노동시간 단축과 같은 요소로부터 큰 편익을 거둘 수 있을 것으로 예상하였다(예, 약 2,700~6,600명의 연간 조기 사망률 감소, EPA 2014b).

또한 이 계획에 따르면 CPP는 PM_(2.5), SO₂, NO₂ 등의 감축을 통해 2030년까지 현재 보다 약 25%의 관련 질병발생을 줄일 계획이다. 미국의 Clean Power Plan에 의한 PM_{2.5}, SO₂, NO₂의 감축계획을 <표 5-2>에 나타내었다.

**<표 5-2> 미국의 청정 발전소 계획에 따른 (Clean Power Plan)
대기오염 물질 저감 계획(2030년까지)**

감축량 (톤)	
CO ₂	730,000,000
PM _{2.5}	54,000 - 56,000
SO ₂	424,000 - 471,000
NO ₂	407,000 - 428,000

자료: EPA(2014b).

미국은 이 청정 발전계획을 미국 전역의 약 1,000개에 달하는 화석 발전소에 적용시킬 계획이다. 이 청정 계획의 주 이슈는 노후한 발전소를 LNG 및 대체에너지원으로 전환시키는 것을 골자로 하고 있다. 현재 미국 내의 석탄 화력 발전소의 평균연령은 약 42년으로 연료별 발전소 분류 중 가장 오래되었다. 따라서 향후의 미국 석탄 화력 발전의 사실상 대량 퇴역이 예상되고 있다(Kopp, 2012).

미국은 CPP를 주단위에서 실천할 수 있도록 주단위의 계획안을 2016년 6월까지 제출하도록 하였으며 2018년까지 주 단위 플랜을 확정, 제출하도록 명시하고 있다(EPA, 2014b). 최근 중국은 (초)미세먼지를 포함한 극심한 대기오염 현상으로 대대적인 대기오염 배출계획을 추진하고 있으며, 미국의 미래 제조업, 발전 부분에서의 대기오염 배출 계획을 벤치마킹하는 것을 검토하고 있다 (조석연, 2014, 개인적 의견교환). 이를 실천할 경우, 본 연구에서 활용한 PC 시나리오에 준하는 저감효과를 거둘 수 있기 때문에 중국의 배출량 및 배출 지역의 변화패턴을 주목하여 이에 따른

장거리 대기오염 영향에 대한 지속적인 평가연구가 필요하다고 할 수 있다. 미국의 이러한 방침은 우리 정부의 전력 수급 기본계획이 선진국 등의 방향과는 다른 것임을 보여주고 있으며, 중국 정부의 미국 정책에 대하여 벤치마킹 의지가 있는 것처럼 우리나라의 향후 전력발전에 대한 방향에 이러한 선진국의 사례를 적용할 필요가 있다. 또한 국내 석탄화력 증설에 따른 미량의 유해 물질 및 중금속의 인체 영향과 노출 인구수를 동시에 고려한 보다 선진적인 환경보건 및 환경 영향평가가 시급하다고 판단된다.

| 제6장 · 결론 및 정책 제언 |

본 연구는 산업통상자원부(과거 지식경제부)의 전력수급기본계획(6차)의 국내 대기질의 영향을 파악하기 위한 것을 주된 목적으로 연구를 수행하였다. 동아시아 차원의 배출 인벤토리는 미국-중국의 공동프로젝트인 INTEX-B 자료를 기본으로 대기화학-수송모형(GEOS-Chem)의 중해상도 규모의 대기질 수치모의를 수행, 분석하였다. 2010년을 기준으로 2027년도까지 전력수급기본계획에 따라 증설 혹은 폐기될 전력발전 시설을 조사하여 지역별 발전량(MW) 변화를 계산하였으며, 2010년 지자체별 전력 발전량과 환경부의 CAPSS 배출량 자료 중 에너지 산업연소의 지자체별 배출량을 기준으로 각각 대조하여 전국 평균 개념의 전원구성별 발전량당 오염물질 배출량을 자체적으로 산정하였다(kg/MW). 이러한 방법으로 미래의 각 광역 지자체별 배출량 총 변화량을 산정하여 (2027년 기준) 그 비율을 기존의 배출 인벤토리에 적용, 대기질 모델링을 수행하였다. 2027년 기후 및 기상변화에 대한 고려는 하지 않았다.

중국의 배출량이 장거리 수송에 의한 국내 영향은 점차 중요해지고 있으므로, 중국의 배출량 변화 시나리오를 선정하여 미래(2027년)의 중국의 배출량 증가 (BAU)와 배출량 저감(PC) 시나리오를 최신의 선행 연구 자료를 바탕으로 적용, 이를 동아시아 차원의 대기질 모델링에 적용하여, 국내의 대기질에 미치는 민감도를 분석하였다. 이를 포함한 본 연구의 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 전력수급기본계획에 따라 오는 2027년에는 전력 발전소의 증설에 따라 인천, 경기, 충남, 강원, 경남지역의 배출량이 다소 증가할 것으로 확인되었다. 특히, 경기지역을 제외하고는 대부분 석탄화력 발전 형태로 증설될 계획이어서 해당지역의 NO_x, CO, PM의 배출량 증가가 예상된다.

둘째, 현재 우리나라 대기질 상황은 PM의 환경기준치 초과일수(시간기준)가 가장

높게 나타나고 있으며, 수도권에서는 오존, 이산화질소 및 일산화탄소의 환경기준치 초과 일수가 약 50일을 넘어서고 있다. 이러한 상황에서 현 정부의 전력수급기본계획에 따라 2027년에 주요지역(서수도권, 동수도권, 충남, 강원)을 예측한 결과 이산화질소(NO₂)가 서수도권(인천, 서부 경기 및 서부서울)에서 환경 기준치를 약 30일 가까이 추가로 초과할 것으로 예상되었다. 이러한 일차 오염물질의 환경기준치 초과 현상은 산성비 및 질소 증가에 의한 이차적인 초미세먼지 증가에 영향을 줄 가능성이 있어, 이와 관련된 환경적 피해가 예상된다. 그러나 건강영향이 상대적으로 큰 오존과 PM₁₀의 환경기준치 초과일수는 크게 증가하지 않을 것으로 예상된다. 그럼에도 불구하고, 일부 지역의 일차 오염물질의 증가 및 석탄화력에 의한 미량의 중금속 및 유해물질의 노출과 건강영향에 대한 지속적인 조사가 시급하다고 판단된다.

셋째, 중국의 배출량 증/감에 따라 국내 주요지역(서수도권, 동수도권, 충남, 강원)의 대기질 농도의 민감도는 다음과 같다. BAU 중국 배출량 증가 시나리오에 따르면 국내 주요 지역의 일산화탄소 환경기준치 초과 일수가 가장 컸다(약 25~40일). 그리고 오존의 연평균 농도 증가보다는 고농도 오존 이벤트 증가로 인하여 오존 농도의 환경기준치 초과 일수가 평균 10일 이상 증가할 것으로 예상된다. 이 PM₁₀의 환경기준치 초과 일수는 오존에 준하는 수준의 증가가 예상된다. 그러나 저감 시나리오(PC)에 의한 환경기준치 초과 일수 감소는 BAU 시나리오에 비해 소폭의 영향을 미쳤다. CO는 약 20일 이하, 오존과 미세먼지는 약 5일 정도의 수준으로 환경 기준치 초과 일수가 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 중국의 저감에 따른 국내의 편익을 기대하기보다는 중국의 배출량 증가를 향후 억제하여, 국내 대기질을 악화시키지 않는 방향으로 국제공조를 유도하는 것이 중요하다고 판단된다. 이 평가에서 국내의 배출량은 2010년 수준으로 고정시켜 가정하였다. 오염 물질 중 이산화질소의 경우는 대기 중 잔존시간이 상대적으로 짧아 중국의 영향이 크지 않은 것으로 나타났다.

넷째, 우리나라는 대기환경정책을 논할 때에 노출인구를 반드시 고려하는 것이 중요할 것으로 사료된다. 그러한 개념은 EPA의 Population Weighted Emissions Index(PWEI) 및 Population weighted concentration(PWC)처럼 인구노출을 감안한

지수를 활용하여 건강영향을 환경정책에 적용하는 것이 유용할 것으로 판단된다.

다섯째, 모델링과 관련된 불확도는 다소 존재한다. 특히 동아시아에서의 상대적으로 부족한 대기질 측정 및 배출량 자료 간 상이성, 그리고 모델링 알고리즘 등의 개선이 지속적으로 필요하다. 본 연구에서 적용한 모델링은 지역 규모 이상의 대륙 차원의 삼차원적 대기질을 설명하는 데에 매우 유용한 모델이나, 동아시아 지역의 특징인 오존 광화학 반응 및 중해상도에서 특정 지역의 점오염원과 그 영향을 분석하는 데에 다소 한계를 보였다. 또한 중국을 포함한 국내외의 배출인벤토리가 물질별로 여전히 현재의 대기질을 설명하기에 일부 과소평가된 경향을 보여, 대기오염 배출 인벤토리 개선을 위한 프로그램(예, MICS-ASIA)의 꾸준한 추진과 검증을 통한 개선이 필요하다. 또한 이와 관련된 다양한 주요 배출요인의 배출계수 등에 대한 정확한 산정과 적용이 필수적이라고 할 수 있다.

마지막으로 중국과 함께 한국의 석탄화력(발전)에 대한 의존도는 현재 국내에서도 환경비용 산정 시 미량의 중금속 등 유해물질들에 대한 평가가 제대로 파악되지 않아 환경비용이 저평가되었을 가능성이 있다. 인구노출에 대한 고려와 함께 이러한 미량 독성 물질의 영향과 환경 피해 비용에 대한 정량적 연구를 통해 석탄화력 발전에 대한 보다 현실적인 환경영향에 대한 논의가 필요하며, 관련 정책 및 국내 전략 환경영향평가 차원에서 이를 적극적으로 반영되어야 된다고 판단된다.

| 참고문헌 |

<국문 자료>

- 국립기상연구소. 2010. 「2009년도 황사 보고서」 .
- 국립환경과학원. 2013. 「대기오염물질 배출량 2011」 .
- 국립환경과학원. 2013b. 「대기환경연보(2012)」 .
- 김순태. 2011. “2007년 6월 수도권 오존모사 V- 배출량 변화에 따른 오존농도 예측 시 민감도 기법 적용”. 「한국대기환경학회지」 27(6): 772-790.
- 나유경 외. 2013. “아시아 지역 대기오염 배출량 데이터의 활용성 비교 분석”. 「기후연구」 8(2): 105-115.
- 산업통상자원부, 민관합동 워킹그룹. 2013. 「2차 국가에너지기본계획 민간합동 워킹그룹」 .
- 심창섭, 서지현. 2013. 「동북아 대기오염 전망을 고려한 국내 석탄화력 발전 증설의 대기질 영향분석」 . 한국환경정책·평가연구원.
- 심창섭. 2010. 「대기 중 이산화탄소 분포에 대한 이해 - 위성관측과 GEOS-Chem 결과를 중심으로」 . 한국환경정책·평가연구원.
- 지식경제부. 2013. 「제6차 전력수급기본계획(2013~2017)」 .
- 환경부. 2011. 「환경통계 Brief Guide」 .
- 환경부. 2012. 「2012년 환경백서」 .
- 환경부. 2013. 「환경통계연감 2012」 .

<영문 자료>

- Bey, I. et al. 2001. "Global modeling of tropospheric chemistry with assimilated meteorology: Model description and evaluation". *Journal of Geophysical Research-Atmosphere*, 20, 106(D19): 23073-23095.
- California Environmental Protection Agency (CEPA). 2013. California Infrastructure SIP. Air Resources Board Report.
- Cofala, J. et al. 2012. *Emissions of Air Pollutants for the World Energy Outlook 2012 Energy Scenarios*. Laxenburg, Austria: International Institute for Applied Systems

Analysis.

EPA. 2014a. *News Releases from Headquarters: EPA Progresses First Guidelines to Cut Carbon Pollution from Existing Power Plants*, EPA Press Office (06/02/2014).

EPA, 2014b, *EPA Fact Sheet: Clean Power Plan*, EPA Press Office.

HEAL. 2013. *The Unpaid Health Bill*.

Heald, C. L. et al. 2005. "A large organic aerosol source in the free troposphere missing from current models". *Geophys. Res. Lett.*, 32, L18809. doi:10.1029/2005GL023831.

Holland, M. and Watkiss, P. 2002. *BeTa Version E1.02a Benefits Table database: Estimates of the marginal external costs of air pollution in Europe*.

Holland, M. et al. 2005. *Damages per tonne emission of PM2.5, NH3, SO2, NOx and VOCs from each EU25 Member State (excluding Cyprus) and surrounding seas*. European Commission DG Environment.

IEA. 2012. *World Energy Outlook 2012*.

Itahashi, S., I. Uno, S. Kim. 2013. "Seasonal source contributions of tropospheric ozone over East Asia". *Atmospheric Environment*, 70: 204-217.

Kim, N. K. et al. 2013. "Verification of NOx emission inventory over South Korea using sectorial activity data and satellite observation of NO2 vertical column densities". *Atmospheric Environment*, 77: 496-508.

Kodama, Y. et al. 2003. "Environmental NO2 concentration and exposure in daily life along main roads in Tokyo". *Environ Res.* Jul, 89(3): 236-244.

Kopp, J. 2012. *Power Plant Decommissioning: A Noble Past, Many Possible Futures*. Benchmark 2012-01, pp.9-12.

Le Quéré, C. et al. 2014. "Global Carbon Budget 2014". *Earth System Science Data Discussions*, 7: 521-610.OECD, 2008.

OECD Environmental Data Compendium 2006/2007. 재인용: 환경부. 2011. 「환경통계 Brief Guide」

Streets, D. G. et al. "Revisiting China's CO emissions after the Transport and Chemical Evolution over the Pacific (TRACE-P) mission: Synthesis of inventories, atmospheric

- modeling, and observations". *J. Geophys. Res.*, 111, D14306, doi:10.1029/2006JD007118, 2006.
- Wang, S. X. and Hao, J. M. 2012. "Air quality management in China: Issues, challenges, and options". *J. Environ. Sci.-China*. 24: 2-13, doi:10.1016/S1001-0742(11)60724-9.
- Wang, S. et al. 2014. "Emission trends and mitigation options for air pollutants in East Asia". *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14:6751-6603.
- Zhang, H. et al. 2012. "Simulation and validation of the aerosol optical thickness over China in 2006". *ACTA METEOROLOGICA SINICA*, 26(3):330-344.
- Zhang, Q. et al. 2009. "Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission". *Atmos. Chem. Phys.*, 9:5131-5153.

<온라인 자료>

전력통계정보시스템. <https://epsis.kpx.or.kr>

EPA. 2010. *Federal Register, Vol. 75, No.119, June 22, 2010, Rules and Regulations.*
www.epa.gov/ttn/naaqs/standards/so2/fr/20100622.pdf

GEOS-Chem Wiki. 2014. *GEOS-Chem Wiki.* <http://wiki.seas.harvard.edu/geos-chem/index.php>

〈부록 1〉 전력 발전소 목록(2010 vs 2027)

부록 1에는 2010년과 2027년의 전력 원료별 발전소 목록을 지역별, 회사별, 설비용량, 대수, 총 설비용량, 연도별로 나타내었다. 지난 2010년도에 운행되었던 발전소는 연도에서 2010년이라고 표기하였고, 2010년부터 2027년 사이에 전력수급 계획에 따라 신설된 발전소는 해당 연도와 월을 작성하였다. 한편, 그동안 폐기된 발전소 목록은 회색 음영으로 표시하여 나타내었다. 그리고 비교에는 6차 전력수급 발전계획을 바탕으로 확정 설비는 ‘확정’으로, 비확정 설비, 즉 발전계획의 목록에만 올라온 발전소는 ‘발전계획(6차)’으로 구분하여 나타내었다.

지역	연료원	발전소명	회사	설비용량	대수	총설비용량(MW)	연도	폐기	신설계획
강원도	LNG	영월복합GT1	남부	183	1	183.0	2010		
강원도	LNG	영월복합GT2	남부	183	1	183.0	2010		
강원도	LNG	영월복합GT3	남부	183	1	183.0	2010		
강원도	LNG	영월복합ST1	남부	299	1	299.0	2010		
강원도	국내탄	영동	남동	200	1	200.0	2010		
강원도	국내탄	영동	남동	125	1	125.0	2010		
강원도	국내탄	동해	동서	200	2	400.0	2010		
강원도	석탄	북평 #1	GS 동해전력			595.0	2016.2		확정
강원도	석탄	북평 #2	GS 동해전력			595.0	2016.2		확정
강원도	석탄	삼척 #1	남부			1,000.0	2015.12		확정
강원도	석탄	삼척 #2	남부			1,000.0	2016.12		확정
강원도	석탄	동부하슬라 #1	동부하슬라 라파워			1,000.0	2019.12		발전계획 (6차)
강원도	석탄	동부하슬라 #2	동부하슬라 라파워			1,000.0	2020.06		발전계획 (6차)
강원도	석탄	동양파워 #1	동양			1,000.0	2019.12		발전계획 (6차)

지역	연료원	발전소명	회사	설비 용량	대수	총설비용량 (MW)	연도	폐기	신설 계획
강원도	석탄	동양파워 #2	동양			1,000.0	2021.07		발전계획 (6차)
강원도	석탄	G프로젝트 #1	삼성물산			1,000.0	2019.04		발전계획 (6차)
강원도	석탄	G프로젝트 #2	삼성물산			1,000.0	2019.10.		발전계획 (6차)
경기도	LNG	부천복합GT	GS POWER	100	3	300.0	2010		
경기도	LNG	부천복합ST	GS POWER	150	1	150.0	2010		
경기도	LNG	안양복합GT	GS POWER	75	4	300.0	2010		
경기도	LNG	안양복합ST	GS POWER	150	1	150.0	2010		
경기도	LNG	여주복합	SK E&S			950.0	2017.06		발전계획 (6차)
경기도	LNG	장문복합 #1	SK E&S			900.0	2015.03		확정
경기도	LNG	장문복합 #2	SK E&S			900.0	2015.06		확정
경기도	LNG	분당복합GT	남동	77.758	8	622.1	2010		
경기도	LNG	분당복합ST	남동	185	1	185.0	2010		
경기도	LNG	분당복합ST	남동	115	1	115.0	2010		
경기도	LNG	대우포천복합 #1	대우			940.0	2016.10.		발전계획 (6차)
경기도	LNG	일산복합GT	동서	100	6	600.0	2010		
경기도	LNG	일산복합ST	동서	100	1	100.0	2010		
경기도	LNG	일산복합ST	동서	200	1	200.0	2010		
경기도	LNG	신평택 3단계 복합	서부			900.0	2017.11		발전계획 (6차)
경기도	LNG	동두천복합 #1	서부			858.0	2014.12		확정
경기도	LNG	동두천복합 #2	서부			858.0	2014.12		확정
경기도	LNG	신평택복합 GT	서부			631.0	2013.8		확정
경기도	LNG	신평택복합 ST	서부			316.0	2014.11		확정
경기도	LNG	평택복합GT	서부	80	4	320.0	2010	2018.01.	(-480)
경기도	LNG	평택복합ST	서부	160	1	160.0	2010		
경기도	LNG	안산복합	에스파워			834.0	2014.1		확정

지역	연료원	발전소명	회사	설비 용량	대수	총설비용량 (MW)	연도	폐기	신설 계획
경기도	LNG	포천복합 #1	포천파워			725.0	2014.05		확정
경기도	LNG	포천복합 #2	포천파워			725.0	2014.11		확정
경기도	유류	평택 #1~4	서부	350	4	1,400.0	2010	2024.12 (-1400)	
경상남도	LNG	통영복합 #1	현대산업 개발			920.0	2017.12		발전계획 (6차)
경상남도	석탄	신삼천포(NSP IPP) #1	SK 건설			1,000.0	2018.10.		발전계획 (6차)
경상남도	석탄	신삼천포(NSP IPP) #2	SK 건설			1,000.0	2019.04		발전계획 (6차)
경상남도	석탄	삼천포	남동	500	2	1000	2010		
경상남도	석탄	삼천포	남동	560	4	2,240.0	2010		
경상남도	석탄	하동 #1~7	남부	500	7	3,500.0	2010		
경상남도	석탄	하동#8	남부	500	1	500	2010		
경상북도	LNG	영남복합	남부			400.0	2016.06		발전계획 (6차)
경상북도	LNG	안동복합	남부			400.0	2014.03		확정
부산광역시	LNG	부산복합GT	남부	150	8	1,200.0	2010		
부산광역시	LNG	부산복합ST	남부	150	4	600.0	2010		
서울	LNG	서울복합 #1	중부			400.0	2016.09		확정
서울	LNG	서울복합 #2	중부			400.0	2016.09		확정
서울	LNG	서울	중부	250	1	250.0	2010	2016.09(-388)	
서울	LNG	서울	중부	137.5	1	137.5	2010		
울산광역시	LNG	신울산복합 GT	동서			581.0	2013.08		확정
울산광역시	LNG	신울산복합 ST	동서			291.0	2014.07		확정
울산광역시	LNG	울산복합GT	동서	150	4	600.0	2010		
울산광역시	LNG	울산복합GT	동서	100	2	200.0	2010		
울산광역시	LNG	울산복합ST	동서	150	2	300.0	2010		
울산광역시	LNG	울산복합ST	동서	100	1	100.0	2010		
울산광역시	유류	영남	남부	200	2	400.0	2010	2014.01 (-400)	
울산광역시	유류	울산 #4~6	동서	400	3	1,200.0	2010	2022.01. (-1200)	
울산광역시	유류	울산 #1~3	동서	200	3	600.0	2010	2014.01. (-600)	

지역	연료원	발전소명	회사	설비용량	대수	총설비용량(MW)	연도	폐기	신설계획
인천광역시	LNG	신인천복합GT	남부	150	8	1,200.0	2010		2024.12 (-1800)
인천광역시	LNG	신인천복합ST	남부	150	4	600.0	2010		
인천광역시	LNG	서인천복합GT	서부	150	8	1,200.0	2010		
인천광역시	LNG	서인천복합ST	서부	75	8	600.0	2010		
인천광역시	LNG	인천 #1~2	중부	250	2	500	2010	2014.03	(-500)
인천광역시	LNG	인천복합GT	중부	163.979	2	328.0	2010		
인천광역시	LNG	인천복합GT	중부	160.729	2	321.5	2010		
인천광역시	LNG	인천복합ST	중부	182.081	1	182.1	2010		
인천광역시	LNG	인천복합ST	중부	180.95	1	181.0	2010		
인천광역시	LNG	포스코복합 #7	포스코에너지			382.0	2014.07		확정
인천광역시	LNG	포스코복합 #8	포스코에너지			382.0	2014.12		확정
인천광역시	LNG	포스코복합 #9	포스코에너지			382.0	2015.03		확정
인천광역시	LNG	포스코파워복합GT #1	포스코에너지	100	3	300.0	2010		2014.08. (-450)
인천광역시	LNG	포스코파워복합ST #1	포스코에너지	150	1	150.0	2010		
인천광역시	LNG	포스코파워복합GT #2	포스코에너지	100	3	300.0	2010		2015.01. (-450)
인천광역시	LNG	포스코파워복합ST #2	포스코에너지	150	1	150.0	2010		
인천광역시	LNG	포스코파워복합GT #3	포스코에너지	100	3	300.0	2010		
인천광역시	LNG	포스코파워복합ST #3	포스코에너지	150	1	150.0	2010		
인천광역시	LNG	포스코파워복합GT #4	포스코에너지	100	3	300.0	2010		
인천광역시	LNG	포스코파워복합ST #4	포스코에너지	150	1	150.0	2010		

지역	연료원	발전소명	회사	설비 용량	대수	총설비용량 (MW)	연도	폐기	신설 계획
인천광역시	석탄	영흥 #7	남동			870.0	2018.12		발전계획 (6차)
인천광역시	석탄	영흥 #8	남동			870.0	2019.06		발전계획 (6차)
인천광역시	석탄	영흥 #5	남동	870	1	870.0	2014.06		확정
인천광역시	석탄	영흥 #6	남동	870	1	870.0	2014.12		확정
인천광역시	석탄	영흥	남동	800	2	1,600.0	2010		
인천광역시	석탄	영흥	남동	870	2	1,740.0	2010		
전라남도	LNG	광양복합 ST	SK E&S	188.4	2	376.8	2010		
전라남도	LNG	광양복합 GT	SK E&S	153.1	4	612.4	2010		
전라남도	LNG	울촌복합 GT #2	메이아올 촌			590.0	2013.07		확정
전라남도	LNG	울촌복합 ST #2	메이아올 촌			295.0	2014.07		확정
전라남도	LNG	울촌복합 GT	메이아올 촌	163.8	2	327.6	2010		
전라남도	LNG	울촌복합 ST	메이아올 촌	197.9	1	197.9	2010		
전라남도	석탄	여수 #1	남동			350.0	2016.2		확정
전라남도	석탄	호남 #1~2	동서	250	2	500	2010		
전라남도	유류	여수	남동	328.6	1	328.6	2010		
전라남도	유류	여수	남동	200	1	200.0	2010		
전라북도	LNG	군산복합GT1	서부	233.3	1	233.3	2010		
전라북도	LNG	군산복합GT2	서부	233.3	1	233.3	2010		
전라북도	LNG	군산복합ST	서부	251.8	1	251.8	2010		
제주	유류	남제주내연#1	남부	10	1	10.0	2010		
제주	유류	남제주내연#2	남부	10	1	10.0	2010		
제주	유류	남제주내연#3	남부	10	1	10.0	2010		
제주	유류	남제주내연#4	남부	10	1	10.0	2010		
제주	유류	남제주	남부	100	2	200.0	2010		
제주	유류	제주GT #1~2	중부	55	2	110.0	2010		
제주	유류	제주GT #3	중부	55	1	55.0	2010	2018.01.	(-55)
제주	유류	제주내연	중부	40	2	80.0	2010		

지역	연료원	발전소명	회사	설비 용량	대수	총설비용량 (MW)	연도	폐기	신설 계획
제주	유류	한림복합GT	남부	35	2	70.0	2010		
제주	유류	한림복합ST	남부	35	1	35.0	2010		
제주	유류	제주기력	중부	75	2	150.0	2010		
충청남도	LNG	당진복합 #5	GS EPS			950.0	2015.12		발전계획 (6차)
충청남도	LNG	당진복합 #3	GS EPS			373.0	2013.08		확정
충청남도	LNG	부곡복합GT	GS EPS	160.96	2	321.9	2010		
충청남도	LNG	부곡복합GT	GS EPS	174.5	2	349.0	2010		
충청남도	LNG	부곡복합ST	GS EPS	178.83	1	178.8	2010		
충청남도	LNG	부곡복합ST	GS EPS	184	1	184.0	2010		
충청남도	LNG	대산복합GT	메이아울촌	93.7	4	374.8	2010		
충청남도	LNG	대산복합ST	메이아울촌	91	1	91.0	2010		
충청남도	LNG	보령복합GT	중부	150	8	1,200.0	2010		
충청남도	LNG	보령복합ST	중부	150	4	600.0	2010		
충청남도	국내탄	서천 #1~2	중부	200	2	400.0	2010	2017.09 (-400)	
충청남도	석탄	동부그린 #1	동부건설			550.0	2016.2		확정
충청남도	석탄	동부그린 #2	동부건설			550.0	2016.12		확정
충청남도	석탄	당진 #9	동서			1,020.0	2015.12		확정
충청남도	석탄	당진 #10	동서			1,020.0	2016.06		확정
충청남도	석탄	당진 #1~8	동서	500	8	4,000.0	2010		
충청남도	석탄	태안 #9	서부			1,050.0	2016.06		확정
충청남도	석탄	태안 #10	서부			1,050.0	2016.12		확정
충청남도	석탄	태안 #1~8	서부	500	8	4,000.0	2010		
충청남도	석탄	신서천 #1	중부			500.0	2018.12		발전계획 (6차)
충청남도	석탄	신서천 #2	중부			500.0	2019.06		발전계획 (6차)
충청남도	석탄	신보령 #1	중부			1,000.0	2016.06		확정
충청남도	석탄	신보령 #2	중부			1,000.0	2017.06		확정
충청남도	석탄	보령 #1~8	중부	500	8	4,000.0	2010		

자료: 전력통계거래소 홈페이지, 지식경제부(2013)에서 재구성. 저자 작성.

〈부록 2〉 GEOS-Chem 의 Full chemistry에서 다루는 화학물질(tracer) 목록

Checklist for NO_x-O_x-Hydrocarbon-aerosol chemistry simulation with SMVGEAR or KPP

#	Name	Description	g/mole
Standard mechanism			
1	NO _x	NO + NO ₂ + NO ₃ + HNO ₂	46
2	O _x	O ₃ + NO ₂ + 2NO ₃	48
3	PAN	Peroxyacetyl Nitrate	121
4	CO	Carbon Monoxide	28
5	ALK4	Lumped >= C4 Alkanes	12
6	ISOP	Isoprene	12
7	HNO ₃	Nitric Acid	63
8	H ₂ O ₂	Hydrogen Peroxide	34
9	ACET	Acetone	12
10	MEK	Methyl Ethyl Ketone	12
11	ALD2	Acetaldehyde	12
12	RCHO	Lumped Aldehyde >= C3	58
13	MVK	Methyl Vinyl Ketone	70
14	MACR	Methacrolein	70
15	PMN	Peroxymethacroyl Nitrate	147
16	PPN	Lumped Peroxypropionyl Nitrate	135
17	R4N2	Lumped Alkyl Nitrate	119
18	PRPE	Lumped >= C3 Alkenes	12
19	C ₃ H ₈	Propane	12
20	CH ₂ O	Formaldehyde	30
21	C ₂ H ₆	Ethane	12
22	N ₂ O ₅	Dinitrogen Pentoxide	105
23	HNO ₄	Pernitric Acid	79

#	Name	Description	g/mole
24	MP	Methyl Hydro Peroxide	48
25	DMS	Dimethyl Sulfide	62
26	SO2	Sulfur Dioxide	64
27	SO4	Sulfate	96
28	SO4s	Sulfate on surface of sea-salt aerosol	96
29	MSA	Methyl Sulfonic Acid	96
30	NH3	Ammonia	17
31	NH4	Ammonium	18
32	NIT	Inorganic nitrates	62
33	NITs	Inorganic nitrates on surface of sea-salt aerosol	62
34	BCPI	Hydrophilic black carbon aerosol	12
35	OCPI	Hydrophilic organic carbon aerosol	12
36	BCPO	Hydrophobic black carbon aerosol	12
37	OCPO	Hydrophobic organic carbon aerosol	12
38	DST1	Dust aerosol, Reff = 0.7 microns	29
39	DST2	Dust aerosol, Reff = 1.4 microns	29
40	DST3	Dust aerosol, Reff = 2.4 microns	29
41	DST4	Dust aerosol, Reff = 4.5 microns	29
42	SALA	Accumulation mode sea salt aerosol (Reff = 0.01 - 0.5 microns)	36
43	SALC	Coarse mode sea salt aerosol (Reff = 0.5 - 8 microns)	36
44	Br2	Molecular bromine	160
45	Br	Bromine radical, or atomic bromine	80
46	BrO	Bromine monoxide	96
47	HOBr	Hypobromous acid	97
48	HBr	Hypobromic acid	81
49	BrNO2	Nitryl bromide	126
50	BrNO3	Bromine nitrate	142
51	CHBr3	Bromoform, or tribromomethane	253
52	CH2Br2	Dibromomethane	174
53	CH3Br	Methyl bromide	95
SOA mechanism			

#	Name	Description	g/mole
1-37	Same tracers as for the standard mechanism		
38	ALPH	A-pinene, B-pinene, sabinene, carene, terpenoid ketones	136.23
39	LIMO	Limonene	136.23
40	ALCO	Myrcene, terpenoid alcohols, ocimene	142
41	SOG1	Lump of gas products of first 3 (ALPH + LIMO + TERP) hydrocarbon oxidation	150
42	SOG2	Gas product of ALCO oxidation	160
43	SOG3	Gas product of SESQ oxidation	220
44	SOG4	Gas product of ISOP oxidation	130
45	SOG5	Gas product of aromatics oxidation	150
46	SOA1	Lump of aerosol products of first 3 (ALPH + LIMO + TERP) hydrocarbon oxidation	150
47	SOA2	Aerosol product of ALCO oxidation	160
48	SOA3	Aerosol product of SESQ oxidation	220
49	SOA4	Aerosol product of ISOP oxidation	130
50	SOA5	Aerosol product of aromatics oxidation	150
51-56	Insert tracers 38-43 (dusts and sea salts) from standard simulation.		
57	BENZ	Benzene	12
58	TOLU	Toluene	12
59	XYLE	Xylene	12
Dicarbonyls mechanism			
1-56	Same tracers as SOA simulation		
57	GLYX	Glyoxal	58
58	MGLY	Methylglyoxal	72
59	BENZ	Benzene	12
60	TOLU	Toluene	12
61	XYLE	Xylene	12
62	MONX	Monoterpenes	12
63	SOAG	SOA product of GLYX	58
64	SOAM	SOA product of MGLY	72
65	C2H4	Ethene	12
66	C2H2	Acetylene	12
67	MBO	2-methyl-3-bute-2-nol	12

#	Name	Description	g/mole
68	GLYC	Glycoaldehyde	60
69	HAC	Hydroxyacetone	74
70	ACRPAN	APAN (CH ₂ CHC(O)OONO ₂)	133
71	ENPAN	ENPAN (NO ₂ OCH ₂ C(O)OONO ₂)	182
72	GLPAN	Peroxyacynitrate from GLCO ₃	137
73	GPAN	Peroxyacynitrate from GCO ₃	135
74	MPAN	2-methyl-1-oxo-2-propenyl nitroperoxyde	132
75	NIPAN	NIPAN (NO ₂ OCH ₂ CCH ₃ CHC(O)OONO ₂ , C5PAN18)	224

GEOS-Chem 의 진단용 변수 (Diagnostic variables) 목록

ND48	Dimension	TIMESERIES AT NL = NUMBER OF LOCATIONS	Units	Category
1-N	(I,J,L)	GEOS-Chem transported tracers (Tracer # for GAMAP = 1 .. N_TRACERS)	[v/v]	IJ-AVG-\$
76	(I,J,L)	OH concentration (Tracer # for GAMAP = 2)	[molec/cm ³]	TIME-SER
77	(I,J,L)	NO ₂ concentration (Tracer # for GAMAP = 19)	[v/v]	TIME-SER
78	(I,J,L)	PBL heights (Tracer # for GAMAP = 1)	[m]	PBLDEPTH
79	(I,J,L)	PBL heights (Tracer # for GAMAP = 2)	[levels]	PBLDEPTH
80	(I,J,L)	Air density (Tracer # for GAMAP = 22)	[molec/cm ³]	TIME-SER
81	(I,J)	3-D Cloud fractions (Tracer # for GAMAP = 19)	[unitless]	TIME-SER
82	(I,J)	Column optical depths (Tracer # for GAMAP = 20)	[unitless]	TIME-SER
83	(I,J)	Cloud top heights (Tracer # for GAMAP = 21)	[hPa]	TIME-SER
84	(I,J,L)	Sulfate aerosol optical depth (Tracer # for GAMAP = 6)	[unitless]	OD-MAP-\$
85	(I,J,L)	Black carbon aerosol optical depth (Tracer # for GAMAP = 9)	[unitless]	OD-MAP-\$

ND48	Dimension	TIMESERIES AT NL = NUMBER OF LOCATIONS	Units	Category
86	(I,J,L)	Organic carbon aerosol optical depth (Tracer # for GAMAP = 12)	[unitless]	OD-MAP-\$
87	(I,J,L)	Accumulation mode seasalt optical depth (Tracer # for GAMAP = 15)	[unitless]	OD-MAP-\$
88	(I,J,L)	Coarse mode seasalt optical depth (Tracer # for GAMAP = 18)	[unitless]	OD-MAP_\$
89	(I,J,L)	Total dust optical depth (Tracer # for GAMAP = 4)	[unitless]	OD-MAP-\$
90	(I,J,L)	Total seasalt tracer concentration (Tracer # for GAMAP = 24)	[unitless]	TIME-SER
91	(I,J,L)	Pure O3 (not Ox) concentration (Tracer # for GAMAP = N_TRACERS+1)	[v/v]	IJ-AVG-\$
92	(I,J,L)	NO concentration (Tracer # for GAMAP = 9)	[v/v]	TIME-SER
93	(I,J,L)	NOy concentration (Tracer # for GAMAP = 3)	[v/v]	TIME-SER
94	(I,J,L)	Grid box height (Tracer # for GAMAP = 1)	[m]	BXHIGHT-\$
95	(I,J,L)	Relative humidity (Tracer # for GAMAP = 17)	[%]	TIME-SER
96	(I,J)	Sea level pressure (Tracer # for GAMAP = 18)	[hPa]	DAO-FLDS
97	(I,J,L)	Zonal wind (a.k.a. U-wind) (Tracer # for GAMAP = 1)	[m/s]	DAO-3D-\$
98	(I,J,L)	Meridional wind (a.k.a. V-wind) (Tracer # for GAMAP = 2)	[m/s]	DAO-3D-\$
99	(I,J)	P(surface) - PTOP (Tracer # for GAMAP = 1)	[hPa]	PEDGE-\$
100	(I,J,L)	Temperature (Tracer # for GAMAP = 3)	[K]	DAO-3D-\$
115-121	(I,J,L)	Size resolved dust optical depth	[unitless]	OD-MAP-\$

Abstract

The Impact of National Plan for Future Electric Energy Production on Ambient Air Quality of Korea

This study tried to evaluate the impact of government's future electric energy production plan on the ambient air quality of Korea. The 6th government plan will increase the number of power plants mostly in Kyunggi, Incheon, Chungnam, Kangwon, and Kyungnam regions of Korea and most of energy source of the plants except in Kyunggi area is coal. The results of this plan will increase CO, NO_x, SO_x, and PM emissions over these regions by 10 ~ 50%. Our air quality modeling projected that the number of days which exceed the air quality standard for O₃ and PM₁₀ will increase, mostly less than 5 days. However, the NO₂ concentration over western Seoul Metropolitan Area (SMA) and Kangwon will increase significantly, which may trigger further environmental impacts such as acid rain and secondary aerosol production. Long-range transport of air pollutant is another important factor of Korea air quality, and the model calculation the future higher Chinese emissions scenario can be more sensitive to the Korea air quality than the scenarios of substantial pollutant reduction, which implies that the implementation of current pollution control policy of China would be critical to maintain the air quality of Korea. Thus the international cooperation for pollution reduction can secure the international benefit by pollution control.

Keyword : National electric energy production, air quality, ozone, emissions, Korea

| 저자 약력 |

심창섭

미국 Georgia Institute of Technology 이학박사

한국환경정책·평가연구원 부연구위원(현)

E-mail : cshim@kei.re.kr

주요 논문 및 보고서

「동북아 지역의 대기관리를 위한 국제협력 기획연구」(2013, 한국환경정책·평가연구원)

“Effect of continental sources and sinks on the seasonal and latitudinal gradient of atmospheric carbon dioxide over East Asia”(2013, Atmospheric Environment) 외

홍지연

서울 시립대학교 환경공학 석사

한국환경정책·평가연구원 위촉연구원

E-mail : jyhong@kei.re.kr

주요 논문 및 보고서

「KEI의 환경분야 국제협력사업 수행을 위한 자체지원 시스템 개발」(공저, 2013, 한국환경정책·평가연구원)

「위성영상으로 분석한 장기간 남한지역 순 일차생산량 변화: 기후인자의 영향」(2011, 대한원격탐사학회지)

| KEI 연구보고서 목록 | 2009~2014

연구보고서/기본연구

- 2014년
- 2014-01 빅데이터를 활용한 환경분야 정책수요 분석 (이미숙, 이창훈)
 - 2014-02 도시하천의 물환경서비스 제고를 위한 물인프라 자산관리 방안 연구 (강형식)
 - 2014-03 폐금속자원 재활용산업의 글로벌 경쟁력 강화를 위한 대·중소기업 상생 방안 (이희선)
 - 2014-04 위해성 평가의 정책 활용도 제고를 위한 화학물질 Action Plan 수립 연구 (II) (서양원, 박정규)
 - 2014-05 전략환경평가제도의 실효적 운용 방안 연구 (II) - 정책계획의 평가 실무가이드라인을 중심으로 (이영준)
 - 2014-06 기후변화 적응형 공간계획방법의 개발과 모의적용 연구 (II) (김동현)
 - 2014-07 동북아 환경재난대응 지역협력 방안 연구 (추장민)
 - 2014-08 환경복지 지표 및 기준 개발에 관한 연구 (김종호, 추장민)
 - 2014-09 사업장배출허용기준 강화가 환경기술 개발 및 배출량 저감에 미친 영향 (공성용)
 - 2014-10 ICT를 통한 녹색 라이프스타일로의 전환 촉진 정책 연구 (장기복)
 - 2014-11 비점오염원 관리 실효성 제고를 위한 토지 소유·이용자의 합리적 책임부여 방안 연구 (김호정)
 - 2014-12 물환경 및 기후변화를 고려한 유해독조 대응체계 및 정책 개선방안 연구 (한혜진)
 - 2014-13 지속가능한 상하수도 재정체계구축 및 운용방안 연구 (II) (문현주)
 - 2014-14 지속가능한 지표수-지하수 혼합대 관리방안 (현윤정)
 - 2014-15 자원순환형 사회를 위한 법체계 정비 방안 연구 (한상운)
 - 2014-16 코호트 자료를 이용한 대기오염의 만성건강영향 평가체계 구축 (배현주)
 - 2014-17 층간소음 분쟁 완화를 위한 관리방안 연구 (박영민)
 - 2014-18 저영향개발(LID) 기법의 환경영향평가 적용 방안 (이진희)
 - 2014-19 기후변화 폭염 대응을 위한 중장기적 적응대책 수립 연구 (하종식, 정휘철)
 - 2014-20 지표 기반 접근법을 이용한 기후변화의 사회경제적 영향 분석 및 전망 (I) (채여라)
 - 2014-21 SDGs 관점의 물인권 지원을 위한 한국의 ODA 전략방향 연구 (조을생)
 - 2014-22 전력수급기본계획에 따른 미래 대기질 영향과 대응을 위한 국제공동연구 (I) (심창섭)
 - 2014-23 [협동] 생물자원에 대한 접근과 이익공유 실행을 위한 지역모델 개발 II (이현우)
- 2013년
- 2013-01 환경재정 DB 및 성과분석모형 구축 (장기복)
 - 2013-02 미래지향적 물환경 목표와 관리체계 연구 (이병국)
 - 2013-03 위해성 평가의 정책 활용도 제고를 위한 화학물질 Action Plan 수립 연구 (I) (서양원)
 - 2013-04 전략환경평가제도의 실효적 운용방안 연구 (I) - 정책계획의 수립절차 및 특성을 중심으로 (유현석)
 - 2013-05 기후변화 적응형 공간계획방법의 개발과 모의적용 연구 (I) (김동현)

- 2013-06 해외 개발사업의 지속가능성 강화에 관한 연구 (정우현)
- 2013-07 생태계서비스지불제 이행 및 평가를 위한 지수체계 개발 (안소은)
- 2013-08 자원·환경위기 시대에 대비한 에너지가격 개편 추진전략 연구(II) (강만옥)
- 2013-09 초미세먼지(PM_{2.5})의 건강영향평가 및 관리정책 연구(II) (공성용)
- 2013-10 물환경 관리여건 변화를 고려한 수질오염 총량제도의 개선방안 연구 (김호정)
- 2013-11 지속가능한 상하수도 재정체계 구축 및 운용방안 연구 (문현주)
- 2013-12 지표수-지하수 혼합대의 환경측면 및 관리범주 연구 (현윤정)
- 2013-13 희토류자석의 자원순환 활성화를 위한 폐자원흐름의 분석 (조지혜)
- 2013-14 종량제 생활폐기물 처리의 배출자부담원칙 확대 적용 방안 (이희선)
- 2013-15 환경보건 감시체계를 활용한 지역 특성별 환경정책수립 연구 (배현주)
- 2013-16 산업단지 환경영향평가의 건강 사회분야 평가강화 방안 (이영수)
- 2013-17 대규모 개발사업의 지속가능성 확보를 위한 예비타당성조사 제도 개선방안 (조공장)
- 2013-18 기후변화 적응정책 이행의 효과성 제고 방안 (명수정)
- 2013-19 가뭄 유형별 기후변화 적응정책 연구 (김연주)
- 2013-20 해외 생물자원 전통식사의 지속가능한 활용전략 연구 (오일찬)
- 2013-21 [협동] 한반도 기후변화 대응을 위한 남북협력기반 구축 연구(III) (명수정)
- 2013-22 [협동] 국가 해수면 상승 사회·경제적 영향평가(III) (조광우)
- 2013-23 [협동] 생물자원에 대한 접근과 이익공유 실행을 위한 지역모델 개발 (이현우)

- 2012년**
- 2012-01 부문별 기후변화 적응대책 우선순위 평가 연구 (채여라 외)
 - 2012-02 온실가스 목표관리제와의 연계를 고려한 국내 배출권거래제 세부운영방안 연구 (이상엽 외)
 - 2012-03 초미세먼지(PM_{2.5})의 건강영향평가 및 관리정책 연구 I (공성용 외)
 - 2012-04 4대강 물환경 개선 중심의 수량 및 수질 통합관리 정책 연구 (이병국 외)
 - 2012-05 Rio+20 녹색경제 논의 대응 국가비전 및 발전방안 연구 (강상인 외)
 - 2012-06 국가 환경보건지표로서 환경성질병부담 도입방안 (신용승 외)
 - 2012-07 국제환경협력사업 내실화를 위한 국가전략 개발 (이 윤 외)
 - 2012-08 기후변화 적응 정보 통합지원 체계구축에 관한 연구 (전성우 외)
 - 2012-09 기후변화를 고려한 지류하천 관리 및 수생태 복원 방향 (강형식 외)
 - 2012-10 기후변화에 따른 화학물질 위해성 관리방안 II (박정규, 서양원)
 - 2012-11 기후변화 적응형 도시구현을 위한 그린인프라 전략 연구 (강정은 외)
 - 2012-12 물발자국 개념의 정책적 도입과 활용방안 (노태호 외)
 - 2012-13 상하수도시스템의 기후변화 적응전략 및 적응비용 추정 연구 (안종호 외)
 - 2012-14 자원·환경위기 시대에 대비한 에너지가격 개편 추진전략 연구 (강만옥 외)
 - 2012-15 자발적 협약의 현황 진단 및 효과적 활용방안 (정우현 외)
 - 2012-16 환경정책 파급효과 분석을 위한 일반균형 모형 개발 (강성원 외)
 - 2012-17 중장기 생물다양성 전략 추진체계 연구 (이현우 외)
 - 2012-18 [협동] 한반도 기후변화 대응을 위한 남북협력 기반 구축 연구 II (명수정 외)
 - 2012-19 [협동] 국가 해수면 상승 사회·경제적 영향평가 II (조광우 외)

- 2011년**
- 2011-01 기후변화 통합영향평가모형 체계 개발: 정책연계모형개발을 중심으로 II (전성우 외)
 - 2011-02 지역성장과 연계한 수변지역의 친환경적 개발 방향 (김익재, 최희선 외)
 - 2011-03 탄소세와 배출권거래제 연계를 통한 효율적 기후변화 대응 방안 (신상철, 박현주)
 - 2011-04 국가적색목록 생물종의 보호를 위한 관리정책 연구 (이현우 외)
 - 2011-05 기후변화 시나리오를 고려한 토지이용예측 모델 개발 I (한혜진)
 - 2011-06 기후변화 적응대책 우선순위 평가 방법론 분석 (채여라, 조현주)
 - 2011-07 기후변화 적응형 도시 리뉴얼 전략 수립: 그린인프라의 방재효과 및 적용방안 (강정은 외)
 - 2011-08 기후변화에 따른 화학물질 위해성 관리방안 I (박정규, 신용승)
 - 2011-09 기후변화와 대기오염으로 인한 건강영향 연구: 사회경제적 변수에 따른 사망영향 (배현주 외)
 - 2011-10 나노 물질의 안전관리를 위한 제도화방안 (홍용석 외)
 - 2011-11 녹색기술 적용촉진을 위한 제도개선방안: 하수슬러지 및 고농도 액상폐기물을 중심으로 (최지용, 김창덕)
 - 2011-12 물 재이용을 통한 도시하천 물순환개선 정책방안 (안중호 외)
 - 2011-13 사회영향평가 지표 개발 및 운영 가이드라인 마련 연구 (조공장 외)
 - 2011-14 산업단지 공급계획의 대기분야 전략환경평가 기반구축 (문난경 외)
 - 2011-15 저소득계층의 기후변화 적응역량 강화를 위한 정책방안 연구 II (추장민 외)
 - 2011-16 특정대기유해물질 관리체계 정비방안 (공성용 외)
 - 2011-17 폐금속자원 희유금속 자원순환 활성화를 위한 기술적·제도적 지원 방안 (이희선 외)
 - 2011-18 하수처리장의 에너지 효율성 개선 방안 연구 (조을생 외)
 - 2011-19 하천 정비사업의 수질 및 수생태계 분야 사후모니터링 방안에 관한 연구 (전동준 외)
 - 2011-20 환경책임과 환경피해보험의 제도화 방안에 관한 연구 II (한상운 외)
 - 2011-21 [협동] 해양 유류유출사고의 중장기적 영향분석 및 제도개선 방안 III (신용승 외)
 - 2011-22 [협동] 한반도 기후변화 대응을 위한 남북협력 기반 구축 연구 I (명수정 외)
 - 2011-23 [협동] 국가 해수면 상승 사회·경제적 영향평가 I (조광우 외)
 - 2011-24 개발사업의 종합환경영향평가지수 산정에 관한 연구 II (유현석 외)

- 2010년**
- 2010-01 기후변화 대응을 위한 물산업 육성 정책방안 (김종호 외)
 - 2010-02 기후변화 통합영향평가모형 체계 개발 : 정책연계모형개발을 중심으로 (전성우 외)
 - 2010-03 녹색 생활양식 확산을 통한 온실가스 감축방안 연구 (명수정 외)
 - 2010-04 택지 및 산업단지 개발사업의 환경평가 단계별 성과분석 (신경희 외)
 - 2010-05 온실가스 감축을 위한 폐기물 관리방안 연구 - 폐기물 부문의 온실가스 전과정 평가 (주현수 외)
 - 2010-06 기후변화와 대기오염이 환경 관련 질환에 미치는 영향 - 기온상승과 오존농도 증가의 상호작용을 중심으로 (배현주 외)
 - 2010-07 공유하천 물안보 체계 구축을 위한 협력방안 (김익재 외)
 - 2010-08 도서지역의 친환경적 용수공급계획 수립방안 (문유리 외)
 - 2010-09 도시기본계획의 전략환경평가 방법론 연구 (조공장 외)
 - 2010-10 폐금속자원 재활용 촉진을 위한 제도·기술적 방안 : 폐전자제품을 중심으로 (김광임 외)
 - 2010-11 미래 녹색도시 구현을 위한 복합기능 도시습지의 복원 및 조성 방안 연구II (방상원 외)

- 2010-12 물환경 거버넌스를 위한 의사결정체제 구축 I (이진희 외)
- 2010-13 법정보호 야생조류의 서식환경 평가방안 (노백호 외)
- 2010-14 식생과 토양의 역할을 고려한 저탄소 토지이용계획 수립 방안 II (황상일 외)
- 2010-15 세대간 생체전이성 화학물질 현황 및 관리방향 (박정규)
- 2010-16 수변지역 도시재생에 있어 저영향개발기법(LID)의 적용 방안 및 효과 (최희선 외)
- 2010-17 대기 중 이산화탄소 분포에 대한 이해 : 위성관측과 GEOS-Chem 결과를 중심으로 (심창섭)
- 2010-18 온실가스 배출권 초기할당 방식에 관한 연구 (김용건 외)
- 2010-19 저소득계층의 기후변화 적응역량 강화를 위한 정책방안 연구 I (추장민 외)
- 2010-20 지구온난화에 따른 지역규모 대기질 영향평가 II (문난경 외)
- 2010-21 환경가치를 고려한 통합정책평가연구 II (안소은 외)
- 2010-22 환경책임과 환경피해보험제도의 제도화방안에 관한 연구 (한상운, 박시원)
- 2010-23 [협동] 해양유류유출사고의 중장기적 영향분석 및 제도개선 방안 II (신용승 외)
- 2010-24 개발사업의 종합환경영향 평가지수 산정에 관한 연구 (유현석 외)

- 2009년**
- 2009-01 [협동] 도시지역 저소득계층 보호를 위한 환경정책연구 III (추장민 외)
 - 2009-02 [협동] 해양 유류유출사고의 중장기적 영향분석 및 제도개선 방안 (신용승 외)
 - 2009-03 환경가치를 고려한 통합정책평가 연구 I (안소은)
 - 2009-04 수질오염총량관리를 위한 배출권거래제 적용방안 연구 (문현주)
 - 2009-05 하천 건전성 평가모델 LOCOPEM을 적용한 환경평가 예측기법 (노태호 외)
 - 2009-06 환경평가를 활용한 토지이용계획 수립방안에 관한 연구 - 도시 및 택지개발을 중심으로 (정주철 외)
 - 2009-07 관광개발 다양화에 따른 친환경적 계획수립 및 평가방안에 관한 연구 (사공희 외)
 - 2009-08 Noise map을 활용한 환경소음의 관리방안 마련 (선효성 외)
 - 2009-09 제품분류에 따른 대기오염물질 직·간접 배출량 추정과 변화요인 분석 (공성용 외)
 - 2009-10 기후변화 대응 온실가스 감축을 위한 국가할당방안 연구 II (이상엽 외)
 - 2009-11 식생과 토양의 역할을 고려한 저탄소 토지이용계획 수립방안 I (황상일 외)
 - 2009-12 북한의 가뭄재해 취약지 분석 및 대응에 관한 연구 (명수정 외)
 - 2009-13 기후변화 대응을 위한 물환경 관리 전략 및 정책방향 I (김익재 외)
 - 2009-14 지구온난화에 따른 지역규모 대기질 영향평가 I (문난경 외)
 - 2009-15 미래 녹색도시 구현을 위한 복합기능 도시습지의 복원 및 조성 방안 연구 I (방상원 외)
 - 2009-16 국토연안생태네트워크 구축과 계획적 관리방안 II (박창석 외)
 - 2009-17 환경시장의 구조 변화와 정책 과제 (김종호 외)
 - 2009-18 그린화학제도 활성화 및 산업체 지원방안 (박정규)

정책보고서/수시연구

- 2014년
- 2014-01 국내 살생물제(Biocide) 관리법 제정 방안 연구 (박정규)
 - 2014-02 인구센서스를 활용한 사회적 약자 배려 환경영향평가방법론 개발 연구 (이상윤)
 - 2014-03 기존시설 활용을 통한 효율적 도시 비점관리방안 연구: 산업단지, 공업지역 및 개별사업장을 중심으로 (한혜진)
 - 2014-04 국가지질탐방로 도입 방안 연구 (이수재)
 - 2014-05 오염정화도양의 재활용 촉진 및 반출정화 관리체계 개선 방안 연구 (황상일)
 - 2014-06 자연환경보전 기본방침 수립을 위한 연구 (이현우)
 - 2014-07 폐전기,전자제품 및 폐자동차의 자원순환 고도화 방안 마련 (신상철)
 - 2014-08 육상풍력 개발사업 지형변화지수 연구 (김지영)
 - 2014-09 초미세먼지로 인한 어린이 환경성 질환 영향 연구 (배현주)
 - 2014-10 정책계획 전략환경영향평가를 위한 지표개발 (권영한)
 - 2014-11 한반도 통합철도네트워크 구축을 위한 (전략)환경영향평가 방안 (전동준)
 - 2014-12 라돈의 실내 공기질 규제에 따른 위해저감 효과 및 건강편익 산정 (신용승)
 - 2014-13 가뭄재난 관리를 위한 용수공급 피해 분석 및 대응 연구 (김연주)
 - 2014-14 법정관리 생태계교란식물의 피해 확산 방지를 위한 환경영향평가 방안 (방상원)
- 2013년
- 2013-01 화학물질 사고대응을 위한 제도개선 연구 (박정규)
 - 2013-02 국가환경지리정보의 환경영향평가 활용현황 및 개선방안 (이상범)
 - 2013-03 환경감리제도 도입에 대한 타당성 분석 (전동준)
 - 2013-04 제도 홍보 및 성과확산을 위한 '환경영향평가 연차보고서' 발간 기획 연구 (박하늘)
 - 2013-05 기후변화적응 홍보정책 전략 마련 연구 (하종식, 김동헌)
 - 2013-06 기후변화의 사회·경제적 영향 평가 체계 및 자료 구축 방안 연구 (채여라)
 - 2013-07 환경교육 활성화를 위한 법제도 개선방안 (이미숙)
 - 2013-08 자원순환정책 실효성 제고를 위한 중장기 과제 (한상운)
 - 2013-09 수변지역 소규모 개발사업의 친환경적 관리방안 연구 (주용준)
 - 2013-10 개도국 물인권 확립을 위한 Green ODA 활성화 방안 (이 윤)
 - 2013-11 한-아세안 환경협력 전략 마련을 위한 사전연구 (강택구)
 - 2013-12 석산개발지 입지유형별 복구 및 활용방안 (사공희)
 - 2013-13 개도국 지속가능발전 역량강화사업의 발전방향 (조을생)
 - 2013-14 동북아 대기오염 전망을 고려한 국내 석탄화력 발전 증설의 대기질 영향 분석 (심창섭)
 - 2013-15 기후변화협약의 적응부문 논의동향과 우리나라의 대응방향 (명수정)
 - 2013-16 도심지역 대심도 지하공간 개발의 환경영향과 정책 제언 (현윤정)
 - 2013-17 온실가스 감축 관련 국가 계획 현황 및 개선방향 연구 (김이진)
 - 2013-18 새만금 수질개선 방안 연구 - 용담댐 방류량을 중심으로 (김연주)
 - 2013-19 한반도 「그린 데탕트」 추진방안에 관한 연구 (추장민)
 - 2013-20 국내 환경기술 수준과 EU BREFs 비교 및 BAT 도입시 비용사례분석 (공성용)

- 2012년 2012-01 Cities and Green Economy : Comparative Study of Korea, China and Japan (정우현 외)
 2012-02 생물자원의 유용성 판단을 위한 기준 연구 (이현우, 김동욱)
 2012-03 환경영향평가에 적용되는 3차원 소음예측모델의 가이드라인 마련 (선효성 외)
 2012-04 환경갈등 예방을 위한 환경평가제도 개선 연구 - 환경영향평가 관련 소송 사례 분석을 통한 접근 (이영수 외)
 2012-05 민간 부문의 기후변화 적응을 위한 정책 기본 방향 (명수정 외)
 2012-06 내륙 유도선 운항에 따른 수질관리 제도개선 방안 연구 (안중호 외)
 2012-07 영흥화력 7,8호기 증설 환경영향 및 경제성 분석 (강광규, 김종원)
 2012-08 오염지하수 관리 강화를 위한 제도적 지원방안 (현윤정 외)
 2012-09 간접방류 산업폐수 관리 개선방안 연구 (조을생 외)
 2012-10 토양생태계의 지속성 관리를 위한 토양환경보전정책 방향 (박용하, 최현아)
 2012-11 백두대간 기맥에 대한 환경성평가 방안 연구 (이수재 외)
 2012-12 기후변화 적응 정책 연구 로드맵 및 추진 전략 (권영한 외)
 2012-13 중국의 對아세안 환경협력 현황 분석 (강택구 외)
 2012-14 국토개발정책 변화와 공간환경정책의 발전방향 (최희선 외)
- 2011년 2011-01 기후변화에 따른 건강영향 평가·적응 정책 방향 (신용승 외)
 2011-02 ODA사업의 환경평가 관리방안 연구 (조공장 외)
 2011-03 풍력발전단지 환경평가 방안 연구: I. 육상, II. 해상 (권영한, 이상범 외)
 2011-04 자연재해 발생 시 환경부문의 대응체계 개선방안 연구 (명수정 외)
 2011-05 교통환경 소음관리를 위한 소음측정망 system 개선 (박영민)
 2011-06 지속가능 발전교육(ESD) 강화방안 (김호석 외)
 2011-07 개발사업 환경평가의 중장기 모니터링 방안 (신경희 외)
 2011-08 재난성 원전사고에 따른 방사성오염의 토양·지하수관리 방향 마련 (황상일 외)
 2011-09 선보전 후개발 원칙의 실현방안 연구: 제주특별자치도 사례 중심 (권영한 외)
- 2010년 2010-01 기후변화에 대한 생물종의 민감성 평가방안 연구 (이현우)
 2010-02 Integrated Water Management Model on the Selenge River Basin Phase III (추장민 외)
 2010-03 녹색생활 지표 개발 및 활용방안 (명수정, 강민수)
 2010-04 지하수자원의 합리적 이용·관리를 위한 비용 부담체계 및 지하수재정 운영방안 연구 (문현주)
 2010-05 낙동강 조류발생 특성분석 및 관리 정책방안 (정유진 외)
 2010-06 지자체 기후변화 적응능력 평가를 위한 지표체계 개발 및 시범적용 (이정호 외)
 2010-07 수용성 향상을 위한 조력발전의 환경친화적 건설방안 (이희선 외)
 2010-08 환경성평가에 있어서 서식지 조사 및 보전방안 (노백호, 이현우)
 2010-09 기후변화와 사회통합에 관한 정책과제 개발 연구 (추장민 외)
 2010-10 하천·호소 퇴적물 관리 및 준설물질 활용방안 (김익재 외)

- 2010-11 국가 온실가스 배출정보 작성 및 관리체계 개선방안 (김호석)
- 2010-12 외국의 배출권거래제 시행에 따른 법적 쟁점 분석 (한상운, 박시원)
- 2010-13 상수원지역의 친환경 토지관리방안 (최지용)
- 2010-14 기후변화 취약성 지수분석을 통한 국가적응역량 제고방안 모색 (김연주 외)
- 2010-15 도시농업의 온실가스 저감효과 및 정책방안 (이현우 외)
- 2010-16 물자원 이용과 관리를 위한 비용분담체계와 가격정책 연구 (문현주)
- 2010-17 대기질개선 특별대책 추진 경험 및 성과 평가 (강광규 외)

- 2009년 2009-01 저탄소·자원순환형 사회 구축을 위한 환경정책 (장기복 외)
- 2009-02 Integrated Water Management Model on the Selenge River Basin II (추장민 외)
- 2009-03 4대강 살리기 사업지역의 하천 환경현황 분석 방안 연구 (이수재)
- 2009-04 합리적인 수리권 및 수자원에의 기여와 보상체계 연구 (문현주)
- 2009-05 지속가능발전 관점에서의 녹색성장 의미와 평가방안에 관한 연구 (김호석 외)
- 2009-06 남·북한 공유하천의 관리 현황과 물안보 확보방향 (김익재 외)
- 2009-07 미세먼지의 농도 변화를 이용한 다중 이용시설의 흡연으로 인한 실내공기질 관리 정책 평가 (김성렬 외)
- 2009-08 유네스코 지질공원의 특성과 시사점 연구 (이수재 외)
- 2009-09 4대강 살리기 사업을 위한 필요 전문기술인력 추정 (안종호 외)

Working Paper

- 2014년 2014-01 국내 지하수의 자원·환경적 가치 확립을 위한 기초연구 (현윤정)
 - 2014-02 층간소음의 건강영향에 대한 기초연구 (박영민)
 - 2014-03 소음원 종류에 따른 3차원 소음예측모델 적용방안 마련 (선효성)
 - 2014-04 개발사업 입지 및 계획기준의 조사·분석에 관한 연구 (주용준)
 - 2014-05 기후변화 취약 근로 직종 파악을 위한 기초 연구 (김동현)
 - 2014-06 불확실성을 고려한 수질오염총량관리 안전율 산정 기초연구 (정선희)
 - 2014-07 기후변화 적응을 위한 공간계획 수립 시 도시/환경/방재분야 공간정보 연계·활용방안 연구 (김태현)
 - 2014-08 기후변화를 반영한 내수침수 리스크 평가 방법론 고찰 (류재나)
 - 2014-09 SEA 사후관리를 위한 해외 사례연구 (조한나)
 - 2014-10 농어촌 관련 정책 및 계획에서의 기후변화 적응 고려 방안 (임영신)
 - 2014-11 소음·진동 사후관리를 위한 기초연구 (선효성)
 - 2014-12 2014 국민환경의식조사 연구 (이미숙)
- 2013년 2013-01 토양자원 유실 최소화를 위한 국내외 환경영향평가 사례 연구 (신경희)
 - 2013-02 PM-2.5 환경영향평가 방안 연구 (이영수)

- 2013-03 지자체 적응대책 수립지원을 위한 기후변화 시나리오 자료 활용 방안 (정휘철)
- 2013-04 기후변화에 따른 도심지역 지질재해 리스크 체계 마련 (이명진)
- 2013-05 비전통가스 개발의 환경영향평가 가이드라인 마련을 위한 기초연구 (조한나)
- 2013-06 모니터링을 통한 친환경 계획기법의 적절성 검증 기초연구 - 도시공간에서의 Stepping Stone
을 중심으로 (최희선)
- 2013-07 국가와 지자체의 기후변화 적응대책 실효성 제고를 위한 연계강화 방안 (임영신)
- 2013-08 KEI 환경정보체계 발전방안 (전성우)
- 2013-09 도시하천 유역의 환경평가 방법 마련을 위한 기초 연구 (홍현정)
- 2013-10 제조업 환경비용의 국제비교 (조일현)
- 2013-11 바이오가스의 재생연료의무혼합제도에 관한 해외사례 분석 (조지혜)
- 2013-12 자연경관심의제도의 현황분석 및 제도 개선방안 (주용준)
- 2013-13 층간소음 관리를 위한 기초연구 (박영민)
- 2013-14 지속가능성 관점에서의 산업구조 변화 분석 (이미숙)
- 2013-15 KEI 중국환경 중장기 연구계획 수립을 위한 기획연구 (추장민)
- 2013-16 기후변화 적응관련 취약계층 지원 대책 현황조사 및 분석 연구 (신지영)
- 2013-17 한국 ODA사업의 환경평가 모니터링 현황과 해외사례 비교 연구 - 사업 종료 후 모니터링
사례를 중심으로 (김태형)
- 2013-18 국내 전략환경평가의 사회·경제성 부문 기능 확립을 위한 기초연구 (이상윤)
- 2013-19 환경영향평가시의 시설별 유해대기오염물질 배출량 산정을 위한 기초연구 (주현수)
- 2013-20 지형장애물 분석을 통한 환경현황 자료 작성방안 (김지영)
- 2013-21 상수원보호구역 상·하류의 수변지역 관리방안 연구 - 잠실상수원보호구역과 팔당상수원
보호구역 구간 중심으로 (김태윤)
- 2013-22 2013 국민환경의식조사 연구 (이미숙)

- 2012년** 2012-01 기후변화를 고려한 농업 가뭄지수 활용 및 적용 기초 연구 (이진영)
- 2012-02 산림경영 기반시설의 주요 환경영향 - 선형사업(임도) 중심으로 (천영진 외)
- 2012-03 방조제 건설에 따른 연안환경의 중장기 변화 평가 연구 - 아산만 수치모델링 중심으로
(김태윤)
- 2012-04 지속가능한 지하수자원 확보를 위한 지하수보전구역 지정 연구 - 외국의 지하수보전
구역 사례 분석 (현윤정)
- 2012-05 공공부문의 지역별 환경보호지출 및 수입(EPER) 통계 추계 (조일현, 김중호)
- 2012-06 누적영향평가 적용의 사례 분석 및 시사점 연구 (김진오)
- 2012-07 유해성에 따른 「폐기물 종료기준」의 해외 현황 및 정책적 시사점 (조지혜 외)
- 2012-08 도시 지하공간 조성에 따른 환경영향 관리 방향 연구 (김윤승)
- 2012-09 폐기물 처리관련 업종의 여건변화가 여타 산업에 미치는 영향 분석 (신상철)
- 2012-10 미래 건강부담 추정치의 영향요인 고찰 - 기후변화에 따른 폭염 증가를 중심으로 (하종식,
신용승)
- 2012-11 셰일가스 국내 도입에 따른 에너지·환경 정책 수립을 위한 기초연구 (주현수, 조한나)

- 2011년** 2011-01 수자원 현황 및 영향요인: 기후변화를 중심으로 (김연주, 정은성)
 2011-02 도시계획의 전략환경평가를 위한 기후요소 평가기법의 해외사례 분석 (엄정희, 유승헌)
 2011-03 임진강 유역의 저수지 지리정보 구축과 수질평가 기초연구 (홍현정, 김익재)
 2011-04 방사능 재해에 따른 환경 및 인체 영향 분석 (심창섭, 홍지연)
 2011-05 해조류를 이용한 바이오연료의 환경 친화적 적용을 위한 기초연구 (조지혜, 이희선)
 2011-06 토양·지하수 오염부지의 종합적위해성평가를 위한 생태위해성평가체계 구축 (김윤승, 이주연)
 2011-07 기후변화협약 당사국총회 의장(국)의 역할 기초연구 (김이진)
 2011-08 환경영향평가 협의내용의 효율적 이행방안을 위한 제도적 고찰 (최상기 외)
 2011-09 지하수오염의 평가 및 정화 규제 정책 방향 제시를 위한 연구: 염소계유기용제 오염 중심으로 (김호정 외)
 2011-10 조력발전소 건설사업에 의한 해양 생물상 영향 사례 고찰 (천영진 외)
- 2010년** 2010-01 주요 교역국의 화학물질 규제동향 분석 (박정규, 김용성)
 2010-02 국내 자원순환지표 변화 추이 (김광임 외)
 2010-03 나노물질의 안전한 사용을 위한 환경·사회안전망 구축방안 연구 (홍용석)
 2010-04 수문·식생 모사를 위한 지표모델의 동아시아 적용 타당성 분석 (김연주)
 2010-05 어류의 물리서식처 적합도 지수 산정 방안 고찰 (강형식 외)
 2010-06 북한의 탄소시장 잠재력 추정 연구 - 에너지부문을 중심으로 (강광규, 이우평)
 2010-07 야간조명으로 인한 생태계 영향 평가 방안에 관한 연구: 해외사례를 중심으로 (이상범)
 2010-08 고령화 사회의 생활패턴 변화 및 환경이슈 조사 연구 (공성용)
 2010-09 고온으로 인한 사망 누적효과 분석 방법론 연구 (하종식, 신용승)
 2010-10 CMAQ를 적용한 환경영향평가서 작성에 대한 매뉴얼 (문난경)
 2010-11 해안개발사업 환경평가 영향예측 결과에 근거한 해양동·식물상 조사정점 선정방안 (맹준호, 조범준)
 2010-12 산업단지 사업에서의 수질오염 영향범위 설정방안 (조한나, 송영일)
 2010-13 개발사업 생태계훼손사고 대응 매뉴얼 구축 (박하늘, 전동준)
 2010-14 지형 특성을 고려한 지형변화의 적정량 평가방안 (사공희, 정재현)
 2010-15 소음지도를 활용한 소음평가 개선 방안 연구: 택지개발사업을 중심으로 (선효성)
 2010-16 CCS 관련 해외 환경관리 제도 및 연구동향 분석 (신경희)

기초연구

- 2009년** 2009-01 다목적댐 상류 폐광산 등 비점오염원 관리방안 (최지용 외)
 2009-02 도서지역 우수공급체계에 관한 고찰 (문유리 외)
 2009-03 폐기물 재활용 규제 선진화 방안 - 포장 및 가전폐기물을 중심으로 (김광임)

- 2009-04 유해물질 관리를 위한 SFA(물질흐름분석) 방법론 적용 연구 (주현수)
- 2009-05 녹색정화(Green Remediation) 최적관리기법 도입을 위한 기초연구 (황상일, 조한나)
- 2009-06 물환경 기준의 통합적 관리방안에 관한 연구 (한대호, 최지용)
- 2009-07 기후변화가 생태계에 미치는 영향 고찰 - 습지식물상을 중심으로 (권영한, 최홍근)
- 2009-08 도시지역의 기후변화 적응을 위한 열섬효과 완화방안 연구 (명수정)
- 2009-09 4대강 관련 법률 및 제도의 현황분석과 효율적 개선방안 (김태형 외)
- 2009-10 지역단위 하수재이용 활성화를 위한 기초연구 (조을생)
- 2009-11 기후변화 관련 환경보건 통합 데이터베이스 구축 (김성렬)
- 2009-12 환경책임과 환경피해보험제도의 제도화방안에 관한 기초 연구 (한상운)
- 2009-13 실시간 수질 모니터링 및 모델링 체계에 관한 고찰 (정유진)
- 2009-14 수질보전을 위한 새만금호 배수갑문 운영 대안에 관한 연구 (이진희)
- 2009-15 식물생태계가 대기 중 오존농도에 미치는 영향 - 기후변화와 관련하여 (심창섭)
- 2009-16 풍력발전시설에서 발생하는 환경소음 및 저주파음의 영향 (박영민, 정태량)
- 2009-17 신도시의 물순환 건전화를 위한 그린인프라 조성 기준에 대한 연구 (장수환)
- 2009-18 저탄소 생태관광지표 개발 및 평가 (배민기, 박창석)
- 2009-19 기후변화에 따른 연안역의 해역-육역 통합 범람 예측 방안에 관한 기초 연구 - 해석 모형 비교·분석을 중심으로 (김경준 외)
- 2009-20 기업 환경보호지출과 오염배출량의 상관관계 분석 - 대기분야를 중심으로 (하종식 외)

기후환경정책연구

- 2014년 2014-01 중장기 환경전망 및 대응전략-KEI 통합환경모형(Integrated Assessment Model) 연구 (강성원)
- 2014-02 생태계서비스 측정체계 기반구축(1): 하천생태계를 중심으로 (안소은)
- 2014-03 화석연료 대체에너지원의 환경경제성평가(II) - 재생에너지 발전원을 중심으로 (이창훈)
- 2014-04 폐자원 및 바이오에너지의 용도별 적정 배분방안 (I) - 바이오가스를 중심으로 (조지혜)
- 2014-05 온실가스 감축정책 현황 및 개선방안연구(II) (이상엽)
- 2014-06 국제기후변화 협상동향과 대응전략 (I) (이상윤, 이승준)
- 2014-07 기후변화에 대응하는 생태계 환경안보 강화 방안(II) : 기후변화 취약생태계 분석 및 전망을 중심으로 (권영한)
- 2014-08 [협동] 지속가능한 물이용을 위한 지표 개발 및 적용 방안 연구 (I) (김연주)

- 2013년 2013-01 중장기 환경전망 연구 (강성원)
- 2013-02 환경가치 DB 구축 및 원단위 추정(IV) (안소은)
- 2013-03 유기성 폐자원의 효율적 에너지화를 위한 관리체계 구축 방안 연구 (한상운)
- 2013-04 기후환경 취약계층의 환경복지 정책연구 (I) (박정규)
- 2013-05 온실가스감축정책현황 및 개선방안 연구 (I) - 감축목표달성을 위한 비용효과적 정책혼합 (강희찬)

- 2013-06 화석연료 대체에너지원의 환경경제성 평가(Ⅰ) (이창훈 외)
- 2013-07 기후변화에 대응하기 위한 생태계 환경안보 강화 방안(Ⅰ) (이수재)
- 2013-08 국토환경관리정책 변화와 개발제한구역의 지속가능한 관리 방안 (전성우)
- 2013-09 국가 물안보 체계 구축을 위한 중장기 정책방안 연구 (강형식)

녹색성장정책연구

- 2012년
 - 2012-01 중장기 환경전망 및 대응전략(Ⅰ) (강성원 외)
 - 2012-02 보호지역의 지속가능한 이용 및 관리 - 지역의 생태·경제·사회적 특이성을 기반으로한 접근 (박용하 외)
 - 2012-03 산업계 유기성폐기물의 자원화 촉진방안 연구 (신상철 외)
 - 2012-04 도서지역 친환경 관광계획 수립방안에 관한 연구 (이상범 외)
 - 2012-05 온실가스 감축의무 협상동향 및 대응방향 연구(Ⅳ) (이정석 외)
 - 2012-06 주요국 온실가스 감축정책 동향 및 시사점 (김용건 외)
 - 2012-07 지열에너지의 환경성 평가 및 환경친화적 이용 방안 (이희선 외)
 - 2012-08 기후변화 대응 물안보 위기관리 정책 연구 (김호정 외)
 - 2012-09 미래 성장동력 확보를 위한 상하수도 선진화 방안 (조을생 외)

- 2011년
 - 2011-01 환경가치 DB 구축 및 원단위 추정 Ⅲ (안소은 외)
 - 2011-02 국토자연자원의 현명한 이용전략 수립 Ⅲ (박창석 외)
 - 2011-03 공간환경계획에 기반한 광역계획의 전략환경평가 방안 (최희선 외)
 - 2011-04 고령사회 진입에 따른 환경문제 및 정책과제 (이정석, 손원익)
 - 2011-05 온실가스 감축의무 협상동향 및 대응방향 연구 Ⅲ (이정석 외)
 - 2011-06 한·중·일 탄소시장 연계의 파급효과 분석 (김용건, 공현숙)
 - 2011-07 탄소세 도입 및 에너지세제 개편방안 연구 (강만옥 외)
 - 2011-08 해양에너지의 환경성 평가 및 환경친화적 국토이용방안 (이희선 외)
 - 2011-09 물관리 취약성과 물안보 전략 Ⅲ (김익재 외)
 - 2011-10 물자원의 가치 변화와 물산업 선진화 전략 (문현주)
 - 2011-11 기후변화 대응을 위한 적정 하천공간 확보방안 Ⅲ: 극한홍수 대응책을 중심으로 (강형식 외)
 - 2011-12 기후변화 대응을 위한 수자원 네트워크 구축방안 연구 Ⅱ (이진희 외)
 - 2011-13 기후변화 대응을 위한 수질제어 및 관리방안 Ⅱ (안종호 외)

- 2010년
 - 2010-01 녹색성장 촉진을 위한 환경규제 선진화 방안 (김종호 외)
 - 2010-02 녹색성장 평가를 위한 지표체계 개발 및 활용방안 연구 (김종호 외)
 - 2010-03 환경정보체계에 기반한 공간환경계획 수립 가이드라인 마련 Ⅱ (최희선 외)
 - 2010-04 연접개발에 대한 사전환경성검토 개선 방안 (선효성 외)

- 2010-05 환경가치 DB 구축 및 원단위 추정 II (안소은 외)
- 2010-06 국토자연자원의 현명한 이용전략 수립 II (박창석 외)
- 2010-07 환경문제를 둘러싼 지역갈등 해소 및 거버넌스 강화 방안 (이정석 외)
- 2010-08 온실가스 감축의무 협상동향 및 대응방향 연구 II (박시원 외)
- 2010-09 국제 탄소시장 동향 및 전망 (이윤, 손원익)
- 2010-10 국내 에너지 시장구조를 고려한 온실가스 배출권 거래제 설계 방안-발전부문 참여방안을 중심으로 (신상철 외)
- 2010-11 기후변화 대응을 위한 탄소세 도입방안 (신상철 외)
- 2010-12 재생에너지의 환경성 평가 및 활성화 방안 - 폐자원을 중심으로 (이희선 외)
- 2010-13 기후변화 적응 강화를 위한 사회기반시설의 취약성 분석 및 대응방안 연구(II) (명수정 외)
- 2010-14 물관리 취약성과 물안보 전략 II (김익재 외)
- 2010-15 해수면 상승에 따른 취약성 분석 및 효과적인 대응정책 수립 II : 연안역 범람평가 및 대응방향 (조광우 외)
- 2010-16 기후변화 대응을 위한 적정 하천공간 확보방안 II (강형식 외)
- 2010-17 기후변화 대응을 위한 수자원 네트워크 구축 방안 I (이진희 외)
- 2010-18 기후변화 연동 4대강 유역 지하수 함양량 예측 및 이용 가능량 산정 II (이정호 외)
- 2010-19 기후변화 대응을 위한 수질 제어 및 관리방안 I (안종호 외)

- 2009년**
- 2009-01 국내 대기오염규제의 온실가스 저감효과 제고방안 (김호석 외)
 - 2009-02 환경정보와 가이드라인 제공에 의한 자율적 환경평가 지원 (이영준 외)
 - 2009-03 환경정보체계에 기반한 공간환경계획 수립 가이드라인 마련 (최희선 외)
 - 2009-04 환경평가 절차 효율화를 위한 스크리닝의 단계별 도입방안 (신경희 외)
 - 2009-05 환경가치 DB 구축 및 원단위 추정 I (안소은 외)
 - 2009-06 국토자연자원의 현명한 이용전략 수립 I (박창석 외)
 - 2009-07 온실가스 감축의무 협상동향 및 대응방향 연구 I (김용건 외)
 - 2009-08 온실가스 저감잠재성 분석 및 감축정책 연구 - 수송 및 건물부문 (강만옥 외)
 - 2009-09 재생에너지의 환경성 평가 및 환경친화적 개발 I - 태양광 및 풍력에너지를 중심으로 (이희선 외)
 - 2009-10 기후변화 적응 강화를 위한 사회기반시설의 취약성 분석 및 대응방안 연구 I (명수정 외)
 - 2009-11 물관리 취약성과 물안보 전략 I (안종호 외)
 - 2009-12 해수면 상승에 따른 취약성 분석 및 효과적인 대응정책 수립 I - 해안침식 영향평가 (조광우 외)
 - 2009-13 기후변화 대응을 위한 적정 하천공간 확보방안 연구 (정주철 외)
 - 2009-14 기후변화 연동 4대강 유역 지하수 함양 및 이용가능량 산정 기법 개발 I (이정호 외)

※ KEI 설립 이후 현재까지의 보고서 원문은 KEI 홈페이지(www.kei.re.kr)에서 보실 수 있습니다.