

KEI

기후환경
정책연구
2019-01-01

기후변화를 고려한 미세먼지 예측 및 중장기 관리정책 수립 연구

A Study on Predicting Levels of Particulate Matter and Devising Mid- to Long-Term Management Policy in Consideration of Climate Change

이승민 · 최기철 · 한진석 · 정은혜 · 오혜련

❖ 연구진

연구책임자	이승민 (한국환경정책·평가연구원 부연구위원)
참여연구원	최기철 (한국환경정책·평가연구원 부연구위원)
	한진석 (한국환경정책·평가연구원 연구위원)
	정은혜 (한국환경정책·평가연구원 연구위원)
	오혜련 (서울대학교 기초과학연구원 선임연구원)

❖ 연구자문위원 (가나다순)

김용건 (한국환경정책·평가연구원 선임연구위원)
김유미 (한국환경정책·평가연구원 연구위원)
원지영 (환경부 대기환경정책과 서기관)
유 철 (국립환경과학원 대기환경연구과 연구관)
윤대옥 (충북대학교 지구과학교육과 교수)
주현수 (한국환경정책·평가연구원 선임연구위원)

© 2019 한국환경정책·평가연구원

발행인	윤 제 용
발행처	한국환경정책·평가연구원 (30147) 세종특별자치시 시청대로 370 세종국책연구단지 과학·인프라동 전화 044-415-7777 팩스 044-415-7799 http://www.kei.re.kr
인 쇄	2019년 12월 26일
발 행	2019년 12월 31일
등 록	제 2015-000009호 (1998년 1월 30일)
ISBN	979-11-5980-384-0 93530
인쇄처	(사)아름다운사람들복지회 02-6948-9650

이 보고서를 인용 및 활용 시 아래와 같이 출처를 표시해 주십시오.
이승민 외(2019), 「기후변화를 고려한 미세먼지 예측 및 증장기 관리정책 수립 연구」, 한국환경정책·평가연구원

값 9,000원

이 보고서는 2019년 한국환경정책·평가연구원에서 기본과제로 수행한
 “기후변화를 고려한 미세먼지 예측 및 중장기 관리정책 수립 연구”
 (전2권 세트)의 제1권입니다.

“기후변화를 고려한 미세먼지 예측 및 중장기 관리정책 수립 연구”

보고서 번호	연구보고서명 (연구책임)	목차
기후환경 정책연구 2019-01-01	기후변화를 고려한 미세먼지 예측 및 중장기 관리정책 수립 연구 (이승민)	1. 서론 2. 미세먼지 농도 및 기상 여건의 중장기적 변화 분석 3. 연평균 미세먼지 농도에 대한 기상변화 기여도 분석 4. 고농도 미세먼지 발생에 대한 기상-기후 영향 분석 5. 고농도 미세먼지 발생의 미래 변화 추정을 위한 예측지수 개발 6. 기후변화를 고려한 중장기 미세먼지 관리 정책 수립을 위한 국내외 여건 분석 7. 결론 및 정책 제언
(별책부록) 기후환경 정책연구 2019-01-02	미세먼지 시즈제 도입 방안 (최기철)	1. 연구 개요 2. 미세먼지 고농도 발생 현황 및 대책 3. 해외 사례 조사 4. 미세먼지 시즈제 도입을 위한 의제 및 정책 발굴 5. 미세먼지 시즈제 대책의 효과 분석 및 평가 6. 미세먼지 시즈제 도입을 위한 제언

서 언

그간 대기오염물질 배출을 저감하기 위해 전 사회가 노력한 결과, 2018년 연평균 초미세먼지 농도는 관측 이래 최저값을 나타내었습니다. 그러나 안심하기 이르다는 듯이 2019년 2월 말~3월 초 발생했던 고농도 미세먼지 현상은 무려 9일 동안이나 계속되어 최장기 고농도 사례로 기록되었습니다. 이것은 전반적인 대기질 개선에도 불구하고 극단적인 기상 여건에 의해 심각한 대기오염이 발생할 수 있음을 보여 주는 단적인 예라고 할 수 있습니다. 더구나 최근 진행된 연구 결과들은 장기간 지속되는 대기오염 현상이 기후변화와도 밀접하게 관련되어 있음을 보여 주었습니다.

현재까지의 대기관리정책은 대기오염물질 배출을 줄이려는 다양한 방법을 강구해 왔지만, 정작 고농도 미세먼지 발생과 밀접한 관련이 있는 기상 및 기후의 영향은 깊게 고려하지 못하였습니다. 또한 기후변화를 유발하는 온실가스 배출관리정책과의 접점을 찾는 데도 다소 어려움을 겪고 있습니다. 이러한 시기에 미세먼지 농도에 대한 기상·기후의 영향을 분석하고, 변화된 기후 여건에서의 고농도 미세먼지 발생을 전망하기 위한 본 연구는 매우 중요한 의미가 있다고 생각합니다. 향후 연평균 미세먼지 농도의 감소만을 목표로 하는 평면적 정책에서 벗어나, 고농도 미세먼지 발생에 미치는 기상·기후의 영향을 고려하고, 고농도 미세먼지 발생 빈도·강도 약화를 목표로 하는 입체적이고 세심한 정책으로의 변화를 꾀하는 데 본 연구가 중요한 자료가 될 것으로 기대합니다.

본 연구를 수행한 한국환경정책·평가연구원 기후대기안전연구본부 대기환경연구실의 이승민 박사, 최기철 박사, 한진석 박사, 정은혜 연구원, 서울대학교 오혜련 박사에게 감사를 표합니다. 바쁘신 와중에도 자문을 통해 연구에 도움을 주신 환경부 원지영 서기관, 국립환경과학원 유철 연구관, 충북대학교 윤대옥 교수께 깊은 감사를 드립니다. 또한 우리 원의 김용건, 김유미, 주현수 박사의 자문에도 감사를 표합니다.

2019년 12월
한국환경정책·평가연구원
원장 윤 제 용

요약

I. 연구의 배경 및 목적

1. 연구 필요성

- 2010년대 들어 정체를 보이고 있는 미세먼지 농도 감소 경향
 - 2000년대 이후 적극적인 대기관리정책 이행의 결과로 전체 대기오염물질 배출량은 꾸준히 감소하는 경향
 - 배출량이 감소함에 따라 (초)미세먼지 농도도 전반적으로 감소하여 2012년에 최저값을 기록하였으나, 이후 소폭 증감을 반복하며 감소 경향 정체

- 최근 기후변화와 대기오염의 관련성을 규명하려는 연구들이 시도되고 있으나 이를 정책적으로 반영하지 못하고 있음
 - 몇몇 선행연구에서 최근의 미세먼지 농도의 감소 경향 정체와 기후변화로 인한 풍속 약화가 관련 있음을 밝히고 있으나, 여러 관련 기후인자를 다각적으로 분석하고 이를 정책적으로 활용하기 위한 연구는 매우 부족한 실정
 - 기존의 미세먼지 관리대책에서 미세먼지와 기후변화, 에너지 정책 간의 연계성 고려가 부족하였음이 계속 지적되어, 향후 현행 미세먼지 관리대책의 한계(기상·기후 영향 미고려)를 보완할 수 있는 중장기 대기관리정책 수립 필요

2. 연구 목적 및 범위

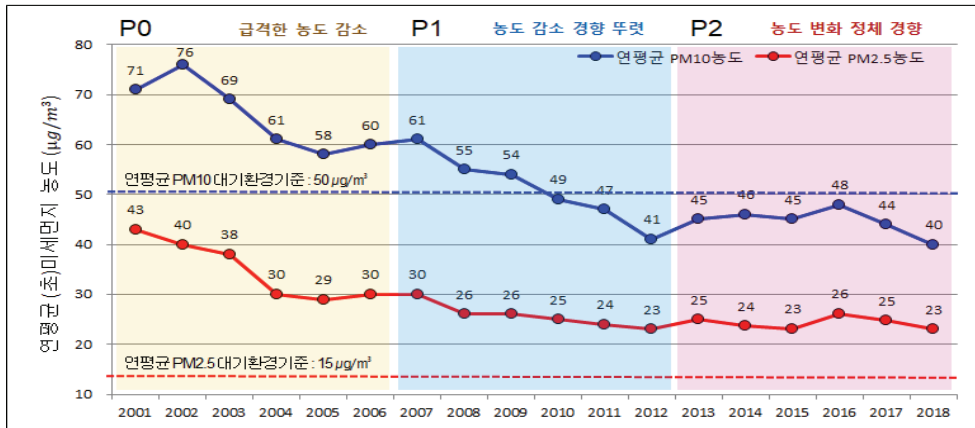
- 기상/기후와 미세먼지 대기질의 관련성 분석
 - 관측자료 통계 분석에 의한 기상인자 및 미세먼지 농도 중장기 변화의 관련성 분석
 - 배출량 고정-기상변화 모델링을 통한 연평균 미세먼지 농도에 대한 기상 기여 분석

- 기후변화에 따른 미세먼지 대기질 변화 예측을 위한 사전 연구
 - 미세먼지 농도 변화와 관련된 주요 기후인자 조사
 - 미세먼지 농도-기상인자 관련성 분석을 기반으로 미세먼지 미래 변화 예측을 위한 예측 지수 개발
- 부문별 배출량 저감정책 도출을 위한 사전 연구
 - 중장기 미세먼지 관리정책 수립에 필요한 부문별 배출량 저감정책 시나리오 작성을 위한 국내외 저감정책 조사

II. 미세먼지 농도 및 기상 여건의 중장기적 변화 분석

1. 미세먼지 대기질 및 기상 여건의 중장기적 변화

- 연평균 미세먼지 농도 변화 추이
 - 분석기간을 P0, P1, P2의 세 기간으로 나누어 살펴보면, P0 기간('01~'06년)에는 PM₁₀과 PM_{2.5} 모두 급격한 감소, P1 기간('07~'12)에는 PM₁₀과 PM_{2.5} 모두 감소하나 P0 기간보다 PM_{2.5}가 완만하게 감소, P2 기간('13~'18)에는 농도 변화 정체 경향(그림 1 참조)

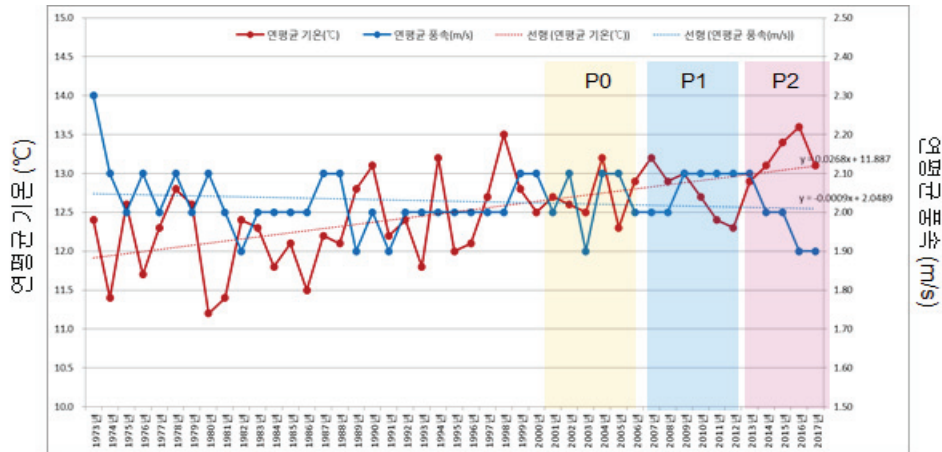


자료: 한국환경공단 AirKorea, “통계정보”, 검색일: 2019.3.3 및 서울특별시 보건환경연구원(2018), p.75. 바탕으로 저자 작성.

〈그림 1〉 기간별 (초)미세먼지 농도 변화 경향

□ 기상 여건의 중장기 변화 추이

- 전국 장기간 통계 대표 45개 지점의 중관기상관측자료를 분석해 보면 연평균 기온은 증가하고, 연평균 풍속은 감소하는 경향. 특히 P2 기간('13~'18년)에 기온은 계속적인 상승, 풍속은 계속적인 감소 경향(그림 2 참조)



자료: 기상청 종합기후변화감시정보, “대기(기상요소)”, 검색일: 2019.5.10. 바탕으로 저자 작성.

〈그림 2〉 연평균 기온 및 풍속의 장기간 변화 추이

2. 미세먼지 농도와 기상 여건 변화의 관련성

□ 최근 기간 풍속의 약화가 배출량 감소 효과를 상쇄하는 것으로 추정

- 기온과 풍속의 변화 경향이 뚜렷하지 않은 P0와 P1 기간에는 배출량 감소에 따라 미세먼지 농도가 감소하지만, 연평균 풍속의 감소 경향이 뚜렷한 P2 기간에는 풍속의 약화가 배출량 감소효과를 상쇄하여 미세먼지 농도 변화가 정체되는 것으로 추정
- 최근 기간의 풍속 감소 및 대기정체가 대기질에 미친 영향은 고농도 미세먼지 발생일수와 지속기간의 변화로도 확인할 수 있음. 최근 농도 36~50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 나쁨 일수는 감소하고 있으나, 51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 매우 나쁨 일수는 증가 경향이며, 고농도가 5일 이상 지속되는 사례 빈도 증가

III. 연평균 미세먼지 농도에 대한 기상 기여도 분석

1. 미세먼지 농도에 대한 기상 기여도 분석 필요성

□ 배출량 감축 완충량 산정을 위한 기상 기여도 분석

- 현행 대기관리정책은 미세먼지 농도에 미치는 기상/기후의 영향을 고려하고 있지 않으므로, 목표연도에 배출량 감축 목표를 달성하더라도, 기상의 영향으로 인해 미세먼지 농도 감소효과가 적어져 목표농도를 달성하지 못할 가능성
- 연평균농도에 대한 기상 기여도 분석을 통해 극단적인(미세먼지 농도에 부정적인 방향으로) 기상조건에서도 목표농도를 달성할 수 있는 배출량 감축 완충량 산정 필요

2. 기상 기여도 산정을 위한 기초 분석

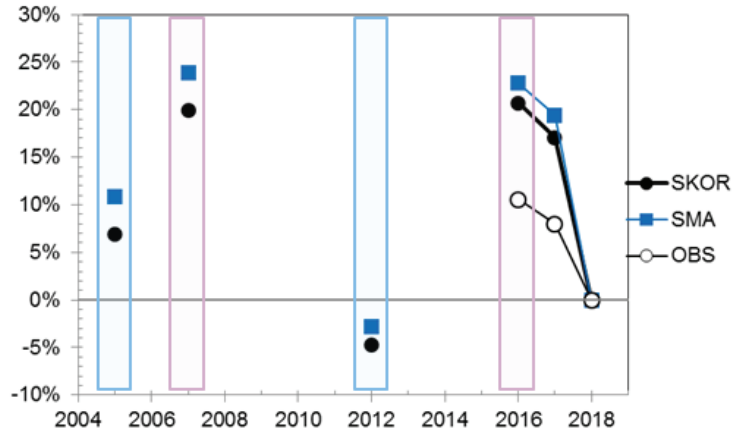
□ 배출량 고정-기상변화 모델링 수행

- 동일한 배출조건에서(배출량 고정) 기상 여건만을 변화시켜 모델링을 수행하면 배출량 변화의 영향을 최대한 제거하고 기상 여건에 의한 농도 기여 분석 가능. 연구 기간이 한정적임을 고려하여 대표연도를 선정하여 모델링 수행
- 초미세먼지 농도는 낮고, 기온 편차가 음으로 큰 값, 풍속 편차가 양으로 큰 값을 보인 2005년과 2012년을 최저 기상 기여도 분석을 위한 해로 선정
- 초미세먼지 농도는 높으면서, 기온 편차가 양으로 큰 값, 풍속 편차가 음으로 큰 값을 보인 2007년과 2016년을 최고 기상 기여도 분석을 위한 해로 선정

3. 대표연도에 대한 모델링 수행 결과

□ 기상 여건 변화에 의한 연평균 초미세먼지 농도 변화 결과

- 최근 연도인 2018년 연평균 농도와 비교했을 때 전국 기준으로 2012년이 5% 정도 낮은 농도로 최저 수준 모의, 2016년은 21% 높은 농도로 최고 수준 모의(그림 3 참조)



자료: 저자 작성.

〈그림 3〉 최근 연도(2018년) 대비 기상연도 변화에 따른 국내(SKOR) 및 수도권(SMA) 연평균 PM_{2.5} 농도 변화 모의 결과와 국내 평균 관측농도(OBS) 변화

- 배출량 고정-기상변화 모델링 결과는 동일한 대기오염물질 배출조건에서 기상의 변화만으로 최대 26~27%(25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 기준으로 약 6.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 변화 가능함을 의미
- 본 분석에 이용한 모델링 방법은 배출량을 고정시켜 배출 “변화”의 영향을 제거한 것이며, 배출량 자체를 제거한 것이 아니므로 배출의 영향이 없다고 해석하는 오류를 범하지 않도록 주의해야 함

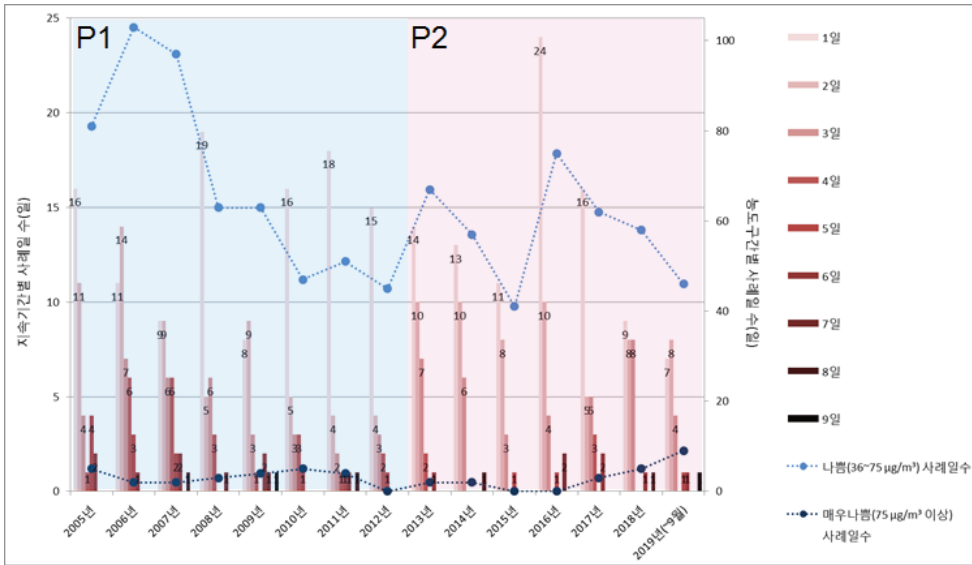
IV. 고농도 미세먼지 발생에 대한 기상·기후 영향 분석

1. 초미세먼지 고농도 사례 발생 관련 요소의 증장기 변화

□ 초미세먼지 고농도 사례의 발생 빈도, 강도, 지속기간의 변화

- 연평균 초미세먼지 농도가 꾸준히 감소하는 P1 기간('05~'12)에는 고농도 사례 발생일 수도 감소 경향
- 연평균 초미세먼지 농도 변화가 정체하는 P2 기간('13~'18)에는 고농도 사례 발생 빈도 증가 경향이 나타나고, 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 매우 나쁨 사례일수도 최근 증가

- 분석 결과는 최근 지속기간이 길고 농도가 높은(대기정체의 영향을 많이 받는) 고농도 사례가 증가하고 있음을 시사



자료: 서울특별시 대기환경정보, “대기질현황”, 검색일: 2019.6.5. 바탕으로 저자 작성.

〈그림 4〉 고농도 초미세먼지 사례 지속기간별·농도구간별 일수(서울시)

2. 고농도 미세먼지 사례 발생과 관련된 기상요소의 변화

□ 고농도 미세먼지 사례 발생과 관련된 기상장 특성

- 시베리아 고기압 약화로 남한 지역의 북서계절풍 풍속이 감소하고, 한반도 지역 상층고 기압 강화로 하강기류가 강해져 한반도 대기가 안정될 때 고농도 사례 발생

□ 고농도 미세먼지 사례 발생과 관련된 기상장의 최근 변화

- 최근 알래스카 및 베링해 동쪽 지역의 기온과 기압이 상승하면서 형성된 대규모 정체성 고기압이 한반도 부근의 대기 정체를 유발하여 농도 상승 및 고농도 지속 장기화에 기여했을 것으로 추정. 후속 연구 필요

V. 고농도 미세먼지 발생의 미래 변화 추정을 위한 예측지수 개발

1. 초미세먼지 농도 예측지수 개발을 위한 요인 분석

- 미래 기후에서의 고농도 미세먼지 발생 예측을 위해 관련된 기후인자 분석
 - 미세먼지 농도와 관련성이 있는 대기순환장 변수(1,000hPa, 850hPa, 500hPa에서의 지위고도, 기온, 동서 방향 바람, 남북 방향 바람의 편차값) 및 중국 미세먼지 농도에 관한 요인을 분석하여 고농도 미세먼지 발생과 연관된 4개 주요 요인을 추출
 - 요인 1은 대기정체로 인한 국지적 고농도 발생 패턴(상층 고기압 강화, 하층 바람 약화)을 보여 주고, 요인 2는 한반도 북서쪽 황사 발원지 부근에서의 대기오염물질 장거리 이동으로 인한 고농도 발생 패턴(상하층 동서 방향 바람 강화)을 보여 주며, 요인 3은 남서풍 계열 바람에 의한 대기오염물질 유입으로 인한 고농도 발생 패턴을 나타냄. 요인 4는 중국 중부, 남부 지역 미세먼지 농도와 연관

2. 선정된 요인을 이용하여 구성한 초미세먼지 농도 예측지수

- 선정된 요인을 이용하여 초미세먼지 농도 예측지수(UFI) 구성
 - 4개 요인을 변수로 하여 다중회귀모형 분석으로 초미세먼지 농도 예측지수 구성
 - 요인 1, 2, 4를 사용하여 만든 모형의 추정값과 관측농도의 상관계수는 0.613, R제곱값은 0.371로 초미세먼지 농도 일변동의 약 37%를 설명하여 가장 좋은 성능을 보였고, 이는 유사 선행연구보다 다양한 관련 기상변수 반영에 의해 예측성이 향상된 결과

VI. 결론 및 제언

- 현행 미세먼지 관리대책 보완 필요
 - 꾸준한 대책 이행으로 인해 연평균 미세먼지 농도가 개선되었다 하더라도 일시적으로 악화된 기상 여건에 의해 언제든지 고농도 미세먼지 사례 발생 가능
 - 연평균 미세먼지 농도의 감소만을 목표로 하지 말고 변화된 기후 여건에 따라 비상시적 현상이 빈발할 것에 대비하여 더욱 강화된 배출 감축 목표 설정 필요

- 미세먼지 대기질에 대한 기상·기후의 영향을 전혀 고려하지 못하고 있는 현재의 미세먼지 관리대책 보완의 근거가 될 수 있는 미세먼지 농도에 대한 기상·기후 영향 평가 연구 필요

주제어 : (초)미세먼지, 기상, 기후변화, 기여도, 대기관리정책

❖ 차례 ❖

요 약	i
제1장 서론	1
1. 연구의 필요성 및 목적	1
2. 연구내용 및 수행체계	4
제2장 미세먼지 농도 및 기상 여건의 중장기적 변화 분석	8
1. 미세먼지 대기질 및 기상 여건의 중장기적 변화	8
2. 미세먼지 농도와 기상 여건 변화의 관련성	16
제3장 연평균 미세먼지 농도에 대한 기상변화 기여도 분석	22
1. 미세먼지 농도에 대한 기상변화 기여도 분석 필요성	22
2. 기상변화 기여도 산정을 위한 기초 분석	23
3. 대표연도에 대한 모델링 수행 결과	25
제4장 고농도 미세먼지 발생에 대한 기상·기후 영향 분석	34
1. 고농도 미세먼지 사례 관련 요소의 중장기 변화	34
2. 고농도 미세먼지 사례 발생과 관련된 기상요소의 변화	37
제5장 고농도 미세먼지 발생의 미래 변화 추정을 위한 예측지수 개발	51
1. 초미세먼지 농도 예측 지수 개발을 위한 요인 분석	51
2. 선정된 요인을 이용하여 구성된 초미세먼지 농도 예측지수	59

제6장 기후변화를 고려한 중장기 미세먼지 관리정책 수립을 위한 국내외 여건 분석	62
1. 기후변화 관련 현황 및 전망	62
2. 국내 미세먼지 정책 현황 및 관련 여건 전망	72
3. 국외 미세먼지 관리정책 현황 및 관련 여건 전망	86
제7장 결론 및 정책 제언	93
1. 결론 및 요약	93
2. 정책 제언	95
참고문헌	97
Executive Summary	101

❖ 표 차례 ❖

〈표 2-1〉 기상인자와 대기질의 상관성	13
〈표 2-2〉 3개 기간별 (초)미세먼지 농도, 풍속, 기온의 변화 경향	19
〈표 3-1〉 Emission-Isolating Modeling을 위한 대표연도 선정	25
〈표 4-1〉 P1과 P2 기간의 계절별 고농도 PM _{2.5} 사례일수 및 발생비중	36
〈표 5-1〉 15개 요인과 설명된 고유값, 분산, 누적 분산	53
〈표 5-2〉 추출된 4가지 요인 성분 행렬	53
〈표 5-3〉 대기순환장 변수만 고려했을 때 12개 성분과 설명된 고유값, 분산, 누적 분산	54
〈표 5-4〉 대기순환장 관련 변수 12개만 고려했을 때 추출된 3가지 요인 성분 행렬	55
〈표 5-5〉 대기순환장 관련 변수 12개만 고려했을 때 추출된 3가지 요인 성분 행렬	59
〈표 5-6〉 모형 3에 대한 표준화계수와 유의확률	59
〈표 6-1〉 RCP 시나리오	65
〈표 6-2〉 2030 국가 온실가스 감축 수정 로드맵 부문별 주요 감축량 및 감축수단	71
〈표 6-3〉 미세먼지 관리 특별대책(2016) 주요 내용	74
〈표 6-4〉 미세먼지 관리 종합대책(2017) 주요 내용	76
〈표 6-5〉 비상·상시 미세먼지 관리 강화대책(2018) 주요 내용	78
〈표 6-6〉 미세먼지 관리 종합대책(2017), 비상·상시 미세먼지 관리 강화대책(2018)의 부문별 감축률	80
〈표 6-7〉 오염물질별 배출량 전망(~'25)	81
〈표 6-8〉 배출량 산정 방법	82
〈표 6-9〉 인구 전망	85
〈표 6-10〉 주요 업종별 성장률	85
〈표 6-11〉 부문별 에너지 사용량 전망 (기준수요)	86
〈표 7-1〉 3개 기간별 (초)미세먼지 농도, 풍속, 기온의 변화 경향	93

❖ 그림 차례 ❖

〈그림 1-1〉 서울시 연간 대기오염물질 배출량 변화 추이	2
〈그림 1-2〉 서울시 연평균 (초)미세먼지 농도 변화 추이	2
〈그림 1-3〉 풍속 약화와 관련된 기상효과 보정 후의 미세먼지 농도 변화 경향 분석	3
〈그림 1-4〉 연구 수행체계도	6
〈그림 2-1〉 전국 도시대기측정망 및 배경농도측정망 위치	9
〈그림 2-2〉 기간별 (초)미세먼지 농도 변화 경향	10
〈그림 2-3〉 지역별 연평균 (초)미세먼지 농도 변화 추이	11
〈그림 2-4〉 전국 102개 종관기상관측망 위치	12
〈그림 2-5〉 연평균 기온 및 풍속의 장기간 변화 추이	14
〈그림 2-6〉 계절평균 풍속의 장기간 변화 추이	14
〈그림 2-7〉 연간 강수량의 장기간 변화 추이	15
〈그림 2-8〉 2016년 대비 기상요소별 변화 경향(전국 평균)	17
〈그림 2-9〉 2016년 대비 평균 풍속 변화 경향(권역별 평균 및 국가배경지역)	17
〈그림 2-10〉 지역별 P1 기간 대비 P2 기간 풍속 증감률	18
〈그림 2-11〉 국내 연평균 풍속 및 정체일수(일평균 2m/s 이하) 변화	20
〈그림 2-12〉 국내 겨울 및 봄철 평균 풍속 및 정체일수(일평균 2m/s 이하) 변화	20
〈그림 2-13〉 고농도($36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상) 초미세먼지 사례 지속기간별·농도구간별 일수(서울시)	21
〈그림 3-1〉 Emission-isolating modeling에 의해 산출된 연평균 미세먼지 농도의 변화	22
〈그림 3-2〉 초미세먼지 고농도 및 저농도 사례별 기상요소값 분포	24
〈그림 3-3〉 대표연도 선정을 위한 기온, 풍속, 강수량 편차 분석	24
〈그림 3-4〉 초미세먼지 농도에 대한 기상 기여도 분석을 위한 모델링 시스템 구성	26
〈그림 3-5〉 기준연도(2016년) 전국 일평균 $\text{PM}_{2.5}$ 관측농도(흑색 원)와 모델 모의농도(적색 선) 시계열 비교	27
〈그림 3-6〉 기준연도(2016년) 전국 일평균 $\text{PM}_{2.5}$ 관측농도(OBS)와 모델 모의농도(MOD) 산포도 및 통계지표 비교	28

<그림 3-7> 모델 모의된 대표연도별 동아시아 지역 연평균 PM _{2.5} 농도 분포 비교	29
<그림 3-8> 모델 모의된 대표연도별 남한 지역 연평균 PM _{2.5} 농도 분포 비교	30
<그림 3-9> 최근 연도(2018년) 대비 기상연도 변화에 따른 국내(SKOR) 및 수도권(SMA) 연평균 PM _{2.5} 농도 변화 모의 결과와 국내 평균 관측농도(OBS) 변화	31
<그림 3-10> 최근 연도(2018년) 대비 기상연도 변화에 따른 국내(SKOR) 및 수도권(SMA) 연평균 PM _{2.5} 농도 변화율	32
<그림 3-11> 최근 연도(2018년) 대비 기상연도 변화에 따른 계절별 평균 PM _{2.5} 농도 변화 모의 결과	33
<그림 3-12> 최근 연도(2018년) 대비 대상 모의된 기상연도별, 계절별 평균 PM _{2.5} 농도 변화율	33
<그림 4-1> 한반도 미세먼지지수 개발에 이용된 기상요소별(좌측으로부터 Z500, U500, V850) 영역	34
<그림 4-2> 기후변화에 따른 고농도 사례 발생빈도 변화	35
<그림 4-3> 고농도 초미세먼지 사례 지속기간별·농도구간별 일수(서울시)	36
<그림 4-4> P1과 P2 기간의 계절별 풍속 변화	37
<그림 4-5> PM _{2.5} 고농도 사례에 대한 500hPa 지위고도, 기온 및 바람의 합성장 분석 결과 ..	39
<그림 4-6> PM _{2.5} 고농도 사례에 대한 850hPa 지위고도, 기온 및 바람의 합성장 분석 결과 ..	39
<그림 4-7> PM _{2.5} 고농도 사례에 대한 1,000hPa 지위고도, 기온 및 바람의 합성장 분석 결과	40
<그림 4-8> 겨울철 PM _{2.5} 고농도 사례에 대한 500hPa 지위고도, 기온 및 바람의 합성장 분석 결과	41
<그림 4-9> 겨울철 PM _{2.5} 고농도 사례에 대한 850hPa 지위고도, 기온 및 바람의 합성장 분석 결과	41
<그림 4-10> 겨울철 PM _{2.5} 고농도 사례에 대한 1,000hPa 지위고도, 기온 및 바람의 합성장 분석 결과	42
<그림 4-11> 두 기간의 고농도 사례에 대한 500hPa 지위고도 및 바람, 기온 합성장 분석 결과	44
<그림 4-12> 두 기간의 고농도 사례에 대한 500hPa 바람 합성장 분석 결과	44

〈그림 4-13〉 두 기간의 고농도 사례에 대한 850hPa 지위고도 및 바람, 기온 합성장 분석 결과	45
〈그림 4-14〉 두 기간의 고농도 사례에 대한 850hPa 바람 합성장 분석 결과	45
〈그림 4-15〉 두 기간의 고농도 사례에 대한 1,000hPa 지위고도 및 바람, 기온 합성장 분석 결과	46
〈그림 4-16〉 두 기간의 고농도 사례에 대한 1,000hPa 바람 합성장 분석 결과	46
〈그림 4-17〉 두 기간의 겨울철 고농도 사례에 대한 500hPa 지위고도 및 바람, 기온 합성장 분석 결과	47
〈그림 4-18〉 두 기간의 겨울철 고농도 사례에 대한 500hPa 바람 합성장 분석 결과	48
〈그림 4-19〉 두 기간의 겨울철 고농도 사례에 대한 850hPa 지위고도 및 바람, 기온 합성장 분석 결과	48
〈그림 4-20〉 두 기간의 겨울철 고농도 사례에 대한 850hPa 바람 합성장 분석 결과	49
〈그림 4-21〉 두 기간의 겨울철 고농도 사례에 대한 1,000hPa 지위고도 및 바람, 기온 합성장 분석 결과	49
〈그림 4-22〉 두 기간의 겨울철 고농도 사례에 대한 1,000hPa 바람 합성장 분석 결과	50
〈그림 5-1〉 상위 10%의 요인 1에 대한 주요 변수 합성장 분석 결과	56
〈그림 5-2〉 상위 10%의 요인 2에 대한 주요 변수 합성장 분석 결과	57
〈그림 5-3〉 상위 10%의 요인 2에 대한 주요 변수 합성장 분석 결과	58
〈그림 6-1〉 전 지구 평균기온의 변화	63
〈그림 6-2〉 RCP 시나리오별 연간 인위적 이산화탄소 배출량	66
〈그림 6-3〉 RCP 시나리오별 평균 지표온도 변화(1986~2005년 대비)	66
〈그림 6-4〉 연평균 최고, 평균, 최저기온의 변화(2012~2017년)	67
〈그림 6-5〉 21세기 한반도 평균기온의 변화	68
〈그림 6-6〉 2030 국가 온실가스 감축 기본 로드맵과 수정 로드맵 비교	70
〈그림 6-7〉 주요 미세먼지 대책의 목표	79
〈그림 6-8〉 중국의 오염물질 배출기준 강화 현황	88
〈그림 6-9〉 중국 5대 도시군 PM _{2.5} 농도 추이	89
〈그림 6-10〉 중국의 대기오염물질별 배출량 변화	90
〈그림 6-11〉 일본의 미세먼지 농도 및 환경기준 달성 추이	92

❖ 약어 ❖

API	Air Pollution Index (대기 오염 지수)
AQI	Air Quality Index (대기질 지수)
CAPSS	Clean Air Policy Support System (대기정책지원시스템)
China_h_PM ₁₀	PM ₁₀ concentration in high-latitude regions of China (중국 고위도 지역의 PM ₁₀ 농도)
China_l_PM ₁₀	PM ₁₀ concentration in low-latitude regions of China (중국 저위도 지역의 PM ₁₀ 농도)
China_m_PM ₁₀	PM ₁₀ concentration in mid-latitude regions of China (중국 중위도 지역의 PM ₁₀ 농도)
KPI	Korea Particulate matter Index (한반도 미세먼지 지수)
PM	Particulate matter (미세먼지)
T500	Temperature at 500hPa (500hPa에서의 기온)
T850	Temperature at 850hPa (850hPa에서의 기온)
T1000	Temperature at 1000hPa (1000hPa에서의 기온)
U500	Zonal wind at 500hPa (500hPa에서의 동서방향 바람)
U850	Zonal wind at 850hPa (850hPa에서의 동서방향 바람)
U1000	Zonal wind at 1000hPa (1000hPa에서의 동서방향 바람)
UFI	Ultrafine particulate matter Forecasting Index (초미세먼지 예측 지수)
V500	Meridional wind at 500hPa (500hPa에서의 남북방향 바람)
V850	Meridional wind at 850hPa (850hPa에서의 남북방향 바람)
V1000	Meridional wind at 1000hPa (1000hPa에서의 남북방향 바람)
Z500	Geopotential height at 500hPa (500hPa에서의 지위고도)
Z850	Geopotential height at 850hPa (850hPa에서의 지위고도)
Z1000	Geopotential height at 1000hPa (1000hPa에서의 지위고도)

제1장 | 서론

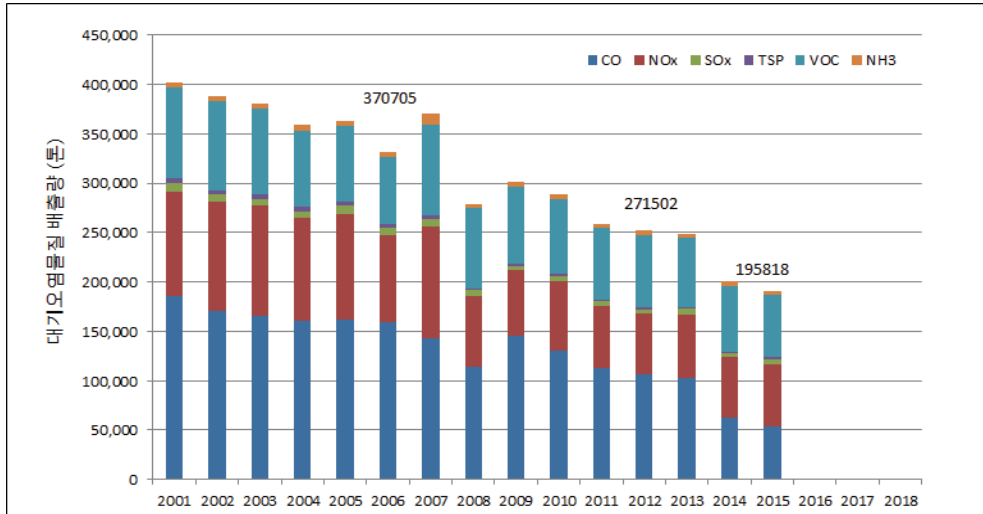
1. 연구의 필요성 및 목적

가. 최근 정체를 보이고 있는 미세먼지 농도 감소 경향

2000년대 이후 적극적인 대기관리정책 이행의 결과로 전체 대기오염물질 배출량은 꾸준히 감소하는 경향이다(그림 1-1 참조). 2000년대 중반까지 30만 톤을 초과하던 서울 지역 대기오염물질 총 배출량은 2008년 이후 30만 톤 이하로 감소하여 2013년까지 20만 톤 대를 유지하다가 2014년과 2015년 20만 톤 미만 수준이었다.

배출량이 감소함에 따라 (초)미세먼지 농도도 전반적으로 감소하여 2012년에 최저값을 기록한 이후 다시 증가하거나 정체하는 추세를 보이다가 2018년에 2012년과 비슷한 수준의 농도를 나타냈다(그림 1-2 참조). 연평균 PM₁₀ 농도는 2010년대 들어 대기환경기준(연평균 농도 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하)을 만족하고 있으나, PM_{2.5} 농도는 2018년 3월에 강화된 대기환경기준(연평균 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하)을 만족하지 못하고 있는 실정이다.

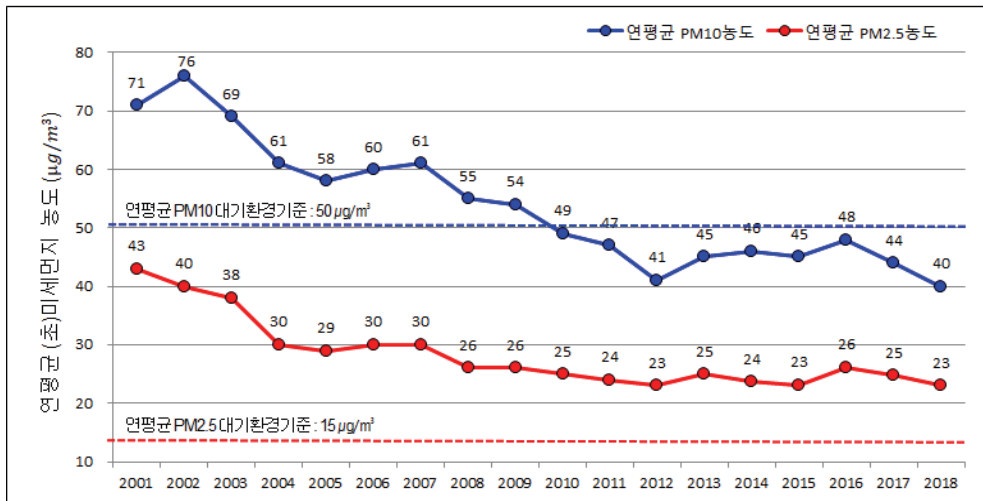
2 | 기후변화를 고려한 미세먼지 예측 및 중장기 관리정책 수립 연구



주: 자료의 연속성을 유지하기 위하여 2015년부터 공식적으로 추가 산정되기 시작한 비산먼지와 생물성연소 배출량은 제외하였음.

자료: 국립환경과학원 국가 대기오염물질 배출량 서비스, “배출량 통합검색”, 검색일: 2019.3.7. 바탕으로 저자 작성.

〈그림 1-1〉 서울시 연간 대기오염물질 배출량 변화 추이

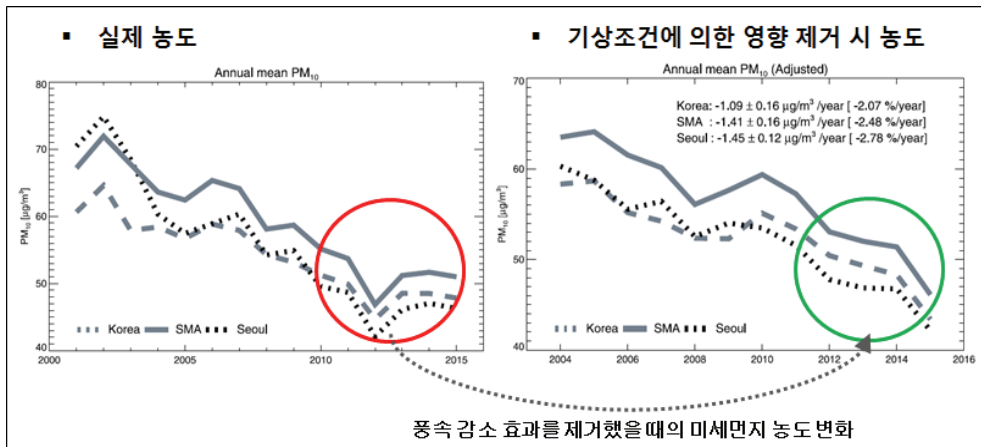


자료: 한국환경공단 AirKorea, “통계정보”, 검색일: 2019.3.3.; 서울특별시 보건환경연구원(2018), p.75. 바탕으로 저자 작성.

〈그림 1-2〉 서울시 연평균 (초)미세먼지 농도 변화 추이

나. 기후변화와 대기오염의 관련성에 관한 선행연구

최근 몇몇 연구를 통해 기후변화가 대기오염에도 영향을 미칠 가능성이 크다는 주장이 제기되었다. Zou et al.(2017)의 연구에서는 한국의 미세먼지 농도에도 심각한 영향을 미쳤던 2013년 1월 중국의 ‘Airpocalypse’¹⁾ 사태를 분석한 결과, 기후변화에 따른 북극 빙하 감소로 인한 시베리아 대륙 고기압 및 북태평양 고기압의 변화가 동북아 지역 계절풍 약화를 초래하였고, 이로 인해 대규모 고농도 미세먼지 현상이 발생하였다고 추정하였다. Kim et al.(2017)의 연구에서는 우리나라의 풍속과 미세먼지 농도의 상관관계를 분석하고, 최근 미세먼지 농도의 감소 경향 정체가 풍속 약화와 관련 있음을 추정하였다(그림 1-3 참조).



자료: Kim et al.(2017) 자료를 바탕으로 저자 재구성.

〈그림 1-3〉 풍속 약화와 관련된 기상효과 보정 후의 미세먼지 농도 변화 경향 분석

이처럼 기후변화와 미세먼지 농도의 관련성을 밝히려는 시도가 최근 진행되고 있음에도 불구하고 몇몇 기후인자에 대해서만 시도되었을 뿐 여러 관련 기후인자에 대한 다각적이고 종합

1) ‘Air(공기)+Apocalypse(대재앙)’의 합성어로 영국 경제지 「Financial Times」가 중국 베이징의 심각한 대기오염 상태를 빗대 처음 사용한 말. 2013년 1월 11일 베이징에서는 초미세먼지 농도가 993µg/m³으로 사상 최고치를 기록하였고, 이를 계기로 중국 정부는 ‘미세먼지와외의 전쟁’을 선포하고 2013년 9월 ‘대기오염방지계획(대기10조)’을 수립하여 최근 5년간 시행하였음.

적인 분석은 시도되지 않았으며, 이를 정책적으로 활용하기 위한 연구는 더욱 부족한 실정이다. 또한 기존의 미세먼지 관리대책에서도 미세먼지와 기후변화, 에너지 정책 간의 연계성 고려가 부족하였음이 지적되고 있다(관계부처 합동, 2017).

다. 현행 미세먼지 관리대책의 한계(기상·기후 영향 미고려)를 보완할 수 있는 중장기 대기관리정책 수립 필요

2017년 수립된 미세먼지 종합대책²⁾에서는 2022년까지 국내 대기오염물질 배출량을 30% 감축하여 초미세먼지 농도를 2016년 $26\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 2022년 $18\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 저감하겠다는 목표를 선언하였다. 그러나 이 목표는 기상 및 기후변화의 영향을 고려하지 않은 상황에서의 감축 목표로서 해당 목표연도에 미세먼지 농도에 부정적인 영향을 미치는 기상 여건이 조성되었을 때 목표농도를 달성하기 어려울 가능성이 우려된다. 지금까지 수행되었거나 현재 수행되고 있는 대기질 관련 분석 및 중장기 정책개발 과제들에서는 기상 및 기후 여건이 대기질에 미치는 영향을 밝히거나 기상·기후와 대기질의 관련성을 과학적으로 규명하여 이를 정책화하려는 연구는 거의 시도되지 않았다. 따라서 본 과제에서는 미세먼지 농도 변화에 영향을 미치는 여러 기상·기후 인자의 변동·변화 경향과 이에 따른 미세먼지 농도 변동·변화에 관한 심도 깊은 분석을 통해 기상·기후 여건과 미세먼지 농도의 관련성을 규명하고, 향후 연구에서 미래 기후변화에 따른 미세먼지 농도 변화를 예측하여 저감 목표배출량을 재산정하고 가능한 배출 저감 시나리오를 작성하여 실효성 있는 중장기 미세먼지 관리 대책을 수립하기 위한 근거자료를 마련하고자 한다.

2. 연구내용 및 수행체계

가. 주요 연구 내용

앞서 언급한 연구 목표를 달성하기 위한 본 과제의 연구 내용은 세 파트로 구성하였으며, 연구기간은 총 3개년으로 계획되었다.

2) 관계부처 합동(2017).

1) 기상/기후와 미세먼지 대기질의 관련성 분석

앞 절에서 몇몇 선행연구를 통해 기후변화와 미세먼지 농도의 관련성을 밝히려는 시도가 최근 진행되고 있다고 언급한 바 있다. 이러한 연구들은 몇 가지 기상 및 기후 인자들과 미세먼지 농도의 관련성을 다소 개별적으로 분석한 측면이 있다. 본 연구에서는 풍속, 기온, 기압, 강수, 습도 등의 여러 기상인자의 변화와 미세먼지 대기질 변화의 관련성을 좀 더 다각적이고 종합적으로 분석해 보고자 한다. 이를 위해 다양한 기상요소와 미세먼지 농도의 중장기적 시계열 변화를 분석하여 최근의 미세먼지 농도 변화 정체 현상이 기상 여건의 변화와 관련성이 있는지 살펴보고, 이러한 관련성이 기상 여건의 중장기적 변화인 기후변화로 인해 초래된 측면이 있는지도 살펴보고자 한다(1차년도). 또한 본 과제의 정책적 활용을 위하여 미세먼지 농도에 관한 기상 기여도를 분석하여 미세먼지 농도의 관리 목표를 달성하기 위한 배출량 감축 완충량을 산정하고자 한다(1차년도 일부 수행, 2차년도 이후 계속 분석). 2차년도 이후에는 1차년도의 분석 결과를 바탕으로 미세먼지 농도와 기상·기후의 관련성을 보다 심층적으로 분석할 예정이다.

2) 기후변화에 따른 미세먼지 대기질 변화 예측

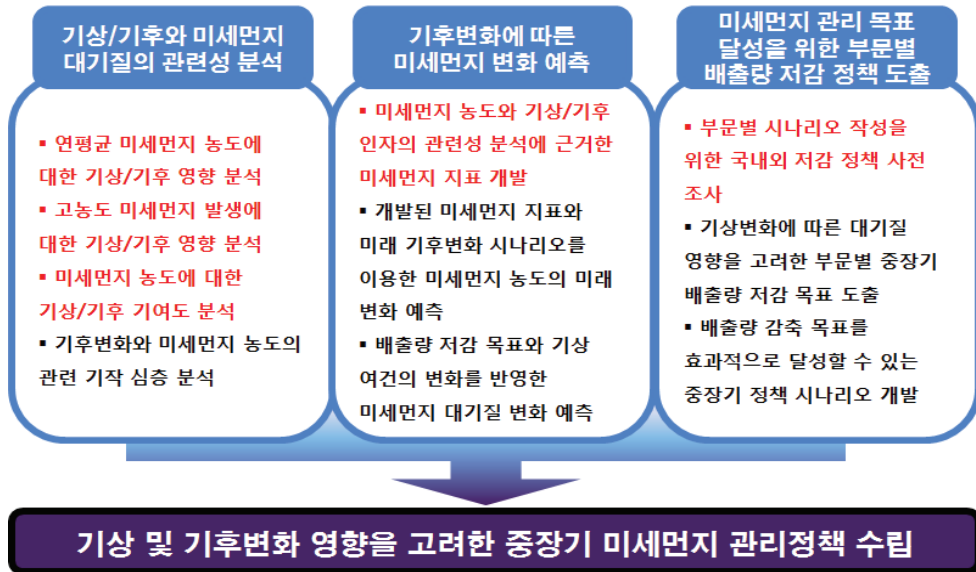
기상 및 기후와 미세먼지 농도의 관련성이 분석되면 미래 기상의 중장기적 변화, 즉 기후변화 패턴으로 대기질의 변화를 예측해 볼 수 있다. 미래의 기상 여건 변화는 기후변화 모델링을 이용한 다양한 연구를 통해 예측되고 있으나, 미세먼지의 농도를 예측한 연구는 미비하다. 이 때문에 기상요소를 이용하여 미세먼지 농도를 대응할 만한 예측지수를 만들면 이를 통해 미래 대기질을 간접적으로 추정할 수 있을 것으로 생각한다. 두 번째 연구 파트에서는 미세먼지 농도와 기상/기후 인자의 관련성 분석에 근거하여 미세먼지 지표를 개발하고(1차년도), 개발된 미세먼지 지표가 미래 기후변화 시나리오에서 어떻게 변화하는지 분석하여 미세먼지 대기질의 미래 변화를 추정해 보고자 한다(2차년도 이후). 또한 대기확산 모델링을 통해 배출량 저감 목표와 기상 여건의 변화를 반영한 미세먼지 대기질의 변화도 예측해 볼 예정이다(2차년도 이후).

3) 부문별 배출량 저감정책 도출

세 번째 연구 파트에서는 중장기 미세먼지 관리정책 수립을 위해 미세먼지 관리 목표 달성을 위한 부문별 배출량 저감정책 시나리오를 도출하고자 하였으며, 1차년도에는 부문별 시나리오 작성을 위한 국내외 저감정책을 사전적으로 조사하였다.

나. 연구 수행체계

본 연구의 내용 및 수행체계를 정리하면 <그림 1-4>와 같다. 총 3개년에 걸쳐 추진 예정인 연구 내용 중 1차년도에 수행할 내용은 파트별로 적색으로 표기하였다. 2차년도 이후의 연구는 과제명 「기후변화에 따른 미세먼지 대기질 변화 추정 및 관련 정책 지원 연구」로 수행 예정이다.



주: 총 3차년도에 걸쳐 연구 추진 예정으로 1차년도 추진 내용은 적색으로 표기함.
 자료: 저자 작성.

<그림 1-4> 연구 수행체계도

다. 보고서 구성

본 과제 의 1차년도 연구 결과를 제2~7장에 정리하였다. 제2장에서는 미세먼지 농도와 기상 여건의 중장기적 변화와 이들 간의 관련성을 분석하였다. 제3장에서는 배출량 고정 모델링을 통해 기상 여건의 변화에 따른 연평균 미세먼지 농도의 변동폭을 분석하였다. 제4장에서는 고농도 미세먼지 발생에 대한 기상·기후의 영향을 분석하고 기간별 변화를 살펴보았다. 제5장에서는 미래 기후에서의 미세먼지 대기질 변화 예측을 위한 미세먼지 예측지수 개발 결과를 정리하였다. 제6장에서는 부문별 배출 시나리오 작성을 위한 국내외 관련 정책의 조사 결과를 수록하였고, 제7장에 결론 및 정책 제언을 제시하였다.

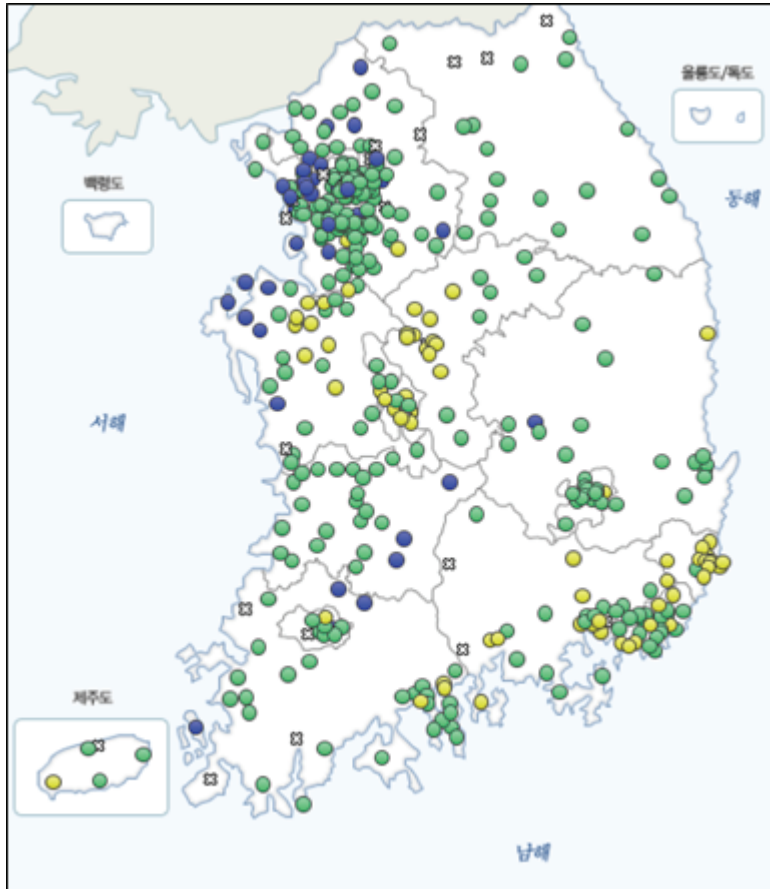
제2장 | 미세먼지 농도 및 기상 여건의 중장기적 변화 분석

1. 미세먼지 대기질 및 기상 여건의 중장기적 변화

가. 연평균 미세먼지 농도 변화 추이

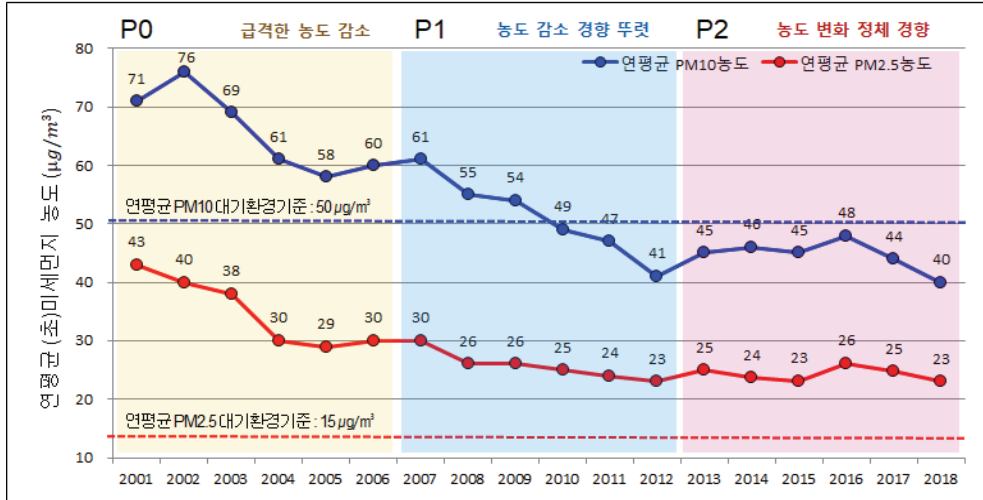
서론에서 살펴본 바와 같이 (초)미세먼지 농도는 전반적으로 감소하는 경향을 나타내지만 시기별로 변화 경향에 차이가 있다. 본 연구에서는 2001년부터 2018년까지의 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도에 대해 17개 광역 지자체(서울시, 인천시, 경기도, 대전시, 세종시, 충청북도, 충청남도, 부산시, 울산시, 대구시, 경상북도, 경상남도, 광주시, 전라북도, 전라남도, 강원도, 제주도)와 2개 배경농도 지역(울릉도, 백령도)별로 분석하였다. (초)미세먼지 농도 자료는 AirKorea 웹사이트(www.airkorea.or.kr/web)에서 제공하고 있는 전국 295개 도시대기측정망 및 5개 국가배경농도측정망 자료를 지역별로 평균하여 분석하였다(그림 2-1 참조). PM₁₀ 농도는 2001년부터의 전국 관측 자료가 있으나, PM_{2.5} 농도의 경우 다른 지역과 달리 서울시에서만 유일하게 1996년부터 관측 자료를 보유하고 있어 서울시에 대해서는 서울특별시 보건환경연구원(2018)의 자료를 인용하여 분석하였고, AirKorea 자료와 서울시 자료의 겹치는 분석 기간인 2015-2018년에 대하여 두 자료를 비교한 결과 수치가 동일하여 서울시 PM_{2.5} 농도 변화 추세는 서울시 자료를 사용하여도 무방하다고 판단하였다.

먼저 서울시의 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도 변화 경향을 살펴보면, 크게 세 기간으로 나누어 변화 경향에 차이가 있음을 볼 수 있다(그림 2-2 참조). 2001~2006년의 P0 기간은 PM₁₀과 PM_{2.5} 모두 급격한 감소 경향을 나타내는 구간이다. 2007~2012의 P1 기간에는 PM₁₀과 PM_{2.5} 모두 감소 경향이나 PM_{2.5}의 경우 첫 번째 기간보다는 감소폭이 완만하다. 최근 기간인 2013~2018년의 P2 기간에는 감소하던 농도가 다시 증가하거나 정체하는 경향을 나타낸다.



자료: 한국환경공단 AirKorea, "실시간 대기정보", 검색일: 2019.6.3.

〈그림 2-1〉 전국 도시대기측정망 및 배경농도측정망 위치

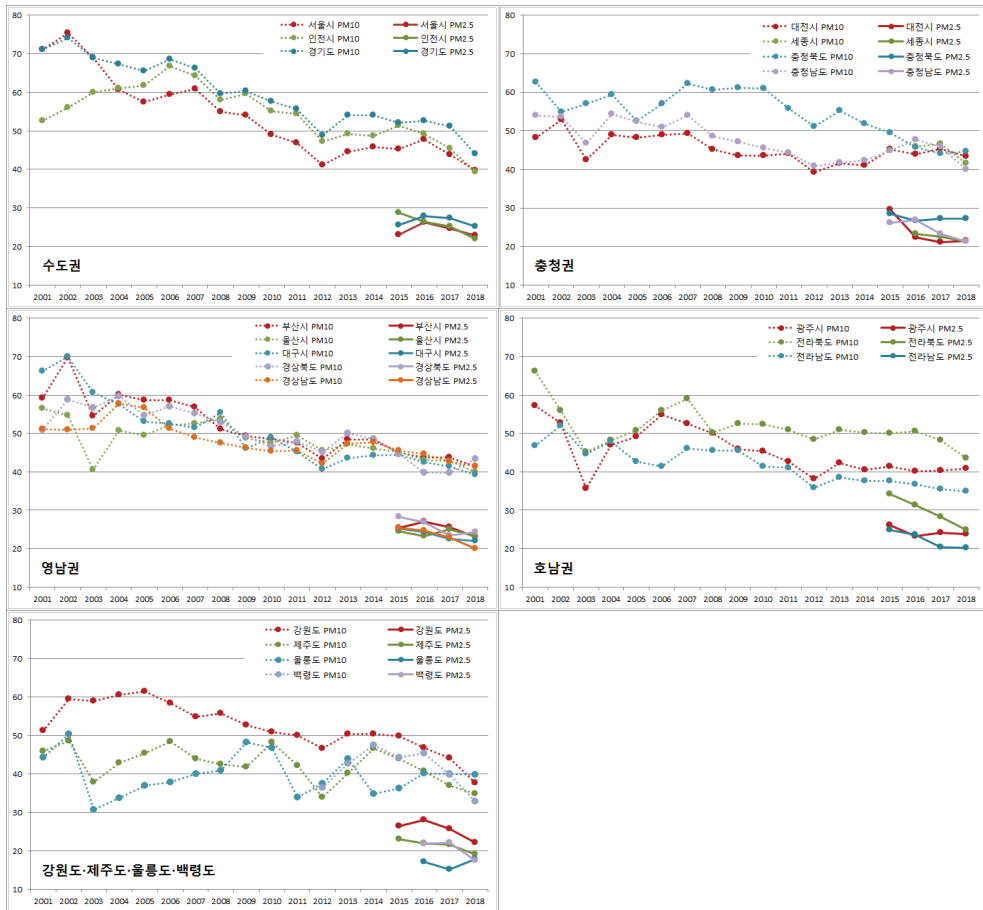


주: <그림 1-2> 재구성.

자료: 한국환경공단 AirKorea, “통계정보”, 검색일: 2019.3.3.; 서울특별시 보건환경연구원(2018), p.75. 바탕으로 저자 작성.

<그림 2-2> 기간별 (초)미세먼지 농도 변화 경향

다음으로 서울 외 지역에 대한 농도 변화 경향을 살펴보면 지역별로 조금씩 차이 있으나 대체로 유사한 변화 경향을 보이고 있다(그림 2-3 참조). 즉 서울 지역과 마찬가지로 2000~2012년까지 분명한 감소 추세를 보이면서 2012년에 저점을 찍었다가, 이후 증가, 정체, 또는 둔화된 감소 경향을 보이고 있다. 타 지역과 비교했을 때 2000년대 초반 농도 수준이 가장 높았던 서울의 농도 감소 경향이 가장 뚜렷한 것을 볼 수 있어, 서울을 비롯한 수도권 중심으로 우선적으로 추진되었던 대기질 개선정책의 효과가 반영된 것으로 추정할 수 있다. 시 단위 광역 지자체보다 도 단위 지자체인 경기, 충북, 전북, 강원 등의 농도가 다른 지역에 비해 상대적으로 높은 편이며, PM_{2.5}의 경우 모든 지역에서 강화된 대기환경기준을 만족하지 못하고 있다.



자료: 한국환경공단 AirKorea, “통계정보”, 검색일: 2019.3.3. 바탕으로 저자 작성.

〈그림 2-3〉 지역별 연평균 (초)미세먼지 농도 변화 추이

나. 기상 여건의 중장기 변화 추이

기상 및 기후 여건과 대기질의 연관성을 살펴보기 위하여 기온, 풍속, 강수량 등 기상요소별로 중장기 변화 추이를 분석하였다. 장기적인 기후변화 경향을 파악하기 위해서 기상청 기후변화감시정보시스템에서 제공하고 있는 전국 장기간 통계 대표 45개 지점 자료를 분석하였다. 최근 기간(2001~2018년)에 대해서는 기상청 기상자료개방포털에서 제공하고 있는 전국 102개 지점의 종관기상관측자료를 분석하였다(그림 2-4 참조).



자료: 기상청 기상자료개방포털, “관측지점정보-종관기상관측”, 검색일: 2019.6.24.

〈그림 2-4〉 전국 102개 종관기상관측망 위치

Jacob and Winner(2009)의 선행연구에서는 기상인자와 대기질의 상관성을 제시하였다(표 2-1). 입자상물질(PM)의 경우 지역 정체 현상과 일관된 양의 상관성이 있으며, 습도와도 대체로 관련성이 있다고 하였다. 반면, 대기 혼합고와 강수량과는 일관된 음의 상관성을 갖고 있으며, 기온과 풍속, 운량과도 대체로 음의 상관성이 있다고 하였다. 본 연구에서는 해당 기상인자 중 종관기상관측소에서 이용 가능한 인자를 고려하여 기온과 강수량, 상대습도 및 풍속 자료들을 위주로 분석을 수행하였다.

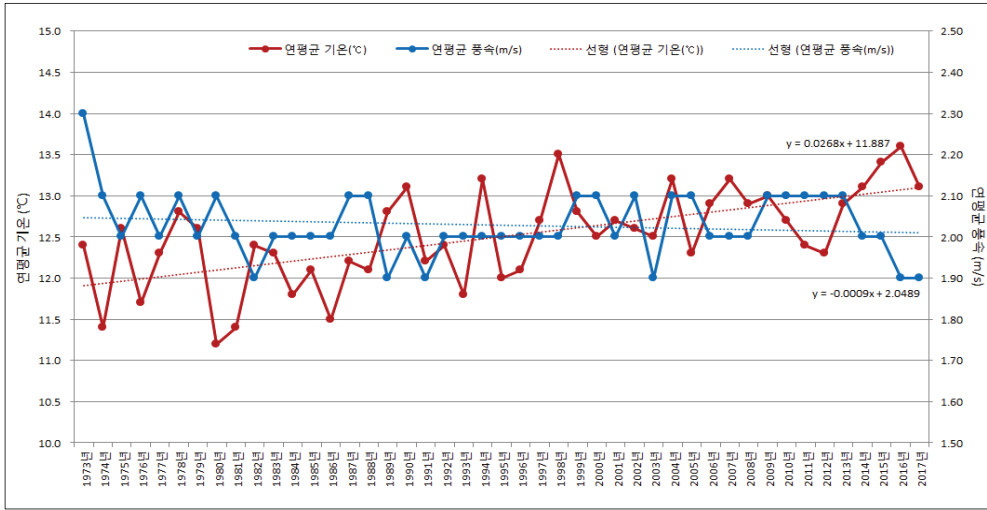
〈표 2-1〉 기상인자와 대기질의 상관성

Variable	Ozone	PM
Temperature	++	-
Regional stagnation	++	++
Wind speed	-	-
Mixing depth	=	--
Humidity	=	+
Cloud cover	-	-
Precipitation	=	--

주: ++일관된 양의 상관성, +대체적인 양의 상관성, =상관성 약함, -대체적인 음의 상관성, --일관된 음의 상관성.
자료: Jacob and Winner(2009), p.54 인용.

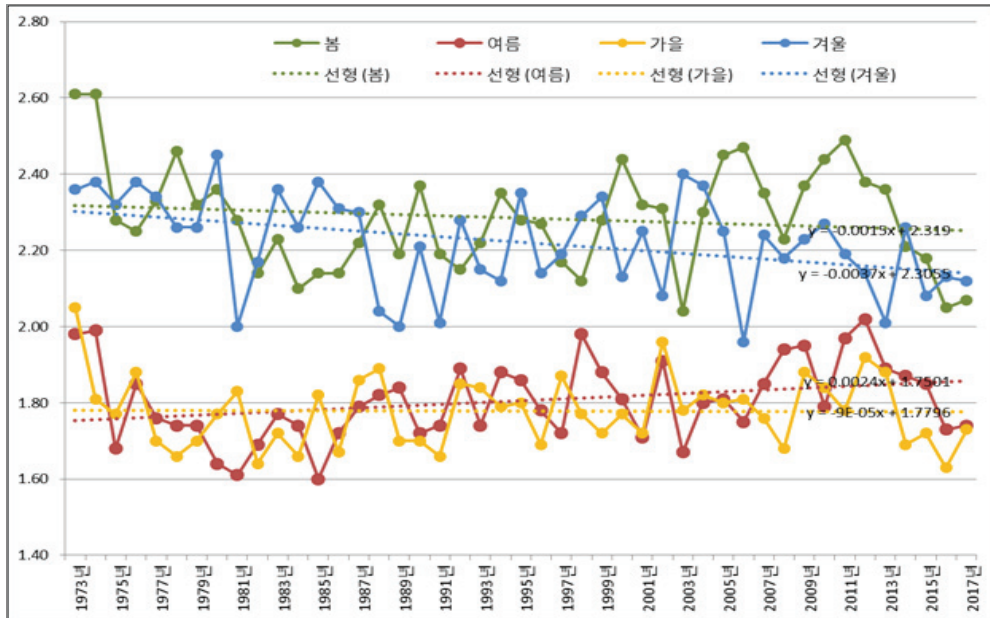
먼저 기온과 풍속의 장기간 변화 추이를 살펴보면(그림 2-5 참조), 연평균 기온은 증가하고, 연평균 풍속은 감소하는 경향을 보인다. 특히 최근 기간에는 2012년을 기점으로 기온은 계속적인 상승 경향, 풍속은 계속적인 감소 경향임을 알 수 있다.

대기 정체와 관련이 있을 것으로 추정되는 풍속 변화에 대해서 어떤 계절의 변화폭이 큰지 살펴보기 위하여 계절별로 분석하였다(그림 2-6 참조). 여름철은 풍속 증가 경향, 이외의 계절은 감소 경향을 보였다. 최근 기간의 변화를 살펴보면, 2012년 이후 특히 봄철의 풍속 감소폭이 큰 것을 확인할 수 있다.



자료: 기상청 종합기후변화감시정보, “대기(기상요소)”, 검색일: 2019.5.10. 바탕으로 저자 작성.

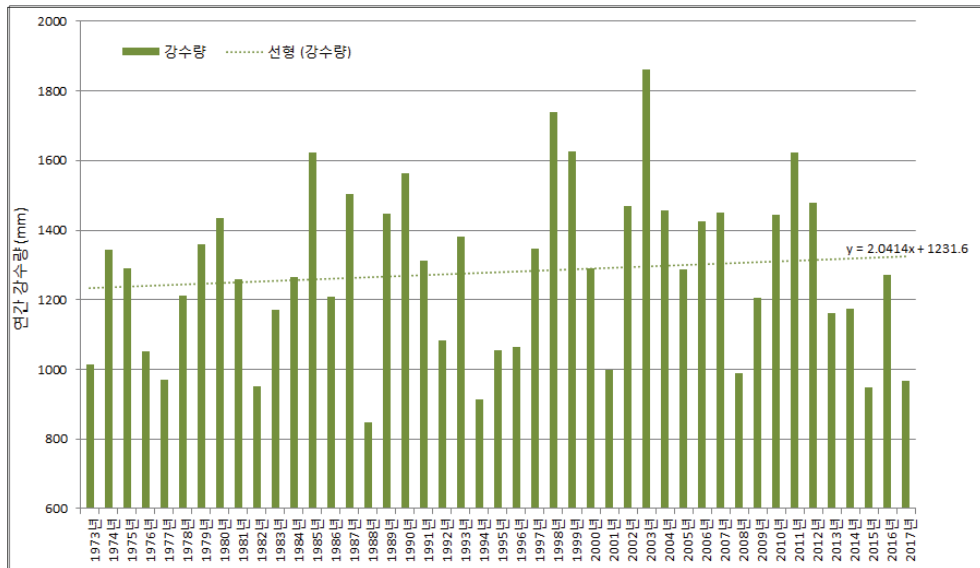
〈그림 2-5〉 연평균 기온 및 풍속의 장기간 변화 추이



자료: 기상청 종합기후변화감시정보, “대기(기상요소)”, 검색일: 2019.5.10. 바탕으로 저자 작성.

〈그림 2-6〉 계절평균 풍속의 장기간 변화 추이

다음으로 강수량 변화를 살펴보았다(그림 2-7 참조). 1973년 이후의 전반적인 변화 추이는 약간 증가하는 경향을 보이지만 최저 848.5mm(1988년)에서 최고 1861.0mm(2003년)로 변동폭이 매우 크다. 최근 기간을 보면 2013년 이후 강수량이 감소하는 경향을 보인다. 2010~2012년 기간의 연간 강수량은 1,400mm를 웃도는 수준이었으나, 2013년 이후의 기간에는 2016년을 제외하고는 평년값(1981년~2010년의 기상요소별 평균값)인 1,307.7mm에 미치지 못하는 수준이다.



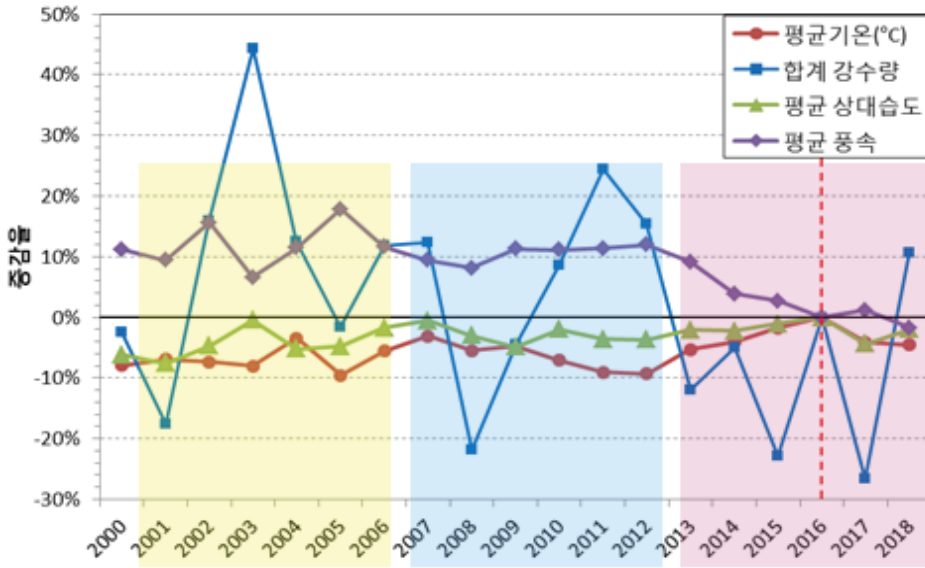
자료: 기상청 종합기후변화감시정보, “대기(기상요소)”, 검색일: 2019.5.10. 바탕으로 저자 작성.

〈그림 2-7〉 연간 강수량의 장기간 변화 추이

2. 미세먼지 농도와 기상 여건 변화의 관련성

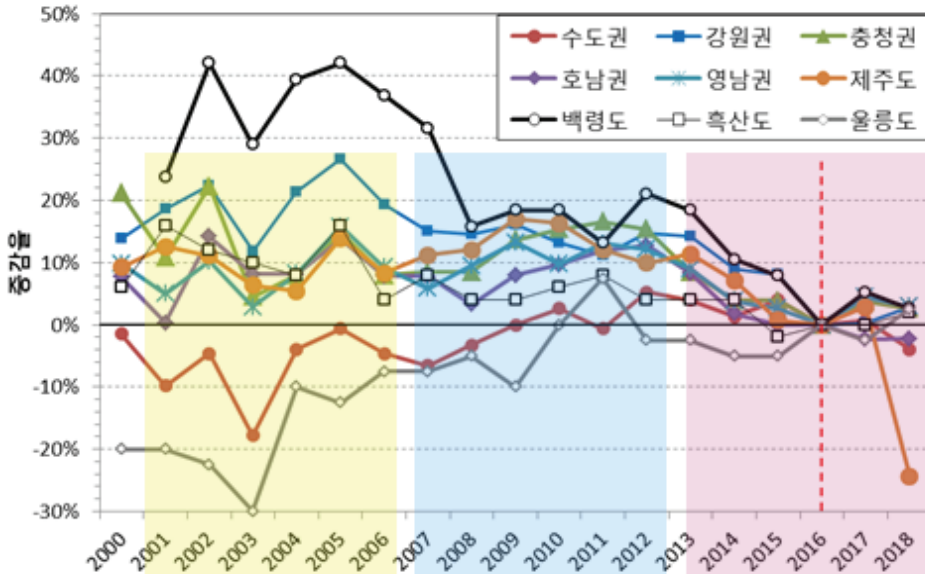
최근 기간의 기상 여건 변화 추이를 좀 더 자세히 살펴보기 위하여 2000년 이후의 기간에 대하여 1973년 이후 연평균 기온이 가장 높았던 2016년(13.6℃)을 기준으로 전국 102개 지점의 종관기상관측자료를 분석하였다(그림 2-8 참조). <그림 2-2>에서 미세먼지 농도 변화 경향을 기준으로 구분했던 세 기간을 동일하게 적용하여 변화 경향을 관찰하였다. 여러 기상요소 중에서도 풍속의 최근 감소 경향을 뚜렷하게 확인할 수 있다. P0 기간의 변동폭이 약간 크긴 하지만 2012년까지 전체적으로 2016년 수준 대비 약 10% 빠른 수준에서 유지되었으나, 2013년 이후의 P2 기간에 풍속이 지속적으로 감소하는 모습을 확인할 수 있다. 강수량의 경우 2016년 수준 대비 약 44%(2003년)~-27%(2017년)로 다른 기상인자에 비해 연도별 변동성이 크다. 평균 기온과 상대습도의 경우 상대적으로 연간 변동성이 적긴 하지만, 기온의 경우 P0 기간에 약간 증가 경향, P1 기간에 감소 경향, P2 기간에 증가 경향을 보였다.

뚜렷한 변화를 보이는 풍속에 대해서 지역별로 구분하여 변화 경향을 살펴보았다(그림 2-9 참조). 대부분의 행정 권역과 국가배경지역(백령도, 울릉도, 흑산도)에서 2012년 이후 감소 경향을 보였다. 특히 백령도의 경우 2000년대 초반과 비교하여 약 40% 이상 감소하여 감소폭이 가장 컸다. 수도권과 울릉도를 제외한 지역들은 변화 경향이 비슷하였다. 2000년대 중반까지 풍속의 변동폭이 크다가 이후 2012년까지 변화 경향이 다소 정체하였고, 이후 감소하는 패턴을 보인다. 수도권 역시 2012년 이후 풍속이 감소하는 경향은 다른 지역과 동일하나, P1 기간에 풍속이 증가하는 모습을 확인할 수 있다. 울릉도의 경우 2000년대 초반 대비 30% 이상 증가하여 다른 지역과 반대되는 변화 양상을 나타냈다.



자료: 기상청 기상자료개방포털, “중관기상관측(ASOS)”, 검색일: 2019.6.24. 자료 기반으로 저자 작성.

〈그림 2-8〉 2016년 대비 기상요소별 변화 경향(전국 평균)



자료: 기상청 기상자료개방포털, “중관기상관측(ASOS)”, 검색일: 2019.6.24. 자료 기반으로 저자 작성.

〈그림 2-9〉 2016년 대비 평균 풍속 변화 경향(권역별 평균 및 국가배경지역)

미세먼지 농도 감소가 분명하게 나타나는 P1 기간과 농도 변화 경향이 정체된 P2 기간의 풍속 변화는 어떠한지 지역별로 두 기간의 평균 풍속 대비 분석(P1 기간 대비 P2 기간의 평균 풍속 증감률 분석)을 실시한 결과는 <그림 2-10>과 같다. <그림 2-10>의 지역별 풍속 변화와 <그림 2-3>의 지역별 농도 변화를 연관 지어 살펴보면 풍속 감소율이 크지 않은 수도권, 충북, 경북 등의 지역은 농도 감소가 큰 폭으로 나타나며, 풍속 감소폭이 큰 제주, 충남, 전남, 경남 등의 지역은 농도 감소폭이 크지 않게 나타나 농도와 풍속 감소의 변화폭은 서로 반대 경향을 보임을 확인할 수 있다.



자료: 기상청 기상자료개방포털, “종관기상관측(ASOS)”, 검색일: 2019.6.24. 자료 기반으로 저자 작성.

<그림 2-10> 지역별 P1 기간 대비 P2 기간 풍속 증감률

기간별 (초)미세먼지 농도, 기온, 풍속의 변화 경향을 정리한 결과는 <표 2-2>와 같다.

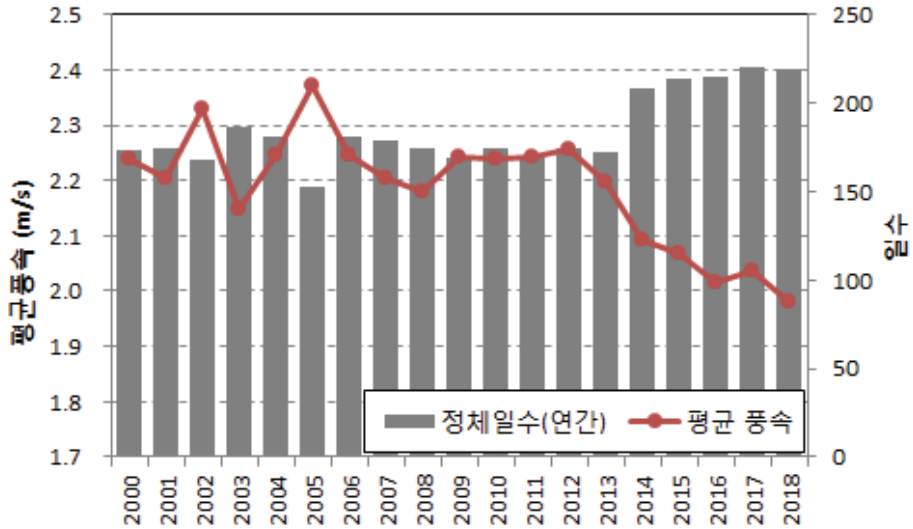
<표 2-2> 3개 기간별 (초)미세먼지 농도, 풍속, 기온의 변화 경향

	P0 기간('01~'06)	P1 기간('07~'12)	P2 기간('13~'18)
(초)미세먼지 농도	급격한 감소	감소 경향	변화 정체 경향
풍속	변동폭 큼	변화 정체 경향	감소 경향 뚜렷
기온	변화 정체 경향	감소 경향	증가 경향

자료: 저자 작성.

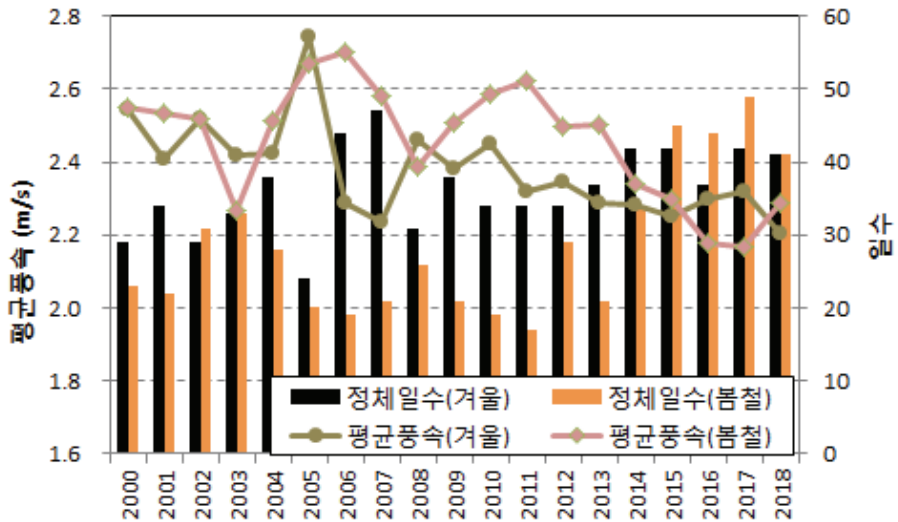
국내 연평균 풍속의 변화와 대기질 농도의 연관 관계를 규명하기 위하여 연도별 정체일수(일평균 풍속 2m/s 이하인 날)를 분석하였다(그림 2-11 참조). 2012년 이후 연평균 풍속이 2.26m/s에서 2018년 1.98m/s까지 지속적으로 감소하는 모습을 보였으며, 정체일수의 경우 2014년부터 이전 기간 대비 최소 50일 이상 증가하였다.

<그림 2-12>는 봄철과 겨울철에 대해 국내 평균 풍속의 변화와 함께 각 계절별 정체일수를 나타낸 것이다. 앞서 장기간 변화에서도 살펴보았듯이 봄철 풍속의 최근(2012년 이후) 감소 경향이 두드러지게 나타난다. 이와 관련하여 정체일수 역시 봄철의 최근 증가 경향이 관찰된다. 2013년까지 30일을 밑돌던 연간 정체일수는 2014년부터 30일을 웃도는 수준으로 증가하여 봄철의 풍속 감소가 정체일수 증가로 이어졌음을 알 수 있고, <그림 2-11>의 분석과 비교했을 때 최근의 풍속 감소와 이로 인한 정체일수 증가는 특히 봄철의 영향이 큰 것으로 추정할 수 있다.



자료: 기상청 기상자료개방포털, “중관기상관측(ASOS)”, 검색일: 2019.6.24. 자료 기반으로 저자 작성.

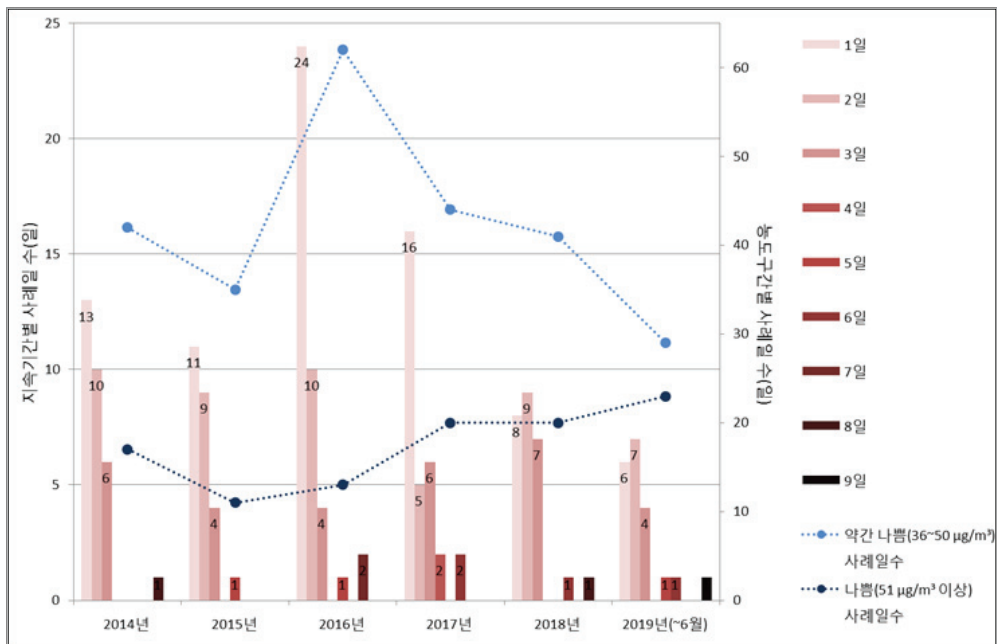
〈그림 2-11〉 국내 연평균 풍속 및 정체일수(일평균 2m/s 이하) 변화



자료: 기상청 기상자료개방포털, “중관기상관측(ASOS)”, 검색일: 2019.6.24. 자료 기반으로 저자 작성.

〈그림 2-12〉 국내 겨울 및 봄철 평균 풍속 및 정체일수(일평균 2m/s 이하) 변화

최근 기간의 풍속 감소 및 대기정체가 대기질에 미친 영향은 고농도 미세먼지 발생일수와 지속기간의 변화로도 확인할 수 있다. <그림 2-13>은 서울 지역의 $PM_{2.5}$ 농도가 약간 나쁨($35\sim 50\mu\text{g}/\text{m}^3$) 및 나쁨($51\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상)인 연간 사례일수와 지속기간별 사례일수를 연도별로 나타낸 것이다. 최근으로 올수록 약간 나쁨 사례일수는 감소하는 듯 보이나, 나쁨 일수는 증가 경향을 보이고 있고, 특히 지속기간별 사례일수를 보면 최근 5일 이상 지속되는 사례가 늘어난 것을 볼 수 있다. 2018년 6일과 8일 지속 사례가 각각 1건씩 발생하였고, 2019년 상반기에는 5일, 6일, 9일간 지속된 사례가 1건씩 발생하였다.



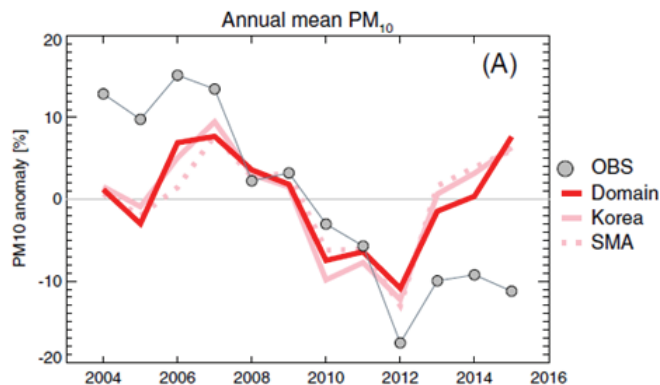
자료: 한국환경공단 AirKorea, “통계정보”, 검색일: 2019.3.3. 바탕으로 저자 작성.

<그림 2-13> 고농도($36\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상) 초미세먼지 사례 지속기간별·농도구간별 일수(서울시)

제3장 | 연평균 미세먼지 농도에 대한 기상변화 기여도 분석

1. 미세먼지 농도에 대한 기상변화 기여도 분석 필요성

Kim et al.(2017)의 선행연구에서는 미세먼지 농도에 미치는 배출량 변화의 영향을 제거하고 기상 여건의 변화만으로 미세먼지 농도가 어떻게 변화하는지 살펴보기 위하여 배출량을 고정하고(분석기간에 대해 동일한 배출량 자료 입력) 기상요소만 변화시킨 Emission-isolating modeling을 수행한 바 있다(그림 3-1 참조). 그림에서 배출량의 변화 없이 기상조건의 변화만으로 연평균 PM₁₀ 농도가 -10.9~7.7%의 변동폭을 가지고 변화하는 것을 살펴볼 수 있다. 즉, 같은 배출량이라 하더라도 2012년처럼 기상 여건이 미세먼지 농도 감소에 호조건인 해에는 농도가 낮을 수 있고, 2007년이나 2015년과 같이 미세먼지 농도에 부정적인 기상 여건이 갖춰진 해에는 농도가 높아질 수 있다는 의미이다.



자료: Kim et al.(2017), p.3.

〈그림 3-1〉 Emission-isolating modeling에 의해 산출된 연평균 미세먼지 농도의 변화

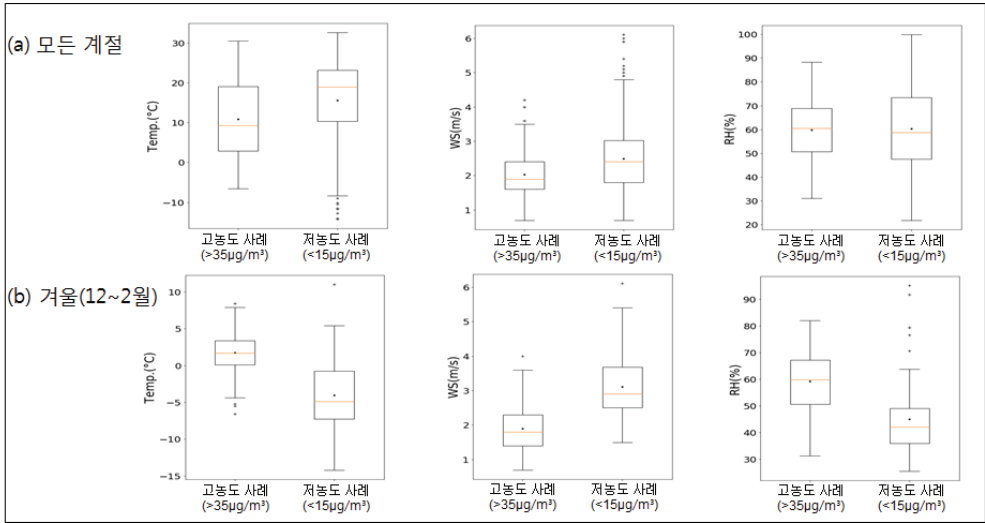
서론에서 언급한 바와 같이 현재의 대기관리정책은 미세먼지 농도에 미치는 기상/기후의 영향을 고려하고 있지 않으므로, 목표연도에 배출량 감축 목표를 달성하더라도, 기상의 영향으로 인해 미세먼지 농도 감소효과가 적어져 목표농도를 달성하지 못할 가능성이 있다. 따라서 연평균 농도에 대한 기상 기여도 분석을 통해 극단적인(미세먼지 농도에 부정적인 방향으로) 기상조건하에서도 목표 농도를 달성할 수 있는 배출량 감축 완충량을 산정할 필요가 있다. 본 절에서는 Emission-isolating modeling 방법을 이용하여 미세먼지 농도에 미치는 기상 기여도를 산정해 보고자 한다.

2. 기상변화 기여도 산정을 위한 기초 분석

분석기간에 대해 동일한 배출량 입력자료를 넣고 기상자료만을 변화시키는 배출량고정-기상변화 모델링을 수행하면 미세먼지 농도에 미치는 배출변화의 영향을 제거할 수 있다. 2000년대의 미세먼지 농도 감소 경향과 2012년 이후의 농도 변화 정체 경향 등의 원인을 규명하고 미세먼지 농도에 대한 기상의 기여도를 산정하기 위해서는 미세먼지 농도 관측자료 분석기간과 동일한 기간(2001~2018년)에 대해 모델링을 수행하여야 하겠으나, 모델링에 장시간이 소요되고 본 과제의 1차년도 연구기간은 한정적인 점을 고려하여 대표연도를 선정하여 모델링을 수행하기로 하였다.

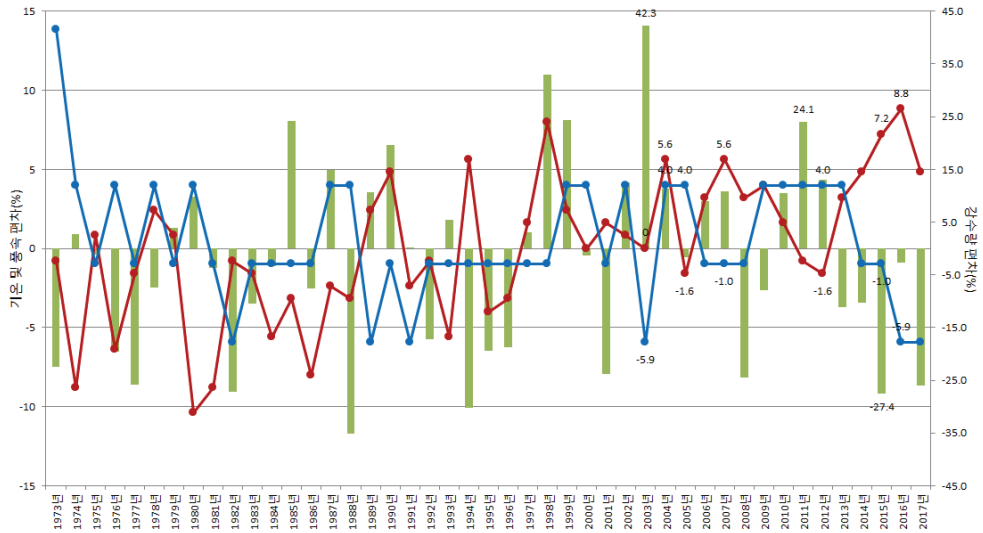
대표연도 선정과 관련하여 미세먼지 농도에 미치는 기상요소의 영향을 보다 확실하게 살펴보기 위하여 2014~2019년 6월 기간에 대해 $PM_{2.5}$ 농도가 $35\mu g/m^3$ 이상인 고농도 사례와 $15\mu g/m^3$ 이하인 저농도 사례를 뽑아서 기온, 풍속, 상대습도값이 어떤 분포를 보이는지 box plot 분석을 수행하였다(그림 3-2 상단 참조). 분석기간 내에 발생한 고농도 사례는 총 347일, 저농도 사례는 452일이었다. 전체 기간을 한꺼번에 분석할 때는 기온의 경우 특히 계절적 특성이 혼재되어 있을 수 있으므로, 고농도 사례 발생빈도가 높은 겨울철에 한정하여 분석하였다(그림 3-2 하단 참조).

〈그림 3-2〉에서 확인할 수 있는 바와 같이 고온, 약풍, 다습할 때 미세먼지 농도가 증가할 가능성이 높고, 저온, 강풍, 건조할 때 농도가 감소할 가능성이 높다.



자료: 기상청 기상자료개방포털, “종관기상관측(ASOS)”, 검색일: 2019.6.24. 자료 기반으로 저자 작성.

〈그림 3-2〉 초미세먼지 고농도 및 저농도 사례별 기상요소값 분포



자료: 기상청 종합기후변화감시정보, “대기(기상요소)”, 검색일: 2019.5.10. 바탕으로 저자 작성.

〈그림 3-3〉 대표연도 선정을 위한 기온, 풍속, 강수량 편차 분석

미세먼지 농도에 미치는 기상요소별 영향을 확인한 후 모델링을 위한 대표연도 선정을 위해 기상요소별 편차 분석을 수행하였다(그림 3-3 참조). 편차 계산은 ‘(연평균값-평년값(‘81~’10년의 평균값))×100/평년값’으로 계산하였고, 기상요소별 편차를 고려하여 2000년대 이후의 특징적인 해를 선별하였다(표 3-1 참조).

초미세먼지 농도는 낮고, 기온 편차가 음으로 큰 값, 풍속 편차가 양으로 큰 값을 보인 2005년과 2012년을 최저 기상 기여도 분석을 위한 해로 선정하였고, 초미세먼지 농도는 높으면서, 기온 편차가 양(+)으로 큰 값, 풍속 편차가 음(-)으로 큰 값을 보인 2007년과 2016년을 최고 기상 기여도 분석을 위한 해로 선정하였다. 1차년도에는 모델링 시간이 한정적임을 고려하여 대표연도만 분석하였으나, 2차년도 이후 모든 기간에 대한 모델링 분석을 수행할 예정이다.

〈표 3-1〉 Emission-Isolating Modeling을 위한 대표연도 선정

연도	초미세먼지 농도	기온	풍속
2005	저	저	고
2007	고	고	저
2012	저	저	고
2016	고	고	저

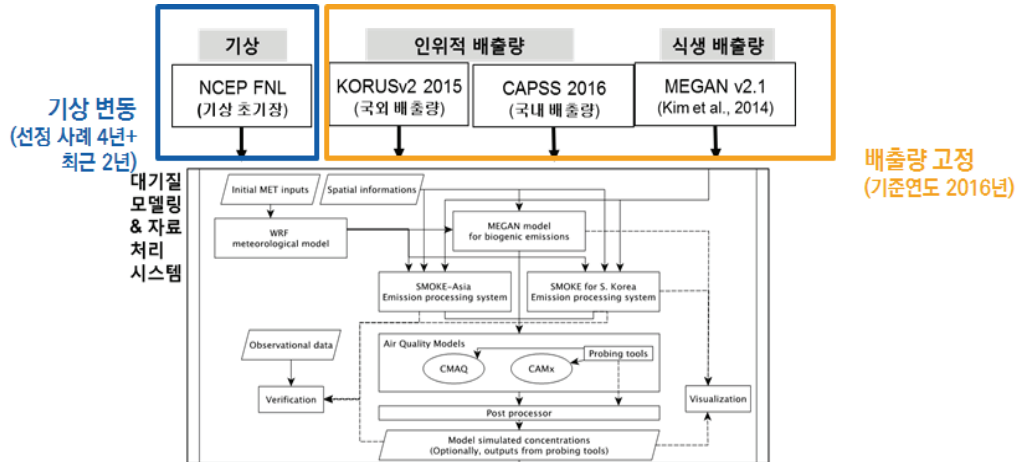
자료: 저자 작성.

3. 대표연도에 대한 모델링 수행 결과

가. Emission-Isolating 모델링 수행체계

초미세먼지 농도에 대한 기상 영향(기여도) 분석을 위하여, 본 연구에서는 대기질 모델에 기반한 Emission-Isolating 모델링을 수행하였다. 기본적인 접근 가정으로 대기오염물질 배출량은 변화 없이 고정되며, 앞서 연구를 통해 선정한 대표연도와 최근 기간들에 대한 기상자료의 변화를 통해 초미세먼지 농도 변화의 민감도 분석 결과를 도출하였다. 〈그림 3-4〉는 본 연구에서 수행될 모델링 시스템의 구성을 나타낸 것으로, 기본적인 기상-배출-대기질 모델

링 구성은 기존 연구의 결과(심창섭 외, 2019)를 활용하되, 본 연구를 수행하기 위한 목적으로 별도의 기상 민감도 분석 실험을 수행하였다.



자료: 심창섭 외(2019), p.51 모델링 시스템 구성도를 기반으로 배출량 고정, 기상변동성을 평가하였음을 추가 표기함.

〈그림 3-4〉 초미세먼지 농도에 대한 기상 기여도 분석을 위한 모델링 시스템 구성

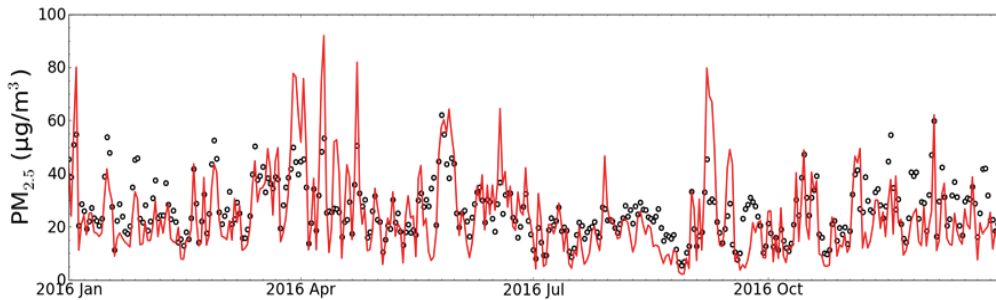
대기오염물질 배출 입력자료로는 국외 배출량 자료는 KORUS-AQ 항측연구 지원을 목적으로 개발된 배출 목록3)자료의 1차 개선버전(KORUSv2)을, 국내 배출량 자료는 가장 최근에 발표된 2016년 국가대기오염물질 배출량(CAPSS) 자료를 활용하였다. 모델링 수행 범위와 공간해상도는 동아시아 지역 27km, 남한 지역 9km 격자 해상도로, 기존 연구의 도메인 구성과 동일하다. 대기질 모델로는 CAMx v6.2를 이용하였다.

나. 대기질 모델링 기본 모사 결과 검증

〈그림 3-5〉는 적용된 대기오염물질 배출목록의 기준연도(2016년)에 대한 기본 모사 검증

3) 박록진 외(2016).

결과를 나타낸 것으로, 일평균 초미세먼지 농도의 변화를 국내 전체 평균 관측 자료와 모델 모의자료를 비교하여 나타낸 것이다. 겨울철과 봄철 기간에 특히 과대 예측하거나 과소 예측하는 날이 존재하나, 전체적으로 모델 모의 결과가 관측농도 수준과 변화 정도를 일정수준 모의하고 있는 것으로 판단된다.

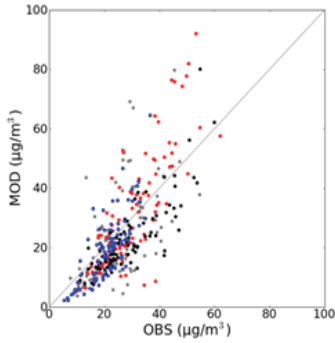


자료: 저자 작성.

〈그림 3-5〉 기준연도(2016년) 전국 일평균 PM_{2.5} 관측농도(흑색 원)와 모델 모의농도(적색 선) 시계열 비교

〈그림 3-6〉은 같은 기간에 대한 전국 일평균 초미세먼지 농도를 비교한 산포도와 통계 지표로 정리한 것을 나타낸 것이다. 연 전체적인 수준은 우수한 모의 성능(NMB $\pm 10\%$, $R > 0.7$)⁴⁾을 보여 주고 있는 것으로 판단된다. 다만 모델 모의농도 수준은 다소 과소 예측하는 것으로 분석되었으며, 계절별로 살펴보면 봄철을 제외한 대부분 모델 예측 결과가 특히 겨울철의 경우 관측치에 비해 과소 모의하는 경향을 나타내었다. 다만 전반적인 과소 모의 경향에도 불구하고, 전체적인 정합성은 모든 계절에서 대부분 적합한 수준을 보여 주고 있어 기상에 의한 상대적인 농도 변화를 분석하고자 하는 본 연구의 목적에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

4) Emery et al.(2016): 최기철 외(2018), p.308에서 재인용.



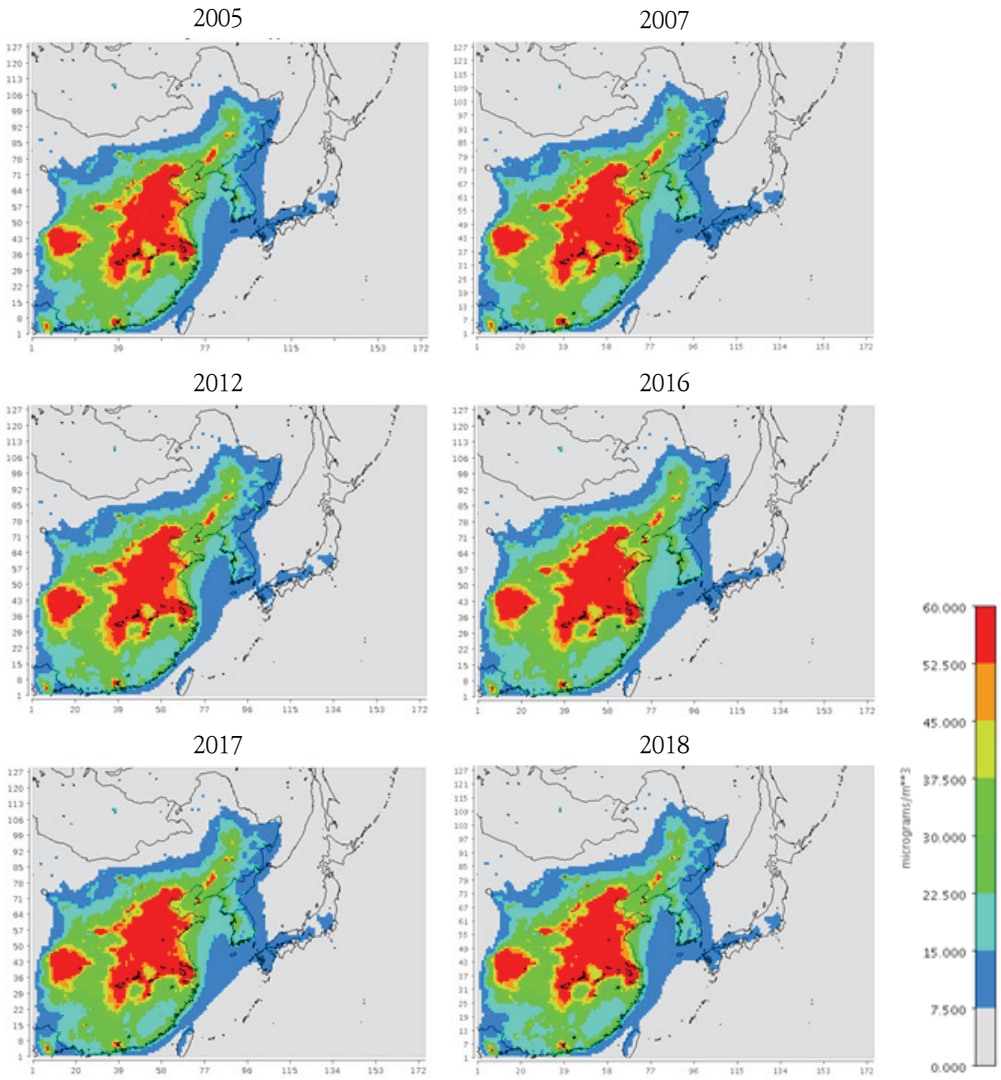
	OBS	MOD	NMB	RMSE	IOA	R
겨울	28.7	22.6	-21.3	9.1	0.85	0.83
봄철	30.1	32.0	6.5	12.6	0.82	0.80
여름	21.1	19.5	-7.9	7.5	0.81	0.76
가을	24.4	22.3	-8.4	12.3	0.73	0.61
연평균	26.1	24.1	-7.5	10.6	0.82	0.75

자료: 저자 작성.

〈그림 3-6〉 기준연도(2016년) 전국 일평균 PM_{2.5} 관측농도(OBS)와 모델 모의농도(MOD) 산포도 및 통계지표 비교

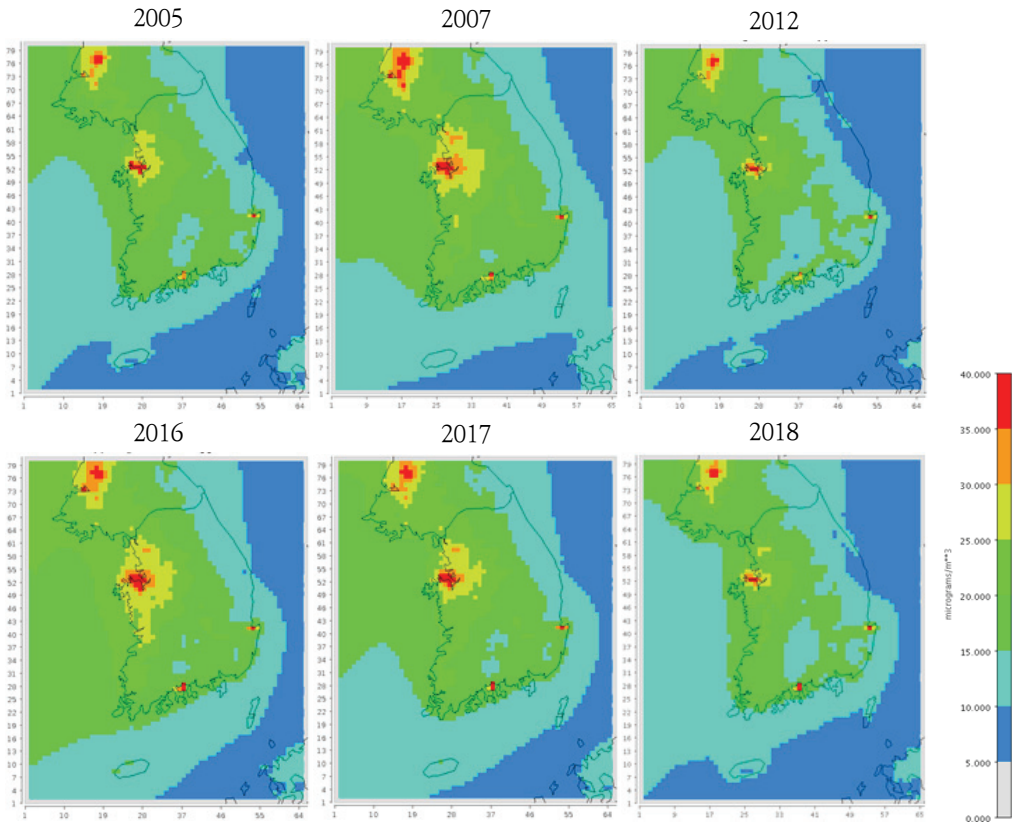
다. 대표연도별 초미세먼지 농도 분포

〈그림 3-7〉과 〈그림 3-8〉은 선정된 대표연도별 연평균 초미세먼지 농도의 공간 분포를 동아시아 지역과 남한 지역에 대해 나타낸 것이다. 동일한 배출량 자료를 적용하였음에도 불구하고, 각 대표연도별 기상요인에 의해 전체적인 농도 수준에 차이를 보였다. 전반적으로 2007년과 2016년에는 농도 수준이 상대적으로 높았으며, 반면 2005년과 2012년의 농도 분포는 상대적으로 낮은 수준이었다. 다만 이러한 기상 변화에도 불구하고 농도 분포위치는 크게 변화하지 않았으며, 농도 수준이 높은 곳은 대부분 대형 발전소 및 산업시설 인근으로 추정된다. 농도 분포 특성은 기상요인보다는 주요 배출원 분포에 의해 좌우되는 것으로 판단된다.



자료: 저자 작성.

〈그림 3-7〉 모델 모의된 대표연도별 동아시아 지역 연평균 PM_{2.5} 농도 분포 비교



자료: 저자 작성.

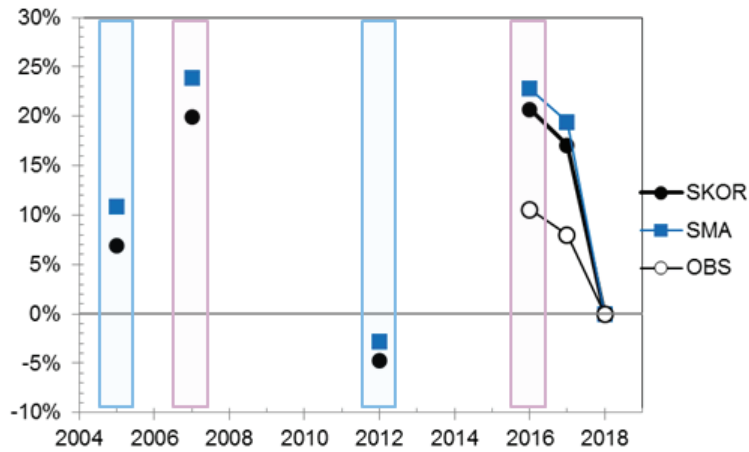
〈그림 3-8〉 모델 모의된 대표연도별 남한 지역 연평균 PM_{2.5} 농도 분포 비교

라. 기상에 의한 연평균 초미세먼지 농도 변화

〈그림 3-9〉와 〈그림 3-10〉은 대표연도 기상인자 변화에 따른 초미세먼지 농도를 최근 대상 기간인 2018년 대비 상대적 변화와 변화율 범위로 나타낸 것으로, 국내 전체와 수도권 지역의 분석 결과이다. 동일한 배출조건에도 불구하고, 기상요인에 따른 변화는 적지 않은 수준이다. 2005년의 경우 2018년 수준 대비 전국 평균 약 7%, 2007년의 경우 약 20% 수준에서 모의되었 으며, 2012년의 경우 가장 최저 수준을 보이는 해로, 2018년 농도 대비 약 5% 낮은 농도로 기상연도 변화에 따른 농도 수준을 모의하였다. 대상 기상연도 중, 가장 낮은 농도를 모의한 해는 2012년(전국 -5%, 수도권 -3%), 가장 높은 연도는 2016년(전국 기준, 21%) 및 2007년

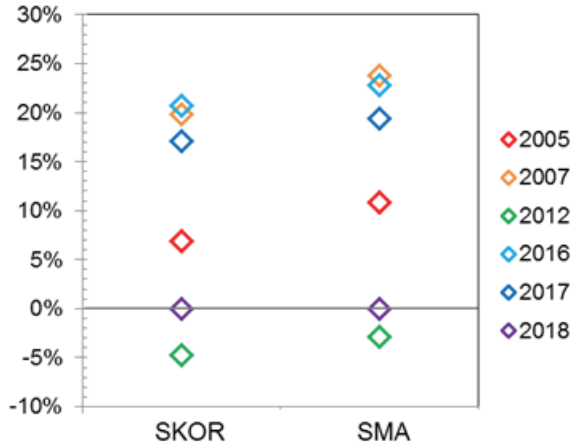
(수도권 기준, 24%)이며, 최근 대상기간인 2018년은 2012년에 이어 두 번째로 낮은 농도를 기록한 기상연도이다.

종합적으로 전국 평균 기준 2018년 대비 -5~21%, 수도권 평균은 약 -3~24% 수준으로 변화를 보였으며, 이러한 결과는 동일한 대기오염물질 배출 수준에서 기상인자로 최대 26~27% 변화할 수 있음을 의미한다. 다만 이러한 기상인자에 의한 변화는 국내 대기오염물질 배출 영향과 국외 영향이 함께 포함되어 있어 해석에 주의해야 한다.



자료: 저자 작성.

〈그림 3-9〉 최근 연도(2018년) 대비 기상연도 변화에 따른 국내(SKOR) 및 수도권(SMA) 연평균 PM_{2.5} 농도 변화 모의 결과와 국내 평균 관측농도(OBS) 변화



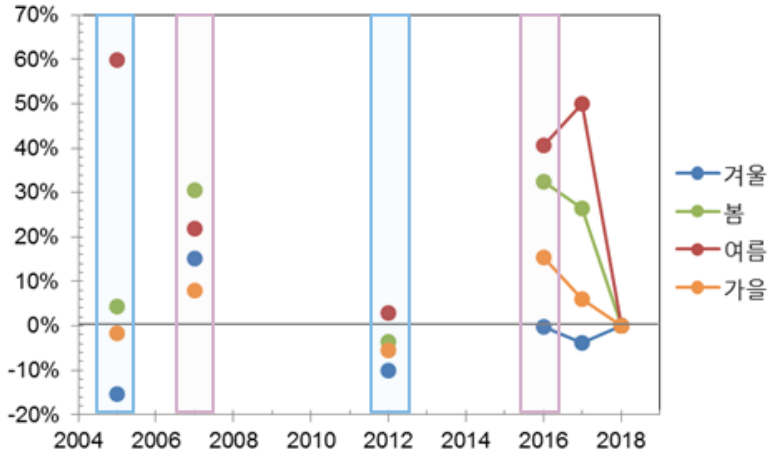
자료: 저자 작성.

〈그림 3-10〉 최근 연도(2018년) 대비 기상연도 변화에 따른 국내(SKOR) 및 수도권(SMA) 연평균 PM_{2.5} 농도 변화율

마. 기상에 의한 계절별 초미세먼지 농도 변화

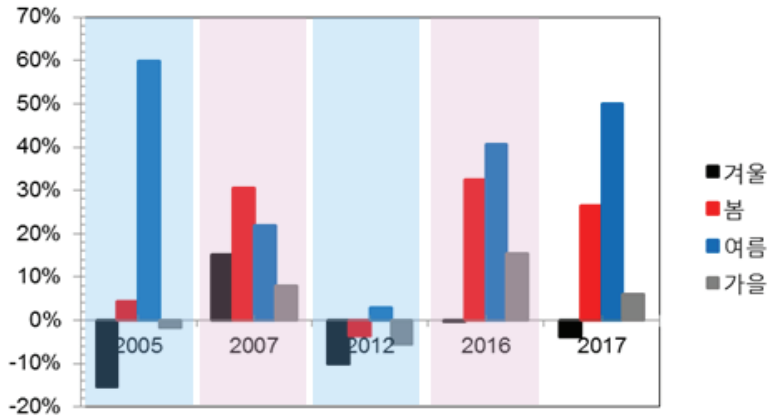
〈그림 3-11〉과 〈그림 3-12〉는 선정된 대표연도별 계절 평균 초미세먼지 농도 모의 결과에 대해 최근 연도인 2018년 대비 변화와 상대적 변화율을 나타낸 것이다. 겨울철과 봄철, 가을철의 경우 2005년과 2012년에 상대적으로 낮고, 2007년과 2016년은 상대적으로 높은 모습을 보였다. 그러나 여름철의 경우 2005년에 상대적으로 가장 높은 농도 수준을 보였고, 대상기간 2018년이 가장 낮은 수준으로 독립적인 변동 패턴을 보이며, 증감폭도 0%(2018년)~60%(2005년) 수준으로 가장 컸다. 여름철을 제외한 나머지 계절은 대부분 연평균 농도 변화 패턴과 유사한 모습이었다.

최근 3년간에 대한 계절별 변화를 살펴보면, 기상연도 변화에 따른 겨울철 농도 변화는 타 계절에 비해 상대적으로 적었으며, 2016년과 2018년이 유사한 수준이었다. 반면, 봄과 가을철은 같은 기간 줄어드는 모습을 보였으며, 특히 봄철의 감소폭(약 33%)이 컸다. 이에 따라 동기간 연평균 농도 감소는 대부분 비겨울철 기간의 기상 변화에 따른 영향으로 풀이된다.



자료: 저자 작성.

〈그림 3-11〉 최근 연도(2018년) 대비 기상연도 변화에 따른 계절별 평균 PM_{2.5} 농도 변화 모의 결과



자료 : 저자 작성.

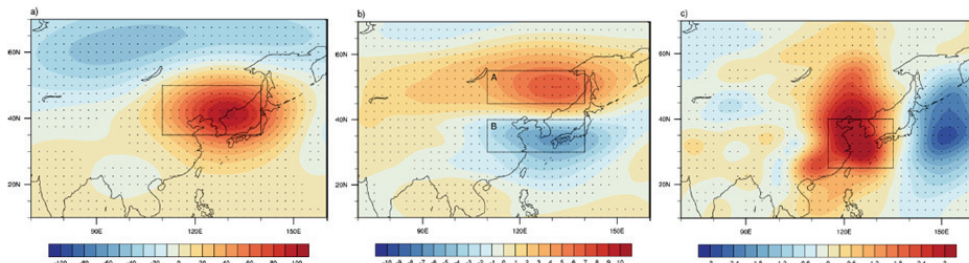
〈그림 3-12〉 최근 연도(2018년) 대비 대상 모의된 기상연도별, 계절별 평균 PM_{2.5} 농도 변화율

제4장 | 고농도 미세먼지 발생에 대한 기상·기후 영향 분석

1. 고농도 미세먼지 사례 관련 요소의 중장기 변화

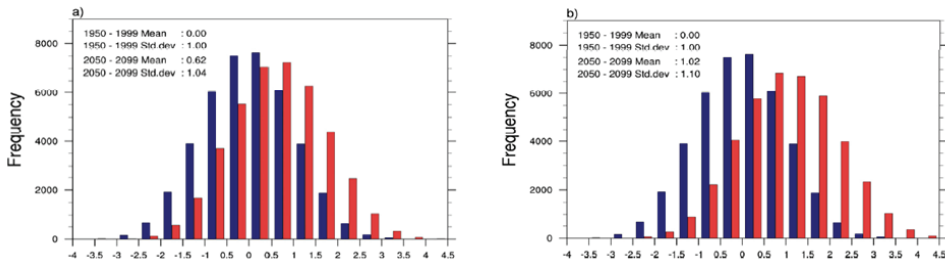
가. 고농도 미세먼지 사례 발생 빈도, 강도, 지속기간의 변화

이현주 외(2018)의 연구에서는 PM₁₀ 농도와 각 기상요소별(500hPa 지위고도, 500hPa 동서 방향 풍속, 850hPa 남북 방향 풍속) 상관성이 높은 지역을 영역 평균 및 합산하여 한반도 미세먼지 지수(Korea Particulate matter Index, KPI)를 개발하고(그림 3-1 참조), 현재 및 미래의 KPI 변화를 통해 고농도 미세먼지 발생과 연관된 기상조건의 빈도수 변화를 분석하였다(그림 3-2 참조). 온난화된 미래 기후 실험(RCP 4.5 및 8.5 시나리오 실험)에서 1950~1999년 기간의 과거 기후와 2050~2099년 기간의 미래 기후에 대해 KPI를 이용한 분석 결과 고농도 미세먼지 발생빈도가 현저하게 증가하는 것으로 분석되었다. 이처럼 기상 여건 또는 기후의 변화에 의해 고농도 미세먼지 발생도 변화할 가능성이 있다.



자료: 이현주 외(2018), p.430.

〈그림 4-1〉 한반도 미세먼지 지수 개발에 이용된 기상요소별(좌측으로부터 Z500, U500, V850) 영역



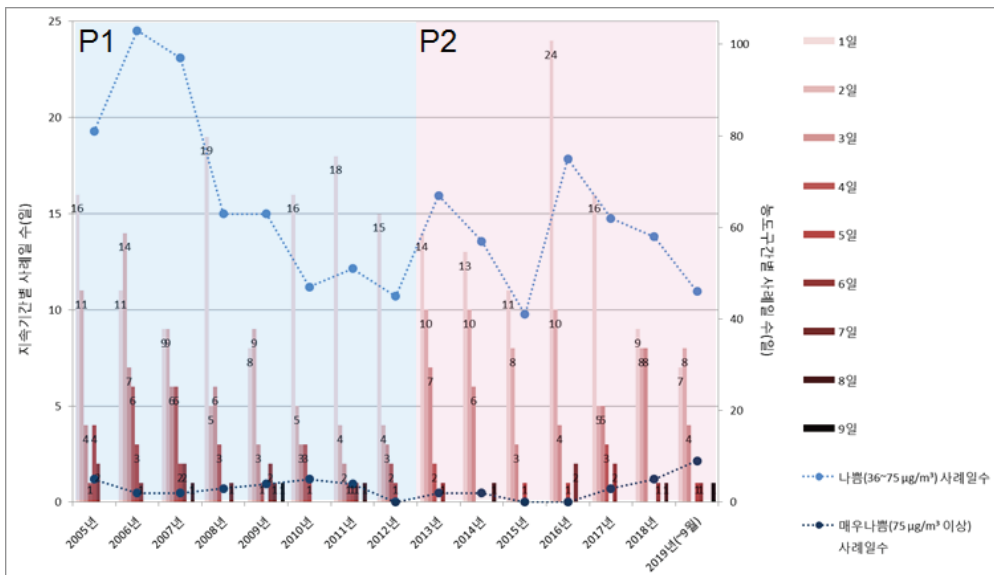
자료: 이현주 외(2018), p.432.

〈그림 4-2〉 기후변화에 따른 고농도 사례 발생빈도 변화

본 연구의 제2장에서도 초미세먼지 고농도 사례 발생과 관련된 최근 변화를 언급한 바 있다(그림 2-13 참조). 공식적인 $PM_{2.5}$ 측정 자료는 2015년부터 공개되고 있어(서울시는 2014년 자료부터 공개) 앞선 분석에서는 2014년 이후의 기간만을 분석하였기 때문에 PM_{10} 과 같이 2000년대 이후의 기간을 세 기간으로 구분하여 중장기적 변화 경향을 관찰하기에 어려움이 있다. 따라서 본 장에서는 서울시 대기환경 정보 사이트(<http://cleanair.seoul.go.kr/>)에서 제공하는 1시간 간격의 $PM_{2.5}$ 자료를 일평균하여 2004~2018년 기간을 분석하였다. 이를 통해 고농도 사례 발생의 중장기 변화와 고농도 미세먼지 발생에 미치는 기상, 기후의 영향을 살펴보고자 한다. 본 장의 분석에서는 한정된 자료를 고려하여 세 기간으로 구분하지 않고, 농도가 감소하는 2012년 이전과 농도가 증가하거나 정체하는 2013년 이후의 두 기간으로 구분하여 변화를 살펴보려 한다.

먼저 〈그림 2-13〉의 분석기간을 확장하여 P1 기간과 P2 기간을 분석하였다(그림 4-3 참조). 그림에서 보는 바와 같이 연평균 초미세먼지 농도가 꾸준히 감소하는 P1 기간에는 고농도 사례 발생일수도 감소 경향을 보인다. 2004년에는 사례 발생 30일로 다소 적었으나, 2005~2007년 기간에 연간 50일 이상 발생하던 수준에서 2010~2012년 기간에는 40일 이하로 감소하였다. 그러나 P2 기간인 2013년 이후 다시 발생빈도가 증가하여 2015년을 제외하고는 연간 40일 초과하여 발생하는 모습을 보인다. 또한 매우 나쁨 사례일수가 최근 증가하는 경향이다. 이는 최근 지속기간이 길고 농도가 높은(대기정체의 영향을 많이 받는) 고농도 사례가 증가하고 있음을 의미한다. 2019년 발생한 매우 나쁨 사례는 총 9일로, 분석기간 중 가장 많은 사례를 나타내고 있을 뿐만 아니라, 매우 나쁨 상태가 9일간 연속된 사례로서 분석기간 중 최장 지속기간을 기록하였다.

기간별로 계절별 고농도 사례 발생일수도 변화하였는지 살펴보기 위하여 P1 기간과 P2 기간의 계절별 고농도 초미세먼지 사례일수를 분석하였다(표 4-1 참조). P1 기간에 비해 P2 기간에 봄, 겨울철의 발생비중이 증가하고 여름, 가을철의 발생비중이 감소하였다. 봄철의 발생비중이 특히 많이 증가했는데, 이는 <그림 4-4>에서 확인할 수 있는 것처럼 봄철 풍속 약화 경향이 가장 큰 것과 관련되었을 것으로 추정된다.



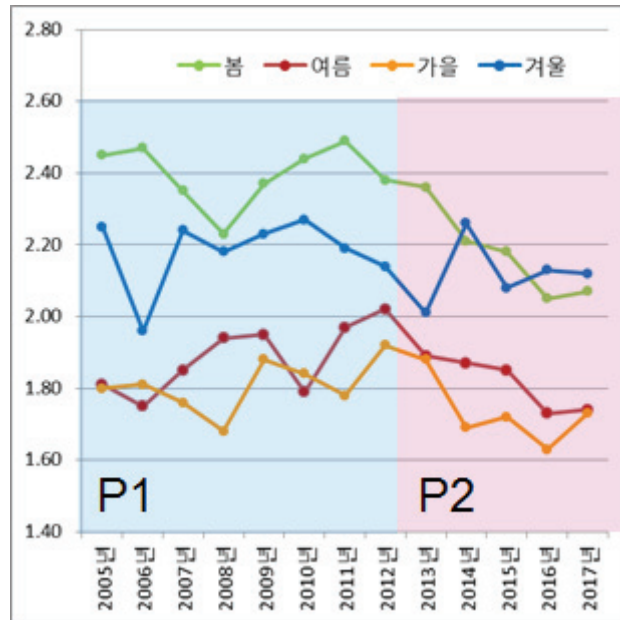
자료: 서울특별시 대기환경정보, “대기질현황”, 검색일: 2019.6.5. 바탕으로 저자 작성.

<그림 4-3> 고농도 초미세먼지 사례 지속기간별 농도구간별 일수(서울시)

<표 4-1> P1과 P2 기간의 계절별 고농도 PM_{2.5} 사례일수 및 발생비중

	봄 (MAM)	여름 (JJA)	가을 (SON)	겨울 (DJF)	총 사례일수
P1 (‘05~’12)	152일 (26.5%)	121일 (21.0%)	112일 (19.5%)	190일 (33.0%)	575일
P2 (‘13~’18)	131일 (35.2%)	52일 (14.0%)	49일 (13.2%)	140일 (37.6%)	372일

자료: 서울특별시 대기환경정보, “대기질현황”, 검색일: 2019.6.5. 바탕으로 저자 작성.



자료: 기상청 종합기후변화감시정보, “대기(기상요소)”, 검색일: 2019.5.10. 바탕으로 저자 작성.

〈그림 4-4〉 P1과 P2 기간의 계절별 풍속 변화

2. 고농도 미세먼지 사례 발생과 관련된 기상요소의 변화

제2장에서는 종관기상관측자료를 이용하여 미세먼지 농도와 관련된 기상요소별 특징을 분석하였다. 종관기상관측자료는 국내 각 지상관측소에서 측정된 기상요소별 자료로서 국내 지역에서도 지표와 가까운 기상의 특성만 살펴볼 수 있을 뿐, 한반도를 포함한 동북아 지역의 미세먼지 농도 관련 기상요소의 특성을 입체적·광역적으로 파악하기에는 어려움이 있다. 국내 미세먼지 농도에는 국내에서 배출된 대기오염물질뿐만 아니라 주변국으로부터 유입되는 대기오염물질도 영향을 미치고 있다. 또한 국내외에서 배출 및 유입된 대기오염물질이 기상 상황에 따라 정체, 혼합, 침적, 확산 등의 과정을 거쳐 미세먼지 농도를 결정하게 된다. 이러한 이유 때문에 수평적으로, 연직적으로 보다 넓은 범위에서 기상자료를 분석할 필요가 있어 본 절에서는 전 지구 규모로 생산된 미국 국립환경예측센터 재분석자료(NCEP/DOE reanalysis-II)⁵⁾를 분석하고자 한다.

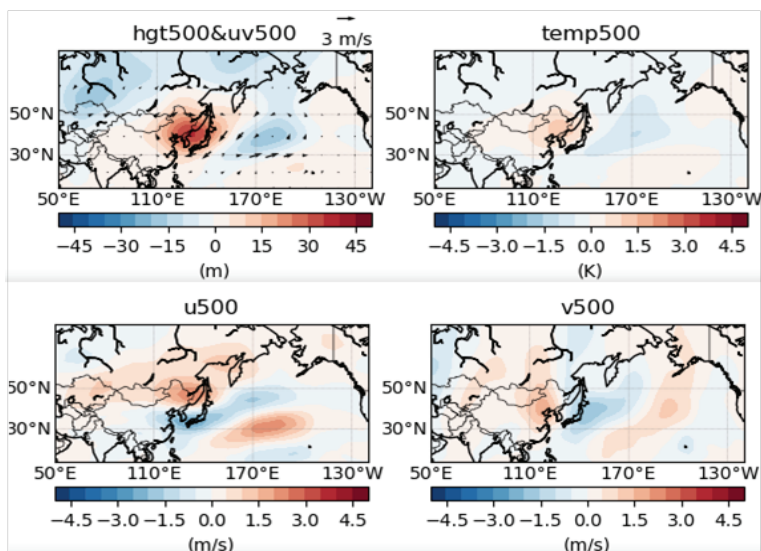
5) Kanamitsu, M. et al. (2002).

가. 분석 자료 및 방법

대기순환장 특성 분석을 위해 사용한 NCEP/DOE reanalysis-II 자료는 위도와 경도가 2.5도 간격의 격자로 구성되어 있고, 연직으로는 17개의 층(1,000hPa부터 10hPa)으로 이루어져 있다. 사용한 변수는 3개 층(1,000hPa, 850hPa, 500hPa)에서의 지위고도, 기온, 동서 방향 바람, 남북 방향 바람이다. 기간은 초미세먼지 농도자료의 기간과 동일하게 2004년부터 2018년까지이고, 분석기간에 대한 일별 기후 평균(2004-2018)을 제거한 편차장을 사용하였다.

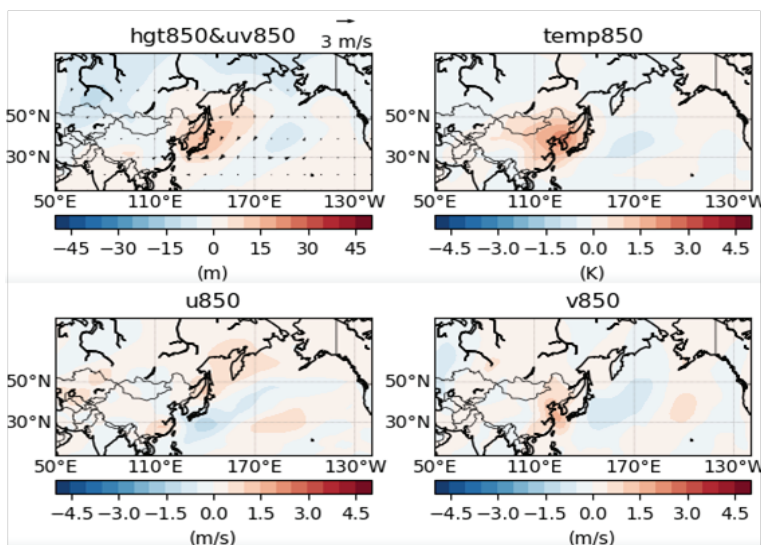
나. 고농도 미세먼지 사례 발생과 관련된 기상장 특성

2004~2018년 전체 기간 동안 발생한 고농도 미세먼지 사례일에 대한 각 기상요소별 합성장 분석 결과는 <그림 4-5>, <그림 4-6>, <그림 4-7>과 같다. 분석기간 동안 발생한 고농도 사례일수는 총 976일이다. 500hPa 상층의 경우, 우리나라에 강한 양의 지위고도 편차가 나타나고, 그 동쪽으로는 음의 지위고도 편차가 나타난다(그림 4-5 참조). 이러한 기압배치는 한반도를 중심으로 음의 동서바람 편차와 양의 남북바람 편차를 유도한다. 이는 상층에서 서풍과 북풍의 약화를 의미하며, 오염물질의 축적에 좋은 조건이다. 이러한 대기순환장 특징은 850hPa에서와 1,000hPa에서의 하층 대기에서도 잘 나타난다. 특히 기온의 경우 다른 층에 비해 850hPa에서는 양의 편차가 가장 뚜렷하게 나타나는데, 이는 지표 부근의 대기가 매우 안정하여 오염물질의 연직수송이 어려워짐으로써 오염물질의 축적에 좋은 조건이 된다(그림 4-6 참조).



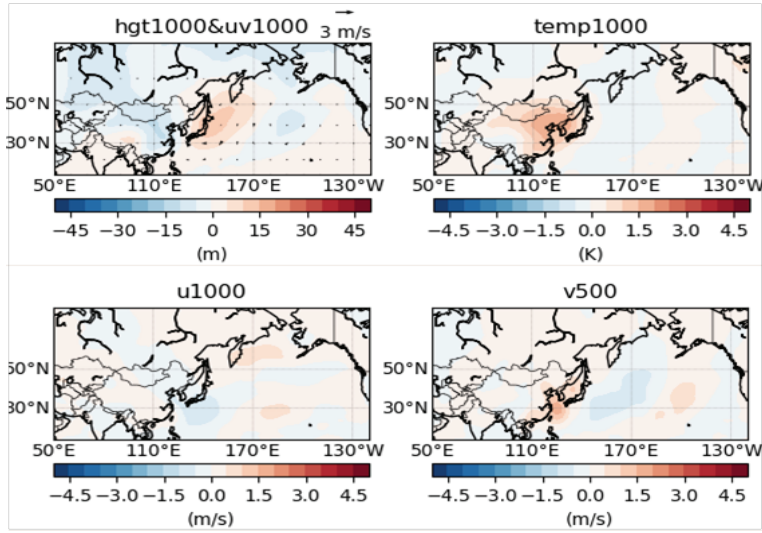
자료: NOAA National Centers for Environmental Information, “NCEP/DOE reanalysis-II”,
 검색일: 2019.7.20. 바탕으로 저자 작성.

〈그림 4-5〉 PM_{2.5} 고농도 사례에 대한 500hPa 지위고도, 기온 및 바람의 합성장 분석 결과



자료: NOAA National Centers for Environmental Information, “NCEP/DOE reanalysis-II”,
 검색일: 2019.7.20. 바탕으로 저자 작성.

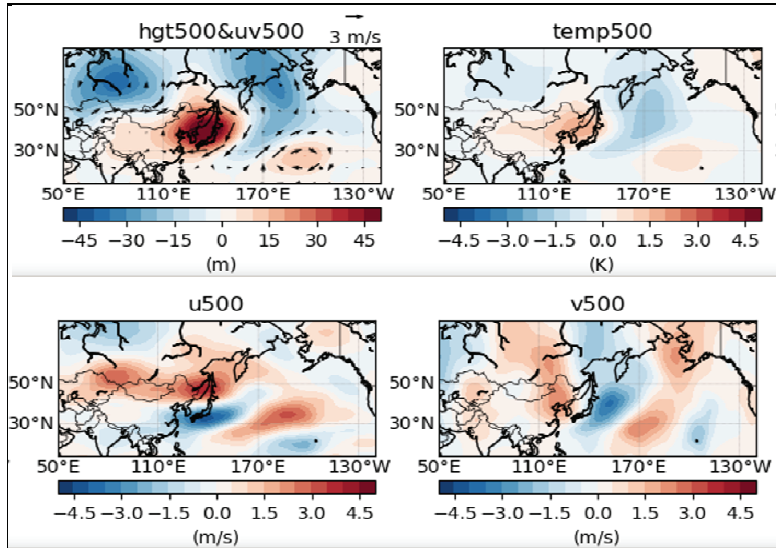
〈그림 4-6〉 PM_{2.5} 고농도 사례에 대한 850hPa 지위고도, 기온 및 바람의 합성장 분석 결과



자료: NOAA National Centers for Environmental Information, "NCEP/DOE reanalysis-II",
 검색일: 2019.7.20. 바탕으로 저자 작성.

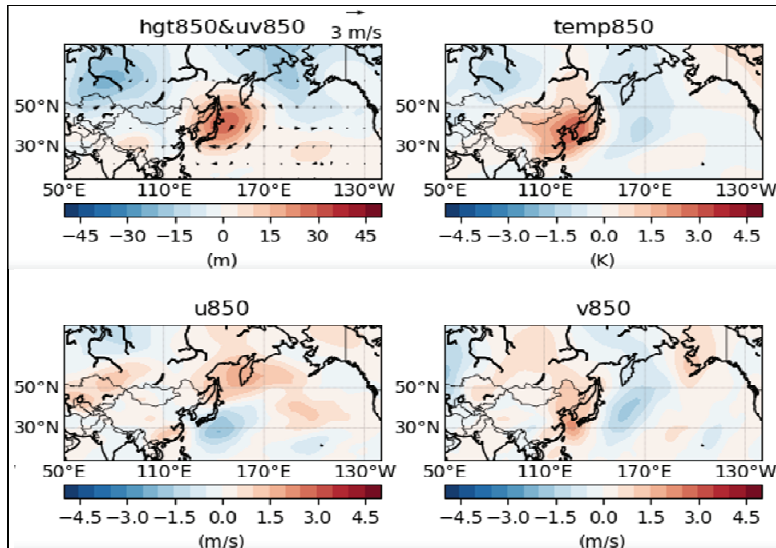
〈그림 4-7〉 PM_{2.5} 고농도 사례에 대한 1,000hPa 지위고도, 기온 및 바람의 합성장 분석 결과

일반적으로 동아시아의 겨울철 기압배치는 서고동저이다. 또한 열적으로도 지표면이 대기보다 차갑기 때문에, 겨울철 대기는 다른 계절에 비해 상대적으로 안정하고, 대기 중 오염물질을 제거할 수 있는 강수량이 적다. 이러한 기압배치와 대기 특성으로 겨울철은 다른 계절에 비해 미세먼지 고농도 현상이 발생하기 쉽다. 따라서 앞 장에서의 분석과 동일하게 겨울철(DJF)에 발생한 고농도 현상일(332일)에 대해 대기순환장 합성장을 추가로 분석하였다(그림 4-8, 4-9, 4-10 참조). 전 계절에 대해 분석한 결과와 비교하였을 때, 한반도에 위치한 고기압 편차가 강해지고, 알류산 지역의 저기압 편차가 두드러지게 나타난다(그림 4-8 참조). 겨울철 알류산 지역에 주로 발달하는 저기압 시스템은 그 위치와 강도에 따라 우리나라 미세먼지 고농도 현상의 지속 일수에 영향을 줄 수 있다. 동서바람의 경우, 한반도 북쪽으로 양의 편차가 나타나는 반면 한반도는 음의 편차가 나타난다. 그리고 남북바람의 경우, 한반도에 양의 값이 뚜렷하다. 이는 겨울철 제트류가 한반도 북쪽을 통해 이동함으로써 한반도 지역은 차고 건조한 북서풍이 약화되고, 풍속이 감소함을 의미한다.



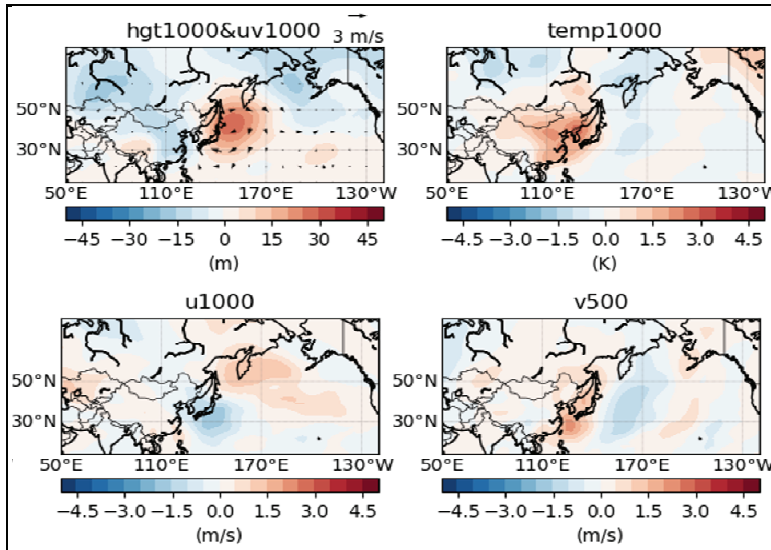
자료: NOAA National Centers for Environmental Information, “NCEP/DOE reanalysis-II”,
 검색일: 2019.7.20. 바탕으로 저자 작성.

〈그림 4-8〉 겨울철 $PM_{2.5}$ 고농도 사례에 대한 500hPa 지위고도, 기온 및 바람의 합성장 분석 결과



자료: NOAA National Centers for Environmental Information, “NCEP/DOE reanalysis-II”,
 검색일: 2019.7.20. 바탕으로 저자 작성.

〈그림 4-9〉 겨울철 $PM_{2.5}$ 고농도 사례에 대한 850hPa 지위고도, 기온 및 바람의 합성장 분석 결과



자료: NOAA National Centers for Environmental Information, “NCEP/DOE reanalysis-II”,
 검색일: 2019.7.20. 바탕으로 저자 작성.

〈그림 4-10〉 겨울철 PM_{2.5} 고농도 사례에 대한 1,000hPa 지위고도, 기온 및 바람의 합성장 분석 결과

다. 고농도 미세먼지 사례 발생과 관련된 기상장의 최근 변화

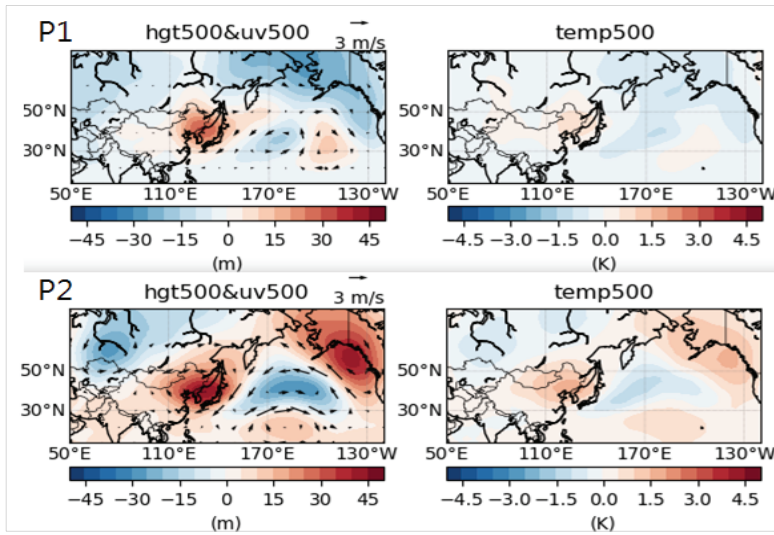
제1절에서 분석한 바와 같이 초미세먼지의 농도 변화 경향에 따라 두 기간(P1: 2004~2012년, P2: 2013~2018년)으로 나누어 동일한 분석을 수행하였다. P1과 P2 기간에 발생한 고농도 사례일수는 각각 604일, 372일이다. 두 기간 동안 발생한 고농도 미세먼지 사례일에 대한 각 기상요소별 합성장 분석 결과는 〈그림 4-11〉~〈그림 4-16〉과 같다. 전반적으로 고농도 사례가 발생하는 대기순환장의 특징은 동일하지만 강도에는 뚜렷한 차이가 있다. 더불어, P1 기간에 비해 P2 기간에 고농도 사례와 관련된 각 변수의 편차값이 크게 나타난다.

지위고도의 경우, 전반기에 비해 후반기에 한반도에 위치한 고기압 편차의 강도가 강해지고, 그 영역도 확장되었다(그림 4-11 참조). 일본 동쪽과 우랄산맥 동쪽에 위치한 저기압 편차의 강도 역시 강화되었다. 일본 동쪽에 나타난 저기압 편차는 고농도 사례가 발생하면 우리나라에 위치한 고기압 편차가 빠져나가지 못하게 하는 일종의 블로킹으로 작용하는데(Lee et al., 2013; Oh et al., 2015), P2 기간의 강도 변화는 최근의 고농도 일수 변화에 영향을 주었을

수 있다(그림 4-3 참조). 그리고 우랄산맥 동쪽에 저기압 편차는 P2 기간에 좀 더 남쪽으로 내려왔고, 그 강도 역시 강화되었다. 이는 우랄블로킹의 약화를 의미한다. 선행연구에 따르면, 우랄블로킹의 약화는 동아시아 지역에 서풍을 약화시키고, 이로 인해 대기가 정체됨으로써 미세먼지 고농도 현상이 발생하기 쉽다고 알려져 있다. 특히 알래스카 지역의 대기패턴 변화가 뚜렷하다. 전반기에는 저기압 편차가 나타나는 반면 후반기에는 고기압 편차가 나타나는데, 이는 상층 고기압이 알래스카 부근에 정체하면 제트기류의 사행이 더욱 깊어지는 것을 유도할 수 있다. 그 결과로 대기 흐름의 정체가 더욱 강화되고, 우리나라에 찬 공기 유입을 막음으로써 우리나라는 비교적 온난한 공기의 영향을 받을 수 있다. 알래스카 부근에 나타난 고기압 편차와 초미세먼지 고농도 현상 사이의 관련성은 향후 추가 연구가 필요하다.

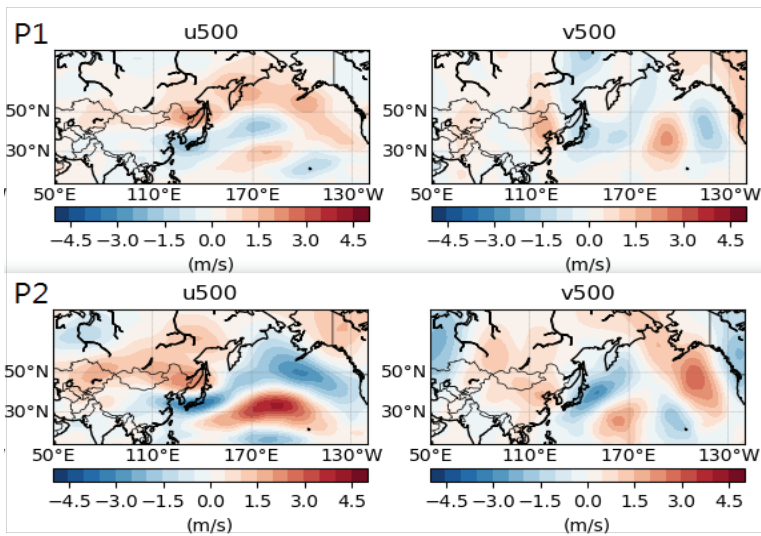
지위고도를 연직적인 관점에서 살펴보았을 때 흥미로운 점은 우리나라에 위치한 고기압 편차가 전반기에는 상대적으로 동쪽으로 더 기울어져 있다는 점이다. 즉, 전반기에는 상대적으로 경압대기에 가까운 한편, 후반기에는 순압대기에 가깝다고 볼 수 있다. 이는 후반기의 고기압 편차와 관련된 대기시스템이 잘 조직화되어 있다고 볼 수 있고, 상대적으로 오염물질의 축적에 용이한 조건임을 의미한다(그림 4-8, 4-10, 4-12 참조).

지위고도의 패턴과 마찬가지로 기온 역시 P2 기간에 한반도에 위치한 양의 편차값이 커지는 반면 동서 바람은 음의 편차값이 커졌다(그림 4-8, 4-9 참조). 즉, 전반기에 비해 후반기에 상대적으로 대기가 안정되어 있음을 나타낸다. 이러한 특징은 후반기에 고농도 현상과 관련된 대기순환장이 고농도 현상 발생에 보다 좋은 조건으로 작용하고 있음을 시사한다.



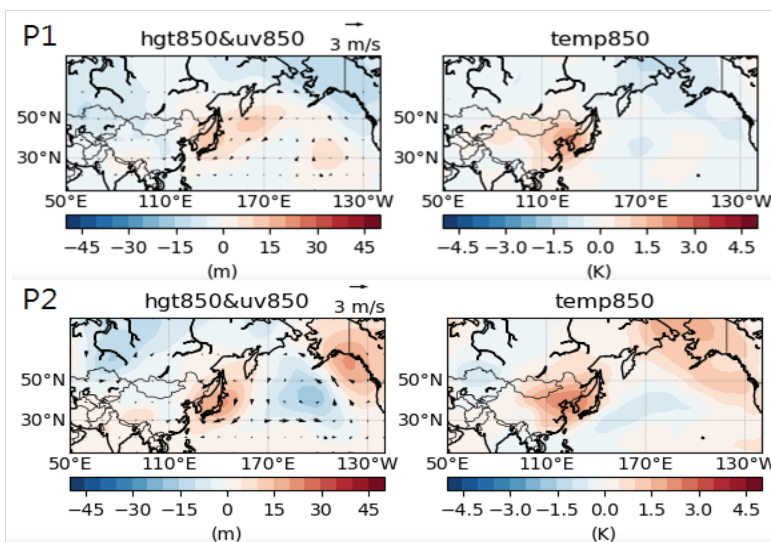
자료: NOAA National Centers for Environmental Information, “NCEP/DOE reanalysis-II”, 검색일: 2019.7.20. 바탕으로 저자 작성.

〈그림 4-11〉 두 기간의 고농도 사례에 대한 500hPa 지위고도 및 바람, 기온 합성장 분석 결과



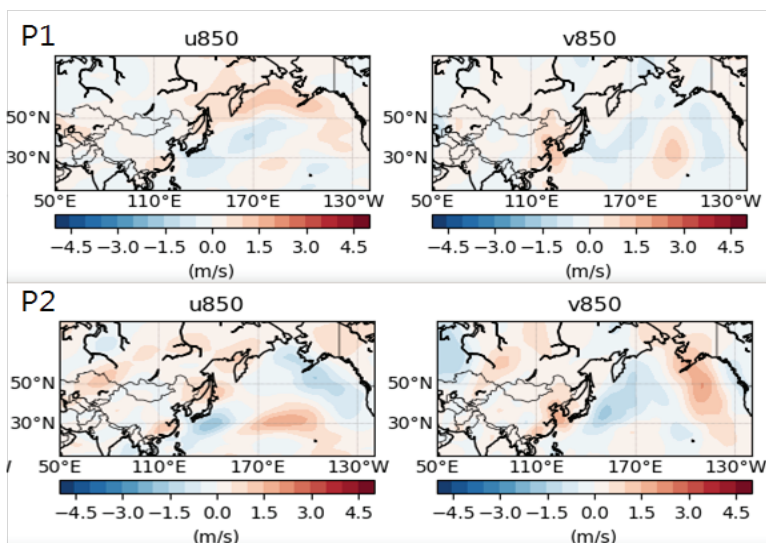
자료: NOAA National Centers for Environmental Information, “NCEP/DOE reanalysis-II”, 검색일: 2019.7.20. 바탕으로 저자 작성.

〈그림 4-12〉 두 기간의 고농도 사례에 대한 500hPa 바람 합성장 분석 결과



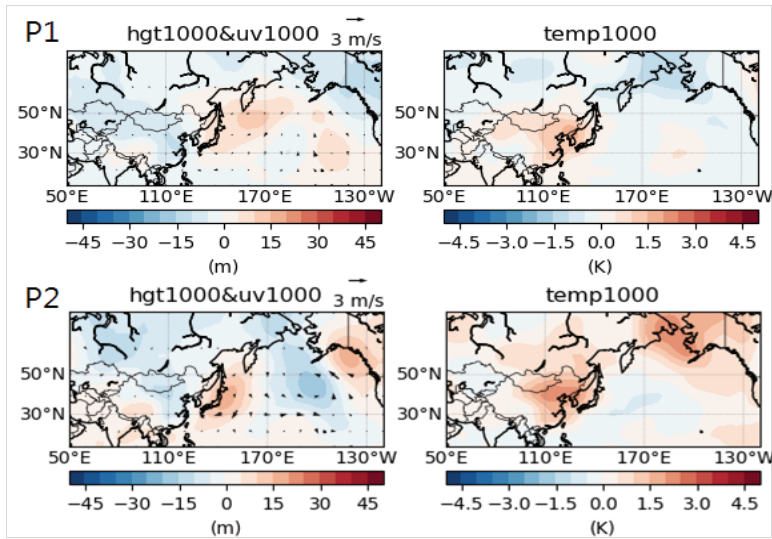
자료: NOAA National Centers for Environmental Information, “NCEP/DOE reanalysis-II”,
 검색일: 2019.7.20. 바탕으로 저자 작성.

〈그림 4-13〉 두 기간의 고농도 사례에 대한 850hPa 지위고도 및 바람, 기온 합성장 분석 결과



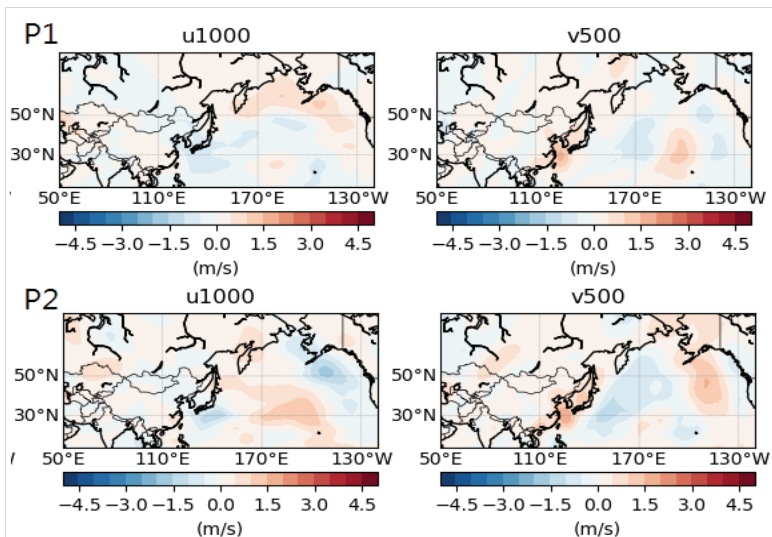
자료: NOAA National Centers for Environmental Information, “NCEP/DOE reanalysis-II”,
 검색일: 2019.7.20. 바탕으로 저자 작성.

〈그림 4-14〉 두 기간의 고농도 사례에 대한 850hPa 바람 합성장 분석 결과



자료: NOAA National Centers for Environmental Information, “NCEP/DOE reanalysis-II”,
 검색일: 2019.7.20. 바탕으로 저자 작성.

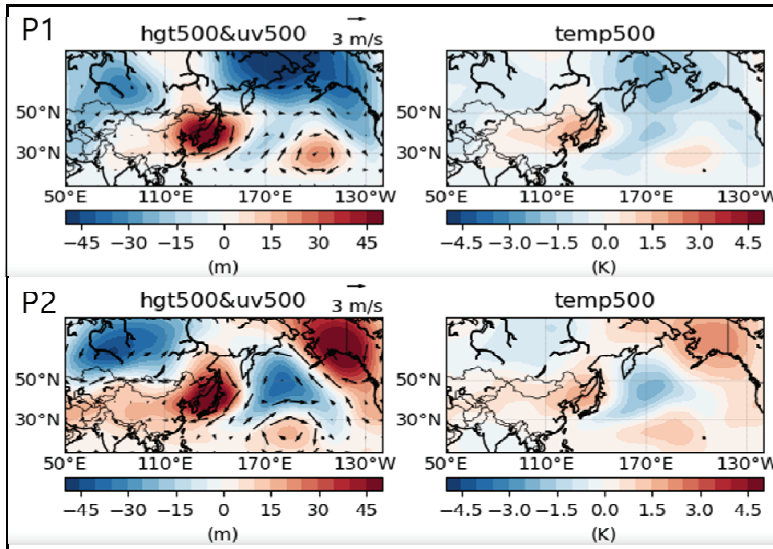
〈그림 4-15〉 두 기간의 고농도 사례에 대한 1,000hPa 지위고도 및 바람, 기온 합성장 분석 결과



자료: NOAA National Centers for Environmental Information, “NCEP/DOE reanalysis-II”,
 검색일: 2019.7.20. 바탕으로 저자 작성.

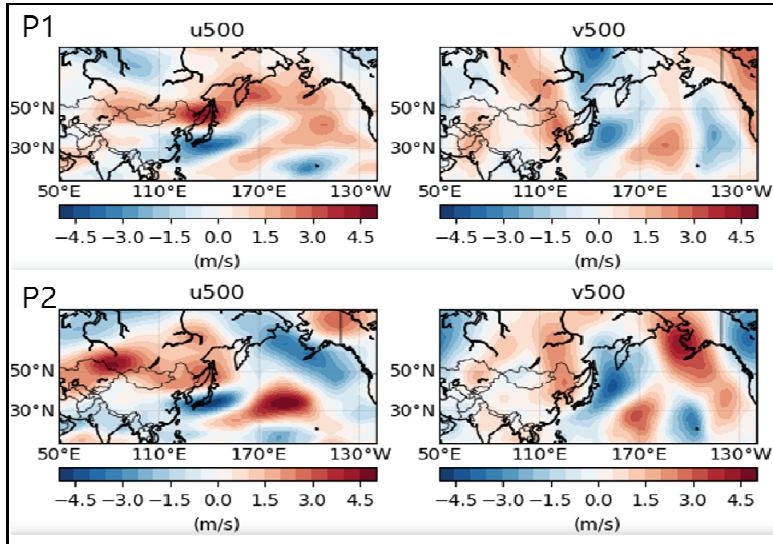
〈그림 4-16〉 두 기간의 고농도 사례에 대한 1,000hPa 바람 합성장 분석 결과

전체 계절에 대한 분석과 동일하게 두 기간(P1: 2004~2012년, P2: 2013~2018년)의 겨울철에 대해서도 살펴보았다. P1과 P2 겨울철 기간에 발생한 고농도 사례일수는 각각 192일(57%), 140일(42%)이다. 전체 계절(P1: 61% vs. P2: 38%)과 비교하였을 때, P2 기간에서 겨울철 고농도 현상 발생일이 증가하였다. 두 기간 동안 발생한 고농도 미세먼지 사례일에 대한 각 기상요소별 합성장 분석 결과는 <그림 4-17>~<그림 4-22>에서 보여 준다. 전반적으로 전체 분석기간을 둘로 나누었을 때와 동일한 대기패턴을 보여 주는 한편 강도가 강화되었다.



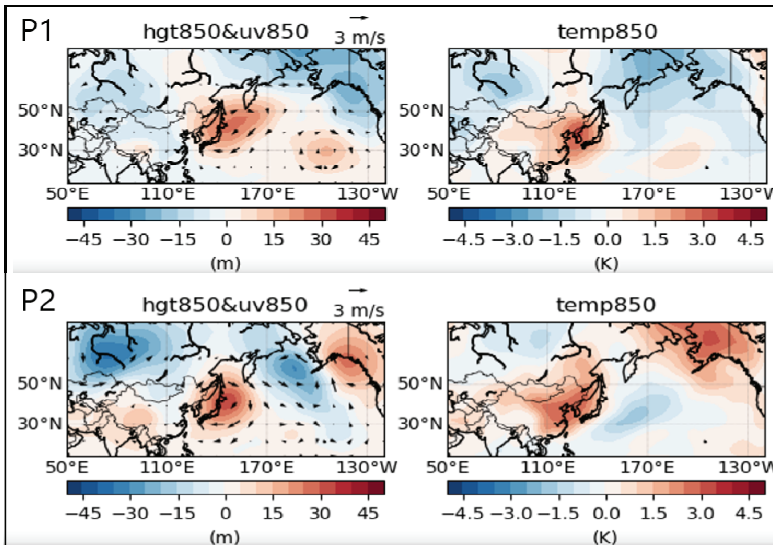
자료: NOAA National Centers for Environmental Information, “NCEP/DOE reanalysis-II”,
검색일: 2019.7.20. 바탕으로 저자 작성.

<그림 4-17> 두 기간의 겨울철 고농도 사례에 대한 500hPa 지위고도 및 바람, 기온 합성장 분석 결과



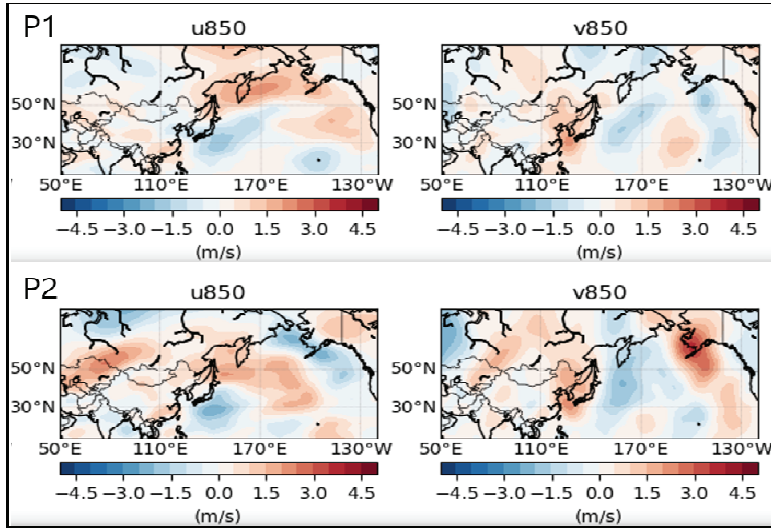
자료: NOAA National Centers for Environmental Information, “NCEP/DOE reanalysis-II”, 검색일: 2019.7.20. 바탕으로 저자 작성.

〈그림 4-18〉 두 기간의 겨울철 고농도 사례에 대한 500hPa 바람 합성장 분석 결과



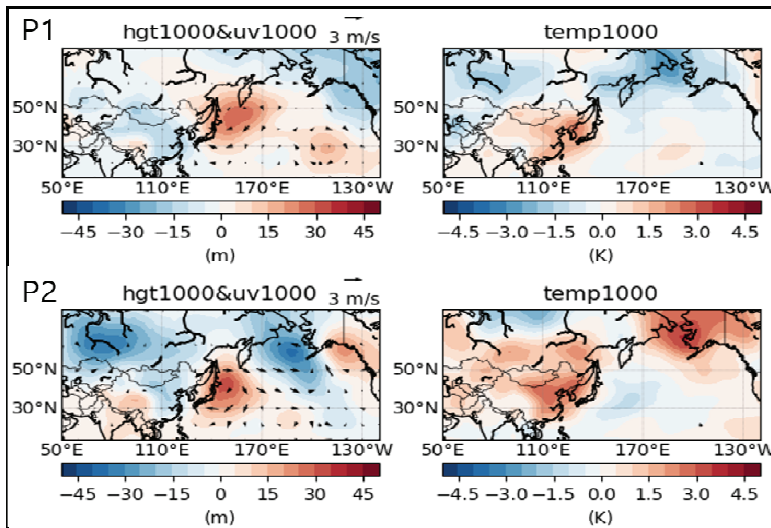
자료: NOAA National Centers for Environmental Information, “NCEP/DOE reanalysis-II”, 검색일: 2019.7.20. 바탕으로 저자 작성.

〈그림 4-19〉 두 기간의 겨울철 고농도 사례에 대한 850hPa 지위고도 및 바람, 기온 합성장 분석 결과



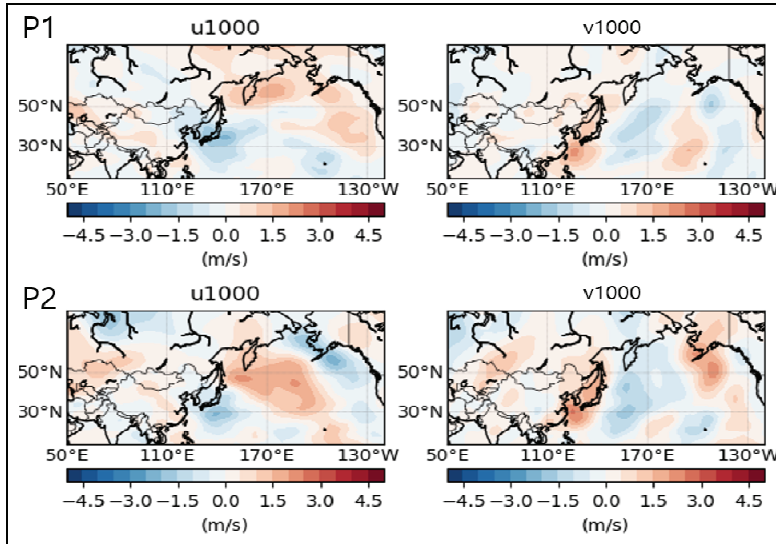
자료: NOAA National Centers for Environmental Information, "NCEP/DOE reanalysis-II", 검색일: 2019.7.20. 바탕으로 저자 작성.

〈그림 4-20〉 두 기간의 겨울철 고농도 사례에 대한 850hPa 바람 합성장 분석 결과



자료: NOAA National Centers for Environmental Information, "NCEP/DOE reanalysis-II", 검색일: 2019.7.20. 바탕으로 저자 작성.

〈그림 4-21〉 두 기간의 겨울철 고농도 사례에 대한 1,000hPa 지위고도 및 바람, 기온 합성장 분석 결과



자료: NOAA National Centers for Environmental Information, "NCEP/DOE reanalysis-II",
검색일: 2019.7.20. 바탕으로 저자 작성.

〈그림 4-22〉 두 기간의 겨울철 고농도 사례에 대한 1,000hPa 바람 합성장 분석 결과

제5장 | 고농도 미세먼지 발생의 미래 변화 추정을 위한 예측지수 개발

1. 초미세먼지 농도 예측 지수 개발을 위한 요인 분석

제4장에서는 재분석자료를 이용하여 초미세먼지 고농도일에 대한 대기순환장의 특징을 살펴보았다. 결과적으로 초미세먼지 고농도 현상과 관련된 일관된 대기순환장적 특성이 있다는 점과, 다른 계절에 비해 겨울철 초미세먼지 고농도 사례의 경우 대기순환장 패턴이 상대적으로 뚜렷하다는 점을 확인하였다. 본 장에서는 이러한 점을 고려하여 겨울철 초미세먼지 고농도 현상과 관련된 대기패턴을 통계적으로 분류하고자 한다. 그리고 더 나아가, 겨울철 초미세먼지 고농도 예측에 활용 가능한 지수(UFI: Ultrafine particulate matter Forecasting Index)를 만들고자 한다.

가. 분석 자료 및 방법

AirKorea에서 제시하고 있는 미세먼지 농도 등급(좋음, 보통, 나쁨, 매우 나쁨)에 따라 대기순환장의 편차 분석을 하였을 때, 농도 등급이 보통인 경우를 제외하고 나머지 등급은 각각 대기순환장적 특성이 뚜렷하다(Hur et al., 2016). 그러므로 UFI를 만들기 위해 제1절과 제2절에서 분석한 2004부터 2018년 기간 동안 초미세먼지 농도가 좋음, 나쁨, 매우 나쁨인 날들에 대한 대기순환장(1,000hPa, 850hPa, 500hPa에서의 지위고도, 기온, 동서 방향 바람, 남북 방향 바람)의 편차값을 사용하였다. 이때, 한반도 초미세먼지 고농도 특성을 잘 반영할 수 있도록 110~140°E, 30~50°N 지역 평균값을 사용하였다.

그리고 우리나라는 지리적인 특성상 중국에서 발생한 오염물질의 장거리 수송 영향을 받을 수 있다. 이러한 영향을 함께 반영하기 위해 2004년부터 2012년 3월까지의 82개 관측소에서

의 API(Air Pollution Index)를 2014년 10월부터 2018년 12월까지 80개 관측소에서의 AQI(Air Quality Index)를 PM₁₀ 농도로 변환하여 사용하였다. API는 일 값이고, AQI는 1시간 간격으로 나오는 결과를 일평균하여 사용하였다. 그리고 중국 각 관측소의 PM₁₀ 농도를 3개의 위도(저위도: 20~30°N, 중위도: 30~40°N, 고위도: 40~50°N)로 나누어 평균하였다.

UFI를 만들기 전에, 본 연구에서는 초미세먼지 농도와 관련된 대기순환장의 요인을 분류하였다. 왜냐하면 본 연구에서 사용하는 대기순환장 변수들은 서로 상관관계를 갖고 있는데, 이러한 변수들을 모두 사용하여 지수화할 경우, 입력변수 간에 다중공산성(multicollinearity) 문제가 발생할 수 있다. 이와 같은 원인에 의해 지수를 만들었을 때 과최적화(over-fitting) 문제를 유발할 수 있다. 따라서 요인 분석을 통해 이러한 문제를 최소화하고자 하였다.

나. 초미세먼지 고농도 발생과 관련된 요인 분석(Factor analysis)

요인 분석은 여러 가지 변수의 상호 관련성을 파악하여 특성이 유사한 요인끼리 묶어주는 방법으로, 자료의 복잡성을 줄이고 정보를 요약하는 데 이용할 수 있으며, 각 변수 간에 존재하는 상호 독립적인 특성을 살펴보는 데 이용한다. 또한 결과의 수치적 해석을 통해 변수의 중요도를 파악할 수 있다.

요인 분석을 위해 앞서 언급한 15개 변수(1,000hPa, 850hPa, 500hPa에서의 지위고도(Z), 기온(T), 동서바람(U), 남북바람(V), 저·중·고위도 중국 PM₁₀ 농도)를 사용하였다(표 5-1). 본 연구에서는 주성분 분석법(Principal component)을 이용하여 주요 요인을 선정하였다. 분석 결과 모두 15개의 요인으로 나뉘는데, 이때 일반적으로 요인의 수는 고유값이 1 이상인 것으로 결정할 수 있다. 따라서 15개의 변수는 4개의 주요 요인으로 나눌 수 있고, 각각 1요인은 38.6%, 2요인은 19.9%, 3요인은 9.0%, 4요인은 7.8%를 설명함으로써 전체 75.4%를 설명한다고 해석할 수 있다. 주요 요인으로 선정된 4개의 요인과 15개의 변수 사이에 성분 행렬을 <표 5-2>에서 보여 준다. 즉 첫 번째 요인은 850hPa 기온(T850)과 가장 높은 관련성이 있고, 이 외에도 500hPa 지위고도(Z500), 기온(T500), 850hPa 남북바람(V850), 1,000hPa 기온(T1000), 남북바람(V1000), 동서바람(U1000), 그리고 중국 고위도 PM₁₀ 농도(China_h_PM₁₀)와 관련성이 있는 것으로 나타났다. 두 번째 요인은 1,000hPa에서 지위고도(Z1000), 850hPa 동서바람(U850), 지위고도(Z850), 세 번째 요인은 500hPa 동서바람

(U500)과 남북바람(V500)과 연관되어 있는 것으로 나타났다. 그리고 마지막 네 번째 요인은 중국의 저위도(China_l_PM₁₀)와 중위도 PM₁₀ 농도(China_m_PM₁₀)와 관련된 것으로 나타났다.

〈표 5-1〉 15개 요인과 설명된 고유값, 분산, 누적 분산

요인	고유값	%분산	누적%
1	5.793	38.623	38.623
2	2.990	19.936	58.559
3	1.356	9.038	67.597
4	1.178	7.856	75.453
5	0.974	6.495	81.948
6	0.805	5.364	87.312
7	0.662	4.413	91.726
8	0.527	3.546	95.242
9	0.434	2.897	98.138
10	0.224	1.490	99.628
11	0.023	0.156	99.784
12	0.018	0.120	99.904
13	0.011	0.070	99.975
14	0.004	0.025	99.999
15	0.000	0.001	100.000

자료: 저자 작성.

〈표 5-2〉 추출된 4가지 요인 성분 행렬

변수	요인 1	요인 2	요인 3	요인 4
T850	0.918	0.167	-0.275	-0.127
Z500	0.893	-0.286	-0.056	-0.219
V850	0.862	0.213	0.218	0.011
T500	0.828	0.022	-0.061	-0.228
T1000	0.822	0.343	-0.296	-0.131
V1000	0.778	0.391	0.110	-0.120
U1000	-0.686	0.510	-0.074	-0.209
China_h_PM ₁₀	0.558	-0.079	-0.053	0.363

〈표 5-2〉의 계속

변수	요인 1	요인 2	요인 3	요인 4
Z1000	-0.063	-0.861	0.351	-0.100
U850	-0.186	0.823	0.230	-0.206
Z850	0.433	-0.761	0.220	-0.176
U500	-0.002	0.453	0.771	-0.092
V500	0.511	0.034	0.536	0.120
China_m_PM10	0.191	0.044	0.092	0.721
China_l_PM10	0.371	0.301	-0.049	0.478

자료: 저자 작성.

이현주 외(2018)에서 제시한 것과 같이 미래 기후에서 초미세먼지 농도 예측을 위해서는 중국 PM₁₀ 농도 자료를 이용할 수 없다는 한계점이 있다. 그러므로 동일한 분석을 대기순환장 자료인 12개 변수만 사용하여 요인 분석을 하였고, 기존 결과와 유사한 결과를 보였다(표 5-3 참조). 즉, 기존의 중국 PM₁₀ 농도를 설명하는 요인 4가 빠진 3개의 주요 요인으로 나눌 수 있고, 각 요인은 기존 결과와 동일하게 나타났다(표 5-4 참조).

〈표 5-3〉 대기순환장 변수만 고려했을 때 12개 성분과 설명된 고유값, 분산, 누적 분산

요인	고유값	%분산	누적%
1	5.391	44.925	44.925
2	2.917	24.306	69.231
3	1.350	11.249	80.480
4	0.996	8.297	88.778
5	0.594	4.950	93.728
6	0.452	3.767	97.495
7	0.241	2.011	99.506
8	0.026	0.219	99.725
9	0.019	0.155	99.880
10	0.011	0.088	99.968
11	0.004	0.031	99.999
12	0.000	0.001	100.000

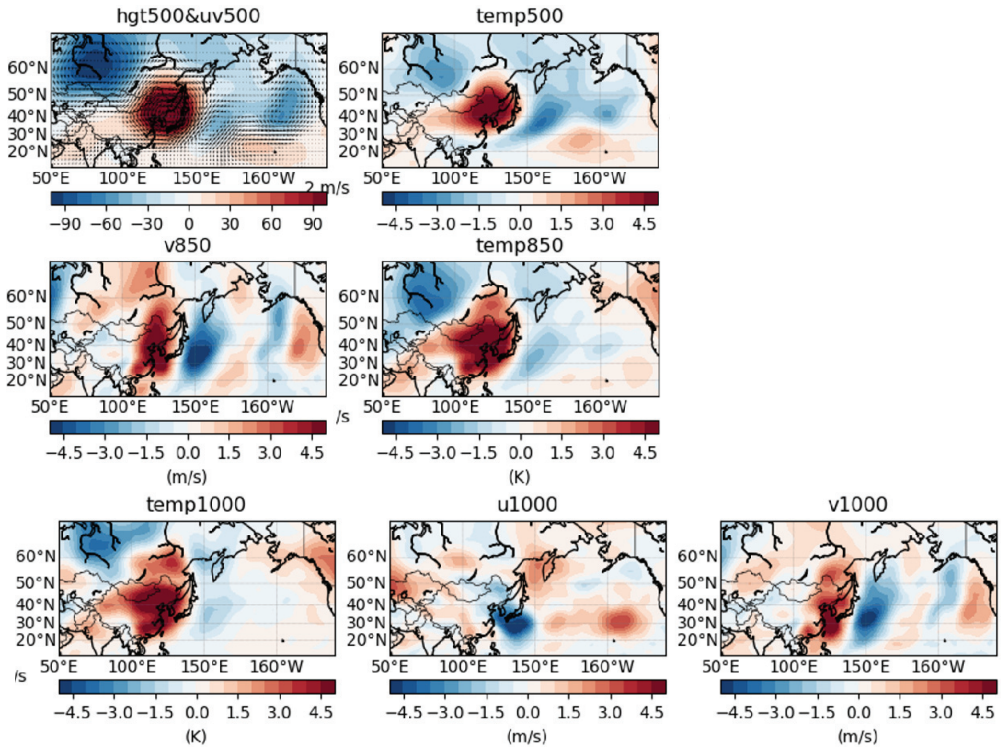
자료: 저자 작성.

〈표 5-4〉 대기순환장 관련 변수 12개만 고려했을 때 추출된 3가지 요인 성분 행렬

변수	요인 1	요인 2	요인 3
T850	0.921	0.186	-0.281
Z500	0.910	-0.266	-0.060
V850	0.860	0.237	0.211
T500	0.847	0.046	-0.073
T1000	0.820	0.359	-0.299
V1000	0.775	0.414	0.106
U1000	-0.690	0.501	-0.067
Z1000	-0.044	-0.865	0.360
U850	-0.201	0.821	0.236
Z850	0.452	-0.756	0.228
U500	-0.002	0.452	0.771
V500	0.513	0.054	0.531

자료: 저자 작성.

실제 선정된 4가지 요인이 어떤 특성을 갖는지 살펴볼 필요가 있다. 그러므로 각 요인별로 상위 10%에 대해 대기순환장 패턴을 살펴보았다.



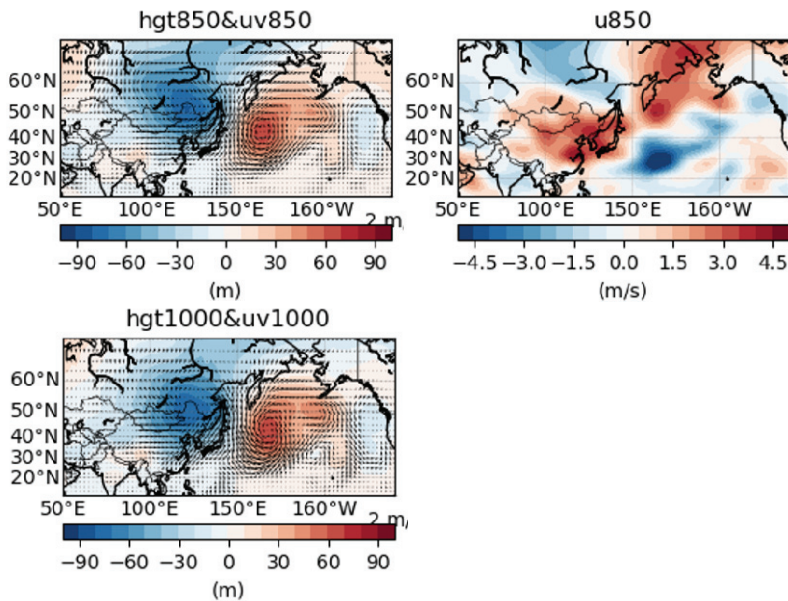
자료: NOAA National Centers for Environmental Information, "NCEP/DOE reanalysis-II",
 검색일: 2019.7.20. 바탕으로 저자 작성.

〈그림 5-1〉 상위 10%의 요인 1에 대한 주요 변수 합성장 분석 결과

요인 1에 대한 상위 10% 경우, 대기순환장은 전형적인 고농도 현상과 관련된 패턴을 보인다(그림 5-1 참조). 우리나라 상층에 강한 고기압 편차가 나타나고 하층을 중심으로 서풍과 북풍 약화로 인한 대기정체가 나타난다. 이로 인해 하층을 중심으로 오염물질이 축적됨으로써 초미세먼지 농도의 증가를 유발한다고 볼 수 있다.

요인 2에 대한 상위 10% 대기순환장 합성장은 우리나라는 저기압 편차 영향권에 놓여 있고, 상대적으로 강한 하층 동서 바람을 보여 준다(그림 5-2 참조). 요인 2의 주요 변수는 아니지만 상층 대기순환장(Z500, U500)도 동일한 패턴을 보인다. 이는 하층부터 상층까지 음의 지위고도 편차가 중국 북부를 포함한 황사 발원지인 몽골 지역까지 확장되어 있고, 상층의 서풍 강화는 황사 발원지에서 상승기류에 의해 대기 상층으로 올라간 오염물질이 서풍류를 타고 한반도

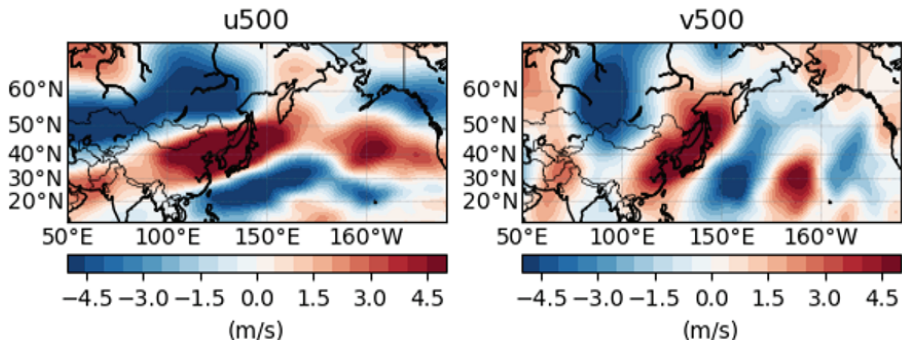
로 이동하는 패턴을 의미한다. 본 연구에서 기상청에서 황사로 보고한 날들을 제거하였지만 실제 황사의 영향과 외부 오염물질의 영향이 함께 포함된 고농도 현상인 날들이었을 가능성이 있다.



자료: NOAA National Centers for Environmental Information, “NCEP/DOE reanalysis-II”,
검색일: 2019.7.20. 바탕으로 저자 작성.

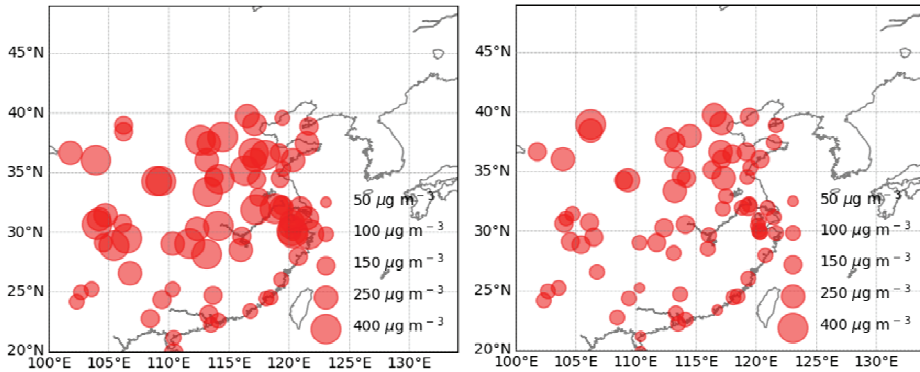
<그림 5-2> 상위 10%의 요인 2에 대한 주요 변수 합성장 분석 결과

요인 3은 상층의 남서풍 계열의 바람으로 인한 초미세먼지 농도 증가를 의미한다(그림 5-3). 상층 지위고도(Z500)을 함께 살펴보면 우리나라 북쪽에 저기압성 회전, 일본에 고기압성 회전이 나타난다. 이로 인해 우리나라는 남서풍 계열의 바람이 분다.



자료: NOAA National Centers for Environmental Information, “NCEP/DOE reanalysis-II”,
검색일: 2019.7.20. 바탕으로 저자 작성.

〈그림 5-3〉 상위 10%의 요인 2에 대한 주요 변수 합성장 분석 결과



자료: 중국 API 및 AQI 자료 바탕으로 저자 작성.

〈그림 5-4〉 상위 10%와 하위 10%의 요인 4에 대한 주요 변수 합성장 분석 결과

요인 4와 관련이 있는 것으로 나타난 중국의 저위도와 중위도 PM₁₀ 농도를 요인 4가 상위 10%일 때와 하위 10%일 때를 나누어 살펴보았다(그림 5-4 참조). 전반적으로 상위 10%일 때 중국 PM₁₀ 농도가 높음을 알 수 있다. 특히 저위도에 비해 중위도 지역의 PM₁₀ 농도가 250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상으로 높음을 알 수 있다.

2. 선정된 요인을 이용하여 구성된 초미세먼지 농도 예측지수

가. 선정된 요인을 입력변수로 만들어진 겨울철 초미세먼지 농도 예측지수(UFI)

앞서 언급한 4가지 요인을 변수로 하여 2004년부터 2018년 겨울철 초미세먼지 농도를 예측하는 다중회귀모형을 구성하였다. 모형을 구성하는 방법을 각 요인을 하나씩 추가하면서 회귀계수를 살펴보았다(표 5-5 참조). 모형 1은 요인 1만을 사용하여 만든 모형이고, 모형 2는 요인 1과 2를 사용하여 만든 모형이다. 그리고 모형 3은 요인 1, 2, 4를 사용하여 만든 모형이다. 요인 3의 경우, 다중회귀 모형에 추가했을 때 R 제곱이 유의하게 증가하지 않았다.

〈표 5-5〉 대기순환장 관련 변수 12개만 고려했을 때 추출된 3가지 요인 성분 행렬

모형	R	R 제곱	추정값의 표준오차
1	0.577	0.332	16.883
2	0.602	0.360	16.526
3	0.613	0.371	16.375

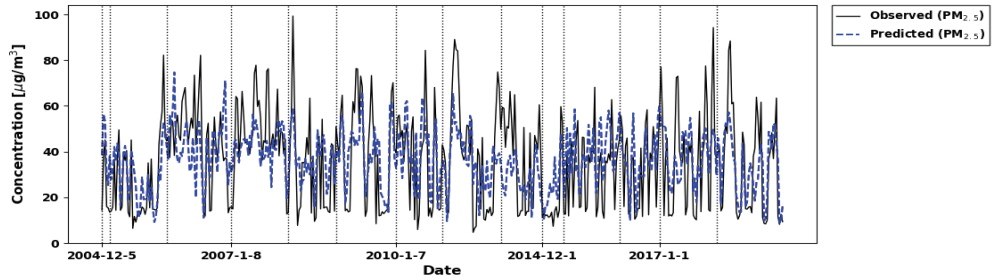
자료: 저자 작성.

〈표 5-6〉 모형 3에 대한 표준화계수와 유의확률

	계수	유의확률
요인 1	0.577	0.000
요인 2	0.171	0.000
요인 4	0.114	0.003

자료: 저자 작성.

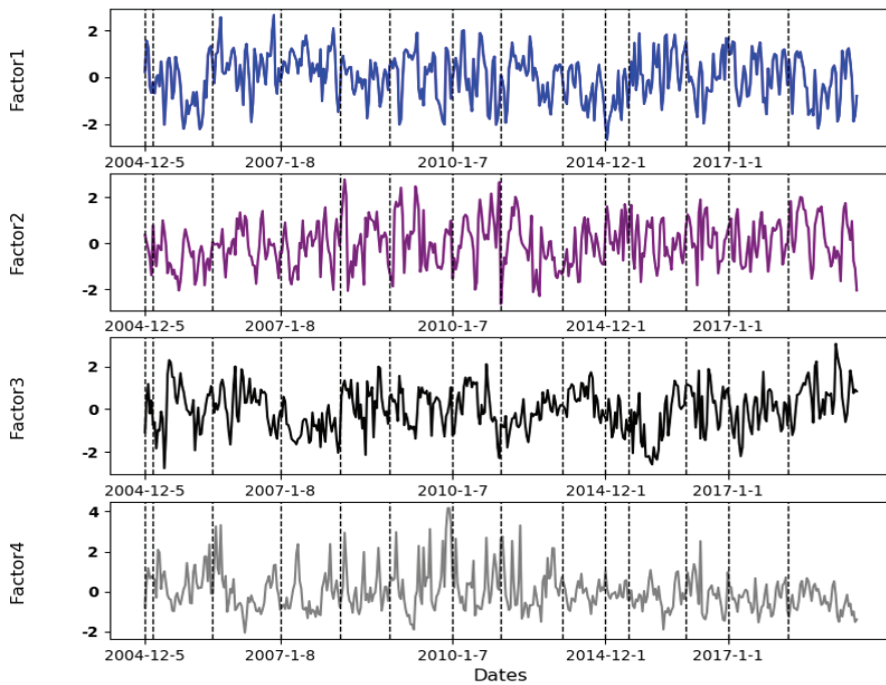
결과적으로 모형 3의 성능이 가장 좋은 것으로 나타났다. 〈표 5-6〉은 모형 3에 대한 각 요인별 계수와 유의확률을 보여 준다. 관측된 초미세먼지 농도와 비교하였을 때 상관계수는 0.613으로, 초미세먼지 농도 일변동의 약 37%를 설명하는 것으로 나타났다. 미세먼지나 초미세먼지 농도는 대기순환장 이외에 배출량 영향을 많이 받는 것으로 알려져 있으므로 일변동의 나머지 부분은 배출량이 설명한다고 볼 수 있다. 이현주 외(2018)에서 개발한 KPI의 경우, 관측된 PM₁₀ 농도와 상관계수가 0.32로 약 10%를 설명하는 것과 비교하였을 때 상대적으로 일변동을 더 많이 설명할 수 있다고 볼 수 있다.



자료: 저자 작성.

〈그림 5-5〉 관측 초미세먼지 농도와 예측된 UFI의 시계열

본 연구를 통해 개발된 UFI가 실제 관측된 PM_{2.5}의 일변동을 잘 보여 줄 수 있는지 시계열 분석을 통해 살펴보았다(그림 5-5 참조). 지수의 특성상 배출량 정보가 빠져 있기 때문에 극값을 잘 맞추지는 못하지만 어느 정도의 경향성은 잘 따라간다고 볼 수 있다.



자료: 저자 작성.

〈그림 5-6〉 각 요인의 시계열

시기에 따른 중요도 변화의 유무를 확인하기 위해 각 요인의 시계열을 살펴보았다(그림 5-6 참조). 요인 1과 2의 경우, 최근 들어 변동성이 감소한 것으로 보인다. 그리고 요인 3은 최근 들어 값이 커지고 있는 반면 요인 4는 값이 작아졌다. 이는 최근에 요인 3의 중요도가 증가했음을 의미하는 한편, 중국 배출량 감소정책으로 인해 요인 4의 값이 작아졌음을 시사한다. 미래 기후에서 각 요인이 조합된 UFI의 지수 변화와 함께 각 요인의 변화를 함께 살펴본다면 어떤 요소의 변화가 초미세먼지 농도 변화에 영향을 주는지 추측하는 데 도움이 될 것이다.

제6장 | 기후변화를 고려한 중장기 미세먼지 관리정책 수립을 위한 국내외 여건 분석

1. 기후변화 관련 현황 및 전망

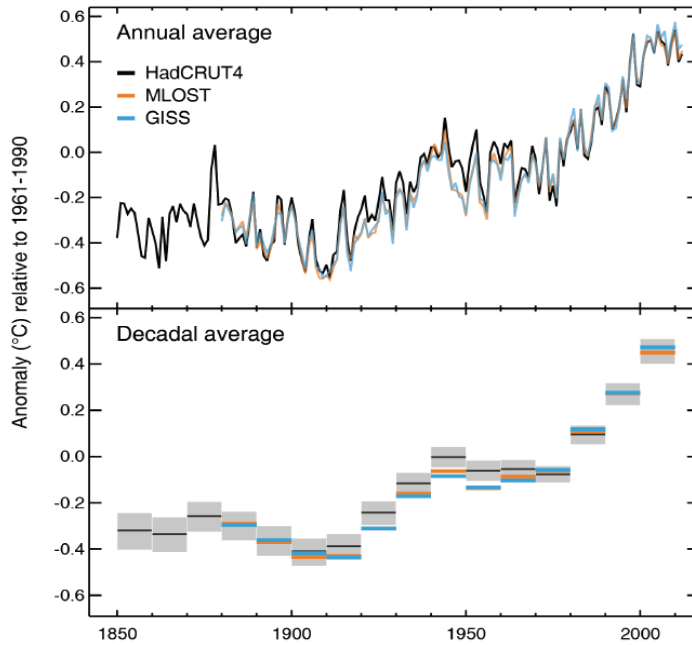
가. 세계 기후변화 현황 및 전망

1) 현황

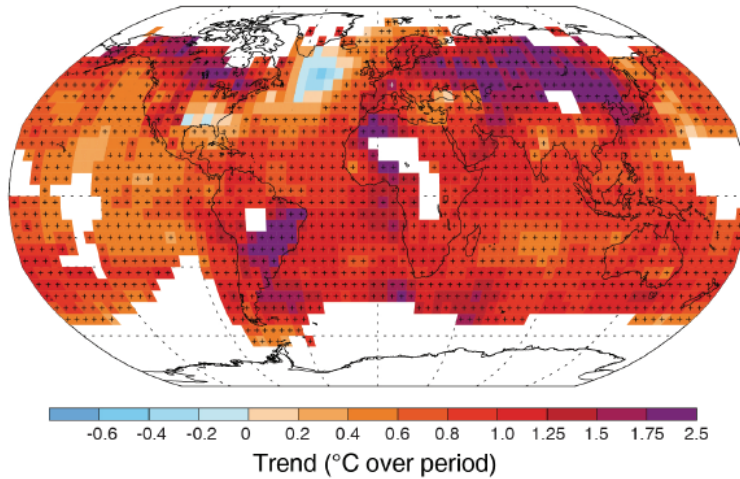
IPCC 제5차 평가보고서(AR5)에 따르면, 지난 133년간(1880~2012년) 지구 평균기온은 0.85℃ 상승했다. 전 세계적으로 빙상과 빙하의 양이 줄고 있으며, 그에 따라 해수면의 높이는 지난 110년간(1901~2010년) 19cm 상승했다. <그림 6-1>과 같이, 평균기온의 상승은 근래 더욱 가속화되고 있다. 지구는 1850년 이래 최근 30년(1983~2012년)이 가장 더웠고, 21세기의 첫 10년은 더 더웠던 것으로 나타났다. 해수면 상승도 더욱 가속화되는 추세로, 해수면 상승률은 1901~2010년에 1.7mm/년인 데 비해 1993~2010년에는 3.2mm/년으로 나타났다. IPCC는 이러한 기후변화의 원인에 대하여 지구 에너지에 불균형을 초래하는 모든 물질·과정이 촉진요인이 될 수 있으며, 특히 대기 중 CO₂ 농도가 주요 원인임을 5차 보고서를 통해 밝혔다.⁶⁾ 온난화와 CO₂ 배출량은 상호비례관계이다. 지구 대기 중 CO₂ 농도는 1750년 산업화가 시작된 이후 화석연료 사용 등 인간활동에 의해 40% 증가하여, 2011년 기준 391ppm 수준이다. 복사강제력(RF)⁷⁾으로 환산하면, 1750년 이후 인간 활동에 의한 전 지구 평균 복사강제력은 2.3W/m²로 나타났다.

6) IPCC(2013).

7) 복사강제력(RF: Radiative Forcing)은 지구-대기 시스템에 출입하는 에너지의 평형을 변화시키는 영향력의 척도로, 양(+)과 음(-)의 복사강제력은 지표면 온도의 상승과 하강을 의미함.



(a) 전 지구 평균기온 변화 경향: 3개의 지표 온도 데이터셋(HadCRUT4, MLOST, GISS)을 이용하여 전 지구의 육지 및 해양 온도를 결합한 평균기온 아노말리를 제시(1961~1990년 평균 기준)



(b) 1901~2012년 전 지구 평균기온 변화: MLOST 시계열의 선형회귀를 이용한 온도의 변화 경향에서 1901~2012년 관측된 온도 변화를 나타냄
 자료: IPCC(2013).

〈그림 6-1〉 전 지구 평균기온의 변화

각국이 기후변화 완화를 위한 정책을 추진하고 있음에도 불구하고, 전 세계 온실가스 총배출량은 2000~2010년에도 크게 증가하였다. 2010년 온실가스 배출량은 연간 49(± 4.5) GtCO₂-eq에 달했다. 화석연료의 연소에 의한 이산화탄소 배출의 증가를 이끈 가장 주요한 요인은 전 세계 경제성장과 인구증가라고 할 수 있으나, 이산화탄소 배출에 대한 경제성장의 기여도는 2000~2010년에 급격히 증가한 반면, 동 기간 인구성장의 기여도는 이전 30년과 거의 비슷한 수준이다.⁸⁾

이러한 기후변화의 영향은 자연계 전반에 포괄적이고 강력하게 나타나고 있다. 다수 지역에서 강수량 변화가 일어났고, 생태계 중 다수의 활동범위, 개체수, 이주패턴 등에 변화가 관찰되었다. 해양 온난화 및 산성화는 해양생물에 대한 영향으로 이어지고 있다. 기후변화의 영향 중 특히 주목받는 것은 극한 기상 및 기후 현상에서의 변화이다. 지구온난화가 진행되면서 극한 저온 현상은 감소하는 반면, 극한 고온 현상은 증가하는 것이 보고되었다. 또한 최근 발생빈도가 증가하고 있는 폭염, 홍수, 가뭄, 태풍 및 산불 등의 극한 기후현상은 현재 기후변동성에 생태계 및 인간계가 매우 취약한 상태로 노출되어 있음을 보여 준다.

2) 전망

IPCC 5차 평가보고서(AR5)에서는 21세기에 걸쳐 나타날 가능성 있는 온실가스 배출 시나리오를 <표 6-1>과 같이 4종의 대표농도 경로(RCP: Representative Concentration Pathways)로 정의했다. 인구, 경제, 기술, 사회제도, 정책 등에 대한 현재의 의사결정과, 이로 인해 잠재적으로 발생할 수 있는 장기적인 기후변화 영향 간의 관계를 담고 있다.

2016년 기준 대기 중 CO₂ 농도는 403.3ppm(국립기상과학원, 2017)으로, RCP2.6은 현재 농도에서 크게 높아지지 않도록 통제하는 것을 가정한 엄격한 완화 시나리오이다. 산업화 이전 대비 지구 기온이 2℃ 이상 상승하지 않도록 하는 것을 목표로 한다. 온난화는 누적 CO₂ 배출량과 관련되므로, <그림 6-2>에서 보이는 바와 같이 초반 수십 년간의 연간배출량이 높다는 것은 후반 수십 년간의 배출량이 낮다는 것을 의미한다.

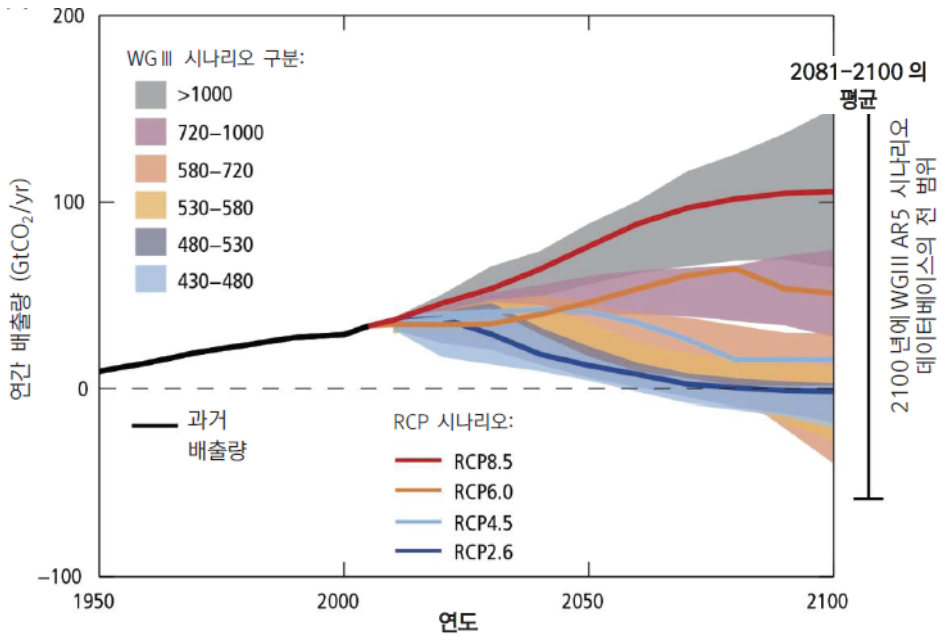
8) IPCC(2013).

〈표 6-1〉 RCP 시나리오

종류	설명	2100년 기준 CO ₂ 농도 (ppm)	온실효과 (W/m ²)	2046~2065년 기온변화 (°C) 평균[범위]	2071~2100년 기온변화 (°C) 평균[범위]
RCP 2.6	지구 스스로 회복 가능할 정도로 인간활동의 영향이 적은 경우	420	2.6	1.0 [0.4-1.6]	1.0 [0.3-1.7]
RCP 4.5	온실가스 저감정책이 상당히 실행되는 경우	540	4.5	1.4 [0.9-2.0]	1.8 [1.1-2.6]
RCP 6.0	온실가스 저감정책이 어느 정도 실현되는 경우	670	6.0	1.3 [0.8-1.8]	2.2 [1.4-3.1]
RCP 8.5	현재 추세(저감 없이)로 온실가스가 배출되는 경우	940	8.5	2.1 [1.4-2.6]	3.7 [2.6-4.8]

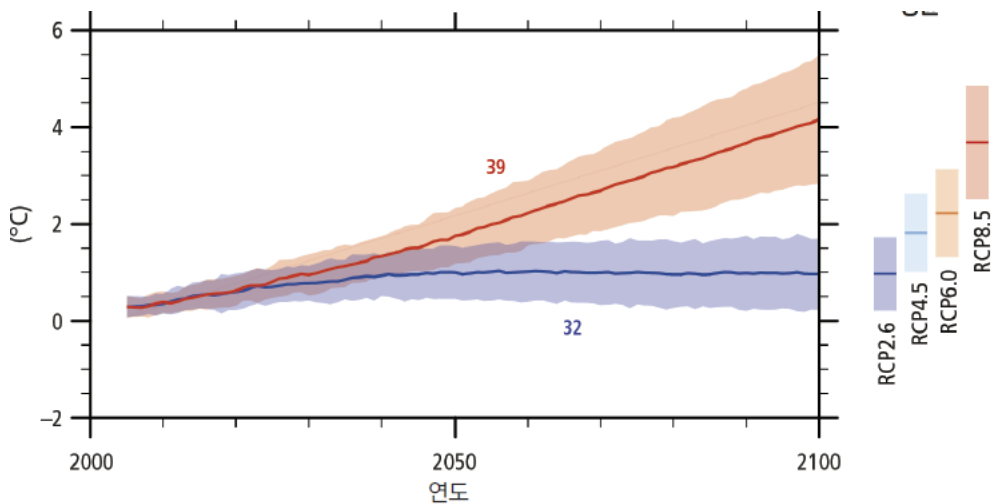
자료: IPCC(2013); 채여라(2017) 바탕으로 저자 재구성.

RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5는 2081~2100년 기준 CO₂ 농도가 각각 540ppm, 670ppm, 940ppm에 이르는 시나리오다. 각 CO₂ 농도 경로에 따른 지구 온도 변화는 〈그림 6-3〉과 같다. 모두 1986~2005년 대비 예상되는 변화를 나타낸다. 시간에 따른 추이를 보면 근미래인 2016~2035년의 평균 지표 온도 변화는 4개 RCP에서 모두 0.3~0.7°C 범위 내에서 비슷하게 나타난다. 그러나 21세기 중반부터는 각 배출 시나리오에 따라 온도 변화가 현저히 달라지기 시작한다. 21세기 후반에 RCP2.6에서는 0.3~1.7°C, RCP4.5에서는 1.1~2.6°C, RCP6.0에서는 1.4~3.1°C, RCP8.5에서는 2.6~4.8°C 상승할 가능성이 높은 것으로 나타난다. 온실가스 감축을 위한 어떠한 노력도 이루어지지 않은 경우의 시나리오인 베이스라인 시나리오의 경로는 RCP6.0과 RCP8.5 사이에 존재한다. 온난화를 산업화 이전 수준 대비 2°C 이내로 제한하기 위해서는 기술적, 경제적, 사회적 및 제도적 측면에서 다양한 경로가 존재할 수 있지만, CO₂ 순 배출량을 거의 0에 수렴시키고, 대기잔류시간이 긴 온실가스들을 금세기 말까지 줄여야 하는 것은 자명한 사실이다. 이러한 급격한 감축은 다양한 측면에서 부수적인 문제들을 초래할 수 있고, 관련 핵심기술이나 추가적 완화수단에 제한이 생길 경우에는 완화비용이 크게 증가하거나 목표 달성이 어려워질 수 있다.



자료: IPCC(2013).

〈그림 6-2〉 RCP 시나리오별 연간 인위적 이산화탄소 배출량



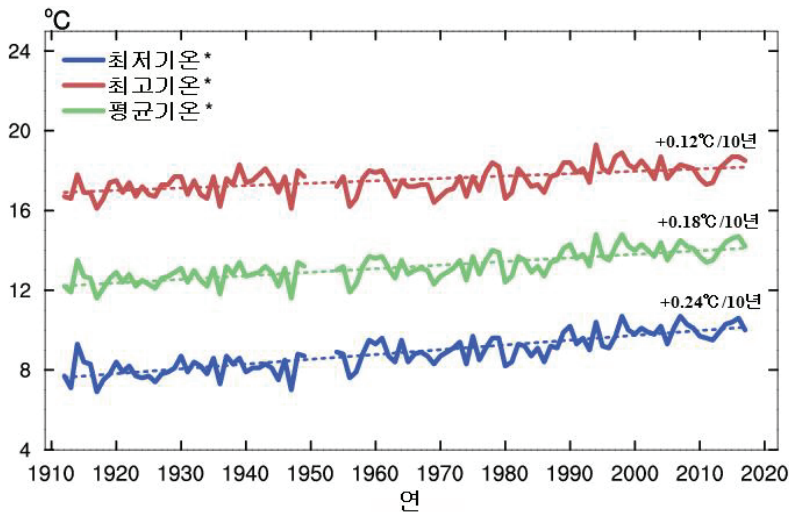
자료: IPCC(2013).

〈그림 6-3〉 RCP 시나리오별 평균 지표온도 변화(1986~2005년 대비)

나. 국내 기후변화 현황 및 전망

1) 현황

관측 결과 지난 106년(1912~2017년)간 우리나라 연평균기온은 1.8℃ 증가하였다. 계절 중에는 겨울과 봄의 기온상승이 가장 뚜렷하였다. 기온 상승에 따라 고온과 관련된 지수인 여름일수, 열대야일수는 증가 추세이며, 저온과 관련된 지수인 서리일수, 결빙일수, 한랭일은 감소 추세를 보이고 있다. 다만, 여름의 평균 최고기온 관련 폭염일과 온난일에는 변화가 보이지 않는다.⁹⁾



자료: 김진욱 외(2018).

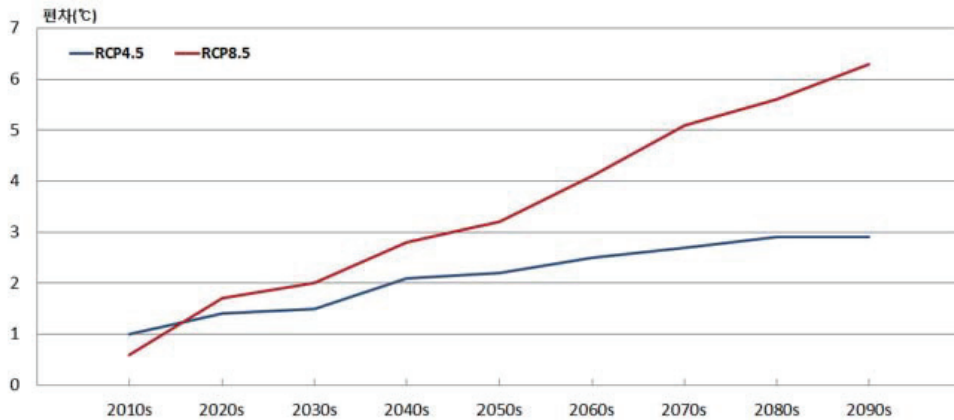
〈그림 6-4〉 연평균 최고, 평균, 최저기온의 변화(2012-2017년)

한반도의 최근 30년간 기온은 20세기 초(1912-1941년)보다 1.4℃ 상승하였다. 평균기온, 최고기온, 최저기온 중 최저기온 상승폭이 가장 컸다. 2010년대(2011-2017년)는 연평균기온이 14.1℃로 역대 가장 높았다. 시기별로 보면 연평균기온은 1830년대와 1990년대 사이에 크게 상승했다.

9) 김진욱 외(2018).

2) 전망

우리나라 72개 관측소에서 30년간 관측한 자료에 근거하여 21세기 한반도의 기후변화를 전망한 ‘한반도 기후변화 전망보고서’(2012)에 따르면, 한반도 평균기온의 시간적 변화는 <그림 6-5>와 같이 예측된다.¹⁰⁾ 한반도 기온은 모든 계절에서 상승하는 것으로 전망되며, RCP8.5 시나리오에서 더욱 뚜렷하게 나타난다. 겨울철과 가을철의 기온상승 경향이 타 계절에 비해 상대적으로 크며, 각각 2030년대, 2050년대 이후 뚜렷한 증가 추세를 보인다. 시나리오별 차이는 겨울철에 최대로 나타나, 겨울철 기온에 대한 전망은 불확실성이 크다.



자료: 기상청(2012).

<그림 6-5> 21세기 한반도 평균기온의 변화

주로 기후 부문만을 다루고 있는 RCP 시나리오와 별도로, 공통사회경제 경로(SSPs: Shared Socioeconomic Pathways) 시나리오를 이용하여 기후정책의 사회경제적 비용 및 효과를 전망하여 비교할 수 있다. SSP 시나리오는 미래 기후변화에 대비하는 수준에 따라 우리나라 경제, 인구, 에너지 사용, 토지 이용 등 사회·경제 지표가 어떻게 변화할지에 대한 정량적 분석을 담고 있다. SSP는 9가지 차원(Dimension), 즉 인구(Demographics), 경제발전(Economic development), 복지(Welfare), 생태요인(Ecological factors), 자원

10) 기상청(2012).

(Resources), 제도 및 거버넌스(Institutions and Governance), 기술발전(Technological development), 광범위한 사회요소(Broader societal factors), 정책(Policies)으로 구성된다. 채여라 외(2017)에서 우리나라 실정을 반영한 공통사회경제 경로(SSP1, 2, 3)와 4개의 RCP 시나리오 매트릭스를 적용하여 우리나라의 기후변화 피해를 경제적으로 산정한 바 있다.

3) 기후변화 관련 국내 주요 법제 및 정책

2010년 제정된 「저탄소 녹색성장 기본법」은 경제와 환경이 조화를 이루는 녹색성장이라는 국가적 이니셔티브를 추진하기 위해 기본법으로 마련되었다. 7개 장, 64개 조항으로 구성되었으며, 기후변화 대응에 있어 전 부문에 광범위하게 적용되는 목표 및 추진방안을 제시하였다는 점에 의의가 있다. 대표적으로 2020년까지 BAU 대비 온실가스 30% 감축이라는 목표가 수립되었고, 이행방안으로 배출권거래제도의 도입을 위한 토대를 만드는 등의 성과를 거두었다. 또한 동 법의 시행령에 따라, 20년을 계획기간으로 하는 기후변화 대응 기본계획을 5년마다 수립·시행하여야 한다.

동 법에 의거하여 2016년 12월 발표된 『제1차 기후변화대응 기본계획』¹¹⁾은 post 2020 신기후체제에 대응하기 위한 우리나라 중장기 기후변화 전략을 담은 첫 번째 종합대책이다. 2017년부터 2036년까지의 기간을 대상으로 하고 있다. 주요 내용은 신재생에너지 보급 및 청정연료 발전 확대, 에너지 효율 향상, 탄소 흡수원 기능 확충, 탄소시장 활용, 10대 기후기술 투자를 확대, 에너지 신산업 적극 육성 등을 담고 있다.

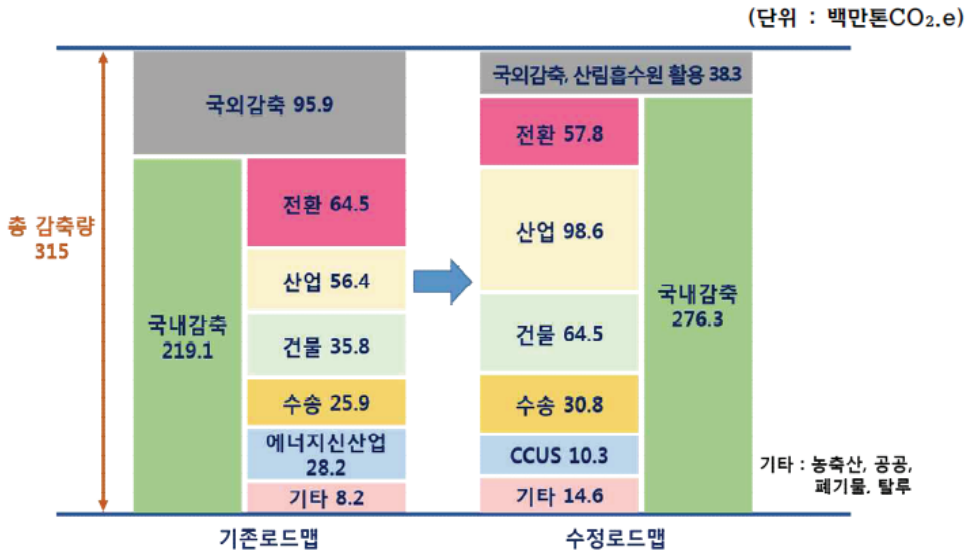
동 기본계획과 함께 확정된 ‘2030 국가 온실가스 감축 기본 로드맵’¹²⁾은 우리나라가 파리협정(Paris Agreement)에서 국제사회에 약속한 ‘2030년까지 국가 온실가스 BAU 대비 37% 감축’ 목표를 효과적으로 달성하기 위한 이행방안을 담고 있다. 기본 로드맵에 따르면 2030년 온실가스 감축량 315만 톤 중 국내에서는 전환(발전), 산업, 건물 등 8개 부문에서 2억 1,900만 톤을 감축하며, 국외에서는 국제시장 메커니즘(IMM)을 통해 9,600만 톤을 감축할 계획이었다. 그러나 로드맵에서 제시한 국외 감축분을 달성하기 위한 수단에 이행 취약점이 지적되고 관련 예산 확보도 쉽지 않음에 따라, 정부는 2018년 7월 국내 부문별 감축량을 늘리고 국외감

11) 관계부처 합동(2016a).

12) 관계부처 합동(2014).

축량을 최소화하는 것을 주요 골자로 하는 ‘2030 국가 온실가스 감축 로드맵 수정안’¹³⁾을 수립·발표하였다.

수정 로드맵에 따르면 전환(발전) 부문 추가감축잠재량 3,410만 톤을 포함하여 국내 온실가스 감축량을 25.7%에서 32.5%까지 높이고, 국외감축과 산림 흡수원 활동 등의 방법으로 나머지 4.5%를 감축하는 내용을 담고 있다. 국내 온실가스 감축계획을 부문별로 살펴보면 <표 6-2>와 같다.



자료: 관계부처 합동(2019).

<그림 6-6> 2030 국가 온실가스 감축 기본 로드맵과 수정 로드맵 비교

13) 관계부처 합동(2018a).

〈표 6-2〉 2030 국가 온실가스 감축 수정 로드맵 부문별 주요 감축량 및 감축수단

부문	감축 목표량 (백만 톤)	주요 감축수단
전환	140.5	· 노후발전소 조기폐쇄 등 발전인프라 개선 · 재생에너지 발전량 비중 제고, 환경급전 도입 등 친환경 발전믹스 강화
산업	98.5	· 공통기기 효율개선 및 공장에너지관리시스템 보급, 공정설비 효율화 등 에너지 이용효율 제고 · 신기술, 혁신기술 개발 및 보급, 고부가제품 전환 · 친환경 공정가스 개발 및 냉매 대체 · 온실가스 저배출 연료 및 원료 대체를 확대, 폐자원 활용
건물	64.5	· 신축 건축물 에너지 기준 강화 · 기존 건축물 그린리모델링 활성화 등 · 신재생에너지 보급 확대 · 건물에너지 정보인프라 구축 및 소비개선 유도
수송	30.8	· 전기차 보급 확대(100만 대→300만 대) · 전기버스 상용화 및 대중교통 운영 확대 · 도로 중심 화물운송체계 개선 등
폐기물	4.5	· 감량화 및 재활용 강화, 매립 최소화, 매립지 메탄가스 회수 등
공공	5.3	· 공공기관 목표관리제 강화 · LED조명·가로등, 재생에너지 설비 보급 확대 · 건축물에너지관리시스템 도입 등
농축산	1.6	· 논물관리 감축기술 개발·보급 · 가축분뇨 에너지화 및 자원화시설 확충 · 양질사료 및 저메탄사료 보급 등
기타	10.3	· 탄소 포집·활용·저장(CCUS) 기술 개발 및 상용화

자료: 관계부처 합동(2018a) 바탕으로 저자 재구성.

2. 국내 미세먼지 정책 현황 및 관련 여건 전망

가. 미세먼지 관련 주요 법제 및 정책

1) 주요 법제

미세먼지 관련 현행 법령은 「환경정책기본법」, 「대기환경보전법」, 「수도권 대기환경개선에 관한 특별법」, 「미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법」이 대표적이다. 먼저 「환경정책기본법」은 대기오염물질의 하나로서 미세먼지의 기준을 제시하고, 배출 저감 및 관리를 위한 방안을 다루고 있다. 미세먼지를 집중적으로 관리하기 위한 내용을 담기보다 환경오염이라는 보다 넓은 관점에서 기본법적으로 접근하고 있다. 그러나 관련 행정계획 수립이나 사업 집행의 범위를 체계화하였으며, 기준초과지역은 특별대책지역으로 고시하여 지방자치단체가 특별종합대책을 수립할 수 있게 하였고, 배출허용기준의 적정성 판단기준이 되는 등 세부법률에서 관리기준을 제시하였다는 점에서 의의가 있다.

「대기환경보전법」은 대기환경 관리기준 등에 대한 보다 세부적인 사항을 담고 있다. 미세먼지와 초미세먼지를 예외 대상으로 규정하고 있으며, 대기환경 관리를 위하여 시·도지사가 오염경보 대상지역을 지정할 수 있게 하였다. 동 법은 미세먼지 및 초미세먼지의 배출허용기준을 별도로 정하고 있지는 않으며, 다만 ‘입자형태의 물질’이라는 구분에서 중금속 등의 화합물, 비산먼지, 매연 등에 대한 배출허용기준을 제시하고 있다. 미세먼지 관련 규제 수단으로는 다음과 같은 규정을 두고 있다.

- 배출가스저감장치 등에 대한 성능유지 검사 의무화
- 기후·생태계변화 유발물질의 관리·처리 방안 마련 의무 부과 및 신고의무 신설
- 신규로 설치되는 석탄화력발전소의 배출허용기준 강화
- 수도권 지역 운행 경유차 배출허용기준에 질소산화물 항목 신설(18년 이후 제작차 대상)

「수도권 대기환경개선에 관한 특별법」은 수도권을 대기관리권역으로 지정하여 추가적인 환경개선 노력을 하고자 하였다. 미세먼지 등 대기오염도를 측정 및 결과를 공개해야 할 의무를

규정하고, 10년마다 미세먼지와 초미세먼지를 줄이기 위한 『수도권 대기환경관리 기본계획』 수립 의무를 규정하였다. 또한 대기관리구역 지역별로 배출원별 대기오염물질 배출허용총량을 정하고 총량관리제를 시행하도록 하였다. 현재 총량제 대상오염물질은 미세먼지 2차생성의 전구물질인 질소산화물과 황산화물이다.

마지막으로, 2018년 8월 제정되어 2019년 2월부터 시행 중인 「미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법」은 미세먼지 및 미세먼지 생성물질의 배출 저감 및 관리에 중점을 두고 있으며, 고농도 미세먼지 빈발에 따라 보다 실효성 있는 미세먼지 대책이 법적 근거에 의해 확립되어야 한다는 필요성에 의해 제정되었다. 주요 내용은 다음과 같다.

- 미세먼지 및 초미세먼지, 전구물질을 정의
- 5년마다 미세먼지 관리 종합계획 및 시행 세부계획을 수립
- 미세먼지 종합정보센터 설치, 미세먼지 보건센터 5년마다 지정
- 자동차 2부제, 공공시설 조업시간 변경 등의 긴급조치 요건 규정
- 대기오염물질 배출시설에 대한 가동률 조정을 요청할 수 있음
- 미세먼지 관리 청정구역을 지정하고 노후경유차 운행 금지 등을 명할 수 있음
- 미세먼지로 인한 건강피해가 우려되는 집단에 대하여 영향조사를 실시할 수 있음
- 미세먼지 민감계층 보호대책을 마련하고, 활동공간의 안전관리기준을 정해야 함
- 미세먼지개선특별회계를 설치하여 관련 재원으로 활용

이러한 규정을 통하여 그간 시범시행 중이던 고농도 미세먼지 비상저감조치에 법적 근거를 제공하게 되었으며, 국가미세먼지정보센터를 설치하여 미세먼지 배출량의 정확한 산정과 정보 신뢰도 제고를 도모하게 되었다.

2) 주요 정책

대기질 관리와 관련한 정부 정책으로는 「대기환경보전법」 제11조에 의하여 10년마다 수립되는 『대기환경개선 종합계획』이 있다. 현재 2차 계획기간(2016-2025)에 있으며, 대기질 개선 목표와 목표 달성을 위한 주요 과제 및 대책을 포괄한다.¹⁴⁾ 대기질뿐 아니라 기후변화 대책

도 함께 다루고 있다. 미세먼지를 중점적으로 다루는 정책은 미세먼지가 사회적 주목을 받기 시작한 2013년 이후부터 발표되었다. 2013년 12월에는 관계부처 합동으로 『미세먼지 종합대책』이 발표되었다. 주로 친환경자동차 확대방안 등 이동오염원에 집중된 대책을 제시하고 있으며, 그 외에도 미세먼지 예·경보제 강화, 사업장 배출허용기준 강화, 한·중·일 국제협력 강화, 친환경 보일러 교체 지원, 대기오염측정망 확충 등을 세부목표로 하고 있다.

이러한 정책적 노력에도 불구하고 국민이 체감하는 미세먼지 오염도가 악화되면서, 2016년 6월 정부는 관계부처 합동으로 『미세먼지 관리 특별대책』을 발표하였다.¹⁵⁾ 기존 『제2차 수도권대기환경기본계획』에서 제시된 미세먼지 농도 목표 $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ 달성시기를 2024년에서 2021년으로 앞당겼다. 2차 생성 전구물질에 대한 관리, 경유차 실도로 배출량 고려, 미세먼지 예·경보 실효성 제고 등을 위한 세부사항을 마련하였다.

〈표 6-3〉 미세먼지 관리 특별대책(2016) 주요 내용

부문	구분	주요 대책
수송 부문	제작차	- 질소산화물 실도로 검사기준 도입 - 경유차 저공해차 기준 휘발유 수준으로 강화
	운행차	- 소유자 리콜 이행 강화 - 운행경유차 매연 배출허용기준 15%→10%로 강화(18~) - 노후경유차 조기폐차, PM·NO _x 동시저감장치 확대 - 노후경유차 운행제한 LEZ 수도권으로 확대 시행방안 마련
	친환경차	- 친환경차 누적 150만 대 보급(~'20) - 공공 친환경차 의무구매 50% - 친환경차 충전기 누적 3,100기 보급(~'20) - 전기·수소버스 보급 확대, BRT 확충
	건설기계 등	- 건설기계 실도로 검사기준 도입 - 건설기계 저공해화 대상 확대(4종)

14) 환경부(2015).

15) 관계부처 합동(2016b).

〈표 6-3〉의 계속

부문	구분	주요 대책
발전 부문	석탄 발전	- 공정률 낮은 석탄발전 9기 중 4기 LNG로 전환, 5기 최고수준 환경관리 - 노후발전소 봄철(3~6월) 가동중단 - 노후발전소 7기 1~3년 조기폐지 - 39기 배출허용기준 현행 대비 2배 강화
	전원 믹스	- 발전연료별 세율체계 사회적 비용 반영방안 검토 - 발전단가 우선 고려에서 환경, 안전 고려로 패러다임 전환
	재생에너지	- 재생에너지 보급 목표 20%로 확대(~'30) - 차세대 기술개발 강화
	사각지대 관리	- B-C유 사용시설 배출기준 강화 - 도서지역 58개 발전소 배출시설 추가 - 고품연료(SRF) 사용시설 입지 제한 및 배출기준 강화
산업 부문	배출부과금	- 다량배출사업장의 배출허용기준 강화 - NO _x 배출부과금 신설
	총량관리	- 수도권 먼지총량제 시범실시('17), 단계적 확대 - 수도권 적용사업장(1~3종) TMS 부착 의무화 - 수도권 외 총량제 대상지역 확대(충청·동남·광양만권)('19)
	사각지대 관리	- 불법행위 집중점검, 실시간감시 - 중소사업장(4,5종) 환경컨설팅 기술지원, 환경개선자금 저리융자 지원 - VOCs 비산배출사업장 시설관리기준 강화
생활 부문	비산먼지	- 도로 오목형 화단 설치 - 도로청소차 2배 확충 - 저마모타이어 기준 마련 - 건축용, 공업용 도료 등의 VOCs 함유기준 강화
	기타생활	- 도시숲 조성 추진, 녹지 늘리기 사업 - 재활용 동네마당, 공동집하장 확충 - 농업잔재물 파쇄, 살포 지원 - 주유소 유증기 회수설비 설치 확대

자료: 관계부처 합동(2016b) 바탕으로 저자 재구성.

2017년 정부가 미세먼지 문제 해결을 국정운영의 최우선 과제로 설정하면서, 같은 해 9월 관계부처 합동으로 『미세먼지 관리 종합대책』이 발표되었다.¹⁶⁾ 여러 번에 걸친 사회적 의견 수렴과정을 통하여 5가지 기본 방향을 설정하였다. 기존 대도시 중심 관리에서 전국 도심지역 중점 관리로 전환하고, 2차생성을 고려한 원인물질의 관리 강화, 인접 국가와의 제도화된 협력 체계 마련, 인체 위해성을 고려한 민감계층 중점보호 실시, 과학적 기반의 미세먼지 대응역량 강화 등이다. 또한 동 대책에서는 2022년까지 미세먼지 30% 저감을 목표로 설정하고, 발전, 산업, 수송, 생활 부문별 집중 감축을 위한 추진과제를 내놓았다. 총량관리 대상지역의 확대, 배출부과금제도 대상물질로 질소산화물 신규 포함 등을 담고 있다. 실현 가능성을 염두에 두고 이러한 주요 감축대책의 시행강도 조절을 통해 배출량을 23.6~31.9% 수준으로 삭감할 수 있는 3가지 시나리오를 제시하였다.

〈표 6-4〉 미세먼지 관리 종합대책(2017) 주요 내용

부문	구분	주요 대책
수송 부문	제작차	- 질소산화물 실도로 검사기준 도입
	운행차	- 운행경유차 매연 배출허용기준 15%→8%로 강화('18~) - 노후경유차 조기폐차 지원물량 확대 - 노후경유차 운행제한 LEZ 충청·동남·광양만권으로 확대('20~)
	친환경차	- 친환경차 누적 200만 대 보급(~'22) - 공공 친환경차 의무구매 70% - 저탄소차협력금제도(안)를 친환경차협력금제도(안)으로 개편 - 친환경차 충전기 누적 10,310기 보급(~'22) - 전기·수소버스 보급 확대, BRT 확충
	건설기계 등	- 건설기계, 경유철도 저공해화 확대 - 이륜차 관리 강화 및 전기이륜차 보급 - 선박연료 황함량기준 강화, 항만 육상전력공급시설 구축

16) 관계부처 합동(2017).

〈표 6-4〉의 계속

부문	구분	주요 대책
발전 부문	석탄 발전	- 공정률 낮은 석탄발전 9기 중 4기 LNG로 전환, 5기 최고수준 환경관리 - 노후발전소 불철(3~6월) 가동중단 - 노후발전소 7기 1~3년 조기폐지 - 39기 배출허용기준 현행 대비 2배 강화
	전원 믹스	- 발전연료별 세율체계 사회적 비용 반영방안 검토 - 발전단가 우선 고려에서 환경, 안전 고려로 패러다임 전환
	재생에너지	- 재생에너지 보급 목표 20%로 확대(~'30) - 차세대 기술개발 강화
	사각지대 관리	- B-C유 사용시설 배출기준 강화 - 도서지역 58개 발전소 배출시설 추가 - 고행연료(SRF) 사용시설 입지 제한 및 배출기준 강화
산업 부문	배출부과금	- 다량배출사업장의 배출허용기준 강화 - NOx 배출부과금 신설
	총량관리	- 수도권 먼지총량제 시범실시('17), 단계적 확대 - 수도권 적용사업장(1~3종) TMS 부착 의무화 - 수도권 외 총량제 대상지역 확대(충청·동남·광양만권)('19)
	사각지대 관리	- 불법행위 집중점검, 실시간감시 - 중소사업장(4,5종) 환경컨설팅 기술지원, 환경개선자금 저리융자 지원 - VOCs 비산배출사업장 시설관리기준 강화
생활 부문	비산먼지	- 도로 오목형 화단 설치 - 도로청소차 2배 확충 - 저마모타이어 기준 마련 - 건축용, 공업용 도로 등의 VOCs 함유기준 강화
	기타생활	- 도시숲 조성 추진, 녹지 늘리기 사업 - 재활용 동네마당, 공동집하장 확충 - 농업잔재물 파쇄, 살포 지원 - 주유소 유증기 회수설비 설치 확대

자료: 관계부처 합동(2017), pp.11-24. 바탕으로 저자 재구성.

인체 위해성이 큰 고농도 미세먼지가 빈발함에 따라, 정부는 2018년 6월 미세먼지 비상대책과 상시대책을 별도로 마련하여 ‘비상·상시 미세먼지 관리 강화대책’¹⁷⁾을 발표하였다. 단기 비상저감조치 시행을 위한 구체화된 계획과 함께, 한층 강화된 상시저감대책도 담았다. 2022년을 목표로 한 미세먼지 감축계획은 종전 30.5%에서 35.8%로 상향 조정되었다.

〈표 6-5〉 비상·상시 미세먼지 관리 강화대책(2018) 주요 내용

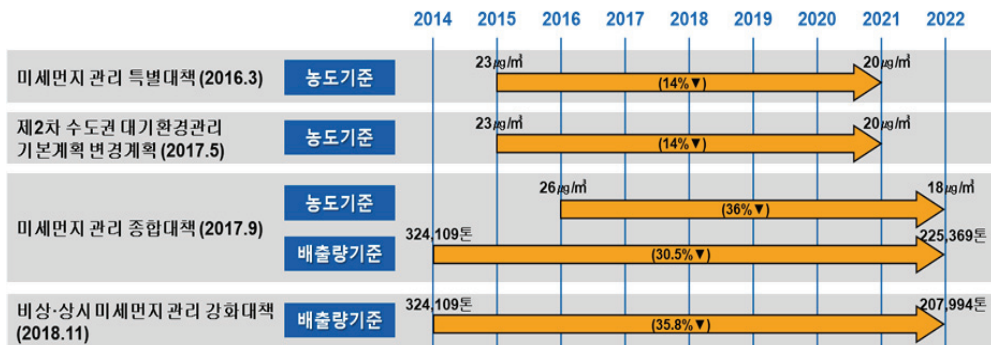
부문	구분	주요 대책
수송 부문	제작차	- 중소형차 질소산화물 실도로 배출허용기준 강화('20~) - 저공해경유차 인정기준 삭제(클린디젤정책 폐기)
	운행차	- 중·대형 노후경유차 폐차보조금 현실화 - 고농도시 배출가스 5등급 경유차 운행제한(수도권 '19~)
	친환경차	- 공공 친환경차 의무구매 100% - LPG 1톤 화물차 신차교체보조금 - 수소버스 보급 확대, BRT 확충
	건설기계 등	- 건설·농업 기계 배출기준 강화 - 항공기 지상전원 공급장치 이용 활성화 - 선박연료 황함량기준 강화, 배출규제해역·저속운항해역 지정
발전 부문	석탄 발전	- 봄철 가동중단 대상 결정 시 실제 미세먼지 배출량을 고려하여 조정 - 야외 저탄장을 단계적으로 옥내화
	전원 믹스	- 연료 부과세율을 유연탄>LNG (2:1)로 조정 - 급전순위 결정 시 환경비용 반영 - 배출량 기반 가동중지
	사각지대 관리	- 도서지역 등유발전시설 배출허용기준 도입 - 바이오중유를 대체 발전연료로 정식 사용
산업 부문	사각지대 관리	- LNG 사용 보일러·발전 시설 NOx 배출기준 강화 - 중소사업장(4,5종) 배출기준 강화와 함께 개선비용 지원('20~) - 방지시설에 IoT 실시간 원격감시 - 유류저장시설 VOC 배출허용기준 단계적 적용 확대
생활 부문	비산먼지	- 건설공사장 분사방식 도장 금지 - 병원·학교 주변 소규모 공사장 신고대상시설로 관리
	기타생활	- 녹지늘리기 사업 - 자연훼손지역 복원사업 - 주유소 유증기 회수설비 설치 의무지역 비수도권으로 확대 - 가정용 저NOx 보일러 보급사업 전국 확대 - 도심 중대형보일러 배출기준 강화

자료: 관계부처 합동(2018b), pp.8-13. 바탕으로 저자 재구성.

17) 관계부처 합동(2018b).

한편, 수도권에서는 「수도권 대기환경개선에 관한 특별법」 제8조에 따라 『수도권 대기환경관리 기본계획』을 10년마다 수립 시행한다. 『2차 수도권 대기환경관리 기본계획』의 계획기간(2015~2024년) 중 ‘미세먼지 관리 특별대책’(2016)이 수립됨에 따라, 동 대책과의 일관성을 확보하고 관련 후속조치를 이행하기 위하여 『제2차 수도권 대기환경관리 기본계획 변경계획』¹⁸⁾을 발표하게 되었다. 변경계획은 미세먼지 저감 대책 추진에 따른 배출 삭감량을 반영하여 지역별 오염물질별 목표배출량을 조정하였다. 또한 에너지원별 상대가격 조정 검토, 저공해차 기준 강화, 고농도 발생 시 비상저감조치 강화, 선박연료기준 강화, 디젤기관차 배출기준 신설, 수도권 외 석탄화력발전소 관리 등을 신규 대책으로 추가하였다.

〈그림 6-7〉은 앞서 설명한 4개 주요 미세먼지 대책의 목표 변화를 보여 준다. 농도 기준으로 설정되었던 미세먼지 저감 목표가 ‘미세먼지 관리 종합대책’부터는 배출량 기준으로 바뀌었다. ‘미세먼지 관리 특별대책’과 『제2차 수도권 대기환경관리 기본계획 변경계획』은 수도권 미세먼지 농도를 2021년까지 2015년 대비 약 14% 줄이겠다는 목표로 동일하며, 이후 배출량 기준으로 30% 감축 목표 발표에 이어 이듬해 35.8%로 더욱 강화된 목표를 내놓았다.



자료: 저자 작성.

〈그림 6-7〉 주요 미세먼지 대책의 목표

18) 환경부(2017).

나. 미세먼지 관련 여건 전망

1) 기존 미세먼지 배출량 전망 리뷰

앞서 살펴본 ‘미세먼지 관리 종합대책’과 ‘비상·상시 미세먼지 관리 강화대책’은 각 대책을 통해 저감 가능한 미세먼지 배출량을 산정하고, 최종적으로 달성할 수 있는 목표배출량을 제시한다. 2018년 11월에 발표된 ‘비상·상시 미세먼지 관리 강화대책’에서는 2022년까지의 부문별 목표 배출량을 이전 계획과 비교하여 <표 6-6>과 같이 제시하였다. 2014년 배출량을 기준으로 2022년까지 총 35.8%를 감축하되, 부문별로는 발전 부문에서 3.6%, 산업 부문에서 19.3%, 수송 부문에서 10.0%, 생활 부문에서 3.0%를 각각 감축하겠다는 계획이다. 제시된 감축량은 각 부문별 SO_x, NO_x 등 대기오염물질 배출량에 전환계수를 곱하여 구한 미세먼지 2차생성분까지 포함된 값이다.

<표 6-6> 미세먼지 관리 종합대책(2017), 비상·상시 미세먼지 관리 강화대책(2018)의 부문별 감축률

부문	기준 배출량 (톤, 2014기준)	미세먼지 관리 종합대책 (기준대비 △30.5%)			비상·상시 미세먼지 관리 강화대책 (기준대비 △35.8%)			최종 감축량 (톤)
		감축량 (톤)	감축률 (%)	배출량 (톤)	추가 감축량 (톤)	추가 감축률 (%)	최종 배출량 (톤)	전체 기준 감축비중 (%)
합계	324,109 (100%)	△98,740	△30.5	225,369 (100%)	△17,375	△5.4%	207,994 (100%)	116,115 (△35.8%)
발전	49,350 (15.2%)	△9,885	△20.5	39,465 (18%)	△1,796	△3.6%	37,669 (18%)	11,681 (△3.6%)
산업	123,284 (38.0%)	△52,791	△42.8	70,493 (31%)	△9,609	△7.8%	60,884 (29%)	62,400 (△19.3%)
수송	90,361 (27.9%)	△27,077	△30.0	63,284 (28%)	△5,282	△5.8%	58,001 (28%)	32,360 (△10.0%)
생활	61,114 (18.9%)	△8,987	△14.7	52,127 (23%)	△688	△1.1%	51,439 (25%)	9,675 (△3.0%)

자료: 관계부처 합동(2018b), p.3.

앞서 설명한 미세먼지 관련 정부 정책들은 2022년까지의 목표배출량만을 제시하고 있다. 보다 장기적으로 전국, 전 부문에 걸친 미세먼지 배출량을 전망한 사례는 현재까지는 2015년 12월에 발표된 『제2차 대기환경개선 종합계획(2016-2025)』이 유일하다. 오염물질별로 2025년까지 예상배출량 대비 30~45%, 2012년 배출량 대비 27~35% 감축을 정책의 기대효과로 제시하고 있다. 사업 시행에 따른 오염물질 배출량 및 감축률은 <표 6-7>과 같다.

<표 6-7> 오염물질별 배출량 전망(~'25)

구분	2012배출량 (천톤)	2025전망배출 (천톤)	2025목표배출 (천톤)	감축률	
				BAU 대비	'12년 대비
PM ₁₀	251,533	260,699	182,134	30%	28%
PM _{2.5}	108,111	113,832	73,884	35%	32%
NO _x	1,108,176	1,210,557	727,067	40%	34%
VOCs	991,515	1,170,493	641,233	45%	35%

자료: 환경부(2015), p.46.

2017년 발표된 『제2차 수도권 대기환경관리 기본계획 변경계획(2015-2024)』은 수도권에 한정되어 있긴 하지만 세부대책별로 저감 가능한 오염물질 배출량을 2024년까지 전망하고 있다. 2013년 발표된 『제2차 수도권 대기환경관리 기본계획(2015-2024)』에서는 2010년 수도권 대기오염물질 배출량 자료를 기준으로 장래배출량을 전망하였으나, 변경계획에서는 2013년 배출량을 기준으로 2024년 배출량을 전망하였다.¹⁹⁾

배출량을 전망하기 위해 먼저 CAPSS의 배출원 대분류 기준에 따라 총 13가지 배출원(에너지산업 연소, 비산업 연소, 제조업 연소, 생산공정, 에너지 수송 및 저장, 유기용제 사용, 도로 이동오염원, 기타 먼 오염원, 폐기물 처리, 농업, 비산먼지, 생물성 연소 등)으로 분류하였다. 그리고 각 부문별 배출량 변화에 영향을 미치는 사회경제적 지표를 선정한 후, 지표들의 변화율을 기준년도 대비 성장률로 전환하였고, 그렇게 계산된 성장계수를 기준년도 배출량에 적용하여 2024년까지의 미래 배출량을 산정하였다. 각 부문별로 전망에 필요한 성장계수를 계산하는 데 사용한 자료는 <표 6-8>과 같이 정리된다.²⁰⁾

19) 환경부(2013); 환경부 수도권대기환경청(2017).

20) 서울연구원(2018).

〈표 6-8〉 배출량 산정 방법

부문	성장계수 계산 자료
에너지산업 연소, 비산업연소, 제조업연소	- 제2차 국가 에너지 기본계획(산업통상자원부, 2014)에서 제시된 '국가 전체 최종에너지 자원별 수요전망', '최종에너지 부문별 수요 전망' - 에너지산업 중 공공·민간·지역 난방시설은 제6,7차 전력수급계획에 따른 지역별, 연도별 설비계획 반영 - 총량대상 사업장은 한국환경공단에서 제공한 사업장별 전망 배출량 적용
생산공정, 유기용제 사용, 농업	- GAINS-Korea II(국립환경과학원, 2015)에서 제시된 전망자료
생물성 연소	- 주로 농촌 지역에서 행해지는 노천소각, 농업 잔재물 소각: 농업 부문과 동일한 성장계수 적용 - 인구수와 더 밀접한 상관이 있는 고기·생선 구이와 숯가마 등: '장래인구추계 시도편: 2013-2040'의 수도권 인구성장률 적용
에너지 수송 및 저장	- 제2차 국가 에너지 기본계획(산업통상자원부, 2014)에서 제시된 부문별 에너지 수요 전망 중 수송 부문의 성장률
폐기물 처리 (소각/기타처리)	- 생활폐기물: '장래인구추계 시도편: 2013-2040년'의 수도권 인구성장률 적용 - 사업장폐기물, 산업폐수처리: '제2차 국가 에너지 기본계획'의 산업 부문 수요전망 적용 - 주거, 상업폐수처리, 매립: '제2차 국가 에너지 기본계획'의 가정/상업 부문 수요전망 적용
기타 면오염원	- 산불 및 화재에 의한 배출량으로서 별도의 성장계수 없이 동일하다고 가정

자료: 서울연구원(2018) 내용을 바탕으로 저자 재정리.

공성용 외(2017)에서는 수도권 대기환경관리 기본계획의 변경계획에 포함된 세부대책을 각각 시행할 때 예상되는 대기오염물질 삭감량을 산정하였다. 단순 식을 통해 계산이 가능한 경우 삭감량을 구하였으며, 효과가 명확하게 입증되지 않은 경우 이행률이나 삭감률에 대한 가정이 도입되기도 하였다. 몇몇 고정오염원 저감대책의 삭감량 산정식을 예시로 들어보면 다음과 같다.

- 저녹스 버너 설치 지원사업

$$\text{삭감량} = \text{저녹스 버너 보급대수(누적)(대)} \times \text{저녹스 버너 교체 시 저감량(톤/년·대)}$$

- 황합유량 0.3% 이하 중유 공급·사용 지역 확대

$$\begin{aligned} \text{삭감량} &= \text{당해연도 BAU} \times \text{삭감계수} \\ \text{삭감계수} &= 1 - (\text{저황유 배출계수} / \text{일반연료 배출계수}) \end{aligned}$$

- 고체연료 사용제한지역 확대

$$\begin{aligned} \text{삭감량} &= \text{당해연도 BAU} \times \text{삭감계수} \\ \text{삭감계수} &= 1 - (\text{친환경연료 배출계수} / \text{무연탄, 유연탄 배출계수}) \end{aligned}$$

- 주유소 유증기 회수시설 설치

$$\begin{aligned} \text{삭감량} &= \text{유증기 회수설비 설치대상 주유소 휘발유 추정 판매량(m}^3\text{)} \\ &\quad \times \text{VOCs 배출계수}(2.391\text{kg/kl}) \times \text{회수율}(90\%) \times 10^{-3} \end{aligned}$$

- 농촌지역 공동집하장 확충

$$\begin{aligned} \text{삭감량} &= \text{농업잔재물 BAU 배출량} \times \text{농촌지역 공동집하장 설치 개소} \\ &\quad \times \text{개소당 삭감률}(0.003\% \text{로 가정}) \end{aligned}$$

- 도로설계기준 강화

$$\text{삭감량} = \text{도로 재비산먼지 BAU(톤/년)} \times \text{삭감률}(5\%) \times \text{이행률}$$

이동오염원 저감대책의 예상삭감량 산정식 예는 다음과 같다.

- 휘발유 및 가스차, 경유차 배출허용기준 강화

$$\begin{aligned} &\{ '15\text{연식 배출허용기준을 적용하는 차량 대수(대)} \times \text{차종별 일일평균주행거리(km/대 \cdot 일)} \times \\ &\quad 365(\text{일/년}) \times ('09\text{연식 복합배출계수} - '15\text{연식 복합배출계수}) \times (1 + \text{냉간시동배출량 환산} \\ &\quad \text{계수}) \times 10^{-6} : \text{경유 차량} \end{aligned}$$

- 노후차 조기폐차

$$\begin{aligned} & \text{최근 3년 이내 조기폐차 차량 대수(대)} \times \text{일일평균주행거리(km/대 \cdot 일)} \\ & \times (\text{경유차 복합배출계수} \times \text{열화계수} - \text{2015년 배출계수})(\text{g/km}) \\ & \times (1 + \text{냉간시동배출량 환산계수}) \times 365(\text{일/년}) \times 10^{-6} \end{aligned}$$

- 노후 건설기계 엔진교체

$$\begin{aligned} & \text{최근 4년간 교체대상 엔진 대수(대)} \times (\text{기존 엔진 적용 배출계수(kg/kwh \cdot 대)} \times \text{열화계수} - \text{교체} \\ & \text{엔진 적용 배출계수(kg/kwh \cdot 대)}) \times \text{평균정격출력(kw)} \times \text{가동시간(h/년)} \\ & \times \text{평균출력비율}(0.48) \times 10^{-3} \end{aligned}$$

위와 같은 방식으로 고정오염원 32개 세부대책과 이동오염원 10개 세부대책에 대하여, 5개 대기오염물질(PM₁₀, PM_{2.5}, NO_x, SO_x, VOCs)의 2024년까지의 연간 삭감량을 전망하고 있다. 추후 전국 단위 데이터가 확보되면 이와 유사한 상향식 방식으로 전국 단위의 삭감량 전망을 만드는 것도 가능할 것으로 생각된다.

전국을 대상으로 일부 부문에 한정하여 장기 대기오염물질 배출량 전망을 한 경우도 있다. 『제8차 전력수급기본계획』은 2030년까지의 발전 부문 미세먼지 배출량 전망을 제시하였다. 동 계획에 따르면, 2030년까지 노후석탄 10기 폐지, 환경설비 개선, 30년 이상 모든 석탄화력 발전소의 봄철 가동중단, LNG 연료전환 등의 대책을 모두 시행할 경우, 발전부문 PM_{2.5} 배출량은 2017년 3만 4,000톤에서 62% 감축한 1만 3,000톤 수준으로 낮아질 것으로 전망된다. 대기오염물질 역시 2017년 17만 4,000톤에서 동일하게 62% 감축한 6만 5,000톤 수준으로 낮아질 전망이다.²¹⁾

그 외 세부대책별로 장기 미세먼지 감축효과를 제시하는 사례가 몇 가지 존재하므로 부문별 미세먼지 배출량 전망 시 참고할 수 있다. 에너지경제연구원은 LPG차 규제 폐지로 인해 2030년까지 질소산화물은 3,941~4,968톤, 미세먼지는 38~48톤 감소할 것으로 내다봤다. 전기차 보급정책과 관련해서는, 2030년까지 전기차 시장점유율 기준으로 3가지 시나리오를 구성하고 수송 부문과 발전 부문에서의 미세먼지 배출량을 분석한 사례가 있다(안상진, 2017). 다만 동 연구에서 전력의 공급구조는 『제7차 전력수급계획』을 따르고 있어, 부문별 전망 후 합치는

21) 산업통상자원부(2017), p.11.

방식으로 장기 배출량 전망을 도출하고자 할 경우, 8차 계획을 이용한 발전 부문 전망과 정합성을 갖지 못한다.

2) 국내 미세먼지 관련 여건 전망

앞서 살펴본 기존 문헌연구를 참고하여 국내 대기오염물질 배출량의 장기 전망을 위해 필요한 사회경제적 지표를 선정하고, 해당 지표의 전망자료를 다음과 같이 정리하였다.

〈표 6-9〉 인구 전망

(단위: 명)

연도	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
인구수	51,780,579	51,905,126	51,926,953	51,629,895	50,855,376	49,574,038	47,744,500

자료: 통계청(2019).

〈표 6-10〉 주요 업종별 성장률

(단위: 조원, 2010년 불변가격)

구분	2017	2030	2040	연평균증가율(%)
농림어업·광업	30.6	33	32.5	0.26
제조업	452.2	585.4	656.8	1.64
- 석유화학·비금속·철강	104.3	128.3	140	1.29
- 조립금속	280.3	375.7	430.4	1.88
SOC(건설업 등)	100.2	117.9	123	0.9
서비스업	827	1191.8	1393.2	2.29

자료: 산업통상자원부(2019).

〈표 6-11〉 부문별 에너지 사용량 전망 (기준수요)²²⁾

(단위: 백만 TOE)

구분	2017	2030	2040	연평균증가율(%)
계	176.0	204.9	211.0	0.8
산업	87.4	107.1	113.3	1.1
가정	22.2	21.9	21.9	-0.1
상업	17.6	22.1	23.9	1.3
공공	6.4	7.6	8.0	1.0
수송	42.5	46.2	43.8	0.1

자료: 산업통상자원부(2019).

3. 국외 미세먼지 관리정책 현황 및 관련 여건 전망

가. 중국

1) 정책 현황

중국 정부는 5년 단위로 대기오염 저감대책을 수립하고 추진하여 왔으며, 현재 시행 중인 저감계획은 ‘국가환경보호 13차 5개년 계획’이 대표적이다. ‘국가환경보호 12차 5개년 계획(2011)’에서는 아황산가스, 질소산화물, 공업분진의 배출량 감축 목표 및 대기질 개선 목표를 설정하고 이를 각 지역별로 할당하여 시행하였다.

이러한 대기오염 저감대책에도 불구하고 극심한 고농도 스모그 현상이 빈발하여 일반인의 건강피해가 우려되면서, 중국 정부는 기존 계획과 별도로 2013년부터 2017년까지의 대기질 개선 목표를 담은 ‘대기오염방지 행동계획’을 발표하고 시행하였다. 대기오염방지 행동계획은 중국 최초로 성 단위가 아닌 광역 차원에서 수립된 대기오염 대책으로, 징진지(베이징·톈진·허베이 등), 창강 삼각주(상하이 등), 주강 삼각주(광둥 등) 등의 지역을 대상으로 한다. PM_{2.5}

22) 기준수요 전망(BAU)은 인구 및 경제 전제하에서 현재의 기술발전, 소비행태 변화, 정책 등이 지속될 경우 예상되는 미래의 에너지 수요 전망치로서, 정부의 추가정책이 없고 소비패턴 등이 그대로 유지된다는 가정하에 실현 가능성이 높은 미래 에너지 수요를 뜻함. 반면 (에너지기본계획에서의) 목표수요는 기준년도(17)에 실행되지 않은 정책과 『제3차 에너지기본계획』에서 새롭게 제시된 정책들이 실현될 경우 예상되는 미래 에너지 수요를 뜻함(제3차 에너지기본계획).

저감에 초점을 맞추어, 전국 285개 도시의 PM_{2.5} 농도를 2012년 대비 10% 이상 감축하는 것을 목표로 하며, 특히 베이징의 연평균 PM_{2.5} 농도를 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 저감하는 것을 목표로 설정하였다. 대기오염방지 행동계획의 주요 조치는 다음과 같다.²³⁾

- ① 오염물질 종합처리능력 강화
- ② 에너지 다소비·오염물질 다량배출 업종 도태 등 산업구조 조정
- ③ 기업 생산기술 발전 가속화 및 에너지절약·환경보호 산업 발전
- ④ 에너지 소비구조 전환 및 청정에너지 확대
- ⑤ 대규모 개발투자사업의 환경 관련 심사 강화 및 환경민감지역 투자 제한
- ⑥ 세제 및 금융 정책 등 환경관리에서의 경제적 수단 및 시장메커니즘 도입
- ⑦ 관련 법규체계 완비 및 중점오염기업 환경정보 공개 등 관리감독 강화
- ⑧ 지방정부 간 협력체계 구축 및 성급 지방정부의 책임제 도입
- ⑨ 모니터링 및 긴급대응 예경보 시스템 구축
- ⑩ 관련 당사자의 책임 명확화 및 국민 참여 유도

2017년 시진핑 국가 주석은 ‘제19차 중국 전국 대표대회’에서 2020년까지 샤오캉사회(중산층 사회) 달성을 천명하며 주요 리스크 예방, 빈곤 퇴치, 오염관리를 강조하였는데, 특히 ‘람천보위전’은 오염관리에서 가장 핵심적인 부분을 차지하고 있다. 2018년 6월 중국 국무원이 발표한 ‘람천보위전 3개년 행동계획’은 오염관리를 위해 다음의 세 가지 목표를 제시하고 있다.²⁴⁾

- ① 2020년까지 전국 SO_x, NO_x, 배출량을 각각 2015년 대비 15% 이상 감축
- ② PM_{2.5} 목표치 미달 도시(지급 이상) 비율을 2015년 대비 18% 이상 감축
- ③ 도시(지급 이상)의 ‘대기질 좋음’ 일수 비율을 2015년 대비 80%까지 상승 / ‘대기질 나쁨’ 일수 비율을 2015년 대비 25% 이상 감소

23) 추장민(2015).

24) 최기철 외(2019).

대기오염 관리를 위한 중국의 환경 법령은 2015년부터 본격 강화되었다. 기본법 성격의 환경보호법이 처음 입법된 이후 24년 만에 개정된 것으로, 지속가능한 발전을 목표로 제시하였다. 2020년까지 중국 내 모든 석탄화력발전소에 초저배출을 위한 방지시설을 설치하도록 하였다. 또한 대기오염방지법을 개정하여, 각 지방정부가 새롭게 강화된 대기환경기준과 배출기준을 달성하도록 법적 근거를 마련하였다. 개정된 법에는 대규모 산업시설에 대기오염 방지설비 설치를 의무화하였고, 비산먼지 및 농업활동에 대한 오염방지 조항이 추가되었으며, 심각한 고농도 오염사례에 대비하여 정부 차원에서 예경보 및 비상대응 체계를 마련하도록 하였다. 동 법을 근거로 현재 배출량 총량 억제, 석탄연료 사용량 감축, 자동차 관리, 위법행위에 대한 처벌 강화 등이 시행되고 있다. 또한 발전, 산업, 생활, 수송 전 분야에 걸쳐 오염물질 배출기준을 강화시켜 왔다. <그림 6-8>과 같이, 철강은 공정별로 세분화시켜 배출기준을 강화하였고, 시멘트 등 대규모 산업시설의 기준을 강화하였다.

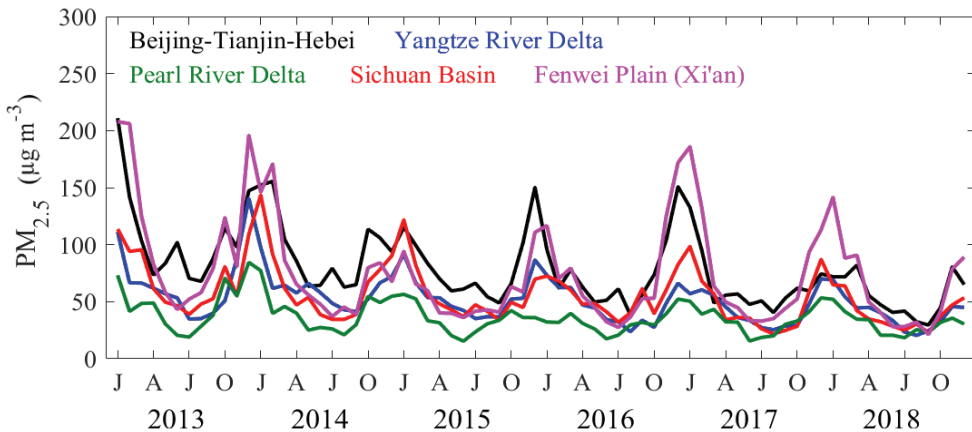
Source sector	Emission source	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	
Power	Thermal power plants	GB 13223-2003			GB 13223-2011			"Ultra-low" emission standard		
		GB 9078-1996	GB 26453-2011							
Industry	Flat glass	GB 9078-1996	GB 26453-2011							
	Sinter	GB 9078-1996			GB 28662-2012					
	Coking	GB 16171-1996			GB 16171-2012					
	Iron	GB 9078-1996			GB 28663-2012					
	Steel making	GB 9078-1996			GB 28664-2012					
	Steel rolling	GB 9078-1996			GB 28665-2012					
	Electronic glass	GB 9078-1996			GB 29495-2013					
	Brick	GB 9078-1996			GB 29620-2013					
	Cement	GB 4915-2004			GB 4915-2013					
	Industrial boiler	GB 13271-2001			GB 13271-2014; Eliminate small coal-fired boilers.					
All	/			Phase out outdated industrial capacity; strengthen emissions standards; phase out small, high-emitting factories; install VOC emission control facilities						
Residential	All	No specific regulations			Replace coal with electricity and natural gas					
Transportation	Light duty gasoline vehicle	Euro 3	Euro 4					Euro 5		
	Heavy duty gasoline vehicle	Euro 3			Euro 4					
	Diesel vehicle	Euro 3			Euro 4			Euro 5		
	All	/			Strengthen emissions standards; retire old vehicles; improve fuel quality					

자료: Zheng et al.(2018).

<그림 6-8> 중국의 오염물질 배출기준 강화 현황

2) 배출량 및 관련 여건 전망

2013년-2018년 기간 동안 중국의 연평균 $PM_{2.5}$ 농도는 30~50%(평균 $5.2\mu g/m^3$) 감소하였다. 특히 베이징은 2017년 2월부터 $PM_{2.5}$ 농도를 100 이하로 유지하고 있으며, 연평균 농도는 $58\mu g/m^3$ 까지 하락하였다. 중국 정부가 대기오염방지 행동계획에서 발표한 대기질 개선 목표를 달성한 것으로 평가된다. 해당 기간 중국의 5대 도시군(징진지, 장강삼각주, 주강삼각주, 쓰촨 분지, 편웨이 평야)의 $PM_{2.5}$ 농도는 <그림 6-9>와 같다.²⁵⁾

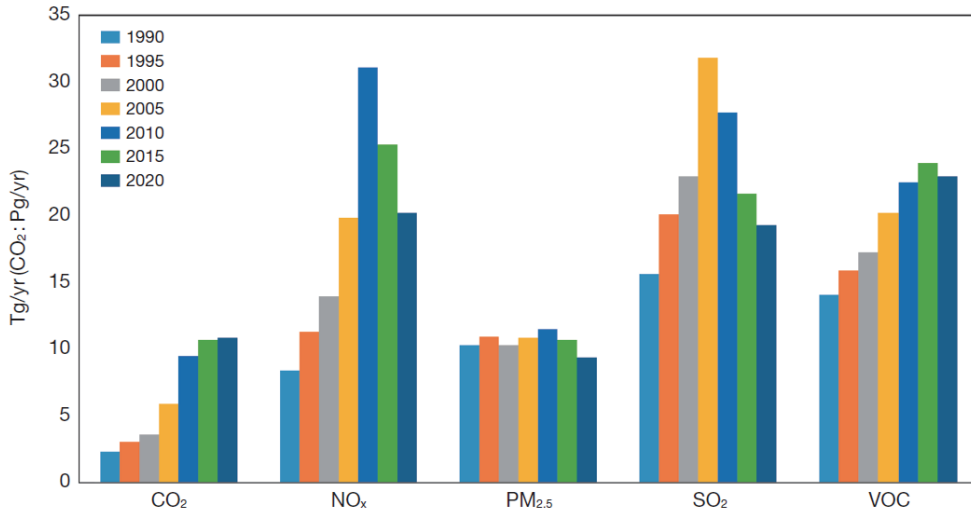


주: CNEMC(China National Environmental Monitoring Center)의 $PM_{2.5}$ 관측자료 기반
자료: Zhai et al.(2019).

<그림 6-9> 중국 5대 도시군 $PM_{2.5}$ 농도 추이

<그림 6-10>은 우정현 외(2018) 연구에서 GAINS 프레임워크의 가장 최신 시나리오인 WEO 2016 시나리오를 이용하여 1990년부터 2020년까지의 5년 단위 연도별 배출량 변화를 나타낸 것이다. CO_2 는 1990년 이후 지속적으로 증가하였지만, 나머지 NO_x , $PM_{2.5}$, SO_x 는 2015년, 2010년, 2005년에 각각 최고점을 기록하고 점차 감소하는 경향을 보였다. CO_2 증가에서 보이듯 연료 사용량이 증가하였음에도 불구하고 다른 오염물질들의 배출량이 감소 추세로 바뀐 것은, 중국 정부가 제11차부터 현재 13차 5개년 계획까지 강력한 오염규제정책을 펼치면서 오염물질 저감기술이 더 많이 적용된 결과인 것으로 추론된다.

25) Zhai et al. (2019).



자료: 우정현 외(2018).

〈그림 6-10〉 중국의 대기오염물질별 배출량 변화

나. 일본

일본의 미세먼지 관리 정책을 정리하고 있는 이수철(2017) 내용 일부를 아래와 같이 요약하여 소개한다. 일본 정부는 2013년 미세먼지가 주요 이슈로 부상하기 이전부터 미세먼지 배출원 인벤토리를 구축하고, 대도시 수송 부문 중심으로 선제적인 저감정책을 추진해 온 것으로 평가된다.²⁶⁾ 1999년 ‘미소입자상 물질의 인체건강영향 조사’ 실시를 시작으로, 2001년 대도시 지역에서 경유차 배출가스 규제를 강화한 No 디젤법 개정을 추진하여 현재 일본 경유차의 비중은 3%대에 머물고 있다. 특히 도쿄도에서는 2008년 PM_{2.5} 배출원별 인벤토리를 작성하여 상세한 미세먼지 배출원 데이터를 바탕으로 효과적인 미세먼지 저감정책을 수립할 수 있었다. 2009년에는 일본 환경성이 축적된 미세먼지 정보를 토대로 PM_{2.5}에 대한 환경기준을 고시하였다. ‘대기환경 상시 감시 매뉴얼’ 개정(2010)을 통해 체계적인 미세먼지 관리방안을 수립하였다. 2011년에는 ‘성분분석 가이드라인’을 마련하고 환경성 내 미세먼지 전문가회의를 설치하는 등 미세먼지 상시 감시체제를 정비하였다. 2013년 2월에는 ‘주의환기를 위한 잠정적인

26) 環境省大気環境課(2014): 이수철(2017)에서 재인용.

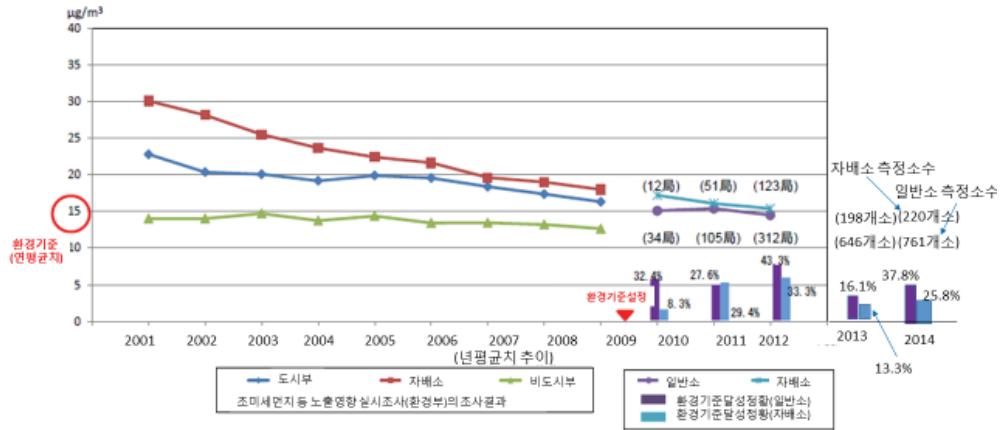
방침'을 책정하여 미세먼지 주의보 발령기준을 설정하였다. 일평균치가 $70\mu\text{g}/\text{m}^3$ 초과가 예상될 경우와 오전 5시~7시 사이의 1시간 수치의 평균치가 $85\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 넘을 경우 주의보를 발령하기로 하였으며, 같은 해 11월 이러한 기준을 한 단계 강화하여 오전 5시~12시 사이 1시간 평균농도가 $80\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과할 경우 주의보를 발령하는 것으로 방침을 설정하였다.

2013년 12월에는 정부 차원의 첫 미세먼지 대책 '미세먼지 종합대책'을 공표하였다. 동 대책은 다음 세 가지 목표를 제시하고 있다. 첫째, 국민에게 적절한 미세먼지 주의 환기를 통한 안전·안심 확보, 둘째, 미세먼지 현상 규명과 감축대책 마련을 통한 환경기준 달성, 셋째, 한·중·일 간 대화와 정책협력을 통한 아시아 지역의 청정한 대기 공유이다. 이러한 목표 달성을 위하여 배출원 데이터 보완, 미세먼지 배출량 예측 및 미세먼지 이동 정보에 대한 과학적 시뮬레이션 모형 구축, 대기환경 모니터링 확충 등을 정책 수단으로 제시하고 있다. 관련하여 환경성 내 '미세먼지 인벤토리 및 발생원 프로파일 책정 검토회'를 설치하고, 미세먼지의 고정 및 이동오염원과 중·소규모 배출원 실태에 대한 파악을 통해 모형 입력자료로 활용할 계획에 있다.²⁷⁾

최근 발표된 '제5차 에너지 기본계획'(2018)에서는 비효율 석탄화력발전소 단계적 폐기 및 재생에너지로의 전환을 포함하고 있어 미세먼지 및 온실가스 배출량 감축을 도모하고 있다.

일본의 미세먼지 농도 및 환경기준 달성 추이는 <그림 6-11>과 같다. 일본의 미세먼지 연평균 농도는 2010년 $17.2\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2014년 $15.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 일본의 환경기준치인 $15.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 근접하고 있다. 이러한 결과는 주로 고정오염원을 대상으로 한 대기오염방지법에 의거한 사업장 대기오염물질 배출규제, 폐기물 소각로 분진 배출규제에 따른 효과로 평가되고 있으며, 자동차 NOx·PM 법에 의거한 디젤차 배기가스 규제 강화에 상당 부분 기인한 것으로 평가되고 있다.

27) 이수철(2017).



- 주: 1) [일반소] 주택지에서 일반 환경 대기오염 상황을 관측하는 측정소
 2) [자배소] 도로 연도에서 자동차 배기가스의 오염 상황을 관측하는 측정소
 3) 2001~2009년도까지는 환경성 측정결과. 2010년 이후 표준 측정법에 의해 도도부현 등에 의한 전국적인 측정이 시작되었다.

자료: 環境省 大氣環境課(2014); 이수철(2017)에서 재인용.

〈그림 6-11〉 일본의 미세먼지 농도 및 환경기준 달성 추이

제7장 | 결론 및 정책 제언

1. 결론 및 요약

본 연구에서는 미세먼지 농도 변화에 영향을 미치는 여러 기상·기후 인자의 변동·변화 경향과 이에 따른 미세먼지 농도 변동·변화에 대한 심도 깊은 분석을 통해 기상·기후 여건과 미세먼지 농도의 관련성을 규명하고, 향후 연구에서 미래 기후변화에 따른 미세먼지 농도 변화를 예측하여 저감 목표배출량을 재산정하고 가능한 배출 저감 시나리오를 작성하여 실효성 있는 중장기 미세먼지 관리대책을 수립하기 위한 근거자료를 마련하기 위해 다음과 같은 세부연구를 수행하였다.

가. 미세먼지 농도 및 기상 여건의 중장기적 변화 분석

미세먼지 농도와 여러 기상요소의 시계열 변화를 분석한 결과 최근(2013년 이후)의 미세먼지 농도 변화 정체 경향은 풍속 약화와 밀접한 관련이 있는 것으로 추정하였다. 이와 같은 관련성은 <표 7-1>과 같이 정리할 수 있다.

<표 7-1> 3개 기간별 (초)미세먼지 농도, 풍속, 기온의 변화 경향

	P0 기간('01~'06)	P1 기간('07~'12)	P2 기간('13~'18)
(초)미세먼지 농도	급격한 감소	감소 경향	변화 정체 경향
풍속	변동폭 큼	변화 정체 경향	감소 경향 뚜렷
기온	변화 정체 경향	감소 경향	증가 경향

자료: 저자 작성.

나. 연평균 미세먼지 농도에 대한 기상 기여도 분석

미세먼지 농도에 미치는 배출량의 영향을 제거하고 기상의 영향만을 평가하기 위하여 대표연도에 대하여 배출량 고정 모델링을 수행하였다. 모델링 수행 결과 동일한 배출량일 때 초미세먼지 농도는 최대 26~27%($25\mu\text{g}/\text{m}^3$ 기준으로 약 $6.5\mu\text{g}/\text{m}^3$) 폭으로 변동하였다. 본 연구에서 산출된 이 결과를 해석할 때는 약간의 주의가 필요하다. 배출량 고정 모델링 시 배출 입력자료가 고정되었을 뿐, 입력되지 않은 것은 아니기 때문에 26~27%라는 수치를 배출의 영향이 전혀 없는 순수한 기상의 영향(기여도)으로 해석하는 데는 오류가 있다. 이 수치는 순수한 기상만의 기여도가 아니라, 동일한 배출조건에서 기상의 변화만으로 최대 높아지거나 낮아질 수 있는 농도 비중이라 해석하는 것이 적절할 것이다. 또한 이번 연구 결과는 몇몇 해를 선별하여 모델링한 결과로서, 후속 연구에서 연속된 장기간에 대해 모델링하여 결과를 검증하는 작업이 필요하다.

상술한 해석의 주의점과 불확실성을 고려할 때 현 단계에서 단언하기 조심스러운 부분이 있긴 하지만, 26~27%($25\mu\text{g}/\text{m}^3$ 기준으로 약 $6.5\mu\text{g}/\text{m}^3$)라는 값은 현행 정책에서 감소시키고자 하는 농도 저감 목표수치에 상당히 근접한 값이다. 이는 계획대로 배출량을 저감시킨다 하더라도 악화된 기상조건에 의해 농도 감소가 거의 없을 수도 있다는 의미이다. 더구나 최근 대상기간인 2018년은 상당히 기상 여건이 좋은 해였으므로 향후 정책 수립 시 2018년을 기준으로 한다면 상당히 강화된 배출 감축 목표 설정이 필요할 것으로 판단된다.

다. 고농도 미세먼지 발생에 대한 기상·기후 영향 분석

최근 지속기간이 길고 농도가 높은(대기정체의 영향을 많이 받는) 고농도 사례가 증가하는 경향을 나타내는 것으로 분석되었다. 한반도 주변 지역에서의 기상영향을 입체적·광역적으로 파악하기 위해 전 지구 규모 재분석 기상자료를 분석한 결과 시베리아 고기압이 약화됨에 따라 남한 지역의 북서계절풍이 약화되고, 한반도 지역 상층의 고기압이 강화됨에 따라 하강 기류가 강화되어 한반도 대기가 안정한 상태일 때 고농도 사례가 발생하는 것으로 분석되었다. 기간을 구분하여 분석한 결과 최근 알래스카 및 베링해 동쪽 지역의 기온 및 기압이 상승하면서 형성된 정체성 고기압이 한반도 부근의 대기정체를 유발하여 농도 상승 지속 장기화에 기여했을 것으로 추정되나 이에 대해서는 후속연구를 통해 보다 명확한 분석이 필요하다.

라. 고농도 미세먼지 발생의 미래 변화 추정을 위한 예측지수 개발

미래 기후에서의 미세먼지 대기질 변화 예측을 위해 요인 분석 방법을 이용하여 미세먼지 예측지수를 개발하였다. 개발된 예측지수를 UFI라 명명하였으며, 이 지수는 선행연구의 지수에 비해 보다 다양한 관련 기상변수를 반영하여 미세먼지 농도에 대한 설명력이 증가한 것으로 평가한다. 향후 후속연구에서 이 지수를 이용하여 미래 기후에서의 미세먼지 대기질을 예측하고자 한다.

마. 기후변화를 고려한 중장기 미세먼지 관리정책 수립을 위한 국내외 여건 분석

부문별 배출 시나리오 작성을 위해 국내외의 다양한 관련 정책을 조사하였다. 2차년도 이후의 연구에서 1차년도에 조사된 관련 정책을 반영하여 부문별 저감 배출량을 산정하고, 대기질 예측 모델링을 위한 배출량 입력자료로 활용할 예정이다.

2. 정책 제언

본 연구에서는 다양한 기상·기후 및 미세먼지 대기질과 관련된 관측자료 분석과 대기확산모델링을 통해 미세먼지 대기질과 기상·기후가 어떻게 밀접한 관련성을 갖는지 분석하였다. 본 연구의 결과를 고려할 때 미세먼지 대기질에 대한 기상·기후의 영향을 전혀 고려하지 못하고 있는 현재의 미세먼지 관리대책은 시급히 보완되어야 할 것으로 판단된다. 2018년 ‘비상·상시 미세먼지 관리 강화대책’ 수립과 2019년 「미세먼지 특별법」 시행 등 최근의 미세먼지 대기 관리대책은 연평균 미세먼지 농도로 개선 정도를 파악할 수 있는 상시적인 대기질과 고농도 미세먼지 사례 발생의 빈도 및 지속기간 등으로 파악할 수 있는 비상시적 대기질을 구분하여 접근하고 있다. 이는 꾸준한 대책 이행으로 인해 연평균 미세먼지 농도가 개선되었다 하더라도 일시적으로 악화된 기상 여건에 의해 언제든지 고농도 미세먼지 사례가 발생할 수 있다는 문제 의식에서 비롯된 정책 변화 결과이다. 올해 3월에 발생하였던 유례없이 지속기간이 길고 높은 농도를 보였던 고농도 미세먼지 사례는 변화된 기상 여건에 의해 상시적 대기질 개선에도 불구하고 심각한 비상시적 대기질 현상이 발생할 수 있음을 보여 주는 단적인 예이다. 고농도 미세

먼지는 국민적 관심사인 만큼 연평균 미세먼지 농도의 감소만을 목표로 하지 말고 변화된 기후 여건에 따라 비상시적 상황 발생이 더욱 잦아질 수 있음을 고려하여 더욱 강화된 배출 감축 목표를 설정해야 할 것으로 판단된다. 본 연구에서 예비 산정된 미세먼지 농도에 대한 기상 기여도 분석 결과는 배출 감축 목표의 강화 정도를 판단하는 데 중요한 근거자료가 될 수 있을 것으로 기대한다.

❖ 참고문헌 ❖

[국내문헌]

- 공성용 외(2017), 「제2차 수도권 대기환경관리 기본계획 변경(안) 마련을 위한 대책별 삭감량 산정연구」, 환경부 수도권대기환경청.
- 관계부처 합동(2014), 「국가 온실가스 감축목표 달성을 위한 로드맵」.
- 관계부처 합동(2016a), 「제1차 기후변화대응 기본계획」.
- 관계부처 합동(2016b), 「미세먼지 관리 특별대책」.
- 관계부처 합동(2017), 「미세먼지 관리 종합대책」.
- 관계부처 합동(2018a), 「2030년 국가 온실가스 감축목표 달성을 위한 기본 로드맵 수정안」.
- 관계부처 합동(2018b), 「비상·상시 미세먼지 관리 강화대책」.
- 관계부처 합동(2019), 「제2차 기후변화대응 기본계획」, p.18.
- 국립기상과학원(2017), 「2017 지구대기감시 보고서」, p.25.
- 기상청(2012), 「한반도 기후변화 전망보고서」, p.89.
- 김진욱 외(2018), 「한반도 100년의 기후변화」, 국립기상과학원, p.7.
- 박록진 외(2016), 「메가시티 오염 발생 메카니즘 규명을 위한 국제관측 캠페인(II) : 대도시 대기 오염 규명 및 국내 배출량 검증을 위한 모델링 분야」, 국립환경과학원.
- 산업통상자원부(2017), 「제8차 전력수급기본계획」, p.11.
- 산업통상자원부(2019), 「제3차 에너지기본계획」.
- 서울연구원(2018), 「2차 수도권대기환경관리 기본계획 변경에 따른 서울특별시 시행계획 변경 수립」.
- 서울특별시 보건환경연구원(2018), 「2017년 서울 대기질 평가 보고서」, p.75.
- 안상진(2017), 「대기오염을 유발하는 전기차의 역설: 전기차 보급 및 전력수급 정책의 고려사항」, Issue Paper, 한국과학기술기획평가원, pp. 9-13.
- 우정현 외(2018), 「중국 대기오염물질 배출의 시공간적 변화 분석」, 「한국대기환경학회지」, 34(1).
- 이수철(2017), 「일본의 미세먼지 대책과 미세먼지 저감을 위한 한중일 협력」, 자원.환경경제연구,

26(1).

이현주 외(2018), “한반도 미세먼지 발생과 연관된 대기패턴 그리고 미래 전망”, *Journal of Climate Change Research*, 9(4), pp.423-433.

채여라 외(2017), 「IPCC 신시나리오 체계를 적용한 우리나라 기후변화의 피해비용 분석」, 한국환경정책·평가연구원.

최기철 외(2019), 「대기관리 정책 분석 및 한중 협력 강화 방안」, 한국환경정책평가연구원.

최기철 외(2018), “대기질 예보 시스템의 입력 배출목록에 따른 PM_{2.5} 모의 성능 평가: 중국 및 한국을 중심으로”, 「한국대기환경학회지」, 34(2), 한국대기환경학회, p.308.

추장민(2015), “중국의 대기오염 저감대책 최근 동향”, Policy & Issues/기획특집, 환경보전협회.

통계청(2019), “장래인구특별추계: 2017~2067년”.

환경부(2013), 「2차 수도권 대기환경관리 기본계획」.

환경부(2015), 「제2차 대기환경개선 종합계획(2015-2024)」.

환경부(2017), 「2차 수도권 대기환경관리 기본계획 변경계획」.

[국외문헌]

Jacob D. and D. A. Winner (2009), “Effect of Climate Change on Air Quality”, *Atmospheric Environment*, 43, pp.51-63.

Emery, C. et al. (2016), “Recommendations on Statistics and Benchmarks to Assess Photochemical Model Performance”, *Journal of the Air and Waste Management Association*, 67(5), pp.582-598.

Hur, S.-K. et al. (2016), “Evaluating the Predictability of PM₁₀ Grades in Seoul, Korea Using a Neural Network Model based on Synoptic Patterns”, *Environmental Pollution*, 218, pp.1324-1333.

IPCC(2013), *Fifth Assessment Report*.

Kanamitsu, M. et al. (2002), “NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2)”, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83, pp.1631-1644.

- Kim, H.-C. et al. (2017), “Recent Increase of Surface Particulate Matter Concentrations in the Seoul Metropolitan Area, Korea”, *Scientific Reports* 7, 4710(2017), <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05092-8>.
- Lee, S. et al. (2013), “Influence of Transboundary Air Pollutants from China on the High-PM₁₀ Episode in Seoul, Korea for the Period October 16-20, 2008”, *Atmosphere Environment*, 77(2013), pp.430-439.
- Oh, H.-R. et al. (2015), “Long-Range Transport of Air Pollutants Originating in China: A Possible Major Cause of Multi-Day High-PM₁₀ Episodes During Cold Season in Seoul, Korea”, *Atmosphere Environment*, 109(2015), pp.23-30.
- Zhai, S. et al. (2019), “Fine Particulate Matter (PM_{2.5}) Trends in China, 2013–2018: Separating Contributions from Anthropogenic Emissions and Meteorology”, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19, pp.11031-11041.
- Zheng, B. et al. (2018), “Trends in China’s Anthropogenic Emissions since 2010 as the Consequence of Clean Air Actions”, *Atmospheric Chemistry and Physics* 18(19), pp.14095-14111.
- Zou, Y. et al. (2017), “Arctic Sea Ice, Eurasia Snow, and Extreme Winter Haze in China”, *Science Advances*, 3, e1602751.

[온라인 자료]

- 국립환경과학원 국가 대기오염물질 배출량 서비스, “배출량 통합검색”, https://airemiss.nier.go.kr/module/statistics/statisticsForm.do?siteId=airemiss&id=airemiss_030100000000, 검색일:2019.3.7.
- 기상청 기상자료개방포털, “관측지점정보-종관기상관측”, <https://data.kma.go.kr>, 검색일: 2019.6.24.
- 기상청 기상자료개방포털, “종관기상관측(ASOS)”, <https://data.kma.go.kr>, 검색일: 2019.6.24.
- 기상청 종합기후변화감시정보, “대기(기상요소)”, http://www.climate.go.kr/home/09_monitoring/meteo, 검색일: 2019.5.10.

서울특별시 대기환경정보, “대기질현황”, <https://cleanair.seoul.go.kr/2020/airquality/localAvg>, 검색일: 2019.6.5.

한국환경공단 AirKorea, “실시간 대기정보”, <http://www.airkorea.or.kr/web>, 검색일: 2019.6.3.

한국환경공단 AirKorea, “통계정보”, http://www.airkorea.or.kr/web/detailViewDown?MENU_NO=125, 검색일: 2019.3.3.

NOAA National Centers for Environmental Information, “NCEP/DOE Reanalysis-II”, <https://www.ncdc.noaa.gov/has/HAS.FileAppRouter?datasetname=NCDOEGR2MON&subqueryby=STATION&applname=&outdest=FILE>, 검색일: 2019.7.20.

Executive Summary

I. Background and Aims of Research

1. Background

- Reductions in (ultra)fine particulate matter (PM) have stagnated since the 2010s.
 - Total air pollutant emissions have decreased steadily as a result of aggressive air quality management policy implementation since the 2000s.
 - As the discharge amounts decreased, (ultra)fine PM concentrations also decreased, recording an all-time low in 2012.

- Recently, studies have attempted to identify the relationship between climate change and air pollution, but this has not been reflected in policy.
 - Several previous studies have revealed that the recent trend toward declining PM concentrations is related to stagnation and a weakening of wind speed due to climate change.
 - Since it has been pointed out that the existing PM management measures do not sufficiently consider linkages between PM, climate change, and energy policies, it is necessary to establish a mid- to long-term air management policy that can compensate for the limitations of current PM management measures (that do not consider weather and climate effects).

2. Research purpose and scope

- Analysis of the relationship between weather, climate and PM air quality

- Analysis of the relevance of mid- to long-term changes in meteorological factors and PM concentration by statistical analysis of observed data
- Analysis of meteorological contributions to annual average PM concentration through fixed-weather change modeling

- Preliminary study for predicting changes in PM air quality due to climate change
 - Investigation of major climatic factors related to changes in PM concentration
 - Development of a prediction index for predicting future changes in PM air quality based on the analysis of the relationship between PM concentration and meteorological factors

- Preliminary study to develop emission reduction policies by sector
 - Research on domestic and foreign reduction policies to prepare scenarios for emission reduction policies for each sector required to establish mid- and long-term PM management policies

II. Analysis of Mid- to Long-term Changes in PM Concentration and Weather Conditions

1. Mid- to long-term changes in PM air quality and weather conditions

- Annual average PM concentration trends
 - The analysis period was divided into three periods: P0, P1, and P2.
 - During the P0 period (2001 to 2006), the concentrations of PM₁₀ and PM_{2.5} fall rapidly, but decrease only gradually during the P1 period (2007 to 2012). During the P2 period (2013 to 2018), concentrations tended to stagnate.

□ Changes in mid- to long-term weather conditions

- When analyzing the weather data from 45 representative national long-term statistics, the annual average temperature increases and the average annual wind speed decreases.
- During the P2 period (2013 to 2018), the temperature continued to rise and the wind speed continued to decrease.

2. The relationship between PM concentration and changes in weather conditions

□ It is estimated that weakening wind speed in the recent period offsets the effect of reducing emissions.

- During the periods P0 and P1, when the tendencies of changes in temperature and wind speed were not clear, PM concentrations decreased with a decline in emissions.
- In the P2 period, when the annual average wind speed decreased, changes in PM concentrations exhibited signs of stagnation to weakening wind speed offsetting the effect of reduced emissions.
- The decrease in wind speed in recent years and the effect of atmospheric congestion on air quality can also be confirmed by changes in the number of days and duration of high-PM concentration.
- The number of bad days with a concentration of 36 to $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ has decreased recently, but the number of very bad days with $51\mu\text{g}/\text{m}^3$ or more has tended to increase, and the frequency of cases where high concentrations last for more than five days has increased.

III. Meteorological Contribution Analysis for Annual Average PM Concentration

1. Necessity of analyzing meteorological contributions to PM concentrations

- Meteorological contribution analysis to estimate the emissions reduction buffer
 - The current atmospheric management policy does not take into account the effects of weather and climate on PM concentrations, so even if the emission reduction targets are achieved in the target year, there is a possibility that the target concentrations may not be achieved due to the effect of the weather.
 - It is necessary to estimate the emissions reduction buffer that can achieve the target concentration even in extreme (negative direction of PM concentration) weather conditions through an analysis of meteorological contributions to annual average concentrations.

2. Basic analysis for estimating weather contributions

- Emission fixed-weather change modeling
 - If the modeling is performed by changing only the weather conditions under the same emission conditions (fixed emissions), it is possible to remove the effects of changes in emissions as much as possible and analyze the contribution of weather conditions to PM concentrations.
 - Considering that the research period is limited, representative years were selected and modeled. The years 2005 and 2012 were selected to model the low end of meteorological contributions. In both years, PM concentrations were low, the temperature deviation was negatively large, and the wind speed deviation was positive.

- 2007 and 2016 were selected as to model the high end of meteorological contributions. In these two years, PM_{2.5} concentrations were high, the temperature deviation was positively large, and the wind speed deviation was negatively large.

3. Modeling Results of Selected Years

- Results of changes in annual average PM_{2.5} concentration due to weather conditions
 - Compared to the average annual concentration in 2018, the lowest level simulated was found to be 5 percent lower in 2012, and the highest level simulated was found to be 21 percent higher in 2016.
 - The results of emission fixed-weather change modeling means that it is possible to change up to 26 to 27 percent (approximately 6.5 μg/m³ based on the annual average concentration of 25 μg/m³) by changing the weather under the same air pollutant emission conditions.
 - The modeling method of this analysis is used to remove the effect of the “changes” in emissions by fixing emissions at a single value, and not to remove emissions altogether; concluding that there is no effect from emissions is a misinterpretation of the model.

IV. Meteorological and Climate Impact Analysis on the Occurrence of High-PM_{2.5} Episodes

1. Mid- to long-term changes in factors related to the occurrence of high-PM_{2.5} episodes
 - Changes in the frequency, intensity, and duration of high-PM_{2.5} episodes

- During the P1 period (2005 to 2012), when annual average PM_{2.5} concentrations were steadily decreasing, the number of days of high-PM_{2.5} episodes were fewer in number.
- During the P2 period (2013 to 2018), when annual average PM_{2.5} concentrations stagnated, the number of high-PM_{2.5} episodes increased, and the number of very bad cases exceeding 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ recently increased
- The results of the analysis suggest that the number of high-PM_{2.5} episodes of long duration and high concentration (which are strongly influenced by atmospheric stagnation) is increasing.

2. Changes in meteorological factors related to the occurrence of high-PM_{2.5} episodes

- Characteristics of meteorological fields related to occurrence of high-PM_{2.5} episodes
 - High-PM concentration cases occur when the wind speed of the northwest monsoon near South Korea decreases due to weakening of the high pressure system in Siberia, and when the lower atmosphere stabilizes due to the high pressure in the upper atmosphere over the Korean peninsula.

- Recent changes in meteorological fields associated with the occurrence of high-PM_{2.5} episodes
 - The large-scale stagnant high-pressure system created by the recent increase in air temperature and air pressure in the eastern regions of Alaska and the Bering Sea caused atmospheric stagnation near the Korean Peninsula, presumably contributing to increased particulate concentrations and long-term persistence. Further research is needed in this regard.

V. Development of a Forecasting Index for Estimating Future Changes in the Number of High-PM Concentration Episodes

1. Factor analysis for the development of a PM_{2.5} concentration forecasting index

- Analysis of related climate factors to predict the occurrence of high-PM_{2.5} episodes in the future climate
 - Four major factors related to the occurrence of high-PM concentration were selected through factor analysis on large-scale atmospheric variables (geopotential height, temperature, and zonal/meridional winds at 1,000 hPa, 850 hPa, and 500 hPa) and PM concentrations in China.
 - Factor 1 shows a pattern of local high concentrations caused by atmospheric congestion (strengthening the high pressure in the upper layer and weakening the lower wind), and factor 2 shows a pattern of high concentrations caused by the long-distance movement of air pollutants near the origin of the yellow dust northwest of the Korean peninsula (wind in the east and west of the upper and lower layers)
 - Factor 3 shows a high concentration generation pattern due to the inflow of air pollutants by southwesterly wind, and factor 4 is related to PM concentration in central and southern China.

2. PM_{2.5} forecasting index using selected factors

- Using the selected factor to construct the Ultrafine particulate matter (PM_{2.5}) Forecasting Index (UFI)
 - Multi-regression model analysis using four factors as variables to construct UFI

- The correlation coefficient between the estimated value of the model made using factors 1, 2, and 4 and the observed concentration was 0.613, and the R-squared value was 0.371. This result shows improved predictability over previous studies by reflecting various weather variables.

VI. Conclusion and Suggestions

- Need to complement current fine dust management measures
 - Even if annual average fine dust concentrations improve due to the steady implementation of measures, high-PM concentration cases can occur at any time due to temporarily deteriorating weather conditions.
 - Implementing fine dust management measures is not only critical to reducing average annual PM concentrations, but also to setting stronger emissions reductions targets in preparation for more frequent climate emergencies.
 - It is necessary to study meteorological and climatic effects on PM concentrations, which can be the basis for supplementing the current management measures for fine particles, which do not currently consider the effects of weather and climate on PM air quality.

Keywords: (Ultra)fine Particulate Matter(PM), Weather, Climate Change, Contribution, Air Quality Management Policy

❖ 저자약력

이승민 (연구책임)

서울대학교 지구환경과학부 대기과학 박사
한국환경정책·평가연구원 부연구위원(현)
leesm@kei.re.kr

주요 연구실적

- 배출허용기준 미설정 대기오염물질에 대한 기준 설정 로드맵 수립 연구 (2016)
- 대기오염물질 배출사업장의 대기질 영향 분석 연구 (2015)

최기철

한국환경정책·평가연구원 부연구위원(현)
kcchoi@kei.re.kr

한진석

한국환경정책·평가연구원 연구위원(현)
jshahn@kei.re.kr

정은혜

한국환경정책·평가연구원 연구원(현)
jungeh@kei.re.kr

오혜련

서울대학교 기초과학연구원 선임연구원(현)
buso2000@cpl.snu.ac.kr

KETI 연구보고서 목록 (2015~2019)

기후환경정책연구

발행연도 | 보고서 번호 | 보고서 제목 (연구책임)

- 2019년
- 2019-01-01 기후변화를 고려한 미세먼지 예측 및 중장기 관리정책 수립 연구 (이승민)
 - 2019-01-02 미세먼지 시준제 도입방안 (최기철)
 - 2019-02 북한의 산림복원과 기후변화가 물관리 취약성에 미치는 영향과 정책방향 연구 (김익재)
 - 2019-03 기후정의 실현을 위한 정책 개선방안 연구(1) (한상운)
 - 2019-04 기후변화적응정책 10년: 현주소 진단과 개선방안모색을 중심으로 (장훈)
 - 2019-05 기후변화 파리협정 적응보고 세부이행규칙 대응방안 연구 (강상인)
 - 2019-06 혼합정수계획법을 이용한 발전부문 온실가스 감축 잠재력 평가 (김용건)
 - 2019-07 환경-주민수용성을 고려한 재생에너지 보급 활성화 방안 (이상범)
- 2018년
- 2018-01 에너지전환을 고려한 중장기(2050) 국가 온실가스 감축전략 (이상엽)
 - 2018-02 미세먼지와 온실가스의 효과적 감축을 위한 기후, 대기, 에너지 정책 연계방안: 발전, 수송 부문을 중심으로 (채여라, 전호철)
 - 2018-03 기후위험 관리를 위한 이해관계자 참여방안 연구 (이승준)
 - 2018-04 기후환경 이슈 분석을 위한 텍스트 마이닝 활용방안 연구 (진대용)
 - 2018-05 2018 기후변화 파리협정 이행협상 동향 및 대응방안 (강상인)
 - 2018-06 지역기반 참여형 연구방법론 연구: 기후변화 리빙랩 시범사업을 중심으로 (신용승, 조공장)
 - 2018-07 사회·환경영향을 고려한 태양광·풍력발전시설 입지 방안 연구 (김태현, 이상범)
- 2017년
- 2017-01 신기후체제 대응을 위한 2050 저탄소 발전전략 연구 I (이상엽)
 - 2017-02 기후변화의 부정적 영향에 따른 손실과 피해 대응방안 (이승준)
 - 2017-03 이상기후 대응을 위한 지역 기후경쟁력 증진 방안 (류재나)
 - 2017-04 신기후체제 국제기후변화 협상동향 분석 (강상인)
 - 2017-05 기후행동 변화를 고려한 정책적 대응전략 마련: 물-에너지에 대한 행동경제학적 접근 (최희선)
 - 2017-06 이상기후에 따른 건강영향 평가·예측을 통한 기후변화 대응 전략 마련 (배현주, 정다운)
- 2016년
- 2016-01 미래환경 전망 및 지속가능사회 비전설정 기반 구축 (조공장)
 - 2016-02 환경과 문화예술 콘텐츠 융합을 통한 기후환경 리스크 커뮤니케이션 전략 수립 (신용승)
 - 2016-03 온실가스 감축-기후변화 적응 연계전략 수립 (황인창)
 - 2016-04 기후변화 및 사회·경제적 요인의 동태적 변화를 고려한 미래 물수급 관리정책 마련(1) (류재나)

- 2016-05 물이용 지속성의 평가와 미래 전망 (김익재)
- 2016-06 최빈국 지역정부의 기후변화적응계획 수립을 위한 기술적 가이드라인 개발 연구 (장훈, 송영일)
- 2016-07 신기후체제 협상 대응 및 기후서비스 산업 발전 방안 연구 (강상인)

- 2015년 2015-01 에너지세제의 환경친화적 개편 및 지속가능한 환경재정체계 구축방안 연구 (강만옥)
- 2015-03 생태계서비스 측정체계 기반구축(II): 하천생태계를 중심으로 (안소은)
- 2015-03 폐자원 및 바이오에너지의 용도별 적정 배분방안(II):
목질계 바이오매스를 중심으로 (이희선, 조지혜)
- 2015-04 국제기후변화 협상동향과 대응전략 (II) (이승준, 이상윤)
- 2015-05 친환경차 보조금 지원 정책의 온실가스 감축 효과 연구 (한진석)
- 2015-06 배출권거래제도의 벤치마크 사례 국제비교 연구 (공성용)
- 2015-07 기후변화에 대응하기 위한 생태계 환경안보 강화방안(III): 기후변화 적응을 위한 생태계 관리방안
개선 (권영한, 이승준)
- 2015-08 넥서스 기반 통합적 기후환경 대응체계 구축 연구: 도시지역 기후적응정책 문제를 중심으로 (김동현,
송영일)
- 2015-09 지속가능한 물이용을 위한 지표 개발 및 적용 방안 연구(II) (안종호, 김익재)

연구보고서/기본연구

- 2019년 2019-01 한반도 신경제지도 녹색화 전략 연구 (이정호)
- 2019-02 속의적 접근을 통한 하천 자연성 회복 정책 도출 연구 (조을생)
- 2019-03 폐기물 자원순환의 국제 동향과 영향 분석 (신상철)
- 2019-04 도시의 지속가능성을 위한 공원녹지 정책의 재정립 방안 (최희선)
- 2019-05 환경정책의 사회적 수용성 제고 방안: 환경문화를 중심으로 (조공장)
- 2019-06 육상화물운송수단의 미세먼지 및 온실가스 저감 방안 연구 (한진석)
- 2019-07 지자체의 고농도 미세먼지 비상관리대책 수립 지원을 위한 연구 (이승민, 신동원)
- 2019-08 기후적응 요소를 고려한 토지·건물정보 제공방안 연구 (신지영)
- 2019-09 지속가능성을 고려한 가축분뇨관리 정책방안 연구 (조을생, 이소라)
- 2019-10 통합물관리를 위한 유역계획의 통합 및 조정 방안 연구 (안종호, 한대호)
- 2019-11 통합물관리체계 하에서 물자원 이용·관리를 위한 비용부담-부과체계 정비방안 연구 (문현주)
- 2019-12 저출산·고령화를 고려한 폭염 노출위험인구 전망 및 지역별 대응 전략 (심창섭, 김오석)
- 2019-13 북한 토양·지하수 오염관리를 위한 남북협력방안 (신경희)
- 2019-14 환경영향평가를 통한 소규모 소각시설 환경개선방안에 대한 연구 (이영준)
- 2019-15 지자체 지속가능발전 전략수립 및 SDGs 반영방안 (이정석)
- 2019-16 지방분권 시대 지자체 환경행정기능 강화를 위한 중앙-지방간 역할 재정립 방안 (정우현)

- 2019-17 순환경제로의 전환을 위한 플라스틱 관리전략 연구 (이소라)
- 2019-18 하천 및 호소의 물환경에 미치는 미세플라스틱 영향 연구 (김익재)
- 2019-19 환경영향평가 고도화를 위한 공간정보활용 체계 구축(II) (이명진)
- 2019-20 생태정보학적 생물다양성 평가 기술 개발 (이후승)
- 2019-21 소음노출의 위해성을 고려한 비용편익 연구(이병권)
- 2019-22 유역단위 하수도 재정전략 수립기법 연구 (류재나)
- 2019-23 Construction of Historical Map Database as a Basis for Analyzing Land-Use and Land-Cover Changes, Exemplified by the Korean Demilitarized Zone and Inner-German Green Belt (Part II) (김오석)
- 2018년 2018-01 개발기본계획의 전략환경영향평가 운영의 성과분석 및 발전방향 연구 (사공희)
- 2018-02 원자력시설 해체 부지의 재사용을 위한 환경관리 전략: 토양 및 지하수 분야를 중심으로 (신경희)
- 2018-03 폐기물처리방법별 환경효율성(Eco-efficiency) 평가 연구 (이소라)
- 2018-04 토양오염부지의 환경매체 연계관리 방안 (황상일, 양경)
- 2018-05 고령화 사회에서의 가정 발생 폐의약품 수거 및 처리체계 개선방안 (서양원, 조지혜)
- 2018-06 고�형연료 에너지 시설의 대기오염물질 관리 개선방안 연구 (김유미, 조지혜)
- 2018-07 우리나라 국토환경 지리정보의 활용성 제고 방안 (명수정)
- 2018-08 복합재난(Natech) 대비 사업장 안전관리 방안 (박정규, 서양원)
- 2018-09 장기미집행 도시공원 자동실효제에 따른 환경적 영향과 대응방안 (최희선)
- 2018-10 점오염원 질소관리 정책강화 타당성 평가 (안중호)
- 2018-11 중소하천 물환경 개선을 위한 용배수로 관리 및 활용 방안 (김익재)
- 2018-12 토지피복지도와 국토환경성평가지도의 정책적 활용 기반 마련 연구 (윤정호, 김근한)
- 2018-13 고령자의 환경친화적 농지이용 전환에 대한 경제성 평가 (김현노)
- 2018-14 생활화학제품 안전관리를 위한 누적위해성평가 연구 (정다운)
- 2018-15 Construction of Historical Map Database as a Basis for Analyzing Land-Use and Land-Cover Changes, Exemplified by the Korean Demilitarized Zone and Inner-German Green Belt(Part I) (김오석)
- 2018-16 가뭄지역 농촌용수 개발계획의 전략환경영향평가 개선방안 연구: 지하수-지표수 복합이용을 대안으로 (김경호)
- 2018-17 생태공학적 기법을 활용한 지역단위 생태계 보호지역 확대방안 (구경아)
- 2018-18 환경영향평가 고도화를 위한 공간정보 활용 체계 구축 (I) (이명진)
- 2018-19 상수원 관리지역의 기후회복력 강화 방안 연구: 4대강 수계를 중심으로 (이정호)
- 2017년 2017-01 국토-환경계획 연동제에 대응한 전략환경영향평가 개선방안: 도시·군관리계획(재정 비) 및 개발제한구역 해제계획을 중심으로 (이영재)
- 2017-02 물인프라 건설단계 이후의 효율적 관리를 위한 중앙과 지방정부의 역할 (문현주, 김현노)
- 2017-03 IPCC 신시나리오 체계를 적용한 우리나라 기후변화의 피해비용 분석 (채여라)

- 2017-04 화학물질관리법 내 화학사고 정책의 개선방안 및 산업계 지원방안 연구(II) (서양원, 박정규)
- 2017-05 국내 온실가스 배출권거래제 시행 효과 분석 (이상엽)
- 2017-06 환경복지 구현을 위한 국민체감형 환경서비스 개발 방안 (신용승)
- 2017-07 환경영향평가서 위생·공중보건 항목의 위해성 평가 개선 연구 (하중식)
- 2017-08 이차전지의 폐자원흐름 분석 및 자원순환성 제고방안 (조지혜)
- 2017-09 생태계서비스 기반의 자연자본 지속가능성 지수 개발 연구(II) (김충기)
- 2017-10 매립자원의 순환이용 가능량 분석 및 미래형 매립지 관리전략 마련 연구 (이소라)
- 2017-11 공공수역 수질개선을 위한 공공하수처리시설 관리제도의 합리적 개선방안 연구 (김익재)
- 2017-12 원자력발전소 해체 폐기물의 안전·안심관리 정책 방안 (이희선)
- 2017-13 ICT 발전트렌드에 대응하는 공간정보의 환경이슈 적용 체계 구축: 빅데이터 분석 과 위성영상 활용을 중심으로 (이명진, 이정호)
- 2017-14 기저유출을 고려한 환경가뭄 평가방안 연구 (현윤정)
- 2017-15 해수담수화에서 생성되는 농축수의 환경적 영향과 평가 (김태윤)
- 2017-16 전기자동차 보급에 따른 지역간 오염물질 및 온실가스 배출 영향 분석 (전호철)
- 2017-17 지권과 생물권 간 공진화 현상에 기반한 국토 자연환경 관리방안 (이수재)
- 2017-18 사회인공지능의 적용을 통한 환경친화적 행동 촉진에 대한 연구 (이정석, 강택구)
- 2017-19 지역별 친환경차 시장 활성화 방안 연구: 인구밀집지역을 중심으로 (한진석)

- 2016년 2016-01 지역기반 환경보전정책 지원 방안 연구(II) (신용승, 배현주)
- 2016-02 도시의 기후 회복력 확보를 위한 공간단위별 평가체계 및 모형 개발(II) (김동현)
- 2016-03 중국의 '일대일로(一帶一路)' 대응 유라시아 지역 환경전략 연구 (추장민)
- 2016-04 사물인터넷(IoT)을 활용한 스마트 물환경관리 방안 및 정책기반 마련 연구 (한혜진)
- 2016-05 생태계서비스 기반의 자연자본 지속가능성 지수 개발 연구(I) (이현우)
- 2016-06 지중환경관리를 위한 제도 개선방안 연구(II) (황상일)
- 2016-07 사회적 투자수익률(SROI)을 고려한 물환경 인프라시설 투자 방향 연구 (류재나, 강형식)
- 2016-08 폐자원흐름분석을 통한 전기·전자제품의 upcycling 활성화 방안 (이희선)
- 2016-09 자원순환사회 전환 촉진을 위한 재활용산업 활성화 방안: 재활용 관리제도 전환에 따른 영향 분석 (이소라, 신상철)
- 2016-10 공간정보를 활용한 재해폐기물 성상별 최적 관리방안 (조지혜, 김태현)
- 2016-11 국가 및 지역 미래성장동력에 대한 환경성 분석 및 환경영향평가 대비방안 연구 (방상원)
- 2016-12 정부3.0 기반 지역기피시설 주민수용성 평가 방안(II) (김태현)
- 2016-13 랜덤워크를 이용한 생태네트워크 변화 모의예측방안 연구(II) (김지영)
- 2016-14 화학물질관리법 내 화학사고 정책의 개선방안 및 산업계 지원방안 연구(I) (박정규, 서양원)
- 2016-15 교통환경정책 수립을 위한 대기환경 개선효과 추정방안 연구: 도로이동오염원을 중심으로 (한진석)
- 2016-16 기후·대기 환경정책에 활용하기 위한 건강 위해성 평가 개선 연구: 농도 반응함수의 국내 표준안을 중심으로 (하중식)
- 2016-17 기후변화 적응을 고려한 지역자원 관리 방안(II) (박창석)

- 2016-18 기후변화 적응정책 지원을 위한 토지이용통합모델 개발(II) (김오석)
- 2016-19 ICT 발전트렌드에 대응하는 공간정보의 환경이슈 적용 체계 구축 (이명진, 이정호)
- 2016-20 북한 환경정보 구축 및 활용 방안 연구(II): 원격탐사를 이용한 자연환경성 우수지역 평가 (정휘철)

- 2015년 2015-01 친환경적 행동의 불편비용과 정책적 시사점 (강만옥)
- 2015-02 월경성 대기오염물질 관리를 위한 단계별 대응방안 연구 (이상윤)
- 2015-03 환경생태유량, 친수용수 등 물수요 변화에 대응하는 물환경 정책 개발 연구 (김호정)
- 2015-04 지역기반 환경보건정책 지원 방안 연구(I): 한국형 CARE 프로그램을 중심으로 (배현주, 신용승)
- 2015-05 육상 생태 보호지역 확대 추진 방안 연구 (이수재)
- 2015-06 폐자동차의 자원순환 고도화 방안을 위한 폐자원 및 잔재물 흐름분석 (이희선)
- 2015-07 환경평가시 대안 설정 및 평가에 관한 연구 (이상범)
- 2015-08 기후변화 적응을 고려한 지역자원 관리 방안(I) (이정호, 박창석)
- 2015-09 동북아 지역 FTA 환경영향대응 및 환경·경제 통합협력전략 연구 (추장민)
- 2015-10 북한 환경정보 구축 및 활용 방안 연구(I): 토지피복지도 구축을 중심으로 (정휘철)
- 2015-11 지중 환경 관리를 위한 제도 개선방안 연구(I) (황상일)
- 2015-12 지하수 의존도에 따른 수생태계 관리를 위한 기저유출지표 개발 및 활용방안 연구 (강형식, 현윤정)
- 2015-13 기후변화 적응정책 지원을 위한 토지이용통합모델 개발(I) (김오석)
- 2015-14 도시의 기후 회복력 확보를 위한 공간단위별 평가 체계 및 모형 개발(I) (김동현)
- 2015-15 기후변화를 고려한 환경인프라 사고대응체계 개선방안 연구 (류재나)
- 2015-16 화학사고 사후영향평가 체계 구축방안 마련 (서양원, 박정규)
- 2015-17 랜덤워크를 이용한 생태네트워크 변화 모의예측방안 연구(I) (김지영)
- 2015-18 풍력발전시설에 대한 소음환경영향평가 및 관리방안 연구 (박영민)
- 2015-19 Bridging Livable City Development over Local Climate Smart Development under UN SDGs (장 훈)
- 2015-20 정부 3.0 기반 지역기피시설 주민수용성 평가 방안(I) (김태현)

정책보고서/수시연구

- 2019년 2019-01 통합법 시행에 따른 대기배출시설 허가조건 평가 및 개선방안 (공성용)
- 2019-02 산업단지, 관광단지 등 폐기물 발생량 산정을 위한 가이드라인 마련 연구 (이영준B)
- 2019-03 물환경 분야 규제 완화에 의한 영향 분석 및 제도개선 방안 (이병국, 김익제)
- 2019-04 도시지역 자연환경 훼손 진단과 복원 방향 (명수정)
- 2019-05 중국의 미세먼지 농도추이 및 한중 간의 오염도 상관관계 분석 (주현수)
- 2019-06 국가 지속가능성 이행과제 간 연관관계 분석방안 연구 (홍한음)
- 2019-07 수송용 에너지 전환을 위한 세계개편의 사회적 수용성 제고방안 연구 (신동원)
- 2019-08 DMZ 토지이용의 지속가능성을 위한 연구 방향 (김오석)

- 2019-09 생활밀착형 환경이슈에 대한 수요반영 개선 연구: 민원 빅데이터 분석을 중심으로 (진대용)
- 2019-10 남북한 도로망 연결사업의 환경영향평가 방안 (전동준)
- 2019-11 P4G 파트너십 의제 개발 및 국내 대응방안 연구 (김호석)
- 2019-12 지역단위 음식물류 폐기물의 효율적 관리방안 마련 연구: 세종시 사례를 중심으로 (신상철)
- 2019-13 환경성·형평성을 고려한 수송용 에너지 적정가격 설정 및 세수 활용 방향 (강만옥)
- 2019-14 택배 등 유통포장재의 재사용 활성화를 위한 정책 지원방안 마련 연구 (이소라)
- 2019-15 시공간을 고려한 환경생태적 우수지역과 환경성질환의 상관성 분석 연구: 환경·국토계획 통합 계획에서의 활용방안을 중심으로 (김근한)
- 2019-16 인체위해 저감방안 마련을 위한 미세먼지 구성성분별 건강영향 연구 (배현주)
- 2019-17 가뭄 대비 기존 지하수 관정 활용을 위한 정책 로드맵 연구 (현윤정)
- 2019-18 시민 참여를 통한 사회·경제적 환경여건별 폭염 체감 영향 분석 (채여라, 최영웅)
- 2019-19 재생에너지 입지계획의 전략환경영향평가 실시방안 연구 (김경호)
- 2019-20 교통소음 관리 기준의 합리화(일원화) 방안 (박영민)
- 2019-21 중국의 대기관리 정책 분석 및 한중 협력 강화 방안 (최기철)
- 2019-22 한반도 지속가능발전을 위한 북한환경 연구로드맵 수립 - 북한 환경실태 기초조사를 통한 미래 친환경 통일 한반도 기반 구축 (추장민)

- 2018년 2018-01 태양광 폐패널의 관리 실태조사 및 개선방안 연구 (조지혜)
- 2018-02 에너지전환정책에 따른 2030 온실가스 감축 로드맵 수정 방향 (이상엽)
- 2018-03 LCA에 기반한 전기차의 발전원별 환경효과 분석 (이소라)
- 2018-04 환경부문 개혁의 법적 효과에 관한 연구 (한상운)
- 2018-05 지방자치·분권 강화에 따른 유역 중심의 하수도 관리체계 연구 (김호정)
- 2018-06 환경부문 헌법 개정을 위한 여론조사 (조공장)
- 2018-07 신규 농업시설물의 수질오염 관리방안 마련 연구 (류재나)
- 2018-08 지자체 교통부문 미세먼지 관리 방안 연구: 서울시 자동차 친환경등급제를 중심으로 (한진석)
- 2018-09 물환경관리계획의 이행평가체계 개선 방안 (김익재)
- 2018-10 소규모 공동주거시설의 층간소음 정책 개선방안 (박영민)
- 2018-11 국민참여형 환경영향평가 체계 구축 및 제도 개선방안 (전동준)
- 2018-12 공동주택 재활용 폐기물 수거·처리 체계 개선 방안 마련 연구 (신상철)
- 2018-13 미세플라스틱 관리 동향 및 정책 제언 (박정규)
- 2018-14 차량·야생동물 충돌사고(WVC) 제어와 방지를 위한 적정 야생동물의 이동통로 확보 방안 연구: 세종특별자치시 생활권 오송역~세종시 고속화도로를 중심으로 (방상원)

- 2017년 2017-01 지진의 환경영향 및 대응방향 (현윤정)
- 2017-02 수송체 중심의 환경정책 활용을 위한 대기오염의 노출위험인구 산정 연구 (배현주)
- 2017-03 지속가능한 사회 구현을 위한 환경평가 미래 발전 전략 (이영준)

- 2017-04 미래 기후 및 사회경제 여건 변화 대응을 위한 환경정책 이슈 발굴 (채여라)
- 2017-05 녹색경제와 지속가능발전을 위한 환경정책 뉴 패러다임 개발 (추장민)
- 2017-06 환경영향평가 시 도로이동오염원 대기오염물질 배출량 산정 개선방안 (김유미)
- 2017-07 환경정의 실현을 위한 지역단위 환경불평등 분석 (김태현)
- 2017-08 산업단지 토양 분야 환경영향평가 개선방안 (양경)
- 2017-09 북한의 환경인프라 조성을 위한 환경협력 연구 (명수정)
- 2017-10 아시아 지역 거점 바이오브릿지 헬프데스크 구축방안 연구 (오일찬)
- 2017-11 통합 물관리의 기본 원칙과 정책 로드맵 연구 (김익제)
- 2017-12 군부대 주둔 및 이전 부지의 환경관리 정책: 토양·지하수 환경을 중심으로 (박용하, 이정호)
- 2017-13 국가 정책·계획 지속가능성 평가체계 개발 (김호석)
- 2017-14 자연적 원인에 의한 중금속 오염 농경지의 합리적 관리방안 마련 (황상일)
- 2017-15 환경정의 측면의 녹지접근성 분석 연구 (명수정)
- 2017-16 야간조명으로 인한 생태계 영향 환경영향평가 조사방안 연구 (이상범)
- 2017-17 환경평가의 공정성 제고를 위한 공탁제 도입방안에 관한 연구 (유현석)

- 2016년 2016-01 가뭄 단계에 따른 적응형 가뭄관리정책 연구: 지역 차원의 비구조적 가뭄대책을 중심으로 (김호정)
- 2016-02 나노폐기물의 안전처리를 위한 관리전략 수립 연구 (조지혜)
- 2016-03 TPP 환경관련 협정문 분석 및 대응방안 연구 (추장민)
- 2016-04 화학사고의 경제적 손실 추정을 위한 방법론 진단 및 선정 방안 연구: 인적·생태적 피해액 추정을 중심으로 (서양원, 곽소윤)
- 2016-05 제주 탄소제로섬 추진전략 연구 (이병국)
- 2016-06 환경분야 공적개발원조(ODA) 사업평가 지침 마련을 위한 연구 (조공장)
- 2016-07 토양정화 곤란 부지의 최적 관리방안 연구 (박용하)
- 2016-08 실도로에서 경유차의 대기오염물질 초과 배출에 따른 사회적 비용 연구 (강광규)
- 2016-09 신기후체제의 기후변화 적응 및 손실과 피해에 관한 대응방안 (이승준)
- 2016-10 대기환경비용을 고려한 친환경차 구매보조금 실효성 제고 연구: 차종별 적정 보조금 수준 분석을 중심으로 (한진석)
- 2016-11 유네스코 세계지질공원 운영 강화에 따른 국가지질공원제도의 개선방안 연구 (이수재)
- 2016-12 신기후체제 시대 기후변화 대응정책 추진체계 연구 (김이진, 이상엽)
- 2016-13 EU REACH 시험자료 분석을 통한 화평법 지원방안 연구 (박정규)
- 2016-14 환경영향평가와 지하안전영향평가의 연계방안 연구 (현윤정)
- 2016-15 비도시지역 주거·공장 혼재형 난개발 평가기준 개발 및 활용방안 마련 (이영재)
- 2016-16 미래환경이슈 대응을 위한 환경정책과제 개발과 환경거버넌스 발전 연구 (추장민)

- 2015년 2015-01 Water and Sustainable Development in Korea: A Country Case Study (안종호)
- 2015-02 산업단지 등의 폐기물 처리시설 설치 의무화 기준 설정 연구 (주현수)
- 2015-03 생물다양성을 고려한 영향평가 방안에 관한 연구 (오일찬)

- 2015-04 토양의 이동에 대한 합리적 관리제도 마련 연구 (황상일)
- 2015-05 국내 산지 능선의 지질-식생 상관관계 분석 (이수재, 이명진)
- 2015-06 환경분야 한중 FTA 활용 및 대책을 위한 정책과제 개발 (추장민)
- 2015-07 계획관리지역 토지이용 실태분석 및 환경관리 방안 (이영재)
- 2015-08 대기오염물질 배출사업장의 대기질 영향 분석 연구 (이승민)
- 2015-09 지자체의 보건의료시설 기후 회복력 강화·관리 방안 연구 (하종식)
- 2015-10 기후변화와 생태계 변화에 기반한 침입외래종의 관리 전략 (박용하)
- 2015-11 재활용동네마당 사업을 통한 생활폐기물 관리 선진화 연구 (신상철)
- 2015-12 AIB 출범과 GCF 운영을 고려한 한국 환경외교의 방향 및 정책 과제 (이정석)

Working Paper

- 2019년 2019-01 환경불평등 해소를 위한 수용체 중심 위해관리 기반 연구 (정다운)
- 2019-02 환경규제 동향분석 및 중장기 정책과제 도출: 포럼 자료집 (김현노)
- 2019-03 전문가시스템(Expert System)의 사후환경영향평가 적용을 위한 기초연구 (이진희)
- 2019-04 저주파 소음의 환경영향평가를 위한 기초 연구 (선효성)
- 2019-05 지속가능한 해양활용을 위한 해양환경통합자료 적용 연구 (김태운)
- 2019-06 선형 교통사업의 지형변화 적정성 평가방안 마련 (권선용)
- 2019-07 생태계 교란식물 분포도 구축을 위한 드론 영상과 이미지 검색 기술의 적용 가능성 검토 연구 (김근한)
- 2019-08 수자원의 합리적 배분 방안 마련 기초 연구: 합리적 물 수급 분석 방안 연구 (서승범)
- 2019-09 환경영향평가 과정에서 드론과 BIM의 적용 가능성 검토 기초 연구 (유재진)
- 2019-10 삶의 만족도 지표(Life Satisfaction Index)를 활용한 미세먼지의 사회적 비용 추정 연구 (전호철)
- 2019-11 순환경제사회를 위한 물질흐름분석의 정책적 활용 동향 연구 (주문술)
- 2019-12 매립장 유래 미세플라스틱 관리방안: 침출수 발생원을 중심으로 (지민규)
- 2019-13 환경정책연구에서 데이터 활용성 강화를 위한 기초 연구 (진대용)
- 2019-14 실내공기질 관리 및 개선을 위한 기초연구 (최현진)

- 2018년 2018-01 에너지 수요전망모형 개발 기초연구 (전호철)
- 2018-02 원자력발전소 해체에 따른 환경영향평가 도입 필요성 연구 (이영준)
- 2018-03 환경영향평가 환경정의 항목 개발을 위한 기초연구 (이상윤)
- 2018-04 조류충돌에 대한 환경영향평가 개선을 위한 기초연구 (이후승)
- 2018-05 드론을 이용한 대기환경 조사기법 분석과 적용을 위한 기초연구 (윤정호)
- 2018-06 서울 미세먼지(PM10) 농도의 시공간 통계분석 활용방안 연구 (홍한움)
- 2018-07 소규모 환경영향평가 제도 개선을 위한 기초연구: 도시개발과 재생에너지개발을 중심으로 (이상범)
- 2018-08 온실가스 배출량의 소득탄력성 추정 연구: 함수계수 패널 분석방법을 중심으로 (전호철)
- 2018-09 환경영향평가 시 지진 안정성 평가 가이드라인 마련을 위한 기초연구 (권선용)

- 2018-10 대기 이미지를 활용한 미세먼지 오염도 추정 (진대용)
- 2018-11 한국의 녹색경제 진단(I): 녹색활동 및 경제운영시스템 (김종호)
- 2017년
- 2017-01 불확실성과 학습효과를 반영한 기후경제 모형 방법론 연구 (황인창)
 - 2017-02 환경경제 분석에서 행위자 기반 모형의 활용방안 연구 (채여라, 정예민)
 - 2017-03 인도 물관리 정책의 비교분석과 환경협력 확대 방향 (김익재)
 - 2017-04 산림경영사업지의 개발용지 전환 사례조사 및 개선사항의 도출 (방상원)
 - 2017-05 환경분야 빅데이터 수집방법 연구: 대기질 데이터를 중심으로 (한국진)
 - 2017-06 에머지 방법론을 활용한 유역의 지속가능성 평가: 금강유역을 중심으로 (이승준)
 - 2017-07 도시재생 활성화지역 노후건물의 재정비 시나리오별 환경적 지속가능성 평가를 위한 기초연구 (송지윤)
 - 2017-08 Smart waste 및 환경정보 제공을 위한 주민참여형 애플리케이션 활용 연구 (이소라, 임혜숙)
 - 2017-09 2차 생성 미세먼지 저감을 위한 암모니아 관리정책 마련 기초연구 (신동원)
 - 2017-10 주요국가 환경정책 트렌드 분석연구 (명수정, 문현주, 신용승, 전호철)
 - 2017-11 한국의 녹색경제지수 산정 (김종호)
 - 2017-12 합성생물 관리방안 마련을 위한 국내외 연구동향 (오일찬)
- 2016년
- 2016-01 시스템과 네트워크 이론을 활용한 미래 환경정책 방향 연구 (이승준)
 - 2016-02 공공자료 분석을 통한 친환경적 풍력에너지 개발 기초 연구 (김태윤)
 - 2016-03 환경영향평가에서 활용 가능한 주민참여 방법 기초 연구 (이상윤)
 - 2016-04 자율주행 자동차의 친환경성 제고를 위한 기초 연구 (이승민)
 - 2016-05 미래 고온환경 변화와 직종 간 임금격차 추정 (김동현)
 - 2016-06 드론을 이용한 환경재난 사후대응 기술 및 연구동향 분석 연구 (손승우)
 - 2016-07 건물부문의 환경부하 평가모형 개발을 위한 기초연구 (송지윤)
 - 2016-08 근지표환경 임계영역(Critical Zones)의 환경적 중요성과 환경 관리의 미래 이슈 (현윤정)
 - 2016-09 시민과학의 자연환경조사 적용방안 연구 (김윤정)
 - 2016-10 환경평가 자료의 공공서비스 지원을 위한 기초연구 (김태형)
 - 2016-11 토지환경 분야의 지속가능발전목표(SDGs) 이행을 위한 정책방향 (명수정)
 - 2016-12 건강영향평가 분야에서의 위해소통을 위한 리스크 테이블 제작 연구 (하종식)
 - 2016-13 해외 환경정책 인벤토리 구축 연구: 환경전략/대기환경/물환경/국토자연/자원순환 부문 (조일현, 공성용, 한대호, 홍현정, 한상운)
 - 2016-14 해외 환경정책 인벤토리 구축 연구: 환경평가 부문 (박하늘)
 - 2016-15 해외 환경정책 인벤토리 구축 연구: 온실가스 감축 부문 (김이진, 간순영)
 - 2016-16 지하수 개발사업의 환경영향평가 개선을 위한 기초연구 (김경호)
 - 2016-17 토양자원 관리를 위한 전략환경영향평가 개선을 위한 기초연구: 도시개발사업을 중심으로 (양경)
 - 2016-18 미세조류 바이오매스의 자원화 활용에 대한 연구: 바이오 (기능성)소재 중심 (지민규)
 - 2016-19 2016 국민환경의식조사 연구 (곽소윤)

- 2015년 2015-01 싱크홀 방지를 위한 환경영향평가 개선방안 연구 (김윤승)
- 2015-02 이슈스캐닝(Horizon Scanning)기법 활용을 통한 물환경관리 부문 이머징 이슈 발굴 (한혜진)
- 2015-03 기후경제통합-지역평가모형 비교분석 및 국내 모형개발을 위한 기초연구 (황인창)
- 2015-04 기후변화로 인한 고온환경 근로자의 작업역량 저하 추정과 공간적 군집 파악 (김동현)
- 2015-05 환경영향평가 설명회·공청회 운영 현황 분석 (조공장)
- 2015-06 도로 및 철도 사업의 토양분야 환경영향평가 사례연구 (신경희)
- 2015-07 빅데이터를 활용한 환경보건서비스에 관한 기초연구 (간순영, 윤성지)
- 2015-08 자원순환분야 지속가능발전목표(SDGs) 이행 기반 마련을 위한 기초연구 (임혜숙)
- 2015-09 내륙습지에 대한 환경영향평가 개선방안 연구 I: 환경부 전국내륙습지조사지침(2011)의 적용을 중심으로 (방상원)
- 2015-10 자원순환성 평가제도 대상 확대를 위한 기초연구 (이소라)
- 2015-11 환경소음 빅데이터의 정책 활용성 제고 방안 (박영민)
- 2015-12 인과지도(Causal Loop)를 활용, 미래 물수급관리 정책 지원을 위한 기초연구 (류재나)
- 2015-13 생물안전 법제 기초 연구 (홍현정)
- 2015-14 지방자치단체 환경영향평가 조례 운영현황 및 효율화 방안 (선효성)
- 2015-15 개발사업의 비점오염 영향평가방법 개발을 위한 기초연구 (이진희)
- 2015-16 환경영향평가 제도에서의 생태계보전협력금 활용 개선방안 (이상범)
- 2015-17 환경가치 중장기 연구 수요 조사 (곽소윤)
- 2015-18 세종특별자치시의 대기질 관리 기획 연구 (심창섭)
- 2015-19 2015 국민환경의식조사 연구 (곽소윤)

사업보고서

- 2019년 2019-01 동아시아 녹색전환을 위한 국제환경네트워크 구축 (이현우)
- 2019-02-01 [국가 리스크 관리를 위한 기후변화 적응역량 구축·평가] 데이터 기반 폭염 및 한파의 직간접 영향 분석 (채여라)
- 2019-02-02 [국가 리스크 관리를 위한 기후변화 적응역량 구축·평가] 별책부록: 수요자의 인식을 고려한 리스크 커뮤니케이션 정책방안(II) (채여라)
- 2019-03-01 동아시아 환경공동체 발전전략 개발 및 협력사업 (김호석)
- 2019-03-02 KEI 북한환경동향 2019년 (김호석)
- 2019-04 물환경 서비스와 물 인프라의 지속가능성 평가(VI) (류재나, 김익재)
- 2019-05 생물다양성협약 이행 지원 프로그램 기획·운영(V) (김충기)
- 2019-06-01 [환경평가 지원을 위한 지역 환경현황 분석 시스템 구축 및 운영] 선박 및 발전시설의 미세먼지 기여도 분석 (문난경)
- 2019-06-02 [환경평가 지원을 위한 지역 환경현황 분석 시스템 구축 및 운영] 개발사업 입지 적정성 평가를 위한 발암성 대기오염물질의 현황 및 배출원 특성 분석 (김유미)

- 2019-06-03 [환경평가 지원을 위한 지역 환경현황 분석 시스템 구축 및 운영] 개발사업에 따른 생물서식지 질적 변화 (전동준)
- 2019-06-04 [환경평가 지원을 위한 지역 환경현황 분석 시스템 구축 및 운영] 한강권역 유역건전성 평가 체계 마련 (박종윤)
- 2019-06-05 [환경평가 지원을 위한 지역 환경현황 분석 시스템 구축 및 운영] 소음지도를 활용한 지역(도시)별 환경용량평가 (이병권)
- 2019-06-06 [환경평가 지원을 위한 지역 환경현황 분석 시스템 구축 및 운영] 주요 재생에너지원별 현황 및 환경적 가용 입지 분석 (이영준)
- 2019-07-01 환경·경제 통합분석을 위한 환경가치 종합연구 (김현노)
- 2019-07-02 환경·경제 통합분석을 위한 환경가치 종합연구 별책부록: 2019 국민환경의식조사 (김현노)
- 2019-08 환경 빅데이터 분석 및 서비스 개발 III (강성원)
- 2019-09 미세먼지 통합관리 전략 수립 연구 (심창섭)
- 2019-10 미세플라스틱의 건강 피해 저감 연구 (박정규)
- 2019-11-01 녹색경제협동연구 성과확산 (현윤정)
- 2019-11-02 녹색경제 활성화를 위한 환경규제 개선방안 (김현노)
- 2019-11-03 어린이 녹색생활환경 구축 연구(1): 위해저감 및 녹색 소비 방안을 중심으로 (정다운)
- 2019-11-04 글로벌 녹색전환 네트워크 구축 (김호석)
-
- 2018년 2018-01 국가 리스크 관리를 위한 기후변화 적응역량 구축·평가: 체감형 적응을 위한 데이터 기반 기후변화 리스크 대응체계 구축(II) (채여라)
- 2018-02-01 [동아시아 환경공동체 발전전략 개발 및 협력사업] 총괄보고서 (이현우)
- 2018-02-02 [동아시아 환경공동체 발전전략 개발 및 협력사업] 환경거버넌스 강화를 위한 공공참여제도 한중 비교연구 (김태현)
- 2018-02-03 KEI 북한환경동향 2018년 (이현우)
- 2018-02-04 KEI 일대일로포럼 자료집 (이현우)
- 2018-03 물환경 서비스와 물 인프라의 지속가능성 평가(V) (류재나, 황상일)
- 2018-04 생물다양성협약 이행·지원 프로그램 기획·운영(IV) (황상일)
- 2018-05-01 [환경평가 지원을 위한 지역 환경현황 분석 시스템 구축 및 운영] 지자체별 오염원별·물질별 미세먼지 기여도 및 전환율 산정 (문난경)
- 2018-05-02 [환경평가 지원을 위한 지역 환경현황 분석 시스템 구축 및 운영] 유해대기오염물질 평가를 위한 모델링 기반 구축 (문난경)
- 2018-05-03 [환경평가 지원을 위한 지역 환경현황 분석 시스템 구축 및 운영] 토석채취사업의 현황 및 개발 적정성 분석 (이영준)
- 2018-05-04 [환경평가 지원을 위한 지역 환경현황 분석 시스템 구축 및 운영] 도시화에 따른 유역건전성 평가 체계 개발(금강수계를 중심으로) (박종윤)
- 2018-05-05 [환경평가 지원을 위한 지역 환경현황 분석 시스템 구축 및 운영] 육상태양광발전사업 현황과 환경적 고찰 (박종윤)

- 2018-06-01 [환경·경제 통합분석을 위한 환경가치 종합연구] 환경·경제 통합분석 시스템 구축 (안소은)
- 2018-06-02 [환경·경제 통합분석을 위한 환경가치 종합연구] 부문별 영향평가 및 가치추정 (안소은)
- 2018-06-03 [환경·경제 통합분석을 위한 환경가치 종합연구] 별책부록: 2018 국민환경의식조사 (안소은)
- 2018-07 원전사고 대응 재생계획 수립방안 연구(3): 중장기 대응방안을 중심으로 (조공장)
- 2018-08 환경 빅데이터 분석 및 서비스 개발 II (강성원)
- 2018-09 미세먼지 통합관리 전략 수립 연구 (주현수)
- 2018-10-01 2018 녹색경제협동연구 사업보고서 (안중호)
- 2018-10-02 한국 제조업의 환경경제효율성 분석 (김중호)
- 2018-10-03 녹색경제 전환을 위한 지속가능한 환경재정 구축 방안: 지속가능발전 정합성 제고를 위한 환경재정 개편 방향 (김호석)
- 2018-10-04 환경기반시설 사업·투자의 타당성·효과성 평가사업(II) (문현주)
- 2018-10-05 국가 친환경 에너지전환 추진을 위한 총괄연구 (이상엽)
- 2018-10-06 녹색사회로의 전환을 위한 정책평가 기반 마련 연구: 개발사업의 사회영향 모니터링을 중심으로 (신용승, 조공장)
- 2018-11 농촌지역 환경복지 증진을 위한 가축매몰지 피해 관리 방안 연구(III) (황상일, 현윤정)
- 2017년 2017-01 물환경 서비스와 물 인프라의 지속가능성 평가(IV) (류재나, 강형식)
- 2017-02 빅데이터를 이용한 대기오염의 건강영향 평가 및 피해비용 추정(III) (안소은)
- 2017-03 생물다양성협약 이행·지원 프로그램 기획·운영(III) (황상일)
- 2017-04 환경평가 지원을 위한 지역 환경현황 분석 시스템 구축 및 운영 (문난경, 이영준, 박중윤)
- 2017-05 환경·경제 통합분석을 위한 환경가치 종합연구 (안소은)
- 2017-06 원전사고 대응 재생계획 수립방안 연구(2): 비상대응계획을 중심으로 (조공장)
- 2017-07 환경 빅데이터 분석 및 서비스 개발 (강성원)
- 2017-08-01 녹색경제 성과확산 (공성용)
- 2017-08-02 환경기반시설 사업·투자의 타당성·효과성 평가사업 (I) (문현주)
- 2017-08-03 환경유해보조금 추계 및 개편방향 연구: 화석연료보조금을 중심으로 (김중호)
- 2017-08-04 사회적 경제를 활용한 친환경 소비 확산방안 (김동현)
- 2017-08-05 자연해택 평가를 통한 지역경제 활성화 방안(II) (김충기)
- 2017-08-06 매공유역의 기후변화 대응 식량안보와 지속가능한 물관리 정책 연구 (강상인)
- 2017-09 농촌지역 환경복지 증진을 위한 가축매몰지 피해 관리방안 연구(II) (황상일, 현윤정)
- 2017-10 석탄화력발전 연료대체 시나리오별 환경·건강영향 분석 (주현수)
- 2017-11 어린이 환경건강 관리 개선방안 연구 (정다은)
- 2017-12 저탄소·친환경 전원 기반 마련에 따른 전기요금 개편의 국민수용성 제고를 위한 효과적 소통 방안 (이승준)
- 2017-13 국가 리스크 관리를 위한 기후변화 적응역량 구축·평가 (채여라)
- 2017-14-01 (총괄) 동아시아 환경공동체 성과 확산 (추장민)
- 2017-14-02 지속가능한 동시베리아 지역공동체 발전전략 연구 (강상인)

2017-14-03 환경거버넌스 강화를 위한 공공참여제도 한·중 비교연구 (정우현, 이정석)

2017-14-04 동북아 국제정세 변화에 대응한 지역 환경협력 추진전략 (추장민)

2017-14-05 KETI 북한환경동향 2017년 (추장민)

- 2016년
- 2016-01-01 기후환경 대응역량 평가체계 구축 (채여라)
 - 2016-01-02 기후변화에 따른 국가 리스크 정량화 연구(Ⅲ): 연안시스템을 중심으로 (조광우)
 - 2016-02 개발사업의 소음모니터링 분석과 개선방안 (선효성)
 - 2016-03 온실가스 감축정책 평가를 위한 환경경제모형 개발·운용(Ⅲ) (강성원, 박창석)
 - 2016-04-01 한중일 3국의 환경투자가 산업에 미치는 영향 비교분석 및 환경산업 활성화 방안 연구 (이정석)
 - 2016-04-02 통일 대비 북한지역 자연재해 대응을 위한 자료 구축과 남북협력 방안 연구(Ⅰ) (강택구)
 - 2016-05 물환경 서비스와 물 인프라의 지속가능성 평가(Ⅲ) (강형식)
 - 2016-06 빅데이터를 이용한 대기오염의 건강영향 평가 및 피해비용 추정(Ⅱ) (안소은)
 - 2016-07 셋강 관리 및 이용 활성화 방안 연구(Ⅱ) (강형식)
 - 2016-08 생물다양성협약 이행 지원 프로그램 기획·운영 (이현우)
 - 2016-09 환경평가 지원을 위한 지역 환경현황 분석 시스템 구축 및 운영 (문난경)
 - 2016-10 환경·경제 통합분석을 위한 환경가치 종합연구 (이창훈)
 - 2016-11 원전사고 대응 재생계획 수립방안 연구(1): 후쿠시마 원전사고의 중장기 모니터링에 기반하여 (조공장)
 - 2016-12-01 2016 녹색경제협동연구 사업보고서 (이창훈)
 - 2016-12-02 녹색경제 평가를 위한 지표체계 개발 (김중호)
 - 2016-12-03 친환경적 태도-행동 분석 모형 구축을 통한 친환경소비 활성화 방안 연구 (곽소윤)
 - 2016-12-04 자연해택평가를 통한 지역경제 활성화(Ⅰ) (김충기)
 - 2016-12-05 아태지역 녹색경제 이행과 메콩유역 농업부문 융합혁신 전략 연구 (강상인)
 - 2016-13 농촌지역 환경복지 증진을 위한 가축매몰지 피해 관리방안 연구 (황상일)
 - 2016-14 대도시지역의 극한 홍수로 인한 복합영향 매커니즘 분석 (채여라)
- 2015년
- 2015-02-01 환경성을 고려한 재생에너지 자원관리의 발전전략 (권영한)
 - 2015-02-02 화력발전소 회처리에 따른 환경영향 최소화방안 연구(Ⅱ) (맹준호)
 - 2015-02-03 해양에너지 개발을 위한 전략환경평가방안 연구 Ⅱ: 해상풍력 발전사업의 입지선정 방안을 중심으로 (김태윤)
 - 2015-03-01 기후환경 리스크 전망과 국가전략(Ⅱ) (박창석)
 - 2015-03-02 기후변화에 따른 국가 리스크 정량화 연구 (Ⅱ): 연안시스템을 중심으로 (조광우)
 - 2015-04 환경평가 모니터링 사업 (이영준)
 - 2015-05 온실가스 감축정책 평가를 위한 환경경제모형 개발·운용(Ⅱ) (김용건)
 - 2015-06-01 지속가능발전 관점에서 본 새마을운동 재조명 (강택구)
 - 2015-06-02 북한지역 하천실태조사 및 지속가능한 이용방안 연구(2): 압록강유역 하천보전 및 지속가능개발 국제협력방안 (추장민)

- 2015-06-03 동아시아 대도시 대기질 개선을 위한 국제 공동 연구 (심창섭)
- 2015-07 물환경 서비스와 물 인프라의 지속가능성 평가(II) (강형식)
- 2015-08 빅데이터를 이용한 대기오염의 건강영향 평가 및 피해비용 추정 (안소은)
- 2015-09 생물다양성협약 이행 지원 프로그램 기획·운영 (이현우)
- 2015-10 환경평가 지원을 위한 지역 환경현황 분석 시스템 구축 및 운영 (문난경)
- 2015-11 셋강 관리 및 이용활성화 방안 연구(I) (강형식)
- 2015-12-01 환경정책이 일자리 창출에 미치는 효과 연구 (강만옥)
- 2015-12-02 Post-2015 SDGs 대응 녹색경제 이행 전략 연구 (강상인)
- 2015-12-03 자원순환경제로의 이행을 위한 정책평가 방법론 개선: 폐기물산업연관표 구축 및 활용을 중심으로 (신상철)
- 2015-12-04 녹색경제 확산을 위한 국제협력방안(II): 메콩지역의 월경성 전략환경평가체계 구축을 중심으로 (유현석)
- 2015-12-05 환경분야 일자리 수요 현황 및 전망 (김종호)
- 2015-13-01 캄보디아-한국 환경연구센터 설립의 계획 수립에 관한 연구 (유현석)
- 2015-13-02 A Study on Policy Directions for the Water-Food-Energy Nexus (I) (김호석)
- 2015-14 자연자본의 지속가능성 제고를 위한 의사결정 지원체계 개발 (이현우)

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

본 책자는 환경표지 인증을 받은
용지로 인쇄되었습니다.

기후변화를 고려한 미세먼지 예측 및 중장기 관리정책 수립 연구

A Study on Predicting Levels of Particulate Matter and Devising Mid- to
Long-Term Management Policy in Consideration of Climate Change

KEI 한국환경정책·평가연구원
Korea Environment Institute

30147 세종특별자치시 시청대로 370 세종국책연구단지 B동(과학·인프라동) 8~11층
TEL. 044-415-7777 FAX. 044-415-7799 <http://www.kei.re.kr>

9 791159 803840 93530
ISBN 979-11-5980-384-0