

발 간 등 록 번 호

12-1790213-000005-01



미세먼지 현황 분석 및 개선 보고서

본보고서



미세먼지 문제 해결을 위한
국가기후환경회의

축 사

안녕하십니까?

우리 인류는 지금 문명사적 전환기에 서 있습니다. 약 1만여년 전 신석기 농업혁명부터 산업혁명과 정보혁명을 거쳐 이룩해 온 풍요롭고 안락한 인류 문명이 이제 더는 지속 가능하지 않다는 경고음이 울리고 있습니다. 지구촌 곳곳에서 폭염, 홍수, 산불 등 자연재해가 끊이지 않고, 식량난, 난민, 테러, 빈부격차와 양극화, 신종 전염병(COVID-19) 등이 하나뿐인 지구와 인류의 삶을 되돌릴 수 없는 위기로 몰아넣고 있습니다.

이 모든 위기의 저변에는 인간의 활동이 만들어 낸 기후위기가 자리 잡고 있습니다. 인류세(anthropocene)로 지칭되듯이 인간의 활동이 지구의 운명에 결정적 영향을 미치는 새로운 지질시대가 이미 도래했음을 인식하고, 지금 당장 자연의 경고에 귀를 기울이고 지속 가능한 미래를 위해 파괴적 변혁에 나서야 할 때입니다.

미세먼지 역시 기후변화로부터 자유로울 수 없습니다. 미세먼지와 기후 변화는 마치 동전의 양면과 같습니다. 당면한 기후위기를 극복하고 온 국민이 안심하고 숨 쉴 권리를 누릴 수 있도록 미세먼지 문제 해결에 나서야 할 이유입니다.

국가기후환경회의 산하 과학기술위원회가 미세먼지 현황 분석 및 개선 보고서를 발간한 것도 당면한 미세먼지 문제 해결을 위한 노력의 산물입니다. 무엇보다 국내 최고의 전문가들이 함께 머리를 맞대고 미세먼지의 발생 원인부터 대응방안에 이르기까지 과학적인 진단과 처방을 하고 있습니다. 정책 없는 기술은 맹목적이고 기술 없는 정책은 공허할 수 있으므로 정책과 기술은 상호연계되어 함께 가야 합니다. 이 보고서가 미세먼지에 대한 폭넓은 과학적 연구분석을 확산하고 과학기술자와 정책결정자 간의 인식 공유에 가교 역할을 해 줄 것으로 기대합니다.

끝으로 본 보고서를 알차게 준비해 주신 과학기술위원회 김용표 위원장과 여러 위원의 노고에 깊은 감사의 마음을 전합니다.

감사합니다.

2020. 5.

미세먼지 문제 해결을 위한 국가기후환경회의

위원장 반기문  기문

발 간 사

미세먼지 문제를 과학적으로 이해하고, 그 해결책을 제시하기 위한 「미세먼지 현황 분석 및 개선보고서」를 발간하게 되어 기쁩니다.

국민의 미세먼지에 대한 불안은 지난 2013년부터 높아지고 있습니다. 이에 따라, 정부에서는 그동안 여러 대책을 발표하고 실행하며 노력하고 있지만, 그 불안을 해소하지는 못하고 있습니다. 이를 통해, 미세먼지 문제를 해결하기 위해서는 국민이 미세먼지의 어떤 점을 불안해하는지를 이해하여야, 효과적인 대책 수립이 가능하다는 것이 명확해졌습니다.

2019년 4월 ‘미세먼지 문제 해결을 위한 국가기후환경회의’가 출범하여 근원적인 미세먼지 문제 해결을 위해 활동하고 있습니다. 또한, 550명으로 구성된 ‘국민정책참여단’을 통해 다양한 국민의 의견을 듣고, 과학기술위원회 등 5개 전문위원회를 구성하여 미세먼지 관련한 여러 문제를 검토하여 미세먼지 문제 해결을 위한 정책 제안을 하고 있습니다.

작년 6월에 열린 국가기후환경회의 국민대토론회와 여론조사 등의 결과, 국민들이 미세먼지 문제에서 불안 및 불만을 느끼는 주요 현안은 외부영향, 농도추이, 저감 우선순위, 고농도 저감방안 등으로 나타났습니다. 국민은 미세먼지 문제를 연구 분야로 인식하는 것이 아니고, 국민이 알고 싶고, 불안해하는 쟁점사항으로 인식하고 있다는 것을 확인하였습니다. 또한, 7월에 열린 전문가 컨퍼런스에서는 9개의 의제(현안)에 대해 전문가들이 과학적인 연구 결과를 근거로 동의 수준을 확인하였습니다. 이런 결과를 바탕으로 국민들이 불안해하고 궁금해 하는 현안에 대해 과학적인 현황을 파악하고, 현안을 해결하기 위한 방향 제시가 절실하게 필요하다는 것을 확인하였습니다.

과학기술위원회는 5개 전문위원회의 하나로, 미세먼지 문제에 대한 과학기술 분야의 주요 현안 도출, 현황 및 문제점 진단, 개선방향 제시를 주요 기능으로 하고 있습니다. 과학기술위원회는 지난 12월 정책결정자를 위한 이슈페이퍼 「미세먼지: 과학기반 해결 - 과학기술 연구결과와 정책 간 연계성 제고 및 소통 강화 -」를 발간하였습니다. 또한, 지난해 9월부터 미세먼지 문제 중 국민이 관심을 갖는 10가지 현안에 대해 현재까지의 과학기술 연구결과와 그 결과의 소통 현황,

개선방안에 대해 논의하여 이 보고서를 완성하였습니다. 본 보고서에서 다룬 10가지 현안에는 미세먼지 발생 원인, 측정 및 예보 현황, 정책 분석, 국제협력 방안 등이 포함되어 있어 현재의 미세먼지 현황과 대응 관련 현주소를 파악하는데 도움이 될 것입니다.

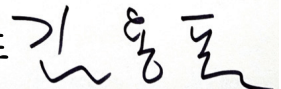
미세먼지 문제를 해결하기 위해서는 전체적인 대기오염물질의 배출, 변환과정에 대한 과학적 이해가 필수적입니다. 또한, 이러한 대기오염 문제는 주로 에너지 사용에서 배출되므로 기후위기와도 연관됩니다. 사회적 복합문제인 미세먼지 해결을 위해서는 과학기술 연구결과의 정책 활용도를 제고하고, 사회경제 시스템 차원에서 문제 해결을 위해 노력하여야 합니다.

이와 더불어, 미세먼지 문제는 우리의 삶과 사회경제와 밀접하게 연관되어 있기에 쉽게 해결할 수 없는 난제임에 틀림없습니다. 그러나 미세먼지는 우리 인간이 만들어낸 삶의 산물이므로 우리가 노력하면 반드시 해결할 수 있습니다. 대기 및 기후 정책이 성공적으로 추진되기 위해서는 대기환경과 기후위기에 대한 인식이 사회 전반에 확대되어 국민이 자발적인 변화에 동참하여야 합니다. 이러한 기반 위에 정책결정자의 의지에 따라 대기 및 기후 문제 해결을 위한 정책 추진이 가능합니다. 이번에 발간한 「미세먼지 현황 분석 및 개선보고서」가 대기환경과 기후위기 정책이 효과적으로 추진되기 위한 일련의 과정에서 국민과 정책결정자에게 도움이 되고 필요한 정보가 되기를 기대합니다.

끝으로, 보고서 작성에 참여하여 주신 과학기술위원회 위원 여러분과 사무처 직원 여러분께 감사드립니다. 그 가운데에서도 보고서 요약문과 이슈페이퍼 작성에 참여한 송미정 간사위원과 채여라 위원께 감사드립니다.

2020. 5.

미세먼지 문제 해결을 위한 국가기후환경회의

과학기술위원회 위원장 김용표 

CONTENTS

SESSION

01

고농도 사례의 원인 및 특성

요약	3
제1장 배경	5
제2장 현황 및 문제점	13
제3장 개선 방안	15

SESSION

02

이차생성 기작

요약	19
제1장 배경	21
제2장 현황 및 문제점	28
제3장 개선 방안	33

SESSION

03

미세먼지 비상저감조치 효과

요약	39
제1장 배경	41
제2장 현황 및 문제점	45
제3장 개선 방안	48

SESSION

04

대기질 국가측정망 신뢰도

요약	77
제1장 배경	79
제2장 현황 및 문제점	81
제3장 개선 방안	90

SESSION

05

예보 모델링 정확도

요약	103
제1장 배경	105
제2장 현황 및 문제점	107
제3장 개선 방안	109

SESSION

06

국외 영향

요약	117
제1장 배경	119
제2장 현황 및 문제점	122
제3장 개선 방안	126

SESSION

07

배출량 자료 신뢰도

요약	131
제1장 현황 분석	133
제2장 진단	134
제3장 개선방안	137

SESSION

08

대기 관리 정책 체계

요약	151
제1장 현황 분석	152
제2장 문제점 및 개선방향	160

SESSION

09

대기 관리 정책 평가 체계

요약	183
제1장 현황 분석	185
제2장 문제점 및 개선방향	190

SESSION

10

국제 연구 및 협력

요약	209
제1장 현황 분석	212
제2장 문제점 및 개선방향	219

* 본 보고서에서 다르게 표시한 경우 외에는 미세먼지는 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})를 통합하여 사용하였음



미세먼지



현황 분석 및



개선 보고서

고농도 사례의 원인 및 특성

요약 | 3

제1장 배경 | 5

제2장 현황 및 문제점 | 13

제3장 개선 방안 | 15

대표 집필자

이지이 이화여대 환경공학과 교수

공동 집필자

임호진 경북대 환경공학과 교수

이미혜 고려대 지구환경과학과 교수

정남순 환경법률센터 부소장

이건욱 일진복합소재 상무

SESSION

01

고농도 사례의 원인 및 특성

대표 집필자

이지이 이화여대 환경공학과 교수

공동 집필자

임호진 경북대 환경공학과 교수

이미혜 고려대 지구환경과학과 교수

정남순 환경법률센터 부소장

이건욱 일진복합소재 상무

요약

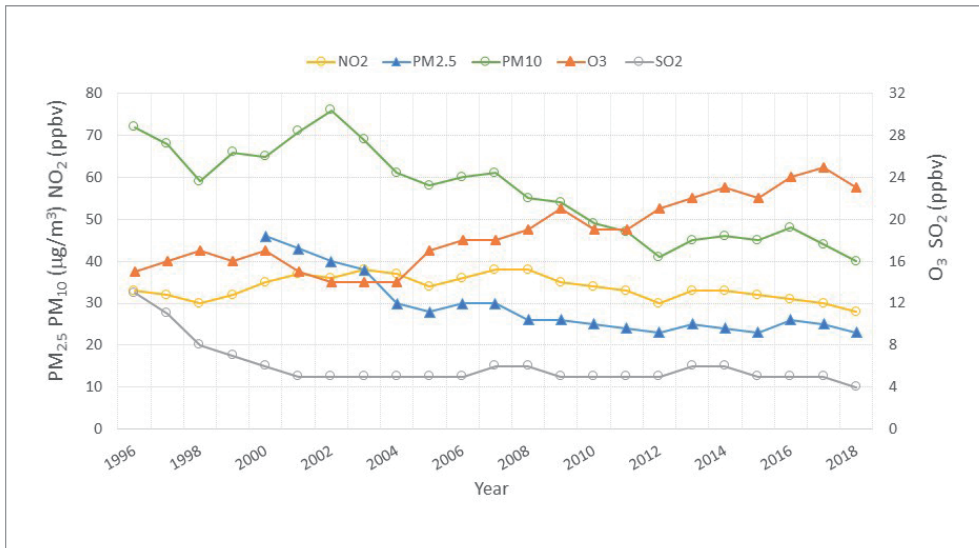
- 최근 4년간 국내 전 지역의 연평균 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도의 감소추세는 미세먼지(PM₁₀)에 비해 약하게 나타남
 - 특히, 서울지역의 경우 1996년 이후 PM_{2.5}의 연평균농도가 지속해서 감소해 왔으나, 2008년부터 큰 변화가 없음
 - PM_{2.5}의 연평균 농도와 일평균 “나쁨”일수의 감소추세는 뚜렷하지 않고, 고농도 기간 시간당 농도는 점점 악화하였으며, 지속시간도 길어지는 것으로 나타남
- PM_{2.5}의 농도에 대한 경향분석은 서울지역에 집중되어 진행되었음
 - 실제로 지역별 PM_{2.5}의 연평균 농도는 서울에 비해 다른 지역들이 높은 것을 확인할 수 있음
 - 특히 전북과 충북의 연평균 PM_{2.5} 농도는 지속적으로 서울보다 높은 상태임
- 2013~2016년과 2018년 PM_{2.5}의 고농도 사례 분석 결과 고농도 미세먼지 발생의 일반적인 특성이 나타남
 - 고농도 미세먼지 발생은 이동성 고기압의 발달에 따른 미세먼지 및 전구물질의 장거리 유입과 이후 공기 정체에 의한 오염물질 축적으로 인한
 - 중국의 영향이 클 때 황산염이 증가하며 PM_{2.5} 농도가 상승함
 - 유입된 오염물질이 축적되면 황산염이 증가하고, 정체 상태에서는 질산염이 증가하면서 유기성분, 특히 2차 유기에어로졸의 기여도는 상대적으로 낮음

- 황산염은 한반도 유입 후 추가생성이 많지 않으며, 질산염과 유기입자는 국지 생성이 많음
- 고농도 기간 서울에서는 질산염의 농도 및 기여도가 컸으며, 최근 질산염 기여도가 더 증가함
- 현재까지 선진국에 비해 국내의 고농도 미세먼지 원인규명에 대한 기술수준은 “어느정도(~50%)” 진행되는 것으로 평가*됨
 - * 과학기술위원회 위원 설문 결과(13쪽 참고)
 - 주요 원인으로는 ①고농도 미세먼지 생성 메커니즘을 규명하기 위한 집중 관측 기회 부재와, ②PM_{2.5} 상시 관측 자료의 기간이 짧고, ③원인 규명에 필요한 고가 분석 장비 보유 및 ④연구 인력확보가 어려운 점으로 판단됨
- 개선방안으로 국내 지역별 특성을 반영한 고농도 미세먼지 원인규명 연구, 특히 이차생성 메커니즘 규명 연구가 필요하고, 더불어 동북아시아 지역 특성을 고려한 맞춤형 연구가 수행되어야 함
 - 또한, 미세먼지 성분 및 기여도에 대해 신뢰할 수 있는 정보를 체계적으로 생산하고, 국민이 쉽게 접근하여 이해할 수 있도록 하는 정보 전달방법의 개발이 필요함

제1장 배경

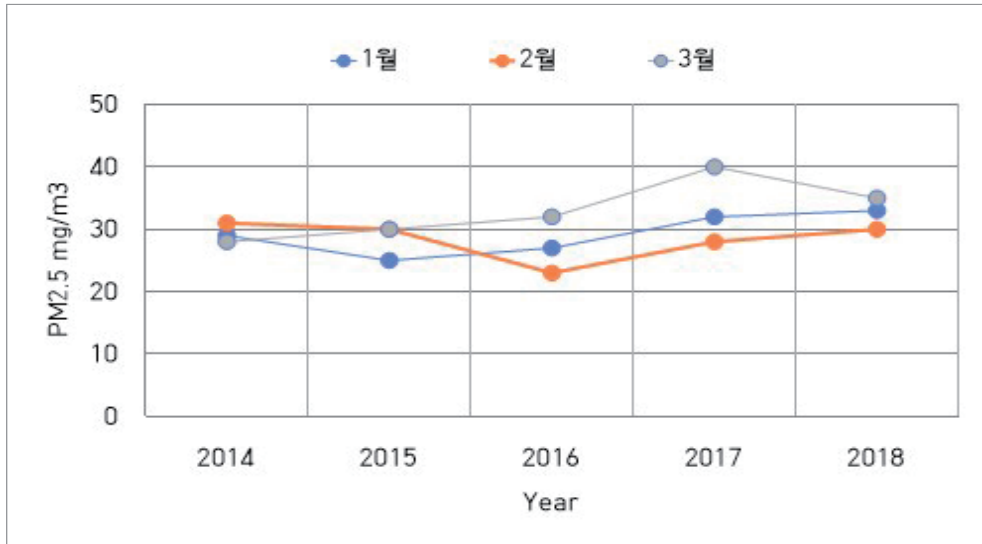
(1) 고농도 미세먼지 발생 상황

- 여러 연구결과에 의하면 최근 4년간('15~'18년) 국내 전 지역의 평균 미세먼지 (PM₁₀)의 연평균 농도는 꾸준히 감소 추세에 있으나('15년 48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 '18년 41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 감소), 감소폭은 매우 미미한 상태임
 - 특히 PM_{2.5}는 전국적으로 2015년부터 측정되었으나 서울시의 경우 1996년부터 자체 측정결과를 확보하고 있음
 - 이 결과 <그림 1-1>에서 보이는 바와 같이 PM_{2.5}의 연평균 농도는 감소 추세이지만 2008년 이후 큰 변화가 없음.
 - 그러나, 1~3월의 경우 <그림 1-2>와 같이 오히려 PM_{2.5}의 농도가 증가하는 추세를 보임



※ 출처: 서울시 대기환경정보(<http://cleanair.seoul.go.kr/main.htm>)

<그림 1-1> 서울시 기준 대기오염물질의 1996~2018 연평균 농도 변화



※ 출처: 서울시 대기환경정보(<http://cleanair.seoul.go.kr/main.htm>)

〈그림 1-2〉 서울시 2014~2018년 1~3월의 PM_{2.5} 월평균 농도 변화

- 일평균 농도를 기준으로 전국지역 연간 미세먼지 “나쁨” 발생일수는 감소추세이나, PM_{2.5} “나쁨” 발생일이 연간 50~60일(1년 중 2개월에 해당하는 기간)에 달하고 고농도 미세먼지의 연일 발생도 빈번해지는 양상을 보임(표 1-1 참조)

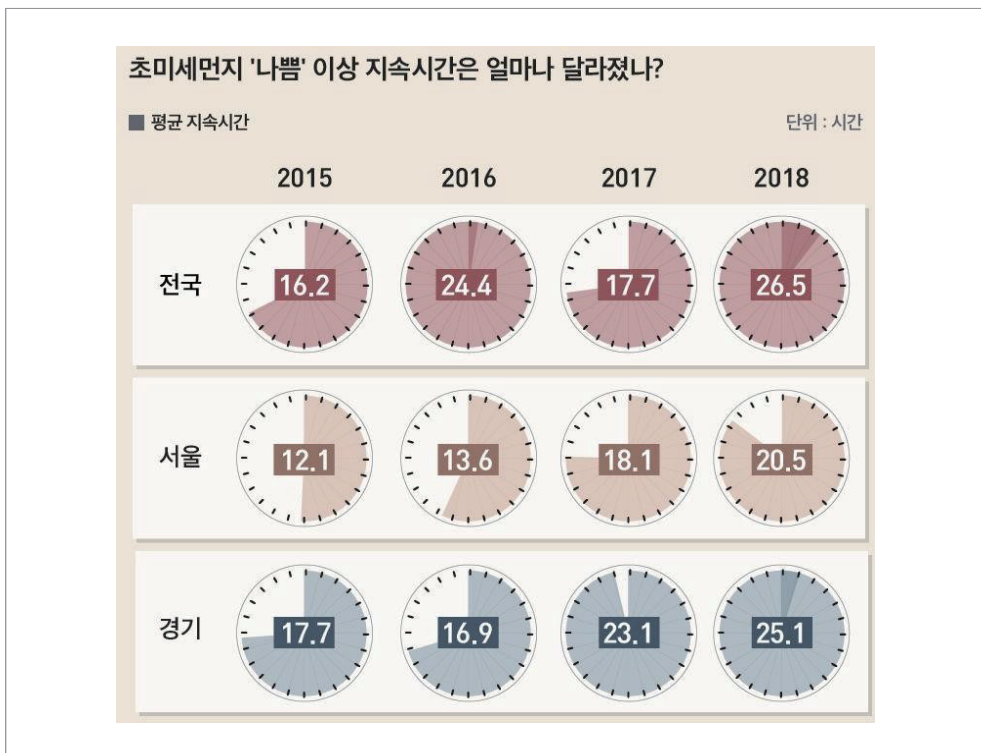
〈표 1-1〉 전국지역 일평균 PM₁₀ 과 PM_{2.5} 평균 “나쁨” 발생일수

구분	연도	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	합계
PM ₁₀	2015년	2	8	9	0	1	1	0	0	0	4	0	0	25
	2016년	0	0	3	4	3	0	0	0	0	0	2	1	13
	2017년	4	1	1	2	3	0	0	0	0	0	0	3	14
	2018년	4	0	4	4	2	0	0	0	0	0	5	2	21
PM _{2.5}	2015년	6	9	8	3	1	5	3	2	0	9	5	11	62
	2016년	9	6	14	6	8	1	0	0	1	3	8	6	62
	2017년	9	6	16	4	3	1	2	0	6	1	3	7	58
	2018년	12	10	10	4	3	2	0	0	0	2	10	5	58

※ 자료: 한국환경공단, 대기환경연보

※ '17년 기준 “나쁨”일수 기준이 51 μ g/m³이상에서 36 μ g/m³이상으로 변경

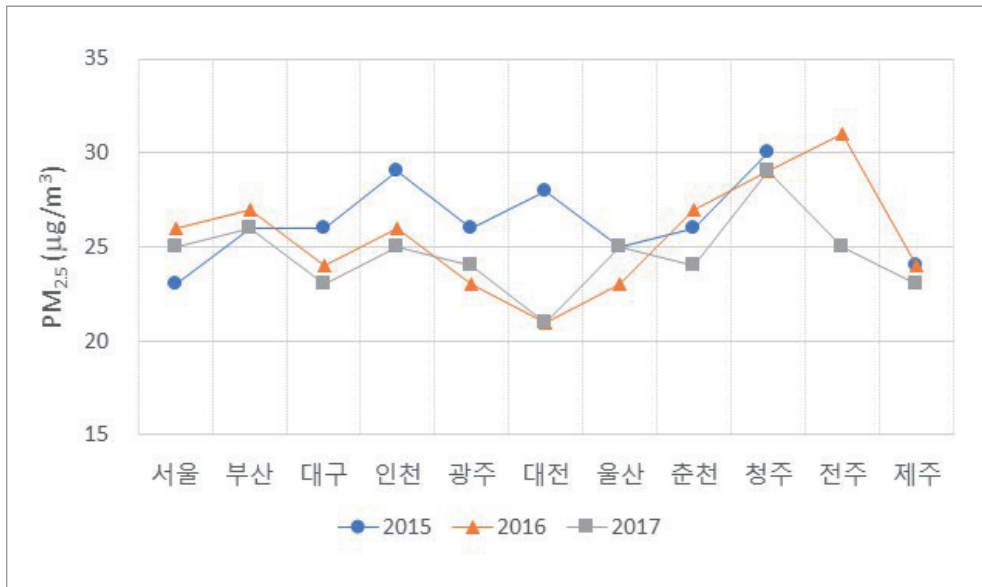
- 시간단위로 살펴볼 경우 고농도 기간의 초미세먼지 농도는 점점 더 악화되고 지속시간도 길어지는 것으로 나타남
 - 초미세먼지 '나쁨' 이상 농도의 평균 지속시간은 서울의 경우, 2015년 1분기 12.1시간에서 2018년 1분기 20.5시간으로 8시간 증가했으며, 경기도는 17.7시간에서 25.1시간으로 증가하여 전국 최장 지속시간을 기록함
 - 2018년 1분기에 초미세먼지 '나쁨' 이상 지속시간이 20시간을 넘긴 광역단체는 경기(25.1)와 인천(22.3), 충북(21.3), 서울(20.5) 4곳이었음
 - 1분기의 1시간 평균 초미세먼지 농도의 최대 값이 매년 증가함
 - 전국적으로 2015년 1분기 95.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 2018년 1분기 102.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 소폭 증가했으나 서울은 2015년 95.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 2018년 149.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 50% 이상 증가함



※ 출처: SBS 보도, 에어코리아, 마부작침 분석자료

〈그림 1-3〉 초미세먼지 '나쁨' 이상 지속시간 비교

- PM_{2.5}의 지역별 농도를 살펴보면 <그림 1-4, 표 1-2> 전체적으로 감소추세이지만 지역별로 서로 다른 특성을 보이고 있음
 - 도시별 연도별 PM_{2.5} 농도를 살펴보면 서울에 비해 다른 지역들의 연평균 농도가 높은 것을 확인할 수 있음
 - 특히 전북과 충북의 연평균 PM_{2.5}농도는 연도별 감소추이를 보이고 있으나 지속해서 서울지역의 연평균 농도보다 높은 상태임



※ 출처: 서울시 대기질 평가보고서 2017

<그림 1-4> 2015~2017년 우리나라 주요 도시의 PM_{2.5} 연평균 변화

<표 1-2> 2015~2018년 주요 도시별 연평균 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도 추이

연도	강원	경기	경남	경북	광주	대구	대전	부산	서울	세종	울산	인천	전남	전북	제주	충남	충북
2015	26	26	25	28	26	26	28	26	23	25	29	25	35	23	29	30	
2016	28	28	25	23	23	24	21	27	26	23	23	26	24	31	22	26	
2017	26	27	23	23	24	23	21	26	25	23	25	25	20	29	22	27	
2018	23	25	20	24	24	22	22	23	23	21	23	22	20	25	19	21	

※ 세종시는 2016년부터 측정

※ 자료: 한국환경공단, 대기환경연보

- “나쁨” 발생일수도 초미세먼지 연평균 농도 추이와 유사함
 - 충북의 경우 '18년 “나쁨”이상 발생일수가 103일로 일년 중 약 1/3에 해당되는 기간으로 심각한 편임
- 연평균 농도가 평균치보다 낮은 강원, 대전, 세종, 인천, 충남 등도 “나쁨” 이상 일수가 최소 45일 이상(18년 기준)으로 1달 이상은 미세먼지로 인한 대기질이 나쁜 상태임

〈표 1-3〉 2015~2018년 주요 도시별 PM_{2.5} 등급 “나쁨” 이상 발생일수

구분		강원	경기	경남	경북	광주	대구	대전	부산	서울	세종	울산	인천	전남	전북	제주	충남	충북
나쁨 일수 (A)	'15	90	74	54	51	69	76	101	67	44	/	76	96	57	93	47	63	76
	'16	86	86	51	79	51	58	40	71	73	24	58	77	48	120	43	83	87
	'17	70	82	34	46	63	43	32	61	61	50	71	64	20	94	36	52	87
	'18	47	69	39	76	63	58	44	60	57	48	73	47	37	86	21	49	99
매우 나쁨 일수 (B)	'15	0	1	0	4	3	0	4	0	0	/	0	3	1	11	3	9	5
	'16	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	1	0
	'17	2	6	0	2	2	2	0	1	3	1	0	1	0	4	0	0	6
	'18	0	5	0	1	3	0	1	0	4	0	0	2	0	1	0	1	4
나쁨 이상 일수 (A+B)	'15	90	75	54	55	72	76	105	67	44	/	76	99	58	104	50	72	81
	'16	86	86	51	83	51	58	40	71	73	24	58	77	48	123	45	84	87
	'17	72	88	34	48	65	45	32	62	64	51	71	65	20	98	36	52	93
	'18	47	74	39	77	66	58	45	60	61	48	73	49	37	87	21	50	103

※ 자료: 한국환경공단, 대기환경연보

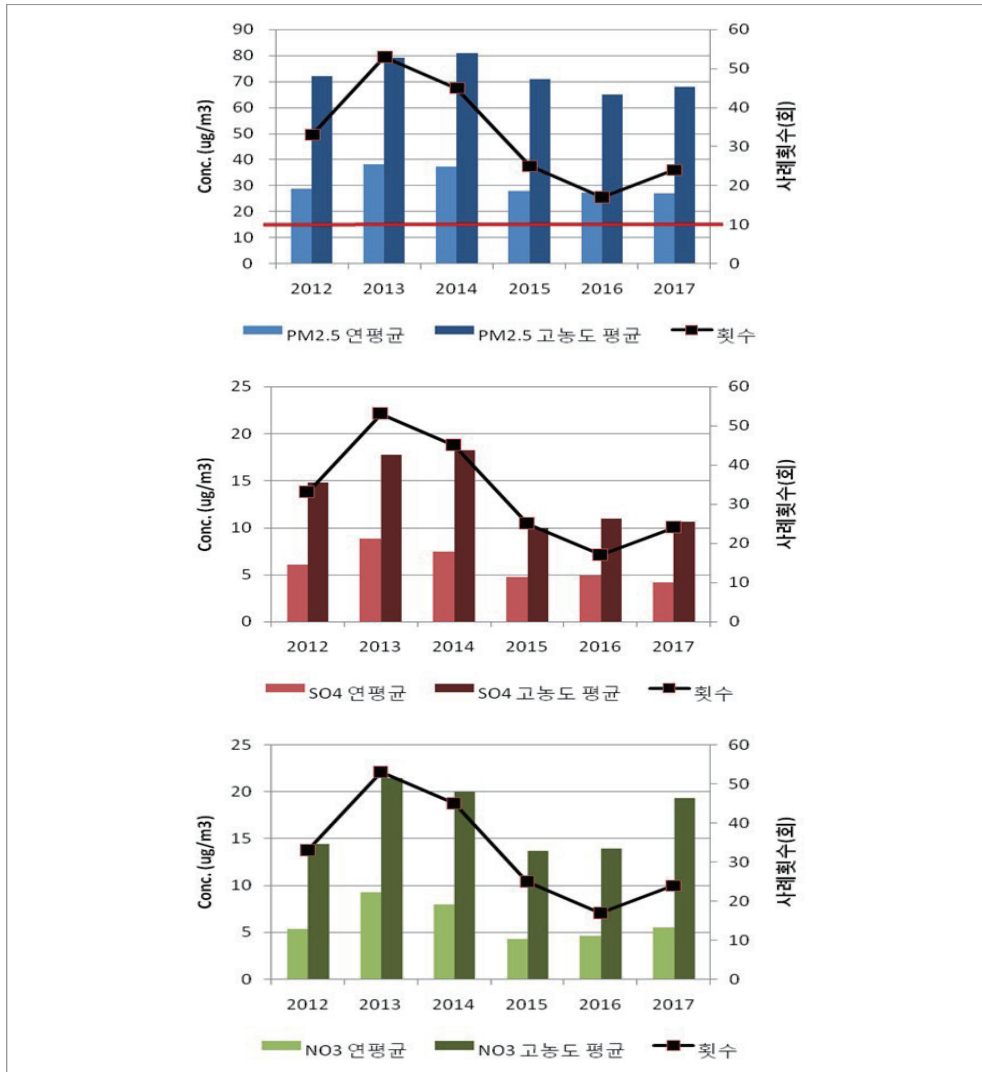
(2) 고농도 미세먼지 발생 원인 및 특성

- 고농도 미세먼지 발생 특성 파악을 위한 조사 및 연구가 이루어짐
 - 국립환경과학원 기후대기연구부 대기환경연구과에서 매년 “대기오염집중측정소 고농도 사례집”을 발간함
 - 미세먼지 범부처 프로젝트 사업 중 “현안이슈 대응을 위한 미세먼지 발생원인 및 정량적 기여도 규명” 일환으로 2013년~2016년과 2018년 집중측정기간 동안 PM_{2.5}의 고농도 사례 분석을 실시함

■ 2013년~2016년과 2018년 PM_{2.5}의 고농도 사례 분석

- 2013년~2016년의 고농도 미세먼지 사례는 한반도 전역에 걸쳐 고농도가 발생하였고, 장기간 계속된 5개의 사례를 선정하여 분석함
- 고농도 미세먼지 발생 시 이동성 고기압의 발달과 이에 따른 미세먼지 및 전구물질들의 장거리 유입이 발생하고, 이후 공기 정체에 의한 오염물질 축적이 일어남
- 중국의 영향이 클 때 황산염이 증가하며 PM_{2.5} 농도가 상승함
 - 유입된 오염물질이 축적되면 황산염이 증가함
 - 정체 상태에서는 질산염이 증가하면서 유기성분, 특히 2차 유기에어로졸의 기여도는 상대적으로 낮음
 - 황산염은 한반도 유입 후 추가생성이 많지 않으며, 질산염과 유기입자는 국지 생성이 많음
- 국립환경과학원이 2개의 대기질 모델 방식을 이용하여 2018년 11월 3~6일의 미세먼지 농도에 대한 국내·국외 기여도를 각각 측정한 결과, 국내 영향은 약 55~82%, 국외 영향은 18~45%로 나타남
 - 즉, 국내 고농도 미세먼지 현상에 대한 국외 유입 기여도는 18~69%로 일별 편차가 크게 나타나는데, 이는 결국 고농도 미세먼지 현상에 대한 국내 발생 미세먼지의 기여도가 클 수 있음을 의미함
- 겨울철 백령도로 유입된 입자는 토양으로부터 암모니아 발생이 작아 상대적으로 산성도가 높았으나 국내 영향이 결합되었을 때는 산성도가 낮았음
 - 이는 지역별로 고농도 미세먼지 발생의 화학적 메커니즘이 다름을 의미함
- 평소 대비 고농도 사례 기간 서울에서 황산암모늄과 질산암모늄의 증가가 두드러지며, 최근에는 질산암모늄 영향이 두드러지고 <그림 1-5> 차량 배출 등 대부분 1차 배출은 기여도 감소함
 - 서울에서는 2차 이온의 비중이 크며, 제주도에서는 OC, EC의 비율이 높고 황산염의 비율이 질산염에 비해 크게 높음

- 광주의 경우, 황산염은 장거리 유입이 지배적인데 비하여 질산염은 장거리 유입뿐 아니라 불균일 반응에 의한 국지 생성도 중요함
- 2014년 여름 울산에서는 인근 산업단지에서 배출된 VOCs와 SO₂의 광화학 반응에 의하여 고농도가 발생하였으며, 고농도 발생시 질산염의 증가가 큼



※ 출처: 국립환경과학원

(그림 1-5) 2012~2017년 서울 PM_{2.5}의 질량과 황산염 질산염 농도의 연평균과 고농도 발생 시 평균농도 변화

- 이러한 일반 특성과 더불어 각 지역별 전구물질의 특성들에 따라 국지적 2차 생성 미세먼지의 발생 메커니즘이 다르게 나타남

(3) 고농도 미세먼지 발생의 심각성 인식

- '19년 3월 현대경제연구원이 발표한 '미세먼지에 대한 국민인식 조사' 보고서에 따르면, 응답자의 87.2%가 미세먼지로 인해 불편하다고 응답함('19년 2월 18일~2월 28일까지, 전국 성인 남녀 1,008명을 대상으로 설문조사 실시)
 - 미세먼지로 인한 가장 심각한 피해로는 '건강악화(59.8%)'가 꼽혔고, 이 외 '실외활동 제약(23.5%)', '스트레스 증가(10.3%)', '공기청정기·마스크 등 비용 증가(4.7%)' 등의 응답이 뒤를 이었음
 - 현재 미세먼지 주의보 발령일수를 반으로 줄이기 위한 비용을 지불할 의사가 '있다'는 응답은 55.0%로 '없다'는 응답(45.0%)보다 높게 나타남
 - 특히 월소득이 600만원 이상인 가구에서는 60.5%가 지불할 용의가 있다고 응답했으나, 월소득 200만원 미만 가구에서는 47.6%이었음
- 미세먼지의 원인에 대해서는 '중국 등 주변국의 영향'(73.8%)이라고 답한 응답자가 가장 많았고, '경유차 등 자동차 배출가스'(10.5%), '석탄화력발전소 등 에너지산업'(6.0) 등의 답변이 뒤를 이었음
 - 국민은 고농도 미세먼지 문제에 있어 국외 유입 미세먼지의 영향이 절대적이며 이에 대한 정부의 해결 노력이 소극적이라는 인식이 팽배함
 - 실제 고농도 미세먼지 발생 시 국외 유입의 기여도가 일정하지 않고, 국내 발생 미세먼지의 영향이 상당하여 국민 인식과 과학적 사실에 대한 이해가 일치하지 않는 문제가 있음

제2장 현황 및 문제점

(1) 현재 연구 결과가 국민에게 현안에 대한 답을 할 수 있는 수준은?

매우 미흡	약간 미흡	어느 정도	약간 만족	충분하게	완벽하게
		○			

■ 국내 연구현황

- 우리나라는 2019년 6월 기준 총 7개소의 대기환경연구소(구 대기오염집중측정소)를 운영 중이나, 측정자료의 심화분석을 통한 미세먼지 생성 기작에 대한 규명과 이해는 아직 명확히 이루어지지 않음
 - 특히, 대기환경연구소의 자료 공개여부 및 이를 활용하기 위한 지역 소재 연구기관과의 협력이 미흡함
- 고농도 미세먼지 발생특성이 지역별로 다르게 나타남에도 불구하고, 지역별 특성에 맞는 미세먼지 원인 규명이 이루어지지 않고 있으며, 지역별 미세먼지 생성기작 이해에 한계가 있음
 - 한·미 대기질 공동연구(KORUS-AQ) 시 항공측정을 통해 이차유기입자가 생성되는 과정 및 특성 규명과 차량 배기가스의 광화학반응에 의한 이차입자의 생성을 연구한 사례가 있으나 지역별 특성을 반영한 미세먼지 원인 규명까지는 한계가 있음
- 수도권 지역은 장기간 자료 구축이 어느 정도 진행되어 왔으나, 국내 산업단지, 농업지역, 산림지역 등에 관한 전구물질과 미세먼지 연구는 매우 미흡한 실정임
- 현재까지 연직 분포 측정자료는 제한적이고, 고농도 발생 시 국지적으로 배출된 대기오염물질에 의한 추가적인 생성 영향에 대한 평가는 이루어지지 않았음

■ 선진국 연구동향

- 미국의 국가 PM_{2.5} 관측망에서는 PM_{2.5}의 과학적 불확실성 해소를 위해 설치된 집중관측소(supersites)를 포함하여 PM_{2.5}의 화학적 성분을 측정하여 오염원과 배출원의 관계를 파악하고 있음
 - 1997년부터 지역특성에 맞는 국가 차원의 측정망 운영을 통한 수십년의 장기 모니터링과 학술 목적의 종합 모니터링을 수행하고 있음

- 미국, 유럽 등의 선진국에서는 지표 측정뿐만 아니라 무인 비행체(드론 포함), 풍선(balloon), 라이다(LIDAR), 항공 등을 이용한 연직 분포 측정을 통해 어느 고도에서 발생원이 주로 분포하는지 감시하고 있음
- 최근 중국은 고농도 미세먼지 원인 규명을 위해 대학, 연구소에서 현장 측정뿐만 아니라 실내외 챔버, 반응흐름관 등을 활용하여 실험실 기반 미세먼지 생성과 화학반응 연구를 함께 수행하여 미세먼지 입자의 성질을 이해하고 나아가 기후변화까지 설명하고 있음

■ 국내 연구수준 평가

- 우리나라는 미세먼지 측정자료에 대한 심화분석이 미흡하고, 미세먼지 생성 메커니즘 규명 관련 기술 수준이 주요국 대비 낮음
- 우리나라의 이러한 기술 부족 이유는
 - 첫째, 고농도 미세먼지 생성 메커니즘을 규명하기 위한 집중관측 기회 부재 (미국 공동연구단 1차례)
 - 둘째, 미세먼지의 화학조성 결과가 생산되는 대기환경연구소 상시 관측자료의 짧은 관측기간(2015년부터 본격적으로 진행)과 자료의 비공개
 - 셋째, 원인 규명에 필요한 고가 분석 장비 보유 및 연구 인력확보가 어려운 점으로 판단됨

(2) 현재 연구 결과가 국민에게 잘 전달되고 있는가?

매우 미흡	약간 미흡	어느 정도	약간 만족	충분하게	완벽하게
		○			

- 고농도 미세먼지 발생원인은 여러 요인에 기인하여 지역별로 다르게 발생하며, 시간에 따른 변동이 큼
- 고농도 미세먼지 발생원인 및 피해 영향 범위가 다양하기 때문에, 고농도 미세먼지 현상에 대한 의견들이 상충됨(미세먼지가 그렇게 위험하거나 심각한 수준이 아님 vs 매우 심각, 건강 등에 악영향 등)
- 이는 국민의 이해에 대한 혼란과 불안을 유발하여 정부의 관리 역량, 미세먼지 관련 연구 지원 체계, 외교 역량 등에 대한 불신, 회의적 견해를 조장할 수 있음

제3장 개선 방안

(1) 고농도 미세먼지 발생에 대한 원인규명을 위한 연구 개선

- 미세먼지 생성에 대한 현재의 과학적 이해는 선진국 환경을 기반으로 하고 있음
 - 그러나 고농도 발생은 지역적으로 기상 조건과 배출원이 다르므로 우리나라를 포함한 동북아시아 지역 특성을 고려한 맞춤형 연구가 필요함
- 중국 기원의 오염물질은 황해를 건너오며 이차적으로 생성되고, 우리나라는 복잡한 해안선과 지형으로 인해 국지 대기순환의 영향이 크므로 비균질 반응과 같은 이차생성 메커니즘 규명이 절실히 필요하며 이를 지역별 특성에 맞춘 상세 심화 연구가 필요함
- 동북아시아의 주요 대기오염물질 배출국인 중국의 오염물질 농도가 최근 배출량 감소로 급격하게 감소하고 있으므로 이에 따른 장거리이동 영향에 대한 장기간 지속적인 관측 및 평가 연구가 필요함
- 또한, 미세먼지 성분 및 기여도에 대한 신뢰할 수 있는 정보를 체계적으로 생산하고, 국민이 쉽게 접근하여 이해할 수 있도록 하는 정보 전달방법 개발이 필요함

(2) 정책/소통

- 고농도 미세먼지 현상에 대한 과학적인 원인규명 결과를 바탕으로 전문가와 정부의 실현가능한 저감대책 마련이 필요함
- 또한, 미세먼지 장기간 추이 등 국민에게 제공되는 미세먼지 관련 추이분석 및 영향 평가 등의 연구결과들에 대한 동일한 방법론이 적용된 통일성(기준이 되는 연구결과들)이 필요하고, 이를 바탕으로 국민과의 적극적 소통을 통한 불안감 해소가 필요함

● ● 참고문헌

1. 서울시 대기환경정보(<http://cleanair.seoul.go.kr/main.htm>)
2. 대기환경연보(2015), 국립환경과학원, 2016
3. 대기환경연보(2016), 국립환경과학원, 2017
4. 대기환경연보(2017), 국립환경과학원, 2018
5. 대기환경연보(2018), 국립환경과학원, 2019
6. 에어코리아, <https://www.airkorea.or.kr/index>
7. 마부작침. SBS 보도자료
8. 대기오염집중측정소 고농도 사례집(2017), 국립환경과학원, 2018



미세먼지



현황 분석 및



개선 보고서

이차생성 기작

요약 | 19

제1장 배경 | 21

제2장 현황 및 문제점 | 28

제3장 개선 방안 | 33

대표 집필자

임호진 경북대학교 환경공학과 교수

공동 집필자

이미혜 고려대학교 지구환경과학과 교수

이지이 이화여자대학교 환경공학과 교수

정남순 환경법률센터 부소장

SESSION

02

대표 집필자

임호진 경북대학교 환경공학과 교수

공동 집필자

이미혜 고려대학교 지구환경과학과 교수

이지이 이화여자대학교 환경공학과 교수

정남순 환경법률센터 부소장

● 요약

- 대기 중 미세먼지의 실효적인 저감정책 개발을 위해 미세먼지의 발생 원인에 대한 명확한 자료의 확보가 무엇보다 중요함
 - 미세먼지는 오염원에서 먼지 형태로 배출되는 일차배출과 가스상 전구체의 대기 화학반응을 거쳐 이차생성된 것으로 구분됨
 - 일차배출은 배출원 관리를 통해 자료가 상당히 축적되어 있지만 이차생성은 선진국에서 개발된 모델이 우리나라 대기의 이차생성 기작을 적절히 반영하지 못해 자료가 충분하지 않은 수준임
- 우리나라를 포함한 동북아시아의 미세먼지 이차생성 기작은 미국, 유럽 등의 상대적으로 깨끗한 환경과는 달라 독자적 연구와 함께 주변국의 연구동향 파악 및 협력이 필요함
 - 미세먼지 전구체인 SO₂, NO_x, NH₃, VOCs 농도가 선진국에 비해 높으면서 NH₃의 영향이 큰 양상을 나타냄
 - 높은 습도와 미세먼지의 미네랄 함량은 수용액상 반응과 표면반응을 비롯한 다상 불균일 반응이 잘 일어날 수 있는 조건임
 - 장거리 이동에 따른 변환과정을 거친 유입 물질들이 국내 배출 전구체와 반응하면 이차생성 기작은 더욱 복잡해짐

- 실험실과 현장측정 연구를 연계한 장기적이고 포괄적 접근이 요구됨
 - 선진국처럼 실험실과 현장측정 연구를 연계해서 모델 입력자료 개발까지 완성하기 위해서는 장기적 연구지원이 필수적임
 - 미세먼지 국가전략 프로젝트에서 스모그챔버를 이용한 미세먼지 이차생성 기작에 대한 연구를 수행중이지만 고농도 시기의 무기미세먼지의 높은 비중과 중국의 연구 동향을 감안하여 무기미세먼지 이차생성에 대한 기초연구도 필요함
- 연구수준 향상을 위한 연구장비의 고도화 및 인력양성이 필요함
 - 선진국은 실시간 화학조성 측정용 고성능 장비가 보편화하였고, 중국도 고성능 장비의 활용에 힘입어 연구수준이 비약적으로 발전함
 - 우리나라도 국가기관이 보유한 고성능 장비의 활용성 확대와 연구장비의 지속적 고도화 추진이 요구됨
 - 부족한 전문 연구인력 확보를 위해 정부 및 유관기관의 대학원생 대상 인력양성이 필요함

제1장 배경

(1) 현안 설명

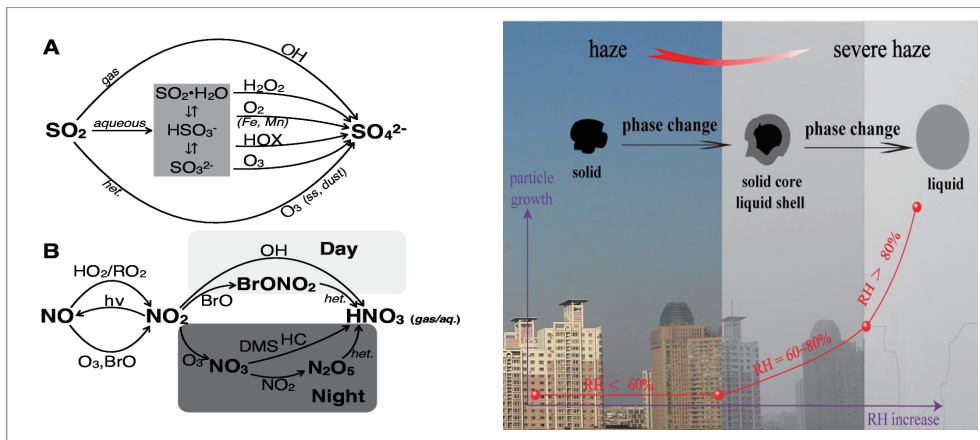
■ 미세먼지의 이차생성

- 대기 미세먼지는 대기오염물질 배출원에서 먼지의 형태로 유입된 일차 미세 먼지와 배출된 전구체 가스가 대기 화학반응을 통해 만들어진 이차 미세먼지로 구분됨
- 미세먼지의 주요 성분 중 원소성 탄소와 중금속 성분은 전부 일차배출 되고, 무기 이온인 황산이온, 질산이온, 암모늄이온은 거의 전부 이차생성 되며, 유기물은 일차배출과 이차생성의 정도가 시기 및 지역에 따라 변함
- 우리나라 미세먼지는 이차생성의 비중이 매우 높아 이차생성 과정의 화학반응과 물리화학적 과정, 즉 생성기작에 대한 규명과 기초자료의 확보가 매우 중요하고, 이것은 미세먼지 예측모델과 저감정책 개발에 필수적인 정보임
- 세계적으로 이차생성 기작 연구는 제한된 조건에서 이차생성의 측정과 검증을 위한 실험실연구, 대기에서 특정 이차생성 기작을 관측하는 현장측정연구, 실험실과 현장측정연구를 통해 실증한 후 예측과 정책개발에 활용하는 모델링연구가 선순환적으로 연계되어 수행됨
- 현재 대부분의 이차생성 기작에 대한 과학적 이해와 자료는 지난 수십년 동안 미국과 유럽이 선도한 다양한 연구결과가 집약된 것임
 - 우리나라처럼 심각한 미세먼지 오염을 겪고 있는 중국은 최근 집중적인 연구 지원으로 급격한 발전을 이루어 미국과 유럽에 근접한 수준임
 - 우리나라는 최근 우리나라 대기환경에서 일어날 수 있는 이차생성 기작을 체계적으로 연구하기 시작한 초기단계임

■ 이차생성 기작: 화학반응

- 이차생성 기작은 화학반응, 물리화학적 특성, 기상이 복합적으로 연계된 과정임
 - 이차생성 화학반응은 기체상, 계면, 액체상(입자상)에서 다양하게 일어남. 각 주요 성분은 독특한 화학반응을 통해 이차생성 되며 무기이온성분과 유기성분의 화학반응으로 구분해서 볼 수 있음

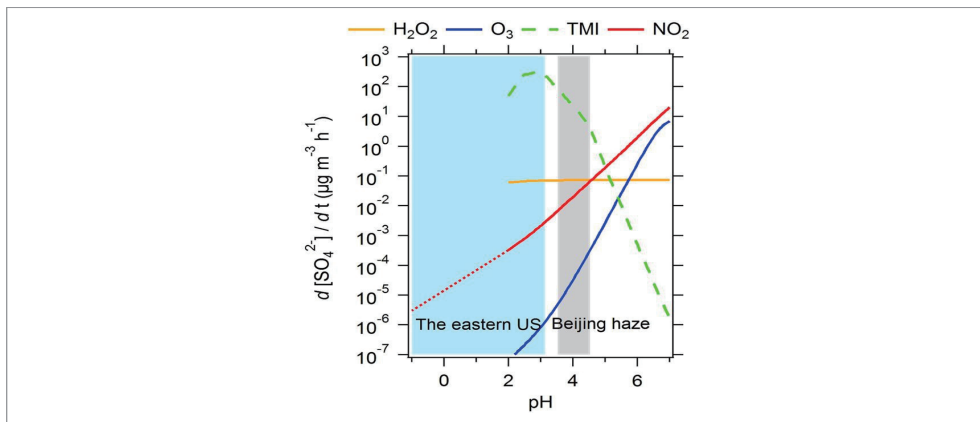
- 무기이온성분의 이차생성은 산성비(산성강하)가 환경문제로 부각된 1960년대 부터 연구되어 화학반응이 매우 명확히 규명된 상태이며 이들은 가스상과 액체상(수용액상) 반응에 의해 대부분 생성됨
 - 가스상에서 SO₂와 NO_x는 대표적 산화제인 OH 라디칼과 반응하여 황산과 질산으로 산화되고, 이어서 염기성 물질인 NH₃와 반응하여 황산암모늄과 질산암모늄을 생성함
- 기체상 광화학반응에 의한 이차생성은 주간에만 가능하고 야간에는 불가능하나 황산과 달리 질산은 야간에도 기체상 비광화학반응(암반응)을 거쳐 생성됨
 - NO₂는 야간에 O₃과 반응하여 NO₃를 생성하고, NO₃와 NO₂가 반응하여 생성된 N₂O₅는 물과 반응하여 질산을 생성함. 그러나 N₂O₅는 매우 쉽게 광분해 되어 주간에는 거의 존재하지 못함
- 미세먼지는 화학조성의 영향을 받아 습도가 높아지면 수증기를 흡수하며, 상대습도 40~80%에서 질량농도가 3~4배까지 증가하면서 입경이 성장함
 - 상대습도가 100% 이상이 되면 더 많은 수증기를 흡수하여 구름 방울이 되며, 이것이 미세먼지가 구름 응결핵으로 작용하는 과정임



〈그림 2-1〉 황산과 질산 이온의 생성과정 (Sofen et al., 2012)

〈그림 2-2〉 습도에 따른 미세먼지의 흡습과정 (Zhejiang Univ. 2019; Sun et al., 2018)

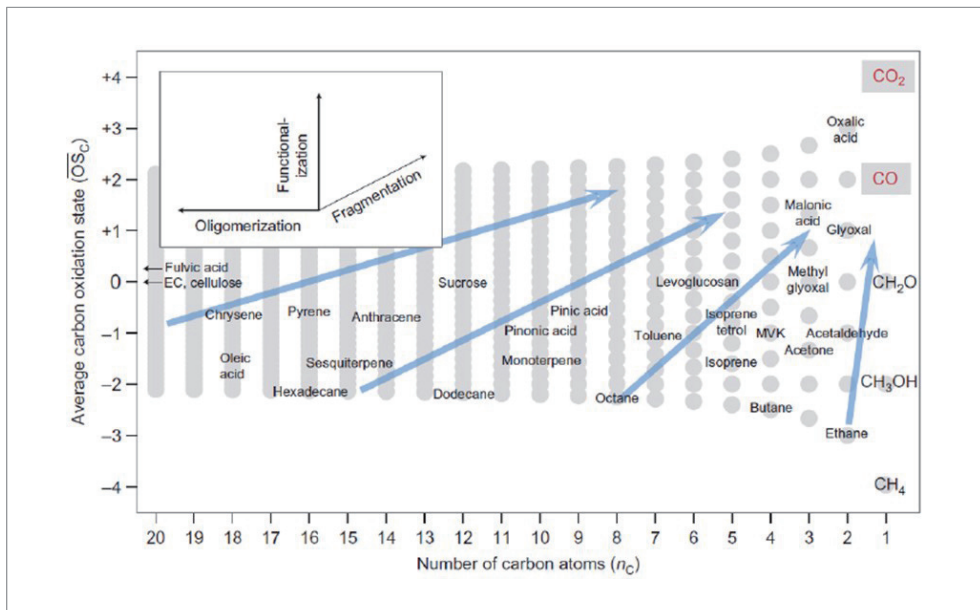
- 수용성인 SO₂와 NO_x는 구름 방울이나 미세먼지 수용액에 녹은 다음 화학반응을 통해 황산암모늄과 질산암모늄을 이차생성함
 - 동일한 질량의 전구체(SO₂, NO_x, NH₃, 유기물)가 미세먼지 수용액(aerosol water)에 녹아 있으면 구름 방울에 비해 농도가 훨씬 높고 이차생성 반응 속도는 농도에 비례해서 증가함
- 수용액에 용해된 SO₂는 H₂O₂, O₃, 전이금속 이온(철, 망간)과 같은 다양한 산화제에 의해 황산으로 산화되고 NH₃와 중화반응을 하여 황산암모늄을 생성함
 - pH에 거의 영향을 받지 않는 H₂O₂ 반응에 비해 다른 산화제의 반응은 수용액의 pH에 민감하게 영향을 받음
 - O₃ 반응은 pH에 비례해 증가하는 경향을 보이고, 전이금속 반응은 pH<3에서는 pH에 비례해 증가하고 pH>3에서는 pH에 반비례하는 경향임



〈그림 2-3〉 수용액상(aerosol water) 황산의 생성에서 pH 영향(Cheng et al., 2016)

- 가스상 NO₃와 NO₂ 반응의 생성물인 N₂O₅도 수용액에 용해되어 수화반응을 거쳐 질산암모늄을 생성할 수 있음
- 일종의 계면인 미세먼지의 표면에서 일어나는 불균일 화학반응에 의해 SO₂와 NO_x가 황산암모늄과 질산암모늄으로 될 수 있음
- 유기미세먼지의 이차생성 기작에 대한 연구는 1960년대 로스엔젤레스를 비롯한 산업화된 대도시의 스모그현상이 심각한 사회문제로 대두되면서 본격적으로 시작됨

- 전구체가 SO₂, NO_x, NH₃로 제한된 이차 무기미세먼지에 비해 전구체 VOCs의 종류가 수백 가지가 넘는 유기미세먼지의 이차생성 기작은 훨씬 더 복잡함
- 초기에는 기체상 이차생성 기작에 대한 연구가 집중되었고, 2000년대 이후 액체상과 표면반응의 중요성이 부각됨
- VOCs가 기체상에서 산화반응을 하면서 생성되는 일부 생성물들이 입자상에 분배되면서 미세먼지로 바뀜
 - 주간과 야간에 각각 OH 라디칼과 NO₃ 라디칼에 의해 화학반응이 개시되고, 불포화 VOCs는 주야 관계없이 오존에 의한 이차생성을 일으킴
- VOCs의 기체상 반응에서 생성되는 일부 카보닐 화합물은 물에 대한 용해도가 SO₂, NO_x, NH₃ 정도로 매우 큰 편이어서 구름, 안개, 미세먼지의 수용액에 용해된 후 산화반응을 거쳐 미세먼지를 이차생성시킴
 - 이 과정에서 미세먼지의 표면에서 중합반응을 비롯한 다양한 반응이 일어나며, 미세먼지상 물의 양과 산도의 영향을 크게 받음

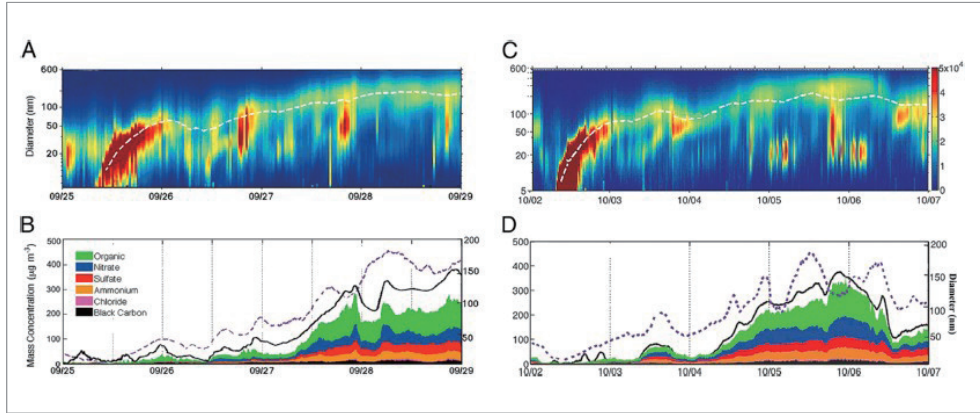


〈그림 2-4〉 산화과정에 따른 탄소 산화도 변화(Kroll et al., 2011)

- VOCs의 산화반응에 관여하는 NO_x 는 유기미세먼지의 생성을, 화학조성, 물리화학적 성질에 직접적인 영향을 미침
 - 이때 산화된 유기물에 NO_x 가 부가되어 생성된 유기질산이 미세먼지 수용액에 녹은 후 수화되면서 질산을 생성하고 질산암모늄을 이차생성하는 기작이 규명됨
- 상기된 이차생성 화학반응은 CMAQ을 비롯한 대표적인 예측모델에 반영되어 있으며, 유기화학반응은 컴퓨터의 연산속도를 고려해 구조가 유사한 물질들끼리 그룹화하는 방법을 적용함(CMAQ 참조)

■ 미세먼지의 이차생성 기작: 상분배

- 질산암모늄과 유기물은 휘발성이어서 온도, 습도, 화학조성에 따라 미세먼지와 기체 사이에 상분배되는 정도가 변하며 이것은 이차생성 기작에도 큰 영향을 미침
- 황산과 질산이 NH_3 와 중화반응에서 경쟁할 때 모든 황산이 먼저 반응해서 비휘발성인 황산암모늄을 생성하고 NH_3 가 남아 있으면 질산과 반응하여 질산암모늄을 생성하며 NH_3 가 부족하면 질산은 조대입자의 알칼리 금속(예, 소듐, 칼륨, 칼슘, 마그네슘)과 반응함
- 질산암모늄은 여름철 기온이 높은 주간에는 잘 생성되지 않고 기온이 낮아진 야간에는 잘 생성되고, 추운 겨울에는 주야간의 영향을 거의 받지 않음
- 유기성분의 휘발도는 매우 넓은 분포를 나타내며, 휘발도가 낮을수록, 즉 증기압이 낮을수록 미세먼지에 상분배되는 비율이 증가함
 - 이 비율은 미세먼지의 유기물 농도가 높을수록 증가하고, 여러 가지 물리화학적 성질에 영향을 받게 되며 이 현상은 2성분 모델 같은 상분배 모델로 해석되어 예측 모델에 적용됨
- 일반적으로 이차생성 물질은 주변의 미세먼지에 달라붙어 질량농도를 증가시킴
 - 한편 이차생성에 의해 매우 작은 입자(<10 nm)의 수농도가 급격히 증가하고 입경의 크기가 수 시간에 걸쳐 점차 증가하는 핵생성 및 입자성장 현상이 발생하기도 함. 이런 현상은 깨끗한 배경지역 뿐만 아니라 도심지역에서도 빈번히 관측됨



〈그림 2-5〉 핵 생성 및 입자 성장(Guo et al., 2014)

(2) 현안 심각성

■ 이차미세먼지의 환경영향

- 이차미세먼지의 성분은 산화상태가 높기 때문에 건강 유해성이 크고, 이차생성 과정의 중간 생성물도 반응성이 높아서 이차생성이 활발한 대기는 유해성이 높은 상태임
- 이차미세먼지의 이온 성분이나 극성 유기물은 미세먼지의 흡습성을 증가시키고 구름 생성에도 영향을 미쳐 기후변화와 시정감소에 대한 악영향을 나타냄

■ 불확실한 국내 이차생성의 기여도

- 고농도 시기에 대기가 정체한 조건에서 국내에서 발생된 NO_x 와 VOCs가 매우 빠르게 반응하여 미세먼지 농도를 증가시키는 현상이 관측됨
 - 그러나, SO_2 는 상대적으로 낮은 국내 배출 요인과 느린 반응 때문에 국내 이차생성의 중요성은 낮은 수준으로 평가됨
- 장거리 이동되는 SO_2 는 황산암모늄을 생성해서 국내에 유입되지만 NO_x 는 질산으로 산화된 후 NH_3 로 중화되지 않은 상태로 유입되면서 국내 NH_3 와 반응해서 질산암모늄을 생성하는 기작의 가능성이 제기됨
- 미세먼지 예측 모델이 현장 측정농도와 화학조성을 정확히 예측하여야 이차생성 기작들의 기여도나 국내 생성 및 장거리이동에서 현상을 규명할 수 있음
 - 선진국에서 개발된 예측모델에는 우리나라 및 동북아지역의 이차생성 기작이 충분히 반영되지 않아 정확도 개선이 필요함

제2장 현황 및 문제점

(1) 현재 연구 결과가 국민에게 현안에 대한 답을 할 수 있는 수준은?

매우 미흡	약간 미흡	어느 정도	약간 만족	충분하게	완벽하게
		○			

■ 현장측정 연구

- 현장측정 연구는 화학성분, 물리화학적 특성, 기상을 측정한 자료를 다양하게 해석하는 형태와 주요 오염원의 추적자(지표) 물질을 측정하여 오염원 추정이나 자료 해석하는 형태로 수행됨
- 기존의 현장측정 연구는 대부분 현황 파악을 위한 목적으로 수행되었기 때문에 이차생성의 확인은 가능하지만 생성기작을 규명하기에는 부족한 수준임. 따라서 겨울철 고농도 질산염의 생성기작이 아직 규명되지 못하고 있음
- 2016년 5월에 수행된 KORUS-AQ 연구가 미세먼지 이차생성 기작에 유용한 정보를 제공할 수 있게 체계적으로 수행되었으며, 광화학 반응이 가장 활발한 시기의 이차생성 기작에 대한 현장측정 연구의 전환점으로 삼을 수 있음
- KORUS-AQ 기간 중 국외 유입이 제한되고 정체가 가장 심한 조건에서 수도권 유기미세먼지의 이차생성 속도가 세계의 다른 대도시보다 5배 이상 빠른 것이 확인되었음. 이것은 광화학 반응성이 매우 높은 유기 전구체(방향족 화합물)의 고농도 수준과 라디칼의 고농도에 의한 것으로 추정됨
- 배출원의 일차먼지 배출량 관리가 우선시되어 배가스(排가스)가 대기화학반응을 통해 이차생성되는 변화과정의 연구가 거의 전무함. 특히 대형 배출원의 배가스에 의한 미세먼지 이차생성에 대한 측정은 매우 중요함
- 특정 이차생성 기작을 규명하기 위해서는 다양한 고사양의 화학성분 분석장비로 동시 측정이 필요하지만 극히 제한적인 수준으로 사용되었음
- 고농도의 산화제를 발생시켜 대기 화학반응에 상응하는 노화시간을 조절할 수 있는 흐름반응기를 이용하여 대기 및 오염원 배가스의 미세먼지 이차생성 잠재력을 평가하는 연구가 최근에 보고된 후 확대되는 추세임

■ 실험실 연구

- 현재 우리나라에는 이차생성 기작 연구에 필요한 설비인 스모그챔버가 2004년 KIST에 설치된 1기와 2013년 경북대에 설치된 2기가 운용되고 있음
 - 미세먼지 국가전략프로젝트를 통해 2018년 KIST에 신규 구축된 중형 스모그챔버는 성능평가 후 본격적으로 연구에 투입될 것임
- 스모그챔버의 수량은 미국, 유럽, 중국에 비해 극히 부족한 실정임
 - 특히 스모그챔버에 설치된 측정장비의 다양성 및 성능의 열세가 스모그챔버의 수량보다 더 심각함
- 연구 수준과 다양성은 수십년간 축적된 노하우를 가지고 있는 선진 국가에 비해 상당히 뒤쳐져 있고, 연구 인력도 비교가 안 될 정도로 적은 수준임
- 다상반응 연구를 선도한 경력의 연구 인력이 미세먼지 국가전략프로젝트에서 우리나라와 동북아 대기 조건과 유사한 유기 및 무기전구체가 복합된 조건에서 다상반응에 의한 이차생성 기작을 연구하는 중임
- SO₂, NO_x, NH₃, VOCs가 혼합된 반응물의 광화학반응에서 NH₃가 있으면 유기성분의 이차생성이 증가하는 것을 확인하였고, 예측모델에 적용하기 위한 모수화도 같이 진행 중임
 - 중국 연구진들도 NH₃가 이차생성에서 상승효과를 일으킨다고 보고한 바 있음
- 미세먼지 특히 유기미세먼지의 물리화학적 성질에 대한 연구도 상당히 부족한 편이며 이차유기미세먼지의 흡습성, 상분리, 점성에 대한 논문이 일부 발표되고 있지만 휘발도에 대한 연구는 거의 보고된 바 없음

■ 낙후된 연구환경

- 고성능 측정장비 부족: 미국과 유럽은 물론이고 중국도 미세먼지의 생성기작 실험에 연구 전용의 AMS, PTR-MS, CI-MS 등 최첨단 장비의 활용이 보편화됨
 - 그러나, 국내의 경우 일부 국책연구기관에서 이런 장비를 활용하고 있지만 모니터링에 사용하는 빈도가 높고, 매우 고가이어서 대학의 연구자들이 구입 및 활용할 기회가 거의 전무한 실정임

- 스모그챔버: 스모그챔버는 기본적인 시설이지만 미국, 유럽, 중국에 비해 태부족한 실정이며, 스모그챔버 실험은 특성상 소요되는 시간이 길어 스모그 챔버당 가용한 실험 회수가 제한적임
 - 이차생성 기작에 대한 현안을 가급적 빨리 해결하기 위해 배출 특성을 고려한 다양한 환경에 적용 가능한 스모그챔버들을 다수 설치하여 활용하고, 얻어진 결과를 정책수립에 반영할 수 있는 형태의 연구지원 방안이 강구되어야 함

■ 국외 연구 현황

- 미국
 - 미국은 가장 먼저 PM_{2.5}를 미세먼지의 기준으로 채택한 국가답게 미세먼지에 대한 연구를 가장 다양하고 폭넓게 지속해서 수행함
 - 미국 EPA는 1997년 PM_{2.5} 기준 설정의 기초가 된 검토 보고서를 작성하였으며, 이후 거의 10년 주기로 수행된 연구 결과를 토대로 검토 보고서를 작성하는 과정을 통해 미세먼지를 관리하고 있음
 - 미국 국가과학재단(NSF)의 최근 대기화학분야 연구비 지원을 보면 상당한 부분이 미세먼지 연구이고, 미세먼지 연구의 거의 대부분이 유기미세먼지에 대한 연구임
 - 새로운 이차생성 기작에 대해서는 다양한 실험실, 현장측정, 모델링 연구를 장기간 지속해서 지원하여 모델에 활용될 수 있게 됨에 따라 다상반응에 의한 무기 및 유기미세먼지의 이차생성 기작이 CMAQ*에 계속 새롭게 추가됨
- * Community Multiscale Air Quality modeling system(미국 환경부가 개발한 대기질 모델)
- 유럽
 - 유럽도 미국과 유사하게 실험실 연구, 현장측정 연구, 모델링 연구를 선순환적으로 운용하면서 미세먼지의 이차생성 기작에 대한 현안에 대응하고 있음
- 중국
 - 중국은 미세먼지의 이차생성 기작에 대한 연구의 후발국이었지만 심각한 미세먼지 문제를 해결하기 위한 중국 정부의 엄청난 지원을 등에 업고 비약적 도약을 하여 미국과 함께 이 분야 연구를 주도하고 있음

- 베이징과 상하이를 비롯한 대표적 오염지역의 고농도 미세먼지 발생 시기에 이차생성 기작을 규명하기 위한 다양한 연구가 수행되고 있으며 현장측정 연구를 통해 베이징 지역 겨울철 고농도 기간에 수용액상 반응과 NH₃의 영향에 대한 중요성을 제기함
- 중국의 대기 특성을 고려해 미국에 비해 유기미세먼지 뿐만 아니라 무기미세먼지의 이차생성 기작에 대한 연구도 매우 활발함. 현장측정 연구에서 확인된 이차생성에서 NH₃의 영향과 함께 황사 및 흙먼지의 영향을 고려해 미네랄 성분의 영향도 비교적 많이 보고됨
- 중국 연구자들의 이차생성 기작 연구에 미국과 마찬가지로 다양한 고성능 화학성분 측정기들을 동시에 사용하고 있음

(2) 현재 연구 결과가 국민에게 잘 전달되고 있는가?

매우 미흡	약간 미흡	어느 정도	약간 만족	충분하게	완벽하게
○					

- 일반 국민은 미세먼지의 발생에 대해 이차생정보다는 일상에서 접하는 일차 배출에 더 주목하며, 이차생성에 대해 이해하고 있더라도 미세먼지 관련 분야 종사자가 아니면 구체적인 이차생성 기작은 쉽게 접하기 어려운 기초 과학 현상임
- 미세먼지에 대한 정보를 주로 마스크를 통해 얻지만 마스크는 기초지식이 없이 이해하기 어렵고 일상생활과 연계하기 어려운 이차생성 기작보다는 주로 미세먼지의 유해성, 노출저감, 피해예방 위주로 다루는 경향이 있음
- 미세먼지의 생성에 대해 많은 관심을 가지고 이차생성 기작에 대한 정보를 접하더라도 일반인들이 복잡한 화학 및 물리적 과정을 설명 없이 이해하기 쉽지 않음

(3) 그 외 현황과 문제 검토 사항

■ 장기적 접근

- 선진국의 사례에서 보더라도 미세먼지는 단기 해결보다는 점진적 개선의 측면이 강한 환경오염 문제 중 하나이며, 국민의 우려를 고려할 때 조속한 개선이 요구되더라도 지나친 조급성은 지양될 필요가 있음
- 대기화학 및 물리 현상이 복잡하게 얽혀진 이차생성 기작은 특히 점진적이고 장기적인 접근이 필요함

■ 기초과학적 접근

- 이차생성 기작 분야에서 선진국의 발전과정을 보면 기초연구의 비중이 점차 증가하는 추세임
- 우리나라도 과학적 미세먼지 오염현상의 진단과 점진적 해결을 위해 기초연구의 비중을 증가시킬 적절한 시기임

제3장 개선 방안

(1) 연구

■ 실험실 연구

- 스모그챔버를 이용하여 우리나라의 대기환경과 유사한 조건(전구체 혼합비, 습도, 온도, 핵입자)에서 다상반응에 의한 유기 및 무기미세먼지의 이차생성 기작을 규명해야 함
- 예측 모델에 필요한 전구체별 화학반응 메커니즘, 생성효율, 물리화학적 성질에 대한 자료를 생산해야 함
- 미세먼지의 이차생성 기작의 해석에 필요한 미세먼지, 특히 유기미세먼지에 초점을 맞춘 물리화학적 성질(흡습성, 휘발성, 상분리, 점도)에 대한 자료 확보가 필요함
- 현장측정 연구에서 이차생성 기작의 규명 및 정량적 추산에 활용될 수 있는 지표성분을 개발하고 실제 활용 가능하게 지표성분의 합성법도 개발해야 함
- 이차생성 기작에 대한 연구를 보다 다양하게 집중적으로 추진하고 앞으로 대두될 오존 문제의 해결에 대비하기 위해 스모그챔버의 추가 설치 및 활용을 검토해야 함

■ 현장측정 연구

- 일반 대기의 측정을 통한 이차생성 기작의 연구와 병행하여 대규모 배출원을 대상으로 배기가스의 이동에 따른 측정을 통해 이차생성 기작 연구가 필요함
- 미세먼지의 이차생성 및 이동에 따른 오염현상을 규명하기 위하여 지상 측정과 함께 연직분포 측정이 포함된 3차원적 자료를 확보해야 함
- 대기의 핵 생성 및 입자성장 현상에서 입도분포 및 화학조성 자료를 분석하여 고농도 미세먼지가 발생될 때 이차생성 기작의 규명에 활용해야 함
- 특정 이차생성 기작이 지역적 미세먼지 오염에 미치는 영향을 실증하기 위한 연구의 고안과 실측을 통한 예측모델 개발 및 평가를 위한 자료 확보가 필요함

■ 연구 환경 선진화

- 연구장비 고도화: 이차생성 기작에 대한 선진국의 연구 수준과 연구 질의 향상은 새로운 현상을 증명하기 위한 새로운 측정방법 및 기술의 개발과 상용화를 통한 측정기의 고도화와 맞물려 있음
 - 후발국으로서 연구 수준을 향상시키기 위하여 선진국 수준의 연구장비* 고도화가 절실함
- * 화학성분 입도분포(AMS), 유기 전구체(PTR-MS), 질소 산화물(CIMS, DOAS), SO₂(ppt 수준), 라디칼 측정(CIMS, LIF), 중간생성물 (유기질산) 측정 등
- 연구인력 양성: 미세먼지의 이차생성 기작에 대한 연구는 연구역사가 상대적으로 짧아 전문 연구인력이 매우 부족한 실정임
 - 정부 또는 관련기관이 대학원생 인력양성 프로그램 및 장학금 제도를 통해 체계적이고 장기적으로 지원하는 대책이 요구됨

(2) 정책/소통

- 미세먼지의 이차생성 기작이 전구체의 배출원 분포 및 지리학적 위치에 영향을 크게 받기 때문에 우리나라 실정에 적합한 정책개발이 필요하고, 국내에서도 지역 맞춤형 정책 개발까지 확장이 필요함
 - 미세먼지에 대한 세미나, 심포지엄, 포럼, 공청회 등 전문가-정부 또는 전문가-국민 간 소통이 다양한 형태로 상당히 많이 이루어짐
- * 이를 통해 이차생성 기작을 포함한 미세먼지의 과학적 정보가 다수의 관계자에게 전파되는 성과가 있음
- 한편, 특정 현안에 대해 실무적으로 심층 토론할 수 있는 소규모 워크숍 형태의 소통 확대를 통해 내실화를 기대할 수 있음

(3) 기타

- 이차생성 기작 등 미세먼지 생성과 관련된 다양한 기초연구에 선진국처럼 기초과학 연구자들이 기존 대기오염 연구자들과 협업할 수 있는 학제간 연구 프로그램의 개발이나 지원이 적극적으로 검토될 시기임

● ● 참고문헌

1. Cheng, Y., G. Zheng, C. Wei, Q. Mu, B. Zheng, Z. Wang, M. Gao, Q. Zhang, K. He, G. Carmichael, U. Pöschl, H. Su, Reactive nitrogen chemistry in aerosol water as a source of sulfate during haze events in China, *Sci. Adv.*, 2, e1601530, 2016.
2. Guo, S., M. Hua, M. L. Zamora, J. Peng, D. Shang, J. Zheng, Z. Du, Z. Wu, M. Shao, L. Zeng, M. J. Molina, and R. Zhang, Elucidating severe urban haze formation in China, *PNAS*, 111, | 17373-17378, 2014.
3. Kroll, J. H., N. M. Donahue, J. L. Jimenez, S. H. Kessler, M. R. Canagaratna, K. R. Wilson, K. E. Altieri, L. R. Mazzoleni, A. S. Wozniak, H. Bluhm, E. R. Mysak, J. D. Smith, C. E. Kolb, and D. R. Worsnop, Carbon oxidation state as a metric for describing the chemistry of atmospheric organic aerosol, *Nature Chem.* 3, 133~139, 2011.
4. Sofen, E. D., B. Alexander, E. J. Steig, M. H. Thieme, S. A. Kunasek, H. M., A. J. Schauer, M. G. Hastings, J. Bautista, T. L. Jackson, L. E. Vogel, J. R. McConnell, D. R. Pasteris, and E. S. Saltzman, WAIS Divide ice core suggests sustained changes in the atmospheric formation pathways of sulfate and nitrate since the 19th century in the extratropical Southern Hemisphere, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 5749-5769, 2014.
5. Sun, J. L. Liu, L. Xu, Y. Wang, Z. Wu, M. Hu, Z. Shi, Y. Li, X. Zhang, J. Chen, and W. Li, Key role of nitrate in phase transitions of urban particles: Implications of important reactive surfaces for secondary aerosol formation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123, 1234-1243, 2018.
6. Zhejiang University(<http://earth.zju.edu.cn/2018/0912/c22046a849136/page.htm>), visited on 2019.



미세먼지



현황 분석 및



개선 보고서

미세먼지 비상저감 조치 효과

요약 | 39

제1장 배경 | 41

제2장 현황 및 문제점 | 45

제3장 개선 방안 | 48

대표 집필자

박일수 한국외대 대기환경 연구센터
수석연구원

공동 집필자

송철한 광주과학기술원 지구환경공학부
교수

김 준 연세대학교 대기과학과 교수

정병주 한국정보화진흥원 국토환경팀장

이은영 수원대학교 환경공학과 교수

SESSION

03

미세먼지 비상저감 조치 효과

대표 집필자

박일수 한국외대 대기환경 연구센터
수석연구원

공동 집필자

송철한 광주과학기술원 지구환경공학부
교수

김 준 연세대학교 대기과학과 교수

정병주 한국정보화진흥원 국토환경팀장

이은영 수원대학교 환경공학과 교수

● 요약

- 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도가 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하고, 다음 날 24시간 평균 농도가 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과할 것으로 예상되면 수도권 지자체 시·도지사는 자동차 운행을 제한하고 미세먼지 배출시설의 가동을 조정하는 등 비상저감조치를 발령·조치하고 있으나, 효율성에 대한 문제점이 제기되고 있으며, 개선 방안이 요구되고 있음
 - 특히 항만, 발전소, 산단 등이 위치한 충남과 시멘트 및 소각장 등이 밀집한 충북은 미세먼지 핫스팟 지역으로, 비상저감조치의 대상지역 확대가 요구됨
 - 또한 5등급 차량 2부제 실시에 대한 효과를 극대화하기 위해 예비저감조치 및 비상저감조치 발령을 앞당기며, 민간영역 확대와 모든 차량 2부제가 필요함
- 미세먼지 농도 이외에도 정체성 고기압 패턴을 예보(12월~3월)하여 예비저감조치 및 비상저감조치를 현재보다 하루 앞당겨 발령하여 비상저감조치 효과를 극대화해야 함
 - 당일(D-3일) 미세먼지 예보(17시 기준) 및 일기도 예보·분석 결과, 글피(D-day) 비상저감조치 시행의 가능성이 높을 경우 내일(D-2일, 비상저감조치 2일 전) 공공부문 중심으로 예비저감조치를 실시해야 함
 - 당일(D-2일) 0시부터 16시까지 초미세먼지 평균 농도가 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하고, 다음 날(D-1)의 초미세먼지 24시간 평균 농도가 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과할 것으로 예측(D-2일 17시 예보 기준, 이하 같음)된 경우 비상저감조치를 발령하여 모든 승용차 2부제를 실시해야 함

- 광역권의 시·도가 협의하여 일정 요건 충족시 미세먼지 특별법 시행규칙에 따른 사업장 및 공사장, 행정·공공기관 차량 2부제 및 공공 공사장·사업장을 대상으로 광역저감조치를 실시하며, 충북(진천군, 음성군, 증평군), 충남(당진시, 서산시, 태안군, 천안시)도 함께 시행해야 함
- 미세먼지 특별법에 대한 시행규칙의 개정을 통해 비상저감조치의 시행기준에서 당일은 당초 1일 전날이었으나 2일 전날로 하며, 고농도 발생 가능한 정체성 고기압 예보를 위한 기상청 태스크포스(T/F) 운영(12~3월)이 필요함
- 수도권지역에서 비상저감조치 발령 기간 모든 차량에 대해 2부제를 실시한 결과 미세먼지 농도는 유의미하게 감소되었음(부록 8참조)
 - 배출량 감소율은 PM₁₀은 16.9%, NO_x는 20.7%, SO₂는 0.1%, CO는 18.0%이었음
 - 비상저감조치 발령일에 2부제를 실시한 경우 미세먼지 농도는 3.3~6.6% 감소하였으나, 현재와 같이 발령 1일 후에 실시한 경우에는 감소 효과가 거의 없었음
- 미세먼지 고농도 발생 계절 동안(12~3월) 수도권 위성도시의 사업장에 대한 효율적 규제를 통해 고농도 미세먼지(PM₁₀) 기저(base)농도를 최대 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 감소시킬 것으로 예측됨(부록 10 참조)
- 개선된 비상저감조치 시행을 통해 겨울철부터 고농도 발생 현상의 감소를 체감할 것으로 평가됨

제1장 배경

(1) 비상저감조치 제정 목적

- 고농도의 초미세먼지(PM_{2.5})가 일정 수준 이상으로 발생할 것으로 예상될 때 단기적으로 이를 줄이기 위한 비상저감조치에 필요한 사항을 정함을 목적으로 함

(2) 추진 경과

- 수도권 미세먼지 비상저감조치 시행('17.2.15~, 서울·경기·인천)
 - 행정·공공기관 중심 차량2부제 시행 및 사업장, 공사장 조업 조정 실시
 - '수도권 공공발령' 추가('17.4), 서울시 자체 서울권역 시행('17.7) 및 예비저감조치·광역발령 도입('18.11)
 - ※ '17.12.30(휴일) 첫 발령, 총 7차례 수도권 비상저감조치 발령
 - 수도권 공공부문 중심에서 민간 부문 및 수도권 외 지역으로 확대 추진('18.11)
 - 수도권 TMS 부착 민간사업장 등 55개 사업장 비상저감조치 자발적 참여 (협약 '18.4.12)
 - 부산(3.1), 광주(3.29) 등 13개 시도 비상저감조치 방안 마련 및 시행 중
 - 「미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법」 제정 및 시행('19.2.15~)
 - ※ 차량운행제한 등 민간부문 비상저감조치 법적 근거 마련

(3) 비상저감조치 유형

- 예비저감조치
 - 모레 비상저감조치 시행의 가능성이 높을 경우 다음날(내일), 즉 비상저감조치가 예상되는 날 하루 전에 선제적으로 미세먼지를 저감하기 위해 실시하는 조치
 - 현재 수도권(서울, 인천, 경기)에서만 시행 중이며, 타 시·도로 확대 추진

■ 비상저감조치

- 미세먼지의 예측 농도가 미세먼지 특별법에 따른 발령기준(미세먼지 특별법 시행규칙 제8조)을 충족하는 경우, 시·도별로 미세먼지를 긴급히 줄이기 위해 시행하는 조치

■ 광역저감조치

- 지리적 위치, 주민 생활권 등을 고려하여 비상저감조치 효과를 높이기 위해 2개 이상의 시·도에서 함께 시행하는 비상저감조치
- 광역저감조치는 예비저감조치와 비상저감조치의 시행 절차 및 조치사항과 동일 (단, 2개 이상 시·도가 동시 시행만 차이)

(4) 비상저감조치 발령 조건

구 분	예비저감조치	비상저감조치	광역비상저감조치
시행지역	시·도 관할지역 중 시·도가 정한 지역		
발령기준	아래 어느 하나의 발령조건 충족 시		환경부 장관 요청 또는 광역권 시·도 협의
	① 내일 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 초과 (0시~16시 평균) + 모레 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 초과 예보 ② 모레 '매우나쁨' 예보	① 당일 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 초과 (0시~16시 평균) + 내일 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 초과예보 ② 당일 주의보·경보 발령 (0시~16시) + 내일 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 초과 예보 ③ 내일 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 초과 예보	
발령권자	시·도지사		
재난문자방송 발송여부(기관)	X * 행정·공공기관 및 공공 사업장·공사장 문자 발송	○ (시·도) * 휴일 시행 시에도 CBS 발송(차량 운행제한 내용은 제외)	
행정·공공기관 차량2부제 여부		○ (민간부문은 자율 참여) * 단, 휴일 시행 시 미시행	
차량운행 제한 시행 여부(대상)	X	○ (시·도 조례로 정하는 자동차) * 단, 휴일 시행 시 미시행	
사업장·공사장 참여 범위	공공 사업장·공사장 (민간 사업장은 자율 참여)	공공 및 민간 사업장·공사장 (의무대상 외 민간사업장 등은 자율참여 유도)	

(5) 비상저감조치 해제 조건

■ 시·도별로 다음 중 어느 하나의 조건을 충족할 경우 21시 이전 조기해제 또는 미시행 가능

- 비상저감조치의 발령 후 다시 예측한 비상저감조치 시행일의 초미세먼지 농도가 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하일 것으로 예측되는 경우

※ 예) 비상저감조치 발령 후 시행 전일(D-1일) 23시 또는 시행일(D일)의 오전 5시 예보가 '보통'으로 예보된 경우

- 폭우, 강풍 또는 그 밖의 기상여건 급변 등으로 더이상 비상저감조치 시행이 필요하지 않다고 판단되는 경우

(6) 적용 기관 및 조치 사항

■ 적용 기관

- 공공부문
 - 국가기관(중앙행정기관) 및 지방자치단체, 교육청, 국·공립학교, 정부·지자체 출연기관, 공직유관단체 등
 - 행정·공공기관 운영 대기배출사업장 및 비산먼지 발생 사업 중 건설업
- 민간부문
 - 비상저감조치 시행 시·도의 주민(차량 운행제한)
 - 「미세먼지 특별법」 시행규칙 등에서 정하는 의무 대상 사업장(고체연료 사용 발전시설, 제1차 금속제조업의 소결로, 배소로 등, 석유정제품 제조업 및 기초유기화합물 제조업의 가열시설, 시멘트제조업의 소성시설 등)
 - 「대기환경보전법」 시행규칙에 따른 비산먼지 발생사업 중 건설공사장

■ 조치 사항

- 공공부문
 - 직원 차량 2부제 의무 시행(전 직원 홍보·전파)
 - 기관 여건에 따라 긴급·필수 차량을 제외한 관용차량(경유) 운행 금지 등
 - 건물 난방 줄이기 등 에너지 절약 실천 동참
 - 공공 사업장·공사장 운영시간 조정 등 저감 조치
 - 지하역사 등 안내방송 및 전광판 송출, 불법소각 감시, 민감 계층 건강 보호 추진 등

미세먼지 현황 분석 및 개선 보고서

○ 민간부문

- 시·도 조례로 정한 자동차 운행 제한
- (사업장) 가동시간 변경, 가동률 조정 또는 대기오염방지시설의 효율 개선 등
- (건설공사장) 공사 시간 변경·조정

* 비상저감조치 추진 단계 및 조치 사항(부록 1, 2 참조)

제2장 현황 및 문제점

(1) 현재 연구 결과가 국민에게 현안에 대한 답을 할 수 있는 수준은?

매우 미흡	약간 미흡	어느 정도	약간 만족	충분하게	완벽하게
	○				

■ 비상저감조치의 효과 분석

- 환경부는 수도권 비상저감조치(2018. 11. 7)에 따른 초미세먼지(PM_{2.5}) 배출량의 감축효과를 분석한 결과, 수도권 지역의 PM_{2.5} 하루 배출량 147톤의 4.7%에 해당하는 평균 6.8톤을 감축한 것으로 추정됨
(환경부 보도자료, 2018.11.14)
 - 비상저감조치 참여수준에 따른 감축비율은 3.8~6.2% 수준이며, 감축량은 최소 5.7톤에서 최대 9.2톤임
 - 노후경유차 운행제한에 따른 초미세먼지 감축효과는 1.5톤인 것으로 분석되었으며, 11월 7일 노후경유차 운행차량은 평상시 평균 14,460대에서 9,062대로 총 5,398대가 줄었으며, 이를 통해 초미세먼지 배출량이 평상시 대비 37.3% 감소함
 - 영흥 1·2호기 등 화력발전 11기에 적용한 상한제약으로 2.3톤(충남포함), KCC 여주공장 등 자발적 협약에 참여한 55곳 민간사업장에서 0.36톤의 초미세먼지를 감축함
 - 기존 조치 중에서는 차량 2부제에 따른 감축효과가 하루 1.61톤, 행정·공공기관 소관 대기배출사업장은 하루 0.73톤, 건설공사장은 하루 0.29톤으로, 차량 2부제의 배출량 감축 효과가 높음
- 수도권 초미세먼지 농도 저감조치 직후 대체로 하락함
 - 서울, 인천, 경기에서 초미세먼지 농도는 3월 1일과 5일 농도를 비교한 결과 각각 84 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ →135 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 82 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ →108 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ →141 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 저감 조치에도 불구하고 상승함

- 2018년 1월17일 2일 연속 저감조치 시행된 직후 서울, 인천, 경기에서 초미세먼지 농도는 1월17일과 19일 농도를 비교한 결과 각각 $88\mu\text{g}/\text{m}^3 \rightarrow 29\mu\text{g}/\text{m}^3$, $69\mu\text{g}/\text{m}^3 \rightarrow 23\mu\text{g}/\text{m}^3$, $91\mu\text{g}/\text{m}^3 \rightarrow 35\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 하락했으나, 대기조건이 다르므로 큰 의미는 없다고 판단됨

〈참고〉 언론에 제기된 문제점

- ‘미세먼지 1%도 못 줄인다’는 연구 결과에도 비상조치 도입한 환경부 (SBS,송옥 기자, 2018. 1. 18)
 - 미세먼지 비상저감조치에 대한 실효성 논란이 거센 상황에서 환경부가 사전에 비상조치의 효과가 미미하다는 보고서를 받고도 이 정책을 도입한 것으로 밝혀졌습니다. 게다가 환경부는 그동안 이 보고서를 외부에 공개하지 않았습니다. 보고서에 어떤 내용이 담겨 있기에 환경부는 이 보고서를 비공개로 유지해온 걸까요?
 - 지금 시행되는 비상조치보다 강력한 제안이 포함됐는데도 초미세먼지 농도는 최대 $0.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ 줄어드는 것으로 나타났습니다. 어제 서울 초미세먼지의 평균 농도는 $95\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 높아졌는데, 이를 적용해보면 비상조치로는 1%도 줄지 않는다는 의미입니다. 비상조치를 전국으로 확대해도 최대 $0.9\mu\text{g}/\text{m}^3$ 줄어드는 데 그쳤습니다. 환경부는 이렇게 효과가 미미하다는 보고서를 받고 결과를 확인했음에도 비상조치 도입을 결정한 겁니다.
- 미세먼지, 비상저감조치도 속수무책? (월간참여사회, 황인창, 서울연구원, 2019. 4월호)
 - 비상저감조치로 고농도 미세먼지 상황 단기간에 개선하기 어려워 비상저감조치는 고농도가 발생하기 전날 늦은 오후에 발령되지만 발령에 따른 실제적인 감축 행동은 고농도가 발생한 당일부터 시행된다. 고농도 미세먼지가 발생하는 날은 보통 대기가 안정되어 있어 대기 순환이 적고 오염된 공기가 외부로 유출되는 속도가 늦다.

(2) 현재 연구 결과가 국민에게 잘 전달되고 있는가?

매우 미흡	약간 미흡	어느 정도	약간 만족	충분하게	완벽하게
	○				

〈참고〉 국가기후환경회의 과학기술 전문가 컨퍼런스('19.7.5.~6.) 논의 결과

- 비상저감조치의 효과 및 한계
 - 공공영역 이외에 민간영역으로 수도권을 뛰어넘어 전국 확대
 - 고농도 상황에서 불법 배출행위를 감시하는 원격감시시스템 도입 필요
 - 고농도시즌에 5등급 차량 통행 제한보다는 2부제 확대 대안 필요
 - 노천소각 등 불법행위에 대한 실질적 단속 강화
 - 계절관리제와 위기관리제도 연계 상호 보완 필요
 - 정책추진 이외에도 현장에서 실효성 있는 대안 필요
- 비상저감조치를 통해 고농도 미세먼지 대응이 가능한가?
 - 관리대상과 규모에 따라 편차는 있으나 농도를 낮추는데 효과 기대, 그러나 고농도 상황을 해소하는 효과는 미미
 - 공공 의무화와 민간 권고의 기반으로는 실효성있는 개선 효과 미미
 - 비상저감조치 이외에 상시대책에 따른 대중교통 수요를 고려한 비상수송 대책 필요
 - 교통분야는 서울과 그 외 지역에서 신규 도입 여건의 격차가 큼
 - 산업 및 지자체 등 현장에서 이행 상황 점검 필요
 - 세분화된 기초 자료와 과학기반을 토대로 비상저감조치 정책 설계 필요
 - 건강위해도 경감측면에서 인구집단의 평균적 노출 피해 저감이 더 중요함
- 미세먼지 계절관리제 도입이 시급한 것은 아닌지?
 - 국지순환 패턴이나 배출특성의 시공간적 특성을 고려한 비상저감조치와 계절 관리제 필요
 - 시존관리제는 난방, 에너지, 건설기계 등을 대상으로 맞춤형 정책설계가 필요
 - 11~3월 계절관리제 보다는 10~3월의 선제적 조치가 필요
- 종합토론
 - 공공 의무화와 민간 권고만으로는 실효성을 거두기 어려우므로, 공공영역을 넘어 민간영역으로, 수도권을 넘어 전국(50만 이상 도시)으로 확대되어야 효과가 극대화됨
 - 국민건강을 보호하기 위해 고농도 미세먼지 발생 시기에 대한 상시적인 관리가 필요하며, 향후 도입이 검토되고 있는 계절관리제(12~3월)는 이러한 관점에서 설계되어야 한다는 데 공감대를 이루었음
 - 특히 교통 부문은 연중 상시대책으로 검토하는 것이 적절하며, 난방, 에너지, 건설기계 등에서도 고농도 시기에 맞춘 일상적 관리대책 마련이 필요

제3장 개선 방안

(1) 예비 비상저감조치 개선 방안

■ 필요성

- 5일 연속 PM_{2.5} 농도가 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하는 사례가 최근 1월과 3월에 발생하고 있음
 - ※ 한반도는 겨울, 봄철에 정체성 고기압 영향으로 대기가 매우 안정하고 정체되어 고농도 현상이 자주 발생함(부록 3 참조)
 - ※ 수도권 지역의 고농도는 3월에 31%, 1월에 22% 발생하였음(부록 3 참조)
 - ※ 2일 이상 지속적으로 고농도 발생시 2~3일 전부터 농도 증가 추세 나타남(부록 4 참조)
- 수도권지역에서 봄철에 충남(당진 등), 겨울철에는 영서, 충북 지역으로부터 최대 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 영향을 받을 수 있음(부록 10 참조)
- 이틀 이상 연속 PM_{2.5} 농도가 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과할 것이 예상되는 경우에도 사전에 아무런 조치가 없던 문제점을 개선하고, 선제적으로 대응 가능함
- 고농도 발생 가능한 날을 일기도 자료로 예보하는 방법이 최근 관련 연구를 통해 실용화될 수 있으며, 현재 사용되는 대기질 예측 모델과 병행 예보 가능함
 - ※ 일기도 근접 분석을 통해 고농도 발생 기간 일기도 특성 분석(부록 5 참조)
 - ※ 2일 이상 지속적으로 고농도 발생 2~3일 전부터 지상 기상(특히 기온, 풍속) 특이한 변동 추세 나타남(부록 6 참조)
- 환경위성(기상 및 해양위성 포함)을 이용한 미세먼지의 장거리수송 여부 판단이 가능해짐에 따라, 대기질 예측모델과 함께 예보에 주요 자료로 지원 가능함

■ 개선방안: 예비저감조치 발령(비상저감조치 시행일 2일전 날 발령)

- ※ 수도권, 영서, 충남, 충북 예비저감조치 시행 시기를 동일
- 개요: 당일(D-3일) 미세먼지 예보(17시 기준) 및 일기도 예보·분석 결과, 글피(D일) 비상저감조치 시행 가능성이 높을 경우, 내일(D-2일, 비상저감조치 2일 전) 공공부문 중심으로 예비 저감조치를 실시하여 비상저감조치의 효과 제고

- 발령요건: 아래 어느 하나의 조건을 충족하는 시·도에서 발령
 - ① 당일(D-3일) 17시 예보 기준으로 모레(D-1일) “매우 나쁨” 그리고 강한 정체성 고기압이 예측된 경우
 - * 비상저감조치가 시행될 것으로 예상되는 날
 - ※ 내일(D-2) 강수 예보 및 정체성 고기압이 약화되는 등 예비 저감조치가 불필요한 것으로 판단된 경우 발령하지 않을 수 있음
 - ② 내일(D-2일)·모레(D-1일) 모두 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 초과할 것으로 예측**된 경우
 - ** (예) 경기도는 2개의 예보권역(경기남부·북부) 모두 조건을 만족할 때 충족한 것으로 봄
- 참여범위: 시·도 관할 지역 내 공공부문 필수 참여(민간부문 자율 참여)
 - ※ 차량2부제 참여, 공공사업장·공사장 작업조정, 도로 물청소, 대국민 홍보 강화 등

■ 후속 조치

- 고농도 발생이 가능한 정체성 고기압 등 예보를 위한 기상청 T/F 운용(12~3월)

(2) 비상저감조치 개선방안

■ 필요성

- 최근 연속 5일 이상의 고농도 미세먼지가 발생하였음(부록 4 참조)
- 수도권지역에서 고농도는 봄철에 55%, 겨울철에 40% 발생하였음(부록 3 참조)
- 수도권지역에서 봄철 고농도는 장거리이동 보다는 국지순환에 의한 자체 영향 높음(부록 7 참조)

■ 개선방안

- 개요: 미세먼지의 예측 농도가 미세먼지 특별법에 따른 발령기준(미세먼지 특별법 시행규칙 제7조*)을 충족하는 경우, 시·도별로 미세먼지를 긴급히 줄이기 위한 비상저감조치를 발령·시행

* 비상저감조치의 시행기준(당일: 비상저감조치 시행일의 2일 전날을 말한다. 시행규칙 개정 필요)

- 발령요건: 아래 중 어느 하나의 조건을 충족하는 시·도에서 발령
 - ① 당일(D-2일) 0시부터 16시까지 초미세먼지 평균 농도가 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과*하고, 다음 날(D-1)의 초미세먼지 24시간 평균 농도가 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과**할 것으로 예측(D-2일 17시 예보 기준, 이하 같음) 된 경우
 - * (예) 경기도의 경우, 경기도 전체 평균농도가 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과할 때 충족
 - ** (예) 경기도는 2개의 예보권역(경기남부·북부) 모두 충족되었을 때 발령요건을 충족한 것으로 봄
 - ② 당일(D-2일) 0시부터 16시 사이에 해당 시·도 내 경보권역*에서 초미세먼지 주의보 또는 경보가 발령(발령 후 해제된 경우도 포함)되고, 다음날(D-1)의 초미세먼지 24시간 평균 농도가 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과 할 것으로 예측된 경우
 - * 시·도별로 비상저감조치 발령에 필요한 권역 수(1개소 이상 등)와 같은 세부 요건을 정할 수 있음
 - ③ 다음 날(D-1일)의 초미세먼지 24시간 평균 농도가 $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과(“매우 나쁨” 수준)할 것으로 예측된 경우
 - * 당일 실측농도와 무관하게 발령 가능
- 참여범위: 시행조례에서 정한 차량 부제 또는 배출가스 등급제 기반의 운행제한 대상 차량, 민간 및 공공 사업장·공사장, 행정·공공기관 2부제 대상 차량 등(미세먼지 특별법 시행령 제10조, 시행 규칙 제9조* 등), 봄철 충남(당진시, 서산시, 태안군, 천안시), 겨울철 영서, 충북(진천군, 음성군, 증평군) 지역 사업장(부록10 참조), 수도권 민간차량 2부제(3월)
 - * 시·도지사가 시행하는 비상저감조치(살수차, 진공청소차 등을 활용하여 미세먼지 제거), 운행 제한 제외 대상 자동차 규정

■ 후속 조치

- 비상저감발령 기간 사례별 차량2부제 평가(부록 8 참조)
 - 장거리이동, 자체, 혼합 사례별 평가
- 서울 도심, 내부, 외곽 순환도로 주요 거점 지역에 차량 2부제 영상 감시시스템 운영하여 실시간 농도 변화 체감, 감지

(3) 광역비상저감조치 개선방안

■ 필요성

- 겨울철에는 북풍, 봄철에는 남풍계열이 우세하여 수도권지역은 봄철에 충남(당진시, 서산시, 태안군, 천안시), 겨울철에는 영서, 충북(진천군, 음성군, 증평군)이 오염원 영향권임(부록 9, 10 참조)

■ 개선방안: 복수 지자체 동시 발령

- 개요: 지리적 위치, 주민 생활권 등을 고려하여 2개 이상의 시·도에서 함께 비상저감조치를 발령하여 저감조치의 효율성 및 효과성 제고
- 발령요건
 - ① 같은 광역권의 시·도가 협의하여 일정 요건 충족시 함께 시행하기로 한 경우
 - ※ 수도권의 경우 3개 시·도 중 2개 이상 시·도에서 요건 충족 시 3개 시도가 동시 시행
 - ※ 영서, 충북(진천군, 음성군, 증평군), 충남(당진시, 서산시, 태안군, 천안시)에서 요건 충족 시 동시 시행
 - ② 「미세먼지 특별법」 제18조 제1항 고농도 미세먼지 비상저감조치에 따라 2개 이상의 시·도에 광역적으로 비상저감조치가 필요하여 환경부장관이 해당 시·도지사에게 비상저감조치 시행을 요청한 경우
- 참여범위: 「미세먼지 특별법」 및 같은 법 시행규칙에 따른 사업장 및 공사장, 행정·공공기관 차량 2부제 및 공공 공사장·사업장

(4) 대응단계별 개선 내용

■ 당초



※ D day는 비상저감조치 시행일

※ 예비비상저감조치 도입하지 않은 시·도는 4단계부터 8단계로 시행

■ 개선방안

○ 기본방향

- 대상지역 확대, 예비저감조치 조기발령, 민간영역 확대, 계절·월 관리제 도입, 차량 2부제 확대

○ 단계별 대응



※ 모든 대상 지역에서 1단계에서 10단계 시행

○ 참여범위 및 조치 사항



Session 03 미세먼지 비상저감조치 효과

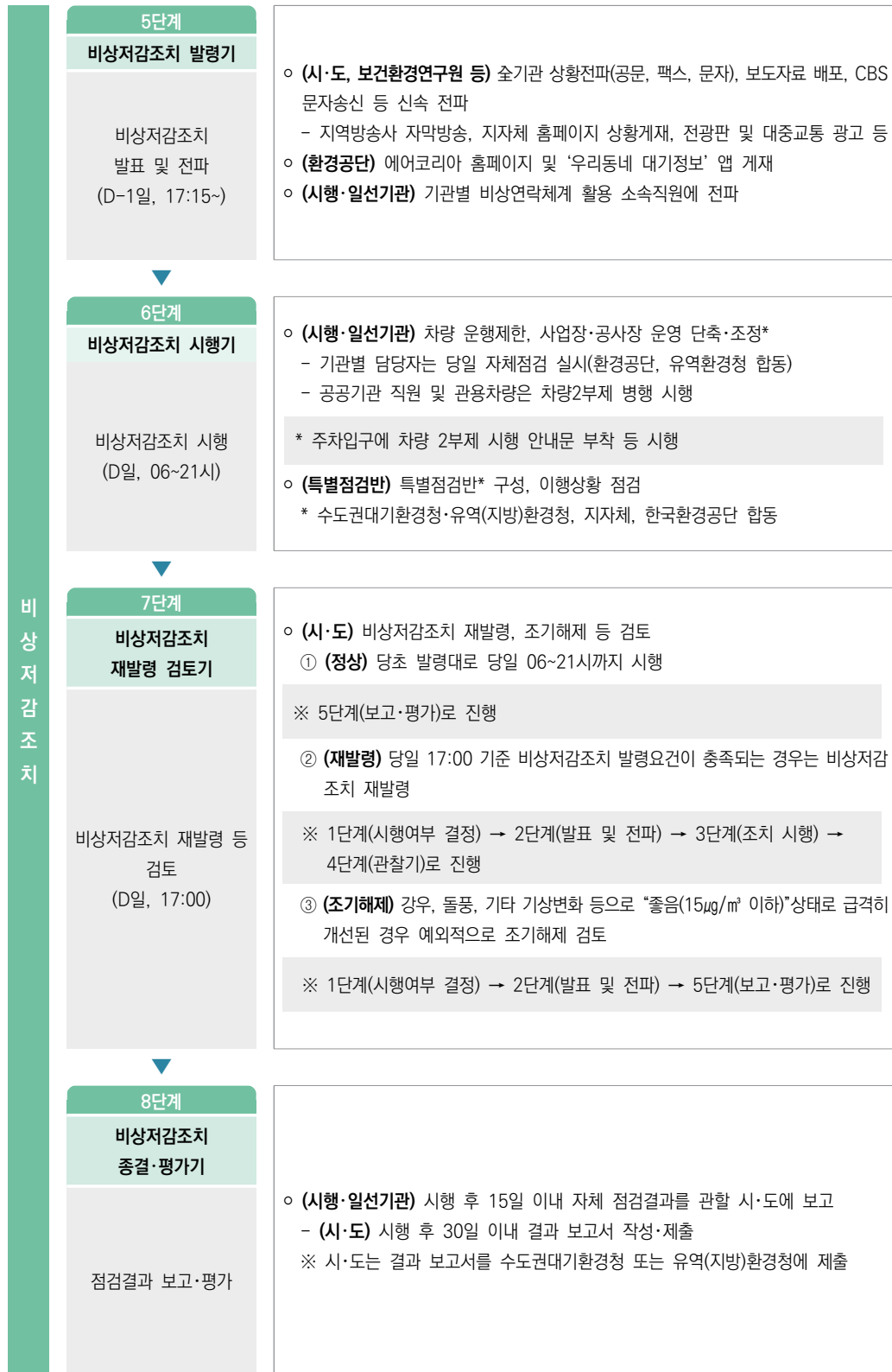
● ● 참고문헌

1. 고농도 미세먼지 정확도 향상을 위한 개념모델 개발연구(1). 국립환경과학원, 2018
2. 고농도 미세먼지 비상저감조치 시행 지침. 환경부, 2019.2
3. 수도권 고농도 미세먼지 비상저감조치 시행 매뉴얼, 환경부, 2018.11
4. 이보람, 박순웅, 종관 기상 상태를 고려한 한반도 대기오염 퍼텐셜 예측법, 한국기상학회, Vol. 33, No. 4, pp. 641~656. 1997
5. Lee, Seoyoung, Jhoon Kim, Myungje Choi, Jaemin Hong, Hyunkwang Lim, Thomas F Eck, Brent N Holben, Joon-Young Ahn, Jeongsoo Kim, Ja-Ho Koo (2019), Analysis of long-range transboundary transport (LRTT) effect on Korean aerosol pollution during the KORUS-AQ campaign, *Atmos. Environment*, 204, 53-67, doi:10.1016/j.atmosenv. 2019.02.020.
6. Park I-S, H-K Kim, C-K Song, Y-W Jang, S-H Kim, C-R Cho, J S Owen, C-H Kim, K-W Chung, and M-S Park (2019): Meteorological Characteristics and Assessment of the Effect of Local Emissions during High PM₁₀ Concentration in the Seoul Metropolitan Area, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, Vol. 13, No. 2, pp.117~135.
7. Park I-S, M-S Park, Y W Jang, H-K Kim, C-K Song, S-K Kim, C-H Kim (2019): Comparison of Meteorological Characteristics and Relationship with Nationwide Emissions during High PM₁₀ Event Days and Non-event Days in the Seoul Metropolitan Area, *Aerosol and Air Quality Research*, In 1st review.
8. Park, M. E., C. H. Song, R. S. Park, J. Lee, J. Kim, S. Lee, J.-H. Woo, G. R. Carmichael, T. F. Eck, B. N. Holben, S.-S. Lee, C. K. Song, and Y. D. Hong (2014), New approach to monitor transboundary particulate pollution over Northeast Asia, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 659-674, doi:10.5194/acp-14-659-2014.

부록 1 비상저감조치 추진 단계



Session 03 미세먼지 비상저감조치 효과



※ 자료: 고농도 미세먼지 비상저감조치 시행 지침(환경부, 2019. 2)

부록 2 고농도 미세먼지 비상저감조치 시행 지침(환경부, 2019. 2)

<단계별 조치 사항>

		예비저감조치(행정·공공기관)				비상저감조치(행정·공공기관 + 민간)			
		1단계	2단계	3단계	4단계	5단계	6단계	7단계	8단계
시행 단계	관계 기관	예비저감조치 준비기	예비저감조치 발령기	예비저감조치 시행기	비상저감조치 준비기	비상저감조치 발령기	비상저감조치 시행기	비상저감조치 재발령 검토기	비상저감조치 종결·평가기
		발령요건 검토 및 시행여부 결정 (D-2일, ~17:15) (행정·공공기관은 평소 준비사항)	예비저감조치 발령 및 전파 (D-2일, 17:15~)	예비저감조치 시행 (D-1일, 06~21시)	발령요건 검토 및 시행여부 결정 (D-1일, 17:00~17:15)	비상저감조치 발령 및 전파 (D-1일, 17:15~)	비상저감조치 시행 (D일, 06~21시)	비상저감조치 재발령 등 검토 (D일, 17:00)	비상저감조치 점검결과 보고·평가
시·도 환경부서		<ul style="list-style-type: none"> 예비저감상황실 운영 유관부서 예비저감조치 준비 협조 요청 직원 및 소속·산하 기관 담당자 비상연락망 확인 특별점검반 운영계획 수립 	<ul style="list-style-type: none"> 비상저감조치 시행여부 결정 및 관계기관 통보 - 차량2부제, 관용차량 운행 금지 등 안내 관할 지역 내 비상저감조치 시행 사실 전파(재난문자 발송, 홈페이지 상황개제, 전광판 및 대중교통 광고 등) 특별점검반 운영계획 확인 	<ul style="list-style-type: none"> 비상저감조치 총괄 특별점검반 운영계획 확인 	<ul style="list-style-type: none"> 비상저감상황실 운영 유관부서 비상저감조치 준비 협조 요청 직원 및 소속·산하 기관 담당자 비상연락망 확인 특별점검반 운영계획 수립 	<ul style="list-style-type: none"> 비상저감조치 시행여부 결정 및 관계기관 통보 - 차량2부제, 관용차량 운행 금지 등 안내 관할 지역 내 비상저감조치 시행 사실 전파(재난문자 발송, 홈페이지 상황개제, 전광판 및 대중교통 광고 등) 특별점검반 운영계획 확인 	<ul style="list-style-type: none"> 비상저감조치 총괄 특별점검반 운영계획 확인 	<ul style="list-style-type: none"> 비상저감조치 재발령 검토 재발령시 5단계 조치사항 시행 	<ul style="list-style-type: none"> 비상저감조치 결과 보고 취합 및 보고 (수도권대기환경청, 유역지방환경청)
차량 운행제한, 배출가스, 공회전		<ul style="list-style-type: none"> 차량 운행제한, 배출가스, 공회전 점검계획 수립 - 담당자 비상연락망 확인 	<ul style="list-style-type: none"> 차량 운행제한, 배출가스, 공회전 단속 준비 	<ul style="list-style-type: none"> 차량 운행제한, 배출가스, 공회전 단속 	<ul style="list-style-type: none"> 차량 운행제한, 배출가스, 공회전 점검계획 수립 - 담당자 비상연락망 확인 	<ul style="list-style-type: none"> 차량 운행제한, 배출가스, 공회전 단속 준비 	<ul style="list-style-type: none"> 차량 운행제한, 배출가스, 공회전 단속 	<ul style="list-style-type: none"> 재발령시 5단계 조치사항 시행 	<ul style="list-style-type: none"> 운영결과 보고 (시·도)

		예비저감조치(행정·공공기관)				비상저감조치(행정·공공기관 + 민간)			
		1단계	2단계	3단계	4단계	5단계	6단계	7단계	8단계
시행 단계	관계 기관	예비저감조치 준비기	예비저감조치 발령기	예비저감조치 시행기	비상저감조치 준비기	비상저감조치 발령기	비상저감조치 시행기	비상저감조치 재발령 검토기	비상저감조치 종결·평가기
		발령조건 검토 및 시행여부 결정 (D-2일, ~17:15) (행정·공공기관은 평시 준비사항)	예비저감조치 발표 및 전파 (D-2일, 17:15~)	예비저감조치 시행 (D-1일, 06~21시)	발령조건 검토 및 시행여부 결정 (D-1일, 17:00~17:15)	비상저감조치 발표 및 전파 (D-1일, 17:15~)	비상저감조치 시행 (D일, 06~21시)	비상저감조치 재발령 등 검토 (D일, 17:00)	점검결과 보고·평가
사업장, 공사장 점검		<ul style="list-style-type: none"> 사업장(공사장)관리 점검계획 수립 - 담당자 비상연락망 확인 	<ul style="list-style-type: none"> 사업장(공사장)관리 점검 사전 준비(점검 업체, 점검 인원, 장비 등) 	<ul style="list-style-type: none"> 사업장(공사장)관리 조ام 조정 상황 점검 	<ul style="list-style-type: none"> 사업장(공사장)관리 점검계획 수립 - 담당자 비상연락망 확인 	<ul style="list-style-type: none"> 사업장(공사장)관리 점검 사전 준비(점검 업체, 점검 인원, 장비 등) 	<ul style="list-style-type: none"> 사업장(공사장)관리 조ام 조정 상황 점검 	<ul style="list-style-type: none"> 재발령시 5단계 조치사항 시행 	<ul style="list-style-type: none"> 운영결과 보고 (시·도)
도로청소		<ul style="list-style-type: none"> 살수차 및 도로청소차 운영계획 수립 - 담당자 비상연락망 확인 	<ul style="list-style-type: none"> 살수차 및 도로청소 운영계획 확인 	<ul style="list-style-type: none"> 살수차 및 도로청소 확대 운영 	<ul style="list-style-type: none"> 살수차 및 도로청소 운영계획 수립 - 담당자 비상연락망 확인 	<ul style="list-style-type: none"> 살수차 및 도로청소 확대 운영 	<ul style="list-style-type: none"> 살수차 및 도로청소 확대 운영 	<ul style="list-style-type: none"> 재발령시 5단계 조치사항 시행 	<ul style="list-style-type: none"> 운영결과 보고 (시·도)
불법소각·산불단속		<ul style="list-style-type: none"> 불법소각·산불단속 계획 수립 - 담당자 비상연락망 확인 	<ul style="list-style-type: none"> 불법소각·산불단속 계획 확인 	<ul style="list-style-type: none"> 불법소각·산불단속 집중 점검 	<ul style="list-style-type: none"> 불법소각·산불단속 계획 수립 - 담당자 비상연락망 확인 	<ul style="list-style-type: none"> 불법소각·산불단속 계획 수립 	<ul style="list-style-type: none"> 불법소각·산불단속 집중 점검 	<ul style="list-style-type: none"> 재발령시 5단계 조치사항 시행 	<ul style="list-style-type: none"> 운영결과 보고 (시·도)
민감계층 등 홍보·캠페인		<ul style="list-style-type: none"> 홍보·캠페인 계획 수립 - 담당자 비상연락망 확인 	<ul style="list-style-type: none"> 홍보·캠페인 계획 확인 	<ul style="list-style-type: none"> 홍보·캠페인 실시 	<ul style="list-style-type: none"> 홍보·캠페인 계획 수립 - 담당자 비상연락망 확인 	<ul style="list-style-type: none"> 홍보·캠페인 수립 	<ul style="list-style-type: none"> 홍보·캠페인 실시 	<ul style="list-style-type: none"> 재발령시 5단계 조치사항 시행 	<ul style="list-style-type: none"> 운영결과 보고 (시·도)
보건환경 연구원		<ul style="list-style-type: none"> 도시대기측정망 모니터링 	<ul style="list-style-type: none"> 도시대기측정망 모니터링 	<ul style="list-style-type: none"> 도시대기측정망 모니터링 	<ul style="list-style-type: none"> 도시대기측정망 모니터링 	<ul style="list-style-type: none"> 도시대기측정망 모니터링 	<ul style="list-style-type: none"> 도시대기측정망 모니터링 	<ul style="list-style-type: none"> 도시대기측정망 모니터링 비상저감조치 재발령 지원 	<ul style="list-style-type: none"> 모니터링 결과 등 보고(시·도)

		예비저감조치(행정·공공기관)				비상저감조치(행정·공공기관 + 민간)			
		1단계	2단계	3단계	4단계	5단계	6단계	7단계	8단계
시행 단계	관계 기관	예비저감조치 준비기	예비저감조치 발령기	예비저감조치 시행기	비상저감조치 준비기	비상저감조치 발령기	비상저감조치 시행기	비상저감조치 재발령 검토기	비상저감조치 종결·평가기
		발령요건 검토 및 시행여부 결정 (D-2일, ~17:15) (행정·공공기관은 평시 준비사항)	예비저감조치 발령 및 전파 (D-2일, 17:15~) (행정·공공기관은 평시 준비사항)	예비저감조치 시행 (D-1일, 06~21시)	발령요건 검토 및 시행여부 결정 (D-1일, 17:00~17:15)	비상저감조치 발령 및 전파 (D-1일, 17:15~)	비상저감조치 시행 (D일, 06~21시)	비상저감조치 재발령 검토 (D일, 17:00)	점검결과 보고·평가
수도권대기 환경청, 유역(지방) 환경청	공공 사업장·공사장	<ul style="list-style-type: none"> 특별점검반 운영계획 수립(지자체 합동) 관내 시도 비상저감 조치시 지도 단속 계획 수립 	<ul style="list-style-type: none"> 비상저감조치 발령상황 확인 특별점검반 운영계획 확인 관내 시도 비상저감 조치시 지도 단속 계획 확인 	<ul style="list-style-type: none"> 특별점검반 운영 (지자체 합동) 관내 시도 비상저감 조치시 지도 단속 실시 	<ul style="list-style-type: none"> 특별점검반 운영계획 수립(지자체 합동) 관내 시도 비상저감 조치시 지도 단속 계획 수립 	<ul style="list-style-type: none"> 비상저감조치 발령상황 확인 특별점검반 운영계획 확인 관내 시도 비상저감 조치시 지도 단속 계획 확인 	<ul style="list-style-type: none"> 특별점검반 운영 (지자체 합동) 관내 시도 비상저감 조치시 지도 단속 실시 	<ul style="list-style-type: none"> 재발령시 5단계 조치사항 시행 	<ul style="list-style-type: none"> 비상저감조치 시도 결과보고 취합 및 보고(환경부)
		<ul style="list-style-type: none"> 비상저감조치 관리카드 비치 담당자 비상연락망 확인 	<ul style="list-style-type: none"> 기관내 직원 및 소속 기관 전파 차량 2부제 의무 시행, 관용차량 운행 자제 전파 비상저감조치 관리카드의 조치사항 등 시행 준비 	<ul style="list-style-type: none"> 차량 2부제 의무 시행, 관용차량 운행 자제 비상저감조치 시행 	<ul style="list-style-type: none"> 비상저감조치 관리카드 비치 담당자 비상연락망 확인 	<ul style="list-style-type: none"> 비상저감조치 관리카드의 조치사항 등 시행 준비 	<ul style="list-style-type: none"> 비상저감조치 관리카드의 조치사항 등 시행 준비 	<ul style="list-style-type: none"> 비상저감조치 시행 	<ul style="list-style-type: none"> 재발령시 5단계 조치사항 시행
민간 사업장·공사장	민간 사업장·공사장	<ul style="list-style-type: none"> 〈자발적합의사업장 등〉 비상저감조치 관리카드 비치 담당자 비상연락망 확인 	<ul style="list-style-type: none"> 〈자발적합의사업장 등〉 기관내 직원 전파 비상저감조치 관리카드의 조치사항 등 시행 준비 	<ul style="list-style-type: none"> 〈자발적합의사업장 등〉 비상저감조치 시행 	<ul style="list-style-type: none"> 비상저감조치 관리카드 비치 담당자 비상연락망 확인 	<ul style="list-style-type: none"> 비상저감조치 관리카드의 조치사항 등 시행 준비 	<ul style="list-style-type: none"> 비상저감조치 시행 	<ul style="list-style-type: none"> 재발령시 5단계 조치사항 시행 	<ul style="list-style-type: none"> 자체점검결과 보고 (시·도)

		예비저감조치(행정·공공기관)				비상저감조치(행정·공공기관 + 민간)			
		1단계	2단계	3단계	4단계	5단계	6단계	7단계	8단계
		예비저감조치 준비기	예비저감조치 발령기	예비저감조치 시행기	비상저감조치 준비기	비상저감조치 발령기	비상저감조치 시행기	비상저감조치 재발령 검토기	비상저감조치 종결·평가기
시행 단계		발령요건 검토 및 시행여부 결정 (D-2일, ~17:15) (행정·공공기관은 평시 준비사항)	예비저감조치 발령 및 전파 (D-2일, 17:15~)	예비저감조치 시행 (D-1일, 06~21시)	발령요건 검토 및 시행여부 결정 (D-1일, 17:00~17:15)	비상저감조치 발령 및 전파 (D-1일, 17:15~)	비상저감조치 시행 (D일, 06~21시)	비상저감조치 재발령 등 검토 (D일, 17:00)	점검결과 보고·평가
관계 기관		발령요건 검토 및 시행여부 결정 (D-2일, ~17:15) (행정·공공기관은 평시 준비사항)	예비저감조치 발령 및 전파 (D-2일, 17:15~)	예비저감조치 시행 (D-1일, 06~21시)	발령요건 검토 및 시행여부 결정 (D-1일, 17:00~17:15)	비상저감조치 발령 및 전파 (D-1일, 17:15~)	비상저감조치 시행 (D일, 06~21시)	비상저감조치 재발령 등 검토 (D일, 17:00)	점검결과 보고·평가
행정·공공기관 (공통)		<ul style="list-style-type: none"> 기관내 직원 및 소속·산하기관 담당자 비상연락망 확인(공사업장·공사장 담당자 포함) 	<ul style="list-style-type: none"> 기관내 직원 및 소속·산하기관 담당자 비상연락망 확인(공사업장·공사장 담당자 포함) 에너지 절약 실천 등짐 	<ul style="list-style-type: none"> 차량 2부제 의무, 관용차량 운행 금지 등 시행 	<ul style="list-style-type: none"> 직원 및 소속·산하기관 담당자 비상연락망 확인(공사업장·공사장 담당자 포함) 	<ul style="list-style-type: none"> 기관내 직원 및 소속·산하기관 담당자 비상연락망 확인(공사업장·공사장 담당자 포함) 차량 2부제 의무, 관용차량 운행 금지 등 시행 	<ul style="list-style-type: none"> 기관 전광판을 활용하여 비상저감 조치 시행 홍보 차량2부제 및 사무장·공사장 비상저감조치 자체 점검 	<ul style="list-style-type: none"> 재발령시 5단계 조치사항 시행 	<ul style="list-style-type: none"> 자체점검결과 보고 (시·도)
행정안전부		<ul style="list-style-type: none"> 방송·전광판 등 활용 행동요령, 비상저감 조치 시행 등 전파 	<ul style="list-style-type: none"> 방송·전광판 등 활용 행동요령, 비상저감 조치 시행 등 전파 	<ul style="list-style-type: none"> 방송·전광판 등 활용 행동요령, 비상저감 조치 시행 등 전파 	<ul style="list-style-type: none"> 방송·전광판 등 활용 행동요령, 비상저감 조치 시행 등 전파 	<ul style="list-style-type: none"> 방송·전광판 등 활용 행동요령, 비상저감 조치 시행 등 전파 	<ul style="list-style-type: none"> 방송·전광판 등 활용 행동요령, 비상저감 조치 시행 등 전파 	<ul style="list-style-type: none"> 재발령시 5단계 조치사항 시행 	<ul style="list-style-type: none"> 자체점검결과 보고 (시·도)
산업자원부 (전력거래소)		<ul style="list-style-type: none"> (상한제약 발령시) 화력발전 상한제약 전파 		<ul style="list-style-type: none"> (상한제약 시행시) 화력발전 상한제약 시행 	<ul style="list-style-type: none"> (상한제약 발령시) 화력발전 상한제약 전파 		<ul style="list-style-type: none"> (상한제약 시행시) 화력발전 상한제약 시행 	<ul style="list-style-type: none"> 재발령시 5단계 조치사항 시행 	<ul style="list-style-type: none"> 자체점검결과 보고 (시·도)
국토교통부 (한국도로공사)		<ul style="list-style-type: none"> 상수, 진공흡입 등 고속도로 청소 계획 수립 도로상황 안내 전광판 등 비상저감조치 홍보 	<ul style="list-style-type: none"> 상수, 진공흡입 등 고속도로 청소 계획 수립 도로상황 안내 전광판 등 비상저감조치 홍보 	<ul style="list-style-type: none"> 상수, 진공흡입 등 고속도로 청소 확대 실시 도로상황 안내 전광판 등 비상저감조치 홍보 	<ul style="list-style-type: none"> 상수, 진공흡입 등 고속도로 청소 계획 수립 도로상황 안내 전광판 등 비상저감조치 홍보 	<ul style="list-style-type: none"> 상수, 진공흡입 등 고속도로 청소 확대 실시 도로상황 안내 전광판 등 비상저감조치 홍보 	<ul style="list-style-type: none"> 상수, 진공흡입 등 고속도로 청소 확대 실시 도로상황 안내 전광판 등 비상저감조치 홍보 	<ul style="list-style-type: none"> 재발령시 5단계 조치사항 시행 	<ul style="list-style-type: none"> 자체점검결과 보고 (시·도)

시행 단계		예비저감조치(행정·공공기관)				비상저감조치(행정·공공기관 + 민간)				
		1단계	2단계	3단계	4단계	5단계	6단계	7단계	8단계	
관계 기관	예비저감조치 준비기	발령요건 검토 및 시행여부 결정 (D-2일, ~17:15) (행정·공공기관은 평시 준비사항)	예비저감조치 발표 및 전파 (D-2일, 17:15~)	예비저감조치 시행 (D-1일, 06~21시)	비상저감조치 준비기	비상저감조치 발표 및 전파 (D-1일, 17:15~)	비상저감조치 시행기	비상저감조치 재발령 검토기 (D일, 17:00)	비상저감조치 종결·평가기	점검결과 보고·평가
	국토교통부 (코레일)	<ul style="list-style-type: none"> 코레일 운영 구간 물창소 계획 및 홍보계획 수립 	<ul style="list-style-type: none"> 코레일 운영 구간 물창소 계획 확인 승강장, 지하철 객차 등 비상저감조치 안내방송 및 전광판 송출 	<ul style="list-style-type: none"> 코레일 운영 구간 물창소 계획 시행 승강장, 지하철 객차 등 비상저감조치 안내방송 및 전광판 송출 	<ul style="list-style-type: none"> 코레일 운영 구간 물창소 계획 수립 홍보계획 수립 	<ul style="list-style-type: none"> 코레일 운영 구간 물창소 계획 확인 승강장, 지하철 객차 등 비상저감조치 안내방송 및 전광판 송출 	<ul style="list-style-type: none"> 코레일 운영 구간 물창소 계획 시행 승강장, 지하철 객차 등 비상저감조치 안내방송 및 전광판 송출 	<ul style="list-style-type: none"> 재발령시 5단계 조치사항 시행 	<ul style="list-style-type: none"> 자체점검결과 보고 (시·도) 	
	농식품부 (농진청)·신라청	<ul style="list-style-type: none"> 농촌 및 산림지역 쓰레기 불법소각 감시 계획 수립 노천소각 금지 홍보 및 특별단속 계획 수립 화목보일러 사용자제 홍보 및 현장점검 계획 수립 	<ul style="list-style-type: none"> 농촌 및 산림지역 쓰레기 불법소각 감시 계획 확인 노천소각 금지 홍보 및 특별단속 계획 수립 화목보일러 사용자제 홍보 및 현장점검 계획 확인 	<ul style="list-style-type: none"> 농촌 및 산림지역 쓰레기 불법소각 감시 시행 노천소각 금지 홍보 및 특별단속 시행 화목보일러 사용자제 홍보 및 현장점검 시행 	<ul style="list-style-type: none"> 농촌 및 산림지역 쓰레기 불법소각 감시 수립 노천소각 금지 홍보 및 특별단속 계획 수립 화목보일러 사용자제 홍보 및 현장점검 계획 수립 	<ul style="list-style-type: none"> 농촌 및 산림지역 쓰레기 불법소각 감시 시행 노천소각 금지 홍보 및 특별단속 시행 화목보일러 사용자제 홍보 및 현장점검 시행 	<ul style="list-style-type: none"> 농촌 및 산림지역 쓰레기 불법소각 감시 시행 노천소각 금지 홍보 및 특별단속 시행 화목보일러 사용자제 홍보 및 현장점검 시행 	<ul style="list-style-type: none"> 재발령시 5단계 조치사항 시행 	<ul style="list-style-type: none"> 자체점검결과 보고(시·도) 	
	문화체육관광부	<ul style="list-style-type: none"> 정부알림 전광판, 정채홍보 SNS 등에 비상저감조치 홍보 	<ul style="list-style-type: none"> 정부알림 전광판, 정채홍보 SNS 등에 비상저감조치 홍보 	<ul style="list-style-type: none"> 정부알림 전광판, 정채홍보 SNS 등에 비상저감조치 홍보 	<ul style="list-style-type: none"> 정부알림 전광판, 정채홍보 SNS 등에 비상저감조치 홍보 	<ul style="list-style-type: none"> 정부알림 전광판, 정채홍보 SNS 등에 비상저감조치 홍보 	<ul style="list-style-type: none"> 정부알림 전광판, 정채홍보 SNS 등에 비상저감조치 홍보 	<ul style="list-style-type: none"> 정부알림 전광판, 정채홍보 SNS 등에 비상저감조치 홍보 	<ul style="list-style-type: none"> 재발령시 5단계 조치사항 시행 	<ul style="list-style-type: none"> 자체점검결과 보고(시·도)
고용노동부	<ul style="list-style-type: none"> 사업장·공사업 근로자 건강보호 조치 지침 운영 	<ul style="list-style-type: none"> 사업장·공사업 근로자 건강보호 조치 시행 협조 요청 	<ul style="list-style-type: none"> 사업장·공사업 근로자 건강보호 조치 시행 	<ul style="list-style-type: none"> 사업장·공사업 근로자 건강보호 조치 지침 운영 	<ul style="list-style-type: none"> 사업장·공사업 근로자 건강보호 조치 시행 협조 요청 	<ul style="list-style-type: none"> 사업장·공사업 근로자 건강보호 조치 시행 협조 요청 	<ul style="list-style-type: none"> 사업장·공사업 근로자 건강보호 조치 시행 	<ul style="list-style-type: none"> 재발령시 5단계 조치사항 시행 	<ul style="list-style-type: none"> 자체점검결과 보고(시·도) 	

		예비저감조치(행정·공공기관)				비상저감조치(행정·공공기관 + 민간)			
		1단계	2단계	3단계	4단계	5단계	6단계	7단계	8단계
시행 단계	관계 기관	예비저감조치 준비기	예비저감조치 발령기	예비저감조치 시행기	비상저감조치 준비기	비상저감조치 발령기	비상저감조치 시행기	비상저감조치 재발령 검토기	비상저감조치 종결·평가기
		발령요건 검토 및 시행여부 결정 (D-2일, ~17:15) (행정·공공기관은 평시 준비사항)	예비저감조치 발표 및 전파 (D-2일, 17:15~)	예비저감조치 시행 (D-1일, 06~21시)	발령요건 검토 및 시행여부 결정 (D-1일, 17:00~17:15)	비상저감조치 발표 및 전파 (D-1일, 17:15~)	비상저감조치 시행 (D일, 06~21시)	비상저감조치 재발령 등 검토 (D일, 17:00)	점검결과 보고·평가
해양경찰청		<ul style="list-style-type: none"> ○ 항만, 부두, 어선 내 불법소각 특별 단속 계획 수립 ○ 운행제한 위반 차량 등 단속 지원 계획 수립 ○ 교통량 조사 지원 (사·도 협조) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 항만, 부두, 어선 내 불법소각 특별 단속 준비 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 항만, 부두, 어선 내 불법소각 특별 단속 실시 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 항만, 부두, 어선 내 불법소각 특별 단속 계획 수립 ○ 운행제한 위반 차량 등 단속 지원 계획 수립 ○ 교통량 조사 지원 (사·도 협조) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 항만, 부두, 어선 내 불법소각 특별 단속 준비 ○ 운행제한 위반 차량 등 단속 지원 준비 (사·도 협조) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 항만, 부두, 어선 내 불법소각 특별 단속 실시 ○ 운행제한 위반 차량 등 단속 지원 (사·도 협조) ○ 교통량 조사 지원 (사·도 협조) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 재발령시 5단계 조치사항 시행 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 자체점검결과 보고(시·도)
경찰청		<ul style="list-style-type: none"> ○ 학교·어린이집·노인 요양시설 야외활동(실외수업) (실외수업) 행동매뉴얼 교육 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 학교·어린이집·노인 요양시설 야외활동(실외수업) 자체 등 검토 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 학교·어린이집·노인 요양시설 야외활동(실외수업) 자체 등 요청 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 학교·어린이집·노인 요양시설 야외활동(실외수업) 자체요청 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 학교·어린이집·노인 요양시설 야외활동(실외수업) 자체 등 검토 등·학교(원) 시간 조정 (비상저감조치 발령시) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 학교·어린이집·노인 요양시설 야외활동(실외수업) 자체 등 요청 ○ 필요시 등·학교(원) 시간 조정 (비상저감조치 발령시) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 재발령시 5단계 조치사항 시행 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 자체점검결과 보고(시·도)
교육부/보건복지부		<ul style="list-style-type: none"> ○ 학교·어린이집·노인 요양시설 야외활동(실외수업) (실외수업) 행동매뉴얼 교육 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 학교·어린이집·노인 요양시설 야외활동(실외수업) 자체 등 검토 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 학교·어린이집·노인 요양시설 야외활동(실외수업) 자체 등 요청 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 학교·어린이집·노인 요양시설 야외활동(실외수업) 자체요청 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 학교·어린이집·노인 요양시설 야외활동(실외수업) 자체 등 검토 등·학교(원) 시간 조정 (비상저감조치 발령시) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 학교·어린이집·노인 요양시설 야외활동(실외수업) 자체 등 요청 ○ 필요시 등·학교(원) 시간 조정 (비상저감조치 발령시) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 재발령시 5단계 조치사항 시행 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 자체점검결과 보고(시·도)

※ 자료: 과농도 미세먼지 비상저감조치 시행 지침(환경부, 2019. 2)

부록 3 수도권 고농도 발생 패턴 및 통계

■ 수도권 고농도 발생 패턴



※ 출처: 국립환경과학원, 2018. 고농도 미세먼지 정확도 향상을 위한 개념모델 개발 연구(I)

■ 수도권 고농도 발생 통계

○ 봄(55%) > 겨울(40%), 3월(31%) > 1월(22%), 복합(63%) > 국외(24%)

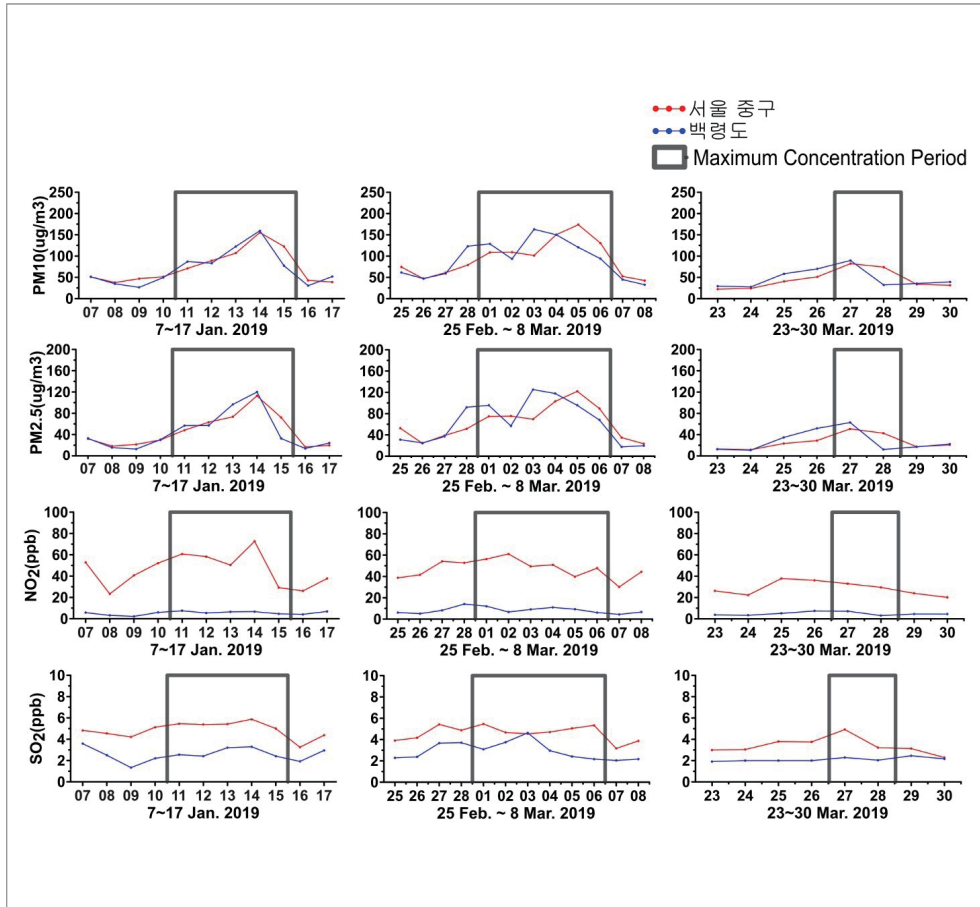
2016~2019	국외	복합형	국내	전체
봄	9	32	5	46
가을	-	2	2	4
겨울	11	18	4	33
전체	20	52	11	83

※ 출처: Park et al., 2019

Session 03 미세먼지 비상저감조치 효과

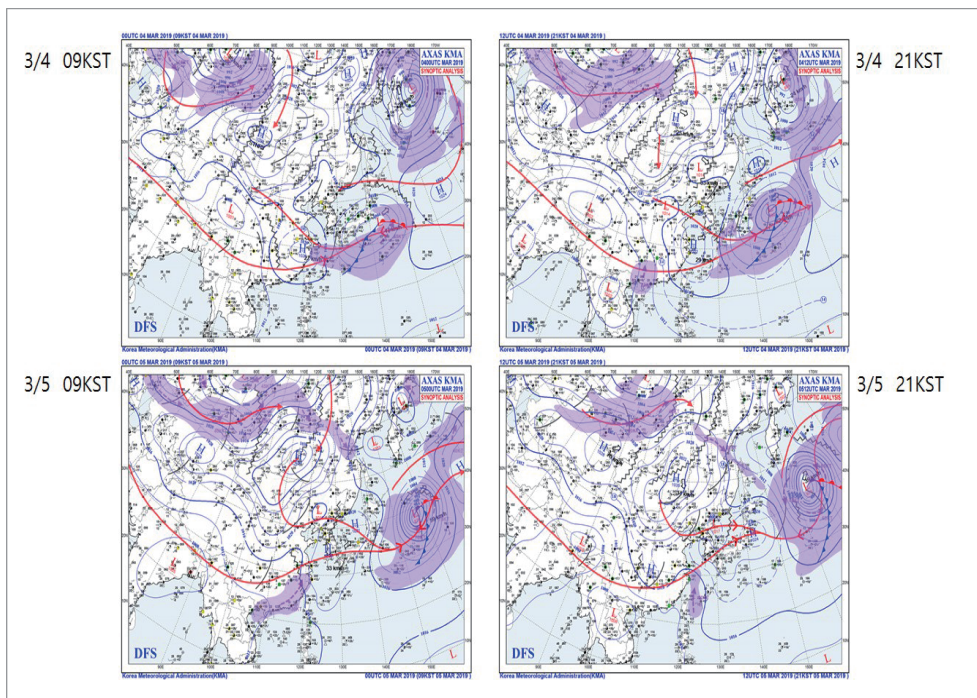
부록 4 최근 비상저감조치 기간 동안 미세먼지 시계열 특성

■ 고농도 발생 3일전부터 상승



부록 5 군집 분석을 통한 고농도 발생 기간 일기도 특성

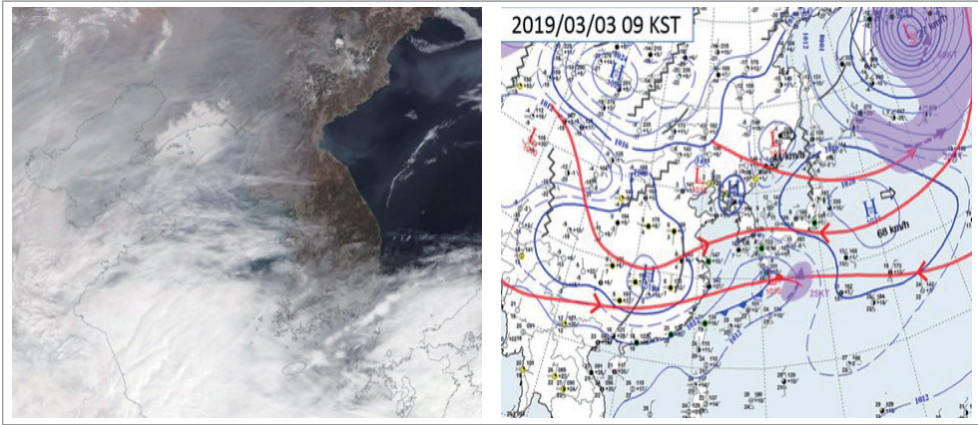
- 군집 분석: 고농도 미세먼지 발생 기간 동안 한반도는 고기압 영향, 850hPa 에서는 기압능이 위치해 있었음. 저농도 기간 동안에는 지상 저기압 또는 기압골이 위치, 850hPa 면에서는 강한 기압골이 한반도를 통과하였음
- 고농도 발생 기간 일기도: 고농도 미세먼지 기간인 3월 1일부터 3월 5일까지 한반도 전역이 고기압의 영향권에 있었으며, 3월 5일 00UTC(09KST)에 한반도 북쪽에 중심을 둔 저기압과 화남지방에서 발달하기 시작한 기압골은 상층 850hPa 저기압 및 500hPa 기압골 세력과 연계되어 발달하며 동진하였고 3월 6일 한반도 지역에서 저기압 세력이 남북으로 연결되기 시작하면서 한반도 전역이 저기압의 영향권에 들게 됨



〈부록 2-1〉 2019년 3월 4일 09 KST부터 5일 21 KST까지 12시간 간격의 지상일기도

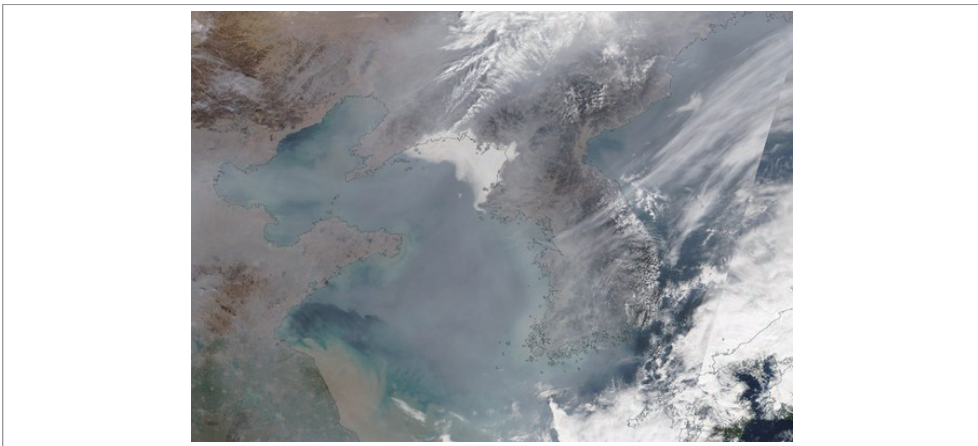
미세먼지 현황 분석 및 개선 보고서

- 고농도 발생 하루 전 화남지역에서 동진한 고기압세력이 약화되었으며, 한반도는 스모그로 덮여지기 시작함



〈부록 2-2〉 2019년 3월 3일 위성 사진

〈부록 2-3〉 2019년 3월 3일 일기도



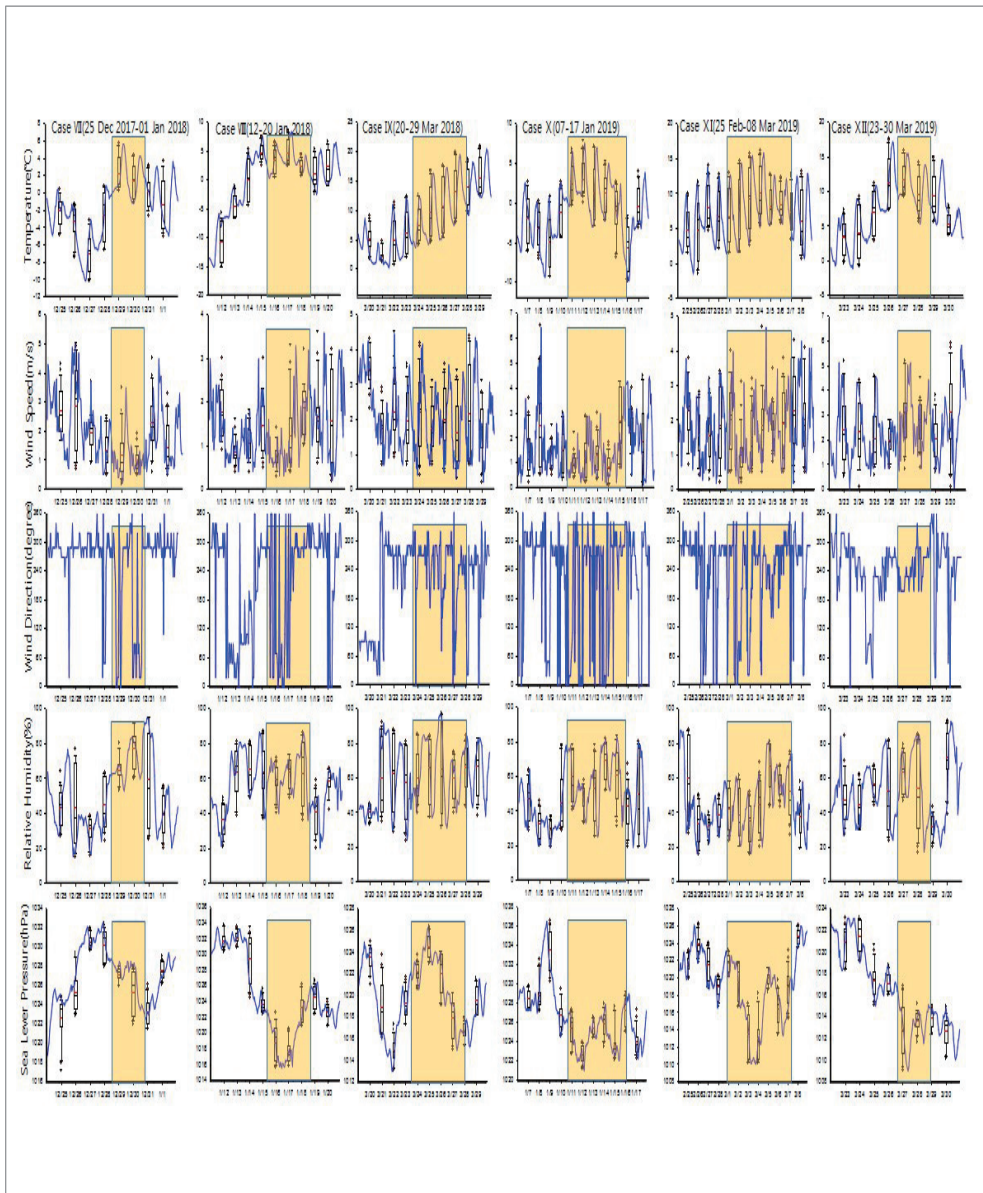
〈부록 2-4〉 2019년 3월 4일 위성 사진

- 고농도 미세먼지 발생시 특징적인 종관 패턴



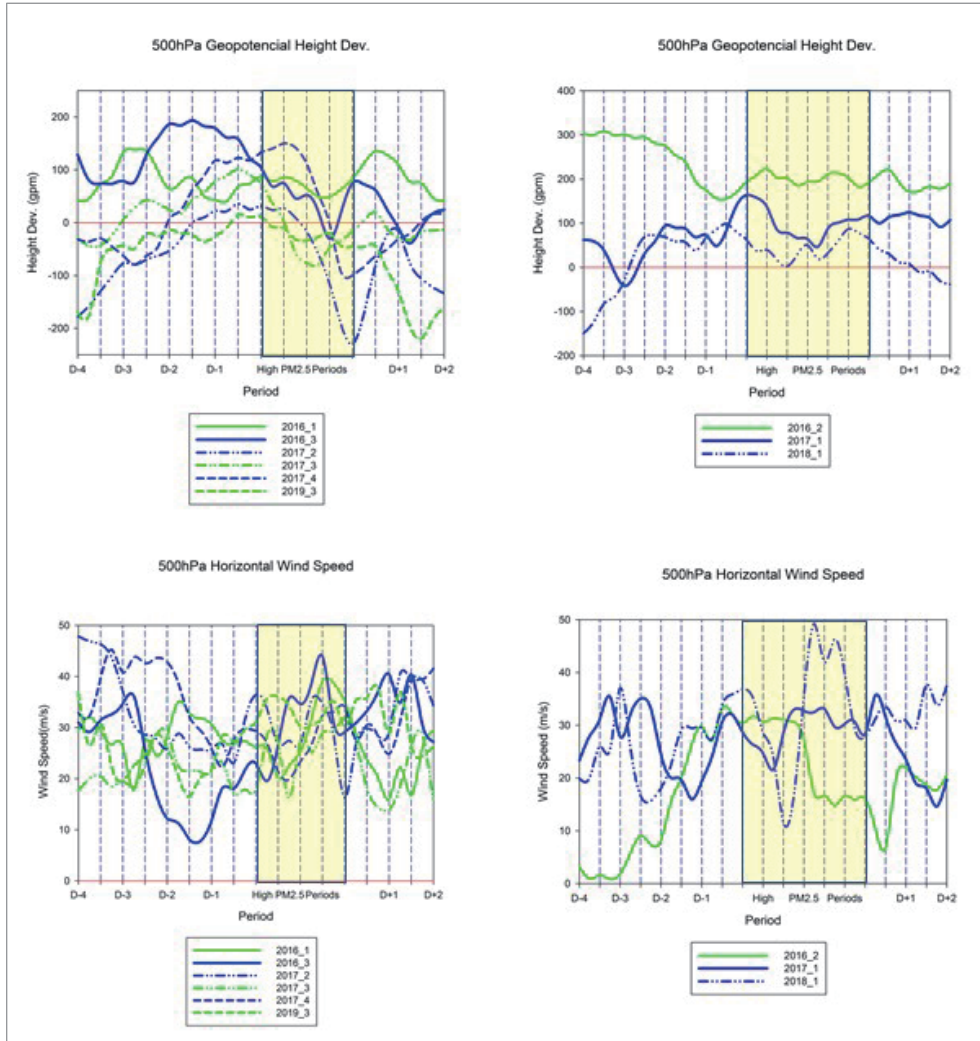
부록 6 최근 비상저감조치 기간 동안 기온, 기압 등의 시계열 특성

- 비상저감조치 조건을 충족하는 기간 중 종로구 기온, 풍속 등의 일변동. 고농도 발생 3일 전부터 기온 상승, 해면 기압 하강이 나타남



미세먼지 현황 분석 및 개선 보고서

- 비상저감조치 기간 3일전부터 지오폠펜셜 고도(GPH) 상승 이후 하강, 500hPa 고도에서 풍속은 2~3일전부터 상승하고 이후 변동폭이 높지 않으며 일정하게 유지됨



부록 7 수도권지역에서 미세먼지 고농도 발생 동안 외부 영향

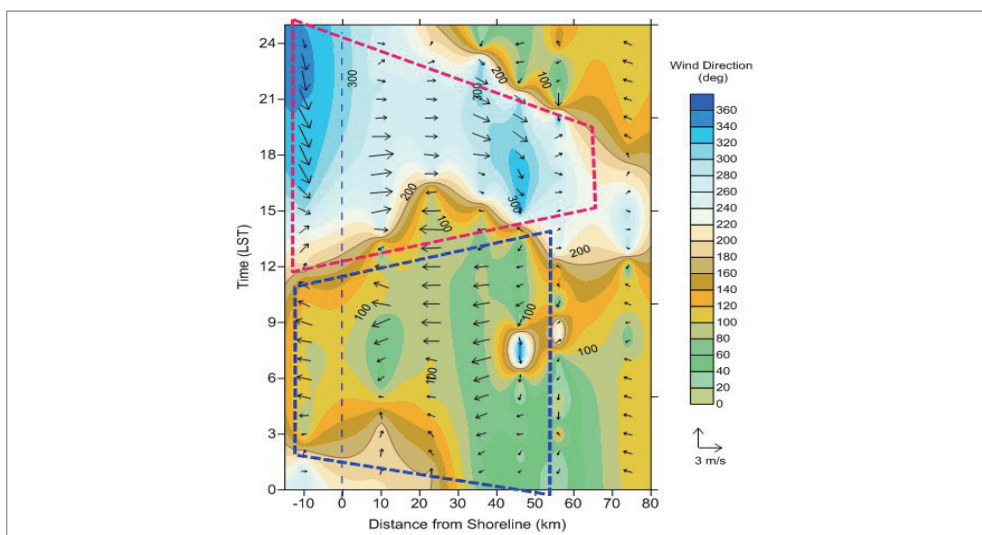
- 겨울철에는 장거리이동 영향이(일부 국내 영향을 포함하여 80% 정도) 크고, 봄철에는 국지순환으로 자체 영향이(일부 장거리이동 영향을 포함하여 60% 정도) 크게 나타남.(Case I: 장거리 영향 우세, Case II: 국내, 장거리 영향 복합, Case III: 국내 영향 우세)

(단위 %)

Case	Season	PM ₁₀	PM _{2.5}	NO ₂	SO ₂
Case I	Spring	72(72)	65(65)	26(24)	49(38)
	Winter_a	84(84)	85(85)	68(67)	58(53)
	Winter_b	92(92)	92(92)	72(72)	68(65)
	Avg.	83(83)	81(81)	55(54)	58(52)
Case II	Spring	63(63)	66(66)	43(41)	41(31)
	Autumn	72(72)	67(67)	54(54)	43(41)
	Winter	77(77)	78(78)	66(64)	46(43)
	Avg.	71(71)	70(70)	54(53)	43(38)
Case III	Spring	73(73)	76(76)	36(34)	38(30)
	Autumn	74(74)	76(76)	47(47)	37(37)
	Winter	74(74)	74(74)	61(60)	56(53)
	Avg.	74(74)	75(75)	48(47)	44(40)

※ 주: 괄호안 숫자는 당진, 태안 화력발전소 가동 중단 동안 서울에 미치는 영향을 분석한 결과이며, 2개 발전소 영향이 거의 없음을 나타냄(Park et al., 2019)

- 수도권 지역에서 오전에는 동풍, 오후에는 서풍으로 국지순환 현상이 우세함



〈부록 2-5〉 수도권에서 해안선으로부터 거리에 따른 지상 바람의 분포

부록 8 비상저감조치 기간 차량2부제 평가

○ 혼합(장거리+자체) 우세 경우 차량2부제 효과(2019. 3.1 ~3.6)

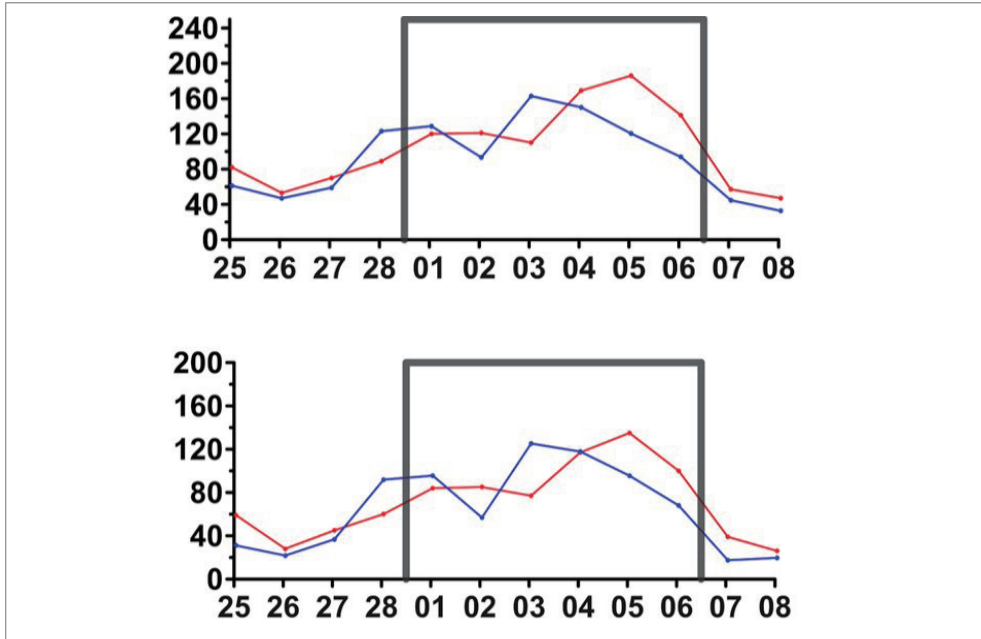
〈부록 2-6〉 서울(발강)과 백령도(파랑) PM₁₀, PM_{2.5} 농도 일변동

지역	서울	인천	하남	의정부	수원
A-3	71.6(55.9)	89.8(70.6)	73.3(57.3)	61.2(47.5)	76.6(60.9)
B-3	69.3(54.2)	84.0(66.6)	70.8(55.5)	60.9(47.2)	73.5(58.6)
감소율(%)	3.21(3.04)	6.46(5.67)	3.41(3.14)	0.49(0.63)	4.04(3.78)
A-2	72.5(56.7)	90.9(71.8)	73.4(57.3)	61.3(47.7)	76.8(61.2)
B-2	72.5(54.9)	84.8(67.4)	71.0(55.5)	60.9(47.4)	73.7(58.9)
감소율(%)	3.31(3.17)	6.71(6.13)	3.27(3.14)	0.65(0.62)	4.04(3.76)
A-1	70.5(49.8)	86.7(63.6)	70.3(49.5)	60.7(41.8)	73.9(53.9)
B-1	70.5(50.8)	86.8(63.7)	70.2(49.5)	60.7(41.8)	74.0(53.9)
감소율(%)	0.0(△2.0)	△0.11(△0.16)	0.14(0.0)	0.0(0.0)	△0.01(0.0)
A0	71.8(55.8)	89.6(70.6)	73.3(56.9)	60.6(46.9)	76.7(60.9)
B0	69.4(54.0)	83.7(66.3)	70.9(55.1)	60.4(46.7)	73.5(58.5)
감소율(%)	3.34(3.23)	6.58(6.09)	3.27(3.16)	0.33(0.43)	4.17(3.94)
A+1	70.7(54.5)	83.8(66.0)	70.8(54.6)	60.7(46.6)	73.6(58.1)
B+1	70.6(54.5)	83.8(66.0)	70.6(54.5)	60.8(46.7)	73.6(58.1)
감소율(%)	0.14(0.0)	0.0(0.0)	0.28(0.18)	△0.16(△0.21)	0.0(0.0)

* A: 차량이부제 실시 안함, B: 차량이부제 실시

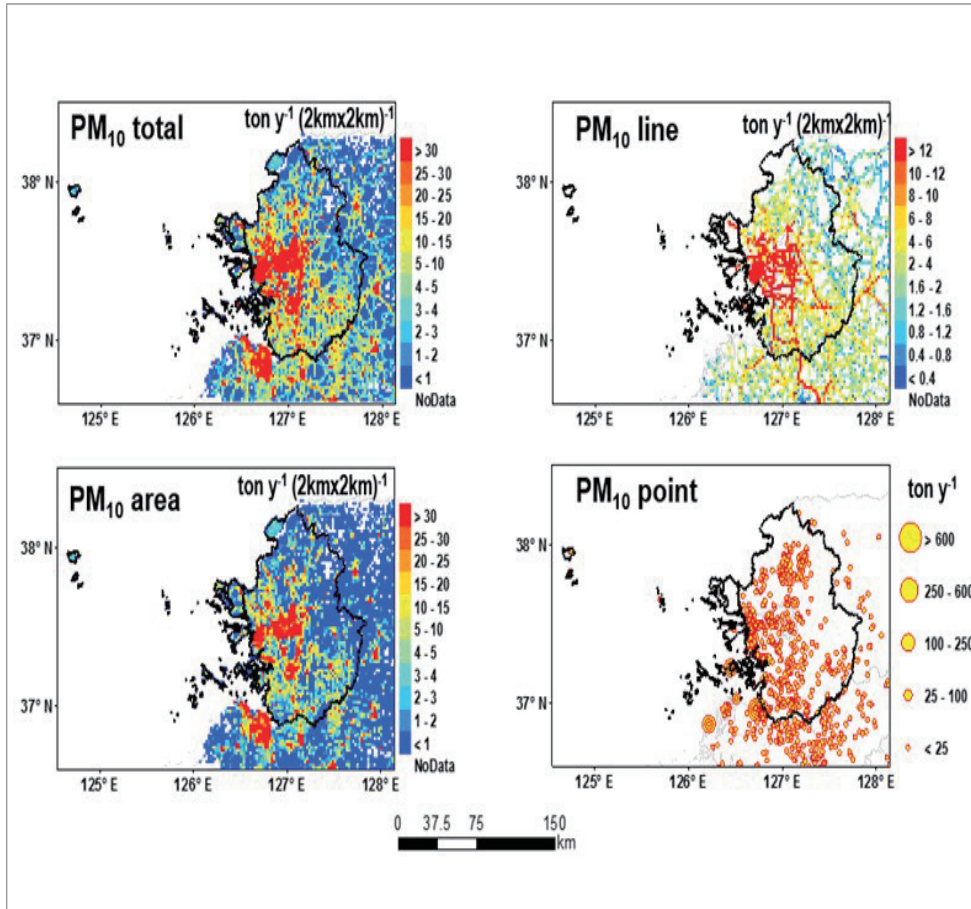
* 예: A-3: 비상저감조치 발령 3일전부터 이동오염원 배출량 감축 없음(2019.2.26.~2019.3.6)
 B-3: 비상저감조치 발령 3일전부터 이동오염원 배출량 50% 감축(2019.2.26.~2019.3.6)
 A-2: 비상저감조치 발령 2일전부터 이동오염원 배출량 감축 없음(2019.2.27.~2019.3.6)
 B-2: 비상저감조치 발령 2일전부터 이동오염원 배출량 50% 감축(2019.2.27.~2019.3.6)
 A-1: 비상저감조치 발령 1일전부터 이동오염원 배출량 감축 없음(2019.2.28.~2019.3.6)
 B-1: 비상저감조치 발령 1일전부터 이동오염원 배출량 50% 감축(2019.2.28.~2019.3.6)
 A0 : 비상저감조치 발령 당일부터 이동오염원 배출량 감축 없음(2019.3.1.~2019.3.6)
 B0 : 비상저감조치 발령 당일부터 이동오염원 배출량 50% 감축(2019.3.1.~2019.3.6)
 A+1: 비상저감조치 발령 1일후부터 이동오염원 배출량 감축 없음(2019.3.2.~2019.3.6)
 B+1: 비상저감조치 발령 1일후부터 이동오염원 배출량 50% 감축(2019.3.2.~2019.3.6)

- * 평균 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$): 1): PM_{10} 평균 농도, 2): $\text{PM}_{2.5}$ 평균 농도
- * 모델링 방법: Spin up은 1일(예, A-3 경우: 2019.2.25.~2019.3.6)
- * 배경농도: 모든 경우 배경 농도 동일(2019.2.25.~2018.2.28. 기간 동안 수도권 평균 농도)
 $\text{PM}_{10}(\mu\text{g}/\text{m}^3)$: 72.9, $\text{PM}_{2.5}(\mu\text{g}/\text{m}^3)$: 46.9, $\text{SO}_2(\text{ppb})$: 5.9, $\text{NO}_2(\text{ppb})$: 41.3, $\text{O}_3(\text{ppb})$: 21.1
- * 감소율(%): $(A-B)/A \times 100$, Δ 는 증가, 기타는 감소를 나타냄



부록 9 수도권 배출량(2015년)

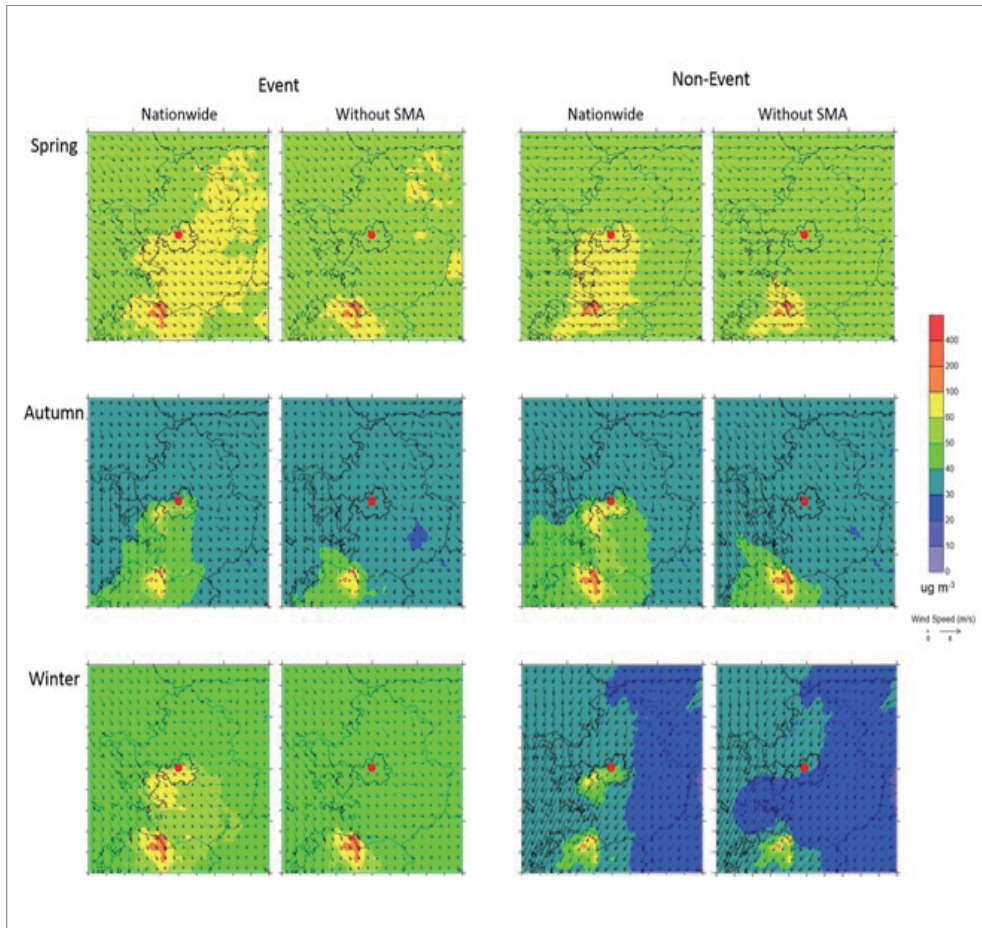
■ 수도권, 충남, 영서 및 충북 지역에서 PM₁₀ 배출원



〈부록 2-7〉 수도권에서 PM₁₀ 전체(좌상), 선(우상), 면(좌하), 점(우하) 배출량의 분포 (Park et al., 2019)

부록 10 배출량과 기상장이 미세먼지 농도에 미치는 영향

- 수도권은 겨울에는 영서, 충북, 봄에는 충남(당진)으로부터 최대 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 영향을 받음. Nationwide는 전국 배출량으로 수행한 모델링 결과, Without SMA는 전국 배출량에서 수도권 배출량을 제외한 모델링 결과이며, 봄철에는 충남 서해안, 겨울철에는 영서, 충북 지역으로부터 많은 영향을 받음



〈부록 2-8〉 전국 배출/수도권 제외 배출을 고려한 계절별 기상 농도의 공간 분포 (Park et al., 2019)



미세먼지



현황 분석 및



개선 보고서

대기질 국가측정망 신뢰도

요약 | 77

제1장 배경 | 79

제2장 현황 및 문제점 | 81

제3장 개선 방안 | 90

대표 집필자

송철한 광주과학기술원 지구환경공학부 교수

정병주 한국정보화진흥원 국토환경팀장

공동 집필자

김 준 연세대학교 대기과학과 교수

이은영 수원대학교 환경공학과 교수

박일수 한국외대 대기환경 연구센터
수석연구원

SESSION

04

SESSION
04

대기질 국가측정망 신뢰도

<p>대표 집필자 송철한 광주과학기술원 지구환경공학부 교수 정병주 한국정보화진흥원 국토환경팀장</p>	<p>공동 집필자 김 준 연세대학교 대기과학과 교수 이은영 수원대학교 환경공학과 교수 박일수 한국외대 대기환경 연구센터 수석연구원</p>
---	---

● 요약

■ 측정망 관리시스템 정립 및 측정 체계 보완·확충

- 측정자료 정도 및 결손 관리
 - 국가측정망 자료의 신뢰성 확보를 위해 우선적으로 측정 자료 결실률 최소화를 위한 환경부·지자체 공동의 노력이 필요함
- (초)미세먼지 관측망 확충
 - 국가측정망의 설치기준에 따른 측정 음영지역이 여전히 존재하며 수도권·대도시 중심으로 정보를 제공하고 있어 각 지역 대표성이 부족함
 - * 18개 지역 측정망 미설치 지역에 초미세먼지(PM2.5) 측정기 설치 확대 필요
 - 대규모 대기오염물질 배출 시설이 많은 포항, 당진, 보령 등을 ‘대기보전 특별대책지역’으로 추가 지정하고, 초미세먼지 측정망 및 관리시스템 추가 설치가 필요함
- 국가집중측정망 운영 효율화
 - 대기환경연구소(구 국가집중측정소) 확대에 있어 지자체의 정치적 목적은 지양되어야 하며, 설립 취지에 부합되는 운영을 위해 대기환경연구소 운영에 관한 법규, 운영 세칙 등을 마련할 필요가 있음

■ 국민 체감형 대기질 측정망(가칭) 구축

- 국민의 편의(편익)를 위해 ‘적정 신뢰도’를 갖춘 미세먼지 정보를 국민 요구에 맞추어 공급하는 노력이 필요함
 - (IoT 기반 자료) IoT 기반 대기질 측정센서망 구축
 - (인공위성 기반 자료) 정지궤도 환경·기상·해양 인공위성자료 기반 대기질 정보망 구축이 필요함

■ 초미세먼지 장거리 이동 관측을 위한 관측 자료 보완

- 초미세먼지의 국외 영향은 연평균 40~60%, 고농도 시기 60~80%로 우리 나라 대기질에 막대한 영향을 초래하므로, 이에 대한 효율적 감시체계 구축이 필요함
 - (환경·기상·해양 인공위성 및 간이 센서 기반의 감시망 구축) 환경·기상·해양위성 자료 기반 인접국가 (초)미세먼지 및 전구체 농도, 이동추이 동북아 광역감시·분석 시스템 개발 및 구축이 필요함
 - (관측자료 국제 공유 시스템 구축) 국내 대기질 관측망 개선의 노력과 별도로 국제 협력 네트워크를 통한 관측 자료 공유 시스템(플랫폼) 도입이 필요함

■ 대기질 측정망 자료 활용 체계 정립

- (미세먼지 예보 및 재분석 활용) 국가 대기질 측정 자료, GEMS, GOCI, MI 등의 환경·기상·해양 인공위성 자료, 1등급 간이 측정기 측정망 자료를 대기질 예·경보 시스템과 연계시킬 수 있는 과학적 시스템 구축이 필요함
- (국가 대기질 관련 기본 자료로서 ‘추이 측정소’ 설정 및 관리) 344개 국가 대기질 측정소의 잦은 이전·재배치, 장비 고장 및 수리 지체 등의 문제로 국가 및 지자체 연별(inter-annual) 변동 추이 통계에 문제가 생길 수 있으므로, 국가 통계로서 국가 및 지자체 정책 검증을 목적으로 한 엄격한 관리가 필요함
- (실시간 정보 제공·예보 시스템) 실시간 (초)미세먼지 현황 정보 제공과 지역별 오염 정도에 따른 지역주민 행동요령 권고, AI 기술을 활용하여 시간 단위 (초)미세먼지 예·경보 정보 전달 시스템 개발이 필요함

제1장 배경

(1) 대기오염물질 국가측정망 관리 및 확충·보완 필요

- 대기오염 측정망을 지속해서 확충하고 있으나, 기존 설치된 측정망 관리 미흡 및 장기 고장·수리, 관측지 이전 등에 따른 관측 결실* 및 측정 음영지역이 발생함

* 현재 국가측정망 관측자료의 자료 결실률은 대략 30~50% 수준으로 추정

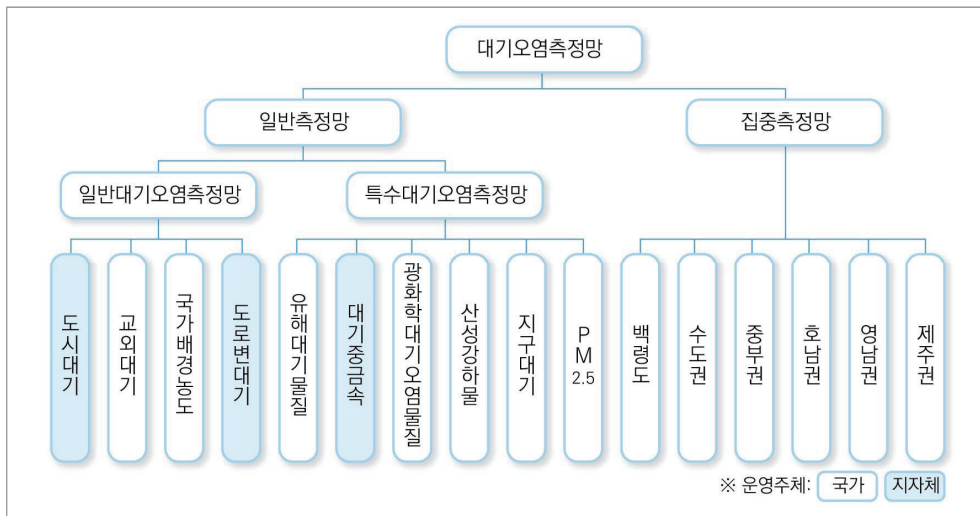
- 국가 제공 초미세먼지 정보가 수도권·대도시에 편중되어 국한된 정보 중심으로 제공됨
 - 국가측정망 설치의 목적인 국민 건강 보호라는 측면에서 수도권 및 대도시 위주로 측정망이 설계된 문제가 존재함
 - 현재 10만 이상의 시·군·구에도 ‘도시대기측정망’ 미설치 지역이 존재함
 - 인구 밀도가 낮은 지역의 경우 측정범위가 너무 광범위(1개소당 60 km² 이상)한 지역이 존재함
 - 효율적인 미세먼지 예·경보제 실시, 미세먼지 정책 달성도 평가, 국민의 보편적 보건·환경권 등을 위한 측정 음영 지역 해소 노력이 필요함

(2) 국민 체감 미세먼지 정보 제공 노력 필요

- 국민이 실제로 체감할 수 있는 실질적인 미세먼지 농도 자료 제공을 위한 간이측정기 측정망 구축 지원이 필요함
 - ※ 국민에게 제공되는 미세먼지 정보 앱(app) 60여 개 중 ‘미세미세’, ‘에어비주얼’, ‘에어맵코리아’, ‘원기날씨’ 등 민간이 제공하는 정보의 경우 측정 신뢰도 문제 발생
- 측정 음영 지역 보완을 위한 정지환경궤도 인공위성자료 시민 제공 및 이를 위한 플랫폼 구축이 필요함
 - 2020년 2월 발사한 환경부 GEMS(Geostationary Environmental Monitoring Spectrometer) 정지궤도 환경인공위성 자료의 활용성 극대화 필요

(3) 국외 영향 관측 및 경보망 구축 필요

- 국외 영향 정도를 확인하기 위한 미세먼지 농도 자료 수집 체계가 미흡함
 - 중국발 대기 정보(황사, 미세먼지 농도 등)는 일부 공개되고 있으나, 국내 미세먼지 원인 분석 및 예측·예보 등에 활용 가능한 데이터는 여전히 부족한 상태임
- 우리나라 미세먼지 농도에 지대한 영향을 미치는 국외(주로 중국) 미세먼지 및 전구물질의 현 상황, 이동 경로 추적을 위한 감시 및 경보를 위한 입체적 관측망 구축이 필요함
 - 우리나라 (초)미세먼지 국외 영향은 연평균 기준 40~60%로 추정되며, 고농도 사례 시는 60~80%로 추정됨
 - 월경성 대기오염 감시·추적을 위한 환경인공위성 자료 실시간 분석 시스템 구축 및 해안·도서 관측망 구축이 필요함



〈그림 4-1〉 대기오염측정망 구성 및 관리·운영 주체1)

1) 본 보고서에서는 현재 환경부와 지자체가 운영하는 일반대기오염 측정망 중 '일반대기오염측정망'과 '집중 측정망'만을 대상으로 분석하고, '특수대기측정망'(유해대기측정, 대기중금속 측정, 광화학대기오염물질 측정, 지구대기 측정, PM_{2.5} 측정)은 보고서의 대상에서 제외함(우리나라 대기오염 측정망 종류 및 설치 목적은 부록 1 참조) 일반대기오염측정망과 집중측정망 외에 기상·환경·해양 인공위성 자료 및 IoT 기반 간이 측정기 자료 활용 방안을 포함하였음

제2장 현황 및 문제점

(1) 현재 연구 결과가 국민에게 현안에 대한 답을 할 수 있는 수준은?

매우 미흡	약간 미흡	어느 정도	약간 만족	충분하게	완벽하게
		○			

- 정부는 '05년 12월부터 아황산가스, 일산화탄소, 이산화질소, 오존, (초)미세먼지 등 기준 대기오염물질의 농도를 시간별로 측정해 '에어코리아(Air Korea)' 웹사이트를 통해 전국 대기오염도를 실시간으로 대국민에 제공하고 있음
- 전국 측정망에서 측정되는 농도자료는 국가대기오염정보관리시스템(NAMIS*)에서 수집하고 Air Korea는 실시간 시간별 정보 공유 시스템

* NAMIS: National Ambient air quality Monitoring Information System



〈그림 4-2〉 대기오염 측정망 대기오염도 정보제공 개념도 및 제공화면

미세먼지 현황 분석 및 개선 보고서

- 우리나라 대기오염 측정망은 지속적으로 확충되고 있기는 하나, 기존 설치된 측정망 관리 인력 부족 및 장기 고장·수리, 관측지 이전 등에 따른 관측 결실 및 측정 음영지역이 발생하고 있음
 - 환경부 및 지자체에서 운영 중인 대기 측정망은 총 657개소(2019년 9월말 기준)가 있으나 측정망 고장, 관측지 이전 등으로 결측 지역이 많이 발생하며, 기존 측정 장비에 대한 관리체계가 미흡함
 - ※ 측정망 11종 : 도시대기, 도로변대기, 산성강하물, 국가배경농도, 교외대기, 대기중금속, 유해 대기물질, 광화학대기오염물질, 지구대기, PM_{2.5}, 대기오염집중
 - 현재 측정망이 설치되지 않은 7개 지자체에서는 미세먼지 지수 확인이 불가하고, 지자체별 도시대기 측정소* 숫자도 차이가 많음
 - * 도시대기측정소의 경우 경기도에 91개 관측소가 존재하는데 반해, 광주 9개, 제주도에는 6개의 관측소만 존재

〈표 4-1〉 미세먼지 농도 확인 불가지역

(단위: 개)

구 분		소 계
경상북도	문경시, 예천군, 의성군, 영양군, 청송군, 성주군, 청도군	7

※ 출처: 에어코리아('19.12)

- 국가측정망 대기질 측정 자료 관리에 있어 보다 우선적으로 자료 결손을 최소화 하는 노력이 필요함
 - 측정 자료의 결손은 엄격한 정도관리(QA/QC: Quality Assurance/Quality Control)로 인한 불가피한 측면은 있으나, 장비의 잦은 이전, 수리 지체 등에 의한 결손은 줄이고자 하는 노력이 필요함
 - 대기오염물질 측정소 관측 자료의 QA/QC 및 측정 장비 관리를 위해서 필요하다면 과감한 외부 위탁(아웃소싱)*이 필요함
 - * 현재 관측 장비 관리 및 QA/QC는 한국표준과학연구소, 한국환경공단, 한국산업기술시험원 등에 용역 위탁을 실시하고 있음. 필요하다면 자격요건을 갖춘 대학 연구소 등에도 과감하게 외부 위탁(outsourcing)을 실시할 필요도 있음

- 대기오염물질 측정소에는 대부분 기상측정망인 AWS(Automatic Weather Station)가 설치되어 있으나 동일 위치에 설치되어 있지 않아 기상요인과 대기질 사이의 과학적인 영향 분석이 어려움

〈표 4-2〉 대기오염 측정망 종류 및 설치 목적

측정망 종류		설치 목적	
일반 측정망	일반 대기오염 측정망	도시 대기	도시지역의 평균 대기질 농도를 파악하여 환경기준 달성 여부 판정
		도로변 대기	자동차 통행량과 유동인구가 많은 도로변 대기질 파악
		국가배경농도	국가적인 배경농도를 파악하고 외국으로부터의 오염물질 유입, 유출상태 등 파악
		교외 대기	도시를 둘러싼 교외 지역의 배경농도 파악
	특수 대기오염 측정망	유해대기물질, 대기중금속 등	도시지역, 주요 산단, 배경농도 지역에서 특정 대기오염물질 오염 실태 파악
		초미세먼지 성분(PM _{2.5})	인체위해도가 높은 초미세먼지(PM _{2.5})의 농도 파악, 성분파악을 통한 배출원 규명
대기오염 집중 측정망	백령도, 수도권 영남권, 제주도 등	국가 배경 지역과 주요 권역별 대기질 현황, 황사 등 장거리 이동 대기오염물질 감시 및 고농도 오염 현상에 대한 원인 규명 * 백령도, 수도권, 제주 장거리 이동 대기오염물질 감시	

※ 출처: 대기오염 측정망 설치·운영 지침('19.6, 환경부) 재구성

- 지자체에 설치된 도시 대기 측정망은 총 388개 지점이며, PM_{2.5}(초미세먼지) 성분 측정망은 42개소에 설치됨²⁾('19.9 기준, 국립환경과학원)
 - 초미세먼지 측정소는 기준 도입 이후('15~) 인구 밀집 지역부터 우선 설치 하였으며, 배출원 규명을 위한 PM_{2.5}(초미세먼지)성분 측정망 설치 확대 중임

2) 대기환경월보 9월호('19.9, 국립환경과학원)

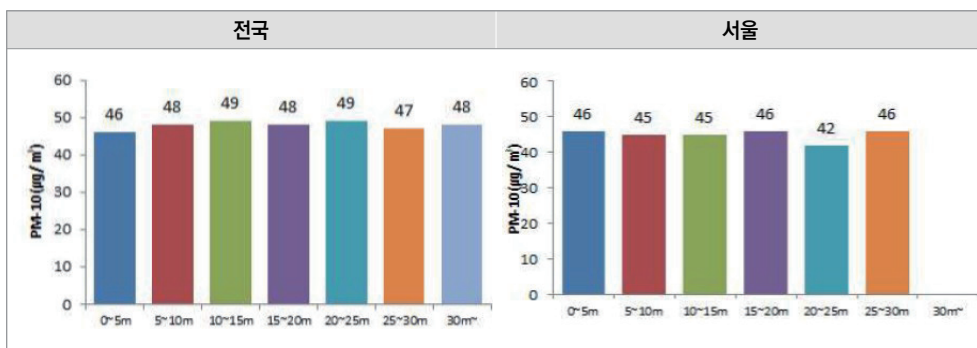
〈표 4-3〉 지역별 도시대기 및 PM_{2.5} 성분 측정망 장비 현황

(단위: 개)

구분	합계	서울	부산	대구	인천	광주	대전	울산	세종	경기	강원	충북	충남	전북	전남	경북	경남	제주
도시대기	388	25	22	14	18	7	10	16	4	86	21	18	29	23	37	27	26	5
PM _{2.5} 성분	42	3	2	2	2	1	1	1	-	4	5	2	4	3	3	5	3	1

※ 출처: 대기환경월보 9월호('19.9, 국립환경과학원)

- 도시 대기오염 정보를 제공하는 도시 대기 측정소 위치는 입지 기준에 부합하지 않거나, 지역오염도의 대표성을 갖기 어려운 위치에 설치되어 대기오염 정보 신뢰도가 우려됨
 - 대기오염 측정망 설치·운영지침에 의해 생활환경 높이인 지상 1.5~10m 내 설치해야 하며 주위 장애물이 없는 곳을 원칙으로 하나, 불가피한 경우 지상 20m 미만에 설치 가능함³⁾
 - ※ 도시 대기 측정망 대기오염 측정소 전국 257곳 중 129곳(50.2%)은 10m 초과하여 설치('15.4, KBS)
 - 환경부는 260개 도시 대기 측정망의 시료 채취구 높이에 따라 연평균 농도를 분석해 본 결과('15), 측정지점의 높이에 따른 미세먼지의 농도 차는 적은 것으로 발표함



〈그림 4-3〉 2015년 전국 및 서울의 도시대기 측정망 높이별 미세먼지 농도 비교

3) 대기오염측정망 설치·운영 지침('19.6, 국립환경과학원)

〈표 4-4〉 과학원 원내(*16.6.22~27)

(단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

구분	2m	3.5m	5m
PM _{2.5} 평균농도	40	39	41

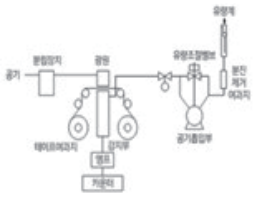
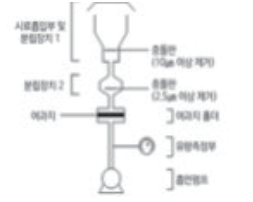
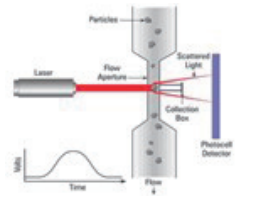
※ 출처: 미세먼지 팩트 체크, 미세먼지 무엇이든 물어보세요(*19.1, 환경부)

- 국내 미세먼지 표준측정법은 베타선 흡수법과 중량법으로 측정되고 있어 결과 신뢰도는 높은 편이나, 측정기의 잦은 유지보수 주기와 이동성 제한 등의 한계가 있음⁴⁾
- 측정망 설치·교체 비용 부담*이 있어 적시 교체에 어려움 발생 또한 내구 연한이 경과한 측정기 파악이 어려운 상황이며, 설치된 측정기들의 정확도**가 기준 미달⁵⁾인 경우가 존재함
 - * 지자체 측정망 설치는 국비 50%가 지원되고 있으나 설치비 포함 측정망 구축 시 약 1억원 이상 소요, 설치 이후 유지보수 비용은 지자체 부담
 - ** 수도권 미세먼지(지름 10 μm 이하) 자동측정기 108대 중 17대(16%)가 허용 오차율인 10%를 초과, 인천시는 17대 중 9대(52.9%)가 오차율을 넘음(*16, 감사원 지적 사항)
- 국가 대기오염 측정망의 대부분의 미세먼지 자동측정기는 외국산 장비이며, 고장 시 고액의 수리 비용과 장시간의 수리시간 소요되며 중대 결함 시에는 측정기 해외 이송 중 측정데이터 손실 우려가 있음
 - ※ 미세먼지 측정기 보수·점검 등의 이유로 다중이용시설의 미세먼지 오염정보를 알 수 없어 주민 불만(*19.3.5, TV조선)
 - ※ '18년 9월 기준으로 국가 운영하는 대기오염 측정소 443곳은 외국산 미세먼지 농도 자동측정기 사용(*19.1.23, 한국일보)
- 도시대기 측정망 중 2000년 전에 설치된 장비가 117개로 장비 노후화에 따른 품질관리가 어려워 신속한 장비 교체가 필요함

4) 한국대기환경학회 논문 '중량법과 베타선 흡수법을 이용한 온라인 광산란 미세먼지 측정기의 PM₁₀, PM_{2.5}의 정확도 평가' 참조(*19)

5) 환경부 수도권 대기환경 개선사업 추진실태 감사결과 보고서(*16, 감사원)

〈표 4-5〉 측정방식에 따른 측정기 비교

구 분	베타선흡수법 (국가측정망)	중량법	광산란방식 (KT, SKT 등)
구조			
측정방식	연속자동측정	수동측정(평균농도 측정)	연속자동측정(실시간 측정)
동작 원리	○ 여과지 위에 채취된 먼지를 통과할 때 흡수 소멸되는 베타선의 차를 이용하여 질량농도를 연속적으로 측정	○ 여과지에 먼지를 채취하여 중량법으로 질량농도 측정	○ 입자상물질의 산란광의 양을 측정하고 그 값으로부터 먼지의 농도를 구함
반응 속도	빠름	느림	빠름
가격	높음	낮음	낮음
크기	대형	중형	소형

- 대기환경연구소가 지속해서 확대되고 있으나, 관련 인력의 확보 없는 대기환경연구소 난립은 매우 바람직스럽지 않음. 또한, 대기환경연구소 확대가 지자체의 정치적인 목적을 갖고 추가 설립되는 현상 역시 우려됨
 - 대기환경연구소의 본래 설립 취지는 광역적인 대기오염 현상의 과학적 원인 규명으로 매우 기초적이고 과학적인 목적으로 설립되는 것이 일반적임
 - 대기환경연구소별 최소 관리 인력에 대한 규정이 필요하며, 대기환경연구소 설립 시, 환경부와 협의 할 수 있는 체계 마련이 필요함
 - ※ 현재 대기오염 집중 측정소 7개가 운영 중이며 1~2명이 많은 수의 고가 정밀기기를 관리하고 있어, 생산 자료 결실률 및 정확도에 매우 중요한 문제점이 발생함
 - ※ 현재 지자체 대기환경연구소 설치를 환경부 차원에서 규제 및 관리할 법적 근거가 부재 (지자체 대기환경연구소 설립 시 관련 연구원 부재로 고가 장비들의 운용 능력이 현저히 떨어짐)
- 최근 민간에서는 실시간 변화량을 확인할 수 있는 소형·경량화된 광산란방식 측정기로 측정한 데이터를 공개하고 있으나 환경변화에 취약하여 정확도가 낮은 편임⁶⁾

6) 한국대기환경학회 논문 '중량법과 베타선 흡수법을 이용한 온라인 광산란 미세먼지 측정기의 PM₁₀, PM_{2.5}의 정확도 평가' 참조('19)

- KT(에어맵코리아), SKT(에브리에어) 등에서는 공중전화부스, 대리점 등에 간이측정기를 설치하여 측정된 데이터를 모바일 앱을 통해 실시간 미세먼지 데이터 정보를 제공 중임
- 간이측정기(광산란법)의 측정데이터를 참고용, 제한적 활용, 교육용 등으로 활용할 수 있도록 성능 인증제(3등급제)가 시행되고 있음(19.8.15)⁷⁾
 - ※ 성능인증 적용 대상은 PM_{2.5}를 측정하는 기기로 「환경분야 시험·검사 등에 관한 법률」에 따른 형식승인이나 예비형식승인을 받지 않은 기기 해당

〈표 4-6〉 간이측정기 성능 인증제

등급	적용 영역	권장 사용처
1등급	참고용	○ 기존 국가측정망 미설치 지역에서 주변 농도를 확인하는 참고 자료로 사용
2등급	제한적 활용	○ 지역 내 배출원 주변 영향 인지 등 농도의 단계적 확인을 위한 용도
3등급	교육용	○ 농도의 경향성은 유지하는 수준으로 정보가 부족한 일반 시민들의 교육용
그 외	그 외	○ 결과를 숫자로 표시하기 어려운 수준으로 학생들의 실습용 교재에 적합

※ 출처: 초미세먼지 간이측정기 가이드북(19.4)

- 광산란 방식 간이 측정기의 측정 정밀도가 매우 낮아 광산란 방식 간이 측정기 설치에 의한 국가측정망 포함 확대는 바람직하지 않은 것으로 판단됨
 - 광산란 방식 간이 측정기 기반 측정망의 경우 통신회사(KT, SKT)나 지자체 등에서 측정망 구성을 원할 경우 국가측정망과 별도로 운영함이 바람직함
 - 간이 측정기 운용 시에는 측정기 CAL/VAL(calibration/validation) 과정에 대한 명확한 protocol 마련이 필요하며, 국립환경과학원과 한국환경공단 주체로 간이 측정기에 대한 등급제의 확실한 실시가 필요함
- 국외 영향이 있음에도 불구하고 활용 가능한 데이터 수 부족⁸⁾과 국외 데이터 수집체계 미흡으로 관측 공백이 존재하며, 국외 영향에 대한 정확도 높은 정보 요구가 증가하고 있음

7) 미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법, 미세먼지 간이측정기 성능인증(제 24조)

8) '한-중 월경성 미세먼지 저감을 위한 공동연구 I' 결과 참조(13, 국립환경과학원)

- 제1차 KORUS-AQ(한미 대기질 공동조사)(16)를 통해 중국, 서해 인근 지역 영향이 48%⁹⁾로 나타났으며, 지상 관측 센서 데이터 분석 결과 중국 영향에 대한 추정¹⁰⁾데이터로 과학적인 근거에 기반한 분석결과 데이터가 필요함
- 정부는 한반도 고농도 미세먼지 발생원인을 규명하고자 NASA와 공동조사를 준비 중이며 제2차 KORUS-AQ 관측 캠페인('21)을 추진 중임
- 국가가 관리하는 국가 배경농도 측정망(3개소, 특히 백령도와 제주도 고산 측정소), 대기오염집중측정망(7개소)을 통해 국외 영향에 대한 대기오염의 과학적 측정이 가능하나 정확도 제고를 위한 측정망 확대와 자료 검증 체계 확립이 필요함

(2) 현재 연구 결과가 국민에게 잘 전달되고 있는가?

매우 미흡	약간 미흡	어느 정도	약간 만족	충분하게	완벽하게
	○				

- 국민이 실시간 체감할 수 있도록, (초)미세먼지 관련 자료를 통합된 플랫폼으로 제공할 필요성이 있음
- 국민의 최대한 편의를 위해서는 아주 정확하지 않은 자료*라도 제공이 가능한 플랫폼**을 통한 정보 구축 및 제공 필요

* 국가측정망 자료 이외에도 IoT 기반 측정 자료, 환경인공위성 측정 자료 등의 제공 가능. IoT 기반 및 환경인공위성 자료의 경우 보다 엄격한 자료 정도 관리 및 알고리즘 향상 필요. IoT 기반 자료와 환경인공위성 기반 자료의 경우는 국가측정망 자료와는 별개로 국민에게 제공 필요

** 현재 국가전략프로젝트 미세먼지 사업단에서 전문가용과 시민용 '통합 플랫폼' 구축 사업을 진행 중임

9) 국립환경과학원-NASA 제1차 KORUS-AQ 공동 조사 결과('16)

10) 국가정보자원관리원-UN 글로벌 펄스(UN Global Pulse) 공동 연구를 추진하여 ①인천 지역 미세먼지-대기 오염 데이터(환경부, 28,464건), ②미국항공우주국(NASA)에서 제공하는 동북아 지역의 위성 센서 데이터 및 ③에어로넷(AERONET)의 지상 관측 센서 데이터를 활용한 동북아 지역의 미세먼지 예측 및 주요 요인 빅데이터 분석 결과('19.1, 행정안전부)

- 지자체·기관·산업별 통계 데이터 위주로 공공데이터 포털(DATA.GO.KR)에 개방*되고 있으나, 데이터가 통합되어 있지 않아 데이터 간의 연계 및 활용이 어려움**

* 대기오염물질, 배출가스, 비산먼지 정보 등 미세먼지 관련 데이터 총 155건 제공 중(19.7)

** 한국서부발전, 한국동서발전, 한국남동발전 등은 주변 대기 환경 공공데이터를 개방하고 있으나 비정기적인 업데이트 주기로 데이터 활용도가 낮음

- 국외에서도 대기 환경 정보시스템을 운영하여 대기 환경 지수, 대기질 현황, 예·경보 현황과 측정소 정보를 시민들에게 제공

〈표 4-7〉 대기오염 실시간 모니터링 및 예보 국외 사례

국가명	사례
 미국	<ul style="list-style-type: none"> ○ 3,000여 개 이상의 측정소 대기오염물질 데이터를 대기품질시스템(AQS)를 통해 수집·가공하여 'AirNow' 홈페이지를 통해 실시간 대기오염 지수 공개 ○ 국가 측정데이터 보안을 위해 공원 의자 형태로 측정소 설치하고 태양열, 풍력에너지를 활용하여 대기오염물질 실시간 측정소 운영(Village Green Project)
 영국	<ul style="list-style-type: none"> ○ UK Air 통해 16개 지역 중심으로 실시간 대기오염 정보 및 위험 예보 제공, 자동 모니터링 시스템 기반의 최신 대기오염 측정농도 정보제공
 중국	<ul style="list-style-type: none"> ○ 인공지능 기반(MS)의 대기오염 분석 및 예측하여 U-Air를 통해 정보 공개, GPS 장착된 택시 활용한 실시간 위치별 대기오염물질 농도 측정
 프랑스	<ul style="list-style-type: none"> ○ 사업부분별 배출물질, 기상, 지리, 인구데이터 통합 분석하여 대기질 예측모델 개발 및 국가 플랫폼 구축(PREV'AIR)하여 실시간 대기오염 정보제공

제3장 개선 방안

(1) 국가 대기질 측정망 관리 방안 및 보완·확충

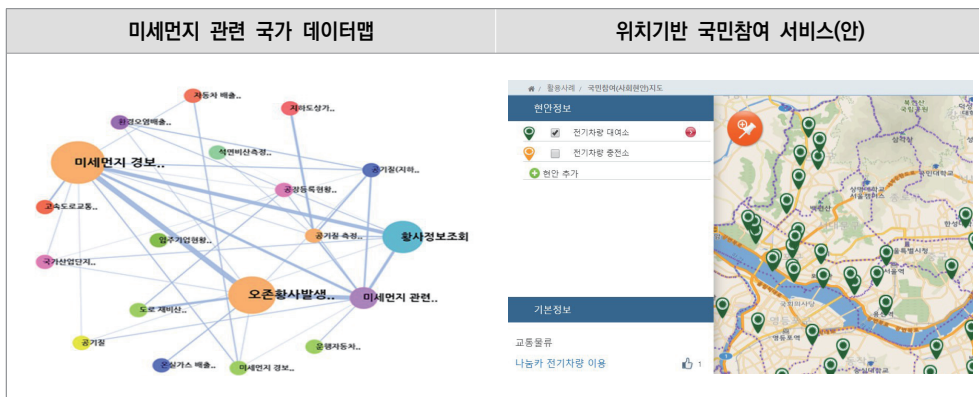
- (자료 정확도 향상) 대기질 국가 측정망 자료의 정확성 확보를 위한 지속적 QA/QC 필요 및 노후 장비의 신속한 교체가 필요함
- (자료 결손 최소화) 관측망 확대에 앞서 국가 대기질 측정망 자료 결손의 원인 분석 및 이에 따른 측정망 관리 프로토콜 마련해야 함
 - 자료 결손 및 자료 정확도 저하의 원인으로는 장비 고장 및 수리, 장비 노후, 장비 이전 등이 있으며, 장비 고장·수리 및 노후화·교체를 위해 지자체별 예산 확보가 필요함
 - 우리나라의 경우 ‘도시 및 도로변 측정소’ 설치 비용의 50% 국가 지원 후 유지·보수는 지자체 소관임
 - 그러나, 유지·보수 등 관리를 위한 지자체 내 전문 인력이 매우 부족함에 따라 자료 결손과 정확도의 지속적 확보에 지장을 초래함
- (미세먼지 관측망 확대) 국가 대기질 측정망이 미설치된 시·군 단위 읍영 지역 및 대규모 산업단지 중심으로 관측망 확충이 필요함
- (대기보전특별대책지역 내 관측망 확충) 대규모 대기오염물질 배출시설이 많은 포항, 당진, 보령 등을 ‘대기보전특별대책지역’*으로 추가 지정하고 우선적 초미세먼지 측정망 및 관리시스템 추가 설치가 필요함
 - * 대기보전특별대책지역: 환경오염·훼손 등으로 환경기준 초과 지역 대상, 시·도지사가 환경보전을 위해 지역 내 토지이용·시설 설치 제한할 수 있는 지역(울산·미포·온산 국가산업단지 등 지정)
 - 대기보전특별대책지역에는 ‘유해대기물질’과 ‘대기중금속’ 측정망을 설치하여 VOCs(Volatile Organic Compounds)와 PAHs(Poly Aromatic Hydrocarbons), 중금속 물질 농도를 동시에 모니터링 하는 것이 필요
- (국가집중측정망) 대기환경연구소가 취지에 비하여 과다하게 설치되고 있으므로 본래 설립 취지에 맞는 운영이 필요함
 - 지자체의 정치적 목적을 위한 지자체 내 새로운 대기환경연구소 설립은 지양해야 함

- 대기환경연구소의 고가 장비는 구입 후 많은 경우 방치되거나 제대로 운용되지 않고 있으므로 대기환경연구소 운영 전문 인력의 대폭 확충과 협업이 필요함 (국립환경과학원 관리)
- (지자체 측정소 운영) 17개 지자체 및 구·군단위에서 간이센서 측정망 설치를 원할 경우 환경부 차원에서 관리할 수 있는 제도적 장치를 마련해야 함
 - 간이센서 측정망은 국가 대기질 측정망과 별도 관리가 바람직함

(2) 국민 체감형 미세먼지 관련 정보 체계 구축

- 국민 편의(편익)를 위해 ‘적정 신뢰도’를 갖는 미세먼지 정보를 국민 요구에 맞추어 공급하는 노력이 필요함
 - ※ 적정 신뢰도 농도 자료는 정의 필요: IoT 기반 1등급 간이 센서나 환경인공위성 기반 자료가 그 대상이 될 수 있음. 간이 센서 측정의 경우 인공지능 이용 등을 통한 보정 과정 필수
- (IoT 기반 자료) IoT 기반 대기질 측정센서망 구축이 필요함
 - 미세먼지 정보를 지역별로 국민에게 신속하게 제공하기 위한 보급형 간이 센서 민간 측정 네트워크 구축 및 이를 통한 측정 음영지역 대기질 정보 보완이 필요하나 기존 국가 대기질 측정망 자료와는 별도 운영이 바람직함
 - IoT 기반 보급형 간이 센서는 소형·경량화된 광산란 방식의 간이측정기로 빠른 분석주기를 특징으로 하므로 음영지역에 대한 활용은 가능함
 - 그러나, 외부 환경에 취약하고 성능 신뢰성이 부족하므로 1등급 센서에 한해 참고용 자료로 활용하고 보정 과정을 거쳐 시민들에게도 참고용 자료로 제공하는 것이 바람직함
- (인공위성 기반 자료) 정지궤도 환경·기상·해양 인공위성 자료 기반 대기질 정보망 구축이 필요함
 - 현재 구동중인 해양 정지궤도 위성인 GOCI(Geostationary Ocean Color Imager)와 2020년 2월 발사한 정지궤도 환경인공위성인 GEMS(Geostationary Environment Monitoring Spectrometer)에서 산출될 자료를 바탕으로 측정 음영지역의 자료 보완이 필요하나, 기존 국가측정망 데이터와는 별도 운영이 바람직함

- 환경·기상·해양 인공위성 자료 역시 태양광의 수동적(passive) 자료 획득 알고리즘에 의해 대기 중 지표면 오염물질의 농도를 계산하기 때문에 정확도에는 한계가 있어 음영지역 참고용으로 활용하고 시민들에게도 참고 자료로만 제공하는 것을 제안함
- GEMS, GOCI I&II, AHI 기반의 AOD(Aerosol Optical Depth) 및 관련 에어로솔 광화학 자료를 (초)미세먼지 농도 자료로 변환하는 기술의 지속적 개발이 필요함
- (간이 측정망 기반 민간데이터 연계) 신규 보급형 센서를 통해 구축한 민간 데이터(KT, SKT 등)를 국민 편의를 위해 제공해야 함
 - 간이측정망 자료의 불확실성을 고려 국가 대기질 측정망 자료와의 통합은 지양하고 별도 운영이 필요함
 - 간이 센서 측정망은 간이 센서 등급제 실시 “1등급 센서”로 한정 사용 유도하고 확산란 방식 간이 센서의 경우 간이 측정기 측정망의 운용에 있어 검·보정에 대한 명확한 protocol 마련 필요함
 - 위치정보 기반 국민 참여 지도서비스(Crowd Map) 제공으로 시각화 기반의 정책과 서비스 개발 활용 및 (초)미세먼지 관련 사용자 위치정보 데이터를 공공데이터와 결합하여 표출 서비스할 수 있는 앱 개발이 필요함



※ 미세먼지 연관 데이터 이외에도 교통, 상가, 문화 등 다양한 분야와 결합서비스 개발 가능

〈그림 4-4〉 국가 데이터맵 및 국민참여 서비스(안)

(3) 미세먼지 발생 국외 영향 분석을 위한 감시·분석 측정망 체계 정립

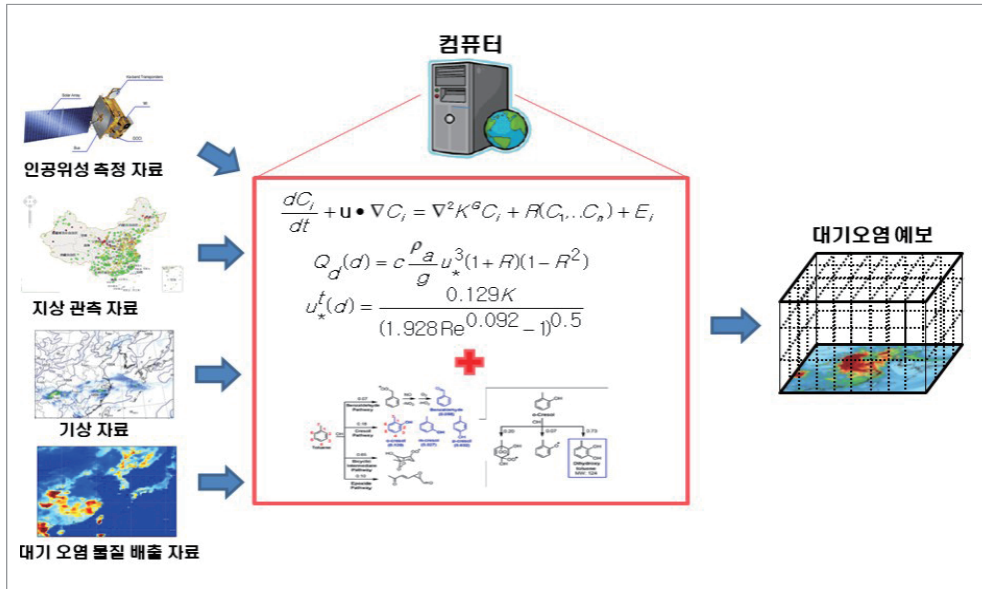
- (환경·기상·해양 인공위성 자료 활용) 환경·기상·해양위성자료를 이용한 해상(특히 황해상)과 인접국가의 (초)미세먼지 및 전구체 농도 감시 및 이동 경로 추적, 동북아시아 광역 감시 시스템 구축이 필요함
 - (신규 관측망 구축) 중국과 북한에서 유입되는 미세먼지의 영향 및 경로 파악을 위해 별도의 관측망 신규 확충이 필요함
 - 또한, 서해안 남부지역(1개소)과 휴전선 지역(없음) 등 중국 및 북한발 (초)미세먼지 측정을 위한 대기오염측정망과 국가 배경농도 측정망을 확충하고 측정망 활용 관리 인력 증원이 필요함
 - (도서·해안 지역 및 선박·등대 활용) 서해안 주요 섬 100곳(소연평도, 격렬비열도 등), 서남부 연안 등의 등대(24기)에 1등급 간이 측정기 센서망을 구축하여, (초)미세먼지 발생·이동 경로 감시 및 분석이 필요함
 - 간이 측정기의 경우 기상 측정을 위해 설치된 해양기상부이(해상부표) 17곳에도 환경측정기 설치가 가능하며, 유·무인 등대* 활용 방안도 모색 필요함
- * 등대 수 인천 5기, 여수 4기, 군산 2기, 목포·진도 10기, 대산 3기 존재
- ※ 해경 순찰선·어업지도선(약 100척), 한-중 정기 외항선(21척)에도 설치 가능
- (국제 관측자료 공유 플랫폼 구축) 국제 협력 네트워크를 통한 관측 자료 공유 시스템(또는 공유 플랫폼) 도입이 필요함
 - 또한, 동북아청정대기파트너십(NEACAP: North-East Asia Clean Air Partnership) 등의 국제 협력 framework을 통해 ‘도시 대기질’자료 뿐만 아니라, ‘교외 대기질’ 및 ‘국가 배경’농도까지 자료 공유 노력 필요

(4) 대기질 측정망 자료 활용 체계 정립

- 미세먼지 예보 및 재분석 활용
 - 국가 대기질 측정 자료, GEMS, GOCI, MI 등의 환경·기상·해양 인공위성 자료, 1등급 간이 측정기 측정망 자료를 대기질 예·경보 시스템과 연계시킬 수 있는 과학적 시스템이 구축이 필요함
 - 이들 측정 자료를 대기질 중·단기 대기질 예보의 초기장으로 활용하고 측정 자료의 정확도는 대기질 중·단기 예보 정확도 향상에 매우 중요한 관건

사항이며, 측정 자료를 대기질 재분석(air quality reanalysis)장 마련에도 활용해야 함

- 인공위성 기반 자료와 간이 측정기 기반 자료의 경우 자료 품질 향상이 필요하며 국가 대기질 측정망 자료 및 인공위성자료, 간이센서 측정 자료 표출 시스템은 전문가용 및 시민용으로 현재 국가전략 미세먼지 과제 하에서 구성 중임
- 국가 대기질 관련 기본 자료로서 '추이 측정소' 설정 및 관리
 - 344개 국가 대기질 측정소의 잦은 이전·재배치, 장비 고장 및 수리 지체 등의 문제로 국가 및 지자체 연별(inter-annual) 변동 추이 통계에 문제가 생길 수 있으므로, 국가 통계로서 국가 및 지자체 정책 검증을 목적으로 엄격한 관리가 필요함
 - 추이 측정소 지정 및 관리는 환경부(국립환경과학원)가 직접 담당하는 것도 방법일 수 있음 (추이 측정소는 현재 전체 국가 대기질 측정소 20% 내에서 선정)
 - 또한, 측정 장비 이동 제한 및 신규 장비 우선 배정 등이 필요하며, 지역별·지자체별 균형있고 원칙있는 숫자 배분이 필요함
- 실시간 정보제공·예보 시스템
 - 실시간 미세먼지 현황 정보 제공과 지역별 오염 정도에 따른 지역주민 행동요령을 권고하고, AI 기술을 활용하여 시간 단위 미세먼지 예·경보 정보 전달 시스템 개발이 필요함
 - 향후 미세먼지 측정시스템을 대기오염 물질관리, 지능형 악취관리, 지자체별 대기환경 관리 등과 연계하여 종합형 환경 정보시스템으로 고도화 필요함



〈그림 4-5〉 국가대기질 측정망 자료와 인공위성자료, 기상·배출자료의 대기오염 예보 활용 모식도

● ● 참고문헌

1. 김승욱, 정부, 미국 NASA와 대기질 공동조사 ... “중국발 미세먼지 검증”, 연합뉴스, 2019.03.17
2. 미세먼지, 빅데이터로 예측한다, 행정안전부, 2019
3. 실내공기 제대로 알기 100문 100답, 환경부, 2019
4. 미세먼지 팩트 체크 미세먼지! 무엇이든 물어보세요, 환경부, 2019
5. 미세먼지 간이측정기 수치, 믿을 수 있나요?, 환경부, 2019
6. PM2.5 미세먼지 자동측정기 국산화 성공, 수입대체 효과 기대, 환경부, 2019
7. 초미세먼지(PM-2.5) 간이측정기 가이드북, 환경부·국립환경과학원, 2018
8. 대기환경월보, 환경부·국립환경과학원, 2019
9. 대기오염측정망 설치·운영지침, 환경부·국립환경과학원, 2019
10. 김주영, 곳곳 보수, 하필 최악일 때 미세먼지 측정기 ‘떡통’, TV조선, 2019.03.06
11. 한국대기환경학회 논문 ‘중량법과 베타선 흡수법을 이용한 온라인 광산란 미세먼지 측정기의 PM10, PM2.5 의 정확도 평가’ 참조 (2019)

부록 1 대기오염 측정망 종류 및 설치 목적

측정망 종류		측정주기	설치 목적
일반 측정망	일반 대기 오염 측정망	도시 대기	연속 ○ 도시지역의 평균 대기질 농도를 파악하여 환경기준 달성 여부 판정
		도로변 대기	연속 ○ 자동차 통행량과 유동인구가 많은 도로변 대기질 파악
		국가 배경농도	연속 ○ 국가적인 배경농도를 파악하고 외국으로부터의 오염물질 유입, 유출상태 등 파악
		교외 대기	연속 ○ 도시를 둘러싼 교외 지역의 배경농도 파악
	특수 대기 오염 측정망	유해대기물질	수동 자동 ○ 도시지역, 주요 산단, 배경농도 지역에서 특정 유해 대기 물질에 의한 오염 실태 파악
		대기중금속	수동 ○ 도시지역, 산단 인근지역에서 중금속에 의한 오염실태 파악
		광화학 대기오염물질	연속 ○ 도시지역의 오존생성 원인 물질인 휘발성유기화합물질(VOCs)의 농도 파악, 오존 오염 현상 규명
		산성강하물	수동 ○ 대기로부터 오염물질의 건성 침착량 및 강우·강설 등에 의한 오염물질의 습성 침착량 파악
		지구대기	연속 ○ 지구온난화물질, 오존층파괴물질의 대기 중 농도 파악
		초미세먼지 성분 (PM _{2.5})	수동 ○ 인체위해도가 높은 초미세먼지(PM _{2.5})의 농도 파악, 성분파악을 통한 배출원 규명
대기 오염 집중 측정망	백령도 수도권 경기권 중부권 충청권 호남권 영남권 제주도	연속 ○ 국가 배경 지역과 주요 권역별 대기질 현황, 황사 등 장거리 이동 대기오염물질 감시 및 고농도 오염 현상에 대한 원인 규명 * 백령도, 수도권, 제주도는 장거리 이동 대기오염물질 감시	

※ 측정항목: 산소포화도, 일산화탄소, 질소산화물, 미세먼지(PM₁₀), 초미세먼지(PM_{2.5}) 등

부록 2 대기질 측정 관련 공공데이터(API) 개방 목록

구분	기관명	목록명	API명	
대기 정보	한국환경공단	미세먼지 경보 발령 현황	미세먼지 경보 정보	
		오존 황사 발생 정보	오존황사 발생정보	
	기상청	황사 관측정보	황사 정보조회 서비스	
	부산교통공사	공기질 측정 정보	부산도시철도 공기질 측정결과	
	한국남동발전(주)	발전소 주변 농도	발전소 주변농도 조회 서비스	
	한국남부발전(주)	발전 관련 환경정보		발전소 주변 기상정보 서비스
				발전소 주변 농도(일별)
				발전소 주변 대기정보
한국동서발전(주)	발전소 주변 대기 환경		발전소 주변 기상정보 조회 서비스	
			발전소 주변 대기질정보 조회 서비스	
대기 오염 물질 정보	한국환경공단	대기오염 정보	대기오염 정보조회 서비스	
	한국환경공단	대기오염 통계 현황	대기오염 통계 서비스	
	국립환경과학원	국가 대기오염물질 배출량	국가 대기오염물질 정보, 배출량 통계	
	울산광역시	대기오염 현황	대기질, 대기질오염도 측정망 운영현황	
	한국서부발전(주)	발전소별 대기오염물질 배출현황	대기오염배출물질 배출량 조회서비스	
	한국서부발전(주)	발전소 주변 대기오염물질 농도	발전소 주변 대기오염물질 농도 조회서비스	
	한국남동발전(주)	대기오염물질 배출정보	대기오염물질 농도 조회서비스, 배출현황	
	한국중부발전(주)	대기오염물질 배출조회 서비스	대기오염물질 농도 조회서비스, 배출현황	
	한국동서발전(주)	대기오염물질 배출량	대기오염물질 농도 조회서비스, 배출현황	

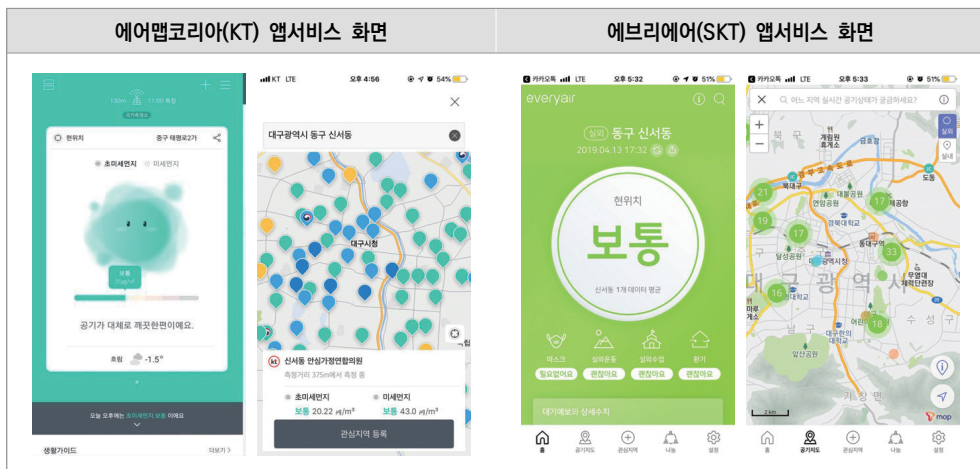
부록 3 미세먼지 데이터 기반 민간(KT·SKT) 서비스

■ Air Map Korea(KT)

- 국가관측망 데이터와 전국 2,000개소의 기지국, 공중전화부스* 등(지상 10m 이내)에서 수집된 미세먼지 데이터를 통합·분석
 - * 인구 기준, 전 국민의 약 50% 이상을 커버할 수 있는 수준이며 미세먼지 민감계층(유아, 노인 등) 및 유동인구 많은 지역에 설치
- 공기질 데이터를 수집·분석하는 개방형 IoT 플랫폼 ‘Air Map Platform’ 기반으로 앱을 통해 실생활 미세먼지 정보제공
- 공기질 관측 ‘스마트 안전모’ 시범사업 이후 현장직원 대상 안전모 배포 및 이동형 관측 센서 확대, 측정소 추가 설치 예정

■ EveryAir(SKT)

- SKT 매장, 대형쇼핑몰, 야쿠르트 전동 카트*등에 IoT 센서를 설치해 사람들의 이동이 많은 장소의 미세먼지를 실시간 측정 및 제공
 - * 전국 1,000여 개의 SKT 매장, 전국 200개 대형 쇼핑몰, 500여 대의 야쿠르트 배달 카트, 간이측정기 (Airbee)등을 통한 미세먼지 실시간 측정
- 측정된 공기질 데이터와 한국환경공단 데이터를 융합해 스마트폰 앱을 통해 전국 미세먼지 지도서비스 제공



〈부록 4-1〉 KT·SKT 미세먼지 관련 앱 화면



미세먼지



현황 분석 및



개선 보고서

예보 모델링 정확도

요약 | 103

제1장 배경 | 105

제2장 현황 및 문제점 | 107

제3장 개선 방안 | 109

대표 집필자

구윤서 안양대학교 환경에너지공학과
교수

공동 집필자

김순태 아주대학교 환경안전공학과 교수
송창근 울산과학기술원 도시환경공학부
교수

조천호 前 국립기상과학원장

SESSION

05

SESSION
05

예보 모델링 정확도

대표 집필자

구윤서 안양대학교 환경에너지공학과 교수

공동 집필자

김순태 아주대학교 환경안전공학과 교수

송창근 울산과학기술원 도시환경공학부 교수

조천호 前 국립기상과학원장

● 요약

- 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5}) 예보는 2013년 8월부터 시범사업을 거쳐 현재 19개 광역시도를 대상으로 4등급(좋음/보통/나쁨/매우나쁨)으로 구분하여, 6시간 간격으로 하루 4번, 3일 예보(당일/내일/모레)로 시행되고 있음
 - 또한 주간 예보가 시범 운영되고 있고, 고농도 시 국가 비상저감조치 발령 및 사회적 재난 관련 업무 등에 활용되고 있음
- 미세먼지(PM_{2.5}) 예보 정확도는 2018년도를 기준으로 지수정확도는 약 84% 수준이고, 나쁨 이상 등급에 대한 고농도 예보 정확도는 72%이나, 실제 시민이 느끼는 체감 오염도를 만족하기에 부족한 실정임
 - 또한, 현재 국민은 생활공간을 중심으로 위해성 정보를 포함한 시·공간적으로 보다 상세한 예보 정보를 요구하고 있음
- 따라서 국가 미세먼지 예보는 실질적으로 국민 생활과 건강관리에 활용될 수 있는 계층별 맞춤형 정보를 제공할 수 있어야 함
 - 이를 위해서는 예보 기간을 현재 3일에서 7일로 하는 주간 예보제와 확률예보 개념을 도입하는 것이 효과적이며, 예보 시간 및 공간적 해상도를 개선한 상세예보 시스템 도입을 위한 측정 및 연구 기반 구축이 필요함

- 주간 및 상세 예보를 위해서는 국내외 위성 및 지상 측정자료를 체계적으로 수집 분석을 위한 입체 관측망 시스템을 구축하고 이를 활용한 지역 및 전지구 규모 수치예보시스템을 개발하는 것이 필요함
 - 특히 시·공간적 상세 예보를 위해서는 동북아지역에서 공간적 연계성을 반영하고, 예보관의 주관적 개념예보의 한계성을 극복하기 위한 인공지능모형을 적용하는 것이 바람직함
- 또한 예보관 역량강화, 예보관 확충 등 예보 인프라 개선을 통해서 예보 업무 선진화 노력이 필요하고, 국민적 요구에 부응하기 위한 소통체계 개선이 요구됨

제1장 배경

(1) 현안 설명

- 미세먼지는 국민 건강을 직접적으로 위협하고 있고, 이를 사전 예방하기 위해서 환경부(국립환경과학원 대기질통합예보센터)는 2013년 시범사업을 거쳐 2014년 2월부터 미세먼지 예보를 전국적으로 시행중이며, 초미세먼지 예보도 시범 사업을 거쳐 2015년 1월부터 전국을 대상으로 시행하고 있음
 - 현재 환경부 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5}) 예보 권역은 총 19개(서울, 인천, 경기 북부, 경기남부, 강원영서, 강원영동, 대전, 충북, 충남, 세종, 부산, 대구, 울산, 경북, 경남, 광주, 전북, 전남, 제주), 미세먼지 농도 수준은 4단계 등급(좋음/보통/나쁨/매우나쁨), 예보 주기는 하루 4번, 예보 기간은 3일간으로 상시적으로 운영되고 있음
 - 또한, 대기질통합예보센터는 주간 예보(7일간 예보)를 시범운영하고 있고, 고농도시 국가 비상저감조치 발령 등 미세먼지 재난 지원 및 국가 대기질 정책 수립에 필요한 모델링 업무를 수행하고 있음
- 현재 국가 미세먼지(PM_{2.5}) 예보 정확도는 2018년도를 기준으로 지수정확도(4개 등급에 대해서 예보일치도)는 약 84% 수준이고, 나쁨 이상 등급에 대한 고농도 예보 정확도는 72%임(국가 대기질통합예보센터 자료)
 - 이는 여러 형태의 수치예보모델 결과를 바탕으로 예보관이 동북아 지역에서 기상 패턴, 그리고 대기질 분포 및 이동특성 등을 종합하여 최종 확정된 개념예보 결과임
- 현재 환경부에서 운영 중인 미세먼지예보는 실제 시민이 느끼는 체감 오염도를 만족하기에 부족한 실정이며, 국민은 보다 생활공간을 중심으로 위해성 정보를 포함한 상세 정보를 요구하고 있음
 - 구체적으로, 일평균 예보를 12시간, 6시간 및 3시간 예보로 시간적 해상도 개선, 예보권역을 기초 지자체 단위로 예보하는 공간적 상세화, 주간예보를 포함한 중장기 예보, 위해성을 근거한 계층별 맞춤형 예보 등을 요구하고 있음

- 따라서, 고농도 발생시 미세먼지예보가 국민 건강 보호를 위한 사전 예방적 기능을 만족하고, 시·공간적으로 상세 예보에 대한 국민적 요구를 충족하기 위해서는 미세먼지 예보 정확도 향상 노력과 함께 국가 예보 운영 인프라를 보완하고, 대국민 소통 체계 개선이 필요할 것으로 판단됨
- 현재 미세먼지 예보에 대한 현안은 아래와 같이 정리할 수 있음
 - ① 고농도 발생 시 미세먼지예보 정보가 국민 건강보호를 위한 사전예방적 기능을 만족하는가?
 - ② 시간적 및 공간적으로 상세한 미세먼지 예보 정보에 대한 국민적 요구가 증가하고 있는데 이를 만족하는 예보는 가능한가?
 - ③ 현재 국가 미세먼지 예보 체계가 국민적 요구를 충족하기 위해서 어떤 노력이 필요한가?

(2) 현안 심각성

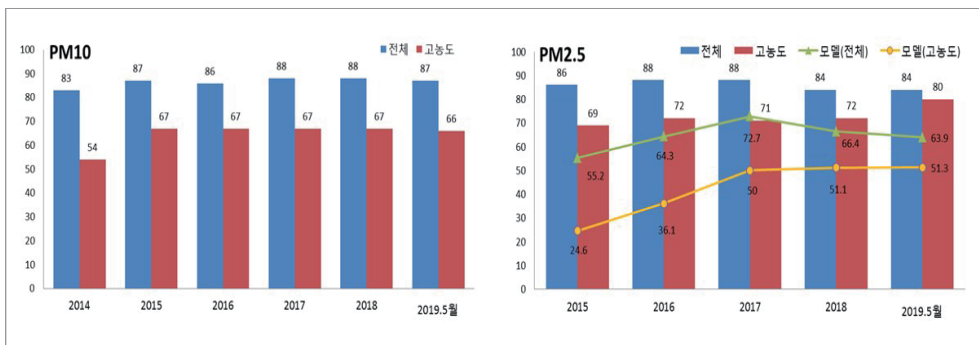
- 어린이, 노약자 등의 취약계층과 연계하여 외부 활동여부, 환기 및 건조, 그리고 마스크 착용 여부 등의 생활양식을 결정하는데 예보 결과가 중요한 역할을 하고 있음
- 현재 국민은 환경부 에어코리아(AirKorea)를 통해서 실시간 측정 및 국가 예보정보를 취득하고 있음
 - 그러나 시·공간적으로 제한적인 국가 미세먼지 정보를 보완하기 위해서 국민은 국내 대기질예보사이트 및 해외 예보사이트에서 제공되는 동영상 자료를 근거로 추가적인 예보 정보를 생산하여 활용하고 있음
 - 예보정보도 현재 국가가 제공하고 있는 19개 예보권역에 대한 일평균 자료 보다 상세한 시·공간적 정보를 생산하여 활용하고 있으나, 환경부가 제공하는 미세먼지 예보는 이를 만족하는데 부족한 실정임
 - 따라서 보다 신뢰성 있는 시·공간적 상세예보 정보를 국가적 차원에서 생산하고, 이를 국민에게 제공할 필요가 있음
- 특히 미세먼지 고농도 발생 시 국가 비상저감조치 발령 여부와 지속기간을 결정하는데 미세먼지 예보가 중요한 역할을 하고 있음
 - 따라서 신뢰성 있는 국가 예보 정보는 사회·경제적 비용을 최소화하는데 필수적 요소임

제2장 현황 및 문제점

(1) 현재 연구 결과가 국민에게 현안에 대한 답을 할 수 있는 수준은?

매우 미흡	약간 미흡	어느 정도	약간 만족	충분하게	완벽하게
		○			

- 대기질통합예보센터 자료에 의하면 예보관이 수치예보결과를 바탕으로 동북아를 포함한 국내 기상 및 대기오염 이동 특성 등을 고려하여 최종 확정하여 발표하는 개념예보는 지수정확도 84~88%, 고농도정확도 69%~80% 수준임
 - 최근 3년간 지수정확도는 소폭 하락하고 있고, 고농도 예측성은 답보상태임
- 한편 수치모델 자체 정확도는 예보관이 확정하는 개념예보보다 10~20% 정도 낮은 실정임
 - 이는 수치모델은 실제 대기 중에서 진행되는 여러 형태의 화학적 반응과 물리적 현상 등을 정량적으로 모사하는데 구조적인 한계가 있고
 - 수치모델의 주요 입력자료인 배출량 및 기상자료의 불확실성으로 인해서 고농도 미세먼지의 유입 및 해소 시기 등에 대한 정량적 예측에 어려움이 있기 때문임
- 국내 단기 예보 정확도는 유럽국가 및 미국의 미세먼지 예보와 비교하여 양호한 수준이나, 중장기 예보 시는 불확실성이 상대적으로 확대되는 경향이 있음



※ 대기질통합예보센터, 미세먼지 모델링 및 예보 관련 설명자료, 2019.7

〈그림 5-1〉 연도별 미세먼지 개념예보 정확도(막대) 및 수치 모델 정확도(실선)

(2) 현재 연구 결과가 국민에게 잘 전달되고 있는가?

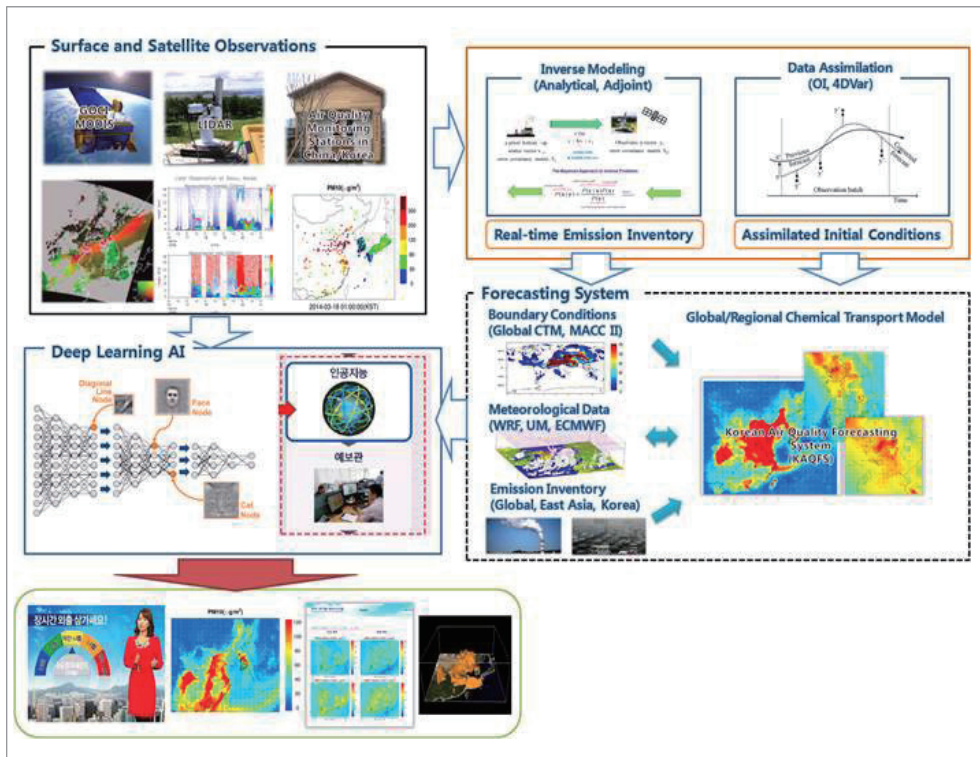
매우 미흡	약간 미흡	어느 정도	약간 만족	충분하게	완벽하게
			○		

- 현재 국민은 AirKorea에 제공되고 있는 기본적인 예보정보를 활용하고 있으나, 보다 다양한 계층별 맞춤형 상세 예보정보를 제공하여 국민 실생활에서 활용도를 높이는 것이 필요함

제3장 개선 방안

(1) 연구

- 국민의 건강을 사전 예방적으로 보호하고, 상세 정보 요구에 부응하기 위해서는 미세먼지 예보를 중장기예보로 확대 시행할 필요가 있으며, 시·공간적 상세 예보를 위한 노력이 필요함
- 현재 국민적 요구에 부응하는 미세먼지 예보시스템은 아래 그림에 개략적으로 나타내었음



※ 출처: 국립환경과학원, 2017, 인공지능을 활용한 예보기반 구축 연구(1)에 관한 연구

〈그림 5-2〉 자료동화 수치예보를 적용한 인공지능 예보시스템

- 예보 정확도를 개선하고, 중장기 예보를 수행하기 위해서는 지상 및 인공위성 자료를 기반으로 한 입체관측시스템 구축, 실시간 역모델링에 의한 Working Inventory 산출과 화학수송모델의 초기조건을 개선하기 위한 자료동화 시스템 구축, 그리고 동북아시아에서 공간적 이동특성을 반영한 인공지능 예보시스템으로 구성됨

- 각각의 구성요소에 대해서 연구 방향을 정리하면 다음과 같음

① 위성 및 지상관측자료를 통한 입체관측망 구축(동북아 및 전지구 대상)

- 위성자료 및 지상관측자료를 통한 입체적 관측망은 현황을 분석하고, 예보 자료동화시스템 구축에 절대적으로 필요한 선결 조건임
- 국내외 대기질자동측정망자료를 실시간으로 수집하여 분석하고 이를 대기질 예보에 활용하는 것이 필요함. 현재 중국 주요도시 39개소 자동측정망자료만 공식적으로 수신하고 있으나, 향후 중국 1,500여개소 대기질자동측정망 자료를 실시간으로 수신할 수 있도록 국가적 차원에서 중국과 협력 Network 구축이 필요함
- 현재 국립환경과학원이 운영 중인 대기질 집중관측 관측망이 2020년도에는 9개소로 확대될 예정임. 이를 입체측정망과 함께 활용하면 미세먼지 성분별 정합도 평가 및 고농도 원인물질 분석에 매우 유용할 것으로 기대되며, 특히 대기환경연구소 성분측정결과를 실시간으로 공개하여 예보 및 위해성 평가에 활용될 수 있도록 하는 것이 필요함
- 입체관측을 위한 Lidar 측정망을 확대 운영하고, 중국, 일본 및 미국 등에서 운영 중인 위성관측자료도 장기적인 관점에서 실시간 수신하고, 이를 예보에 활용하기 위한 국제적 수준의 측정망 입체 Network 구축이 필요함. 특히 2020년도부터 운영 예정인 국내 정지궤도 위성인 GEMS와 연계하여 연속적이고 광역적인 입체관측망을 구축하는 것이 필요함

② 자료동화를 적용한 지역규모 수치예보모델 개선(단기 예보)

- 관련 전문가들이 판단하고 있는 예보 불확실도는 1) 배출량 2) 초기장 3) 대기 모델 4) 기상장 순으로 평가되고 있음. 배출량자료는 국내를 포함한 동북아지역을 대상으로 신뢰성 있는 배출자료 확보를 위한 지속적인 노력이 필요하고, 기상장의 경우 국내 기상청에서 지속해서 연구 개발하고 있는 KIM(KIAPS) 모델을 장기적 관점에서 적용하는 것이 바람직함
- 미세먼지 예보에 활용되고 있는 지역규모 수치모델은 주로 미국 환경청에서 개발 제공되고 있는 것으로 국내 실정에 적합한 지역규모 수치모델을 개발하는 것이 필요함

- 현재 미세먼지 국가 전략프로젝트로 추진중인 “한국형 통합 대기질 측정·예보 시스템 개발”연구가 1단계(2017~2019) 및 2단계(2020~2023)를 거쳐서 지속해서 추진되면 국내외 입체 측정망 및 동북아 배출 특성이 반영된 예보모형이 개발될 것으로 예상됨
- 한국형 모델은 개발 단계별로 현업 예보에서 적용, 검증, 보완 등을 통해 실제 현업 예보에서 활용성을 확보하는 것이 필요함

③ 전지구 규모 자료동화 적용 수치모델 개발(중장기예보)

- 현재 3일간의 단기예보에서 중장기 예보로 확대 시행하기 위해서는 국내 실정에 맞는 전지구 규모 수치모델개발이 필요함. 중기적 관점에서 보면, 동북아지역 대기질은 경계에서 유입되는 전구물질과 경계 내외에서 발생하는 여러 형태의 비정규 배출원(산불, 화산폭발, 황사 등)의 영향에 노출되어 있음
- 따라서 중장기적 미세먼지 예보를 위해서는 전지구 규모 예보모델 개발이 요구됨. 현재 유럽에서 운영하고 있는 CAMS, 일본의 SPRINTARS 등이 대표적인 전지구 규모 대기질 예보모델임

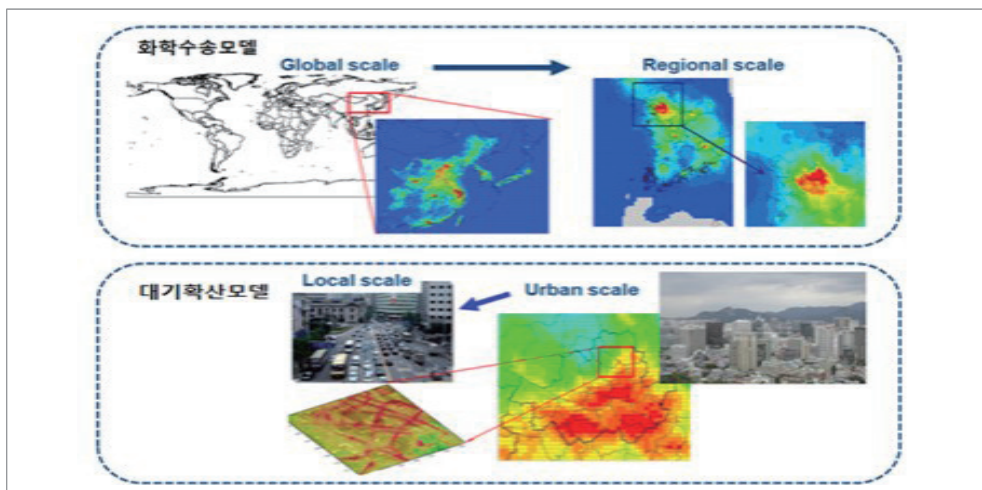
④ 인공지능 예보시스템 개발

- 수치모델의 한계성을 극복하고 예보관의 주관적인 개념예보를 대체할 방법으로 최근 인공지능(AI) 기반 미세먼지 예보시스템이 대안으로 부각되고 있음
- 다양한 지상 및 위성 관측 자료와 여러 형태의 수치예보모델 결과를 종합하여 인공지능 Big data를 구성하고, 이를 활용한 심층학습 인공지능기법을 개발하여 예보를 수행하는 것임
- 이를 위해서는 관측자료를 수집 분석하고, 자료동화모델을 적용하여 품위가 높은 1차 및 2차 Big data를 구축하는 것이 필요하며, 최종적으로는 이를 활용하여 동북아지역과 국내 예보권역 간의 공간적 연계성과 시계열 변화 특성을 반영하는 한국형 인공지능시스템을 개발해야 함
- 인공지능 예보를 위해서는 장기간에 걸친 다양한 Big data 구축이 필요함. 특히 동북아지역의 배출원과 예보권역간의 상관성 및 예보권역 자체의 시간적 변동 특성을 반영한 2차 Big data 확보가 인공지능 예보 모형 개발에 선결조건임. 따라서 인공지능예보에 대한 기반 인프라 확보를 위한 지속적인

연구가 필요하고, 시범 사업을 통한 검증과 보완을 통해서 지역별 특성을 반영한 인공지능 기법 최적화가 필요함

⑤ 상세 예보를 위한 Hybrid 시스템 개발(실시간 Mapping 및 단기 상세예보)

- 우리가 현재 호흡하는 대기는 여러 공간적 규모로 이동 확산되는 대기오염 물질에 노출되고 있음. 즉 지구규모(Global scale), 동북아 지역, 그리고 국내지역(Regional scale)에서 배출된 배경적 오염물질과 함께 주변 도로 및 공장 등의 국소규모(Local scale)의 배출원의 영향을 복합적으로 받고 있음
- 예보에 적용되는 수치모델(화학수송모델)의 공간적 해상도는 동북아지역 27km, 한반도지역 9km, 수도권지역 3km이므로 주변에서 배출되는 오염원의 영향을 평가하는데 한계가 있음. 국지규모의 배출원의 영향을 계산하는 확산모델(CALPUFF, AERMOD)을 적용하면 100m 이내의 공간적 해상도로 미세먼지 농도를 예측하고, 배경농도를 계산하는 수치모델과 결합하는 Hybrid모델이 대안임
- 실제로 Hybrid모델은 상세규모로 도로변 노출농도 산출 및 위해성 평가에 많이 활용되고 있으며 이와 같은 Hybrid모델을 적용하면 고해상도로 미세먼지 예측과 위해성 평가가 가능함
- 또한, 현재 구축되고 있는 센서기반 상세 측정자료를 활용하여 실시간으로 미세먼지 현황을 상세 Mapping하고 예보하는데 Hybrid 모델링 적용 가능성을 적극 검토할 필요가 있음



〈그림 5-3〉 상세 규모 예보를 위한 Hybrid 모델링의 필요성과 구성

⑥ 미세먼지 확률 예보제 도입

- 현재 고농도시 미세먼지 농도가 나쁨 구간내($36\mu\text{g}/\text{m}^3 \leq \text{PM}_{2.5} \leq 75\mu\text{g}/\text{m}^3$) 범위로 예측되면 모두 나쁨으로 예보하고 있음. 예측농도가 $36\mu\text{g}/\text{m}^3$ 또는 $75\mu\text{g}/\text{m}^3$ 부근으로 예측되는 경우에도 모두 나쁨으로 예보는 되지만 실제 나쁨 확률과 인체에 미치는 영향이 상이함
- 따라서 예보 시 나쁨이라는 등급예보와 함께 나쁨이 발생할 확률정보도 함께 제공(예시: 서울지역 미세먼지 내일 예보 나쁨, 나쁨 확률 70% 등)하여 국민이 일상생활에 확률정보를 활용할 수 있도록 해야 함

⑦ 통합예보 현업 체계 구축 및 예보 인프라 선진화

- 대기오염 문제에 대한 국민 우려가 증가하고 있으며, 특히 취약계층의 예보수요가 급증하고 있으나, 전문인력 및 전담조직이 부족한 실정임
- 현재 예보관은 상시예보(4회/일) 및 주간예보(시범/주2회)를 수행하고 있고, 또한 비상저감조치 발령 및 미세먼지 재난 지원을 위한 예보 및 고농도 원인분석 정보 등을 제공하고 있음
- 그러나 현행 국립환경과학원의 예보 인력은 2인 1조로 4개조 총 8명 체제에 머물러 있어, 모든 수요를 맞추기 위해서는 예보센터 전문인력이 매우 부족함
- 따라서 보다 효율적인 예보를 위해서 현업예보 인력, 모델개발 및 예보분석, 예보 시스템 운영을 위한 인적 및 공간적 인프라를 선진화할 필요가 있음

(2) 정책/소통

- 미세먼지 예보를 근거로 시행되는 고농도 발생시 비상저감조치는 해당 지자체에 중요한 현안 업무임. 또한, 고농도 발생 및 지속 여부는 그 지역의 기상 및 배출특성에 의해서 결정되기 때문에 지자체도 자세한 국가 예보 모델링 결과를 공유하는 것이 필요함
- 따라서 국가 수치 예보결과를 지자체와 공유하여 지자체에서 고농도 발생 원인을 자체적으로 규명하고 효율적인 대기질 관리 및 비상저감조치를 수행하는데 편의성을 제공할 필요가 있음

(3) 기타

- 예보 정보와 함께 계층별로 위해성 기반의 위해성 정보와 행동 요령도 자세히 전달할 필요가 있음
- 미세먼지 예보에 가장 중요한 입력자료가 동북아시아 및 국내 배출량 자료임. 특히 동북아 주변 국가와 공동연구를 수행하고, 동북아지역 지상관측 및 인공위성 자료를 활용하여 배출량 산정을 위한 기초자료를 체계적으로 수집하고 분석하는 노력이 필요한 것으로 판단됨

● 참고문헌

1. 최대련, 윤희영, 구윤서, 지표측정자료를 활용한 동아시아 자료동화 대기질 예보시스템 개발, 한국대기환경학회지, 35(1), 2019.
2. 최대련, 윤희영, 구윤서, 배출원 기여도를 이용한 미세먼지 역모델링 예보시스템 개발, 한국대기환경학회지, 34(6), 2018.
3. 대기질 수치예보 정확도 향상을 위한 모델링 개선 연구(III), 국립환경과학원, 2016.
4. 인공지능을 활용한 예보기반구축 연구(I), 국립환경과학원, 2017.
5. 수도권지역 교통환경 변화에 따른 대기질 예측 및 위해성 평가 연구, 국립환경과학원, 2018.
6. Koo, Y.S., H.Y. Yoon, D.R. Choi, J.S. Han, J.B. Lee, Y.J. Lim, An analysis of chemical and meteorological characteristics of haze events in the Seoul metropolitan area during January 12~18, 2013, Atmospheric Environment, 178, 87~100, 2018.
7. Koo, Y.S., D.R. Choi, H.Y. Kwon, Y.K. Jang, J.S. Han, Improvement of PM₁₀ prediction in East Asia using inverse modeling, Atmospheric Environment, 106, 318~328, 2015.



미세먼지



현황 분석 및



개선 보고서

국외 영향

요약 | 117

제1장 배경 | 119

제2장 현황 및 문제점 | 122

제3장 개선 방안 | 126

대표 집필자

김순태 아주대학교 환경안전공학과
교수

공동 집필자

송창근 울산과학기술원 도시환경공학부
교수

구윤서 안양대 환경에너지공학과 교수

조천호 前 국립기상과학원장

SESSION

06

대표 집필자

김순태 아주대학교 환경안전공학과
교수

공동 집필자

송창근 울산과학기술원 도시환경공학부
교수

구윤서 안양대 환경에너지공학과 교수

조천호 前 국립기상과학원장

● 요약

- 미세먼지 농도에 대한 국외 영향 분석의 중요성은 두 가지로 나뉘볼 수 있음
 - 첫째, 현재 이용 가능한 최선의 과학적인 방법을 통해 고농도 미세먼지 발생 과정과 주요 오염원에 대한 정량적 분석 등이 가능하며, 대기질 개선 계획 수립 시 경제적, 보건적 측면에서 기초자료로 활용될 수 있음
 - 둘째, 당장의 초미세먼지 농도 저감은 어려워도, 국민의 우려와 불안 해소 차원에서 상황 정보의 전달 과정에서 중요함. 고농도 미세먼지 발생 후 수일 이상이 경과할 때까지 이러한 기초적 정보가 전달되지 못하는 것은 대기질 개선 노력에 대한 불신으로 확대될 수밖에 없음
- 국외 영향은 대상기간의 설정에 따라 장기 분석과 단기 분석으로 구분됨
 - 장기 분석은 계절 또는 연간 미세먼지 농도에 대해 다년간의 국외 영향 추세와 기상/기후학적 원인, 동북아 배출량 변화에 따른 국내 미세먼지 농도 영향을 살펴볼 수 있음
 - 사실상, 국민의 관심은 대부분 단기간 고농도 발생에 초점이 모아짐. 이러한 단기 국외 영향 분석에서 정부와 학계가 풀어야 할 당면 과제는 다양한 정보와 분석 결과에 대한 공유와 논의 과정을 통해 현시점에서 도출될 수 있는 최선의 결과를 국민에게 전달해야 한다는 점이며, 개별적인 정보 전달 방식이 이루어질 경우 국민의 불안감을 증폭시킬 수 있음

- 국내외 영향 분석에서 많이 이용되는 수치 모사의 그간 국내 적용 과정을 살펴보면, 미국의 대기질 개선 계획 수립과 같이 검증-개선-활용이라는 순차적 단계를 적용하지 못하고, 과학적 이해 기반이 대기질 예보에 확대되어 적용되는 방향으로 발전되지 못하였음
 - 대기질 예보의 경우 배출과 영향 이해를 위한 인과 관계 해석보다는 자료동화, 초기장 개선, 경험적인 보정 등 다른 외적 요소를 더해 대기질 예보의 정확도를 향상시켜옴
 - 이러한 예보 차원에서의 수치 모사의 활용은 대기질 개선 정책에서 필요한 고도화된 기상-배출량-대기화학 모사 기반 마련이라는 하나의 큰 축과는 다른 역할을 담당함
- 현재 국내 대기질 개선 정책은 삭감 배출량에 대한 시행 또는 이행으로 평가됨
 - 이전 주요 관심이었던 1차 대기오염물질의 경우 해당 배출 저감이 농도 개선으로 곧바로 이어지나, 2차 대기오염물질은 배출과 농도간 과학적 이해가 필요함
 - 중국 등 국외 영향을 언급하면서도 현재 대기질 개선 계획은 국지적인 배출 관리에 중점을 두고 있음
 - 수용체 중심의 노출 저감이 궁극적 목적이라면 '농도 중심'의 관리로 국내 대기질 관리 체계가 '진화'해야 하며, 이에는 대기질 개선 정책에 수반되는 제도와 시스템, 그리고 구성요소까지 포함되어야 함
 - 그간의 '배출량' 중심의 개념에서는 배출-농도 간의 인과 관계에 대한 이해가 필요치 않았으며, 이는 곧 지금 우리가 마주하고 있는 국외 영향 산정과 전달의 어려움이라는 현실로 반영되고 있음

제1장 배경

(1) 현안 설명

- 최근 언론에서 발표한 미세먼지에 대한 국민의 인식 조사를 보면 국내 미세먼지의 주요 발생 원인이 국외 배출 영향이라고 80% 이상이 응답하고 있음
 - 미세먼지 예보(국립환경과학원)를 위해 상시 운영하고 있는 모델링을 활용하여 파악된 장기적인 한반도에 대한 국외 영향은 평시 30~50%, 고농도시 60~80%로 추정됨
 - 한·중·일 국제 공동연구 결과에 따르면 2017년을 대상으로 초미세먼지 (PM_{2.5})에 대한 우리나라 주요도시(서울, 대전, 부산) 국내외 영향을 분석한 결과, 자체 기여율은 연평균 기준으로 한국 51%로 나타남
 - 그리고 2017년 연평균 기준으로 중국 배출원에 대한 우리나라 3개 도시에 대한 평균 영향은 32%로 나타남
 - 그러나 국외 영향(기여도)은 미세먼지 사례별/기간별 변동성(불확실성)이 매우 크며, 국외 영향의 일관성 및 과학적 근거에 대한 국민의 요구가 비등함
- 현재 발표된 대부분의 국내 미세먼지에 대한 국외 배출 영향은 수치모델과 수용모델에서 산출된 결과를 기반으로 하고 있음
 - 수치모델은 대기 중 오염물질의 화학반응, 이류/확산, 침적 등의 과정을 수식화한 것으로, 실제 미세먼지의 농도를 재현할 수 있으며, 기상 및 배출량 입력 자료를 포함한 방대한 양의 기초자료와 고성능의 계산환경이 필요하나 대기오염물질의 시/공간적 거동을 확인할 수 있어 물리, 화학 과정에 대한 해석이 가능함
 - 반면 수용모델은 대기오염물질의 장기 관측 자료를 토대로 통계적인 분석을 통해 미세먼지 농도의 각 구성성분이 어떤 배출원에서 기인하였는지를 분석하는 방법이므로, 수치모델과 비교해 적용이 용이하나, 배출량과 농도의 관계를 해석하기 어렵다는 단점이 있음

- 국내 고농도 미세먼지 발생일은 주로 겨울철과 봄철 등 추운 계절에 많으며, 연구자 마다 접근 방법이 다르고, 사용된 모델, 대상 기간 등에도 차이를 보이며, 국내 고농도 미세먼지에 대한 중국 배출 영향 분석 결과들만 보더라도 수치모사의 경우 30~75% 범위에서 나타남
 - 고농도 기간이 아닌 장기간에 걸친 중국 배출 영향에 대해서는 25~60% 까지 다른 범위가 제시되고 있음
 - 수용모델을 이용한 연구 결과에서는 기간에 따라 작게는 25%, 높게는 75%로 추정하고 있음
- 현재 이용 가능한 과학 지식과 정보로 국내외 기여도를 하나의 값으로 특정하는 것에는 무리가 따르므로 국외 영향 또는 기여도 분석은 목적에 따라 달라질 수밖에 없으며, 그 결과를 어떻게 수용하고 전달할지에 대한 연구 집단 간의 논의가 필요함
 - 현재 추정되는 국외 영향 분석의 경우 대기질 개선 수립 과정에서 미세먼지 농도 악화 원인 분석과 고농도 발생 과정에 대한 이해, 그리고 어떻게 국내 배출량을 저감하여 대기질을 개선할지 참고자료로 이용하는 것이 바람직함
 - 또한, 국민의 입장에서는 고농도 발생 시 그 원인에 대한 이해 목적으로 국외 영향에 대한 관심을 보임
- 국외 영향 분석 결과에 대한 불확도를 논하기 이전에, 다소 혼란스런 정보의 전달은 그간 이에 대한 밑바탕이 되는 연구 부족을 의미함
 - 또한 대기질 예보 관점에서도 '부정확한 국외 영향 분석은 결국 부정확한 예보'로 이어질 수밖에 없다는 점에서 해결해야 할 문제임

(2) 현안 심각성

- 기 언급된 바와 같이 국외 영향 분석은 대상기간에 따라 장기 분석과 단기 분석으로 구분됨
 - 장기 분석은 계절별, 연도별 PM_{2.5} 농도에 대해 유입되는 국외 기여도와 장기 추세 변화를 추정할 수 있는 반면, 국민이 관심이 있는 국외 영향 분석의

경우 대부분 고농도 기간에 초점이 모여져 고농도 발생 시 단순히 왜 농도가 높아지는 지에 대한 정보를 요구하고 있음

- 이러한 단기적 국외 영향 분석은 학계가 당면한 어려운 점과 문제점으로, 고농도 미세먼지 발생 시 즉각적인 대응이 어려우며, 함께 문제를 풀어야 할 상황 정보에 대한 공유도 제한적임
 - 수치 예보를 통해 미세먼지 농도와 국외 기여 등이 분석될 수 있으나, 정확한 국외 영향분석을 위해서는 해당 사례에 대한 기본적인 모사의 재현성이 뒷받침되어야 함
 - 입력되는 기상 자료는 예보장이 아닌 분석장이 이용되어야 하며, 성분 농도 등 관측 자료와의 비교 등을 통한 객관적 자료 생성이 필요함
 - 따라서 이러한 일련의 과정들은 많은 정보가 요구되며, 단기간 내에 이루어져야 하므로 검증과 논의가 어렵고, 특히 성분 자료의 경우 자료 제공이 없다면 외부 기관에서의 접근 자체가 어려움
 - 또한, 연구자간 접근 방식, 이용 자료, 그리고 해석 결과에 대한 교차 검증 및 논의 과정이 생략되기 때문에 분석결과가 연구자 마다 달라질 수 있다는 점도 국민의 입장에서는 수용하기 어려움
 - 그 동안 고농도 사례에 대한 비교 연구가 지속해서 수행되지 못한 점도 향후 그리고 현재 발생하는 고농도 미세먼지 해석에 대한 불확도 범위 추정을 어렵게 함
 - 중국의 MICS-Asia 프로그램과 일본의 J-STREAM과 같은 연구는 결국 국외 영향 뿐 아니라 과학적인 방법으로 대기질 현황을 이해하고 정책적 활용도와 완결성을 높이기 위한 노력일 것임

제2장 현황 및 문제점

(1) 현재 연구 결과가 국민에게 현안에 대한 답을 할 수 있는 수준은?

매우 미흡	약간 미흡	어느 정도	약간 만족	충분하게	완벽하게
		○			

- 그간 대기 확산·화학 모델링을 통해 BFM, PSAT, DDM, Adjoint, Inverse modeling 등 방법론을 활용하여 파악한 국외 영향에 대한 연구결과는 아래와 같음

○ 2019.1월 (고농도) 전국 (국립환경과학원, 2019)	: 국외 69~82%, 한국 18~31%
○ 2018.11월 (고농도) 전국 (국립환경과학원, 2018a)	: 국외 51~66%, 한국 34~49%
○ 2018.3월 (고농도) 수도권 (국립환경과학원, 2018b)	: 국외 32~69%, 한국 31~68%
○ 2018.1월 (고농도) 수도권 (국립환경과학원, 2018c)	: 국외 38~57%, 한국 43~62%
○ 2017.3월 (고농도) 전국 (국립환경과학원 내부 분석자료)	: 국외 52~86%, 한국 14~48%
○ 2017.1월 (고농도) 전국 (국립환경과학원 내부 분석자료)	: 국외 52~86%, 한국 14~48%
○ 2015년 (1년 장기) 전국 (국립환경과학원, 2017a)	: 국외 59%, 한국 41%
○ 2016.5월 (KORUS-AQ) 서울 (국립환경과학원, NASA, 2017)	: 국외 48%, 한국 52%
○ 2017.1월 (고농도) 전국 (국립환경과학원 내부 분석자료)	: 국외 51~85%, 한국 15~49%
○ 2015년 (1년 장기) 전국 (국립환경과학원 내부 분석자료)	: 국외 43%, 한국 57%
○ 2016년 (1년 장기) 전국 (국립환경과학원 내부 분석자료)	: 국외 47%, 한국 53%
○ 2017년 (1년 장기) 전국 (국립환경과학원 내부 분석자료)	: 국외 51%, 한국 49%
○ 2014년 (1년 장기) 수도권 (환경부, 2017)	: 국외 49~67%, 한국 33~51%
○ 2015.8,10월~2016.1,4월 서울 (서울특별시, 2016)	: 국외 55%, 한국 45%
○ 2013년~2014년 (2년 장기) 수도권 (Park et al., 2019)	: 국외 27%
○ 2012년~2016년 (5년 장기) 수도권 (Bae et al., 2020)	: 국외 43%

- 전문가들은 이상의 정량적 국외 영향을 파악하는 방법론에 대해 사용 대기 확산·화학 모델링 간 기여도 결과 차이 및 중국/국내 미확인 배출량 등 모델 입력 자료의 한계에 기인한 불확실성을 지적함
 - 이러한 정량적 방법론을 보완하기 위해 위성/집중측정 등 관측에 기반을 둔 정성적 방법론이 활용되기도 하며, 이는 측정값인 만큼 명시적인 과학적 증거로 활용됨

- 위성에 산출되는 AOD 분포, 역궤적 분석 및 지상/항공탑재 Lidar 등 분석 자료를 활용하여 수송된 고도, 유입되는 3차원적 공간 분포, 서해상 유입 플럭스(in-flux) 정보, 장기간 유입 추세를 파악할 수 있음
- 또한 대기환경연구소와 항공측정 등 특별 관측 자료를 활용하여 장거리 이동 중 미세먼지 화학적 성분의 변동 등 자료를 확보할 수 있음
- 또한, 현재 도출되는 연구결과의 신뢰성 확보 및 국내 연구자간 이해증진을 위해서라도 공통 사례에 대한 비교 및 토의 과정이 필요함
- 이를 통해 현재 우리나라에서 발생하고 있는 고농도 미세먼지의 원인과 국외 영향 등에서 차이점과 공통점을 분류할 수 있으며, 차이점이 발생하는 경우 이에 대한 극복 가능 여부와 극복방안이 논의될 수 있음
- 방법론적인 면에서 현재 기술로는 정확한 기여도의 산정이란 것은 불가능하며 오차 범위를 가지게 됨. 따라서 국민에게 국외 영향 결과 전달 시 해당 사례에 대한 국외 기여도는 동일한 기간이더라도 시간별로 차이를 보일 수 있다는 점 등이 충분히 설명되어야 함
- 현재 모사의 불확도를 감안하여 국외 영향은 범위 또는 확률적인 값으로 표현될 수 있으며, 대국민 정보 전달 시 농도의 증감 범위로서 제시할 수 있음. 또한, 평년 대비 혹은 기준 시점으로부터 얼마만큼 증가 또는 감소할 것인가에 대한 정보를 제공하는 방안도 고려될 수 있음
- 국외 영향에 대한 기술적인 분석과정에서 또 다른 어려운 점 중 하나는 최근 중국 배출량의 급격한 변화와 북한 등 우리나라에 영향을 줄 가능성이 높은 배출량 정보의 확보임
 - 황산화물 배출의 경우 최근 3~4년에 걸쳐 60% 이상 감소한 것으로 일부에서 보고하고 있으며, 질소산화물의 경우에도 1%~20% 가량 감소한 것으로 추정됨
 - 이러한 국외 배출량 변화 영향은 국내 수용지점에서의 암모니아를 비롯한 다른 전구물질의 농도 등에 의해 달라질 수 있으므로 고농도 발생에 대한 최근 경향을 보다 심도 있게 분석해야 함

- 다른 관점에서 국외 기여도 분석은 고농도 사례에 국한하지 않고 대기질 개선을 위한 중요 자료이므로, 현재 이용할 수 있는 다양한 방법들을 적용하는 것이 중요함
 - 수치모사의 경우 정량적인 분석과 배출량 변화에 따른 미래예측이 가능하다는 점에서 장점을 가지고 있음
 - 중국의 경우 MICS-Asia 프로그램을 통해 각국에 맞는 모델링 시스템을 선정하고 계산하는 노력을 과거 십 수 년에 걸쳐 진행해 오고 있고, 일본의 경우에도 최근 시작된 J-STREAM과 같은 모델링 플랫폼 마련 연구를 통해 다양한 입력 자료를 마련하고 있으며, 모델의 정책적 활용도를 높이기 위해 노력 중임
 - 그에 반해 국내의 경우 국외 영향에 대해 개별 연구자에 의한 결과는 도출되고 있으나, 국가 대기질 모사 시스템 및 향후 각 지자체에서 수행할 것으로 예상되는 기여도 분석을 위한 플랫폼 마련 연구는 아직 미진함
 - 따라서 수용 모델, 지시자 기반 분석, 기상 유형 분석 등 다양한 방법들을 통한 접근과 논의가 필요함

(2) 현재 연구 결과가 국민에게 잘 전달되고 있는가?

매우 미흡	약간 미흡	어느 정도	약간 만족	충분하게	완벽하게
		○			

- 국외 영향 분석의 경우 시의성이 중요한 요소 중 하나이나, 이에 대한 결과 전달까지 대부분 며칠에서 몇 주까지 소요됨
 - 기다리는 국민 입장에서는 불안감이 더해지며, 언론에서는 다양한 경로를 통한 개별 분석 정보를 전달하게 되면서 ‘불신’으로 이어짐
 - 따라서 분석 결과와 함께 소통의 관점에서 문제를 생각해야 하며, 이를 위해서는 단기간에 걸친 성과 목표 설정과 함께, 장기적인 안목에서의 준비가 필요함

- 전문가들은 국외 영향을 국민에게 제공하는 방법을 다변화 또는 표준화하는 것에 대해 대부분 공감하고 있음
 - 정량적 기여도 추정 방법론 별 장/단점을 명시하여 발표하고, 정성적/관측 기반 정보를 추가적으로 제시하여 정량적 기여도의 불확실성을 보완할 필요가 있음
 - 정량적 기여도 불확실성 개선을 위해서는 모델 정확도 개선에 대한 연구·개발의 지속적 추진과 미세먼지 및 전구물질 국내/외 공동 관측, 서해안 배경 측정소 및 서해상 선박 측정과 같은 국가 배경측정 확장도 고려할만 함
- 또한, 국외 영향 정보 제공 방법에 대해서도, 고농도 시에는 현상에 대한 과학적 분석 자료의 간결/명료/신속한 배포로 불필요한 기여도 논란을 미리 차단할 필요가 있음
 - 또한 장기적인 추세 등에 대해서는 책임 있는 국가기관에서, 예를 들어 연 평균적 범위, 추세에 대해 연보 형식을 통해 공식적으로 발표할 필요가 있음

제3장 개선 방안

(1) 연구

- 국내에서 수치 모델을 이용한 대기질 예측(prediction)은 미국에서 수행하는 소위 'SIP, 대기질 개선 계획 수립' 개념에서의 모사 기법 및 입력 자료의 고도화, 수 없이 반복적인 실험을 통한 경험 축적과 전문 인력 양성이라는 정통적인 접근이 아닌, 대기질 예보(forecast) 관점에서 보다 집중되어 왔음
- 대기질 예보의 경우 내일 또는 모래의 초미세먼지 농도 예측이 주된 목적으로, 수치예보 결과 외 자료동화, 초기장 개선, 경험적인 보정 등을 통해 결과가 달라질 수 있으며, 이러한 수치모사 외적인 요소들은 대기질 예보의 정확도를 향상시키는 큰 역할을 함
 - 과거 기간에 대한 대기질 모사 정확도 향상을 위해 고농도 초미세먼지 재현성이 확보되는 대기질 모사 옵션 선택 및 입력 자료의 개선 등은 예보 시스템으로부터 벤치마크 할 수 있음
 - 수치모사 외적인 요소들의 경우 과거 기간 대기질 모사에 대한 재현성을 개선할 수 있는 실질적인 방안은 아니므로 대기질 모사 정확도 향상을 위해 대기질 예보와는 다른 관점에서 접근되어야 함
- 현재 우리나라에서 대기질 개선 정책은 농도보다는 배출량이 보다 중점에 놓여 있으며, 그 예로서 시행 계획 및 이행계획에 대한 실적 평가는 농도가 아닌 삭감 배출량 계획 대비 진행률이 평가되고 있음
 - 이전에 주 관심이 되던 1차 대기오염 물질의 경우 배출량과 농도의 상관성이 2차 대기오염물질에 비해 뚜렷이 나타나므로 배출량과 농도간의 과학적인 이해에 앞서 배출량 규제만으로도 충분히 목적하는 농도를 달성할 수 있었음
 - 이에 반해 초미세먼지 그리고 최근 부각되는 오존과 같은 2차 대기오염물질의 경우 국내뿐만 아니라 국외로부터의 유입 영향이 크게 우려되고 있는 실정임
 - 이러한 국내외 영향이 기상조건에 의해서 수시로 변화되는 점, 계절별 주성분 농도 및 중량농도가 변화하는 점 등을 고려하면, 단편적인 배출량 저감만으로는 농도 개선 효과 예측은 쉽지 않으며, 이러한 배출량 중심 규제의 경우 배출량과 농도 간 상호 영향에 대한 심도 깊은 이해를 필요치 않음

- 최근 불거지는 2차 대기오염물질 관리를 위해서는 ‘배출량 중심’의 관리에서 탈피하여 ‘농도 중심’의 관리로 변화해야 함
 - 과학적 접근, 대기질 현황 이해, 비용 투입에 따른 배출량, 농도, 노출 개선 효과 분석, 인력 양성, 다각적 관측을 통한 자료 확보와 배출 관리 등이 필요하며, 이를 지원할 수 있는 제도와 정책 개발 병행을 통해 쉽게 풀지 못한, 풀 수 없는 문제를 단숨에 해결할 수도 있음
 - 순차적 접근과 과정이 있어야만 국내외 영향 분석, 국내 배출 목록 확인과 개선을 통한 실질적인 대책 수립과 주변 오염원에 대한 정량적인 기여도 분석이 가능해짐

(2) 정책/소통

- 과학적인 이해에는 시간이 필요하며, 이를 연구할 수 있는 인적자원의 확보가 중요함
 - 이러한 점에서 초미세먼지 현상규명 및 과학적 이해를 위한 장기적인 투자가 필요하며, 현재 운영되고 있는 대기질 관리제도의 기본적인 철학과 목표 등에 대한 재검토도 필요함
- ‘우리는 어떤 소통을, 무엇을 위한 소통을 원하는가’, ‘이러한 연구의 궁극적 목적은 국외 영향 분석인가’, ‘누구를 타히려 함인가’를 분명히 해야 함
- 향후 미세먼지 농도와 관련된 많은 개선 노력 중에 ‘국민’이 핵심 역할을 해야 함을 우리가 함께 인지하는데, 전문가 집단의 노력이 필요할 것임

● ● 참고문헌

1. 국립환경과학원 보도자료(2019년 2월 7일), '올해 첫 고농도 1월 11~15일 미세먼지 발생 사례 분석 결과', 국립환경과학원, 2019.
2. 국립환경과학원 보도자료(2018년 11월 28일), '11월 25~28일 황사와 고농도 미세먼지 발생 사례 분석 결과', 국립환경과학원, 2018a.
3. 국립환경과학원 보도자료(2018년 4월 10일), '3월 고농도 미세먼지, 국외 미세먼지 유입과 국내발생 미세먼지 효과가 더해져 발생', 국립환경과학원, 2018b.
4. 국립환경과학원 보도자료(2018년 2월 7일), '수도권 고농도 미세먼지 원인... 국외 기여율 57~38%', 국립환경과학원, 2018c.
5. 국립환경과학원 보도자료(2019년 11월 20일), '동북아 장거리이동 대기 오염물질 공동연구 보고서 발간', 국립환경과학원, 2019.
6. KORUS-AQ 예비보고서, 국립환경과학원, NASA, 2017.
7. 대기질 예보 권역에 대한 배출원별 지역 간 정량적 기여도 평가 연구(I), 국립환경과학원, 2017.
8. 수도권 대기개선 대책 효과 분석 연구, 환경부(연구수행기관 아주대학교), 2017.
9. 초미세먼지(PM_{2.5}) 배출원 인벤토리 구축 및 상세모니터링 연구, 서울특별시, 2016.
10. Park, M. B., T.J. Lee, E.S. Lee, D.S. Kim, Enhancing source identification of hourly PM_{2.5} data in Seoul based on a dataset segmentation scheme by positive matrix factorization(PMF), Atmospheric Pollution Research, 10, 1042~1059, 2019.
11. Bae, C., B.-U. Kim, H.C. Kim, C. Yoo, S. Kim, Long-range transport influence on key chemical components of PM_{2.5} in the Seoul Metropolitan Area, South Korea, during the years 2012-2016, Atmosphere, 11(1), 48, 2020.



미세먼지



현황 분석 및



개선 보고서

배출량 자료 신뢰도

요약 | 131

제1장 현황 분석 | 133

제2장 진단 | 134

제3장 개선 방안 | 137

대표 집필자

김정수 한서대학교 환경공학과 교수

공동 집필자

공성용 한국환경정책평가연구원
선임연구위원

고영주 한국화학연구원 책임연구원

박기서 KC 그린홀딩스 부사장

박현설 한국에너지기술연구원 책임연구원

조성용 전남대 환경에너지공학과 교수

SESSION

07

SESSION
07

배출량 자료 신뢰도

대표 집필자

김정수 한서대학교 환경공학과 교수

공동 집필자

공성용 한국환경정책평가연구원
선임연구위원

고영주 한국화학연구원 책임연구원

박기서 KC 그린홀딩스 부사장

박현설 한국에너지기술연구원 책임연구원

조성용 전남대 환경에너지공학과 교수

● 요약

- 대기정책지원시스템(이하 CAPSS) 배출량 자료는 대기정책 수립의 기본적인 자료이나 자료 신뢰도 개선과 관리에 필요한 인력 및 예산지원 등은 매우 부족한 실정임
 - 배출량 자료가 부정확하면 정책모델링 결과가 왜곡되어 잘못된 저감 대책으로 추진됨으로써 효과적인 대기질 개선을 어렵게 함
 - PM_{2.5} 농도 개선의 장애 요소 중 하나로써 CAPSS의 부정확성이 지적됨
- CAPSS 부정확성이 상당부분 존재하나 이를 개선하기 위한 여건이나 노력이 부족하였음
 - CAPSS는 국가기관이나 공신력있는 기관에서 생산되는 기초통계자료(연료 통계, 사업장의 설문조사자료(SEMS), 신뢰성이 인정된 연구결과 등)를 활용하여 산정하고 있는데, 이들 기초통계자료에도 부정확성이 상당히 존재함
 - 누락 배출원, 배출계수, 활동도자료 등 배출량 산정단계에서의 부정확성이 존재하나 이를 개선하기 위한 노력이 미흡함
 - 그동안은 대기환경보전법에 근거하여 발전소나 산업시설 등 사업장의 배출시설과 자동차 등을 중심으로 관리해 왔고 생활계 오염원 등은 누락되었음

- 배출계수는 지속적으로 자체 연구를 통해 개선해 왔으나 생산공정이나 실험이 곤란한 배출시설에 대한 배출계수는 미국 EPA의 배출계수를 활용하고 있음
- 활동도는 환경분야 이외의 기관에서 생산되므로 배출량 산정과의 연계성이 부족함
- CAPSS 전담인력 및 예산의 절대 부족으로 개선에 한계가 있음
 - ※ 2019년 하반기에 미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법에 의해 「국가미세먼지종합정보센터」가 신설되어 기존의 인력 부족 문제는 대폭 해소될 전망
- 배출량 자료 개선을 위해 누락 및 과소평가 배출원 조사, 기초 통계자료의 신뢰도 개선, 배출계수 및 활동도 개선이 필요함
 - 특히, 생물성 연소, 비산먼지 등 누락 배출원을 조사하고 중소기업장, 선박 및 건설장비, NH₃ 및 VOCs 배출원 등에 대한 개선이 필요함
 - 기초통계 신뢰도 향상을 위한 유관 기관의 이해도를 제고하고 자료 검증기능을 강화해야 함
 - DARS 평가기법을 이용한 배출계수 및 활동도 신뢰도를 평가하고, 활동도의 시·공간 할당 방법론 및 해상도 개선이 필요함
 - 산정된 배출량 자료를 모델링이나 오염도 측정자료와 교차 검증하여 정확도 수준 평가에 활용해야 함
 - 적정 인력 보강과 아울러 전담인력의 전문화와 잦은 인사이동으로 인하여 전문성이 저해되는 등의 요인을 최소화할 수 있는 체계적인 관리시스템 확립이 요구됨

제1장 현황 분석

- 대기정책지원시스템(이하 CAPSS)(붙임 1)) 배출량 자료는 대기정책 수립의 기본적인 자료이나 그 중요성에 비해 자료 신뢰도 개선과 관리에 필요한 인력 및 예산지원 등은 매우 부족한 실정임
 - 배출량 통계는 대기 측정망 자료와 함께 대기환경 정책의 가장 핵심적인 기초자료임에도 관련 업무에 대한 인력 및 예산 지원 등이 미흡함
 - 측정망 자료가 오염도 수준을 평가하고 대책추진 여부를 결정하는 정책 판단의 시작이라면, 배출량 자료는 관리대책의 우선순위 및 개발, 정책의 효과 검증을 위한 기본 요소임
 - 그럼에도 불구하고 그동안 전담 인력과 예산 규모가 매우 미흡함
 - 배출량 자료*가 부정확하면 정책모델링 결과가 왜곡되어 잘못된 저감 대책으로 추진됨으로써 효과적인 대기질 개선을 어렵게 함
 - * 배출량 자료의 3요소인 언제(Temporal), 어디서(Spatial), 얼마만큼(Amount) 중 하나라도 부정확하면 엉뚱한 지역이나 배출시설에 대해 대책을 적용하게 됨

■ CAPSS 배출량 자료 부정확성에 대한 불신이 증가함

- 국립환경과학원에서 운영 중인 CAPSS는 우리나라 공식 배출량 자료로써 대기관리정책에 큰 역할을 하고 있으나 부정확성 등의 이유로 상당한 비판을 받고 있음
 - 특히 PM_{2.5} 농도 개선의 장애요소 중 하나로서 CAPSS의 부정확성을 지적
 - ※ 과학기술위원회 위원들의 인식 조사결과도 이와 유사(표 7-1))

〈표 7-1〉 배출량 통계자료의 연구수준과 홍보수준에 대한 전문가 인식

① (연구수준) 현재 연구 결과가 국민에게 현안에 대한 답을 할 수 있는 수준은?

매우 미흡	약간 미흡	어느 정도	약간 만족	충분하게	완벽하게
		○			

② (홍보수준) 현재 연구 결과가 국민에게 잘 전달되고 있는가?

매우 미흡	약간 미흡	어느 정도	약간 만족	충분하게	완벽하게
	○				

※ 출처: 국가기후환경회의의 과학기술위원회 위원 설문조사결과(2019.8)

제2장 진단

- CAPSS 부정확성이 상당부분 존재하나 이를 개선하기 위한 여건이나 노력이 부족하였음
 - CAPSS 부정확성은 기초통계자료의 부정확성과 일부 배출원의 누락을 포함한 배출량 산정에서의 부정확성으로 구분할 수 있음
 - 이러한 문제는 지속적인 노력을 통해 개선해야 하지만 PM_{2.5} 문제 해결의 중요성을 감안할 때 시급을 요함
 - 또한 CAPSS를 운영하면서 자료의 검증, 문제점 발굴 및 개선을 위한 내부 노력도 필요함
- CAPSS는 국가기관이나 공신력있는 기관에서 생산되는 기초통계자료(연료통계, 사업장의 설문조사자료(SEMS), 신뢰성이 인정된 연구결과 등)를 활용하여 산정하고 있는데, 이들 기초통계자료에도 부정확성이 상당히 존재함
 - 현재 이용하고 있는 기초통계는 150여개 기관의 300여개 자료에 달하지만 이들 기초자료에도 부정확한 부분이 상당히 존재하여 결국 배출량 자료의 부정확을 야기함
 - 타 기관에서 작성하는 통계자료는 각 기관 고유의 목적이 있기 때문에 배출량 산정에 활용하는데 한계가 있음
 - 배출량 산정 시 활동도 등으로 사용되는 유관기관 통계자료에 대한 입수 근거가 미흡하고, (근거 법령*은 있으나 미제출 시 처벌 규정 등 강제성이 부족함)
 - * 미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법 제 17조(국가미세먼지정보센터의 설치 및 운영) 제 3항: 제2항에 따른 미세먼지 등의 배출량 정보와 관련된 관계기관 및 배출시설의 관리자 등은 정확한 미세먼지 등의 배출량 산정을 위한 통계자료 작성 및 정보 제공 등에 적극 협력하여야 한다.
 - 또한 일부 연구결과가 발표되더라도 국가통계로 사용하기 위해서는 검증이 필요하여 CAPSS 반영에는 시간이 필요함
- 누락 배출원, 배출계수, 활동도자료 등 배출량 산정단계에서의 부정확성이 존재하나 이를 개선하기 위한 노력이 미흡

- 누락 배출원은 최근까지 배출통계는 물론 개선대책에서도 포함되지 않는 경우가 많아 대책의 실효성을 저해하는 요소로 작용하고 있음
 - 그동안은 대기환경보전법에 근거하여 발전소나 산업시설 등 사업장의 배출시설과 자동차 등을 중심으로 관리해 옴
 - 과거 20~30년 전에는 누락배출원의 기여율이 낮아 문제가 되지 않았으나, 경제 규모가 커지면서 다양한 누락배출원이 점점 많아져 대기질 관리의 주요 문제점으로 부각됨

※ 배출원 누락 및 과소/과대평가에 의해 관측치(농도 등)에 대한 설명력이 떨어짐(붙임 2)
- 시급한 개선이 필요한 배출원은 다음과 같음
 - 누락배출원: 항만 지원시설, 화목 연료, 고기구이 음식점, 사업장내 비산먼지, 균용차량·장비, 저감장치 미장착 소형엔진 등
 - 과소배출원: 유기용제 사용(VOCs), 노천 및 불법소각 등
 - 불확도 높은 배출원: 농·축산 등 암모니아(NH₃) 배출원, 소규모 사업장, 산업 공정, 도로 비산먼지 등
- 배출량 산정의 주요 항목인 배출원의 배출계수는 아직 외국의 계수를 사용하는 경우가 많고, 일부 계수는 외국에도 없는 사례도 있어 부정확성의 요인이 됨
 - 배출계수는 지속적으로 자체 연구를 통해 개선해 왔으나 생산공정이나 실험이 곤란한 배출시설에 대한 배출계수는 미국 EPA의 AP-42 배출계수를 활용하고 있음
 - 외국자료는 국내의 배출시설과 다른 경우가 많고 누락배출원에 대한 계수는 전혀 없는 사례도 많아 배출량의 정확성을 떨어뜨리는 요인이 됨
- 배출량 산정에서 또 다른 핵심적인 자료인 활동도는 대부분 환경분야 이외의 기관에서 생산되고 있어 배출량 산정과의 연계성이 부족함
 - 예를 들어, 자동차들이 차종별로 어느 지역을 통행하는지 알아야 함에도 지자체별 등록대수 통계만 작성하거나 고속도로에서는 차종 구분없는 통행량만 조사하고 있으므로 이를 위한 추가적인 연구가 필요함

- VOCs는 PM_{2.5} 생성에 중요한 물질이지만 성분자료가 구축되어 있지 않아 정밀한 원인규명 및 대책 수립에 한계가 있음

 - CAPSS 전담인력 및 예산이 절대 부족함
 - 국립환경과학원 지구환경연구과에서 관리를 전담하고 있으나 인력 및 예산이 절대적으로 부족하여 CAPSS 개선에 한계가 있음
 - 최근에는 예산이 증가하고 있으나 2017년 이전에는 절대 부족한 상황이 지속됨
 - 현재 전담인력이 5인(연구관 1인과 연구사 1인, 연구원 3인)에 불과하여 CAPSS 개선 등의 업무는 주로 외부기관 용역에 의지하는 상황임
- ※ 2019년 하반기에 미특법에 의해 「국가미세먼지종합정보센터」가 신설되어 기존의 인력부족 문제는 대폭 해소될 전망

제3장 개선 방안

■ 누락 및 과소평가 배출원 조사

○ 생물성 연소 배출량

- 대부분 누락되고 있는 음식점업의 경우 식재료, 조리방법, 조리시설에 따라 배출특성이 다양하고 식사 시간에 배출강도가 집중되는 특징이 있으므로 이를 반영한 분류체계와 활동자료 파악이 필요함
- 화목난로 설치 및 사용에 대한 현황 조사와 배출량 산정이 필요함

○ 이동오염원 배출량

- 도로 이동오염원의 경우, 차종별(버스/트럭/승용, 자가용/운송용/건설용 등) 활동자료 및 시·공간 해상도 개선이 필요함

※ 교통안전공단과 한국도로공사 등에서 고속국도 31개 노선, 3,872 km(2015년 기준) 자료적용 방안, 공간(GPS좌표) 및 시간해상도(일, 침두/비침두) 개선방안 연구 진행 중

- 비도로 이동오염원의 경우, 현재 누락되어 있는 항만 내 작업 장비에 관한 활동도 및 적용 가능한 배출계수 조사가 필요함
- 건설기계와 농기계의 경우 대기오염물질 배출량 산정 시 평균 출력을 적용하고 있으나, 개별 출력을 적용할 경우 배출량의 상당한 차이가 발생할 것으로 예상됨. 따라서 건설기계와 농기계의 경우 개별 출력 적용과 월별 가동률에 대한 신뢰성 있는 자료의 적용이 필요함
- 소형 이동식 발전기, 레저용 소형 엔진 등도 고농도 대기오염물질을 배출함에도 저감 장치가 장착되지 않고 운영되므로 배출량 조사가 필요함

○ 군용 차량 및 장비 등의 배출량

- 군사시설의 경우 고정배출원(취사·난방 등) 뿐만 아니라 기동장비(도로·비도로 배출원)들 대다수가 대기오염방지 규제가 없거나 연료품질 정보가 없어 민간시설에 비해 상대적으로 높은 배출강도를 보일 것으로 예상됨
- 따라서 군사기밀을 필요로하는 전략자산을 제외하더라도 일상적인 시설 장비에 대해서는 지속해서 배출량 산정이 가능하도록 배출원 조사 및 조사 체계, 배출계수의 개발(외국 배출계수 사용 포함)이 필요함

○ 농·축산 부문 배출량

- 농업 배출원 중 누락되고 있는 가축분, 슬러지, 기타 유기질비료, 작물잔사, 작물재배 등에 따른 활동도 및 배출계수 개발이 필요함
- 또한, 축산 중 가축분뇨 자원화(퇴비화)시설, 가축분뇨 자원화(액비화) 시설, 농가 자체 분뇨 처리 시스템, 축종 별 품종 등에 대한 활동도 및 배출계수 개발도 필요함
- 이 외 분뇨 및 하·폐수 처리 분야 중 매립시설, 음식물 퇴비화 처리시설 등 누락 부문 추가 등이 필요함

○ 중·소규모 사업장 배출량

- 신고 배출량(자가측정)과 실제 배출량과의 차이 확인 및 배출량 수정이 필요함
- 4~5종 이하의 소규모 사업장에 대한 사업장 개요, 배출 및 방지시설 현황, 굴뚝 현황, 가동현황, 연료사용량, 제품생산량 등 배출량 산정을 위한 항목 조사 등 자료 입수 체계 구축이 필요함

※ IoT, 인공지능(AI), 무인항공기(UAV 또는 드론) 등 4차 산업혁명의 주요 요소 기술 등을 접목하여 대기배출시설의 환경감시, 모니터링, 예측 및 관리의 혁신이 가능해짐에 따라 소형 사업장에 대한 자료입수 및 관리 가능

- 배출원 관리에서 누락되어 있는 도서지역 비상발전기 현황 조사가 필요함

○ 사업장 내 비산먼지 배출량

- 사업장의 경우 다양한 저장시설과 이송시설 등에서 비산먼지가 발생하고 있으나(규제 시행 중), 배출량 산정에서는 전혀 반영되지 않음
- 따라서 이 부문에 대한 활동도 구축 방법 마련이 필요함

○ 도로비산먼지 배출량

- 자동차 운행시 타이어, 브레이크의 마모에서 발생하는 입자의 배출 기여도가 증가하고 있음. 또한 전기차 등 친환경자동차 보급 확대에 따라 향후 자동차 부문에서 마모입자 배출의 중요성이 커짐
- 그러나 현재 국내 포장도로 재비산먼지 배출계수 식(EPA, 2011)은 타이어/브레이크 마모 입자는 제외됨

- 따라서 국내 자동차 타이어 및 브레이크 마모에 대한 배출자료 구축이 별도로 필요하며 이를 위한 표준화된 시험방법 마련이 요구됨
- VOCs 배출량
 - 유기용제 사용에 의한 배출량이 부정확하여 이를 개선하기 위해 도료 중 VOCs 함유량과 사용량에 대한 조사가 필요함
 - 유류 저장시설에서의 VOCs 실제 배출량 조사가 필요함
 - ※ 미국 EPA 자료는 측정으로 산정한 배출량이 배출계수 배출량보다 크게는 수십배 차이가 있는 것으로 보고
 - VOCs의 어떤 성분이 주요한 PM_{2.5} 원인인지 파악하기 위해 세분화된 성분정보를 포함해야 함
- 기초통계 자료의 수집 및 정확도 개선
 - 배출량 산정을 위해 활용되는 유관기관 통계자료 미제출시 처벌 규정 등 강제성 부여를 통한 신뢰도 높은 자료의 지속적 입수체계 구축이 필요함
 - 미세먼지 종합정보센터 신설 및 배출량 수집근거(관계법령 등) 강화
 - 유관기관들의 배출량 통계에 대한 이해도 제고 등을 통해 자료 제공의 타당성 및 필요성을 공유하여 자료의 신뢰도 및 활용성 제고가 요구됨
 - 산정된 배출량 자료를 모델링이나 오염도 측정자료와 교차 검증하여 정확도 수준 평가에 활용함
- 배출계수와 활동도 자료의 개선
 - DARS* 평가방법론에 의한 배출량 불확도 평가 결과를 참조하여 우선순위를 도출함(부록 3)
 - * DARS(Data Attribute Rating System)는 미국 환경청 EIIIP에서 추천하는 불확도 평가 시스템
 - 국내 현황에 맞는 배출계수 개발 비중 제고 및 노후화된 배출계수 최신화 필요
 - 국가 배출량에 적용되는 배출계수 2만여 개 중 국내 개발 23.9%, 외국계수 76.1% 적용되고 있음. 따라서 국내 실정에 맞는 국가 고유 배출계수 개발 비중 제고가 필요함

- 또한 적용 배출계수 중 대부분이 90년대 혹은 2000년대 초반에 개발된 자료<표 7-2 참고>이므로, 해당 부분에 대한 최신화 연구가 필요함

<표 7-2> 에너지산업연소 공공 및 민간발전 부문 1, 2, 3종 보일러 배출계수 예시

연료명	단위	CO	NOx	SOx	TSP	PM ₁₀	VOCs	NH ₃
비민수용무연탄	kg/ton	0.3	9 ^b	19.5S ^b	200 ^b	116 ^a	0.15	0.00028
유연탄	kg/ton	0.25	7.5 ^b	19S ^b	50 ^b	29 ^a	0.03	0.00028
B-A유	kg/kℓ	0.6	5.99 ^b	18S ^b	0.84 ^b	0.671 ^a	0.125	0.096
B-B유	kg/kℓ	0.6	2.47 ^b	14.3S ^b	1.2 ^b	0.959 ^a	0.125	0.096
B-C유	kg/kℓ	0.6	6.64 ^b	14.3S ^b	1.1S+0.39 ^b	0.879S+0.312 ^a	0.125	0.096
LSWR	kg/kℓ	0.6	6.64 ^b	14.3S ^b	1.1S+0.39	0.879S+0.312 ^a	0.125	0.096
경유	kg/kℓ	0.6	2.4 ^b	17S ^b	0.24 ^b	0.198 ^a	0.03	0.096
등유	kg/kℓ	0.6	2.4 ^b	17S ^b	0.24 ^b	0.198 ^a	0.03	0.096
LPG	kg/kℓ	0.384	1.157	0.005	0.036	0.036 ^a	0.06	0.013
LNG	kg/천m ³	1.55	6.04 ^b	0.01 ^b	0.036	0.036 ^a	0.21	0.051

※ 출처: US EPA(1994~1998), AP-42

※ 출처^a: US EPA(2006), Speciate 4.0

※ 출처^b: 환경부 대기환경보전법 시행규칙 <별표 10>

○ 활동도의 시·공간 할당 방법론 및 해상도 개선

- 관련 연구 등을 통해 모델링 등에 활용되는 배출량의 활용성 및 적합성을 높이기 위한 연구가 필요함

※ 시간해상도 개선의 예시: (현재) 월별 → (개선) 시간별 등

■ CAPSS 운영시스템 보완 및 전문성 제고

- 배출원별 모듈화를 통해 신속성 및 유연성을 확보하고, 대기정책지원기능 추가 등을 위한 New-CAPSS 구축(부록 4)
 - 데이터표준화 및 연계, 관련 인프라 도입 등을 통한 유관기관 정보수집 자동화, 배출원별 산정 시스템 모듈화 기능 구축
 - 대기질영향예측시스템, 빅데이터 분석 시스템 도입 등을 통한 배출원별 기여도 및 국내외 기여율 분석, 대책별·시나리오별 미세먼지 저감효과 분석 기능 등 추가

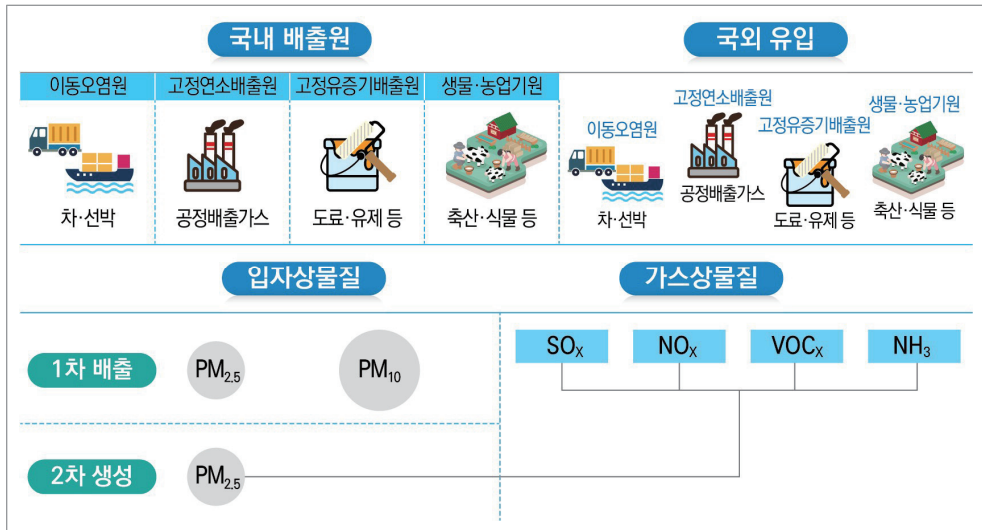
- CAPSS 운영 전문인력 보강 및 예산 지원
 - 기존 5인 규모의 인력을 보강한 「국가미세먼지종합정보센터」가 신설된 것은 다행이나 배출량 정확도를 개선하고 활용도를 높이기 위한 다양한 노력이 필요함
 - 아울러, 앞에서 언급한 문제점들을 근원적으로 개선해 나가기 위해서는 전담인력의 전문화와 잦은 인사이동으로 인하여 전문성이 저해되는 등의 요인을 최소화할 수 있는 체계적인 관리시스템 확립이 요구됨
 - 필요한 연구를 동시 다발적으로 진행하기 위해서는 예산의 증액 및 우선 배정이 필요함

●● 참고문헌

1. 국가 대기오염물질 배출량 산정방법 편람(Ⅲ), 국립환경과학원, 2013.
2. 대기오염물질 배출계수 - 2012년 대기오염물질 배출량 기준, 국립환경과학원, 2015.
3. 국가 대기오염물질 배출량 기초자료구축을 위한 표준업무절차서 - 2015년 배출량 기준, 국립환경과학원, 2018.
4. DARS ; Volume 6 - Quality Assurance Procedures and DARS Software Quality Assurance and Quality Control materials for air emissions from the Emissions Inventory Improvement Program(EIIP).
5. <https://www.epa.gov/air-emissions-inventories/volume-6-quality-assurance-procedures-and-dars-software>

부록 1 CAPSS 구성 개요

- 미세먼지는 배출원으로부터 직접 배출되는 1차배출(Primary PM_{2.5})과 가스상 물질 반응에 의한 2차생성(Secondary PM_{2.5})으로 구성



〈부록 7-1〉 1차배출 및 2차생성 모식도

- 1차 배출량에 대해 국립환경과학원에서는 '99년부터 배출원 분류체계에 따라 미세먼지 등 9개 대기오염물질을 국가 공식자료로써 매년 산정·발표

※ 미국의 경우는 환경 보호국(EPA: Environmental Protection Agency)이 배출통계는 3년에 한 번씩, 배출 입력 자료는 1년에 한 번씩 갱신하여 국가인벤토리(NEI: National Emissions Inventory)를 작성(현재 '14년 NEI까지 공개하고 있으며, '17년 NEI는 '20년 4월 공표 예정)

- CO, NO_x, SO_x, TSP, PM₁₀, PM_{2.5}, VOCs, NH₃, BC 등 물질에 대해 13개 대분류별로 배출량 산정

$$\text{배출량} = \text{활동도} \times \text{배출계수} \times (1 - \text{방지효율})$$

- (점 오염원) SEMS* 및 TMS**를 기반으로 상향식(Bottom-up) 산정

* SEMS: Stack Emission Management System, 대기배출원관리시스템

** TMS: Telemonitoring System, 굴뚝원격감시체계

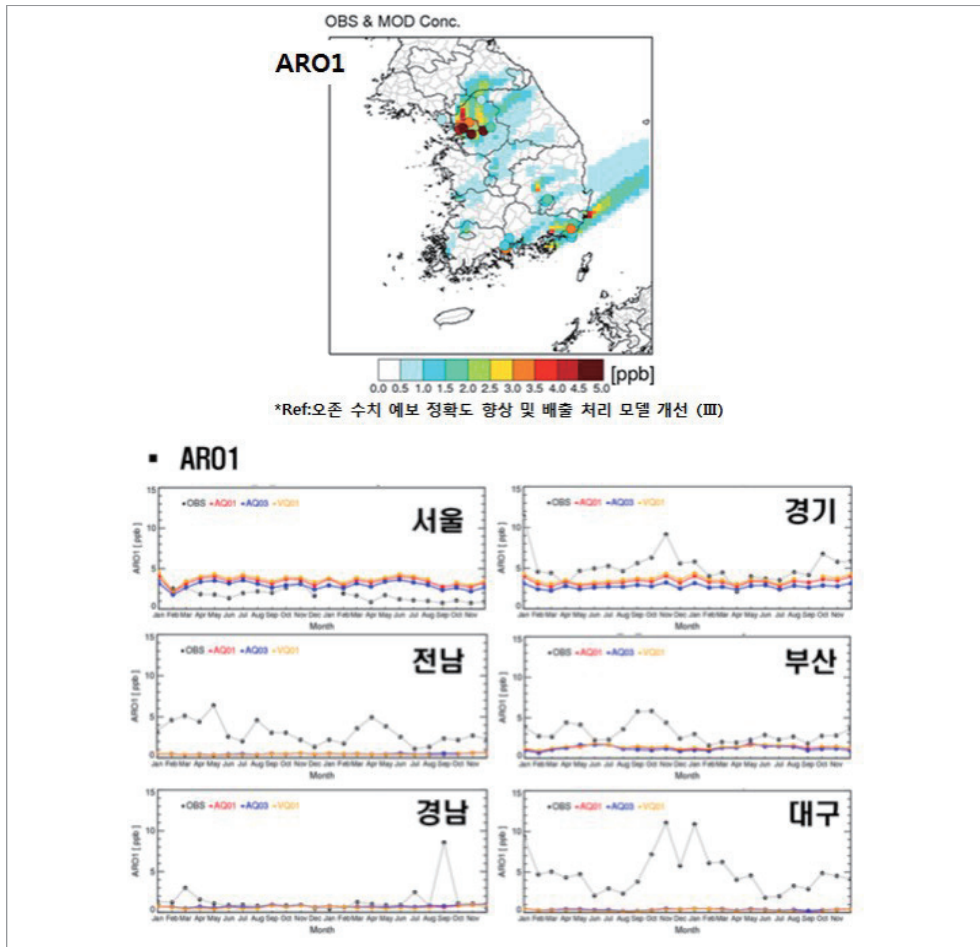
- (이동 및 면 오염원) 부문별 연료 사용량 등을 활동도로 하여 하향식(Top-down) 산정

- (배출계수) 국립환경과학원 연구결과 등 국내 배출계수 우선 적용, 국내 계수가 없을 경우 유럽 CORINAIR, US EPA AP-42 등 적용
- (활동도) 연료·원료 사용량, 주행거리 등 150여개 기관에서 300여개 통계 자료를 입수하여 활용
- 배출량 통계는 관련 연구 및 수도권 대기환경개선계획, 미세먼지관리종합대책 등 대기관련 대책 수립·시행·이행효과 분석 등에 활용되므로 정확하고 신뢰도 높은 통계 산정 필요

부록 2 모델링과 관측자료에 의한 국내 배출량 수준 평가 결과

■ 확산 모델 결과에 의한 평가 예시

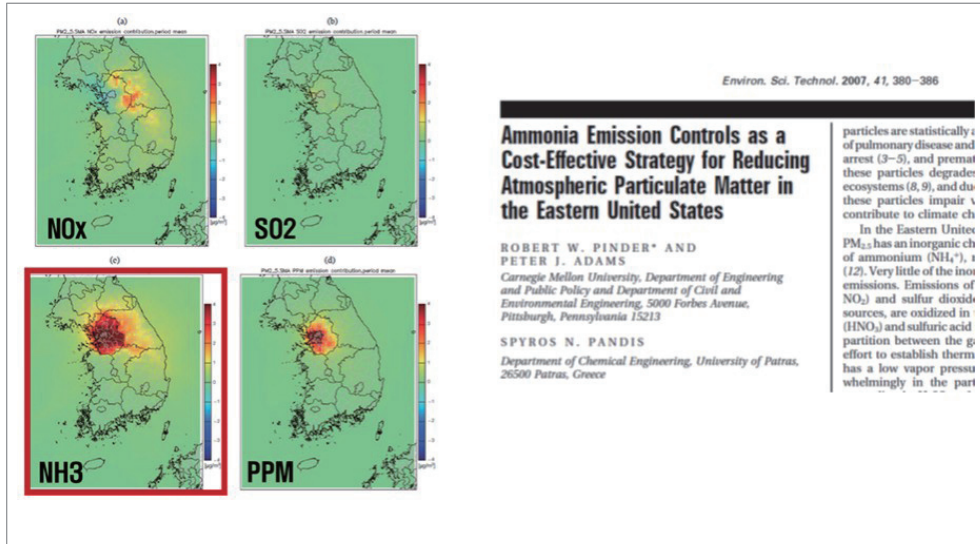
- 장기모사 수행 및 국내 광화학 측정망, 도시대기 측정망 자료 등을 활용하여 전반적인 미세먼지 배출량 수준 평가 가능
- VOCs 배출량의 경우, 수도권을 제외한 지역에서는 모사 농도가 관측농도에 비해 낮게 모사됨. 따라서 VOCs 배출량이 부족한 것으로 사료됨. 특히, 산업단지가 밀집된 전남 지역의 경우 VOCs 과소모의가 두드러지며, 이는 공장 및 산업단지에서 배출되는 배출량이 CAPSS(생산공정 배출원)에서 과소평가된 것으로 사료됨



※ 출처: 국가 대기오염물질 배출량 평가 방법 개발 및 로드맵 개선 연구, 국립환경과학원, '18.2

〈부록 7-2〉 광화학 측정망 자료

- PM_{2.5} 농도에 대한 수도권 지역 배출물질 기여도 분석 결과, 국내 PM_{2.5} 농도에 대하여 암모니아의 기여도가 높게 나타나므로 암모니아 배출량 불확도에 대한 검토가 필수적임



※ 출처: 국가 대기오염물질 배출량 평가 방법 개발 및 로드맵 개선 연구, 국립환경과학원, '18.2

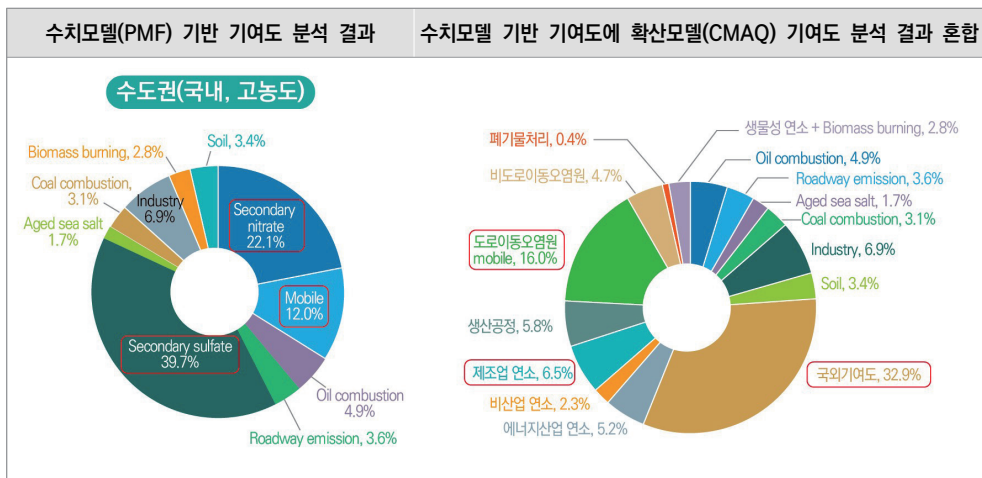
- CMB(Chemical Mass Balance)모델 결과와 서울시 CAPSS PM₁₀ 자료와 비교분석하여 배출원별 보완점 제시

CAPSS(서울)		서울시 CMB 기여도 결과	
에너지 산업연소(0.07%) + 비산업연소(1.85%)	1.92%	기름연소 + LNG 연소	29% - (차량 일부)
제조업연소(0.02%) + 생산공정(0.00%) + 폐기물처리(0.02%)	0.04%	소각 및 산업 = 7%	7%
도로이동오염원	19.86%	경유 + 휘발유 차량 = 15.4%	15% + (기름연소 일부)
비도로이동오염원	4.60%	건설장비 = 13%	1% + (기름연소 일부)
비산먼지 합산	73.58%	Bio 소각 + 건설활동 + 도로먼지 = 31%	31% + (기름연소 일부)
질산염 + 황산염		질산염 + 황산염	20%
총합	100%	총합	103%

※ 출처: 서울시 대기중 미세먼지의 상세 모니터링을 통한 미세먼지 특성 조사 연구, 서울특별시, '09

■ 수용 모델 결과 등에 의한 평가 예시

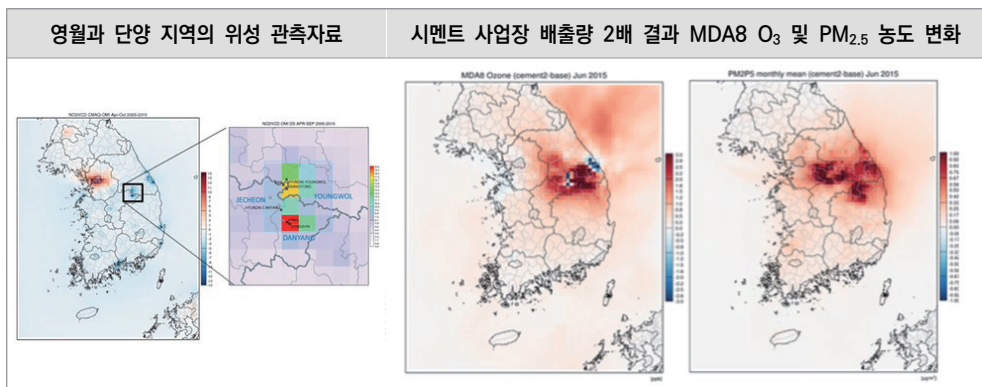
- 배출량에 대한 개발체계 검토 수행이 가능하며, 배출원에서 먼 오염원 및 이동오염원 등에 대한 보완이 추가적으로 필요함을 확인 가능
- 국내 고농도 사례에 대한 불광동 PM_{2.5} 농도 기여도를 분석한 결과 수용모델과 수치모델을 혼합하여 분석할 경우 12가지 배출원 및 국외 기여도 구분이 가능해짐(수치모델 기반 분석결과 보다 이동오염원의 기여도가 증가하였으며 제조업연소, 생산공정, 에너지 산업 연소 기여도가 커짐)



※ 출처: 미세먼지의 국내의 기여율 산정 및 수용모델 적용 가이드라인 마련(Ⅲ), 국립환경과학원, '17)

■ 관측자료에 의한 평가 예시

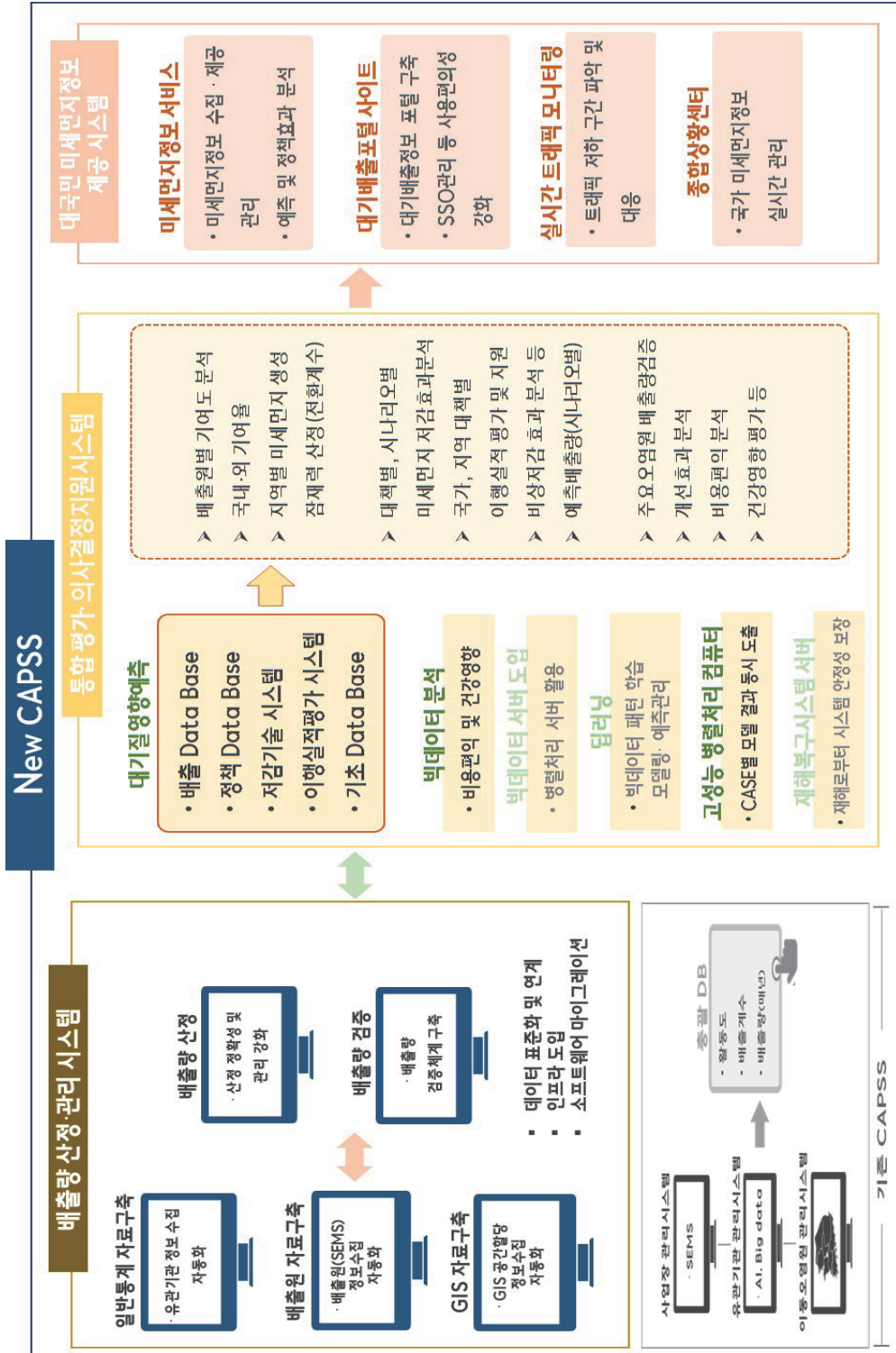
- 국내 배출량의 불확도 검토 및 누락오염원 등에 대한 파악 가능
- 인공위성을 통한 신호가 비교적 강하게 나타나는 도심지역의 배출량 및 주요 점오염원의 배출량에 대한 평가 수행



부록 3 DARS 방법론 적용에 따른 배출량 불확도 평가결과(배출량 기여도 고려)

순위	대분류	중분류	오염물질	불확도
1	농업	분뇨관리	NH ₃	40.86
2	유기용제 사용	도장시설	VOCs	27.13
3	도로이동오염원	화물차	NO _x	13.55
4	제조업 연소	기타	PM ₁₀	11.85
5	비산먼지	건설공사	PM ₁₀	10.22
6	생산공정	석유제품산업	SO _x	10.08
7	비산먼지	도로재비산먼지	PM ₁₀	9.63
8	유기용제 사용	기타 유기용제사용	VOCs	9.50
9	비도로이동오염원	해상선박	NO _x	9.50
10	도로이동오염원	승용차	CO	9.26
11	생물성 연소	농업잔재물 소각	CO	8.69
12	비도로이동오염원	해상선박	SO _x	8.48
13	제조업 연소	기타	SO _x	6.87
14	에너지산업 연소	공공발전시설	SO _x	6.23
15	비도로이동오염원	건설장비	NO _x	6.22
16	비도로이동오염원	해상선박	CO	4.98
17	도로이동오염원	화물차	CO	4.60
18	생산공정	석유제품산업	NH ₃	4.56
19	도로이동오염원	이륜차	CO	4.37
20	비산먼지	비포장도로 비산먼지	PM ₁₀	4.13
21	생물성 연소	목재난로및보일러	CO	4.08
22	비도로이동오염원	건설장비	CO	4.03
23	생산공정	제철제강업	SO _x	4.02
24	비산업 연소	주거용시설	CO	4.02
25	농업	비료사용농경지	NH ₃	3.93
26	도로이동오염원	RV	NO _x	3.68
27	비산먼지	농업활동	PM ₁₀	3.38
28	에너지산업 연소	공공발전시설	NO _x	3.37
29	생산공정	식음료 가공	VOCs	3.31
30	생산공정	석유제품산업	VOCs	3.30

부록 4 New CAPSS 구성도





미세먼지



현황 분석 및



개선 보고서

대기관리 정책 체계

요약 | 151

제1장 현황 분석 | 152

제2장 문제점 및 개선방향 | 160

대표 집필자

김동술 경희대학교 환경학 및
환경공학과 교수

공동 집필자

채여라 한국환경정책평가연구원
선임연구위원

동종인 서울시립대학교 환경공학부 교수

양오봉 전북대학교 화학공학부 교수

이오이 환경정의 사무처장

SESSION

08

SESSION
08

대기관리 정책 체계

대표 집필자

김동술 경희대학교 환경학 및
환경공학과 교수

공동 집필자

채여라 한국환경정책평가연구원
선임연구위원**동종인** 서울시립대학교 환경공학부 교수**양오봉** 전북대학교 화학공학부 교수**이오이** 환경정의 사무처장

● 요약

- 다양한 관점에서 본 우리나라의 대기환경 관리·정책 문제점
 - 환경 패러다임과 평가원칙의 부재, 환경 기초연구의 미진, 공해의 사전예방 미흡, 환경악법의 존속, 비합리적 대기환경관리 예산의 배분, 미흡한 환경기준과 배출기준, 특정대기유해물질의 경시, 면오염원 관리부실, 인적·물적 환경 인프라의 부실, 중앙 및 지자체 환경공무원의 인력 부족과 비전문성, 환경 이해당사자간의 소통 부재, 대 국민 환경교육과 홍보의 부족 등
- 미세먼지 저감을 포함한 종합적 환경의 질 개선을 위한 체계적이고 합리적인 정책과 계획 수립이 필요함
 - 환경성, 경제성(에너지), 사회성, 국제성, 위해성 등의 환경 프로토콜을 사회성 합의에 의해 결정하고, 환경과 건강위주의 프로토콜을 국가차원에서 선언하여야 함
- 과학적 근거를 가진 목표 설정 및 꾸준한 시행과 함께, 헌법에 명시된 국민의 환경권 보호를 위해 이해당사자들이 각자의 역할을 되돌아봐야 함

제1장 현황 분석

(1) 헌법에 명시된 국민의 환경권 보호

- 1980년 개정된 헌법 제35조는 “모든 국민은 건강하고 쾌적한 환경에서 생활할 권리를 가지며, 국가와 국민은 환경보전을 위하여 노력하여야 한다”고 명시하고 있음

(2) 대기환경관리 법령 현황

- 대기관리에 관한 현행 법령은 「환경정책기본법 시행령」, 「대기환경보전법 시행령」, 「수도권 대기환경개선에 관한 특별법」 및 동법 시행령¹⁾ 등이 있으며, 2015년 신설된 「환경오염시설 통합관리법」과 2018년 8월에 신설된 「미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법」이 핵심 법률들임
- 정부는 이들 법률의 시행령에 의거하여, 미세먼지로 인한 국민의 건강과 환경에 미치는 피해가 심각해짐에 따라 관련 특별대책을 추가 설정하고, 체계적인 저감 및 관리 대책의 기반을 마련 중에 있음
- 현행 법령들의 주요 내용은 아래와 같음

① 환경정책기본법

- 「미세먼지특별법」이 제정되기 전에는 미세먼지에 관한 기준 및 이를 관리하기 위한 체계적인 법제로 「환경정책기본법」 및 「환경정책기본법 시행령」이 그 역할을 담당하였음
- 「환경정책기본법」은 환경보전에 관한 국민의 권리·의무와 국가의 책무를 명확히 하고 환경정책의 기본사항을 정하여 환경오염과 환경훼손을 예방하고 환경을 적정하고 지속가능하게 관리·보전함으로써 모든 국민이 건강하고 쾌적한 삶을 누릴 수 있도록 함을 목적으로 함(제1조)

1) 이 밖에도 「학교보건법 시행령」은 학교 또는 정화구역이 「도시 및 주거환경정비법」상 정비구역으로 지정·고시되는 경우 교육감은 정비구역 내 공사로 인한 소음·진동, 통학로의 교통안전성, 학교의 예상 일조량 등과 미세먼지를 포함한 비산먼지를 조사하여야 한다는 내용으로, 특수한 경우의 미세먼지 오염현황 조사를 위한 근거규정(제20조)을 두고 있고, 「환경분야 시험·검사 등에 관한 법률 시행규칙」에서는 실내공기질 분야 측정기기, 즉 미세먼지를 포함한 실내공간 오염물질 측정을 위한 기기는 형식승인을 받도록 하는 근거규정(제2조)으로서 미세먼지에 관한 관리규정을 운영하고 있다.

- 환경보전을 위한 규제에 관하여 “정부는 환경보전을 위하여 대기오염·수질오염·토양오염 또는 해양오염의 원인이 되는 물질의 배출, 소음, 진동, 악취의 발생, 폐기물의 처리, 일조의 침해 및 자연환경의 훼손에 대하여 필요한 구제를 하여야 한다.”라고 규정하였음(제30조)
- 환경오염이라는 넓은 개념에서 기본법적인 입장에서 접근하고 있다는 점에서 심각도가 높아지고 있는 미세먼지 문제를 체계적이면서 집중적으로 다루는데에는 한계가 있으나, 미세먼지에 관한 관리기준을 마련하였다는 점²⁾에서 국가 및 지방자치단체가 환경에 관한 법률의 제·개정 및 행정계획 수립이나 관련사업 집행의 범위와 정도를 체계화하였다는 데 의미가 있음³⁾
- 환경기준을 자주 초과하는 지역은 환경부장관이 관계 중앙행정기관의 장 및 시·도지사에게 협의하여 환경보전을 위한 ‘특별대책지역’으로 지정·고시하고, 해당 지역의 환경보전을 위한 ‘특별종합대책’을 수립하여 관할 시·도지사에게 이를 시행하게 할 수 있으며⁴⁾, 특별대책지역의 환경개선을 위하여 필요한 경우에는 대통령령으로 정하는 바에 따라 그 지역에서 토지이용과 시설 설치를 제한할 수 있음⁵⁾
- 특히 「환경정책기본법」에서 정하고 있는 대기환경기준은 ‘배출허용기준’의 설정기준이 된다는 점에서 관련 세부법률에서 이를 관리하는 기준이 됨⁶⁾
- 미세먼지의 관리에 관한 기준에 관하여는 「환경정책기본법 시행령」 제2조에서 규정하고 있고 <표 8-1>은 총먼지(TSP), 미세먼지(PM₁₀), 미세먼지(PM_{2.5})의 ‘연간’ 및 ‘24시간’ 대기환경기준에 대한 강화내역을 담고 있으며, <표 8-2>는 우리나라와 주요 국가에 대한 환경기준을 보여주고 있음

② 대기환경보전법

- 「대기환경보전법」은 제1조(목적)에서 ‘대기오염으로 인한 국민건강 및 환경상의 위해를 예방하고 대기환경을 적정하고 지속가능하게 관리·보전함으로써 모든 국민이 건강하고 쾌적한 환경에서 생활할 수 있게 하는 것을 목적으로 한다.’라고 밝히고 있음

2) 전략환경영향평가, 환경영향평가, 소규모 환경영향평가 등 관련 평가 실시에 있어 환경기준의 적정성을 유지할 수 있으나 여부는 그 시행 여부에 있어 중요한 평가지표가 된다는 점에서 환경영향평가의 기준의 역할도 수행한다고 볼 수 있다(「환경정책기본법」 제41조).

3) 국가법령정보센터, “환경정책기본법”, 제13조.

4) 국가법령정보센터, “환경정책기본법”, 제38조 제1항.

5) 국가법령정보센터, “환경정책기본법”, 제38조 제2항.

6) 국가법령정보센터, “대기환경보전법”, 제16조 제3항.

- 동법 시행령 제1조의4에서는 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})를 대기 오염도 예측·발표의 대상 오염물질로 규정하고 있으며, 환경부장관은 ‘국가 대기질 통합관리센터’를 지정하여 이들 미세먼지에 대한 대기오염도를 예측하고 결과를 발표하도록 규정하였음⁷⁾
- 시·도지사는 동법 제8조4항에 의거하여, ‘대기오염경보의 대상지역’을 지정할 수 있도록 하고 있으며, 해당 지역에서 미세먼지(PM₁₀)와 미세먼지(PM_{2.5})의 농도가 환경기준을 초과하는 경우에는 ‘대기오염경보’를 주의보, 경보, 중대경보 등으로 구분하여 발령할 수 있도록 규정하였음⁸⁾
- 「대기환경보전법」은 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})에 대한 ‘배출허용기준’을 별도로 규정하고 있지는 않으며, 단지 ‘입자형태의 물질’이라는 구분을 통하여 먼지, 카드뮴·납·크롬·구리·니켈·아연 등의 화합물, 비산먼지, 매연 등에 대한 ‘배출허용기준’을 설정하고 있음⁹⁾

〈표 8-1〉 미세먼지 대기환경기준의 강화내역¹⁰⁾

항 목		1983	1991	1993	2001	2007	2012	2018
먼지 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	총먼지 (TSP)	150/년 300/일	150/년 300/일	150/년 300/일	-	-	-	-
	미세먼지 (PM ₁₀)	-	-	80/년 ¹⁾ 150/일 ¹⁾	70/년 150/일	50/년 100/일	50/년 100/일	50/년 100/일
	초미세먼지 (PM _{2.5})	-	-	-	-	-	25/년 ²⁾ 50/일	15/년 ³⁾ 35/일

※ 주: 1) 1993년 PM₁₀ 기준 신설(1995년 적용)
 2) 2011년 PM_{2.5} 기준 신설(2015년 적용)
 3) 2018년 PM_{2.5} 기준 신설(2018년 적용)

7) 국가법령정보센터, “대기환경보전법”, 제7조의2 제3항; 국가법령정보센터, “대기환경보전법 시행령”, 제1조의4 제2항.
 8) 대기오염경보가 발령된 경우 ‘주의보’ 발령 시에는 주민의 실외활동 및 자동차 사용의 자제 요청 등, ‘경보’ 발령 시에는 주민의 실외활동 제한 요청, 자동차 사용의 제한 및 사업장의 연료사용량 감축 권고 등 그리고 ‘중대경보’ 발령 시에는 주민의 실외활동 금지 요청, 자동차의 통행금지 및 사업장의 조업시간 단축명령 등을 할 수 있으나, 미세먼지(PM₁₀)와 미세먼지(PM_{2.5})의 경우에는 ‘주의보’와 ‘경보’만 발령할 수 있다(「대기환경보전법」 제8조4항 및 동법 시행령 제2조).
 9) 사실상 배출시설과 자동차 등에서 발생하는 대부분의 미세먼지(PM₁₀)와 미세먼지(PM_{2.5})에 대한 배출기준을 간접적으로 설정했다고 할 수 있다.
 10) 국립환경과학원(2019). 대기환경연보 2018.

〈표 8-2〉 각국의 미세먼지 대기환경기준(2018년 현재)¹¹⁾

(단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

항목	기준 시간	한국	미국	일본	호주	중국 ⁶⁾	EU	WHO ¹⁾
PM ₁₀	24시간	100	150 ^{P, S) 2)}	100	50	150	50 ⁷⁾	50
	년	50			25	70	40	20
PM _{2.5}	24시간	35 ¹⁾	35 ^{P, S) 3)}	35 ⁵⁾	25	75		25
	년	15	12 ^{P) 4)} 15 ^{S) 4)}	15	8	35	25	10

- ※ 주: 1) 우리나라의 경우, 24시간 평균치는 99백분위수의 값이 그 기준을 초과해서는 안됨
 2) 미국의 경우, 1차 기준(primary), 2차 기준(secondary)로 나뉘며, P, S)로 구분하여 표기함, 98 percentile의 3년 평균치가 1년에 1회 이상 초과하면 안됨
 3) 미국의 경우, 일평균치의 3년간 평균치가 1년에 1회 이상 초과하면 안됨
 4) 미국의 경우, 연평균의 3년간 평균치가 초과하면 안됨
 5) 일본의 경우, PM_{2.5}의 24시간 농도의 98percentile이 대기환경기준을 초과하면 안됨
 6) 중국의 경우, 도시지역에 적용한 Class2 기준임
 7) EU의 경우, 24시간 농도가 1년에 35회 이상 초과하면 안됨

- 「대기환경보전법」에서는 기후변화와 생태계 변화 등에 따른 배출 관리 및 황사방지를 위한 대응방안 등 대기환경보전에 관한 일반적인 관리시책과 제도를 포함하고 있음
- 1990년 「대기환경보전법」이 제정된 이후, 2019년 7월 현재까지 36차례 부분 개정되었는데, 개정사유의 대부분은 제도 운영상의 미비점을 보완하는 수준이었음
- 국민의 건강과 복지 향상이라는 패러다임을 설정하여, 국민의 환경의식 수준, 국가의 경제 수준, 전 세계의 역할기대를 반영하는 「대기환경보전법」의 전면 개정이 요구됨

③ 수도권 대기환경개선에 관한 특별법

- 「수도권 대기환경개선에 관한 특별법」(이하 「수도권특별법」)의 제1조(목적)는 “이 법은 대기오염이 심각한 수도권지역의 대기환경을 개선하기 위하여 종합적인 시책을 추진하고, 대기오염원을 체계적으로 관리함으로써 지역주민의 건강을 보호하고 쾌적한 생활환경을 조성함을 목적으로 한다.”라고 명시하고 있음

11) 국립환경과학원(2019). 대기환경연보 2018.

- 이를 위해 환경부장관이 수도권 대기관리권역에서 미세먼지 등 대기오염도를 측정하고 그 결과를 공개하여야 할 의무¹²⁾와 10년마다 질소화합물, 황산화물, 휘발성유기화합물, 오존, 먼지(TSP)를 포함한 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})를 줄이기 위한 '수도권 대기환경관리 기본계획'을 수립할 의무를 규정하고 있음¹³⁾
- 2013년 12월 2차기본계획이 수립되어, 2015년부터 시행되고 있음.
기본계획에는 ㉔ 대기환경개선 목표 및 기본방향, ㉕ 배출량 및 대기오염도 현황과 전망, ㉖ 배출원별 배출허용총량, ㉗ 배출원별 배출량의 저감계획, ㉘ 시·도별 배출허용총량, ㉙ 저공해자동차의 보급, ㉚ 사업장 총량관리대상 오염물질(질소산화물·황산화물·먼지) 배출허용총량의 할당기준, ㉛ 총량을 할당받은 사업장에 대한 지원 등을 포함하고 있음
- '대기오염물질 총량관리제도'는 2015년부터 시행된 '온실가스 배출권거래 제도'와 유사한 제도로써 각 지역별로 총량관리 대상오염물질의 배출허용총량을 정하고, 그 범위 안에서 각 사업장에게 배출허용량을 할당하도록 하였음. 또한, 배출권 시장을 도입함으로써 사회적으로 가장 최소의 비용으로 일정한 수준의 환경을 유지할 수 있게 하는 제도가 마련됨. 현재 총량관리가 실시되고 있는 대상오염물질은 질소산화물(NO_x)과 황산화물(SO_x) 2종류와 2018년부터 시행중인 총먼지(TSP: Total Suspended Particles)임
- '대기오염물질 총량관리제도'가 전구물질 관리를 통해 미세먼지 저감에 있어 중요한 역할을 한다고 평가되고 있음

④ 환경오염시설 통합관리법

- 그동안 많은 환경관련 법률이 제정되었지만 2015년을 '환경원년'이라고 말하는 사람들이 많음
- 즉, 「화학물질 등록·평가법」, 「화학물질관리법」, 「환경오염피해구제법」, 「온실 가스 거래제」, 「HAP 비산배출시설 관리제」, 「수도권특별법 제2차 기본계획」 등 대기환경관련 많은 법령과 제도가 2015년 신설 및 개정되었기 때문이며, 무엇보다 「환경오염시설 통합관리에 관한 법률(이하 통합환경

12) 국가법령정보센터, "수도권 대기환경 개선에 관한 특별법", 제7조의2 제1항.

13) 국가법령정보센터, "수도권 대기환경 개선에 관한 특별법", 제8조.

관리법)」이 제정되었기 때문임. 그동안 경제위주의 환경정책에서 벗어나 국제적 위상에 걸맞는 규제제도가 도입되기 시작하였음

- 환경부는 2014년 1월 「통합환경관리법」을 입법예고 했었는데¹⁴⁾, 동법은 대형 사업장을 대상으로 최적가용기법(BAT: best available technique)을 도입하여 환경오염매체를 통합 관리하는 체계이며, 다수의 환경 인·허가로 인한 사업자의 부담을 완화하며, BAT를 사업장 여건에 맞게 적용하여 환경기술의 발전, 환경질 개선, 더 나아가 산업활동의 생산성 제고를 목적으로 하였음
- 「통합환경관리법」은 1977년대 미국의 BACT(best available control technology, 최선의 방지기술) 제도와 1996년 EU의 BAT를 모델로, 그동안 대기, 수질, 폐기물, 소음진동 등 개별 매체별로 분산되어 이루어지던 환경관리 인·허가 체계를 근본적으로 개혁하는 내용을 담고 있음
- 2017년 이후 업종별로 관리체계가 시행되고 있으며, 2024년까지 전체 업종에 확대되어 시행될 예정임
- 이 법률에 의하여, 우리나라 환경관리체제는 커다란 변화와 함께 발전이 예상되지만, 미국의 BACT 및 EU의 BAT의 핵심인 환경평가 프로토콜, 즉 환경성, 경제성, 위해성, 사회성, 지역성, 국제성 등이 융통성 있게 고려된 프로토콜이 아직 마련되어 있지 않음

⑤ 미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법

- 2018년 8월에는 미세먼지 저감대책을 위한 제도로 「미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법」(이하 「미세먼지특별법」)이 제정되어 2019년 2월부터 시행 중임
- 「미세먼지특별법」 제1조(목적)에는 ‘이 법은 미세먼지 및 미세먼지 생성 물질의 배출을 저감하고 그 발생을 지속해서 관리함으로써 미세먼지가 국민건강에 미치는 위해를 예방하고 대기환경을 적정하게 관리·보전하여 쾌적한 생활환경을 조성하는 것을 목적으로 한다.’라고 규정하고 있음

14) 환경부(2014). 환경오염시설 통합관리에 관한 법률 제정안 재입법예고, <http://www.lawmaking.go.kr/lmSts/ogLmPp/21192>(2015.8.6. Accessed).

- 「미세먼지특별법」은 미세먼지에 대한 정부의 종합적 관리대책이 법적 근거를 바탕으로 미세먼지 배출시설에 대한 배출량 조사와 저감대책 등이 의무적으로 집행되어야 한다는 공감대에서 제정되었음
- 또한, 수도권 공공·행정기관을 대상으로 시범시행 중이던 ‘고농도 미세먼지 비상저감 조치’에 법적 근거를 제공하였으며, 시·도지사는 특별법을 통해 자동차의 운행제한 또는 대기오염 물질 배출시설의 가동시간 변경이나 가동률 조정, 대기오염방지시설의 효율 개선 등의 조치를 시행 가능하게 되었음
- 특별법은 미세먼지 대책을 심의하는 ‘미세먼지 특별대책위원회’¹⁵⁾와 이를 지원하기 위한 ‘미세먼지 개선기획단’을 국무총리 소속으로 설치하고, 환경부에는 ‘국가미세먼지정보센터’를 두어 그간 제기되던 신뢰도 문제를 해결하기 위하여 미세먼지 배출량의 정확한 산정과 관련 정보를 관리하도록 하였음
- 또한, 미세먼지 저감 및 관리에 있어서는 5년마다 종합계획을 수립하도록 하고, 시·도지사는 이에 따른 시행계획을 수립하여 추진실적을 매년 보고하도록 규정하였음

〈표 8-3〉 국내 대기질 개선을 위한 미세먼지 정책 및 제도의 변화

시기	정책	세부 내용
1980년대	배출 부과금	<ul style="list-style-type: none"> ○ 1980년 자동차 배출가스 규제 시행 ○ 1983년 TSP 환경기준 ○ 1983년 배출부과금 제도시행
1990년대	PM ₁₀ 환경기준 설정	<ul style="list-style-type: none"> ○ 1990년 대기환경보전법 제정(1995년 개정) ○ 1990년 환경정책기본법 제정 ○ 1990년 제작차 배출가스 허용기준 적합 인증제 ○ 사업장에 대한 지도·점검, 연료 규제 ○ 1993년 PM₁₀ 환경기준 신설(연평균 80, 일평균 150μg/m³) ○ 1995년 PM₁₀을 미세먼지라는 법적 용어로 규제 시작 ○ 1997년 기본배출부과금 제도 시행 ○ 대기오염물질배출시설의 설치 및 변경에 대한 허가·신고제도 운영

15) 국무총리 소속의 ‘미세먼지특별대책위원회’는 미세먼지 저감 및 관리 정책을 정부 차원에서 효율적으로 추진하기 위해 국무총리와 대통령이 지명한 민간위원장을 공동위원장으로 하고 관계 중앙행정기관의 장과 민간 전문가 등을 위원으로 한다.

시기	정책	세부 내용
2000년대	1차 수도권 대기환경 관리 기본계획, 1차 대기환경개선 종합대책 수립	<ul style="list-style-type: none"> ○ 2001년 TSP 환경기준 삭제 ○ 2001년 PM₁₀ 환경기준 강화(연평균 70$\mu\text{g}/\text{m}^3$) ○ 2003년 수도권 대기환경 개선에 관한 특별법 제정 ○ 2005년 수도권 대기환경관리 기본계획(2005~2014년) ○ 2005년 환경친화적자동차의 개발 등에 관한 기본 5개년 계획 ○ 2005년 대기환경개선 10개년 종합계획(2006~2015년) ○ 2005년 경유차 DPF 부착사업 실시 친환경 에너지 보급·확대 ○ 2007년 PM₁₀ 환경기준 강화(연평균 50, 일평균 100$\mu\text{g}/\text{m}^3$) ○ 2007년 경유차 DPF 설치 ○ 2008년 사업장 오염물질 총량제 시행
2010년대	2차 수도권 대기환경 관리 기본계획, 미세먼지 특별대책 수립	<ul style="list-style-type: none"> ○ 2010년 먼지 총량제 시행 폐지, 제2차 친환경차 기본계획 수립 ○ 2011년 PM_{2.5} 환경기준 신설 ○ 2013년 석탄 화력발전소 확충(6차 전력수급 기본계획) ○ 2013년 제2차 수도권 대기환경관리 기본계획(2015~2024년) 수립 ○ 2014년 PM₁₀, PM_{2.5} 대기오염 경보제 신설 ○ 2015년 PM_{2.5} 환경기준 적용(연평균 25, 일평균 50$\mu\text{g}/\text{m}^3$) ○ 2015년 제2차 대기환경개선 종합계획(2016~2025년) 수립 ○ 2015년 제3차 환경친화적자동차 개발 및 보급계획 기본계획 수립 ○ 2016년 6월 3일 미세먼지 특별대책 수립
2017년	2차 수도권 대기환경 관리 기본계획 변경계획, 미세먼지 종합 대책계획	<ul style="list-style-type: none"> ○ 2017년 5월 제2차 수도권 대기환경관리 기본계획 변경계획(2015~2024년) ○ 2017년 6월 노후 석탄 화력발전소 8기 섯다운 ○ 2017년 6월 23일 미세먼지 특별법안 제안(계류) ○ 2017년 7월 국정운영 5개년 계획: 미세먼지 30% 감축
2018년	2차 수도권 대기환경관리 기본계획 재변경	<ul style="list-style-type: none"> ○ 2018년 3~6월 3개월간 발전소 정례적 섯다운 ○ 공정률 10% 미만 석탄화력발전소 원점재검토(총 9기) ○ 2030년까지 경유자동차 운행 전면 금지 ○ 2018년 3월 PM_{2.5} 환경기준 강화 (연평균 25→15$\mu\text{g}/\text{m}^3$, 일평균 50→35$\mu\text{g}/\text{m}^3$)

제2장 문제점 및 개선방향

■ 현재 연구 결과가 국민에게 현안에 대한 답을 할 수 있는 수준은?

매우 미흡	약간 미흡	어느 정도	약간 만족	충분하게	완벽하게
	○				

- 현재 정책 평가나 우선순위 결정과 관련한 체계적 방법론 연구가 미흡하여 국가 차원의 평가 기준이나 방법론에 대한 근거를 마련하여야 함

■ 현재 연구 결과가 국민에게 잘 전달되고 있는가?

매우 미흡	약간 미흡	어느 정도	약간 만족	충분하게	완벽하게
	○				

- 현재 미세먼지와 관련된 다양한 대책이 수립되어 이행 중이나, 대책 선정의 이유나 근거에 대해 국민과의 소통은 미흡함

(1) 과학기술 기반 대기환경 관리의 개요 [〈표 8-4〉와 〈그림 8-1〉]

- 우리나라 환경 관리 및 정책의 평가와 관련한 방법론 연구는 미흡함
 - 〈표 8-4〉는 선진국의 환경 관리 및 정책의 단계적 발전과정을 보여주고 있음. 우리나라의 현재 수준을 비교적 객관적으로 판단하기 위해 노력하였으며, 이를 도표 속에 밑줄 친 굵은 글씨로 붉게 표시하였음
 - 단, 검토과정에서 우리나라의 일부 특정사업장에서 적용되고 있는 관리와 제도는 고려하지 않았음
- 전세계는 대기오염물질의 장거리운송과 국경을 초월하는 문제를 경험했으며, 국제협력과 관련하여 바람직한 해결책도 얻고 있음
 - 한 예로 미국, 캐나다, 멕시코의 해결방안을 제시함 NARSTO(North American Research Strategy for Tropospheric Ozone)는 북미대륙의 대기질관리 개선을 위한 정부/민간 연구협력체로, 1994년 창설되었음

〈표 8-4〉 선진국의 환경 관리 및 정책의 단계적 발전과정과 우리나라의 현재 수준

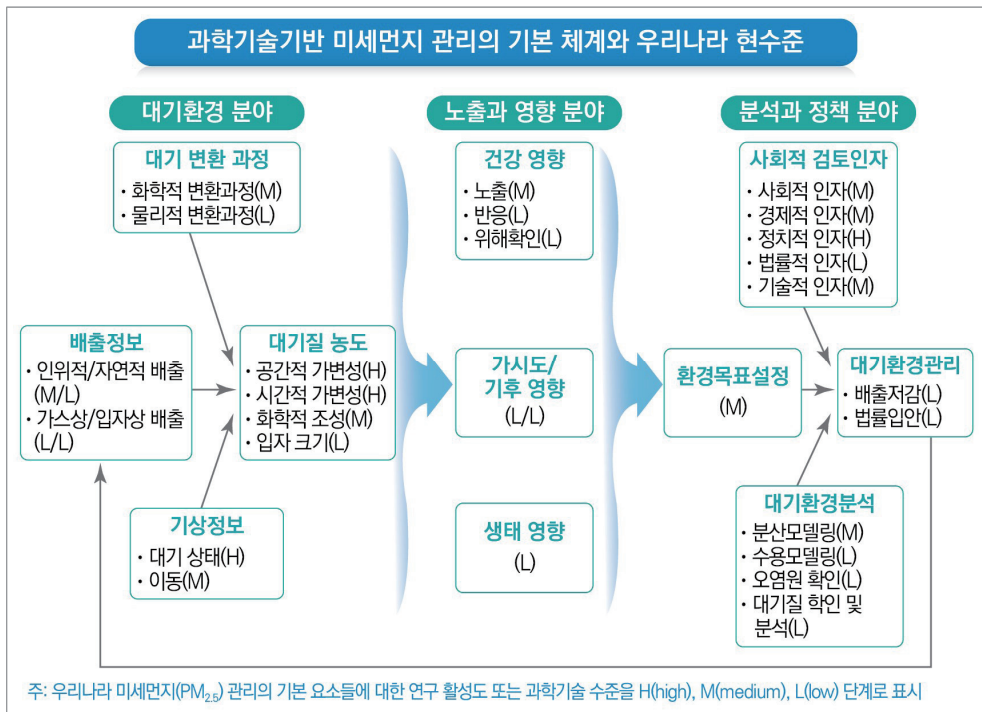
항 목		단계적 발전단계	
중 합 환 경 관 리	① 환경 패러다임의 발전과정 [(1),(2)]	경제발전우선	환경보전우선
	② 환경평가 프로토콜의 도입과정 [(3)]	환경성 환경성, 경제성, 사회적 (에너지 포함)	환경성, 경제성, 사회적 환경성, 경제성, 사회적, 위해성 (고용포함), 국제성
	③ 환경규제의 수입국가	일본 (1960-현재)	미국 (1990-현재)
	④ 환경문제의 해결방안	정치사회적 해결 (환경 이념, 철학, 패러다임의 부족)	환경권 보호에 관한 사회적 제논의 및 협의
	⑤ 환경예산의 배분 방법	지역별 매체별 항목별 편중	지역적 통합관리 + 국제 전략적 선택과 집중
	⑥ 환경규제의 변화	법률적 규제 (regulation)	통합관리를 통한 예산분산
	⑦ 환경규제 관리대상 변화 [(9)]	배출원 (사업장)	보조금제 (subsidy)
	⑧ 환경관리기술의 변화 단계	오염매체별 사후처리 관리	오염매체별 사전예방관리
	⑨ 환경처리기술의 발전 단계	처리기술	회피기술, 재생·복원기술
	⑩ 대기환경 이해자간 소통여부[(10),(11)]	불통	감시 및 평가기술
대 기 환 경 관 리	⑪ 과학기술기반 대기관리 여부 [(8)]	약 (기반, 기초, 원천 기술부재)	소통 (민·관·산)
	⑫ 대기환경기준 (AAQS)의 강도 [(4)]	약 [행정목표(goal) 수준·관리책임 없음]	강 (과학기술기반 대기환경연구, 노출·위해연구, 분석·정책연구 활성화)
	⑬ 대기오염원에 대한 주요 규제정책 변화 [(7),(8)]	인료규제	강 [기준 (standard) 수준: 국민의 건강과 복지 고려]
	⑭ 대기오염 규제지역 확대과정 [(6)]	지역별 세분화 (수도권, 특별대체지역)	점오염원 (사업장) 및 생활오염원 (반오염원) 규제
	⑮ 대기환경관리 주체 (공무원)의 전문성과 유연성 [(7)]	경직 (환경공무원의 전문성과 인력 부족)	대기오염 특성상 광역화
	⑯ 대형 대기업소에 대한 환경규제의 강도	약 (사업장의 옹통성, 능률성, 정치적 수용성 확보 단계)	유연 (환경공무원의 전문성과 인력 풍부)
	⑰ 대형 대기업소의 배출규제 [(5)]	농도규제	강 (사업장의 옹통성 제한, 사회적 수용성 확보, 허가/신고/영향/관리 보고서 제출, 정보공개, 벌칙금, 부과, 양벌제 도입, 환경투자 활성화 단계)
	⑱ 관리대상 대기오염물질의 항목 확대과정 [(5)]	환경기준물질	배출권 거래제
	⑲ 대기 입자상 물질 (분진)의 배출규제 [(5)]	매연	유해대기오염물질 (HAP)
			PM ₁₀ (수도권 대형업소 국한)
		TSP (현재 전국)	PM _{2.5}

※ 주: 우리나라 환경관리 및 규제의 현재 위치는 밑줄 친 붉은색으로 표시했으며(일부 항목은 2019년 현재 목표달성이 미진하기 때문에 일부 글자만을 표시, 선진국의 최종 목표항목은 파란색으로 표시하였음.)

※ 출처: 한국대기환경학회(2016)¹⁶⁾ 을 바탕으로 재구성

16) 한국대기환경학회(2016), 대기환경, Chapter 13: 대기오염의 규제, 정책 및 관리, 김동술

- 국제협력 공동연구의 대상은 오존과 분진이었는데, 2000년에 오존 평가서, 2004년 분진 평가서¹⁷⁾가 각각 발간되었음. 이 분진 평가서에는 추후 한국과 중국이 과학기술 협력과정에서 참고해야 할 방대한 내용을 담고 있는데, 그중 <그림 8-1>은 이들 국가가 설정한 과학기술기반 미세먼지 관리를 위한 기본체계도임. 우리나라 대기환경 과학기술 체계의 개선방안을 찾고자 이 체계도를 이용하였으며, 우리나라의 현재수준을 높음(H), 중간(M), 낮음(L)으로 구분하여 표시하였음
- 대기환경정책을 개발하고 시행하기 위해서는 환경과학기술이 기반이 되어 과학적 타당성과 방법론을 검토하여야 하며, 과학적 평가와 분석에 의거하여 실행 성공도를 평가하여야 함.
- <표 8-4>와 <그림 8-1>을 바탕으로, 우리나라의 미세먼지 관리 및 정책의 문제점을 각론별로 찾고 향후 개선방안을 발굴함



<그림 8-1> 과학기술기반 미세먼지 관리의 기본체계(NARSTO)와 우리나라의 현재 수준

17) NARSTO(2004). *Particulate Matter Science for Policy Makers: A NARSTO Assessment*, Edited by P. McMurry, M. Shepherd, and J. Vickery, Cambridge University Press, Cambridge, UK,

(2) 환경 패러다임 설정과 법령정비의 필요성 [〈표 8-4〉의 ①항]

- 우리나라는 「환경정책기본법」에서 환경법의 개념을 자연환경과 생활환경을 규율하고 있는 모든 법률이라고 광의적으로 해석하고 있음. 즉, 환경문제는 토지정책, 에너지정책, 산업정책 등과 연계된 총체적 환경의 보전 및 개선의 문제를 포함하여 환경법으로 해석하고 있음(환경부, 2012)
- 그럼에도 각종 환경관련법이 서로 환경친화적으로 연계되지 않고, 헌법에 보장된 국민의 환경권을 침해하는 각종 환경법들이 제정되어 시행되고 있음. 기본적인 이유는 각종 환경법 내에 환경 패러다임(paradigm)이 구체적으로 명시되지 않았기 때문임
- 우리나라는 1996년 녹색환경의 나라 건설을 위한 환경대통령 선언문을 발표한 바 있음. 선언문에는 환경에 대한 발상의 전환, 환경공동체 건설, 환경정책의 기본방향 등을 제시하면서 “환경에 대한 청사진이 없는 나라는 미래가 없는 나라이며, 희망이 없는 나라”라고 끝을 맺었음(환경부, 1996)
 - 또한, 환경부는 환경윤리에 관한 서울선언문(1997.6.4)을 환경백서 서두에 실고 있는데(환경부, 1997), 본 선언문의 실천강령에는 정부, 시민, 단체, 산업체, 학계 및 언론의 역할을 자세히 담고 있음. 반복되는 시행착오이지만 당시의 초심을 잊지 말고 국민의 환경권 보호를 위해 각자의 역할을 되돌아볼 필요가 있음
- 1992년 리우 유엔환경개발회의(UNCED)에서, 중진국 이하 수준의 국가에서는 균형적인 경제정책과 환경정책이 경제발전과 환경개선의 목표를 동시에 달성하는 지름길임을 확인하였음
 - 우리나라 환경청(현재 환경부)은 그 이전인 1984년 제5차 경제사회발전 5개년계획의 실천계획을 수정하여 기본방향을 경제발전과 환경보전의 조화에 두고 그동안 소홀히 하였던 환경보전에 역점을 두었음(환경청, 1984)

- 정부는 2006년 기존 오염물질 관리정책만으로는 건강과 지속성을 중시하는 국민의 새로운 삶의 양식에 대응하는데 한계가 있음을 인정하고, ‘국민건강 중심’으로 환경정책 패러다임을 바꾸고 2006년을 ‘환경보건 원년’으로 선언했음(환경부, 2006)
- 그럼에도 현시점에서도 여전히 환경·경제 조화주의는 커녕 경제성장 우선주의가 팽배하고 있음
 - 선진국의 경우 일찍이 조화주의와 결별하고, 환경보전 우선주의도 뛰어 넘어 이제는 건강우선주의로 패러다임을 변경하고 있음
 - 2019년 11월 경제 선진국 대열에 합류를 선언한 우리나라의 경우, 이제 건강 우선주의로 패러다임을 설정할 적정한 시점임
 - 미세먼지 문제의 해결도 저감 시간을 단축시키려면, 정부가 환경오염개선에 대한 확고한 의지를 가지고 선진국 수준의 환경과 건강위주의 패러다임을 조속히 선언하여야 함

(3) 환경평가 프로토콜의 선진화 [〈표 8-4〉의 ②항]

- 우리나라는 최근까지 오염물질을 배출하는 사업, 심지어는 공항, 터널, 케이블카 등 각종 사업의 인·허가를 신청할 때마다, 지역주민, 시민단체, 사업장, 행정기관 사이에 갈등이 심각함
 - 이는 그동안 환경에 대한 패러다임과 평가 프로토콜(protocol)이 부재한 가운데 각종 사업이 결정되고 시행되었기 때문임
 - 선진국의 경우, 모든 인·허가의 결정은 국가가 설정한 환경 패러다임과 평가 프로토콜을 기반으로, 지방정부가 각 프로토콜 항목의 가중치를 사회적 합의에 따라 융통성 있게 설정하여 합리적으로 운영하고 있음
 - 우리나라도 각종 인·허가 사업에 이러한 개념을 적극 적용한다면, 환경 개선은 물론 사회적 갈등 해소에도 크게 기여할 것임
- 대부분 선진국이 채택한 환경평가 프로토콜 항목은 환경성, 경제성(에너지 포함), 사회적(고용과 복지 포함), 국제성, 건강 및 위해성, 안전성 등임

- 중국의 경우, 2014년 4월 중국 역사상 가장 강력한 환경보호법을 제정하였으며, 2018년 3월에는 헌법 32조를 수정하여 5위1체 [물질문명(경제성), 정치문명(정치성), 사회문명(사회성), 정신문명(정신성), 생태문명(환경성)]가 조화롭게 발전할 수 있도록 환경법 체계를 변경한 바 있음(한승훈, 2019)
- 비록 환경 선진국의 프로토콜 설정과 다소 차이가 있으나, 헌법상에 환경 프로토콜을 설정하면서 강력한 환경 사업의 동력이 마련하였다고 판단됨

(4) 환경기준의 문제점과 개선방향 [표 8-4]의 ⑫항

- 우리나라 대기환경 기준치(criteria)를 국민의 건강·복지 보호를 목표로 한 진정한 의미의 기준치(standard)로 설정하기 위한 노력 강화 필요
 - 비록 환경기준은 지속해서 강화되고 있다고 하지만, 대기환경 개선의 실행도구라고 할 수 있는 배출허용기준 설정은 다소 허술하며, 중앙정부와 지자체가 환경기준을 달성하지 못한 경우에도 책임소재가 불명확함
 - 따라서 대기환경기준의 달성여부가 지자체에 대한 각종 환경평가지 반영되어야 하며, 미달성 지자체에 대해서는 지원 차별화와 인허가 권한 축소 등의 제재가 필요함

(5) 배출규제의 문제점과 개선방향 [표 8-4]의 ⑬~⑮항

- 선진국의 대기배출규제는 농도규제에서 총량규제로, 총량규제에서 배출량 거래제도로 신속히 변화하였음[표 8-4]의 ⑬항]
 - 현재 우리나라는 수도권 및 특별대책구역 등 극히 일부구역에서 NO_x와 SO_x에 대해 총량규제를 시행하고 있는데, 이 규제 자체도 농도규제를 일부 변형시킨 제도로서 지속적인 대기환경관리 개선 측면에서는 한계가 있음
 - 따라서 지속적인 오염물질의 배출저감과 기업의 신규 시장진입을 용이하게 하기 위해서는, 최근의 ‘온실가스 배출량 거래제도’처럼, 미세먼지에 대해서도 배출권 거래제도라는 경제적 유인책을 도입하여야 함

- 대기오염물질에 대한 배출권 거래제도를 대형 사업장에 도입하기 위해서는 면밀한 사전 준비와 연구가 필요한데, 특히 인적 및 물적 인프라 구축이 신속히 요구됨
- 2019년 11월 현재, 「대기환경보전법」상 대기오염물질은 대기 중에 존재하는 물질 중 가스·입자상물질 64종을 환경부령으로 정하고 있음[표 8-4]의 ⑱항
 - 이 중 일반 대기오염물질 24종과 저농도에서도 장기적인 섭취나 노출에 의하여 사람의 건강이나 동식물의 직·간접 위해를 끼칠 수 있어 대기 배출에 대한 엄격한 관리를 위해 특정대기유해물질(HAP: hazardous air pollutants) 35종으로 구분됨
 - 현재 사업장 배출시설에 적용되는 배출허용기준은 일반대기오염물질 11종, 특정대기유해물질 16종만이 설정되어 관리되고 있으며, 2019년 5월에 확정된 「대기환경보전법 시행규칙 개정안」에 따라 HAP 8종 기준이 신설되어 2020년 1월 1일부터 적용될 예정임
 - 배출규제 오염물질의 종수 확대와 동시에, 이에 상응하는 배출자료(emission inventory)의 신속한 구축이 필요함
 - 선진국의 대기오염물질은 모든 오염물질을 포함시키고 있으며, HAP의 경우 미국은 187종, 일본은 234종을 설정하고 있음
- 분진의 물리적 크기분포는 화학적 위해 못지않게 중요하며, 방지장치를 설계할 때도 분진크기에 입각한 처리효율이 성능평가의 핵심이 됨[표 8-4]의 ⑲항
 - 이러한 이유로 우리나라도 1995년 이후 미세먼지(PM₁₀)와 총먼지(TSP)에 대한 대기환경기준을 동시에 시행하다가, 2001년 이후부터는 TSP 항목을 삭제하고 PM₁₀ 항목만 규제하고 있으며, 2015년 1월부터 미세먼지(PM_{2.5}) 항목도 신설하였음
 - 환경규제와 배출규제는 국가 경제력에 맞게 시의적절하게 설정되어야 하는데, 우리나라 배출규제는 1983년 이후 현재까지 36년간 PM₁₀과 PM_{2.5}가 아닌 TSP만을 규제하고 있음(현재 수도권에서는 「수도권특별법」에 의거하여 1~3종 배출업소에 한해 PM₁₀으로 규제하고 있음)

- 따라서 우리나라의 배출규제는 강화되는 환경기준과 보조를 맞추어, 전체 대형 배출업소에 대하여 TSP가 아니라 당장 PM₁₀으로, 그리고 가까운 장래에 PM_{2.5}로 규제하여야 함
- 2015년부터 환경관리방식에 커다란 변화를 가져올 수 있는 「환경오염시설 통합관리에 관한 법률(이하 통합환경관리법)」이 시행되고 있음
 - 우리나라의 경제력과 국제적 위상에 맞는 규제제도로서, 현재 대형사업장(1~2종)을 대상으로 최적가용기법(BAT: best available technique)을 기반으로 각종 환경오염매체를 통합적으로 관리하는 체계임
 - 한편, 역시 2015년에 시행 중인 「수도권특별법 2차기본계획」에서는 미세먼지(PM₁₀) 관리대상 업종을 3종까지 확대하고 있으므로, 「통합환경관리법」에서의 대상업종을 3종을 포함하여, 1~3종으로 확대하여 전국적으로 시행할 필요가 있음
- [배출업소 분류와 배출량 산정] 현재 대기배출 업소는 규모에 따라 1~5종으로 분류하고 있는데, 단지 총먼지(TSP)와 2가지 가스상물질(NO_x, SO_x)의 잠재 배출량에 입각하여 분류하고 있음
 - 예를 들어, 위 3가지 오염물질의 연간 배출량의 합이 80톤 이상이면 1종 업소로 분류하고 있으며, 2톤 미만이면 5종 업소로 분류하고 있음
 - 배출업소의 규모에 따라 적용되는 규제, 면제조항, 배출부과금도 커다란 차이가 있으므로 현행 3가지 오염물질의 배출량 규모에 따른 사업장 관리는 매우 중요한 규제 항목임
 - 하지만 이러한 업종 분류방법으로 인해 야기되는 부작용이 매우 큰데 이에 대한 문제점과 개선 방안은 아래와 같음
- ① 현 업종 분류법 때문에 대기오염물질 배출량 산정시 제외되는 물질들(CO, PM₁₀과 PM_{2.5}, 휘발성 유기화합물(VOC), 다환방향족 탄화수소(PAH), 특정 대기유해물질(HAP), 악취, 온실가스 등)의 배출관리가 사실상 비합리적으로 시행되고 있음
- ② 단지 3가지 오염물질 [TSP, NO_x, SO_x] 만이 배출량 산정시 고려되므로, 특히 인간, 동식물, 생태계에 심각하게 영향을 주는 HAP, 생활상 커다란

불편을 초래하는 악취물질, 지구기후변화 온실가스들이 누락되어 있는 바, 이들 대기오염물질은 업종 분류시 기준항목에 포함되어야 함

- 현재 일부 산단과 공단에 속한 사업장들은 HAP과 악취물질을 대량으로 배출하고 있지만, 단지 3가지 오염물질(먼지, SO_x, NO_x)을 적게 배출한다는 이유로 3~5종 업소, 즉 중소기업 또는 영세업종으로 분류되고 있어 규제 사각 지역이 존재함

③ 우리나라의 경우, 단일 HAP를 10톤(여기서, 1 tonne = 1,000 kg; metric ton) 이상 배출하는 사업장에 대해서는 별도의 배출기준을 설정하여 관리하고 있음. 미국은 단일 HAP 10톤(여기서, 1 ton = 2,000 lb; short ton), 또는 187종 HAP를 합산하여 25톤일 경우, 대형 업종으로 분류하여 MACT (maximum achievable control technology; 최대성취가능방지 기술)을 적용하여 엄격하게 관리하고 있음. 즉 우리나라의 경우, 선진국과 비교하여 HAP의 종수도 적지만 복합 HAP를 배출하는 사업장에 대해서는 면죄부를 주고 있음

④ 최근 국내 대형사업장에서 대기배출 측정대행업소의 부적절한 행위로 배출관리의 부실문제가 사회적으로 대두되면서 그 심각성이 노출되고 있음. 이를 개선하기 위해서는 배출관리의 정도보증과 정도관리(QA/QC)를 재점검하여야 함. 또한 현행 배출량 산정법도 대기환경 과학기술에 입각하여 선진국 수준으로 수정되고 보완되어야 함

⑤ 종합하여, 합리적 배출량 산정법에 입각하여 일반 대기오염물질, 악취물질, HAP, 온실가스를 구분하여 배출량을 산출한 이후, 각 배출량을 환경과 건강에 미치는 영향도를 감안하는 업종 분류방법론을 개발하여야 함

- 일반 대기오염 물질의 경우, 현행과 「통합환경관리법」의 제도를 보완하고, HAP의 경우 미국의 MACT 제도를 준용하여 개선할 것을 제안함. 또한 현행 「수도권 특별법 기본계획」, 「통합환경관리법」, 「HAP 비산배출저감(대기환경보전법 제13조2)」, 「악취관리법」 시행규칙과 연계시킨다면 이행속도와 개선 효과가 빠를 것으로 판단함

(6) 대기관리권역의 광역화 [〈표 8-4〉의 ⑭항]

- 우리나라는 현재 대기규제지역을 「대기보전특별대책지역」, 「대기환경규제지역」 및 「수도권대기관리권역」으로 나누고, 가스상 및 입자상 오염물질과 악취 물질을 규제하는 「배출허용기준」과 특별대책지역 내 기존 배출시설에 적용하는 「엄격한 배출허용기준」, 그리고 특별대책지역 내 신규 배출시설에 적용하는 「특별배출허용기준」이 있음
- 수도권 중 일부지역에 대해서는 강화된 배출허용기준이 설정되어 있으며, 「통합환경관리법」이 시행되면서 더욱 강화된 기준이 도입되고 있음
- 한편, 우리나라는 2008년 9월 「수도권특별법」에 의거하여 수도권 관리권역을 대기환경기준의 80%를 초과하는 지역으로 규정하고 설정했는데, 비록 수도권에 국한한 특별법이었지만 당시에 우리나라 전역이 대기관리권역에 포함되어야 한다는 의견이 많았음
- 대기오염물질의 특성상 오염물질의 이동거리 및 영향반경이 넓기 때문에 좁은 국토 내 더 협소하게 분리하여 관리권역을 설정하는 것은 지역 형평성 차원에서도 합리적 규제라고 할 수 없으므로 「수도권특별법」을 증장기적으로 전국으로 확대 적용하고 관리권역도 전국으로 확대하여야 함

(7) 대기환경개선에 배치되는 환경관련법령과 제도 [〈표 8-4〉의 ⑬, ⑮항]

- 1990년 제정된 「대기환경보전법」 제40조는 사업장의 배출 시설과 방지시설의 정상적인 운영·관리를 위하여 환경기술인을 임명하도록 규정하고 있고, 시행규칙 제54조에는 환경기술인의 의무고용제를 규정하고 있음[〈표 8-4〉의 ⑮항]
 - 하지만 1994년 6월 「기업활동 규제완화에 관한 특별조치법」(이하 「기업규제 완화특별법」)이 제정되면서 각종 환경법상 인력수급관련 법규는 25년간 사실상 유명무실하게 되었음
 - 이 특별조치법의 악영향으로, 국내 대학의 상당수 환경관련 학과들이 폐쇄되었으며, 고급 환경전문 인력의 교육과 양성에 걸림돌이 되었고, 환경기술인을 더 이상 채용하지 않은 기업체들은 당장의 경제적 혜택을 얻었지만, 각종 환경·안전사고를 겪는 부메랑이 되었음

- 이 특별법은 시행 당시 긴박한 경제위기를 탈출하기 위해 도입된 비록 상위법이지만 임시법적 성격을 가지고 있었음
 - 이제 당시의 목적을 충분히 실현하였고 악영향이 파악된 만큼, 이러한 전근대적 특별법은 조속히 개정되어야 함. 특히 동 특별법 제 29조 (안전관리자의 겸직허용 조항) 및 제37조 (대기환경기술인 공동채용 조항)는 즉시 폐기되어야 함
 - 현재 미세먼지 오염원 관리 중 사각지대의 하나는 면오염원임. 면오염원 중 가장 우려되는 곳은 첨단방지설비 없이 고체 및 고형연료와 같은 저급연료를 사용하는 모든 중소 및 영세 업소들이며, 더불어 이들 저급연료를 난방 및 취사 목적으로 사용하는 주거지들임[<표 8-4>의 ⑬항]
 - 그동안 우리나라 대기질 개선에 도움을 준 3대 연료정책은 「항합유기준제도」, 「고체연료 사용금지제도」, 「청정연료사용 의무화 제도」인데, 「폐기물관리법」 및 「재활용촉진법」에서는 신재생에너지의 보급확대 정책의 일환으로 고형연료의 사용을 장려하고 있음
 - 법률상 고체연료와 고형연료는 매우 큰 차이가 있음. 고형연료란 생활폐기물, 폐합성 수지 및 섬유, 폐고무, 폐타이어 등 가연성 고형폐기물을 사용하여 제조한 연료를 말하는데, 목재 펠릿도 바이오 고형연료에 속함
 - 이러한 고형연료를 연소시키면, PM_{2.5}를 비롯한 각종 특정대기유해물질(HAP)이 다량 배출된다는 사실은 잘 알려져 있음
 - 첨단방지설비를 설치한 대형사업장에서는 영향이 작으나, 중소형 사업장과 각종 면오염원의 배출관리가 허술할 때 당장 대기질 악화로 나타나며, 최근 이러한 이유로 전국에서 고형연료 사용 신규사업장 인·허가와 관련하여 사회적 논란이 계속되고 있음
 - 경제성을 내세워 고형연료의 사용을 장려한다고는 하지만, 건강비용을 감안하면 그 경제성도 의문시 됨. 이와 같이 환경정책에 대한 부처간 이견은 기본적으로 환경에 대한 패러다임 설정이 부재하기 때문임. 현재 우리나라 소각분야는 「대기환경보전법」영역이 아니며, 「폐기물관리법」영역임
- ※ 「미세먼지 저감과 관리를 위한 특별법(이하 미세먼지특별법)」과 「대기관리권역의 대기환경개선에 관한 특별법(이하 권역별 특별법)」과의 정합성 검토

- ① 「미세먼지특별법」에 의한 ‘종합대책’은 농도개선 목표를 법에서 정하도록 규정하고 있고 「권역별특별법」에 의한 ‘권역별 기본계획’은 지역총량을 정하도록 하고 있어 두 대책간의 정합성이 유지되어야 함
 - ② ‘종합대책’의 경우 지역별 목표농도를 설정하도록 하고 있으며, ‘권역별 기본계획’ 역시 목표농도 설정과 개선목표를 제시하도록 하고 있어 두 계획의 목표농도 설정과 평가 방법 등에 대한 검토가 필요함
 - ③ 법률에서 정한 계획수립 방법론을 구체화하여 계획 간의 정합성을 유지하도록 미래배출량 전망 등 지침서와 같은 구체적인 방법론을 통일하여 제시하는 것이 중요함
 - ④ 5년 주기 ‘특별대책’의 경우, 부분별 이행대안이 기존 ‘대기환경관리 기본계획’, ‘온실가스감축로드맵’, ‘에너지기본계획’ 등에서 다루고 있는 내용이므로 중복성 검토가 필요함<표 8-5>
- 특히 수송 부문의 경우, 거의 모든 대책에서 친환경차 보급과 배출허용기준을 중복적으로 포함하고 있으며, 단지 발표시기에 따라 세부목표 및 지원 규모만이 다를 뿐임. 발전부문의 세부대책들도 대부분 중복되어 있음

<표 8-5> 대기, 기후변화, 에너지 관련 각종 계획 및 대책의 중복성 검토(수송, 전환)

계획 및 대책	부 문	주요 대책
대기환경개선 종합계획	수송	<ul style="list-style-type: none"> ○ 친환경차 보급 확대(고효율 저탄소차 보급 확대) ○ 교통수요 관리 강화 ○ 제작차 배출가스 관리 강화, 운행차 질소산화물 관리체계 구축 등
	전환(발전)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 배출권거래제 선진화, 사업장 배출관리(농도, 총량)의 선진화
미세먼지관리 종합대책	수송	<ul style="list-style-type: none"> ○ 노후 경유차의 점진적 퇴출 추진(조기폐차 물량 확대, 운행제한 확대 등) ○ LPG차, 전기차 등 친환경차 보급 확대 ○ 선박(연료 황 함량기준 강화 등) 및 건설기계(3만 1,000대 저공해화 등) 관리 강화
	전환(발전)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 석탄화력 비중 축소(공정률 낮은 석탄발전 원점 재검토, 노후 석탄발전소 가동 중단 및 조기폐지 등) ○ 재생에너지 확대(‘30년 20%) ○ 발전용 에너지(유연탄, LNG 등) 세율체계 조정 검토
수도권 대기환경관리 기본계획	수송	<ul style="list-style-type: none"> ○ 친환경차 보급 확대(전기차 등 차종 다양화) ○ 제작차 배출허용기준 및 사후관리 강화, 운행차 배출가스 관리 강화 ○ 비도로 이동오염원 관리 강화, 교통수요 관리 강화
	전환(발전)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 대기오염물질 배출총량제 강화 ○ 수도권 외 석탄발전소 관리강화(노후 석탄화력 폐지, 성능 개선, 건설 제한 등)

계획 및 대책	부 문	주요 대책
기후변화대응 기본계획	수송	<ul style="list-style-type: none"> ○ 친환경차 보급 확대(전기차 확대 보급, 평균 연비 기준강화) ○ 비도로 이동오염원 효율 개선, 철도 확대
	전환(발전)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 발전인프라 개선(노후 석탄화력 폐지, 성능 개선, 건설 제한 등) ○ 발전환경 발전 믹스 강화(재생에너지 발전량 비중 제고, 석탄화력 불철 섀다운제, 환경급전 등)
에너지 기본계획	수송	<ul style="list-style-type: none"> ○ 친환경차 보급기반 확충(전기차, 수소차, 클린디젤 등) ○ 평균연비 목표기준 마련
	전환(발전)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 발전인프라 개선(노후 석탄화력 폐지, 성능개선, 건설 제한 등) ○ 친환경 발전믹스 강화(재생에너지 발전량 비중 제고, 석탄화력 불철 섀다운제, 환경급전 등)
에너지이용 합리화계획	수송	<ul style="list-style-type: none"> ○ 연비 개선(선진국 수준 평균연비 향상) 및 대중교통 활성화 ○ 전기차 보급 확산
	전환(발전)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 전환손실 감축(석탄화력 효율 향상, 발전소 운배수열 활용 등) ○ 에너지 가격 및 시장제도 개선(환경비용 개선, 전기요금제도 개선 등)
전력수급 기본계획	전환(발전)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 석탄발전량 감축(환경비용 반영, 세제 조정, 석탄발전의 물리적 제약 등) ○ 친환경·분산형 전원 확대(재생에너지 확대, 용량요금 차등 확대 등)

※ 자료: 체어라, 전호철(2018)

(8) 배출계수와 배출량 산정의 문제점과 개선 [〈그림 8-1〉과 〈표 8-4〉의 ⑪, ⑬항]

- 우리나라는 1990년대부터 매년 연료사용에 입각하여 대기오염물질에 대한 배출량을 산정하고 정책자료로 활용하고 있음[〈그림 8-1〉과 〈표 8-4〉의 ⑪항]
 - 당시 연료의 종류별 사용량을 지역별로 파악할 수 있었기 때문에, 이 자료에 입각하여 대기환경 규제오염물질에 대한 배출량을 쉽게 산정할 수 있었음
 - 즉, 특정 연료를 연소했을 때 특정 오염물질이 특정 양만큼 배출된다고 추정하는 수치를 ‘배출계수(emission factor)’라고 하는데, 단순히 연료 사용량에 배출계수를 곱하여 배출량을 추정하였음
 - 배출계수는 1998년 이전에는 미국 EPA의 계수를 사용하였지만, 1999년 이후에는 국내외 배출계수를 병행 사용하여 산정방식을 개선하였고, 생산공정, 에너지공급, 유기용제 사용 등 일부 비연소 부문까지 확대 적용하였음(환경부; 2005, 2007)

- 배출계수는 대기환경학에서 매우 중요시 되고 있는 연구분야로, 선진국의 경우 장기간 많은 실험을 통해 방대한 배출계수를 개발해 왔으며, 국가마다 다양한 고유의 배출원이 존재하므로 막대한 시간과 연구비가 소요되나, 우리나라의 경우 국내 실험연구는 물론 외국의 자료를 활용하는 연구도 미진했음
- 대기오염물질은 수많은 인위적 배출원 이외에도, 토양, 해염 등과 같은 자연적 배출원에서 방출됨[〈그림 8-1〉과 〈표 8-4〉의 ①항]
 - 최근 우리나라는 미세먼지 관리를 위해 각종 기본계획과 더불어, 2016년 특별대책, 2017년 종합대책, 2018년 강화대책을 수립한 바 있음
 - 모든 대책은 신뢰성 있는 배출계수에 입각하여 점·선·면 배출원 각각에서의 배출량을 산정한 이후 삭감량을 결정하여 수립하여야 하지만, 우리나라는 기초연구 부진으로 상당수의 배출원(면오염원, 2차분진오염원, 불법연소, 자연적 오염원, 비산먼지, 기타 미인지 배출원 등)이 배출총량 추정과정에서 사실상 누락되어 있음
 - 정부가 각종 대책에서 발표하는 배출원 자료는 미완성인 부분이 많으며, 누락된 배출자료가 배출 총량에 합산될 때마다 기여백분율이 크게 변동됨
 - 〈표 8-6〉은 미완성 배출량을 기반으로 추정한 대표적인 자동차 기여도 오류를 보여주고 있음. 이 기여도 추정은 2006년 당시 국내 수용모델 과학자들에게 비판을 받았는데, 그 이후 2007년부터 기여도는 빠른 속도로 감소함

〈표 8-6〉 과거 우리나라 전역과 서울시에서 추정된 이동오염원에 대한 규제오염물질과 PM₁₀의 기여도(%)로서 배출량에 입각하여 추정한 대표적 기여도 오류

(단위: %)

연도	모든 규제대기오염물질			PM ₁₀		
	전지역	서울	수도권	전지역	서울	수도권
2001	39.4	62.0		31.0	67.7	
2002	40.1	66.7		43.4	73.8	
2003	39.5	66.9		43.3	73.3	
2004	36.4	67.9		46.2	79.3	
2005	35.2	63.2		37.6	69.8	
2006	32.7	68.0		36.9	78.3	
2007	31.4	49.1		23.5	48.8	
2008	29.7	-		16.2		
2009	30.8	-	46.8	8.9		33.1

※자료: 환경부 환경백서(환경부, 2004~2012)

- 우리나라 정부는 미세먼지 관리대책 [특별대책(2016.6.3) 및 종합대책(2017.9.26)]을 발표하면서, PM_{2.5} 발생량을 수도권에서는 경유차 29%, 건설기계 22%, 냉난방 12%, 발전소 11%로 추정하였고, 전국적으로는 사업장 41%, 건설기계 17%, 발전소 14%, 경유차 11%로 추정하였음. 이를 근거로 막대한 예산이 이들 배출원 관리를 위해 집행되고 있음[〈표 8-4〉의 ⑬항]
 - 대기환경 기초연구가 활발한 유럽 28개국에서 2016년도에 PM_{2.5}의 평균 발생량을 발표하였는데, 상업활동 및 가정 등 생활주변의 면오염원 56%, 경유차를 포함한 모든 차량 13%, 사업장 10%, 발전소 5%로 추정(EEA, 2016) 하였으며, 우리나라 발표내용과 큰 차이를 보였음
 - 배출량 산정에서 비롯된 기여도 추정에서 오류가 발생한다면, 일부 배출원은 과대평가되어 비합리적으로 제재를 받으며, 일부 배출원은 과소평가되어 규제대상에서도 누락됨
 - 이동오염원과 발전소 등의 배출원만이 부각되다 보니, 정부예산도 선택과 집중 정책으로 편중되고 있으며, 이러한 예산의 편중은 미세먼지 이외의 다른 대기환경분야, 실내공기, 수질 및 토양, 생태 등 주요 환경 매체에 대한 관리 소홀로 이어짐

- 우리나라 국민의 환경에 대한 의식수준과 경제적 수준에 상응하는 환경기초 연구 투자는 조화롭게 집행되어야 하며, 배출계수 개발과 배출량 추정과 같은 환경·과학적 기초·기반·원천 연구지원은 미국의 「1955년 대기오염 방지법」에서와 같이 연구비 투자항목을 의무화하여 법제화하여야 함

(9) 미세먼지 배출원의 기여도 추정 방법론의 개선 [그림 8-1]과 <표 8-4>의 ⑦항

- 대기환경 규제정책을 개발하고 시행하기 위해서는 환경기준 및 배출기준 설정과 함께 오염원(source)에 대한 합리적 관리와 평가가 중요하며, 무엇보다 오염원인을 정확히 파악하여야 함[그림 8-1]
 - 즉, 오염물질의 장기간 집중적인 모니터링, 오염물질의 물리화학적 정밀분석, 목표 오염물질에 대한 시·공간적 거동 파악, 변환과정, 생성과 소멸, 배출원과 수용체와의 관계 파악 등을 연구하여야 하며, 이를 통해 인간의 건강과 복지 등 수용체에 미치는 영향 등을 연구해야 함
- 환경과학적으로 미세먼지의 오염원인을 정량적으로 결정하는 방법론은 크게 두 가지가 있음. 미세먼지 발생원에 대한 배출자료와 기상자료를 이용하여 수학적 모뎀링하는 방법과 미세먼지를 물리화학적으로 정밀하게 분석한 후 이 자료를 통계적으로 모뎀링하는 방법이며, 전자의 기법을 ‘분산모뎀(‘확산모뎀’ 혹은 ‘대기질모뎀’로 부름), 후자를 ‘수용모뎀’ 이라고 함[그림 8-1]과 <표 8-4>의 ⑦항]
 - 선진국의 경우, 전·후자 방법을 이용한 추정 결과가 거의 같기 때문에 신뢰도가 높지만, 우리나라는 전적으로 배출량 기반 분산모뎀 방법론에만 의존하고 있기에 신뢰도가 감소함
 - 또한 미세먼지 배출원 중 경유차, 건설기계, 발전소 등 일부 배출자료에 대해서는 확보하고 있으나, 누락 배출원이 존재함에 따라 이를 입력자료로 사용하는 분산모뎀링 추정치는 오차가 있으며, 배출원 관리가 일부 특정 배출원에 집중될 수밖에 없고, 각종 미세먼지 저감대책의 성과가 감소함
 - 전 세계 선진국들이 환경정책 및 규제를 수용체 위주로 전환하고 있는 현시점에서, 빅데이터를 활용하는 수용모뎀링 연구는 최단 시간에 오염원인을 정량적으로 파악할 수 있는 유일하고 확실한 방법론임

- 또한, 현재 전국 7개 대기환경연구소에서 측정되는 미세먼지(PM_{2.5})의 시간별 화학성분자료와 기상자료는 국민이 궁금해 하는 제반 PM_{2.5}의 거동을 설명해 줄 수 있는 고급자료임
- 가까운 장래 정량적 오염원인을 준실시간으로 밝힐 수도 있고, 분산모델과의 상이한 결과를 검증할 때 활용할 수도 있으며, 또한 국제협력 공동연구에 활용될 수 있는 중요한 자료임
- 이들 대기환경연구소 자료를 국내 대기환경학자들과 공유한다면 미세먼지의 짧은 시간에 원인분석이 가능하며, 수용모델링은 미세먼지에 대한 2차오염원, 미확인 오염원, 불법배출 오염원, 불법연소 오염원, 장거리 이동오염원, 비산먼지 오염원 등의 기여도를 정량적으로 밝힐 수 있는 효율적 방법론임

(10) 이해당사자 의견 수렴 방향 [〈표 8-4〉의 ⑩항]

- 대기환경정책을 개발하고 실행하는 과정에서 이해당사자 간의 의견을 수렴하는 과정은 매우 중요하며, 환경과학기술은 정책에 영향을 받는 시민과 사업장에 정보를 제공하고 소통하게 하는 가교 역할을 해야 함
- 〈표 8-7〉에는 민·관 이해당사자간에서 도출된 문제점, 현황 및 개선방향을 제시하였음

(11) 기타 미세먼지 저감을 위한 중단기 정책 제안

- 미세먼지 저감을 포함한 대기환경개선을 위한 핵심정책은 ‘연료 정책’, ‘에너지 정책’, ‘쓰레기 정책’임. 정부의 1981년 저황유 공급제도, 1985년 고체연료 사용규제, 1988년 LNG 사용의무화 제도, 1993년 유연휘발유의 공급을 전면 중단 정책 등은 우리나라 대기질 개선에 크게 기여한 대표적 정책들임
- 비록 화석연료 에너지 분야는 대기오염 역사에서 악연으로 관계를 맺고 있지만, 환경개선과 경제발전 사이에서 긴밀한 공생관계를 유지해야 하며, 최근 진행되는 ‘탈핵정책’ 및 ‘석탄발전소 폐쇄정책’은 대기환경에 막대한 영향을 주기 때문에, 환경성, 경제성, 사회성, 국제성, 위해성 등 환경 프로토콜을 신중히 검토하여 수정되어야 함

- 쓰레기 연소와 소각에 의한 미세먼지(PM_{2.5}) 기여율과 관련하여 최근 수용 모델에 기반한 연구에 의하면¹⁸⁾, 서울시에서 PM_{2.5} 오염이 극심했던 2년간 (2013~2014년) 평균 기여율은 쓰레기 소각(8.0%), 생체량 불법연소(5.3%), 폐플라스틱 불법연소(1.0%)를 차지하여 폐기물관련 연소 기여율 이동오염원 다음으로 큰 배출원이었음
 - 현재 생활상 면오염원 관리 중 난제가 폐기물 불법연소행위인데, 1995년1월 시행된 「쓰레기종량제도」와 2013년 7월 시행된 「음식물쓰레기 종량제도」가 원인제공을 하였음
- 최근 폐기물 소각기술은 놀라울 정도로 발전하여 완벽한 대기오염물질 처리와 고효율 에너지 회수가 가능하므로 대형 최첨단 쓰레기소각장을 전국에 거점별로 신설한다면(10년간 약 2~3조 원의 비용이 예상), 최근 미세먼지와 HAP의 저감을 물론, 폐비닐과 폐플라스틱 문제로 인한 경제활동 위축, 미세 플라스틱 오염으로 인한 해양오염 문제 등을 비롯하여, 각종 환경매체의 개선에도 크게 기여할 것으로 판단함
- 정부가 환경과 건강위주의 패러다임을 선언하고 이를 실천에 옮기기 위해서는 무엇보다 초·중등학교에서 환경교육을 강화하여야 하며 모든 국민이 함께 참여할 수 있도록 시민단체에 의한 환경홍보 활동도 강화하여야 함
 - 야외에서의 불꽃놀이, 쥐불놀이, 바비큐 구이가 생활에 활력과 즐거움을 주겠지만 미세먼지 오염을 크게 악화시키므로 이러한 생활상 즐거움도 온 국민이 조금씩 나누고 줄인다면 미세먼지 개선에 커다란 도움이 됨
 - 무엇보다 대기질 개선이 각종 저감계획과 대책에 의거하여 시행되는 동안에도 노약자 및 민감/취약계층의 건강보호에는 선제적이고 지속적인 노력이 수반되어야 함

18) Min-Bin Park, Tae-Jung Lee, Eun-Sun Lee, Dong-Sool Kim(2019), Enhancing source identification of hourly data in Seoul based on a dataset segmentation scheme by positive matrix factorization(PMF), Atmos. Poll. Res., 10, 1042-1059.

〈표 8-7〉 미세먼지에 대한 이해당사자간(민·관) 도출된 문제점, 현황 및 개선방안

구분	항 목	구체적 문제점, 현황, 개선방안
문제점 (시민들의 불신)	미세먼지 발생원에 대한 불신	○ 미세먼지 발생원 원인규명과 저감정책의 경우, 특성상 과학기술 의존도가 높으나 반영도는 낮음
		○ 일부 전문가들이 제시한 30~50% 국외 발생원 기여도에 대해 국민이 신뢰하지 못하며, 가짜 정보와 뉴스가 인터넷상에서 확산되고 있음
		○ 과학적 정보에 기반한 미세먼지의 정확한 발생원인에 대한 정보가 부족한 실정
	저감 정책에 대한 불신	○ 환경·시민단체들의 미세먼지관련 정책위원회, 연대기구 등이 정책개발 및 투입과정에 참여(2002년 이래 35개 시민사회단체들은 경유차 공대위 결성했음)했으나 과학기술 정책의 경우, 전문성 부재로 시민참여의 창구가 존재하지 않음
		○ 2018년 환경부 미세먼지에 대한 인식조사 조사 결과, 91%가 미세먼지 오염도가 심각하다고 느끼며 78.7% 건강위험이 된다고 답변함, 정부의 미세먼지 대책에 대해서는 57.5%가 알고 있으나, 정책만족도는 44.6%가 불만 표시
		○ 2019년 2월, 고농도 장시간 미세먼지 발생으로 시민들의 정책 만족도가 낮고 불안감이 고조되면서 시민 스스로 자구책 찾기에 나서는 상황 발생
과학기반 정책에 대한 불신	○ 인공강우, 대형 공기청정기 등 정부가 제안한 대기환경 과학정책에 대해 시민만족도 낮음	
	○ 검증되지 않은 과학정책의 남발은 국민불신 가중의 원인으로 작용	
현황	시민참여 현황	○ 2019년 미세먼지 특별대책위원회 출범과 함께, 시민공론장 최초신설, 상설위원회 전문가 및 500여명의 시민참여단 구성 및 운영
		○ 온라인 참여의 경우, 미세먼지 정보 사이트의 산재로 단일방향 정책소통 필요
		○ 서울시의 경우, 2017년 5월 대규모 미세먼지 시민토론회 이후 타운홀 미팅, 해커톤, 시민캠페인 등 민관협치로 정책개발 및 실천과제 수행
		○ 경기도 평택, 광명, 고양, 성남시 등 미세먼지 정책토론을 위한 시민참여창구 개설
		○ 춘천시, 세종시 등 미세먼지 모니터링을 통해 시민참여 유도
개선방향	정보접근권 강화	○ 미세먼지 정책에 대한 정보접근의 기회 확대
		○ 정부대책에 대한 민·관 소통을 위해, 현재 부처별로 산재하는 온라인 정보제공 단일화 창구 신설
		○ 창구 신설로 부정확한 미세먼지 정보에 대한 시민의 항변창구, 정부의 답변창구로서 민·관 소통 강화
		○ 온라인 개설시 시민들의 정책 제안 및 정책에 대한 공론조사가 가능한 창구개설
		○ 전문용어로 표기된 과학기술 정책 언어를 시민친화적인 언어로 개발하고 해설
	공공 참여기회 확대	○ 미세먼지 정책에 대한 시민참여 공론조사 실시
		○ 정책결정 과정에서 분기별 시민합의체 신설 및 운영
		○ 시민 제안사항에 대한 반영여부 피드백 공람
		○ 지자체 별로 시민동참을 위한 공론장, 교육, 모니터링 활동 등에 대한 행정적·재정적 지원정책 마련

● ● 참고문헌

1. 학교보건법 시행령, 국가법령정보센터
2. 도시 및 주거환경정비법, 국가법령정보센터
3. 환경분야 시험·검사 등에 관한 법률 시행규칙, 국가법령정보센터
4. 대기환경보전법·환경정책기본법, 법령집, 2019
5. 대기환경연보(2018), 국립환경과학원, 2019
6. 수도권 대기환경 개선에 관한 특별법, 국가법령정보센터
7. 김동술, 대기환경, 한국대기환경학회, 2016
8. 환경백서, 환경부, 1996
9. 환경백서, 환경부, 1997
10. 환경백서, 환경부, 2012
11. 1984 환경보전, 환경청, 1984
12. 한승훈, 중국의 대기오염개선 관련 법제도(정책) 현안과 협력방안, 기후변화협회 세미나, 2019
13. 환경백서, 환경부, 2005
14. 환경백서, 환경부, 2007
15. P. McMurry, M. Shepherd, and J. Vickery, *Particulate Matter Science for Policy Makers: A NARSTO Assessment*, 2004
16. European Environment Agency(EEA), *Air Quality in Europe-2016 Report*, 2016
17. Min-Bin Park, Tae-Jung Lee, Eun-Sun Lee, Dong-Sool Kim, Enhancing source identification of hourly data in Seoul based on a dataset segmentation scheme by positive matrix factorization (PMF), 2019



미세먼지



현황 분석 및



개선 보고서

대기관리 정책 평가 체계

요약 | 183

제1장 현황 분석 | 185

제2장 문제점 및 개선방향 | 190

대표 집필자

동종인 서울시립대 환경공학부 교수

공동 집필자

채여라 한국환경정책평가연구원
선임연구위원

김동술 경희대 환경학과 교수

양오봉 전북대 화학공학부 교수

이오이 환경정의 사무처장

SESSION

09

대기관리 정책 평가 체계

대표 집필자

동종인 서울시립대 환경공학부 교수

공동 집필자

채여라 한국환경정책평가연구원
선임연구위원

김동술 경희대 환경학과 교수

양오봉 전북대 화학공학부 교수

이오이 환경정의 사무처장

● 요약

- 국내 적용되는 대기질을 본격적으로 관리하고 배출원 대책을 강구하기 위한 본격적 제도는 1990년 대기환경보전법이 제정, 시행되고부터임
 - 당시 전통적으로 문제시되어 왔던 1차 대기오염물질이었던 아황산가스, 일산화탄소, 총먼지의 대기오염도를 저감하기 위하여 연료대책, 난방방식 개선, 일부 집진시설 설치 등의 대책들이 적용되었음
 - 에너지사용량과 산업생산이 팽창하고 자동차 등록대수가 증가되면서 대기오염 물질 배출량은 급격히 증가하게 되었음
 - 대기오염 양상도 일부 1차 대기오염물질의 오염도의 감소에도 불구하고 광역적인 오염형태를 나타내는 2차 대기오염물질 (오존 등 대기중 생성되는 오염물질)의 오염도는 증가하게 되었고 이와 더불어 각종 화학물질 대기 배출량이 증가하면서 대기중 유해성 대기오염물질 오염도가 증가하면서 국민 위해성 측면의 대기오염 관리 필요성이 증대하게 되었음
- 이에 대응하기 위해 대기환경기준을 수차례 개정한 바 있고 배출원 관리를 위해 주기적으로(1990, 2003, 2010, 2015, 2020년) 대기오염물질 배출허용기준을 강화한 바 있음
 - 그러나 미세먼지 등의 대기환경기준의 설정은 인체 위해성에 기반을 두고 작성된 것이 아니라 일정 기간내에 달성할 수 있는 목표로서 완화된 기준으로 설정 되었으며 설정 시기도 앞선 국가나 국제기구보다 매우 뒤처지게 되었음

- 대기오염이 심각해진 수도권을 중심으로 특별대책을 세우고 수도권 특별법(2003.12)에 기초한 대형 배출원을 대상으로 배출농도 중심의 규제에서 총배출량규제로 적용하였으나 현재 문제가 되는 미세먼지 등의 대기오염도는 만족할 만한 수준을 달성하지 못하고 있음
- 현재까지 수립·이행 중인 대책 및 계획은 대책별 효과 및 편익에 대한 분석이 체계적으로 이루어지지 않고 있다고 할 수 있음
 - 대책 수립 단계에서 일관된 체계적 방법론을 적용한 대책의 비용·효과 분석 및 이에 근거한 대책 선정 및 우선순위 평가와 예산 배정이 필요함
 - 대책 선정의 기준이 명확하지 않아 저감 대책과 배출 기여도 사이의 우선순위가 불일치한 측면이 있음. 수도권 대기질 개선 특별 대책의 경우 중소 규모 산업시설, 생활계 및 상업시설 등 다양한 배출원의 오염배출량이 대부분을 차지하나 정부 및 지자체 예산의 약 70%는 신규 자동차 구입 보조나 매연여과장치 부착 지원 관리에 집중되어 있음
 - 대기관리 정책의 평가는 주로 이행 기관의 이행 평가로 이루어지고 있으나 이행 기관의 자체 평가방식의 집행 물량 및 예산 집행도 위주의 평가로 이루어진 이행 평가는 대기질 개선이라는 목표 달성도를 평가하기에는 많은 한계가 있음
- 최근 수년동안 문제시되는 미세먼지 대응을 위하여 2016, 2017년에 특별대책을 발표하고 시행하고 있지만 과거 대응책의 연장선상에서 이루어지고 실제 미세먼지 대기오염도는 잘 개선되지 못하고 있음
 - 향후 미세먼지 특별법, 통합환경관리법, 대기관리권역 확대 특별법 등에 의해 미세먼지의 직접적, 간접적 저감 노력을 하고 있지만 미세먼지 형성의 주요한 요인, 관련된 국내의 다양한 발생원 분석, 외부적 요인에 대한 다원적 분석에 근거한 핵심적이고 효과적인 저감대책이 수립되어야 할 것임. 또한, 대책의 당위성(비용 효율성, 취약계층 보호, 체감도, 위해성 저감) 등 과학적 경제적 근거 제시가 미흡해 국민과 이해당사자의 수용성이 낮은 상황임. 이해당사자 및 국민의 대책 수용성을 높이고 효율적 대책 수립을 위해서는 대책 선정 기준, 평가 방법론 등에 대한 국가 차원의 일관성 있는 체계 및 방법론의 개발·적용이 필요함

제1장 현황 분석

(1) 대기질 관리 개요

- 국내 대기질 관리는 1980년 환경청이 설치되고 주로 연료정책에 의존하였음
 - 과거 연탄을 주 난방연료로 사용하면서 발생하는 아황산가스, 일산화탄소, 먼지 등을 관리대상으로 하였음
 - 주요 연료가 고체연료에서 석유 위주의 액체연료로 전환되고 에너지 사용량이 증가하면서 대기질은 악화하였고 대기환경보전법 (1990년) 제정을 기회로 배출원 관리(1999년까지 주로 아황산가스, 먼지 위주의 3단계 배출허용기준 강화), 자동차 배출가스 관리가 시작되었음
- 2000년에 접어들면서 지속적 에너지 사용량 증가와 자동차의 급증으로 수도권 등 심각한 대기오염 현상(미세먼지, 오존, 유해대기오염물질)이 관찰되고 수도권 대기환경개선 특별법이 제정되고 과거 각 배출원의 배출농도 기반 배출원 관리와 함께 수도권 허용총량에 기초하여 할당된 각 주요 배출시설의 허용 배출량(아황산가스, 질소산화물)에 기반한 총량규제를 실시하게 되었음
- 따라서, (초)미세먼지의 대기오염도가 어느 정도 개선 경향을 나타내다가 2013년 이후 더 이상 개선되지 못하고 일정 시기 고농도 오염사례가 빈번하게 나타나게 되었음
- 평균적인 (초)미세먼지의 대기오염도가 개선되지 않는 점과 일시적인 고농도 오염현상에 대한 분석과 이와 관련된 효과적인 배출원 대책이 요청되고 있음. 연대별 대기관리 대책을 요약하면 다음과 같음

연대별 대기관리 대책

- 1980년대: 연료 규제 및 난방방식 변경
 - 연료용 유류 황함유량 기준 강화(서울, 1981)
 - 대형 보일러 LNG 연료 사용(서울, 1988)
 - 지역난방 확대(1985년부터)

- 1990년대: 대기관리 법적 체계 구축 및 자동차공해 대책 강구
 - 대기환경보전법 제정(1990), 배출허용기준 예고제 실시(~1999)
 - LPG 차량 도입(1990)
 - 도시지역 등 고체연료 사용 금지(1999)
 - CNG 버스 도입(1999)
- 2000년대: 수도권 대기질 대책 및 종합계획 수립
 - 수도권 대기질개선 특별대책(2002): 서울·인천·경기도 일부 지역 대상, 당진·태안·보령 지역 화력발전소를 검토하였으나 미포함, 미세먼지(PM₁₀, 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)와 이산화질소(22 ppb) 오염도 개선을 목표
 - 수도권 대기환경개선에 관한 특별법 시행(2005): 수도권 대형 사업장(1~3종 업체) 총배출량(SO₂, NO_x, PM) 규제, 노후 경유차 조기폐차·LPG엔진 개조, 매연저감장치(DPF) 부착 사업 시행
 - 특정대기유해물질 관리 기본계획(2004~2013) 및 유해대기물질 관리 기본계획(2014~2023): 물질 지정, 모니터링 확대, 인벤토리 구축 등
 - 대기환경 종합계획(2006, 제1차 10년 계획)
- 2010년대: 미세먼지 대책수립
 - 대기환경 종합계획(2016, 제2차 10년 계획)
 - 미세먼지관리 특별대책(2016.6)
 - 초미세먼지 서울 기준 2021년 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2026년 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 달성 목표
 - 노후 경유차 조기폐차('05 이전 차량 2019년까지 폐차 완료)
 - 에너지 상대가격 조정방안 검토
 - 신차의 30% 친환경차 보급(2020), 주유소의 25%(3,100기) 충전소 구축
 - 노후 석탄발전소(10기) 친환경적 처리(폐지, 연료전환 등)
 - 도로 먼지청소차(476대, 2020까지) 보급
 - 미세먼지관리 종합대책(2017.9)
 - 미세먼지 나쁨 초과일수 감소(목표: '16년 258일 → '22년 78일)
 - 국내배출량 30% 감소(석탄발전소 4기 LNG화, 5기 최고수준배출기준)
 - 노후 경유차 조기폐차 및 저공해화('05 이전 차량 286만대의 77% 대상, 2022년까지)
 - 미세먼지의 저감 및 관리에 관한 특별법(2019.2)

- 미세먼지 고농도 발생 계절(12~3월)에 배출시설 추가 감축대책 적용
- 미세먼지관리 종합대책 수립(매 5년마다)
- 대기관리권역의 대기환경개선에 관한 특별법(2020.4 시행)
 - 수도권 외 동남권(부산·울산·대구·경남북 일부 지역), 남부권(여수·광양·광주·전남 일부 지역), 중부권(대전, 세종, 충남북 및 전북 일부 지역) 등 3개 지역을 추가로 1~3종 대형배출시설 총량규제 적용

(2) 대기환경기준 및 대기질 변화

- 국내 대기오염물질 중 초기 오염도가 높았던 아황산가스, 일산화탄소, 먼지 저감에 주력하였고 대기환경기준도 이들 물질에 대하여 높았던 기준이 대기질 개선 정도에 따라 점차 강화된 기준을 적용하게 되었음
- 미세먼지에 대해서는 외국의 기준 변경에 따라 국내에서도 PM₁₀ 기준을 1993년에 도입하였고 PM_{2.5} 기준을 2015년에 도입하게 되었음. 요약하면 다음과 같음

대기환경기준 및 대기질 변화

■ 대기환경기준의 변천

- 아황산가스(1978), 일산화탄소, 이산화질소, 오존, 먼지(총먼지), 탄화수소(1983), 납(1991), 벤젠(2010) 기준
- 미세먼지(PM₁₀) 기준(1993) (80(년), 150(일)μg/m³)
- 미세먼지(PM₁₀) 기준 강화(2007) (50(년), 100(일)μg/m³)
- 초미세먼지(PM_{2.5}) 기준(2015) (25(년), 50(일)μg/m³)
- 초미세먼지(PM_{2.5}) 기준 강화(2018) (15(년), 35(일)μg/m³)

■ 대기오염도의 변화

- 아황산가스, 일산화탄소, 먼지(총먼지) 등 배출원에서 직접 배출되는 1차 대기오염물질은 1990년대 이후 연료대책, 배출원 대책에 의해 지속해서 감소되어 왔고 대부분 대기환경 기준을 만족함
- 탄화수소 항목은 삭제되었고, 납, 벤젠 항목은 기준을 훨씬 하회함
- 질소산화물(NO₂로서)의 장기 대기환경기준은 만족하지 못하는 수준이고 초미세먼지의 중요한 형성 요인으로서 대기 중 오염도 개선이 시급히 필요한 대기오염물질임. 대기중 광화학반응 생성물의 지표물질인 오존(O₃)은 1990년대 이후 평균오염도 및 단기기준 초과회수가 지속적으로 증가하여 하절기 주요 관리대상 오염물질이 되고 있음

- 미세먼지(PM₁₀) 기준은 완화된 기준 그대로 있으며 초미세먼지 위주로 정책을 운영하여야 할 경우 향후 삭제를 고려하여야 할 것임
- 초미세먼지(PM_{2.5}) 기준은 다른 국가들보다 매우 늦게 설정되었으며(2015) 그나마 기준치가 매우 완화된 수준에서 설정됨(25(년), 50(일)μg/m³). 이후 2018.3월 기준이 강화되었으나(15(년), 35(일)μg/m³) 국제기구인 WHO의 10(년)μg/m³, 미국의 12(년) μg/m³에 비해서 완화된 수준임
- 현재 국내 주요 지역의 연평균 오염도는 23~25μg/m³으로 효과적인 개선대책이 요구됨
- 대기중 발암성 물질 등 유해성 대기오염물질 오염도도 상당 수준 높은 것으로 평가되고 있으나 국내 지정 대기오염물질의 수가 64종으로 앞선 국가들의 150~220종 보다 매우 적은 수의 물질만 대상으로 하고 있어 지정 대기오염물질의 수를 국제적 수준으로 시급히 늘릴 필요가 있음

(3) 대기관리 종합대책

- 국내 대기관리 대책의 수립은 대기환경보전법, 수도권 대기환경개선에 관한 특별법에 의한 수도권 대기환경관리 기본계획과 대기환경 10년 종합계획으로 진행되다가 최근 미세먼지의 저감 및 관리에 관한 특별법이 신설되었고 수도권 특별법의 확대적용으로 만들어진 대기관리권역의 대기환경개선에 관한 특별법에 의한 법정계획이 새롭게 만들어지고 있음
- 법정계획 외에 미세먼지 관리대책으로 6.3특별대책(2016)이 수립되어 추진되다 9.26종합대책(2017)으로 통합되었으며 최근 미세먼지 특별법의 신설로 미세먼지 관리 종합대책으로 통합되어 관리될 예정임

(4) 수도권 대책 이행평가 현황

- 10년 단위 기본계획 수립결과를 토대로 서울, 인천, 경기 3개 시도에서 시행계획을 수립하고 세부 대책을 시행함
- 수도권대기환경청은 매년 지방정부로부터 대책시행 결과를 보고받고 이를 취합하여 대기관리 대책의 성과를 평가함
- 대책은 정량대책 50여개, 정성대책 50여개로 구성되며 정량대책은 온실가스 배출 전망치(BAU)대비 삭감량을 산정하도록 하고 있음

(5) 미세먼지 특별대책 이행 점검

- 「미세먼지 관리 종합대책(’17.9.26)」의 목표 달성 및 성과 극대화를 위해 이행상황에 대한 철저하고 지속적인 점검·관리 필요
- 관계부처 합동 TF를 통해 주기적으로 이행실적을 점검·평가하고, 그 결과를 반영하여 종합대책 수정·보완

관계부처 합동 TF

- 구성 : 국무조정실 사회조정실장(팀장), 12개 관계부처 국장급(간사: 환경부)
- 운영 : 종합대책 이행완료(’22)까지 매분기 세부이행상황 점검·평가
- 점검대상 : 기재·산업·국토·과기정통·외교·해수·환경·교육·농림·복지부 및 산림청
(부처 자체 점검 → 점검결과 평가 → 이행계획 수정·보완)

제2장 문제점 및 개선방향

■ 현재 연구 결과가 국민에게 현안에 대한 답을 할 수 있는 수준은?

매우 미흡	약간 미흡	어느 정도	약간 만족	충분하게	완벽하게
	○				

- 현재 정책의 평가나 우선순위 결정 방법론에 대한 체계적 연구가 부족해 국가 차원의 대책 평가 기준 등에 대한 근거를 마련할 필요가 있음

■ 현재 연구 결과가 국민에게 잘 전달되고 있는가?

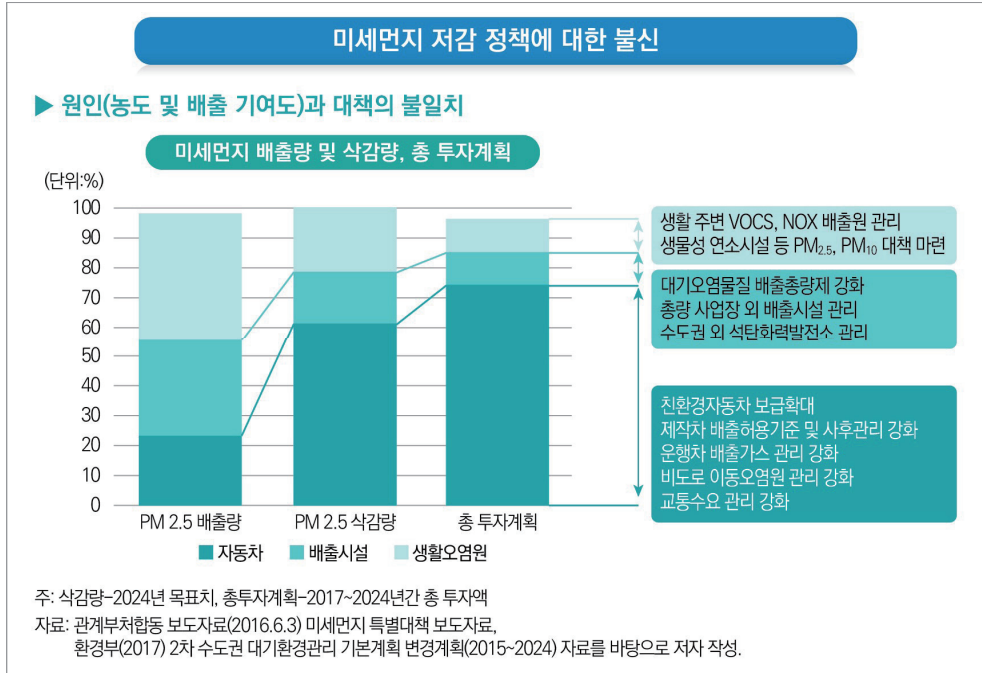
매우 미흡	약간 미흡	어느 정도	약간 만족	충분하게	완벽하게
	○				

- 현재 미세먼지 관련 많은 대책이 수립 이행중이나 대책이 선정된 이유나 근거에 대해 국민에 대한 소통은 미흡한 상태임

(1) 정책 선정의 근거 제시 및 평가 체계 구축

- 현재까지 수립된 대기질 관리 대책 및 미세먼지 특별 대책은 다양한 부문의 대책이 포함되어 있으나 각 대책에 대한 효과 및 비용에 대한 분석 및 대책 선정의 근거 제시가 미흡함
- 저감 대책과 배출 기여도 사이의 불일치에 대한 과학적 근거 및 비용 효율성, 비용 효과에 대한 경제성 평가 등 근거 제시가 미흡해 국민과 이해당사자의 수용성이 낮음
 - 수도권 대기질 개선 특별대책에서 서울시의 경우 중소기업 배출시설, 생활계·상업계 오염원이 배출원의 약70%를 차지하고 있으나 정부 예산의 70%는 이동오염원 관리(전기차 신차 구입 보조금, 운행경유차 폐차, 매연저감장치(DPF) 설치 등)에 집중됨
 - 이해당사자 및 국민의 대책 수용성을 높이고 효율적 대책 수립을 위해서는 대책 선정 기준, 평가 방법론 등에 대한 객관적 체계를 구축할 필요가 있음

- 미세먼지 정책 목표 달성을 위한 최적 정책조합 발굴 시스템 구축이 필요하며, 미세먼지 정책·기술의 모니터링 및 평가 방법론 개발이 필요함
- ※ 배출량, 건강영향, 사회 경제적 영향 분석, 정책/기술별 비용편익 분석 기술 개발
- ※ 정책 기술별 성과평가 지표개발 및 모니터링 시스템 마련



〈그림 9-1〉 수도권 대기질 개선 특별대책 배출원별 배출량 및 투자 계획

〈표 9-1〉 미세먼지 특별대책 연차별 투자 계획(서울시)

(단위: 백만원)

	투 자 계 획					
	계	2018	2019	2020	2021	2022
계	2,039,645	203,953	416,386	562,555	500,196	356,555
서울형 자동차 친환경등급제 도입	830	100	130	200	200	200
운행경유차 저공해 사업	537,491	97,813	119,062	119,949	118,353	82,314
운행경유차 배출가스 저감	524,720	96,554	116,024	117,041	115,445	79,656
보증기간 경과장치성능유지 관리	11,416	784	2,658	2,658	2,658	2,658
어린이 통학차량의LPG차 전환지원	1,355	475	380	250	250	-
전기차 보급 및 충전인프라 확충	1,194,027	95,808	250,100	364,600	314,800	168,719
수소차 보급 및 충전인프라 확충	109,985	1,890	8,250	19,345	17,500	63,000

	투 자 계 획						
	계	2018	2019	2020	2021	2022	
실내공기질관리강화로 시민건강권 보호	196,452	8,212	38,714	58,261	49,143	42,122	
아동복지시설 공기청정기 설치 지원	28,066	5,886	5,545	5,545	5,545	5,545	
아동복지시설 공기청정기 지원 확대	413	82	82	83	83	83	
지하철 공기질 강화를 위한 대폭적인 시설개선	지하철	164,932	1,680	32,500	52,023	42,885	35,844
	지하상가	3,041	564	587	610	630	650
동북아 대도시 협력	860	130	130	200	200	200	

※자료: 동종인, 서울시 미세먼지 정책 및 예산구조 분석, 2019.7

(2) 대기환경기준 설정 및 대기질 달성 목표

○ 대기환경기준의 설정

- 대기환경기준은 환경정책기본법에 의해 설정되거나 개정되고 있으며 현재의 대기질, 저감정책에 의한 달성가능성 등을 고려한 정책적 목표로 설정되고 있음
- 대기환경기준은 대기관리 정책의 기본이 되는 것으로 국민의 환경질에 의한 영향을 종합적으로 검토하되 발암성·독성 위해성, 배출원 분포, 대기오염도 등을 감안하여 신중하게 작성되어야 함
- 대기환경기준을 개정하는 기준도 적합하게 설정되어야 함. 주기적(예, 매3~5년 주기)이며 전반적으로 인체 위해성, 배출원·대기오염도의 변화 등을 감안하여 분석되어야 함

○ 미세먼지 종합대책 등의 대기질 목표

- 그동안 각종 저감대책의 미세먼지 포함 대기질 개선목표는 대기환경기준과는 크게 관계없이 단기 및 장기 목표를 설정하는 경향이 있음
- 대기관리권역 및 광역자치단체의 대기질 달성 여부 판단 시 대기환경기준을 중심으로 달성지역, 미달성지역으로 판단되어야 할 것임
- 향후 미세먼지 저감대책의 달성 대기질 목표를 가능한 한 대기환경기준을 가이드라인으로 설정되어야 할 것임

(3) 대기관리 주요 정책 및 개선점

- 대기환경개선 종합계획(2006년부터 매 10년)
 - 장기적 대기질 개선을 위한 종합대책으로 설정되었으나 악화하는 대기오염 상황에 대하여 적극적으로 대응할 수 있는 종합적 대응책이나 대기질 개선을 위한 에너지, 산업, 교통, 세제 등의 분야에서 정책 조화를 이루기 어려운 점이 있음
- 장거리이동대기오염물질피해방지 종합대책(2012) 및 국제협력(2013)
 - 원론적 차원의 대책 방향과 정책내용을 제시하고 있으나 실천적 내용을 담는 데에는 한계가 있음
- 대기오염배출시설 배출허용기준
 - 전국적으로 적용되는 주요 오염물질(약 26개 물질)의 주요 배출시설에 대한 배출 허용농도 위주의 기준을 제시함
 - 에너지 사용량의 증가, 유해화학물질 사용량·배출량의 증가에 능동적으로 대응하기 어려운 구조임
 - 대기관리권역(대기질 개선이 필요한 인구 50만 이상의 도시)의 시도는 조례에 의해 별도의 배출허용기준을 적용할 수 있으나 실질적으로 지자체별 문제시 되는 오염물질에 대한 별도의 배출허용기준은 과거 질소산화물 등 일부 있었으나 최근에는 그 사례를 찾기 어려움
- 대기오염물질 배출원 및 배출량 조사
 - 주요 대기오염 배출시설에 대한 배출원 데이터베이스(Source Inventory)를 일반 대기오염물질(아황산가스, 질소산화물, 먼지)을 대상으로 운영하고 있고 매년 업데이트 하고 있음. 주로 대형 배출시설(1~3종 시설), 자동차 등 선·면 오염원을 대상시설로 하고 있음
 - 인체 위해성을 감안한 유해대기오염물질에 대한 배출원 데이터베이스, (초)미세먼지 원인물질에 대한 종합적 배출원 데이터베이스가 구축되어 있지 않음

- 대기오염 배출시설의 설치허가·신고 및 가동개시
 - 지역의 신규 대기오염 배출시설의 설치허가·신고 시 검토기간의 한정으로 인해 지역에 대한 충분한 영향 검토, 기술적 검토 등이 어려운 실정임
 - 신규 시설의 가동개시 후 성능에 대한 충분한 점검이 이루어지기 어려운 측면이 있음
 - 계속 운영 시 일정한 기간 후 시설의 정상운영에 대한 점검, 기술개발에 의한 최신 최적방지기술의 적용 등이 어려우므로 일정 주기의 재인가 제도 등의 검토가 필요함
- 대기오염 특별대책지역
 - 대기오염 특별대책지역(울산·온산산단, 여천산단)에는 엄격한 배출허용기준, 특별배출허용기준이 적용되고 있음
 - 대기관리권역 확대 적용, 통합환경관리 등이 새로이 시행되므로 특별대책 지역의 적용에 대해 재검토가 필요함
- 대기환경규제지역
 - 대기환경기준을 초과하였거나 초과할 우려가 있는 지역(서울, 부산, 인천 등 대도시, 광양 등)에 대해 지정하고 시도지사 또는 대도시 시장은 실천계획을 수립하여야 함
 - 실천계획을 시행하고 사업시행 후 평가결과를 반영하여야 함
 - 수도권 특별대책, 미세먼지 특별대책 등과 제도의 중복이 있을 수 있음
- 수도권 대기환경개선에 관한 특별법
 - 수도권 대형 사업장(1~3종 업체) 총배출량(SO₂, NO_x, 먼지) 규제, 노후 경유차 조기폐차·LPG엔진 개조, 매연저감장치(DPF) 부착 등 실시
 - 수도권에 대한 수도권대기환경청의 종합적 대기질 평가, 원인 분석, 개선대책 기획·수립, 정책평가 및 환류, 예산의 수립 및 집행 등의 분야에서 미흡함

- 총량 규제
 - 기존 총량규제를 적용하던 수도권에서 대기관리권역 전국 확대에 따른 권역별 총배출량 설정 및 업종별 관리기준, 지역간 배출권거래 등에 있어 효과적인 방법 모색이 필요함
 - 자동차 등 이동오염원에서 배출되는 대기오염물질 배출량에 대한 총량관리 (특히 질소산화물, 미세먼지 등) 필요성이 있음
- 자동차 대기오염 관리
 - 국내에서는 현재 지역의 대기오염도와는 상관없이 신규자동차의 등록이 자유롭게 이루어지고 있어 자동차공해에 의한 대기오염 관리가 어려움
 - 각 지역별로 미세먼지 오염도 달성을 위한 자동차 대기오염물질 총배출량 관리를 위해서는 자동차 운행의 일정 부분 제한하는 자동차 통행량 총수요 관리가 적극적으로 고려되어야 함
 - 현재 서울시는 녹색교통진흥지역 제도를 도입하여 도성내 5등급 경유차량 통행을 제한하는 제한적 교통수요관리를 시행하고 있음
 - 이를 시행하기 위해서는 미세먼지의 원인이 되는 질소산화물, 휘발성유기화합물, 미세입자물질 제어를 위하여 화석연료를 사용하는 휘발유, 경유 자동차를 포함하는 교통수요관리가 이루어져야 할 것임
- 지역 대기관리 행정체계의 미흡 및 개선
 - 기존 지역 대기질 관리는 주요 강 유역 위주로 편재되어 있음(한강유역환경청 등)
 - 대기질 영향권 분석에 따른 지역 대기관리 행정체계를 갖출 필요가 있음
 - 광역 자치단체를 대상으로 미세먼지관리 행정단위를 구축하고 미세먼지 관련 자문 및 배출시설 관리·개선을 위한 전문위원회 설치가 필요함
 - 기초 자치단체를 대상으로 미세먼지 담당자를 배치하고 미세먼지 발생원 및 불법 배출을 감시하는 감시원 제도 도입이 필요함

- 위해성 기반 대기오염 관리
 - 대기오염물질(64종) 지정 관리의 한계: 대기 중 존재하는 수많은 오염물질의 합리적 관리를 위해서는 관리 대상 대기오염물질을 150~200종 정도로 확대하여야 함. 또한, 대기환경보전법에 의한 대기오염물질(64종) 외에 악취방지법에 의한 지정 악취물질(22종), 다중이용시설 등의 실내공기질에 의한 실내공간오염물질(10종), 저탄소녹색성장기본법에 의한 온실가스물질(6종), 수도권법에 의한 우선관리 유해대기물질(48종) 등 서로 다른 기준에 의한 관리기준을 적용함으로써 혼돈을 초래할 수 있으므로 통합적인 관리를 고려해야 함
 - 특정대기유해물질(35종)의 한계: 특별히 위해성이 있다고 인정하여 시설 입지선정이나 시설관리가 엄격한 특정대기유해물질이 35종으로 한정되어 한계가 있고 기존 특정대기유해물질에 대해서도 배출원 파악이 미진하고 배출허용기준이 설정되어 있지 않거나 엄격히 관리되고 있지 않아 개선의 여지가 있다고 보여짐
 - 휘발성유기화합물(37종) 지정 관리의 한계: 기존 수많은 대기중 휘발성유기화합물에서 특별대책지역 관리를 위해 배출량이 많고 광화학 반응성 있다고 판단되는 물질에 한하여 지정 관리해 오고 있지만 재평가를 통해서 인체위해성이 있다고 인정되는 물질들에 대해 추가 지정이 필요하고 특히 응축성 미세먼지 같은 기전에 의하여 초미세먼지 형성에 기여하는 물질에 대해서는 추가 지정, 관리가 필요함

(4) 대책 이행 성과 평가

- 자체 평가 기반으로 진행되어 구체적 실적 제시가 어려움
 - 90% 이상의 과제가 정상 추진되고 있다고 평가되나 실질적 대기 개선으로 이어지지 않고 있음
- 대기질 개선 목표 달성을 위한 단계적 성과 점검 및 대책 평가 부재
 - 각 대기질 개선대책들의 설정목표의 적정성이나 달성 성과에 대한 단계적이고 체계적인 점검이 이루어지지 못하고 있음

- 수립·시행되는 대책의 성과에 대한 평가 및 환류 체계가 미흡함
- 대책의 성과평가는 BAU대비 삭감량을 토대로 평가를 진행하여 불확도가 높고, 외부 기여도를 고려하여도 대기질 개선 정도와 부합하지 않을 수 있음
 - 정책의 성과평가를 대기환경기준, 대기오염도기반으로 전환하는 것을 고려할 필요가 있음
 - 농도개선 효과는 증장거리 영향이 높은 계절과 그렇지 않은 계절을 분리하여 정책의 실효성을 평가하고 그 결과를 반영하여야 할 것임
 - 정성적 대책의 경우 증장기적으로 정량화 전환 계획 수립이 필요함

(5) 지역 대기질 개선대책

- 지역별 대기오염 개선대책 수립 시 대기오염 미달성지역, 달성지역으로 구분하여 접근할 필요가 있음
- 대기질 상태가 청정한 지역에 대해서는 대기질 오염예방 정책이 미진하므로 청정 대기질을 유지할 수 있는 대책이 필요함

(6) 지자체의 역할 및 책임

- 1991년 이래 지방으로 이양이 결정된 총 556개 환경사무 가운데 379개 사무의 이양이 완료되었으며 이 중 대기분야 사무는 51개 사무가 국가에서 지방으로 이양이 완료되었음
 - 미세먼지의 최다 배출원(38%)인 사업장의 경우도 규제의 주요 권한(대기오염 배출시설의 허가, 개선명령, 조업정지 등)이 지방으로 이양된 바 있음
- 중소사업장의 대기관리 사무에 대한 지방이양이 이루어졌지만 막상 지자체는 실질적으로 대기 관리를 할 수 있는 부서도 인력도 없는 경우가 많아 측정대행업체와 배출사업장에 대한 관리 업무가 지방자치단체로 이양된 뒤 불법행위가 늘고 있다는 지적이 있음
 - 지방자치단체의 배출시설 관리 기능을 강화하기 위하여 전문직 확보, 능력배양, 배출원 감시 기능 강화 등의 조치가 필요함

〈표 9-2〉 미세먼지 관련 지방 분권

기능명	단위사무	근거법령	완료	이양방향
생활환경상의 대기 오염물질 배출 규제	비산먼지 발생사업의 신고 수리	대기환경보전법	1997.8	국가→시도
	비산먼지 발생사업자에 대한 조치명령	대기환경보전법	1997.8	국가→시도
자동차 운행의 규제	운행차의 개선명령	대기환경보전법	2002	시도→시군구
	운행차의 수시점검	대기환경보전법	2002	시도→시군구
비산먼지 발생사업장관리	비산먼지 발생사업(변경) 신고 수리	대기환경보전법	2005	국가→시도
	비산먼지 발생 사업자에 대한 사업의 중지, 사용제한	대기환경보전법	2005	국가→시도
	비산먼지 발생 사업장에 대한 조치명령 또는 개선명령	대기환경보전법	2005	국가→시도
운행차 검사대행자 관련사무	개선결과보고	대기환경보전법	2005	시도→시군구
	검사대행자의 등록	대기환경보전법	2005	시도→시군구
	검사대행자의 등록취소 및 영업정지	대기환경보전법	2005	시도→시군구

(7) 미세먼지 저감 지역간 책임·협력 및 국제 협력

- 미세먼지 등 대기오염물질은 행정구역을 벗어나 이웃 지역에 영향을 주고 받으므로 이를 개선하기 위한 제도적, 실천적 방안이 요구됨
 - 미세먼지 원인물질들의 광역자치단체 또는 대기관리권역의 경계를 넘어 영향을 줄 경우 이의 개선을 요구하는 제도적 근거가 필요함
 - 이를 위하여 객관적 영향 평가, 기술적 저감방안 평가, 시설의 설치 지원·예산의 지원 등에 관한 규정이 필요함
 - 광역적 대기오염 형태를 개선하기 위한 협의체 구성이 필요함
- 미세먼지 등 월경성 오염물질 저감을 위한 국제협력·국제연구 지원
 - 미세먼지 등 월경성 오염물질 저감 국제협력을 위하여 국제기구, 지자체, 공공기관, 학술단체, 언론 및 민간단체 활동을 지원하는 제도 구축
 - 미세먼지 등 월경성 오염물질 저감을 위한 국제연구를 진흥하는 연구기금 조성 및 학술 교류협력 프로그램 확충 및 적극적 지원

- 동북아 미세먼지에 대한 정부·지자체·전문가·민간단체 등을 망라한 컨벤션 (학술 세미나, 기술교류·전시, 정책교류, 협력방안 협의, 국제 공조활동 등) 개최 및 전문단체·학술단체 등 지원

(8) 시민 참여 및 NGO의 역할

- 미세먼지 발생원이 시민들 자신인 경우 자발적 참여에 의해서 오염물질 배출을 최소화하는 정책 강구가 요청됨
 - 자동차, 음식점 등 시민들의 일상생활에 의한 미세먼지 기여율이 높으나 여론조사 결과, 시민들이 “자신은 미세먼지에 의해 심각한 피해를 당하고 있으나 자신이 오염물질 배출에 기여하고 있다”는 인식이 매우 낮은 것으로 알 수 있음
 - 자동차의 운행, 자동차의 구매 등에 있어서 자율적인 시민운동(예, 시민참여형 Blue Sky운동)이 지역적으로 일어날 수 있도록 행정 및 예산지원이 필요함
 - 대규모 유통업체, 대기업 관련 자동차 통행을 줄이고 친환경 교통을 도모할 수 있도록 제도화하고 지원체계를 갖추
 - 이를 효과적으로 달성하기 위하여 기존 시민단체나 새로운 NGO기구 또는 언론단체들과 협력할 필요가 있음

(9) 미세먼지 관리를 위한 통합적 접근

- 미세먼지 저감을 위해 각종 제도의 통합적 융합이 필요함
 - 미세먼지 저감과 관련한 대책들이 과거부터 수많이 강구되어 왔고 현재에도 환경관련 제도, 각 부처별 대책, 지자체별 대책 등이 수립되고 있음 (<표 9-3>과 같은 미세먼지 관련 대기 개선대책들이 시행되어 왔음)
 - 한시적인 특별법 성격의 대책들을 지양하고 대기환경보전법이나 좀더 통합적인 법·제도 체계를 갖추어 이를 중심으로 시행되어야 할 것임
- 미세먼지 관련 환경·에너지·과학기술 등 행정체계 재정립이 필요함
 - 미세먼지 등 심각한 사회적 문제를 해결하기 위해서 이를 통합적으로 관리할 수 있는 관련 행정체계의 재정이 필요한 것으로 판단됨

〈표 9-3〉 대기관리 대책 및 계획 비교

	수도권 대기환경관리 기본계획	대기환경 10개년 종합계획	미세먼지 관리 특별대책 (‘16.6.3)	미세먼지 관리 종합대책 (‘17.9.26)	권역별 기본계획 (‘20.4.3 시행)	미세먼지 종합대책
근거 법률	수도권대기환경 개선에 관한 특별법	대기환경 보전법 제11조	-	-	대기관리권역의 대기환경개선에 관한 특별법	미세먼지의 저감 및 관리에 관한 특별법
계획 기간	10년 (5년주기 변경가능)	10년 (5년주기 변경가능)	5년	5년	5년 (권역별)	5년
수립 이력	○1차 기본계획 (2005~2014) ○2차 기본계획 (2015~2024) ○변경계획: 6.3 특별대책 반영 ○수정계획 수립중	○1차 종합계획 (2006~2015) ○2차 종합계획 (2016~2025)	○특별대책은 종합대책 (9.26) 이동	○1차 계획 (2017~2022)	수립중	수립중
수립 주체	환경부/지방정부 (서울, 인천, 경기)	환경부	정부합동 (환경부 주도)	정부합동 (환경부 주도)	환경부/지방정부	환경부/지방정부
계획 수립 방법론	기본적인 방향만 법률제시(계획수립 용역-환경부T/F)	환경부 주관 (1차 계획은 연구용역 시행)	환경부 T/F 중심으로 추진	환경부 T/F 중심으로 추진	기본적인 방향만 법률제시(계획수립 용역-환경부T/F)	기본적인 방향만 법률제시(계획수립 용역-환경부T/F)
시행 방안	○중앙정부 기본 계획 수립 ○지방정부 시행 계획 수립/이행 ○수도권대기환경청 전담관리	○환경부가 제도 및 법률로 시행	○TF구성 운영후 TF해체 ○분기별 세부이행 상황 점검·평가	○TF구성 운영후 TF해체 ○분기별 미세먼지 관리위원회 논의	○권역별 기본계획 수립(수도권/중부/ 동남/남부) ○지방정부 시행 계획 수립/이행	○중앙정부 기본 계획 수립 ○지방정부 시행 계획 수립/이행
관리 대상 오염 물질	관리물질 7종 (총량관리 3종) 1. 질소산화물 2. 황산화물 3. 휘발성유기 화합물 4. 먼지 5. 미세먼지(PM ₁₀) 6. 초미세먼지 (PM _{2.5}) 7. 오존(O ₃)	대기오염물질 64종 ○농도 관리 미세 먼지 (PM ₁₀ , PM _{2.5}), O ₃ ○배출량 관리 (PM _{2.5} , PM ₁₀ , NO ₂ , VOCs) ○위해도 관리 (HAPs)			관리물질 7종 (총량관리 3종) 1. 질소산화물 2. 황산화물 3. 휘발성유기 화합물 4. 먼지 5. 미세먼지(PM ₁₀) 6. 초미세먼지 (PM _{2.5}) 7. 오존(O ₃)	1. 질소산화물 2. 황산화물 3. 휘발성유기 화합물 4. 미세먼지(PM ₁₀) 5. 초미세먼지 (PM _{2.5}) 6. 환경부령으로 정하는 물질 ↳ 암모니아(NH ₃)

	수도권 대기환경관리 기본계획	대기환경 10개년 종합계획	미세먼지 관리 특별대책 ('16.6.3)	미세먼지 관리 종합대책 ('17.9.26)	권역별 기본계획 ('20.4.3 시행)	미세먼지 종합대책
계획의 목표	(서울) '24년 ○ PM ₁₀ 30 μ g/m ³ ○ PM _{2.5} 20 μ g/m ³ ○ NO ₂ 21ppb ○ O ₃ (8시간 평균) 60ppb	○ 환경기준 달성률 제고(PM ₁₀ , PM _{2.5} , O ₃ , 측정소기준) - 미세먼지(연간) '25년 90% (PM ₁₀ , PM _{2.5}) - 오존(1시간): '25년 70% - HAPs: 기준년도('16) 대비 위해도 50% 저감('25)	(서울) ○ '21년, 미세먼지 20 μ g/m ³ ○ '26년, 미세먼지 18 μ g/m ³	미세먼지 국내 배출량 ○ '14년 대비 '21년까지 14% 감축 ○ '22년까지 30% 감축으로 강화 (서울) '22년 ○ PM _{2.5} 오염도 18 μ g/m ³	수립중 ○ 지역별 대기환경 개선목표 ○ 권역별 오염물질 배출허용총량	수립중 ○ 미세먼지 농도개선 목표 ○ 미세먼지 배출량 현황 및 전망 ○ 배출 저감목표 및 대책
이행 평가	○ 매년 수도권 대기환경관리 위원회 보고 ○ 3년 단위 국회보고	○ 확인되지 않음	○ 9.26대책으로 이동	○ 미세먼지 종합대책으로 이동	○ 매년 시행계획 추진실적 보고 ○ 5년 단위 기본계획 평가	○ 매년 시행계획 추진실적 국회 보고 ○ '20년 중간 보고서 국회 제출 ○ '22년 종합 보고서 국회 제출
평가 방법	○ 정량평가 삭감계획량 대비 삭감실적 ○ 정성평가 비계량화 대책의 이행평가	○ 기준년 대비 삭감량	○ 서울의 목표농도 달성여부	○ 기준년 대비 오염물질 삭감량	수립중 ○ 수도권특별법과 유사한 구조	○ 미세먼지 감축 실적을 포함한 이행계획 대비 실적 평가
모델링 수행 여부	수행중 (CMAQ)	○ HAPs 대기분산 모델(오염물질의 공간분포 파악), 수용모델(대기중 농도에 대한 배출원별 기여도 추정) 병행 개발	수행중 (CMAQ)	○ 모델링 없이 삭감량으로 대체	수행중 (CMAQ)	○ 중장기적으로 「국가미세먼지정보센터」 설치
특징 및 한계	○ 대책 선정 기준에 대한 근거 미흡	○ 연도별·부문별 감축목표를 포함한 '30년 목표의 세부 이행계획이 수립되지 않음	○ 수도권 외 지역의 삭감을 통하여 서울의 목표농도를 달성하는 방식	○ 다수의 대책이 기존 대책과 중복되 차별성에 대한 검토 필요		

(10) 종합 평가 및 개선점

- 대기 개선 대책 목표 설정
 - 대기환경기준의 정립: 시민 인체위해성 기반 미세먼지 등 대기환경기준 설정방법 확립, 주기적(매 3~5년) 재검토가 필요함
 - 대기 개선 목표 설정 시 대기환경기준이 가이드라인이 되도록 함
 - 지역별 대기오염 달성도 판단 시 대기환경기준이 판단기준이 되도록 하고 달성 지역, 미달성지역을 구분함
 - 청정지역의 경우 기존 대기오염도가 악화하지 않도록 별도의 기준 마련이 필요함
- 시민 인체위해성 기반 대기관리 대책 수립
 - 현재 대기오염물질 지정은 대기오염물질 심사·평가 위원회의 엄격한 기준에 의해서 심사되고 관계 부처 협의, 규제개혁위원회 등의 과정을 거쳐야 하므로 대기중 위해가능성이 있는 물질에 대해 사전 예방적 모니터링을 하기 어려운 구조인 바, 대기오염물질 확대 지정이 필요함
 - 따라서, 기존의 대기오염물질(현재 64종) > 유해대기감시물질 > 특정대기유해물질(35종) 체제를 대기오염물질, 유해대기오염물질(또는 유해대기 감시물질) 체제로 전환하여 대기중 유해물질을 사전 예방적으로 광범위하게 모니터링을 확대하고, 단계적 대기오염물질 심사를 통하여 대기오염물질을 확대해야 함
 - 대기환경기준 설정 및 각종 대책 정책달성도 평가 시 인체영향(발암 위해도, 비발암독성 영향 등) 기반으로 접근함
 - 대기오염물질 및 특정대기유해물질 배출원에 대한 세밀한 관리 기준을 설정함
 - 초미세먼지 대기오염도 전국 빅데이터 확립 및 활용체계 구축이 필요함
- 초미세먼지 발생원 배출원 인벤토리 구축
 - 초미세먼지 유발 대규모·중소규모 배출시설, 생활계·상업계 시설, 농업·어업·임업·수목·사고성 배출·불법 배출, 비산먼지배출, 비산휘발성물질 배출, 비정상상태 배출 등에 대한 고유의 배출원단위 개발이 필요함

- 초미세먼지 유발 자동차, 항공기, 건설기계, 선박, 철도, 기타 이동수단에 대한 고유의 배출원단위 개발이 요구됨
- 초미세먼지 배출량 산정을 위한 방법론 정립 및 데이터베이스화 방법을 정립하고 지역별 초미세먼지 배출원 데이터베이스(Source Inventory) 확립 및 전국 배출원 빅데이터 정립이 이루어져야 함
- 효율적인 총배출량 관리
 - 전국 대상 합리적인 대기관리권역의 설정 및 효과적 관리방안 강구
 - 초미세먼지 형성 요인물질에 대한 국가적, 지역적 총 허용배출량 및 삭감량 설정
 - ① 고정·이동·면 오염원 포함
 - ② 질소산화물에 대한 총체적 저감체계 구축
 - ③ 지역별 자동차 질소산화물·미세먼지 배출량 총량 관리제도 구축
 - ④ 응축성 미세먼지 형성 원인물질에 대한 규명, 배출원 인벤토리 작성 및 총량적 저감
 - 인접 영향 권역에 대한 관리 규정 설정
 - 최적방지기술에 기초한 합리적인 기술규제 방안 정립
 - 민간 주도 주요 대기오염배출원 관리방안 마련
 - 효율적이고 비용경제적인 대기관리권역 내 및 대기관리권역 간 공동 저감제도 도입 및 배출권거래제 제도 구축
- 대기관리 및 국제협력 체계 재구축
 - 각종 미세먼지 관련 법·제도의 중복성을 배제하고 대기환경보전법 또는 통합형태의 법 위주의 제도 통합
 - 대기관리권역별 대기관리 조직체계 구축
 - 대기관리권역별 대기관리 전문위원회 운영 및 미세먼지 오염도·배출원 빅데이터 관리조직 설치

- 미세먼지의 다양한 발생원의 배출원단위·배출량·대기거동·저감방안 연구 지원 조직 및 예산체계 구축
- 국제적, 권역간 대기오염 영향 연구 지원체계 구축
- 미세먼지 국제협력, 국제연구, 컨벤션 지원을 위한 제도 및 예산 구축
- 광역 및 기초지자체의 조직 및 기능 재정립
 - 광역 및 기초자치단체별 미세먼지 관리 조직·인원 및 예산 체계 구축
 - 기초지자체별 미세먼지 발생원 관리를 위한 감시인 제도 도입
- 환경과 경제가 상생하는 관리체계 구축
 - 현재 미세먼지 등 대기질 관리를 위한 대기환경개선대책, 에너지 기본계획(발전계획, 신재생에너지 계획 포함), 경제 관련 계획(도시·교통 계획, 에너지세 포함), 과학기술개발 등이 상당히 밀접한 관계가 있으며 동일한 시설, 동일한 에너지 등을 대상으로 하고 있음
 - 그럼에도 불구하고 각 계획의 수립단계 및 이행단계에서 별도로 운영되고 있어서 환경(Environment)-에너지(Energy)-경제(Economy), 소위 3E's의 유기적 관계를 증진시키기 위한 제도를 수립함
 - 미세먼지 개선을 위한 환경-산업·에너지-경제 관계 부처의 통합적 운영이 필요하고 특히 대기환경-에너지 관련 부서의 통합을 추진함
- 시민참여형 대기관리 정책수립 및 시행
 - 시민과 관련된 미세먼지 발생원(자동차, 생활계·상업계, 중소 규모 배출시설 등) 관리를 위한 시민단체 및 자발적 시민 조직에 대한 체계구축
 - 기초지자체를 활용한 지역별 시민활동 지원제도 도입
 - 미세먼지 저감정책의 시민 의견 수렴 및 환류
 - 미세먼지 피해예방을 위한 시민참여 지원

● ● 참고문헌

1. 서울 대기질 정책, 서울연구원, 2016
2. 수도권 대기질개선 특별대책, 환경부, 2002
3. 유해대기오염물질 관리 기본계획(안), 환경부, 2014
4. 수도권 대기환경관리 시행계획 추진실적 평가보고서, 환경부·수도권 대기환경청, 2011
5. 동종인, 서울시 미세먼지 정책 및 예산구조 분석, 서울시의회 예산정책 연구위원회, 2019
6. NARS 현안분석 vol.57, 미세먼지 행정의 현황과 개선과제, 국회입법 조사처, 2019
7. 미세먼지 관리 특별대책, 환경부 보도자료, 2016
8. 미세먼지 관리 종합대책, 환경부 보도자료, 2017
9. 대기환경보전법·환경정책기본법, 법령집, 2019
10. 미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법안(대안), 국회 환경노동위원회, 2018
11. 미세먼지 특별법 시행령, 환경부 보도자료, 2019
12. 대기오염후보물질 조사 연구, 국립환경과학원, 2018



미세먼지



현황 분석 및



개선 보고서

국제 연구 및 협력

요약 | 209

제1장 현황 분석 | 212

제2장 문제점 및 개선방향 | 219

대표 집필자

양오봉 전북대 화학공학부 교수

공동 집필자

채여라 한국환경정책평가연구원
선임연구위원

김동술 경희대 환경학과 교수

동종인 서울시립대 환경공학부 교수

이오이 환경정의 사무처장

SESSION

10

SESSION

10

국제 연구 및 협력

대표 집필자

양오봉 전북대 화학공학부 교수

공동 집필자

채여라 한국환경정책평가연구원
선임연구위원

김동술 경희대 환경학과 교수

동종인 서울시립대 환경공학부 교수

이오이 환경정의 사무처장

● 요약

(1) 현황 분석

- 미세먼지 저감을 위한 국가 간 국제 연구 및 협력은 아래와 같이 한·중, 한·중·일, 동북아(한·중·일·러·북한·몽골), 한·미, 한·EU 등 주요 국가 간에 진행되고 있음
- 한·중 미세먼지 과학기술 주요 협력 사업
 - 한·중 대기질 공동연구사업('17~'20), 한·중 온실가스 인벤토리 및 탄소시장 공동연구 사업('19~'23), 한·중 미세먼지 공동 저감 실증 협력사업('15~), 한국과 중국 정부 간 대기질 측정자료 공유 사업 등
- 한·중·일 동북아 장거리 이동 대기오염물질(LTP) 협력('95년~) 현황
 - 4단계('13~'17) 연구기간 동안 한·중·일 3국이 각각 연구한 초미세먼지(PM_{2.5}) 연구결과('19.11.20)의 주요 내용은 다음과 같음
 - 3국의 국가별 관측지점에서 장기 관측한 국가별 초미세먼지 연평균 농도('15년 대비 '18년 농도)는 감소 추세임
 - * 한국 12% 감소, 중국 22% 감소, 일본 12% 감소('17년)
 - 대기질모델기법에 의하여 산출한 '17년 기준 우리나라 3개 도시(서울, 대전, 부산)의 미세먼지 영향은 중국이 32%, 일본이 25% 차지하는 것으로 나타남

■ 동북아청정대기파트너십(NEACAP) 현황

- 한국, 중국, 일본, 러시아, 몽골, 북한 6개 회원국이 참여하고 있으며, 미세먼지(PM_{2.5}, PM₁₀), 오존과 기타 관련 물질 정보 및 데이터를 공유하고 있음

■ 한·미, 한국-OECD 대기질 환경 협력 현황

- 한미 대기질 공동조사(KORUS-AQ, '13년~): 고농도 미세먼지 발생원인 규명과 예보 정확도 개선을 위해 미국 NASA와 3차원 입체 관측 등을 추진함
- 한국-OECD 동북아 미세먼지 정책 연구('18. 4월~): OECD와의 협업을 통해 객관적인 증거 기반의 한·중, 동북아 미세먼지 국제협력을 위한 전략을 제시함

■ 향후 추진 예정인 미세먼지 관련 국제 연구 및 협력

- 한·아세안 특별정상회담(부산, '19.11.25~26) 시 한·아세안 간 환경문제(미세먼지) 협력 사업을 발굴하기로 함
- 2020년 2월에 정지궤도 환경위성(GEMS, Geostationart Environment Monitoring Sepctrometer)을 발사하였으며 한반도 및 동아시아 대기오염 물질의 감시와 이 자료를 이용한 국제 협력 연구를 추진할 예정임
- 고농도 미세먼지 원인규명을 위한 제2차 국제 대기질 공동조사('20~'24) 및 국제 협력 추진(한국, 미국항공우주국, 유럽우주국) 예정임

(2) 문제점 및 개선 방향

■ 현재 한·중, 한·중·일, 한-미, 한-OECD, 동북아(한, 중, 일, 러, 몽골, 북한) 등

- 양자 또는 다자간의 미세먼지 저감을 위한 국제협력 사업을 실시하고 있음
- 그러나 과학기술에 기반한 미세먼지 오염물질에 대한 측정, 모델 개선, 원인 규명, 배출량 산정 향상을 위한 종합적이고 체계적인 국제 공동연구를 추진해야 하고, 북한의 미세먼지 원인 분석 및 개선에 대한 연구도 필요함
- 각 부처나 기관에 분산된 미세먼지 국제협력 연구를 총괄 기획·조정하는 분과 필요함(예: 국가기후환경회의 국제협력분과)

- 한·중·일 대기오염물질의 증장거리 이동(LTP) 국제연구
 - 중국의 경우 국가모델을 개발하였고 우리나라도 예보모델 개발에 상당한 예산과 노력을 경주하고 있으나 각국이 인정하는 객관적인 자료 확보와 모델 적용이 이루어지지 않고 있음
 - 당사국 간의 긴밀한 협력과 유엔 등을 통한 협력 노력이 필요하며, 3국과 인접한 북한의 오염물질 배출량 자료 불확도 문제 개선을 위한 인벤토리 구축과 공동연구도 필요함

- 과학기술 기반의 공동연구 및 동북아 배출권 거래시스템 도입 추진
 - 과학기술 기반의 국제 공동연구와 협력 시 한·중·일을 포함한 동북아 지역의 배출권 거래시스템(ETS, Emission Trading System) 도입과 청정개발 메커니즘(CDM, Clean Development Mechanism)을 위한 관련 국가 간 국제협정 추진이 필요하며, 이를 통해 UN이 추진하는 지속가능개발 메커니즘(SDM, Sustainable Development Mechanism)에 대비가 필요함
 - 2020년 우리나라에 설립 예정인 UN CTCN(Climae Technology Center & Network) 지역사무소를 활용하여, 북한을 포함한 동북아 청정대기를 위한 기술협력 플랫폼 및 공동 기술 사업화를 제안하고 이를 전 세계 권역으로 확대가 필요함

- 국내외 및 지역의 민·관 총괄 협력 체제 구축 필요
 - 한·중·일 동북아 3국의 지자체들 간의 협력관계를 맺고 각종 교류를 하고 있는 지역들 간의 국제협력 연구센터(지자체의 거점대학 내)를 설치 운영하도록 지원하여 국제 공동연구를 국가, 지자체 및 거점대학 간의 협동연구로 확대하여 미세먼지의 자료 확보와 저감 노력을 전방위적으로 확대해야 함
 - 지역 거점대 미세먼지 연구센터 사업은 국비, 지방비, 대학의 매칭 시스템으로 최첨단 실시간 측정 장비구축(국비, 지방비), 운용인력과 연구인력(대학) 제공, 국제 공동연구비(국비, 지방비) 선진 시스템을 구축하여 국제협력 수준 향상이 필요함
 - 수도권 중심의 미세먼지 저감 정책과 협력이 지방정부로 확대되어야 하고, 지방정부 간의 협력과 서울-베이징 간의 국제협력이 한·중·일의 지방 정부 간의 국제협력으로 확대되도록 적극 지원해야 함

제1장 현황 분석

- 미세먼지 분야의 다자간과 양자 간의 국제협력은 다양하게 진행되고 있음. 특히 우리나라의 미세먼지에 가장 영향을 미치는 중국과의 국제협력은 비교적 잘 진행되고 있다고 할 수 있음
 - 한·중 대기질 공동연구 사업, 한·중 온실가스 인벤토리 및 탄소 시장 공동연구 사업, 한·중 미세먼지 공동 저감 실증 협력 사업, 한·중 정부 간 대기질 측정자료 공유 등이 예임
 - 또한, 한·미, 한·OECD 간의 대기질 환경협력도 진행되고 있으며, 다자간의 협력은 한·중·일 동북아 장거리 이동 대기오염물질(LTP) 협력, 한·중·일·러·몽골·북한 6개국이 참가하는 동북아 청정대기 파트너십 등의 다자간 협력이 진행되고 있음
- 미세먼지 저감을 위한 국제 협력 연구 결과가 구체적으로 미세먼지 저감에 어떠한 성과로 이어졌는지 평가하는 것은 시기상조일 수 있지만, 중간 점검을 통해 지금까지의 국제 협력을 종합적으로 점검할 단계가 되었다고 할 수 있음

(1) 한·중 환경협력 현황

- 한·중 환경협력 센터 사업
 - 한·중 정상회담(17.12, 중국)에서 한·중 환경 협력계획(18~22)을 체결하였고, 미세먼지 저감 공동 노력의 구심점으로 한·중 환경협력센터를 개소하였음 (18.6.25, 베이징)
 - 한·중 환경협력 센터의 주요 과학 기술 협력 내용은 다음과 같음
 - 한·중 대기질 공동연구사업(17~20)은 중국 북부지역의 대기오염물질 특성 파악, 원인 규명, 대기질 개선책을 제시하고, 단계적 액션플랜은 관측 기반 구축(17), 관측 및 모델링(18), 분석(19), 개선책 제시(20)로 구성됨
 - 한·중 인공강우 협력연구(18~22)의 주요 내용은 한국의 인공강우 기술 선진화, 운영기술 확보를 위한 기술 및 인력 교류임

- 서울·베이징 대기질 개선 협력사업('18~'22)의 주요 내용은 서울-베이징 환경 분야 공동연구단 구성 및 운영임
- 한·중 광역 대기환경관리 정책교류 워크숍('18~'22)의 주요 내용은 각국의 수도권 대기 환경청 운영 사례와 정책 경험 등을 공유하는 것임
- 한·중 노후 경유차 저공해화 프로그램('19~'20)은 중국발 미세먼지 저감을 위해 중국 주요 5개 성(도시) 노후 경유차를 대상으로 각 도시별로 연 50대씩 매년 저감장치 부착을 시범지원('19)하고, '20년에는 지역 및 대상을 확대하는 것이 주요 내용임
- 한·중 온실가스 인벤토리 및 탄소 시장 공동연구 사업('19~'23)의 주요 내용은 온실가스 감축 기반 구축·운영 공동연구와 국가 및 사업장 온실가스 인벤토리 연구('19~'20), 탄소 시장 연계기반 마련 연구('22~'23)임

■ 한·중 미세먼지 공동 저감 실증 협력 사업('15~)

- 한국의 우수한 대기오염방지기술(집진, 탈질, 탈황)을 중국에 적용하여 중국발 미세먼지 저감, 대중국 환경산업 수출 확대가 주요 내용이며, 적용 지역은 산둥, 하북, 산서, 섬서, 요녕, 내몽고, 길림, 흑룡강, 강소, 하남임
- 적용 분야는 제철소, 석탄화력발전소의 탈질, 탈황, VOC 저감 등이며, 추진 방식은 한국이 핵심기술과 정부 자금(20%)을 제공하고, 중국이 정부와 기업 자금(80%)를 부담하는 방식임
- 주요성과로 12건(833억원)의 계약을 성사시켰으며, 기존 대비 평균 79%의 집진 개선 효과를 보임. 추가로 40개(1,600억원) 규모의 프로젝트를 협상 중에 있음

■ 한국과 중국 정부 간 대기질 측정자료 공유

- 전용선(FTP, File Transfer Protocol)을 이용하여 실시간 대기질 측정자료를 한국 국립환경과학원과 중국 국가모니터링센터 간 공유함('15.12.10~)
- 한국의 서울, 인천, 경기 3개 시·도와 중국 베이징 등 35개 시·성의 대기질(PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, NO₂, CO, O₃) 측정자료 실시간 공유 중이며, 이 자료를 양국의 미세먼지 예·경보에 활용하고 있음

■ 한·중 맑은하늘(청천) 프로젝트

- 한중 환경협력 양해각서('14.7.3. 한중정상회담)를 기반으로 공동 연구단 구성하여 운영('15.6 베이징)하고 있음
- 주요 내용은 다음과 같음
 - 중국 북부지역(베이징, 바오딩, 칭다오, 다롄, 창저우, 탕산 6개 도시)의 대기질 공동 관측('17.5월 관측 시작)
 - 지상과 항공관측을 중심으로 대기질 모니터링 수행, 대기질 성분 측정분석, 모델링 평가 진행
 - '17년 관측 기반구축 및 연구 착수, '18년 장기관측, 집중관측, 모델링
 - '19년 관측자료를 종합하여 대기오염특성분석, 개선대책 제시('20년)

(2) 한·중·일 동북아 장거리이동 대기오염물질(LTP) 협력 현황

■ 현황

- '95년 한·중·일 3국은 동북아 장거리 이동 대기오염물질 조사와 대책 마련을 위한 공동연구와 워크숍 개최에 합의함(LTP, Long-range Transboundary Air Pollutants)
- '96년 LTP 모니터링과 국가 간 배출원-수용지 관계를 분석하여 국가 간 상호 영향에 관한 공동연구에 착수함
- 단계별 연구 내용은 다음과 같음
 - 1단계('00~'04): DB 및 모델링 시스템 구축, 연구 기반 마련
 - 2단계('05~'07): 황산화물의 배출원, 수용지 간의 관계 분석
 - 3단계('08~'12): 질소산화물의 배출원, 수용지 간의 관계 분석
 - 4단계('13~'17): 미세먼지(PM_{2.5}) 장기관측 및 결과 분석
 - 5단계('18~): 공동연구 계획 논의

■ 주요 결과(표10-1 참조)

- 각국의 배경농도 관측지점(한국:백령, 강화, 태안, 고산, 중국: 다롄, 옌타이, 샤먼, 일본: 리시리, 오키)에서 2000~2017년 동안 관측한 자료를 분석한 결과, 국가별 초미세먼지(PM_{2.5}) 연평균 농도의 경우 '15년 대비 '18년 농도가 한국은 12%, 중국은 22%, 일본('17년 기준)은 12% 감소한 것으로 나타남

〈표 10-1〉 한·중·일 도시별 초미세먼지(PM_{2.5}) 상세 기여율

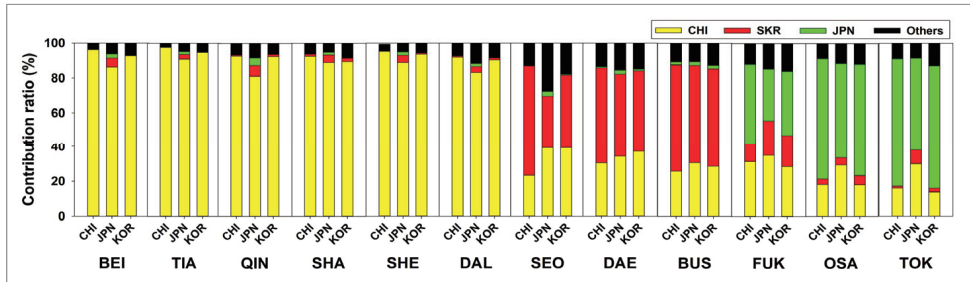
 최솟값,
 최댓값,
 붉은글씨: 자체기여율

배출원		중국	한국	일본	기타
수용지					
베이징	중국 연구결과	96	0	0	4
	일본 연구결과	86	5	2	6
	한국 연구결과	93	0	0	7
톈진	중국 연구결과	97	0	0	3
	일본 연구결과	91	3	2	5
	한국 연구결과	95	0	0	5
상하이	중국 연구결과	92	1	0	6
	일본 연구결과	89	4	1	5
	한국 연구결과	89	2	0	8
칭다오	중국 연구결과	93	1	0	7
	일본 연구결과	81	6	4	9
	한국 연구결과	92	1	0	6
선양	중국 연구결과	95	0	0	4
	일본 연구결과	89	4	2	5
	한국 연구결과	94	1	0	6
다롄	중국 연구결과	92	1	0	7
	일본 연구결과	83	3	2	12
	한국 연구결과	90	1	0	8
서울	중국 연구결과	23	63	0	13
	일본 연구결과	39	30	3	28
	한국 연구결과	39	42	1	18
대전	중국 연구결과	30	55	1	14
	일본 연구결과	34	48	2	16
	한국 연구결과	37	47	1	15
부산	중국 연구결과	26	62	2	11
	일본 연구결과	31	57	2	11
	한국 연구결과	29	57	2	13
도쿄	중국 연구결과	16	1	74	9
	일본 연구결과	30	8	53	9
	한국 연구결과	14	2	71	13
오사카	중국 연구결과	18	3	70	9
	일본 연구결과	30	4	55	12
	한국 연구결과	18	5	65	12
후쿠오카	중국 연구결과	31	11	45	12
	일본 연구결과	35	20	30	15
	한국 연구결과	29	19	37	16

※ 기타(others): 몽골, 러시아, 북한 등

※ 출처: 동북아 장거리 이동 대기오염물질 공동연구 보고서, 환경부/국립환경과학원, 2019.11.20.

Session 10 국제 연구 및 협력



- 대기질모델기법을 이용한 3국 주요 도시(한국: 서울·대전·부산, 중국: 베이징·텐진 등 6개 도시, 일본: 도쿄·오사카·후쿠오카)의 국내외 미세먼지 영향 분석 결과 자체 기여율은 연평균 기준 한국 51%, 중국 91%, 일본 55%로 나타났음
- '17년 연평균 기준으로 중국 배출원의 우리나라 3개 도시(서울·대전·부산)에 대한 평균 영향은 32%, 일본에 대한 영향은 25%로 나타났음

(3) 동북아 환경협력계획(NEASPEC) 및 동북아 청정대기 파트너십(NEACAP)

■ 동북아환경협력계획(NEASPEC)

- 제22차 동북아환경협력계획(NEASPEC) 고위관리회의('18.10.25~26)를 계기로 출범한 역내 대기오염 저감을 위한 공동대응체제
 - North-East Asian Subregional Programme for Environmental Cooperation (NEASPEC), 한국 주도로 '93년 설립(한, 일, 중, 러, 몽, 북한 등 6개 회원국)된 동북아 환경협력체로 대기오염, 해양쓰레기, 자원보존 등 환경이슈 협력 추진 중
- 미세먼지를 포함한 대기오염 관련 정보 파악, 공동연구 활동 수입, 관련 정책 제언 및 과학기반 정책 협의를 목표로 하고 있음
- 향후 역내 지역협의체들의 연구결과를 통합하는 역할을 동북아청정대기파트너십(NEACAP, North-East Asia Clean Air Partnership, '18.10 출범)이 수행함으로써 시너지 확대 기대

■ 동북아 청정대기 파트너십(NEACAP)

- 참여 국가는 한국, 중국, 일본, 러시아, 몽골, 북한 6개 회원국으로, 미세먼지(PM_{2.5}, PM₁₀), 오존, 기타 관련 물질을 모니터링함

- 핵심프로그램은 다음과 같음
 - 배출량 데이터, 이동 및 침적에 관한 정보, 배출관리 기술과 국가 정책에 관한 정보 등 공개 가능한 관련 정보 및 데이터 공유
 - 동북아 배출 인벤토리 개발 및 유지관리, 국가 지역 대기오염 이동과 침전 모델링 및 모델 비교 등 NEACAP 활동과 기타 협력 메커니즘 조정, 통합
 - 회원국 과학자, 전문가, 정책 및 의사 결정자 간의 과학기반과 정책 중심 협의, 정책 시나리오 개발 등 대기오염 해결을 위한 잠재적인 기술 및 정책 제안

(4) 한·미, 한국-OECD 대기질 환경협력 현황

■ 한·미 대기질 공동조사(KORUS-AQ)

- '13년부터 고농도 미세먼지 증가에 따라 발생 원인규명과 예보 정확도 개선을 위한 미국 NASA와 3차원 입체 관측 등을 목적으로 함
- 추진 경과는 다음과 같음
 - 공동조사 추진 합의('13.12) 및 업무협약('15.10)
 - 1단계 측정('16.5.2~6.12): 80개 기관 580명이 참가하여, 지상·항공·원격 관측을 수행
 - 결과 설명회 개최('17.7.19): 예비종합보고서 공개, 연구결과 미세먼지 국내 영향이 52%로 국외 영향보다 높았음
 - 2단계 일정 합의('18.1.25): '21.1~2월, '22.5~6월 간 집중 관측을 합의

■ 한국-OECD 동북아 미세먼지 정책 연구

- OECD와의 협업을 통해 증거 기반의 한중, 동북아 미세먼지 국제협력 전략 제시하기 위하여 추진됨(협정서 서명, '18.4월)
- 연구 명칭은 '대기오염 개선을 위한 규제 조치'이며, '18년부터 '19년까지, 18개월 간 3억원의 연구비로 진행함
 - 연구 내용은 동북아 지역 미세먼지를 중심으로 대기질 개선을 위한 지역협력 대책을 제시하는 것으로, 구체적 내용은 유럽 CLRTAP(Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, '79), 미-캐나다 AQA(Air

Quality Agreement, '91년 미국-캐나다 채택) 등 해외 사례 연구, 동북아 지역 협력 체계 분석, 중국 등 동북아 국내 대기질 규제 정책 분석으로 구성되어 있음

- 연구 형태는 OECD 주도의 문헌 연구, 선행 연구(CLRTP, 중국 녹색성장 연구 등) 분석, 현지 연구(Fact Finding Mission, '18년), 전문가 워크숍 등임

(5) 향후 추진 예정이거나 필요한 미세먼지 국제 연구 및 협력

- 한·아세안 간 환경문제(미세먼지) 협력 사업을 발굴하기로 함

※ 한·아세안 특별정상회담, 부산, '19.11.25~26

- 2020년 2월에 정지궤도 환경위성(GEMS, Geostationart Environment Monitoring Sepctrometer)을 발사하였으며 한반도 및 동아시아 대기오염 물질의 감시와 이 자료를 이용한 국제 협력 연구를 추진 예정임
- 고농도 미세먼지 원인규명을 위한 제2차 국제 대기질 공동조사('20~'24) 및 국제 협력 추진 중임(한국, 미국항공우주국, 유럽우주국)
- 북한과의 미세먼지 및 기후변화 관련 현황, 저감 및 적응 기술 공동연구, 상호 효과 분석, 기타 다양한 협력이 요구되고 있으며 관련하여 정책기획 연구를 통해 공동연구 및 실효적 협력 방안을 마련하여 적극적으로 추진할 필요가 있음
 - 국내 유입되는 북한발 미세먼지 오염물질에 관한 국내의 과학적 연구 지원과 북한 내 발생하는 미세먼지 오염물질에 관한 연구 협력이 필요함
 - 단기적 관점에서 북한과의 미세먼지 문제 해결에 기여하는 저감/적응 기술 협력 방안 제시 및 중장기적 관점에서의 남북 기술협력 강화 추진이 필요함

제2장 문제점 및 개선방향

- 현재 연구 결과가 국민에게 현안에 대한 답을 할 수 있는 수준은?

매우 미흡	약간 미흡	어느 정도	약간 만족	충분하게	완벽하게
		○			

- 현재 연구 결과가 국민에게 잘 전달되고 있는가?

매우 미흡	약간 미흡	어느 정도	약간 만족	충분하게	완벽하게
	○				

(1) 국제협력 연구를 총괄 기획·조정하는 기구 조직

- 양국과 다자간의 미세먼지 저감에 관한 과학기술 기반의 종합적이고 체계적인 국제 공동연구를 주관하고 각 부처나 기관에 분산된 미세먼지 국제협력 연구를 총괄 기획·조정하는 분과 조직이 필요함(예: 국가기후환경회의의 국제협력위원회)
- 현재 미세먼지 원인 규명, LTP, 모델링 등을 위한 한·중·일, 한·중, 한·미, 한-OECD 양국 또는 다자간의 정책 공조는 이루어지고 있으나, 그에 상응하는 체계적이고 종합적인 과학기술 기반의 국제 공동 연구가 미흡한 실정임
- 또한 국제 공동연구를 총괄할 우리의 컨트롤 타워도 부재하여, 각 기관이나 대학들의 민간 레벨의 개별적인 공동연구가 진행되어 우리나라의 미세먼지 저감을 위한 정책개발 및 실행 계획에 제대로 활용이 되지 않고 있는 실정임
- 따라서 미세먼지 저감을 위한 한·중·일, 한·중, 한·미, 한-OECD 간의 양국 또는 다자간의 국제 공동연구를 기획하고 총괄하여 연구결과를 정책이나 실행 계획에 활용할 우리나라의 컨트롤 타워를 세워야 함

(2) 한·중·일 대기오염물질의 중장거리 이동(LTP) 국제 연구

- 최근 한·중·일 3국이 LTP 연구결과를 발표한(19.11.20) 자료에 의하면 3국이 각각 수행한 연구결과를 각각 따로 나열하였음

- 공동연구라 함은 3개국의 연구진의 공동으로 참여하여 각국의 오염물질을 측정하고 같은 모델을 사용하여 상호의 영향을 진단하고 발표하여야 함
- 따라서 향후 공동연구의 정신을 살려 3국이 공동으로 오염물질을 측정하고 같은 모델을 적용하여 공동의 결과를 도출하도록 합의하고 이러한 결과를 바탕으로 저감을 위한 방안을 제시해야 함
- 미세먼지를 포함한 미세먼지의 원인이 되는 많은 오염물질들을 정확히 측정하고, 분석 모델 개발과 저감 정책을 공동으로 도출해야 함
- 중장거리 이동에 있어 북한의 오염물질 배출량 자료의 부재로 3국의 공동연구의 불확도가 높은바, 북한 지역의 오염물 자료 및 이동 경향 측정을 위한 노력도 선행되어야 함

(3) 과학기술 기반의 공동연구 및 동북아 배출권 거래시스템 도입 추진

- 한·중·일 환경 장관 회의를 통한 실효성 있는 목표의 설정과 이를 달성할 수 있는 3국 간의 과학기술 기반의 공동 연구의 활성화 및 긴밀한 협력 노력이 지속되어야 함
- 북한의 대기오염은 우리나라 수도권 미세먼지 농도에 상당한 영향을 끼치고 있으며 북한의 경제개발로 인하여 그 영향이 증가할 가능성이 크므로, 북한과의 환경 협력이 중요함
- 과학기술 기반의 국제 공동연구와 협력 시 한·중·일을 포함한 동북아 지역의 배출권 거래시스템(ETS, Emission Trading System) 도입과 청정개발 메커니즘(CDM, Clean Development Mechanism)을 위한 관련 국가 간 국제협정 추진이 필요하며, 이를 통해 UN이 추진하는 지속가능개발 메커니즘(SDM, Sustainable Development Mechanism)에 대비가 필요함
- 2020년 우리나라에 설립 예정인 UN CTCN(Climate Technology Center & Network) 지역사무소를 활용하여, 북한을 포함한 동북아 청정대기를 위한 기술협력 플랫폼 및 공동 기술 사업화를 제안하고 이를 전 세계 권역으로 확대 할 필요가 있음
- 아시아 지역의 배출권 거래제도 통합을 위한 3개국 실무 추진단의 구성을 우리가 주도적으로 제안해 나갈 필요가 있음

(4) 한·중 미세먼지 공동 저감 실증 민간 협력 사업

- 중국의 경우 전 세계의 다양한 저감 기술이 설치 및 운영되고 있어 국내 기술의 경쟁력을 확보하기 용이하지 않음
- 방지시설 현장 설치공사의 경우 책정된 예산대비 사업비 규모가 커서 실효성 있는 성과물을 도출하기 매우 어려움
- 국내 독자기술 개발을 위한 R&D 투자 및 국내 기술 적용 사업장의 확대를 추진하여, 국내 시장에서 검증된 상용기술의 해외수출 교두보로 중국 시장을 활용하고 이를 통하여 동남아시아 시장으로 확대 적용되어야 함

(5) 국내·외 및 지역의 민·관 총괄 협력 체제 구축

- 한·중·일 동북아 3국 지역의 거점대학 간의 국제협력 연구센터 지원을 통한 국제협력 연구의 활성화가 필요함
 - 수도권과 지역의 거점대학 미세먼지연구 센터 설치/공동 운영시스템을 구축하고, 중국과 일본의 주요 지역 거점대학 미세먼지연구 센터 간의 국제 공동연구 지원으로 민간 레벨의 교류 활성화로 국가 간의 공동연구 분위기 제고가 필요함
 - 지역 거점대학 미세먼지 연구센터 사업은 국비, 지방비, 대학의 매칭 시스템으로 최첨단 실시간 측정 장비구축(국비, 지방비), 운용 및 연구 인력(대학), 공동연구비(국비, 지방비)의 시스템 구축으로 미세먼지 저감 연구의 활성화가 필요함
- 일부 이루어지고 있는 지방정부 간 협력(Inter-Local Governmental)도 강화되어야 하며, 당장 시행하여야 할 대책과 기술면에서 지자체 간의 경험 공유와 공동 대응이 필요함
 - 전문가-연구기관 간 협력(Inter-Experts)도 정책 수행의 실효성을 높이기 위해서 현재보다 훨씬 활발하게 이루어져야 하며, 시민들의 인식 확대와 참여도를 높이기 위해서 민간단체 참여와 협력(Inter-NGO)도 필수적임
 - 많은 대기 개선정책이 시민들의 참여가 없이 이루어지기 어려움. 이는 동북아 지역 각 정부들이 보다 적극적이고 실질적인 대응을 위해서 필요한 부분이며,

여기에 국제기구들의 다양한 차원의 참여 및 협력방안 도출을 지속해서 추진해야 함

(6) 미세먼지 저감을 위한 국제 공동연구 및 인력 교류 확대 필요

- 미세먼지 저감을 위한 국제 공동연구 과제 도출 및 수행의 선진화
 - 미세먼지 저감을 위한 국가 간의 공동연구와 지역의 거점대학 간의 공동연구 과제가 중복되지 않고, 각 지역의 특색을 살린 연구 과제를 도출하여 연구를 진행하고 총괄적으로 통합하여 실질적인 저감을 위한 실행 방안이 도출되도록 유기적인 협력 연구가 필요함. 더불어 총괄 조정기능을 갖는 컨트롤 타워(예: 국가기후환경회의의 국제협력위원회)가 그 기능을 수행해야 함
 - 현재 민간 레벨의 대학 및 학회 간의 국제 공동 심포지움이 이루어지고 있으나 실질적인 정책개발로 이어지지 않고 있어, 총괄 기획과 조정하에 유기적인 협력과 각각의 심포지움이 특색을 살린 국제 심포지움으로 발전하여 정책 개발로 이어질 수 있도록 유도해야 함
- 미세먼지 저감연구 인력 국가 간 교류 활성화 필요
 - 미세먼지 저감 국제 공동연구를 위하여 각국의 연구인력이 함께 모여 연구를 진행하거나 상대국에 파견하여 공동연구를 진행하도록 연구진의 교류를 위한 국가 간 협정이 필요함. 이것이 실질적인 공동연구의 활성화와 자료의 공유와 동일 모델 적용으로 이어질 수 있음

● ● 참고문헌

1. 미세먼지 저감을 위한 한중협력 강화 방안(참고자료) 2018.11.23.
(환경부, 외교부)
2. 환경부(국제협력과) 보도자료, 2018. 6. 18
3. 한중 환경협력 기본구상(2016~2025) 수립을 위한 연구, 2016, 환경부
(한국환경정책·평가연구원)
4. 한중간 미세먼지 관련 환경협력공동위, 국장회의 보도자료, 2019.1.24.
(외교부, 환경부, 해양수산부)
5. KEI 중국환경브리프(2018-03호), 5~6쪽
6. 국내 우수기술을 활용한 한-중 공동 미세먼지 저감사업 본격화,
2018.4.16., 환경부 보도자료
7. 한중 환경협력 확대를 위한 중국 환경관리 정책 및 체계 분석 연구,
2016.4, 환경부(한국환경·정책평가연구원)
8. 미세먼지 저감 한중 공동워크숍 개최, 2017.5.19., 환경부 보도자료
9. 동북아 장거리이동 대기오염사업(LTP) 평가, 2012.11, 국립환경과학원
10. 동북아 장거리 이동 대기오염물질 공동연구 확대 강화, 2016.11.18.,
환경부 보도자료
11. 동북아 장거리이동 대기오염물질 공동오염 공동연구 요약 보고서,
2019.11.20., 환경부/국립환경과학원
12. 제22차 동북아환경협력프로그램(NEASPEC) 고위급회의 개최,
2018.10.26., 외교부 보도자료
13. 동북아청정대기파트너십(NEACAP) 보도자료, 2019.7.3., 외교부
보도자료
14. KORUS-AQ 예비종합보고서, 국립환경과학원-NASA; KORUS-AQ
환경부 보도자료, 2017.7.19.; 제2차 KORUS-AQ 보도자료, 환경부,
2019.5.17.
15. 한·아세안 특별정상회담(2019.11.25.~26., 부산), 정부 보도자료
16. 환경 위성 이용한 미세먼지 해법(2019.11.19.), 환경부/국립환경
과학원 보도자료

집필자

미세먼지 현황 분석 및 개선보고서

현안	대표 집필자	공동 집필자
고농도 사례의 원인 및 특성	이지이	임호진, 이미혜, 정남순, 이건축
이차생성 기작	임호진	이미혜, 이지이, 정남순
미세먼지 비상저감 조치 효과	박일수	송철한, 김준, 정병주, 이은영
대기질 국가측정망 신뢰도	정병주, 송철한	김 준, 이은영, 박일수
예보 모델링 정확도	구윤서	김순태, 송창근, 조천호
국외 영향	김순태	송창근, 구윤서, 조천호
배출량 자료 신뢰도	김정수	공성용, 고영주, 박기서, 박현설, 조성용
대기관리 정책 체계	김동술	채여라, 동종인, 양오봉, 이오이
대기관리 정책 평가 체계	동종인	채여라, 김동술, 양오봉, 이오이
국제 연구 및 협력	양오봉	채여라, 김동술, 동종인, 이오이



발행일 2020년 5월

발행처 미세먼지 문제 해결을 위한 국가기후환경회의
서울 종로구 새문안로 76 콘코드엔 빌딩 13층
T. 02-6744-0512 www.ncca.go.kr

기획편집

국가기후환경회의 과학기술위원회
: 김용표 위원장, 송미정 간사위원
국가기후환경회의 국제과학기술국



본 인쇄물은 친환경용지와 콩기름 잉크를 사용하여 만들어졌습니다.



미세먼지

현황 분석 및 개선 보고서



미세먼지 문제 해결을 위한
국가기후환경회의