국가기후환경회의
국민정책참여단

www.ncca.go.kr

National Council on Climate and Air Quality

국민정책참여단 미세먼지 정책제안 참고자료집

2019. 7

미세먼지 문제 해결을 위한
국가기후환경회의

발 간 사

국가기후환경회의 위원장 | 반기문

안녕하십니까?

국가기후환경회의의 국민정책참여단으로 활동해 주시는 여러분께 참고자료집을 통하여 인사드리게 되어 기쁘게 생각합니다. 지난 6월 출범식에서 저는 여러분들이 미세먼지에 관한 한 국민을 대표하는 국회의원이 되신 것이라고 말씀드렸습니다. 여러분 각자의 목소리는 5천만 국민들 중 성별・연령・지역을 대표하는 것이기 때문입니다. 무엇보다도 현재 상황이 가히 미세먼지의 재난이라고 일컬어지는 현실인 만큼, 문제 제기에 머무르는 것이 아니라 문제 해결을 위한 행동을 하기 위해서 시간과 열정을 쏟아주신다는데 큰 의의가 있습니다. 여러분들은 미세먼지 문제에 대해 심각하게 고민하고, 국민 각자의 삶의 방식과 생활 패턴을 변화시켜 나가야 하는 시대적 과제를 선도해 나가고 계신 것입니다.

이러한 맥락에서 국가기후환경회의는 국민정책참여단 여러분들께서 미세먼지 발생원인과 그 영향에 대해 정확히 이해하고, 정책제안을 숙의하시는 데 도움을 드리기 위해 본 자료집을 준비했습니다. 미세먼지의 정확한 실체와 저감 및 피해 예방 방법, 인근 국가와의 국제협력 등에 관한 전문적 지식이 뒷받침될 때 가장 합리적인 해법이 도출될 수 있다고 믿기 때문입니다. 미세먼지는 배출 후 대기 중에서 2차로 생성되고 이동하는 굉장히 복합적인 현상으로 전문가 사이에서도 의견이 정리되지 않은 부분이 많습니다.

본 자료집만으로 미세먼지와 관련한 모든 문제를 설명하는 데는 한계가 있겠지만 수많은 전문가와의 논의를 거쳐 과학적이고 객관적인 정보를 담으려 노력하였습니다. 아무쪼록 미세먼지에 대한 정책대안을 발굴하고 숙의하시는 국민정책참여단 여러분들의 여정에 길잡이가 될 수 있기를 기대합니다.

고대 로마의 철학자인 세네카는 말했습니다. “우리가 가진 시간이 적은 것이 아니다. 우리가 제대로 활용하지 않은 시간이 많은 것이다.” 우리가 살고 있는 이 순간이 후대에는 절체절명의 기회였다고 평가될 수 있습니다. 이제 우리는 시간을 제대로 활용해야만 합니다. 미세먼지 문제는 사회 전반의 구조적인 변화와 우리 모두의 노력, 각자의 몫에 최선을 다할 때 해결할 수 있습니다. 그리고 변화를 기대할 수 있습니다.

국가기후환경회의는 이러한 사회적 변혁을 위한 계기를 마련하고 문제를 해결해 나가는데 중추적인 역할을 할 수 있도록 최선의 노력을 기울일 것입니다. 여러분들의 지혜를 하나로 모아 미세먼지 문제를 해결할 수 있는 과감하고 훌륭한 정책대안이 도출되기를 기대합니다.

여러분 모두의 노고에 감사와 응원의 마음을 전합니다.

2019년 7월

반 기 문

국민정책참여단

미세먼지 정책제안 참고자료집

National Council on Climate and Air Quality

CONTENTS

| I | 미세먼지란 무엇인가? ····· 1

| II | 미세먼지 발생원인 ····· 25

| III | 미세먼지 저감 ····· 63

| IV | 미세먼지 건강보호 ····· 105

| V | 국제협력 ····· 137

| VI | 과학적 기반 강화 ····· 169

[참고문헌] ····· 195

[용어해설] ····· 203

[참고자료] ····· 215

[일러두기]

본 자료집은 국민정책참여단의
미세먼지 문제 해결을 위한 정책제안 숙의 활동을
지원하기 위해 외부 전문가를 집필진으로 위촉하여
작성한 것으로서 국가기후환경회의의 공식 의견과는
다를 수 있음을 알려드립니다.

국가기후환경회의
『국민정책참여단 미세먼지 정책제안 참고자료집』

<집필진>

- 1장/ 이미혜 고려대학교 지구환경과학과 교수
- 2장/ 김순태 아주대학교 환경안전공학과 교수
- 3장/ 김정수 한서대학교 환경연구소 연구교수
  김동영 경기연구원 생태환경연구실 실장
- 4장/ 임영욱 연세대학교 의과대학 환경공해연구소 부소장
- 5장/ 추장민 한국환경정책·평가연구원 국제·북한협력연구실
  북한환경정보센터장
- 6장/ 송창근 울산과학기술원 도시환경공학부 교수

01

미세먼지란 무엇인가?

1. 미세먼지 특성 ····· 3
2. 미세먼지의 위험 ····· 13
3. 우리나라의 미세먼지 농도 변화 ····· 17
4. 요약 ····· 24

국민정책참여단

미세먼지 정책제안 참고자료집

제1장 미세먼지란 무엇인가?

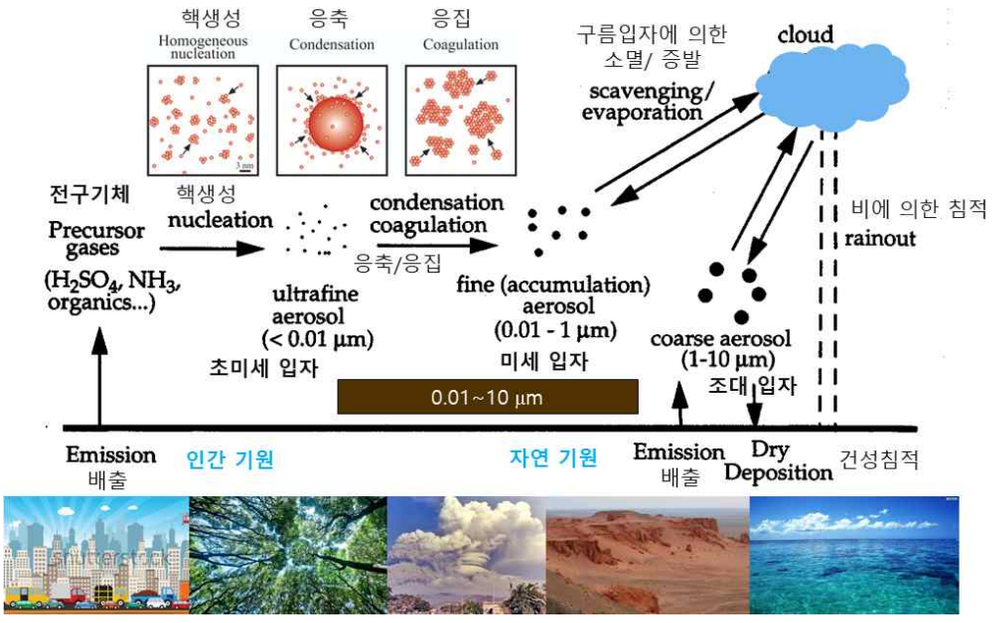
고려대학교 | 이미혜

1. 미세먼지 특성

1) 미세먼지란?

질소와 산소 기체 중심으로 구성된 공기 중에는 이산화탄소(CO_2)나 오존(O_3) 같은 기체 상태로 존재하는 물질과 함께 액체(droplet)나 고체(particle) 입자도 떠 있는데, 이를 통틀어 먼지(particulate matter, PM)*라 부른다.[1)]

안개, 꽃가루, 황사, 산불연기, 화산폭발연기, 담배연기, 굴뚝연기, 자동차 매연 등은 모두 먼지에 속한다. 먼지는 자연적 또는 인위적인 배출원에서 대기로 직접 배출되거나 기체 상태로 배출된 후 입자로 변환되는 복잡한 과정을 거치며 이차적으로 생성되기도 한다(그림 1.1)[2)].

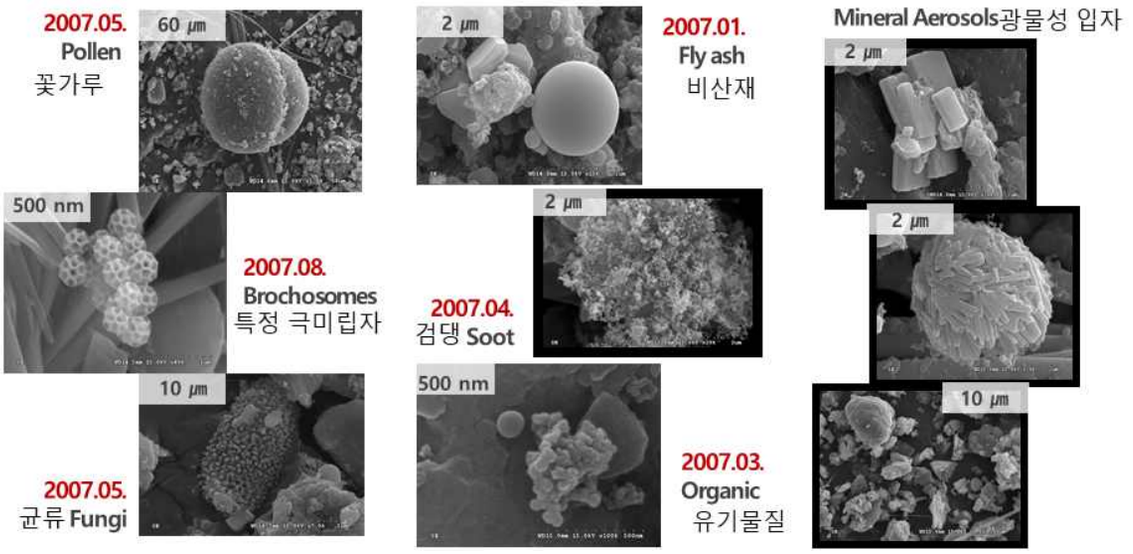


[그림 1.1] 대기 중 먼지(에어로졸) 생성과정

자료: Jacob (1999) 수정작성

1) U.S. EPA(미국 환경보호청) (1996), Air Quality Criteria for Particulate Matter.
* PM(particulate matter)은 고체상 및 액체상의 미세입자를 총칭하는 의미로 사용되는데, '입자상 (오염)물질' 또는 '분진', '먼지' 등의 명칭으로 부르고 있으며, 학술적으로는 간단히 에어로졸(aerosol)이라고도 한다. 본 자료집에서는 이해의 편의상 '먼지'로 지칭하였다. 먼지 지름이 10㎛ 이하인 먼지는 PM-10(또는 PM_{10}), 2.5㎛ 이하인 먼지는 PM-2.5(또는 $PM_{2.5}$)로 표기한다.
2) Jacob, D. (1999), Introduction to Atmospheric Chemistry, Princeton University Press. 280 pp.

대기 중 먼지는 그 기원과 생성과정, 크기와 모양, 화학조성이 매우 다양하다(그림 1.2)[3]. 자연적인 배출원에서 생성되는 입자는 대부분 바람에 의해 대기 중으로 유입되며 크기가 마이크로미터(10^{-6}m) 이상으로 크고, 인위적인 입자는 상당수가 연소과정에서 기체의 형태로 배출된 후 입자로 생성되며 마이크로미터 이하로서 크기가 작다.



[그림 1.2] 공기 중 미세먼지 전자현미경(SEM*) 사진 (고려대 안암캠퍼스에서 채취한 시료)

* *SEM(Scanning Electron Microscope)* 자료: Kang et al. (2012)

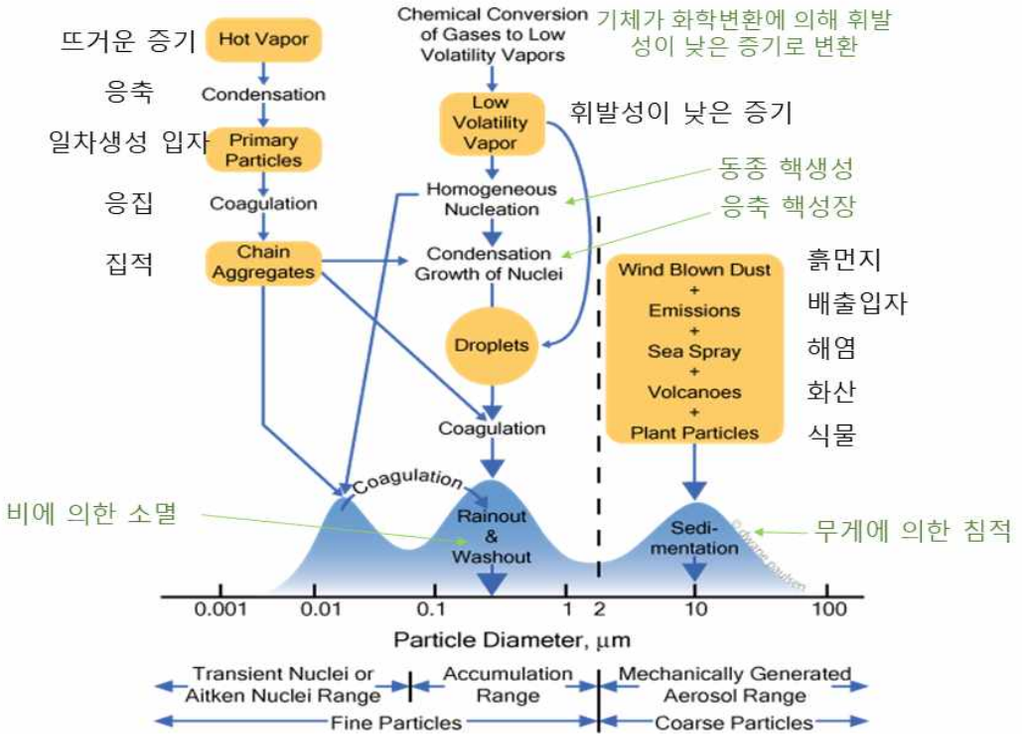
2) 미세먼지 특성

(1) 크기

먼지는 입자 크기에 따라 공기 중에서 이동되거나 제거되는 특성이 결정되며 또한 인체에 미치는 영향도 달라진다. 먼지는 또한 배출된 오염원과 화학 조성에 대한 정보도 담고 있다. 먼지 입자의 모양은 일정하지 않으므로 이를 이상적인 구형으로 가정한 지름(diameter)으로 공기 중에서의 움직임을 나타내는데, 대부분의 먼지입자는 지름이 0.01~10㎛ 범위에 분포한다.

공기 중 먼지는 그 양이 적고 크기도 작기 때문에 이를 정량화 할 때에는 주로 크기별로 나누어 개수를 세거나 포집해서 무게로 나타낸다. 일반적으로 대기 중에서 입자 크기에 따른 질량 분포는 1~3㎛를 경계로 작은 지름과 큰 지름에서 농도가 높은 지점이 나타난다(그림 1.3).

3) Kang, E. et al. (2012), Characterization of atmospheric particles in Seoul, Korea using SEM-EDX, Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 12, 6016-6021.



[그림 1.3] 대기 중 입자의 크기 분포

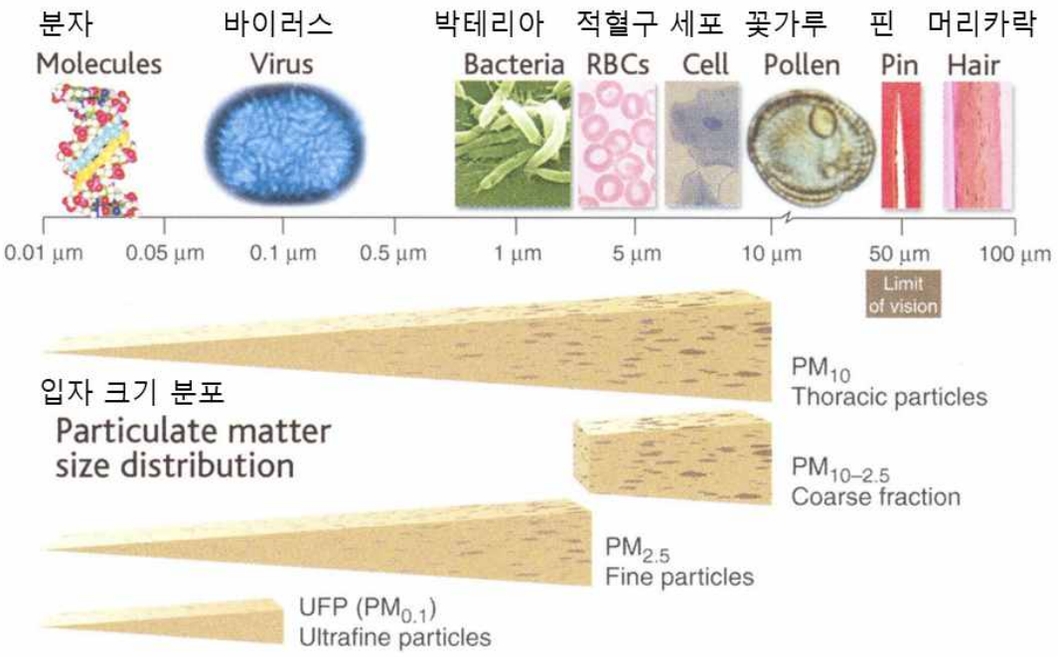
먼지는 보통 2.5㎛를 기준으로 이보다 지름이 크면 조대입자(coarse particle), 작으면 미세입자(fine particle)로 구분한다[4]. 특별한 장치 없이 공기 중의 입자들을 필터로 거르면 조대입자와 미세입자를 모두 포함해 크게는 50㎛ 입자까지 포집되는데 이를 총부유먼지(TSP, Total Suspended Particulate)라 한다.

미국 환경보호청(EPA)에서는 1971년 총부유먼지(TSP)를 대표적인 대기오염물질로 지정하였는데, 총부유먼지(TSP)는 풍속, 습도 등 기상조건에 따라 포집되는 입자의 크기가 달라지며 상대적으로 건강 위해성이 작은 토양입자가 많이 포함된다. 이에 따라 미국 환경보호청(EPA)은 1987년부터 대기오염물질 중 먼지(particulate matter) 지표대상을 폐로 들어와 호흡기에 영향을 줄 수 있는 10㎛보다 작은 입자인 PM-10으로 개정하고, 1997년에는 2.5㎛보다 작은 입자인 PM-2.5를 추가했으며, 2006년 PM-2.5 환경기준 농도를 연평균 15㎍/㎥, 24시간 평균 35㎍/㎥ 수준으로 낮추었다[5].

참고로 우리나라도 2018년 3월 27일부터 PM-2.5의 대기환경기준을 미국 수준으로 강화하였다.[6] 실제 미세먼지 채취기를 사용해 PM-2.5와 PM-10를 포집하면 2.5㎛

4) 이는 학문적 분류로서 법적 분류와는 차이가 있다. 현재 「미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법」에서는 미세먼지를 지름이 10마이크로미터(㎛) 이하인 입자를 '미세먼지'로, 지름이 2.5마이크로미터(㎛) 이하인 입자를 '초미세먼지'로 정의하고 있다.
5) U.S. EPA (2006), National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) for Particulate Matter ($PM_{2.5}$)
6) 환경부 보도자료 (2018.3.20.), "미세먼지(PM2.5) 환경기준 미국 일본 수준으로 강화"
- PM-2.5 환경기준 강화 : 연평균(기존 25㎍/㎥ → 개정 15㎍/㎥), 일평균(기존 50㎍/㎥ → 개정 35㎍/㎥)

또는 10㎛를 기준으로 마치 선을 그어 구분하듯 큰 입자가 완전히 걸러지는 것은 아니며, 해당 크기를 기준으로 약간 큰 입자는 50% 보다 작은 효율로, 약간 작은 입자는 50% 보다 높은 효율로 포집된다. 그림 1.4는 미세먼지의 크기가 얼마나 작은지를 미소생체 단위들과 비교하여 보여주고 있다.[7)]



[그림 1.4] 미세먼지 크기

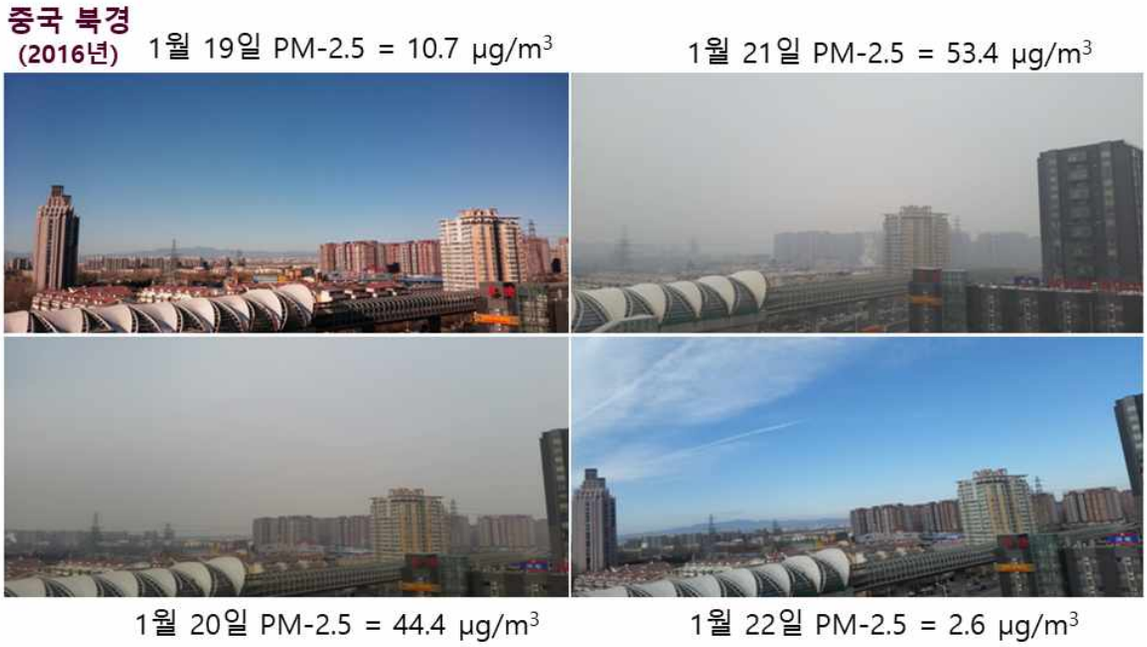
자료: Kaiser (2005)

(2) 영향

미세먼지 입자들은 인간의 눈에는 보이지 않는다. 하지만 대기 중에 입자 개수가 많으면, 특히 인위적으로 생성되는 작은 입자들은 태양빛을 효과적으로 산란시키는데 빛의 삼원색인 빨강, 초록, 파랑 빛을 산란시켜 하늘을 희뿌옇게 만들어 시정을 감소시킨다(그림 1.5)[8)]. 기상청에서는 이를 기상현상의 하나인 연무(haze)로 정의하고 있다.

미세먼지는 그 크기와 무게에 따라 차이는 있지만, 통상적으로 대기 중에서 약 1주일 정도 체류할 수 있는데, 좁은 규모에서는 인체의 건강에, 넓은 지구 규모에서는 기후변화에 영향을 미친다. 어떻게 이 작은 입자들이 이런 작용을 하는 것일까? 여러 가지 특성이 복합적으로 더해진 결과지만 입자의 조성과 가장 큰 연관이 있다.

7) Kaiser, J. (2005), Mounting Evidence Indicts Fine-Particle Pollution, Science, 307, 1858-1861.
8) 국립환경과학원 (2017), "한중 공동연구단 운영지원 사업", 고려대학교.



[그림 1.5] PM-2.5 농도와 시정

자료: 국립환경과학원 (2017)

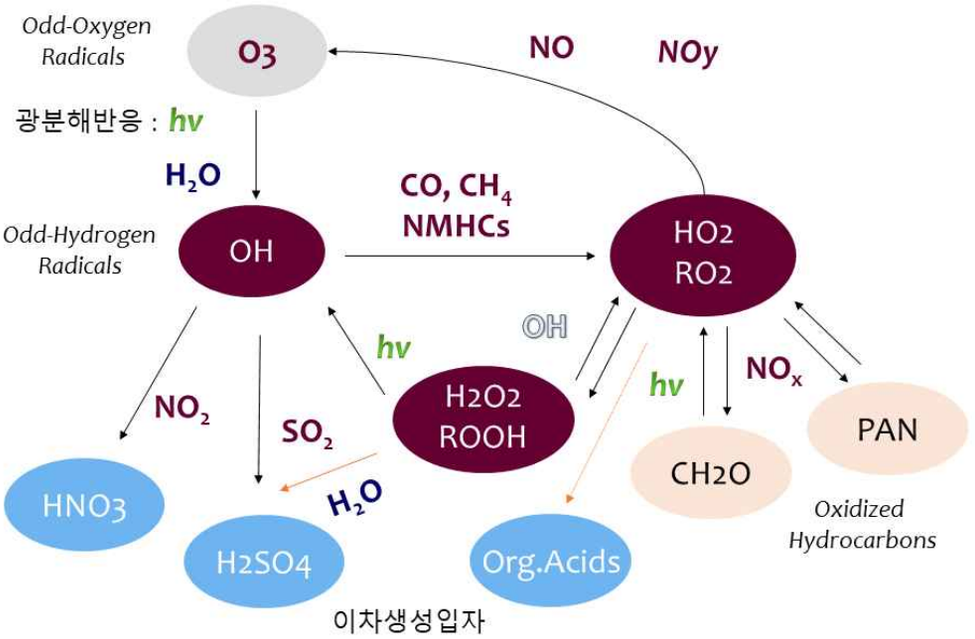
(3) 생성

지구의 대기는 태양계 내 이웃하는 금성이나 화성의 대기와는 아주 다르게 산소가 21%를 차지한다. 덕분에 성층권에는 오존이 다량 존재해 자외선을 차단하며, 인간과 생태계가 존재하는 지구 표층에서는 오존이 대기 중으로 배출되는 각종 오염물질을 산화시키는 광화학 반응을 통해 우리가 숨 쉬는 공기를 깨끗하게 정화시킨다 (그림 1.6).

오존은 햇빛 중 자외선에 의해 광분해 된 후에 물분자와 반응하면 반응성이 매우 큰 OH라는 라디칼(수산기)[9]을 만든다. 이 OH가 대기 중으로 유입되는 거의 모든 오염물질을 공격해 산화반응을 시작한다. 일부 기체는 대단히 안정적이어서 이 공격을 받지 않고 대기 중에 오래 머무를 수 있는데, 이산화탄소(CO_2)나 프레온가스(CFCs)[10]와 같은 온실기체가 대표적인 물질이다.

광화학 반응과 같은 산화과정에서 질소산화물(NO, NO_2)이 충분하면 오존이 다량 생성되며, 미세먼지 또한 이때에 함께 생성된다.

9) 라디칼(radical)은 짝을 이루지 않고 홀로 존재하는 전자를 가진 원자, 분자, 이온 등의 화학종으로 반응성이 크다.
10) 염화불화탄소(CFCs, Chloro Fluoro Carbons) : 염소와 불소를 포함한 일련의 유기 화합물을 총칭하며 보통 프레온가스(Freon Gas, 듀폰사의 상표명)라고 불림. 대표적인 성층권 오존층 파괴 물질이며, 온실기체임. 2010년부터 사용이 금지됨.



[그림 1.6] 대기 중의 화학반응

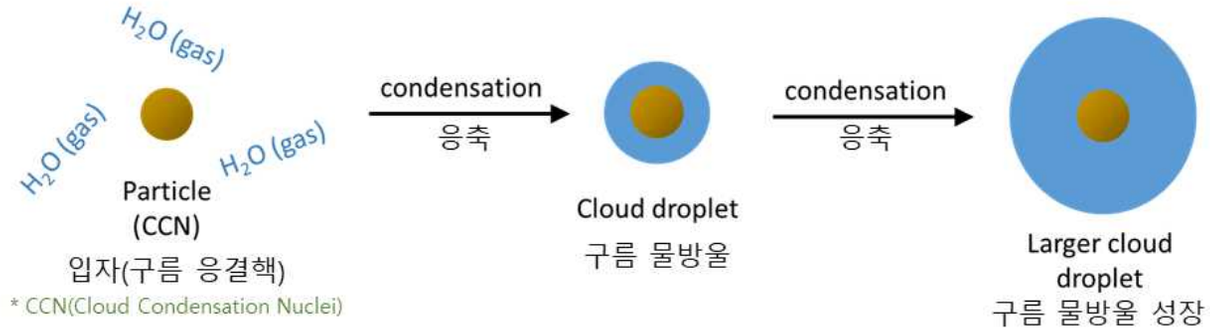
대기의 1/3은 육지와 2/3는 바다와 접해 있는데, 지구의 표층에는 탄소(carbon), 질소(nitrogen), 황(sulfur) 등의 성분이 매우 풍부하다. 이들은 식물과 동물을 포함한 지구 생태계의 주요 구성 성분이기도 하다. 만일 나무나 석탄을 태우면 그 안의 탄소, 질소, 황 등의 성분이 공기 중 산소와 반응해 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO_2), 휘발성 유기화합물(VOCs, Volatile Organic Compounds), 일산화질소(NO), 이산화질소(NO_2), 이산화황(SO_2) 등의 산화물로 변환되어 대기 중으로 배출된다. 그리고 모든 연소 과정에서는 고온 조건에서 공기의 주성분인 질소와 산소가 반응하여 질소산화물($NOx=NO+NO_2$)을 생성한다. 난방을 위해 연료를 태우거나, 집에서 조리를 하거나, 공장을 가동하거나, 자동차・배・항공기 등의 운송수단을 사용하는 과정에서, 그리고 산불이 자연적으로 발생하더라도 이들 오염물질이 발생해 대기로 배출된다.

만일, 이 물질들이 그대로 대기 중에 남는다면 인간은 가스 중독으로 죽음을 면하기 어려웠을 것이다. 하지만 다행스럽게도 지구 대기는 광화학반응에 의한 자연정화로 이러한 불행한 일이 발생하지 않는다. 대기로 배출된 오염물질은 대기를 따라 움직이는 도중 산화되어 궁극적으로 황산(H_2SO_4), 질산(HNO_3), 각종 유기산 등의 산성기체(acid)가 되어 공기 중 양이 가장 많은 수증기를 잘 끌어모아 입자로 변환된다.

자연에서는 이런 산성 물질을 중화시키는 장치 또한 작동한다. 암모니아(NH_3) 기체가 가장 대표적인 중화물질로 주로 농업과 축산 과정에서 발생된다. 암모니아 기체는

황산이나 질산 기체와 직접 반응하여 입자를 생성하기도 하며 이미 생성된 입자의 산성도에 따라 입자상으로 전환되므로 산성입자가 많은 경우 미세먼지의 양을 증가시킬 수 있다. 이때 비록 미세먼지가 생성되기도 하지만, 미세먼지가 생성되는 과정은 궁극적으로 대기로 배출된 오염물질을 다시 표층으로 되돌려 보내기 위한 과정이다. 즉, 대기로 배출된 오염물질을 다시 지표로 환원시키기 쉽게 변환시켜 대기로부터 제거하는 메커니즘으로 이해될 수 있다. 마치 인간과 지구생태계의 유지를 위해 미리 설계되어 지구 안에 장착된 일종의 붙박이 시스템과도 같다. 이 자연의 과정에 인간이 크게 개입하여 고농도 미세먼지가 발생했고 그 피해를 사람들이 입게 된 것은 아이러니한 일이 아닐 수 없다.

대기 중 미세먼지의 존재는 또한 담수를 공급해주는 비를 만드는데도 필수적이다. 일반적으로 수증기만 있으면 비가 만들어지는 것으로 생각하기 쉬운데 실제로는 수증기를 끌어모아 응결하도록 돕는 응결핵이 없으면 상대습도가 100%를 넘더라도 구름 입자가 생성되지 않는다. 미세먼지가 그 응결핵 역할을 한다. 따라서 미세먼지가 없다면 구름과 빗방울이 형성되기 어렵다(그림 1.7).



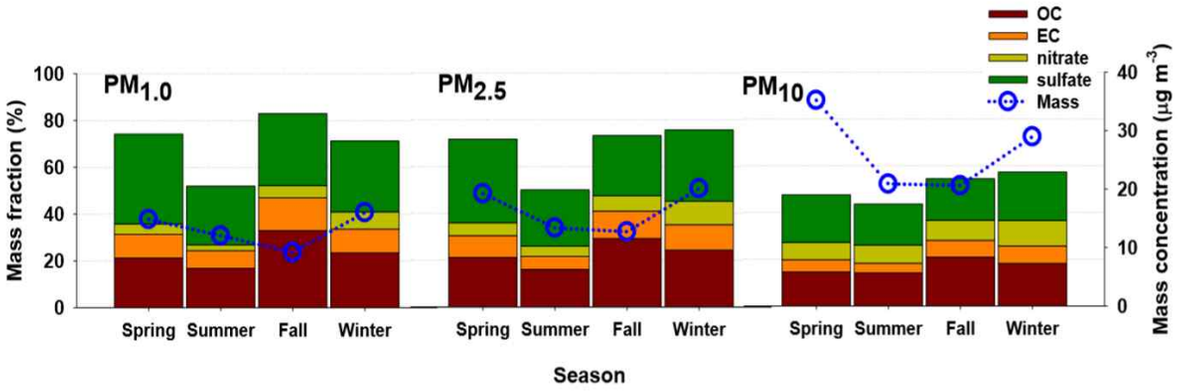
[그림 1.7] 미세먼지가 구름응결핵(CCN)으로 구름 입자로 성장되는 과정

(4) 조성

미세먼지를 채취해 화학조성을 분석하면, 광화학반응에 의해 2차적으로 생성된 황산염(SO_4^{2-}), 질산염(NO_3^-), 암모늄염(NH_4^+) 등의 무기이온과 유기탄소(OC, organic carbon) 그리고 직접 배출되는 무기탄소(EC, elemental carbon) 등이 주요 성분으로 나타난다,

이들 각 성분의 농도와 질량에 대한 기여도는 채취하는 입자의 크기(PM-10, PM-2.5, PM-1.0)에 따라, 지역과 계절, 그리고 기상 특성에 따라 달라진다. 그림 1.8[11]은 제주

고산에서 1년간 측정된 PM-10, PM-2.5, PM-1.0의 조성 변화를 비교한 사례로서, 계절에 따라 미세먼지 조성에 많은 변화가 있음을 보여주고 있다.



[그림 1.8] 제주도 고산에서 2007~2008년에 측정된 PM-10, PM-2.5, PM-1.0의 계절에 따른 주요 조성의 변화

자료: Lim et al. (2012)

만일 측정지역이 사막 근처나 그 풍하(바람이 불어나가는 쪽)에 위치한다면 미세먼지는 토양입자의 영향이 크며, 바닷가 근처라면 해염입자의 영향이 커서 일반적으로 PM-10에서 알칼리성 이온인 칼슘(Ca^{2+}), 마그네슘(Mg^{2+}), 나트륨(Na^{+}), 염소(Cl^{-}) 등과 금속성분인 규소(Si), 철(Fe), 알루미늄(Al) 등의 농도가 증가한다. 우리나라는 주로 봄철 황사의 영향을 받아 PM-10 농도가 증가할 때 이들 화학물질의 농도가 증가한다.

반면 인위적으로 생성되는 황산염, 질산염, 암모늄염, 탄소성분은 주로 작은 입자를 이루고 있으므로 PM-2.5와 PM-1.0의 성분을 분석하면 이들이 대부분을 차지한다. 따라서 대도시나 산업단지 그리고 그 주변에는 이들 성분이 PM-2.5나 PM-1.0의 농도를 증가시킨다. 유기탄소(OC)와 무기탄소(EC)는 대부분 연소과정에서 생성되는데, 연소되는 재료와 연소 환경에 따라 발생되는 OC와 EC의 농도가 다르다. 특히 EC는 나노크기로 존재해 질량보다는 개수농도에 대한 기여가 더 크며, OC는 아주 많은 종이 극미량에서부터 높은 농도까지 존재하므로 종별로 농도를 일일이 다 규명하지 못한다. 이 탄소성분은 인체 위해성이 크기 때문에 건강영향 측면에서 관심이 높다.

11) Lim. S. et al. (2012), Ionic and carbonaceous compositions of PM10, PM2.5 and PM1.0 at Gosan ABC superstation and their ratios as source signature, Atmospheric Chemistry and Physics, 12, 1-18.

(5) 미세먼지와 기후변화

대기 중 오염물질 농도는 과거 산업혁명을 기점으로 급속하게 증가하기 시작했다. 인위적인 배출이 현재처럼 크지 않았을 산업혁명 이전 시대에는 미세먼지 농도가 현재보다 낮았겠지만, 미세먼지가 만들어지는 과정은 크게 다르지 않았을 것이므로 질산염, 황산염, 유기/무기 탄소 등이 주요 성분이었을 것이다. 실제 그린랜드나 남극대륙에서 빙하시료(ice core)를 시추해 화학 조성을 분석하면 황산염과 토양입자 성분 그리고 EC 입자들이 관찰된다(IPCC, 2013)[12]. 이들은 과거 큰 화산폭발을 추적하거나 먼지와 생체연소(biomass burning) 영향을 추적하는데 유용한 지표(indicator)로 사용된다.

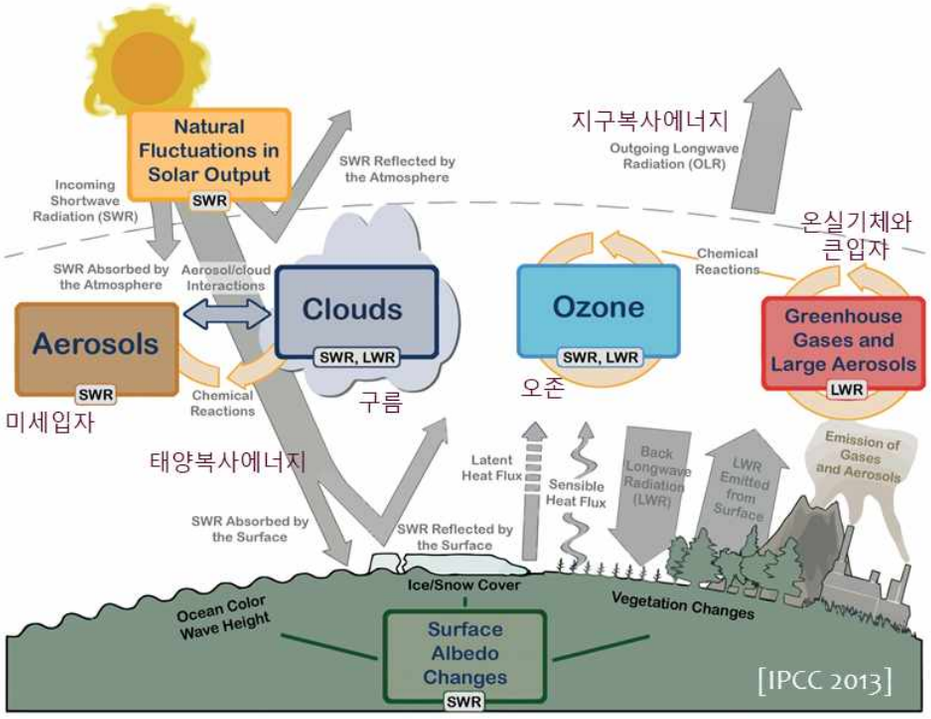
현재 산업시설과 도시에서 배출되는 이산화황(SO_2)은 과거에는 화산폭발 시 분출되거나 바다에 서식하는 플랑크톤에 의해 공급되었고, 현재 화석연료 연소 과정에서 배출되는 일산화질소(NO)와 이산화질소(NO_2)는 과거에는 산불이나 대기 상층에서 번개에 의해 공급되었을 것이다. 유기탄소(OC)는 산림에서 나무가 방출하는 자연적 휘발성유기화합물(Biogenic volatile organic compounds, BVOCs)에 의해 공급되어, 아마 과거에도 지구상에 비를 내리기에 충분할 정도의 미세먼지 농도는 유지되었을 것이다.

그러나 산업혁명이 시작되고 인류가 다량의 화석연료를 소비하며 다량의 오염물질을 대기로 배출시키면서 대기 조성 변화에 미치는 인간의 영향이 크게 증가해 자연적인 배출을 능가하게 된 것이다. 일부 전문가는 이를 강조해 21세기를 인류세(anthropocene)[13]로 명명하기도 한다.

황산, 질산, 암모늄, 유기탄소 등으로 구성된 미세먼지는 직접 태양빛을 산란시키거나 구름응결핵이 되어 구름을 형성하므로 지구로 유입되는 태양에너지의 양을 감소시켜 기후에도 영향을 미친다(그림 1.9). 다만 무기탄소(EC) 성분은 짙은 색에 의해 양이 증가하면 태양에너지 흡수가 증가해 온난화에 기여한다. 따라서 오존과 더불어 단수명 온실기체로 구분되는데 이는 대기오염과 기후변화가 서로 밀접하게 관련되어 있음을 보여주는 좋은 예이다.

12) IPCC Working Group I. (2013), Climate Change 2013-The Physical Science Basis: Summary for Policymakers. Intergovernmental Panel on Climate Change.

13) 인류세(anthropocene) : 퇴적된 지층을 기준으로 지구의 시대를 나누어 과거 1만년전부터를 '홀로세'로 명명하는데, 21세기 현재는 인간이 지구환경에 막대한 영향을 끼치는 시대임을 강조해 만들어진 단어(성층권 오존구멍 생성 원인을 규명한 공로로 1995년 노벨 화학상을 수상한 폴 크루첸 박사가 제안)



[그림 1.9] 미세먼지의 지구 규모에서의 영향

자료: IPCC (2013)

(6) 과학적 이해 수준

구름이 만들어지고 비가 오려면 구름 응결핵이 필요한데 그 역할을 하는 미세먼지가 생성되는 과정을 우리는 아직도 정확하게 이해하지 못한다. 마이크론 크기의 미세먼지가 밀리미터 크기의 빗방울로 성장하는 과정에서 지름은 천배(10^3), 체적은 십억(10^9) 배가 증가한다. 이런 천문학적인 성장과 더불어 나타나는 자연현상을 현재의 과학기술 수준에서 충분하게 이해하지 못하고 있다.

미세먼지의 생성과 제거 메커니즘에 대한 이해에 있어서도 이러한 한계가 있다. 미세먼지를 만드는 배출원을 찾아 배출만 줄이면 미세먼지가 감소할 것이라고 간단하게 생각할 수 있다. 하지만 배출량 감소와 비례해서 미세먼지 농도가 감소하지는 않는다. 지구의 환경은 여러 요소들이 복잡하게 얽혀있을 뿐만 아니라 미세먼지 대부분은 대기 중에서 2차적으로 생성되는 특성 때문이다.

배출을 줄이더라도 기상상태(온도, 습도, 풍향, 풍속 등)에 따라 공기의 움직임에 따라 대기 중에서 생성되는 미세먼지의 양은 크게 달라지지 않을 수 있다. 따라서 미세먼지가 대기 중에서 생성되는 기작을 정확하게 이해하지 못하면 미세먼지 문제를 근본적으로 해결하는데 한계가 있으므로, 이를 규명하기 위한 꾸준한 노력이 필요하다.

2. 미세먼지의 위험

미세먼지의 영향은 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 동북아시아에서 전지구적 규모에 이르는 지구환경 측면에서는 앞부분에 기술되었듯이 직접 햇빛을 산란시키거나 구름응결핵을 만들어 간접적으로 지구로 유입되는 태양에너지를 반사시켜 냉각효과를 유발한다. 이러한 영향은 '기후변화에관한정부간협의체'(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)를 통해 지속적으로 보고되고 있으며(예를 들어, IPCC 2013년 보고서), 집중적인 연구 결과로 불확실성이 조금씩 줄어들고 있다.

반면 작은 도시나 지역 규모에서는 인간의 건강에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 국제보건기구(WHO)에서 인체에 미치는 영향을 기반으로 여러 단계의 기준을 설정해 제시하고 있는데(표 1.1), 각 나라는 이를 기반으로 자신의 국가 상황을 고려해 환경기준을 설정한다.

[표 1.1] 국제보건기구(WHO)의 PM-2.5 기준

구분	PM-2.5 [㎍/㎥]		건강영향 : 사망위험률
	연평균	일평균	
잠정목표 1	35	75	권고기준 대비 15 % 증가
잠정목표 2	25	50	잠정목표1 대비 6% 감소 (2-11%)
잠정목표 3	15	37.5	잠정목표2 대비 6% 감소 (2-11%)
권고기준	10	25	사망위험률 심폐질환&폐암 사망률 증가 최저

자료: 환경부 (2019), "미세먼지 오해와 진실: 무엇이든 물어보세요"

우리나라는 2015년 환경기준에 초미세먼지(PM-2.5)를 추가하였다. 당시에는 WHO의 「잠정목표 2」를 따르다가, 미세먼지 문제가 심각해지고 정부의 정책과 환경기준 수준에 대한 여러 비판에 대응하여 2018년 3월 환경기준을 미국과 일본의 수준인 「잠정목표 3」으로 상향 조정하였다.

국제보건기구(WHO) 산하 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)에서는 2014년 세계암리포트(World Cancer Report)를 출간하면서 대기오염 자체와 미세먼지를 인간에게 암을 발생하는 Group 1(인체발암물질) 물질로 지정하였다(표 1.2)[14].

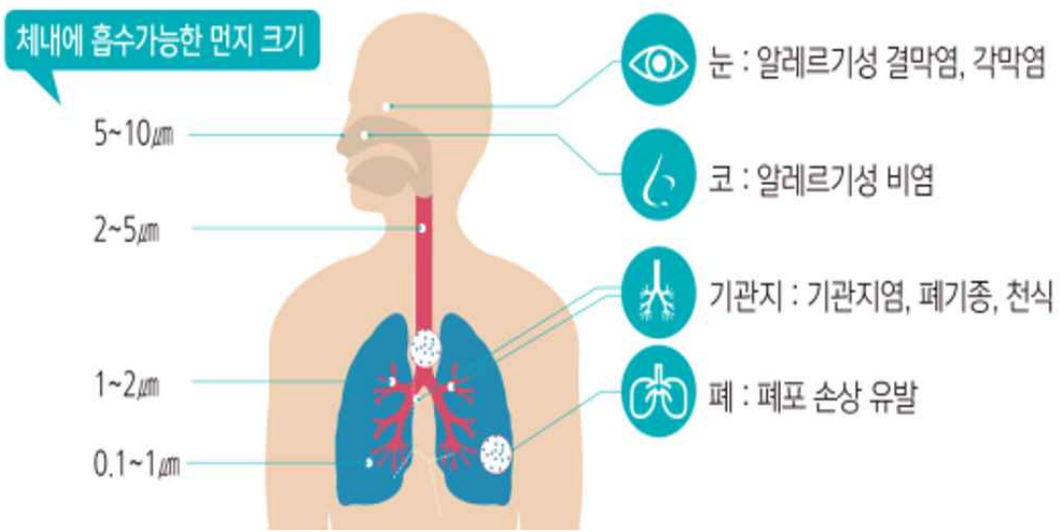
14) World Health Organization(WHO), International Agency for Research on Cancer(IARC), (2014), World Cancer Report 2014, Edited by B. W. Stewart and C. P. Wild,

[표 1.2] 인간에게 암을 일으키는 Group 1으로 지정된 대기오염물질

오염 종류	오염물질	암 종류
엔진 배기가스	디젤엔진 배기가스 (diesel engine exhaust)	폐
대기	대기오염 (outdoor air pollution) 먼지 (particulate matter) 결정질 규소 분진 (silica dust)	폐
실내공기	실내 가정용 석탄연소 담배 흡연 / 이차흡연	폐

자료: WHO/IARC (2014)

이러한 미세먼지의 건강 영향은 입자의 크기에 따라 결정되는데 1㎛보다 큰 입자는 코에서 걸러지는 반면, 나노 크기의 입자는 호흡기 내 깊숙이 침투하여 폐포까지 도달할 수 있다(그림 1.10).

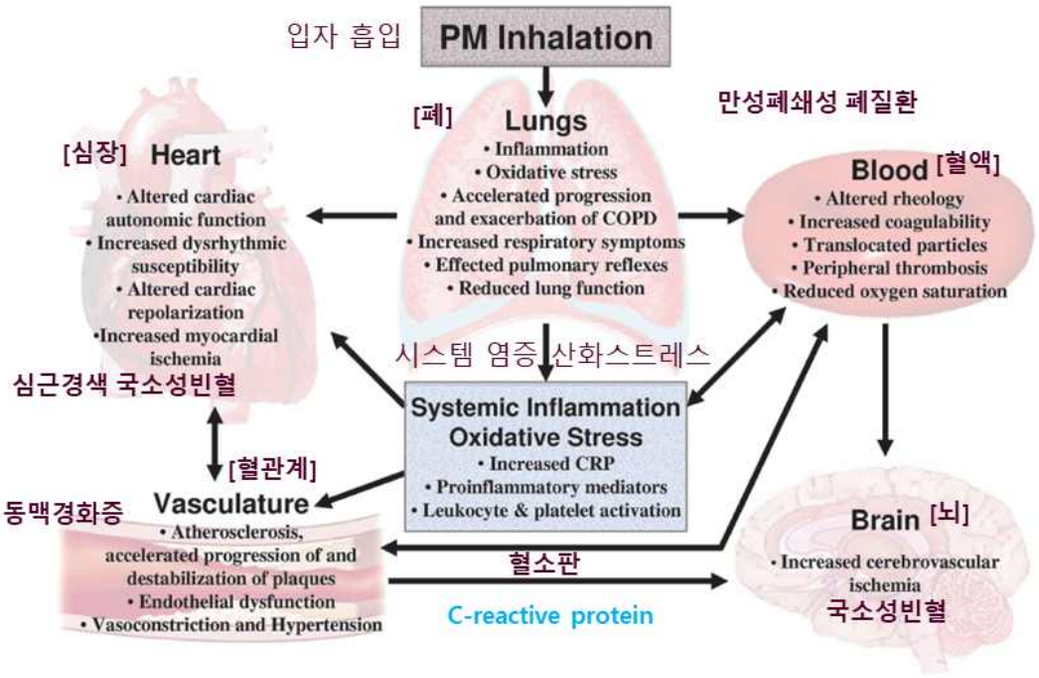


[그림 1.10] 미세먼지 입자 크기와 그로 인해 발생할 수 있는 질병

자료: 환경부 (2016), "바로 알면 보인다: 미세먼지, 도대체 뭘까?"

그리고 호흡기 뿐 아니라 심혈관계와 뇌까지 그 영향이 미칠 수 있음이 여러 연구결과로 발표되었다(그림 1.11)[15]. 미세먼지의 건강 영향을 파악하기 위한 연구는 사람을 대상으로 직접 실험을 할 수 없으므로 쥐를 이용하거나 대기질과 역학자료를 바탕으로 수행되고 있다.

15) Pope III, C. A. & Dockery, D. W. (2006), Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect, Journal of Air & Waste Management Association, 56, 709-742.



[그림 1.11] 미세먼지로 인해 발생할 수 있는 질병

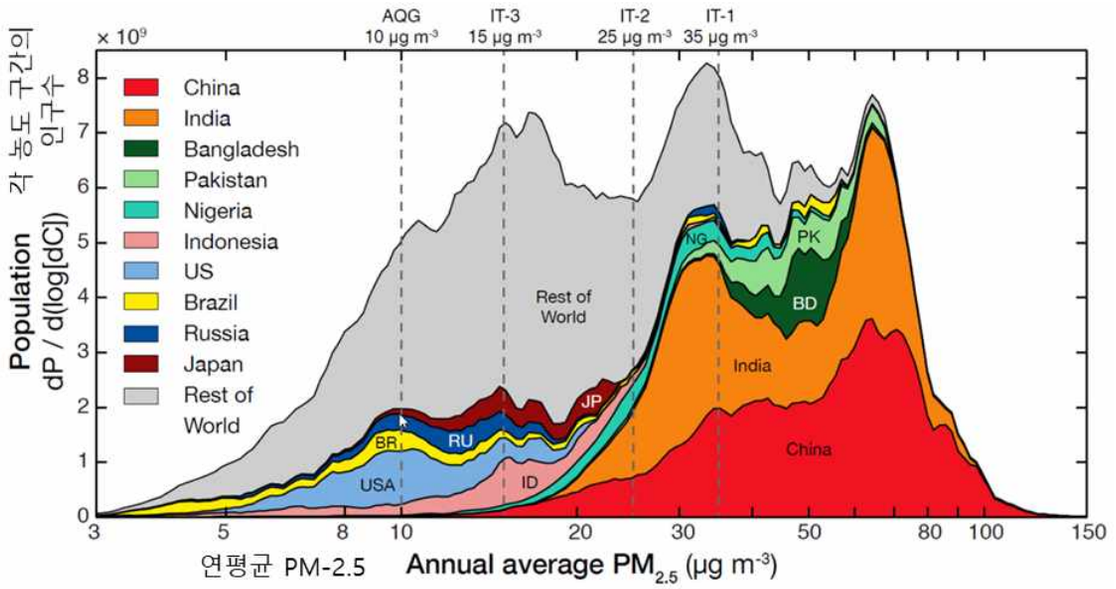
자료: Pope III & Dockery (2006)

지금까지 연구된 결과를 기반으로 국가별로 일정 미세먼지 농도에 노출된 인구수를 파악하면, 중국과 인도, 방글라데시, 파키스탄 등 주로 인구밀도가 높은 아시아의 개발도상국가에서 고농도의 미세먼지에 노출 정도가 심한 것으로 파악된다(그림 1.12)[16]. 미세먼지에 의한 초과사망자 수를 조사해도 유사한 결과가 나타난다(그림 1.13)[17].

미세먼지 농도는 근본적으로 인구밀도와 함께 경제와 환경관리 역량과도 높은 상관성이 있음을 알 수 있는데, 선진국의 경우 인구밀도가 높은 국가들도 개발도상국과는 대조적으로 대기오염이 심하지 않으며 상대적으로 미세먼지에 의한 위험도 크지 않다.

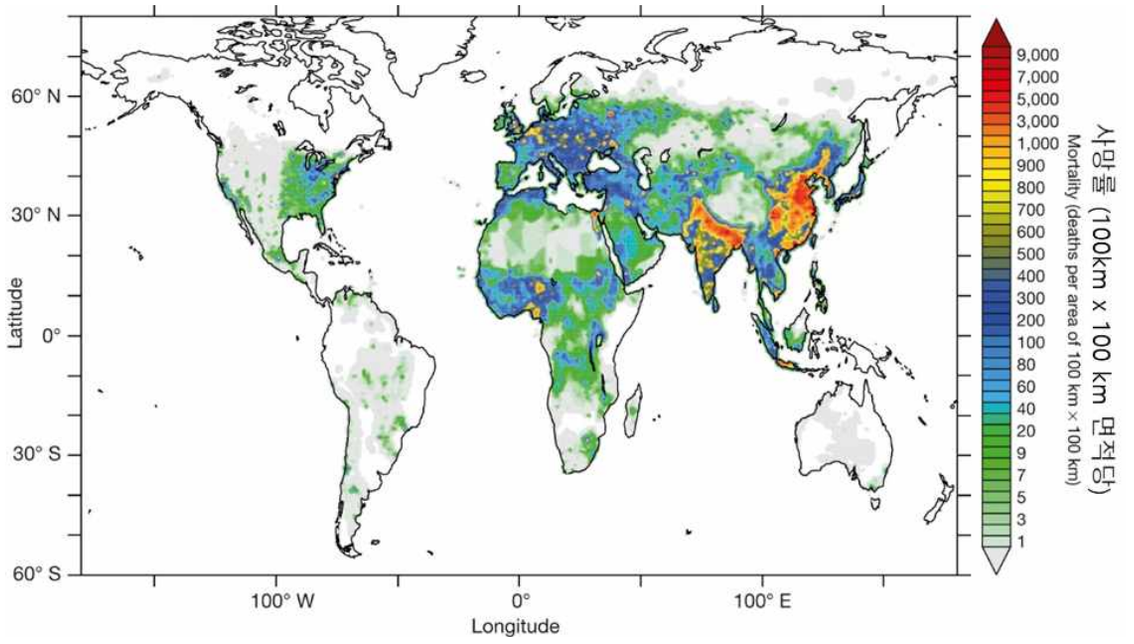
이러한 측면에서 볼 때, 이제는 미세먼지로 인한 대기환경의 위험정도가 한 국가의 전반적인 수준을 결정하는 척도로도 손색이 없는 듯하다.

16) Brauer, M. et al. (2016), Ambient Air Pollution Exposure Estimation for the Global Burden of Disease 2013. Environmental Science & Technology. 50, 79-88.
17) Lelieveld, J. et al. (2015), The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale, Nature, 525, 367-371.



[그림 1.12] 전세계 국가별 국제보건기구 기준별 PM-2.5 농도에 노출되는 인구 수

자료: Brauer et al. (2016)



[그림 1.13] 전세계 PM-2.5에 의한 초과 사망자 수

자료: Lelieveld et al. (2015)

3. 우리나라의 미세먼지 농도 변화

우리나라는 1990년대부터 대기오염 측정망을 확충하기 시작하여 현재 전국적으로 400여 개에 가까운 다양한 목적의 측정소가 설치되어 있다. 그중 도시대기오염 측정망에서는 오존(O_3), 이산화질소(NO_2), 일산화탄소(CO), 이산화황(SO_2), 초미세먼지(PM-2.5), 미세먼지(PM-10) 등의 기준성 대기오염물질들의 농도가 1시간 간격으로 측정된다.

이러한 항목 중 PM-2.5는 가장 늦게 대기환경기준에 포함되어 2015년부터 전국적으로 측정되기 시작하였다. 측정망 관측소에서 산출되는 자료는 '에어코리아(AIRKOREA) 홈페이지'[18]를 통해 실시간으로 공개된다. 대기오염측정망의 측정 목적 및 측정항목은 표 1.3과 같다.

18) 대기오염도 실시간 공개시스템(에어코리아), www.airkorea.or.kr

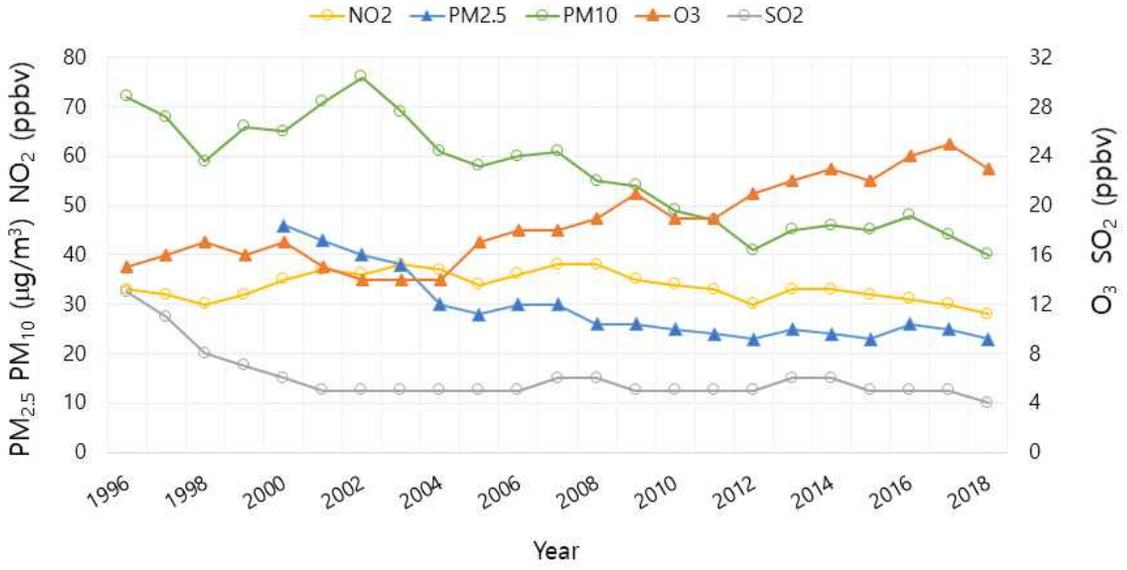
[표 1.3] 「대기오염측정망 운영계획(2016~2020)」에 따른 대기오염측정망의 설치목적 및 측정항목

구 분			운영 주체	측정 주기	설 치 목 적	측 정 항 목
일반측정망	일반대기오염측정망	도시대기	지자체	연속	도시지역의 평균대기질 농도를 파악하여 환경기준 달성여부 판정	SO_2, CO, NOx, 미세먼지(PM-10), 초미세먼지(PM-2.5), O_3, 풍향, 풍속, 온도, 습도
		교외대기	국가	연속	광범위한 지역의 배경농도 파악	SO_2, CO, NOx, 미세먼지(PM-10), 초미세먼지(PM-2.5), O_3, 풍향, 풍속, 온도, 습도
		국가 배경농도	국가	연속	국가적인 배경농도를 파악하고 외국으로부터의 오염물질 유입·유출 상태, 장거리이동 현황 등 파악	SO_2, CO, NOx, 미세먼지(PM-10), 초미세먼지(PM-2.5), O_3, 풍향, 풍속, 온도, 습도
		도로변 대기	지자체	연속	자동차 통행량과 유동인구가 많은 도로변 대기질 파악	SO_2, CO, NOx, 미세먼지(PM-10), 초미세먼지(PM-2.5), O_3, 풍향, 풍속, 온도 ※필요시 Pb, HC, 교통량 추가
	특수대기오염측정망	유해대기물질	국가	수동에서 자동으로 순차적 전환 (VOCs) ※18년 시행 :수동(월2회)	도시지역, 주요 산단, 배경농도지역에서 특정유해대기물질에 의한 오염 실태 파악	VOCs(휘발성유기화합물): 16종
						PAHs(다환방향족탄화수소): 16종
		대기 중금속	지자체	수동 (매월 2째주)	도시지역 또는 산단 인근지역에서 중금속에 의한 오염실태 파악	Pb, Cd, Cr, Cu, Mn, Fe, Ni, As, Be, Al, Ca, Mg
		광화학 대기 오염 물질	국가 지자체	연속	도시지역의 오존생성의 원인물질인 휘발성유기화합물질(VOCS)의 농도를 파악하여 오존오염현상을 규명하고 오존예보 등을 위한 기초 자료로 활용	NOx, NOy, 미세먼지(PM-10), 초미세먼지(PM-2.5), O_3, CO, VOCs(ethane 등 56종), 풍향, 풍속, 온도, 습도, 일사량, 자외선량, 강수량, 기압, 카르보닐화합물
		산성 강하물	국가	수동 (강우시, 6일간격) ※ 수은항목은 연속 (단, 수은 습성침적량은 수동)	대기로부터 오염물질의 건성침착량 및 강우 . 강설 등에 의한 오염물질의 습성침착량 파악	건성: 초미세먼지(PM-2.5) 질량, 초미세먼지(PM-2.5) 중 이온성분(Cl, NO_3^-, SO_4^{2-}, NH_4^+, Na+, K+, Ca^{2+}, Mg^{2+}), 가스상(HNO_3, NH_3)
						습성: pH, 이온성분(Cl, NO_3^-, SO_4^{2-}, NH_4^+, Na+, K+, Ca^{2+}, Mg^{2+}), 전기전도도, 강우(설)량
						수은: 총가스상수은, 종별수은, 습성침적량
		지구대기	국가	연속	지구온난화물질, 오존층파괴물질의 대기 중 농도 파악	CO_2, CFC(-11,-12,-113), N_2O, CH_4
		초미세먼지 (PM-2.5) 성분	국가	수동 (6일간격)	인체위해도가 높은 초미세먼지(PM-2.5)의 농도 파악 및 성분파악을 통한 배출원 규명	초미세먼지(PM-2.5) 질량, 탄소성분(OC, EC), 초미세먼지(PM-2.5) 중 이온성분(Cl, NO_3^-, SO_4^{2-}, NH_4^+, Na+, K+, Ca^{2+}, Mg^{2+}), 중금속성분(Pb, Cd, Cr, Cu, Mn, Fe, Ni, As, Be)
집중측정망	백령도 수도권 경기권 중부권 충청권 호남권 영남권 제주도		국가	연속	국가 배경지역과 주요 권역별 대기질현황, 황사 등 장거리 이동 대기오염물질 감시 및 고농도 오염현상에 대한 원인 규명 * 백령도, 수도권, 제주도는 장거리 이동 대기오염물질 감시	미세먼지(PM-10), 초미세먼지(PM-2.5) 질량, 초미세먼지(PM-2.5) 중 탄소성분(OC, EC), 이온성분(Cl, NO_3^-, SO_4^{2-}, NH_4^+, Na+, K+, Ca^{2+}, Mg^{2+}), 중금속성분(Pb, Cd, Cr, Cu, Mn, Fe, Ni, As, Be) 장거리이동 대기오염물질(수은, 불화수소, 시안화수소, 염화수소, 포름알데히드) 등

자료: 환경부·국립환경과학원 (2019), "대기오염 측정망 설치·운영 지침"

서울시는 보건환경연구원이 운영하는 관측소에서 정부의 관측보다 빨리 PM-2.5 측정을 시작하여 현재 더 긴 기간의 자료를 확보하고 있으므로 본 절에서는 서울시 자료를 이용하여 서울시의 미세먼지 농도 수준을 분석하였다(그림 1.14).[19]

그림 1.14에 따르면, 1996년부터 2018년 사이 20여 년 동안 서울시 전체 PM-10 연평균 농도는 1년에 1.4㎍/㎥씩 감소하였고, PM-2.5 연평균 농도는 비슷한 수준인 1년에 1.1㎍/㎥씩 감소하였다.



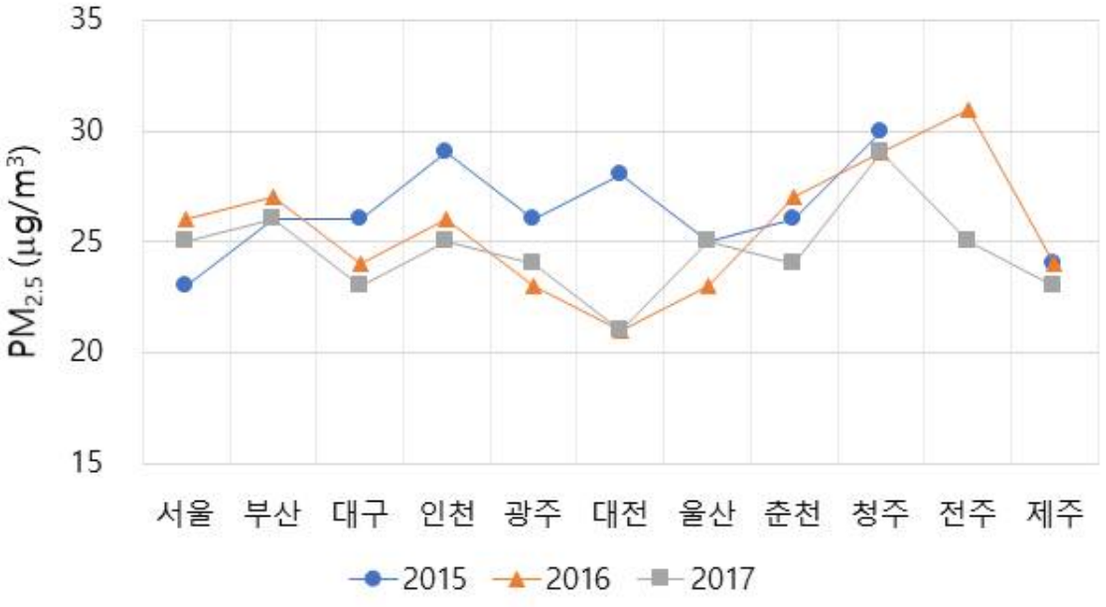
[그림 1.14] 서울시 기준 대기오염물질의 1996~2018 연평균 농도 변화

자료: 서울시 (2018), "대기질 평가보고서 2017"

반면 오존(O_3)은 1년에 0.45ppbv 씩 증가하였고, 이산화질소(NO_2)는 증감을 반복하여 전체적으로는 큰 변화가 없었으며, 이산화항(SO_2)은 2000년대 초반까지 빠르게 감소하다가 이후로 일정한 추세를 보이고 있다. PM-10과 PM-2.5 모두 2012년 정도까지 감소하는 추세가 분명하다. 이는 대기환경 개선을 위한 정책의 효과와 노력의 결과로 평가된다. 하지만 PM-10의 연평균 농도는 황사 발생에 따라 크게 좌우되므로 변화 추세에 영향을 미치는데, 가장 분명한 예로 매우 강한 황사가 발생했던 2002년 농도가 가장 높았다. 2012년 이후 PM-10과 PM-2.5의 농도는 일정한 감소 추세를 보이지 않는다. PM-10은 2016년까지 다시 증가하다 감소하며 PM-2.5도 유사하게 2016년 약간 상승하였다. 최근에는 연변동성이 상대적으로 크고 게다가 PM-2.5 측정은 전국적으로는 2015년부터 실시되었으므로 불과 몇 년 동안의 자료를 기반으로 PM-2.5의 연변화를 단정하기는 어렵다.

19) 서울시 (2018), "대기질 평가보고서 2017", http://cleanair.seoul.go.kr/air_pollution.htm?method=average

서울 외 지역의 PM-2.5 측정자료는 2015년부터 산출되어 2017년까지 비교가 가능하다.[20] 2015년에서 2017년 3년 동안의 서울을 비롯한 10개 도시의 연평균 PM-2.5 농도를 비교하면 전반적으로 2015년의 농도가 2016년과 2017년에 비해 높다 (그림 1.15). 청주의 연평균 농도는 2015년에 가장 높았는데 청주는 이후에도 높은 농도가 유지되었지만 인천과 대전은 2016년 농도가 감소하며 연변동이 크게 나타났다. 전주는 2016년부터 자료가 산출되었는데 11개 도시 중 최고 농도를 보였으나 2017년 크게 감소했다. 제주시는 3년동안 낮은 농도가 계속 유지되었지만 3년 평균 농도는 24㎍/㎥으로 대전 23㎍/㎥에 이어 두 번째로 낮았다.



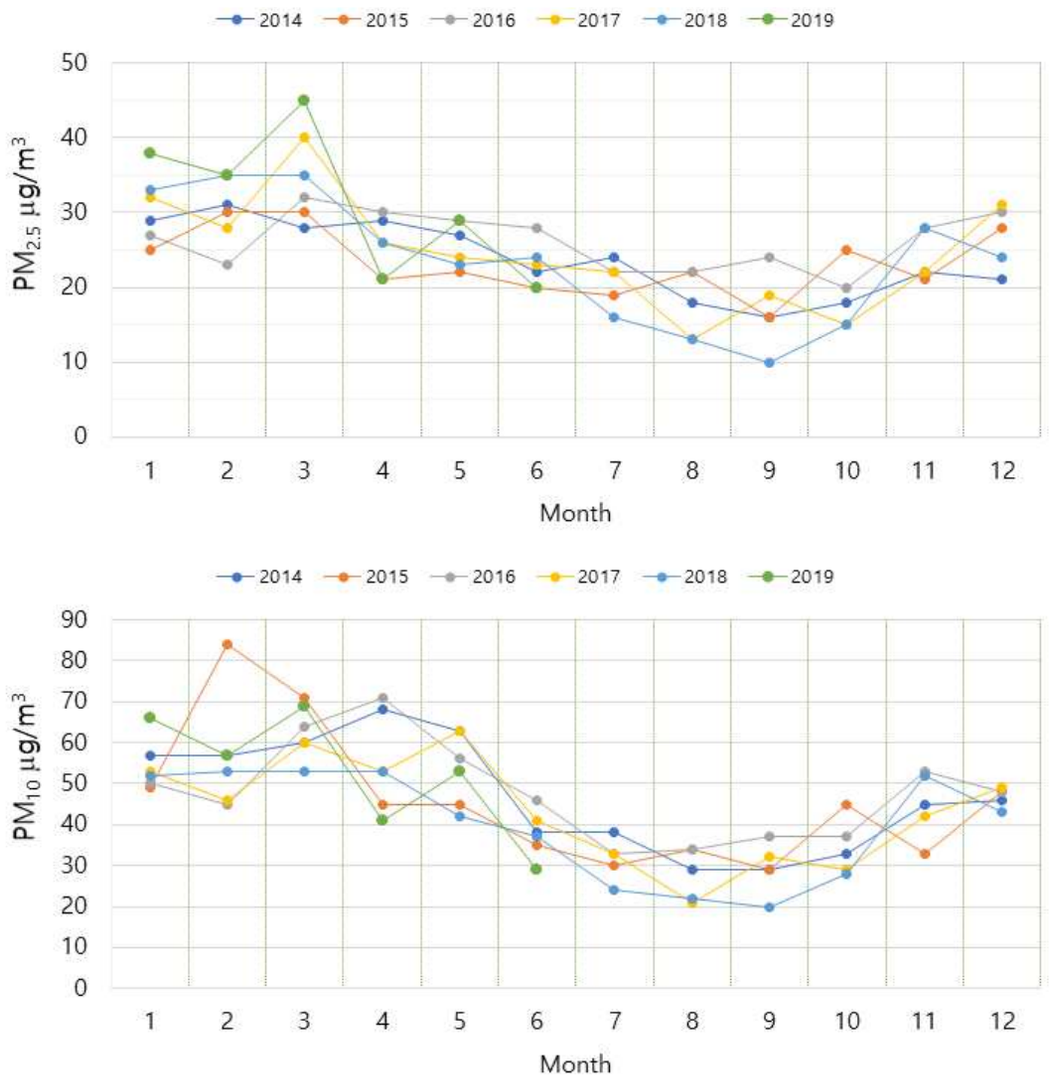
[그림 1.15] 2015~2017년 우리나라 주요 도시의 미세먼지(PM-2.5) 연평균 변화

자료: 국립환경과학원 (2018), "대기환경연보 2017"

2014년 1월부터 2019년 6월까지 연도별 월별 평균농도 변화는 1~3월에 높고 여름철에 낮은 우리나라 전역의 전반적인 오염물질 분포 특성을 보인다(그림 1.16).

PM-10도 여름철의 농도가 낮았지만 1~3월보다는 3~5월의 농도가 높은데 이는 3~5월에 주로 발생하는 황사의 영향도 포함하기 때문으로 분석된다. 따라서 PM-10의 연별 변동성도 이 기간이 가장 크다.

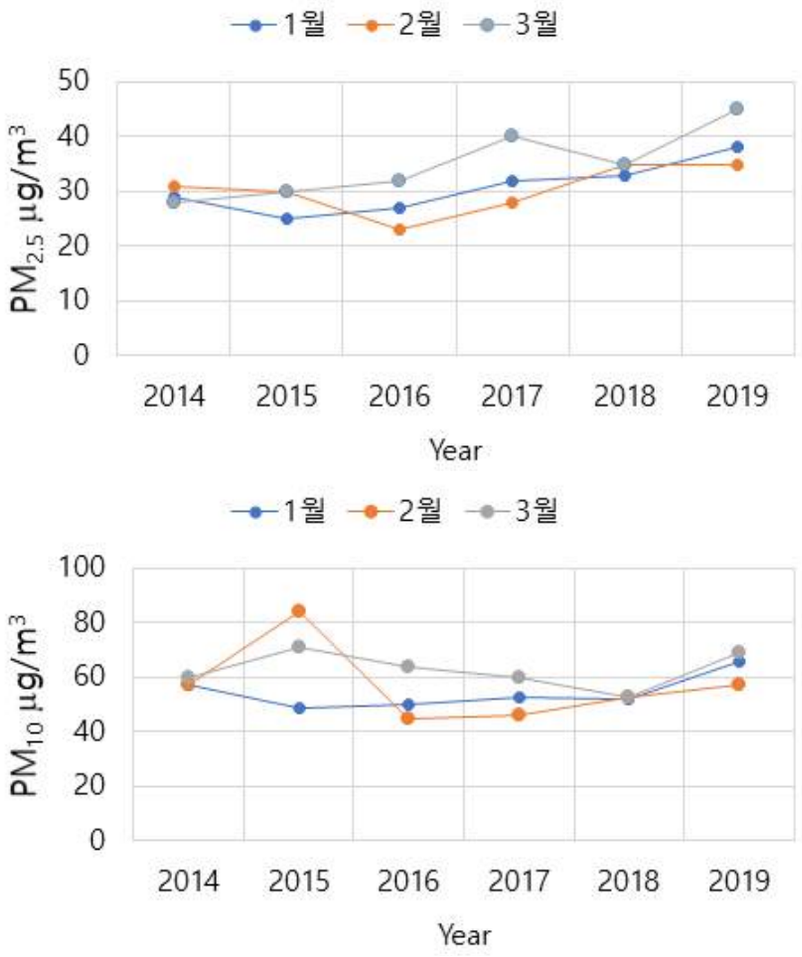
20) 국립환경과학원 (2018), "대기환경연보 2017"



[그림 1.16] 서울시 2014~2019년 PM-2.5(위)와 PM-10(아래) 월평균 농도 분포

2014~2019년 동안 PM-2.5의 월평균 농도는 1~3월에 가장 높고 변동성도 가장 큰데, 이는 고농도 미세먼지 발생과 관련이 있다. PM-2.5 주의보와 경보가 주로 이 기간에 발령되었다. 따라서 2014~2019년 동안 1~3월의 월평균 PM-2.5 농도를 비교하면 2014년부터 2019년까지 점차 증가하는 경향을 보인다(그림 1.17).

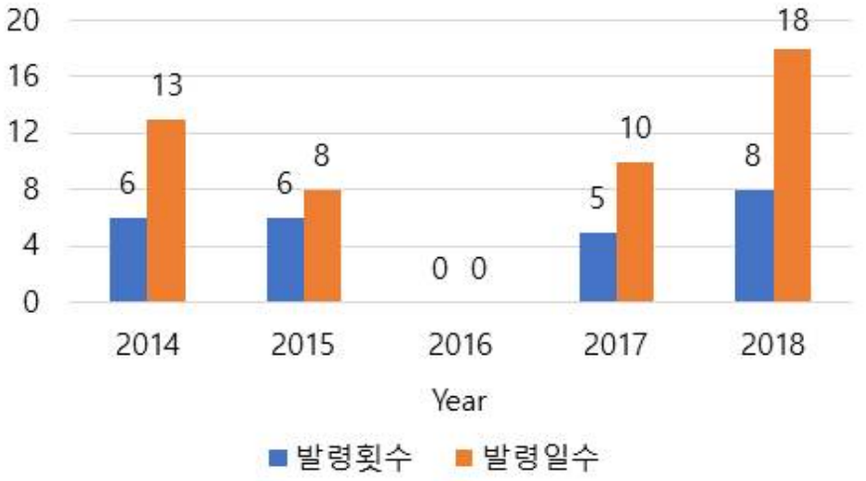
특히 1월과 3월은 연도에 따른 증가 경향이 분명하다. 이를 직선의 상관성으로 표시하면 상관계수가 0.8 이상인데 이는 그 경향성이 의미가 있음을 나타내는 것이다. 이에 대한 과학적 이유는 아직 설명할 수 없다. 하지만 PM-2.5 농도가 2016년 약간 증가했다가 현재 감소추세에 있음에도 국민이 체감하는 미세먼지의 심각성이 더욱 커지는 것은 이와 같은 고농도 발생 시기의 농도 증가 경향과 관련될 수 있다. PM-2.5와는 달리 1~3월 동안 연도에 따른 월별 평균농도의 유의미한 변화 경향성이 PM-10에는 나타나지 않는다.



[그림 1.17] 서울시 2014~2019년 미세먼지 농도가 높은 1~3월의 PM-2.5(위)와 PM-10(아래) 월평균 농도 변화

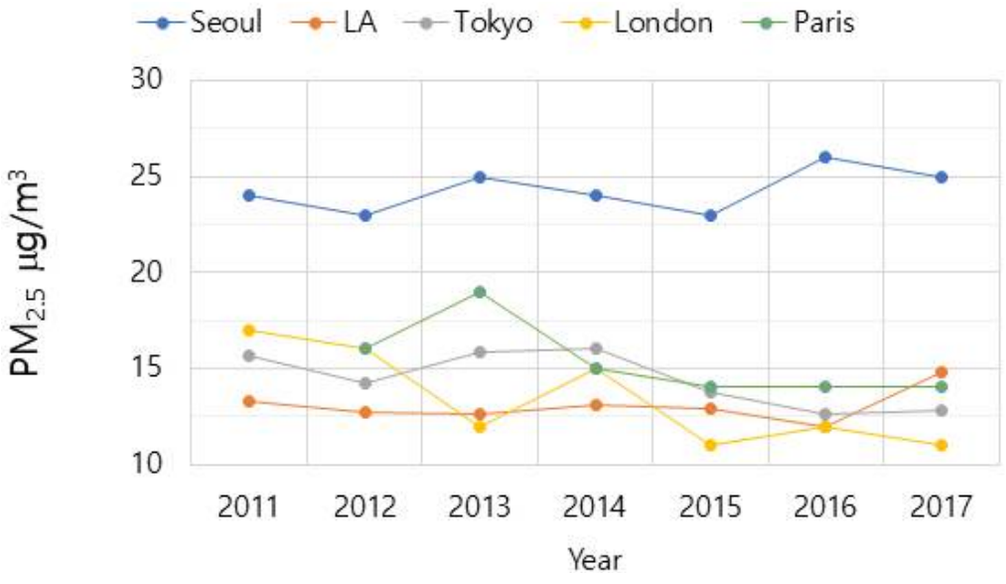
최근 5년 동안의 PM-2.5 미세먼지 주의보 발령횟수와 발령일수는 2016년을 기점으로 2017년과 2018년에 증가하였다(그림 1.18). 2018년부터는 서울에서 비상저감조치가 시행되었는데, 2018년과 2019년 모두 1월과 3월에 고농도 비상조감조치가 발령되었다. 이러한 겨울철 고농도 발생은 연평균에 영향을 주어 그림 1.14에 보이듯 PM-2.5 농도는 감소 추세에서 2016년을 기점으로 약간 상승하였다.

2016년에는 PM-2.5 미세먼지 주의보가 한 번도 발령되지 않았음에도 연평균 농도가 상승했는데, 이는 다른 해와는 달리 1~3월 겨울철 농도가 낮은 반면 4~6월의 농도가 높았고 여름철 농도가 다른 해에 비해 상대적으로 높았기 때문이다. 2014년부터 연도별 월평균 농도 변화는 2016년에 가장 작았다. 이러한 결과는 PM-2.5 농도의 연 변동성이 크며 고농도가 발생하는 겨울 뿐 아니라 낮은 여름에도 큰 것을 보여주는데, 이는 날씨의 변동성과 관련이 있음을 시사한다.



[그림 1.18] 2014~2018년 서울시 미세먼지(PM-2.5) 주의보 발령횟수와 발령일수

그림 1.19는 서울의 PM-2,5 연평균 농도를 미국 LA, 일본 동경, 영국 런던, 프랑스 파리 등의 선진국 대도시와 비교한 것이다. 2011년~2017년 사이 런던에서 PM-2.5 농도가 가장 크게 감소했고, LA는 오히려 2017년에 증가했으며, 서울의 농도는 이들 도시에 비해 높다. 서울은 PM-2.5 기준이 2018년 강화되었지만, 이들 도시는 우리보다 앞서 낮은 기준을 적용해 왔다.



[그림 1.19] 최근 7년('11~'17) 동안 서울과 선진국 주요 도시와의 연평균 미세먼지 농도 비교

자료: 에어코리아(www.airkorea.or.kr)

도시마다 기후, 지형 등의 지리적 특성과 인구, 주거형태 등 PM-2.5 농도에 영향을 미치는 인자들이 모두 다르다. 특히 전세계의 PM-2.5 농도 분포가 보여주듯 PM-2.5 농도는 인구밀도와 아주 밀접한 관계가 있다.

그리고 PM-2.5는 직접적인 배출에 더해 대기 중의 2차 생성이라는 복잡한 과정이 관여하므로 이러한 인자들을 함께 고려한 과학적인 이해가 우선되어야 하며 이에 기반한 정책 수립이 필요하다.

제1장 요약

- 질소와 산소 기체로 구성된 공기 중에 떠 있는 액체나 고체 입자를 통틀어 먼지(PM)라 부르며 지름이 2.5㎛ 보다 작은 것들을 PM-2.5 미세먼지로 구분한다.
- PM-2.5는 주로 화석연료 연소 등의 인위적 활동에서 배출되는 물질이 대기 중에서 복잡한 반응을 거쳐 생성되며, 황산염, 질산염, 암모늄염, 유기탄소, 무기탄소 등의 성분으로 이루어져 있다.
- 미세먼지는 빛을 산란시켜 시정을 감소시키고 구름 생성에 기여해 기후에 영향을 주는 동시에 인간의 건강에 악영향을 끼칠 수 있다.
- 우리나라 대기환경은 과거 20여 년 동안 현저하게 개선되었다. 오존 농도가 꾸준히 증가하고는 있지만, PM-10은 전국적으로 PM-2.5는 서울에서 연평균 농도는 뚜렷하게 감소하였다.
- 다만 최근 낮아진 농도 수준에서 감소 추세가 주춤한 동시에 2017년부터 1~3월에 PM-2.5 고농도 발생일과 월평균 농도가 증가했다.
- 따라서 집중 대응에도 불구하고 국민의 체감 농도와 우려는 줄어들지 않고 있다.

02

미세먼지 발생원인

1. 미세먼지 배출원과 생성 메커니즘 ···· 27
2. 국내 주요 배출원 및 미세먼지 기여도 ·· 30
3. 주변국들의 영향 ····· 37
4. 기상학적 요인은? ····· 49
5. 중국 등 국외영향은 얼마인가? ····· 54
6. 미세먼지 발생원인에 대한 주요 이슈 ·· 57
7. 요약 ····· 61

국민정책참여단

미세먼지 정책제안 참고자료집

제2장 미세먼지 발생원인

아주대학교 | **김순태**

미세먼지[21]는 대기 중에서 생성 과정이 매우 복잡하며, 국내 배출뿐만 아니라 다른 국가의 배출과 식생 등 자연 배출원에 의한 영향까지 매우 복합적으로 나타나는 오염 현상이다. 따라서 미세먼지 개선 대책 수립을 위해서는 발생원과 기여도 조사를 기반으로 미세먼지 농도에 대한 원인을 파악하는 과정이 우선적으로 이루어져야 한다.

제2장에서는 국내 주요 배출 영향에 대한 설명에 앞서 전반적인 미세먼지 배출원의 구분과 고농도를 포함한 농도 생성 과정을 살펴본다. 이를 토대로 배출과 농도의 정량적인 관계를 이해하기 위한 기여도 분석 방법을 소개하고, 국내 미세먼지 농도에 영향을 줄 수 있는 주변 국가들의 대기질 변화 관련 연구를 살펴본다. 이와 함께 미세먼지 농도 증가에 주요한 영향을 미치는 기상 등 환경요인에 대해 설명하고, 국내외 배출 영향과 미세먼지의 단기 및 장기 농도 변화와 관련된 주요 이슈들을 논의한다.

1. 미세먼지 배출원과 생성 메커니즘

1) 미세먼지 배출원

미세먼지 배출원은 형태에 따라 자동차, 철도, 선박 등 교통 관련 오염원 (이하 '선 오염원')과 굴뚝 등의 고정 오염원 (이하 '점 오염원'), 그리고 주거나 산업 단지 등 지역 단위로 계산되는 오염원 (이하 '면 오염원')으로 분류할 수 있다.[22] 한편, 미세먼지의 주요 구성 성분은 직접 배출되는 1차 미세먼지와 전구물질[23] 즉, 재료물질로

21) 대기 중 미세먼지는 입자의 크기에 따라 '미세먼지(PM-10)'와 '초미세먼지 (PM-2.5)'로 구분된다. 다만 본 장에서는 보건상 문제가 되는 초미세먼지에 초점을 맞추어 설명하며, 특별한 언급이 없는 한 미세먼지는 초미세먼지(PM-2.5)를 의미한다.

22) 대기오염물질을 배출하는 인간 활동에 의한 인위적인 배출원은 점 오염원, 선 오염원, 면 오염원 등으로 구분한다. 점 오염원(point source)은 대규모 공장이나 발전소 등과 같은 사업장 배출시설을 말하며, 굴뚝 위치를 점으로 표시한다. 선 오염원(line source)은 자동차, 선박, 비행기 등과 같이 움직이는 교통기관 배출원을 말하며, 움직이면서 선 모양의 배출을 보이기 때문에 선 오염원 또는 이동 오염원이라 불린다. 면 오염원(area source)은 일반 가정난방 등과 같이 넓은 면적에 고르게 분포된 배출원을 말하며, 주로 단위 면적당 인구 수나 연료 이용량 등을 이용하여 배출량을 추정한다.

23) 전구물질(precursor) : 일반적으로 화학 반응에서 반응물을 말하며, 반응 생성물의 재료가 되는 물질을 말한다. 여기서는 2차 미세먼지를 생성하는 화학반응에 참여하는 황산화물(SOx), 질소산화물(NOx) 등을 지칭한다.

배출된 후 대기 중에서 생성되는 2차 미세먼지로 구분할 수 있으며, 이를 도식화하면 아래와 같다(그림 2.1).

[그림 2.1] 1차 미세먼지와 2차 미세먼지

1차 미세먼지에는 원소탄소(Elemental Carbon, EC)[24], 1차 유기탄소(Primary Organic Carbon, POC), 중금속, 지각성분 등이 있으며, 2차 미세먼지에는 무기성 물질, 2차 유기탄소(Secondary Organic Carbon, SOC) 등이 있다.

1차 미세먼지 중 원소탄소는 연소과정이나 노천(야외)소각 등을 통해 발생하며, 중금속의 경우 금속 가공 공장, 쓰레기 소각 과정 등에서도 배출된다. 지각성분은 황사, 해염(바다소금) 입자, 비산(날림)먼지 등으로 구성되며, 꽃가루, 화산재 등 자연적으로 발생되는 배출량도 1차 미세먼지로 분류된다.

한편, 2차 미세먼지 중 황산염, 질산염, 암모늄염과 같은 무기성 물질의 경우 전구물질인 황산화물(SOx), 질소산화물(NOx), 암모니아 등 가스상 오염물질에 의해 생성되는데, 이들 전구물질은 산업, 발전, 농업 등 다양한 오염원에서 배출된다. 유기탄소의 경우 석유정제, 화학공정, 페인트 도장, 펄프 염색 같은 유기용제 사용 이외에 식물이나 조리과정 등에서도 배출된다. 과거 언론 등에서 회자되었던 '고등어구이'는 미세먼지의 주범은 아니지만 적절한 환기가 이루어지지 않으면 실내 미세먼지를 증가시킬 수 있다[25].

2) 미세먼지의 농도

대기 중 미세먼지 농도는 '배출', '화학반응', '이동' 및 '제거'의 과정들의 상호 작용에 의해 결정된다. 이러한 과정들은 순차적으로 일어나는 것이 아니라 매 순간 동시에

24) 원소탄소: Elemental Carbon(EC) 또는 Black Carbon(BC, 블랙카본)을 말한다. 일반적으로 검댕이라고 불리는 물질이다.
25) 환경부 (2016), "바로 알면 보인다: 미세먼지, 도대체 뭘까?"

발생한다. 다만, 어느 과정이 우세한지에 따라 농도가 증가할 수도, 감소할 수도 있다. 예를 들어, 제거나 유출보다 배출이나 생성이 높을 경우 미세먼지 농도는 증가하며, 반대의 경우에는 미세먼지 농도는 감소한다.

'배출'에는 1차 미세먼지 및 전구물질의 배출이 포함되며, 전구물질은 대기 중 복잡한 '화학반응'을 통해 미세먼지를 생성 또는 성장시킬 수 있다. 따라서 대기질 관리의 기본 방향은 1차 미세먼지 및 전구물질의 배출 저감이다. 여기에서 주의할 점은, 대기 중에서 많은 부분을 차지하는 2차 미세먼지[26]의 농도는 다양한 전구물질과 과정들에 의해 결정되기 때문에, 배출량 감소에 비례하여 농도 개선이 이뤄지지는 않는다. 즉, 배출량을 절반으로 줄인다고 해도, 농도는 절반 수준으로 줄어들지 않을 수 있다. 이러한 배출량과 농도의 관계 때문에 배출량 관리에 따른 미세먼지 농도 개선 정도를 예측하는 것은 단순하지 않다. 이외에도 미세먼지는 바람 등 기상조건에 따라 배출 지역으로부터 다른 지역으로 '이동'할 수 있다. 전구물질 또한 마찬가지로, 배출 후 다른 지역으로 이동하고 2차 생성을 통해 미세먼지 농도를 증가시킬 수 있다. 예를 들어, 중국의 자동차에서 배출된 질소산화물(NOX)은 대기 중에서 반응하여 질산(HNO_3) 가스로 전환되어 편서풍을 타고 국내로 이동될 수 있다. 질산(HNO_3) 가스 자체는 미세먼지가 아니지만, 국내에서 암모니아(NH_3)와 반응하여 질산암모늄과 같은 미세먼지를 생성할 가능성이 있다. 우리가 기여도를 이야기할 때, 중국과 국내의 기여도를 별개로 볼 수 없는 이유 중 하나가 여기에 있다.[27],[28]

한편, 일단 대기 중에서 미세먼지가 체류 시간이 증가되면서 점차 크기가 성장하는데, 일정 크기 이상으로 충분히 성장하면 중력에 의해 '제거'될 수 있다. 또한, 크기가 작더라도 바람에 의해 이동되거나, 강수에 의해 씻겨 내리는 등 다양한 과정을 통해 대기 중 미세먼지 농도는 감소할 수 있다. 이러한 제거 과정 덕분에 배출이 계속 일어남에도 불구하고, 미세먼지 농도는 계속 높아지지 않는다.

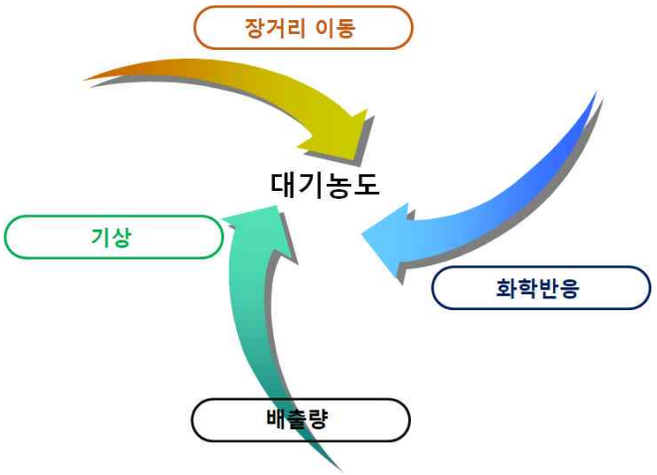
국민들이 불안해하는 고농도 미세먼지 발생일은 배출량이 특별히 증가하지 않음에도 불구하고 이러한 과정들의 불균형으로 인해 농도가 증가하는 경우에 해당한다. 고농도 사례일 (발생일) 동안에는 산불이나 누출 등 미세먼지 배출이 급증할 수도 있으나,

26) 환경부의 2016년 미세먼지 배출량 발표에 따르면, 전국의 미세먼지 배출량은 347,279톤이며, 이 중 71.1%인 247,032톤이 황산화물(SOx), 질소산화물(NOx), 휘발성유기화합물(VOCs) 등에 기인한 것으로 추정하고 있다. 이와 관련하여 전문가들 사이에서는 2차 생성물질에 대한 획일적 배출계수 적용 등에 대해 비판과 논쟁이 있다. 다만, 전체 미세먼지 배출량 중 2차 생성물질의 비중이 높다는 것에는 큰 이견이 없는 것으로 보여진다.

27) Kim, B.-U. et al. (2017a), Spatially and chemically resolved source apportionment analysis: Case study of high particulate matter event. Atmospheric Environment, 162, 55-70.

28) Kim, S. et al. (2017d), PM2.5 Simulations for the Seoul Metropolitan Area: (I) Contributions of Precursor Emissions in the 2013 CAPSS Emissions Inventory. Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 33, 139-158.

대기 정체 등 기상적인 원인이 중요하게 작용한다. 이와 관련된 부분은 2.4절에서 보다 자세하게 설명한다.



[그림 2.2] 미세먼지 농도 생성 메커니즘

2. 국내 주요 배출원 및 미세먼지 기여도

1) 주요 미세먼지 배출원

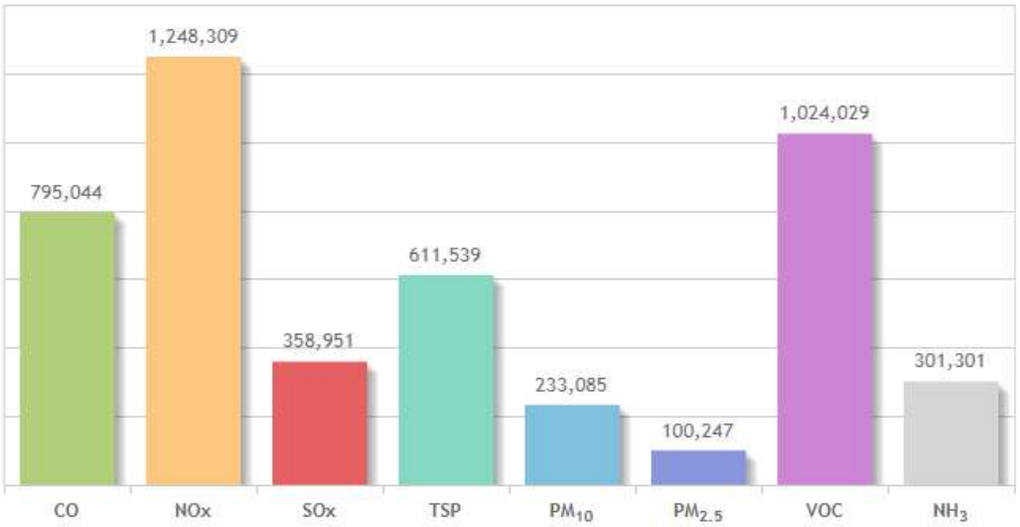
국립환경과학원에서는 국가대기정책지원시스템(Clean Air Policy Support System; CAPSS)[29]을 활용하여 매년 대기오염물질 배출량을 산정하고 있다. 배출원 대분류 기준에 따라 아래와 같이 주요 배출 부문을 13개로 구분하고, 시·군·구 별로 배출량을 산정한다.

- 에너지산업 연소
- 비산업 연소
- 제조업 연소
- 생산공정
- 에너지수송 및 저장
- 유기용제 사용
- 도로이동오염원

29) 국립환경과학원 국가대기오염물질 배출량 서비스. CAPSS의 공식 명칭은 국가대기정책지원시스템이며, 국가대기오염물질 배출량 산정 시스템을 의미하기도 한다. 일반적으로 우리나라 국가대기오염물질 배출량 자료를 지칭할 때 CAPSS 자료라고도 불린다.

- 비도로이동오염원
- 폐기물 처리
- 농업
- 기타 면오염원
- 비산먼지
- 생물성 연소

최근 공개된 2016년 대기오염물질 배출량은 그림 2.3과 같다. 배출 물질별로 보면, PM-2.5(여기서는 1차 미세먼지 배출량을 의미)는 100,247톤/년, 질소산화물(NOx)은 1,248,309톤/년, 그리고 황산화물(SOx)은 358,951톤/년으로 산정되고 있다. 부문별로 살펴보면, PM-2.5의 경우 제조업연소(37%), 비산먼지(17%), 비도로이동오염원(14%) 순으로 배출량이 많다. 황산화물(SOx)은 생산공정(31%), 에너지 산업 연소(26%), 제조업 연소(24%) 순으로, 질소산화물(NOx)은 도로이동오염원(36%), 비도로이동오염원(25%), 제조업 연소(14%) 순으로 높게 나타난다. 이러한 국내 배출량 자료는 대기오염물질의 영향 분석 및 대기질 개선 대책 효과 분석 시 근거자료로 이용되므로 높은 정확도가 요구된다.



[그림 2.3] 국내에서 산정된 2016년 오염물질 배출량 (단위 : 톤)

자료: 국립환경과학원 국가대기오염물질 배출량 서비스

2) 국내 배출원의 미세먼지 기여도

효과적인 미세먼지 농도 개선을 위해서는 어느 배출원의, 어느 배출 물질을, 얼마만큼

관리할 수 있는지, 비용 대비 편익은 어느 정도인지를 우선적으로 파악해야 한다. 이를 위해 기여도 분석이 이루어질 수 있다. 본 절에서는 다양한 기여도 분석 방법 중 배출량을 이용한 기여도 분석 방법에 대해 설명한다.

배출량을 이용한 기여도 분석이란, 관심 또는 규제 대상인 오염원에서 배출된 대기오염물질이 대기 중에서 미세먼지 농도로 변하는 정도를 추정하는 것이다. 예를 들어, 국내에서 1년 동안 100만 톤의 질소산화물(NOx)이 배출되어 국내 연평균 미세먼지 농도 수치가 3㎍/㎥ 더 나빠진다고 가정하자. 이 경우 국내에서 배출되는 질소산화물(NOx)을 50% 줄인다면, 미세먼지 농도는 3㎍/㎥의 50% 수준인 1.5㎍/㎥ 개선될 것으로 예상할 수 있다. 이러한 관계를 바탕으로 오염 부문별 배출량과 삭감비율 등을 고려하여 종합적인 개선 효과를 산정할 수 있다. 전구물질이 미세먼지로 전환되는 이 비율을 '전환율(conversion rate)'이라 부르며, 이는 관련 자료나 연구를 통해 알아낼 수 있다.

표 2.1과 표 2.2는 각각 전국 및 수도권의 1차 오염물질 배출량을 나타낸 것이다. 1차 오염물질 배출 정보를 통해 초미세먼지는 주로 사업장과 이동 오염원에서 배출되며, 황산화물(SOx)은 발전, 사업장, 비도로이동오염원에서 배출된다. 질소산화물(NOx)은 도로이동오염원에서 가장 많이 배출되며, 휘발성유기화합물은 유기용제 및 사업장의 생산공정에서 주로 배출된다.

이를 바탕으로 최근 정부의 미세먼지 관리 대책(6.3 특별대책, 9.26 종합대책, 11.8 강화대책 등)에서 제시하고 있는 배출원별 영향을 재구성 해보면 그림 2.4와 같다. 동 그림에 따르면, 전국적으로는 사업장의 비율이 가장 높고, 그 다음으로 건설기계 등 비도로 이동오염원과 도로이동오염원, 발전소 등의 비율이 높은 반면, 수도권에서는 자동차 등 도로이동오염원 비율이 가장 높고, 그 다음으로 건설기계 등 비도로 이동오염원, 사업장 등의 배출 비율이 높다.

이러한 배출량 기반 기여도 평가 방법은 기존 자료를 활용하여 단기간에 배출량 삭감에 따른 농도 개선을 도출할 수 있는 장점이 있다. 단, 전구물질이 미세먼지 농도로 전환되는 비율은 배출여건이나 기상 상황에 따라 달라진다. 따라서, 이러한 방법은 주요 배출원을 추정하거나 전반적인 저감 대책 방향 설정 시에 주로 이용되며, 대기질 개선계획처럼 구체적인 저감 방안을 수립할 때는 3차원 광화학 모델을 이용하는 등 고도의 대책 효과 분석이 필요하다.[30),31),32)]

30) U.S. EPA (2019), Guidance on the Development of Modeled Emission Rates for Precursors (MERPs) as a Tier 1 Demonstration Tool for Ozone and PM2.5 under the PSD Permitting Program, EPA-454/R-19-003.
31) Kim, S. et al. (2017d), PM 2.5 Simulations for the Seoul Metropolitan Area: (I) Contributions of Precursor Emissions in the 2013 CAPSS Emissions Inventory. Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 33, 139-158.

[표 2.1] 2016년 전국의 1차 대기오염물질 배출량

(단위 : 톤)

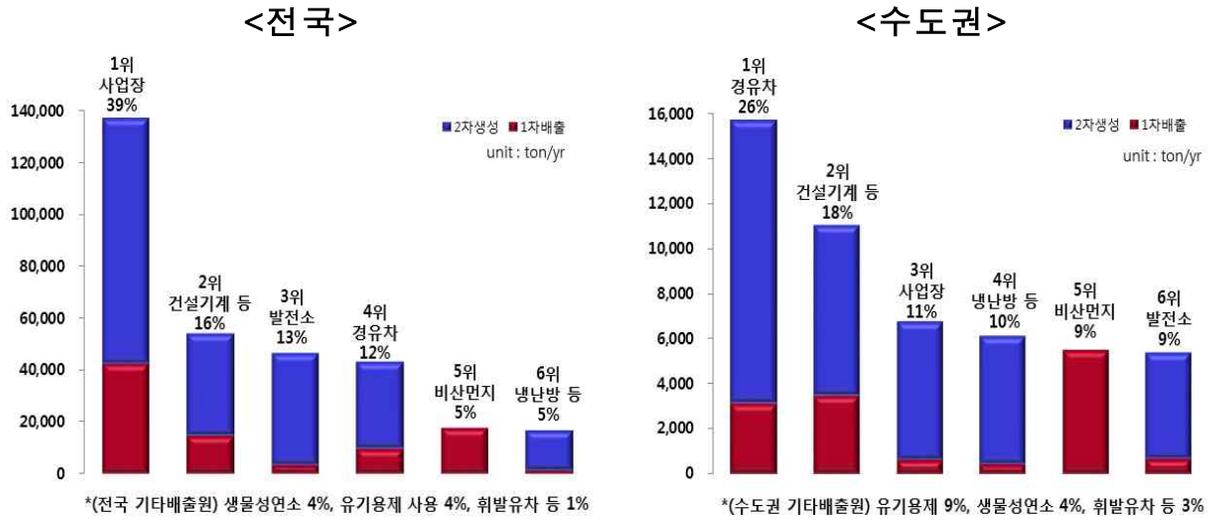
구 분		PM-2.5	SOx	NOx	VOCs
합 계		100,247(100%)	358,951(100%)	1,248,309(100%)	1,024,029(100%)
에너지 산업연소	발전소	3,253(3%)	91,696(26%)	145,445(12%)	8,001(1%)
사업장	제조업연소	36,785(37%)	86,593(24%)	175,332(14%)	3,342(0%)
	생산공정	5,191(5%)	112,734(31%)	55,932(4%)	186,104(18%)
	폐기물 처리	252(0%)	2,161(1%)	13,570(1%)	58,988(6%)
냉난방 등	비산업 연소	978(1%)	24,015(7%)	85,824(7%)	2,740(0%)
	기타 면오염원	275(0%)		167(0%)	624(0%)
도로이동 오염원	경유차	9,612(10%)	138(0%)	416,266(33%)	16,932(2%)
	휘발유차 등	136(0%)	94(0%)	36,729(3%)	30,629(3%)
비도로이동 오염원	비도로이동 오염원	14,354(14%)	41,443(12%)	309,986(25%)	40,816(4%)
유기용제	에너지수송·저장				30,160(3%)
	유기용제 사용				558,004(54%)
생활주변 오염원	비산먼지	17,286(17%)			
	생물성 연소	12,124(12%)	78(0%)	9,059(1%)	87,687(9%)

[표 2.2] 2016년 수도권의 1차 대기오염물질 배출량

(단위 : 톤)

구 분		PM-2.5	SOx	NOx	VOCs
합 계		15,897(100%)	31,822(100%)	326,086(100%)	300,244(100%)
에너지 산업연소	발전소	678(4%)	9,175(29%)	18,585(6%)	3,334(1%)
사업장	제조업연소	416(3%)	4,763(15%)	9,066(3%)	411(0%)
	생산공정	195(1%)	5,766(18%)	3,791(1%)	22,489(7%)
	폐기물 처리	56(0%)	868(3%)	3,103(1%)	14,907(5%)
냉난방 등	비산업 연소	348(2%)	6,798(21%)	41,700(13%)	1,441(0%)
	기타 면오염원	107(1%)		67(0%)	241(0%)
도로이동 오염원	경유차	3,156(20%)	52(0%)	156,846(48%)	5,312(2%)
	휘발유차 등	57(0%)	41(0%)	18,243(6%)	16,269(5%)
비도로이동 오염원	비도로이동 오염원	3,501(22%)	4,348(14%)	73,676(23%)	9,706(3%)
유기용제	에너지수송·저장				8,213(3%)
	유기용제 사용				210,518(70%)
생활주변 오염원	비산먼지	5,480(34%)			
	생물성 연소	1,904(12%)	11(0%)	1,009(0%)	7,404(2%)

32) Kim, S. et al. (2017b), PM2.5 Simulations for the Seoul Metropolitan Area: (II) Estimation of Self-Contributions and Emission-to-PM2.5 Conversion Rates for Each Source Category. Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 33, 377-392.



[그림 2.4] 2016년 1차 배출 및 2차 생성 합계

3) 향후 국내 기여도 산정 관련 고려사항

앞서 배출량을 이용한 기여도 분석 방법을 소개하였으나, 보다 상세한 대기질 계획 수립이나 대기오염 현황 분석 시에는 다른 방법을 이용한다. 본 절에서는 국내외에서 주로 이용되는 수치모델 및 수용모델 기반의 기여도 분석 방법을 간략히 설명한다.

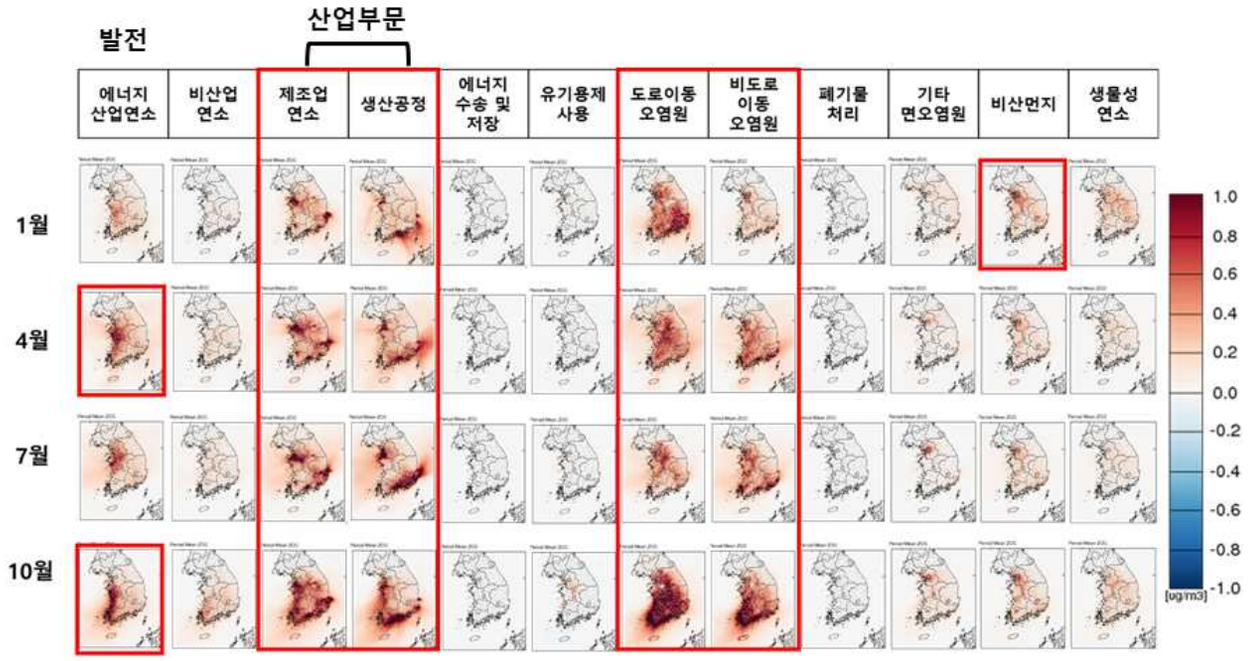
(1) 수치모델 이용 기여도

대기질 모사(摹寫, simulation)란, 대기 중 화학반응, 수송 등을 수식화하여 컴퓨터를 통해 실제 대기오염물질의 농도를 재현하는 방법이다. 일기예보는 이러한 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 기온이나 강수를 예측하는 한 예이다. 이러한 기법을 적용할 경우 미세먼지 농도와 함께 주요 배출량에 대한 기여도를 추정할 수 있다. 미국 환경보호청(EPA, Environmental Protection Agency)의 경우 대기질 모사를 통한 관리계획 수립 지침을 제시하고 있으며, 중국이나 일본 등에서도 최근 정책적 활용을 위한 대기질 모사 개선 연구가 활발하게 진행되고 있다[33),34),35),36),37),38),39).

33) NASA (2016), KORUS-AQ Rapid Science Synthesis Report, https://espo.nasa.gov/korus-aq/content/KORUS-AQ, 검색일자: 2019.7.15.
34) 김순태 외 (2017), 수도권 초미세먼지 농도모사: (II) 오염원별, 배출물질별 자체 기여도 및 전환율 산정, 한국대기환경학회지, 33(4), 377-392.
35) Kim, H. C. (2017), Regional contributions to particulate matter concentration in the Seoul metropolitan area, South Korea: seasonal variation and sensitivity to meteorology and emissions inventory. Atmospheric Chemistry and Physics, 17(17), 10315-10332.
36) 국립환경과학원 (2013), "동북아 대기오염 국가간 상호영향 공동 연구 (I)", 최종보고서
37) MJeong, U., J. et al. (2011), Estimation of the contributions of long range transported aerosol in East Asia to carbonaceous aerosol and PM concentrations in Seoul, Korea using highly time resolved measurements: A PSCF model approach. J. Environ. Monitor., 13, 1905-1918,

수치모델[40]을 이용한 대기질 모사를 위해서는 방대한 양의 기초자료가 준비되어야 한다. 기본적으로 별도의 모델을 통해 기상 자료와 배출량 자료를 마련해야 하며, 도로망, 인구 및 산업 분포 등에 대한 정보가 제공되어야 한다. 이러한 기초자료의 신뢰성이 낮을 경우 도출되는 결과 또한 신뢰성이 낮다. 한편, 대기질 모사가 제대로 이루어졌는지 평가하기 위해 관측자료와의 비교가 필수적이다.

그림 2.5는 미세먼지 국가전략프로젝트 사업단[41]에서 진행되고 있는 연구결과를 일부 발췌한 것으로, 3차원 광화학 수치모델을 이용한 국내 초미세먼지 농도에 대한 배출원별 기여도를 분석한 결과이다. 국내 전반적으로 이동오염원, 산업, 발전 부분의 기여도가 상대적으로 높게 나타난다. 단, 세부 지역별로 해당 배출부문의 영향 정도가 다를 수 있다.



[그림 2.5] 국내에서 배출되는 배출원별 대기오염물질이 초미세먼지 농도에 미치는 영향

자료: 미세먼지 국가전략프로젝트 사업단)

38) 김종희 외 (2016), 2014년 2월 서울의 고농도 미세먼지 기간 중에 CMAQ-DDM을 이용한 국내외 기여도 분석. 한국대기환경학회, 32(1), 82-99.
39) 배민아 외 (2018), 수도권 초미세먼지 농도모사: (V) 북한 배출량 영향 추정. 한국대기환경학회지, 34(2), 294-305.
40) 3차원 광화학 수치모델은 배출량 자료, 기상 자료를 바탕으로 대기 중 오염물질의 화학 반응, 수송, 침적 등 대기 중 오염물질의 거동을 방정식을 통해 계산하는 모델이다.
41) 미세먼지 국가전략프로젝트 사업단 (http://pmcenter.kist.re.kr/main/)

(2) 수용모델 기반 국내 배출원별 기여도

수용모델은 대기오염물질의 장기 관측자료를 토대로 통계적인 분석을 통해 미세먼지 농도의 각 구성 성분이 어떤 배출원에서 기인했는지를 분석하는 방법이다. 수치모델에 비해 상대적으로 적용이 용이하며, 축적된 관측자료를 이용하여 기여도를 정량적으로 도출할 수 있으므로 추세 분석이 가능하다는 장점이 있다. 반면, 배출량과 농도의 관계를 해석하기 어려운 단점이 있다. 수용모델을 기반으로 국내에서 수행된 초미세먼지 배출원별 기여도 분석결과를 표 2.3에 일부 정리하였다.

[표 2.3] 수용모델을 이용한 미세먼지 기여도 분석결과 상호 비교

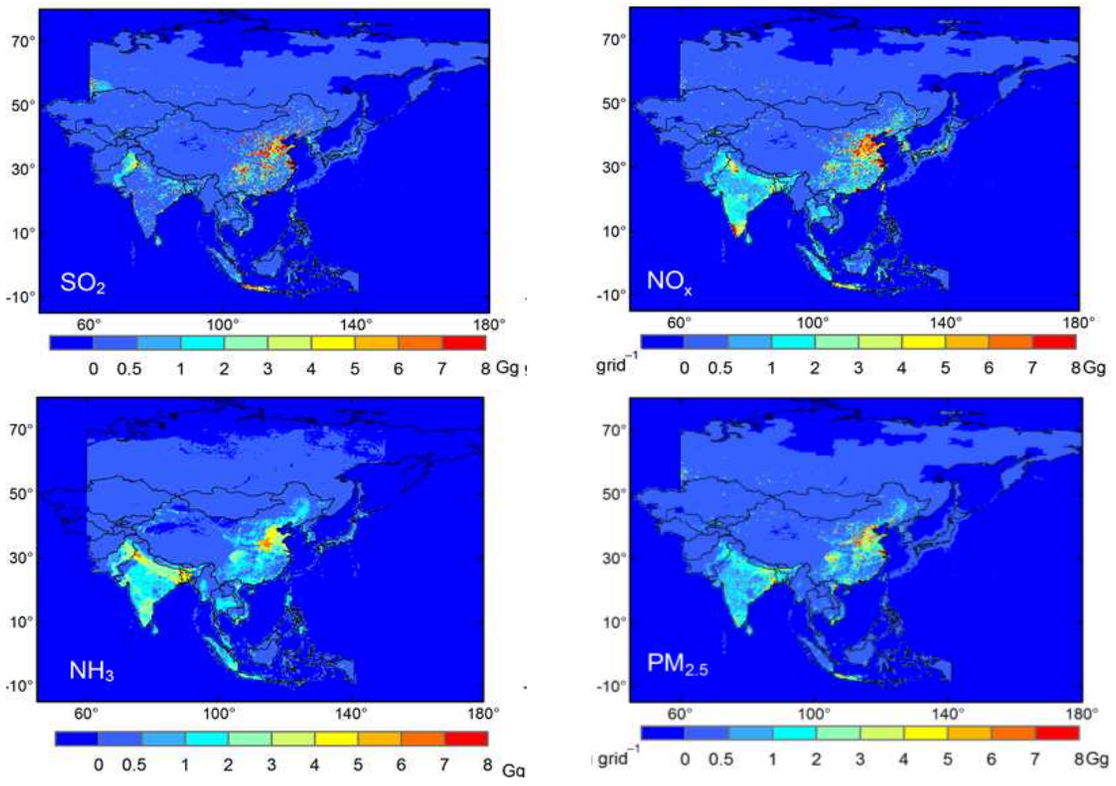
	Yi와 Hwang (2014)[42]	Heo 외 (2018)[43]	Lim 외 (2010)[44]	Choi 외 (2013)[45]	Kang 외 (2015)[46]	Lee 외 (2008)[47]
대상 물질	PM-10	PM-10	PM-10	PM-2.5	PM-2.5	PM-2.5
대상 지역	서울	평택	대전	인천	충주	광주
기간	'06.09 ~'07.11	'15.01 ~'16.12	'00.04 ~'02.12	'09.06 ~'10.05	'13.05, 07, 10, '14.01	'01.03 ~'02.02
구분	상대적 기여도 (%)					
이동 오염원	34.3	12.0	21.0	23.0	22.7	35.8
산업/연소	4.9	10.9	37.0	14.6	12.4	2.6
생물성 연소	6.0	17.6	3.0	6.1	11.0	2.8
먼지	17.2	12.0	16.0	6.1	1.7	9.9
해염 입자	6.2	9.3	0.0	5.9	0.0	2.7
2차 생성 황산암모늄	16.2	19.4	23.0	19.0	26.5	14.6
2차 생성 질산암모늄	9.3	18.7		25.4	24.0	7.6
기타	5.8	0.0	0.0	0.0	0.0	20.6

42) Yi, S. M., & Hwang, I. (2014), Source Identification and Estimation of Source Apportionment for Ambient PM 10 in Seoul, Korea. Asian Journal of Atmospheric Environment (AJAE), 8(3).
43) Heo, J. B. et al. (2009), Source apportionment of PM2.5 in Seoul, Korea. Atmospheric Chemistry and Physics, 9(14), 4957-4971.
44) Lim, J. M. et al. (2010), Source apportionment of PM10 at a small industrial area using Positive Matrix Factorization. Atmospheric Research, 95(1), 88-100.
45) Choi, J. K. et al. (2013), Source apportionment of PM2. 5 at the coastal area in Korea. Science of the Total Environment, 447, 370-380.
46) 강병욱 & 이학성 (2015), 충주시 초미세먼지 (PM 2.5) 의 배출원 기여도 추정에 관한 연구. 한국대기환경학회지 (국문), 31(5), 437-448.
47) Lee, H. et al. (2008), Source identification of PM2. 5 particles measured in Gwangju, Korea. Atmospheric Research, 88(3-4), 199-211.

3. 주변국들의 영향

우리나라를 포함한 동북아 지역의 경우 대기오염물질의 배출밀도(면적 당 배출되는 양)는 전 세계적으로도 높은 수준이다. 우리나라는 편서풍 지대에 위치하여 서풍이 주요하나, 계절에 따라 중국, 북한, 몽골 등으로부터 대기오염물질이 유입될 수 있다. 본 절에서는 주변국의 오염원이 국내 대기질에 미칠 수 있는 영향을 설명하며, 산불, 화산 등 자연 배출원에 의한 영향도 함께 살펴본다.

아시아 내 29개 국가에 대한 배출량 정보를 가지는 MIX[48] 배출량 목록은 발전(power plant), 산업(industry), 주거(residential), 교통(transportation), 농업(agriculture) 등 총 5개 부문으로 구성된다. MIX 배출량 목록에 따르면 아시아 국가의 배출량은 중국과 인도를 중심으로 높게 나타나며(그림 2.6, 그림 2.7), 중국의 경우 도시화가 많이 진행된 동부지역의 배출량이 상대적으로 더 높다.



[그림 2.6] MIX 배출량 목록의 아시아 국가의 배출량 공간분포 (단위: Gg/격자)
자료: Li et al. (2017)

48) Li et al. (2017), MIX: a mosaic Asian anthropogenic emission inventory under the international collaboration framework of the MICS-Asia and HTAP. Atmospheric Chemistry and Physics, 17, 935-963.

Countries	SO_2	NO_x	CO	NMVOC	NH_3	PM_{10}	$PM_{2.5}$	BC	OC	CO_2
China[a]	**28 663**	**29 071**	**170 874**	**23 619**	**9804**	**16 615**	**12 200**	**1765**	**3386**	**10 124**
Japan	708	1914	4278	1178	479	114	81	20	8	1107
Korea, DPR	211	238	4488	138	111	264	115	14	17	71
Korea, Republic of	418	1062	838	851	190	124	87	24	8	541
Mongolia	99	62	735	47	97	109	46	2	4	15

[그림 2.7] 중국, 일본, 북한, 우리나라 및 몽골의 물질별 연간 배출량

(단위: Gg/년, CO_2의 경우 Tg/년)

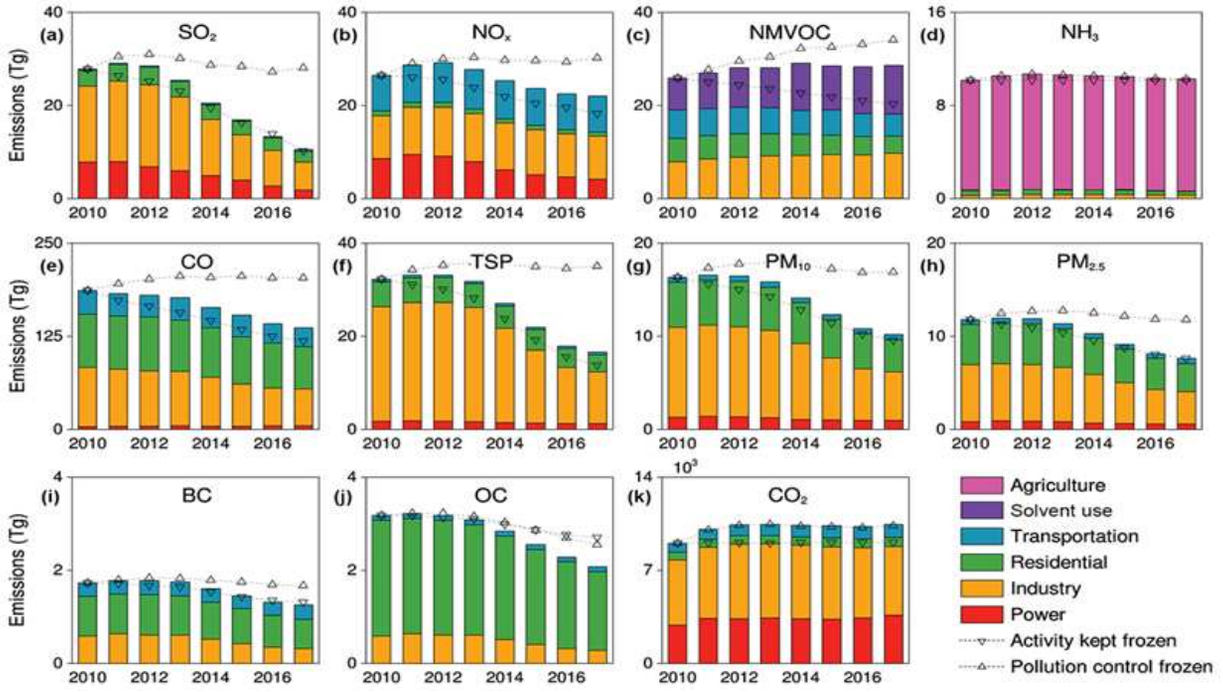
자료: Li et al. (2017)

1) 중국의 영향

중국의 급속한 산업 발달과 경제 성장은 도시화와 에너지 사용 증가로 이어져 대기오염을 더욱 심각하게 만들었으며[49], 대기오염물질의 장거리 이동 가능성은 우리 국민들의 불안감을 가중하고 있다. 그러나 중국도 자국민들의 건강피해를 우려하여, 2010년을 기점으로 미세먼지를 포함한 환경기준물질에 대하여 배출량 규제를 강화하였다[50]. 2013년에는 2017년에 대한 대기오염 개선을 목표로 별도의 정책을 마련하는 등[51][52] 다양한 장단기 정책을 수립하였다. 또한, 2013년 수립된 중국의 5개년 정책에서는 2020년에는 이산화황(SO_2), 질소산화물(NOx), 1차 먼지와 휘발성유기화합물 배출량이 2015년에 비해 각각 23%, 21%, 25%, 14%씩 감소할 것으로 예측하였다[53].

그림 2.8은 2010년~2017년 사이 중국의 물질별 배출량을 추정한 것으로[54][55][56][57][58]), 이산화황(SO_2), 질소산화물(NOx), 암모니아(NH_3), 미세먼지를 비롯한 대부분의 오염물질 배출량이 2010년 이후 상당히 감소하였다. 특히, 2010년~2013년 동안 감소폭이 10% 이내였던 것에 비해, 2013년~2017년 동안의 감소폭은 20~60% 수준이었다.

49) Hu, L.-W. et al. (2017), Ambient Air Pollution and Morbidity in Chinese, 1017, 123-151.
50) 홍철, 박인권. (2017), 중국 지방정부 역량이 대기오염 개선성과에 미치는 영향. 지역연구, 33(4), 29-42.
51) 문광주 외 (2018), 중국 초미세먼지 현황 및 정책 동향. 한국대기환경학회지, 34(3), 373-392.
52) 추창민 (2015), 중국의 대기오염 저감대책 최근 동향, 한국환경정책·평가연구원
53) Wang, S. X., B. (2014), Emission trends and mitigation options for air pollutants in East Asia. Atmospheric Chemistry and Physics, 14(13), 6571-6603.
54) Zheng, B. et al. (2018), Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions. Atmospheric Chemistry and Physics, 18, 14095-14111.
55) Zhang, Q. et al. (2007), NOx emission trends for China, 1995–2004: The view from the ground and the view from space. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 112(D22).
56) Zhang, Q. et al. (2009), Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission. Atmospheric Chemistry and Physics, 9(14), 5131-5153.
57) Lei, Y. et al. (2011), Primary anthropogenic aerosol emission trends for China, 1990–2005. Atmospheric Chemistry and Physics, 11(3), 931-954.
58) Li, M. et al. (2017), MIX: a mosaic Asian anthropogenic emission inventory under the international collaboration framework of the MICS-Asia and HTAP, Atmos. Chem. Phys., 17, 935–963.



[그림 2.8] 중국의 배출부문별 물질별 배출량의 연간변화

자료: Zheng et al. (2018)

2000년~2015년 중국 배출량의 공간적 변화에서도[59], 2000년~2010년까지는 이산화황(SO_2)과 질소산화물(NOx), 1차 먼지의 배출량이 증가하나, 2015년 이후 대체로 배출량이 감소하는 것으로 확인된다. 특히, 우리나라와 인접한 중국 동부지역에 대한 감소가 크게 나타난다(그림 2.9). 중국 동부에 위치한 산둥지역을 중심으로 배출량 변화를 분석한 연구에 따르면, 2010년을 기준으로 2016년까지 질소산화물(NOx)의 경우 20%, 이산화황(SO_2)의 경우 60% 정도가 감소한 것으로 분석하였다[60] (그림 2.10). 이처럼 다수의 연구결과로부터 최근 중국 배출량은 감소하고 있다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 2013년 이후의 대기오염 개선을 위한 정책의 효과로 볼 수 있다.

59) 우정헌 외 (2018), 중국 대기오염물질 배출의 시공간적 변화 분석. 한국대기환경학회지, 34(1), 87-100.
60) 김현철 외 (2018), 중국 산둥반도 배출량 변화와 한국 대기질의 연관성 검토. 한국대기환경학회지, 34(2), 356-365.

Fig. 7. SO_2 emissions by region/year.

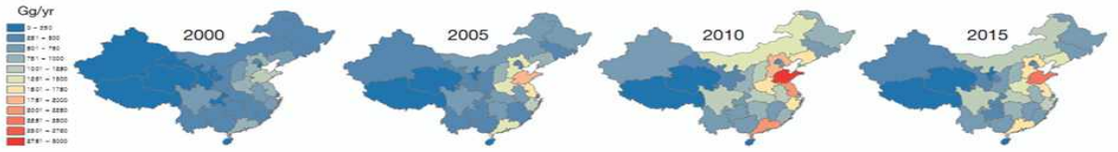


Fig. 8. NO_x emissions by region/year.

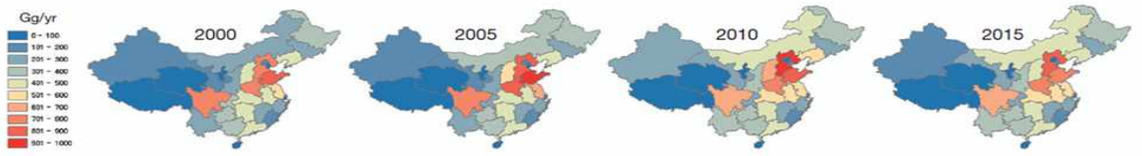
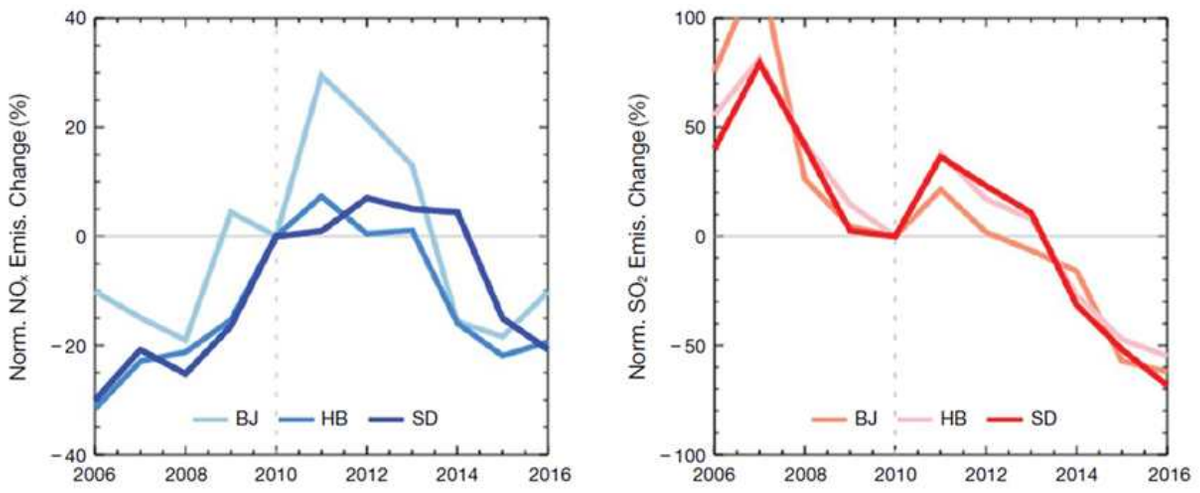


Fig. 9. $PM_{2.5}$ emissions by region/year.

[그림 2.9] 배출량 저감 노력에 따른 중국지역 공간적 변화 (단위: Gg/년)
자료: Woo et al. (2018)

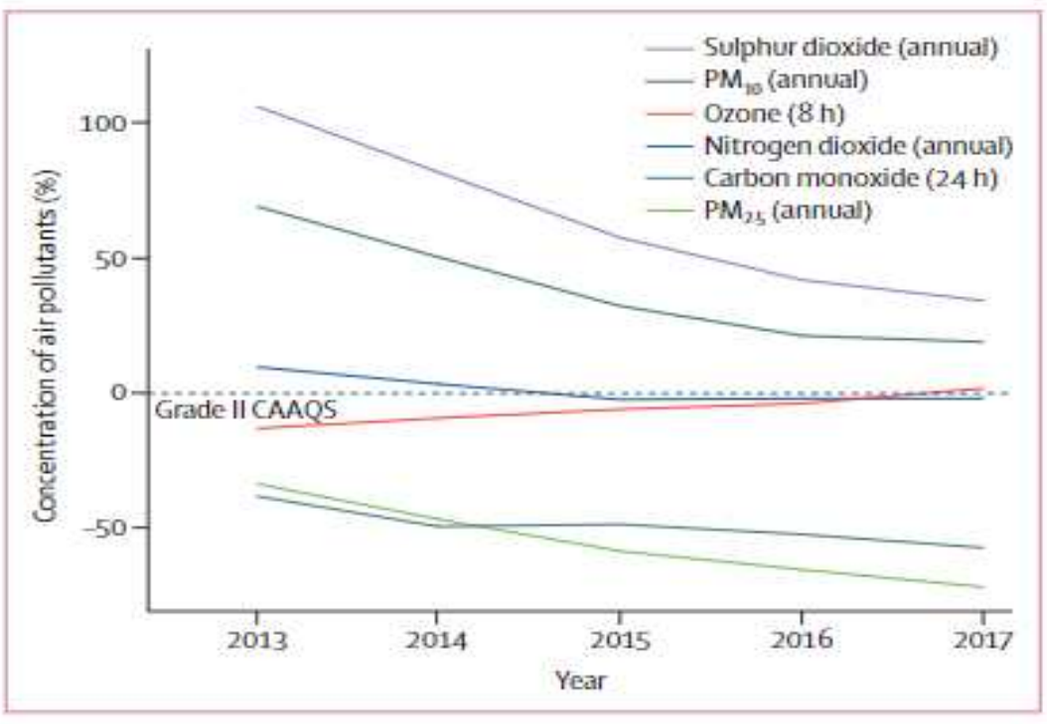


[그림 2.10] 중국 질소산화물(NOx) 및 황산화물(SOx) 배출량 저감에 따른 연간 배출량 변화
자료: Kim et al. (2018)

2013년~2017년에 동안의 연평균 기준성 대기오염물질의 농도를 살펴보면, 오존을 제외한 모든 물질이 꾸준히 감소한다[61](그림 2.11). 특히 2013년부터 2015년 사이에 대기오염물질의 농도가 급격하게 감소하였다. 이와 같은 농도 감소는 앞서 설명한

61) Huang, J. et al. (2018), Health impact of China ' s Air PollutionPrevention and Control Action Plan : an analysis of national air quality monitoring and mortality data. Lancet Planet. Heal. 2, 313-323.

바와 같이, 중국의 배출량 감소 노력에 따른 결과로 보인다. 또한, 중국의 배출량 및 오염물질의 농도가 낮아짐에 따라 국내로의 영향 또한 과거에 비하여 감소하였을 것으로 판단된다. 그러나 중국의 대기오염물질 농도 감소는 또한 눈여겨볼 만하나, 향후 지속적으로 감소할 것인지 여부와, 기후 및 기상과의 연계성 등 추가적인 분석이 필요하다. 중국 배출량이 국내에 미치는 영향에 대한 정량적인 분석은 2.5절에서 보다 자세히 검토한다.

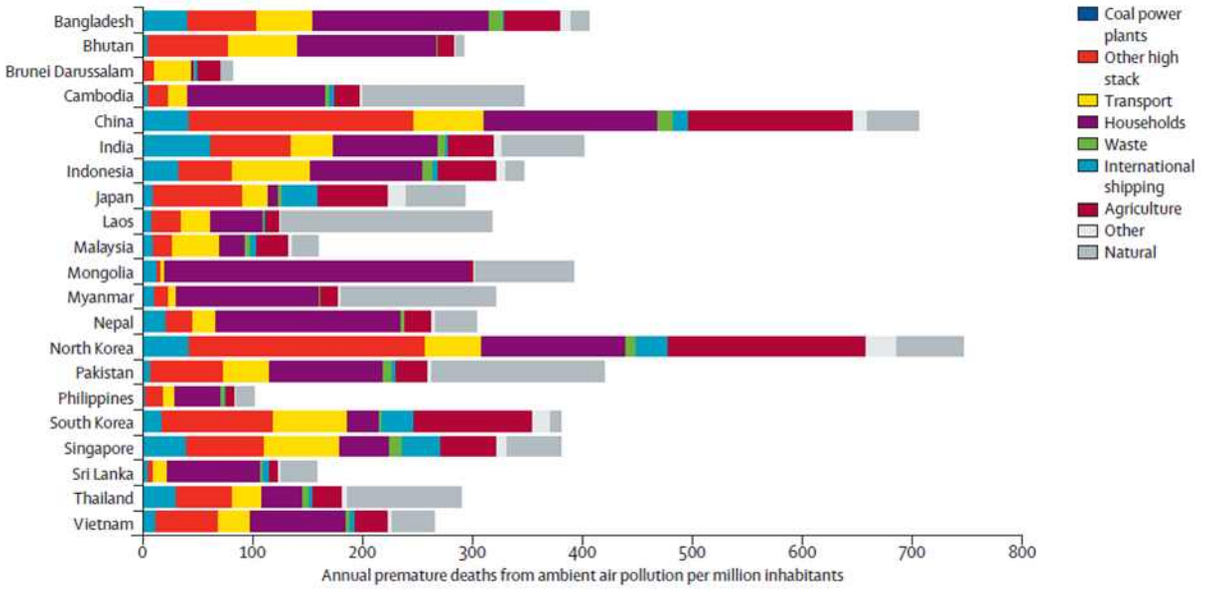


[그림 2.11] 중국 76개 도시 내 6가지 대기오염물질의 연간 농도 변화

자료: Huang, J. (2018)

2) 북한의 영향

2017년 발표된 '기후와 건강 보고서'[62]에 의하면, 아시아권에서 PM-2.5 농도에 의한 노출 영향이 가장 높은 국가는 북한이다. 2015년을 기준으로 북한의 100만 명 당 PM-2.5에 의한 조기사망자는 약 750명으로 분석되었다. 중국의 경우 700명, 우리나라의 경우 북한의 50% 수준인 480명이다 (그림 2.12). 이로 미뤄볼 때, 북한의 대기질 문제는 심각한 수준임을 알 수 있다. 또한 북한은 우리나라와 마찬가지로 중국 대기오염물질의 장거리 이동에 따른 영향을 받기 때문에 대기오염이 더욱 가중될 우려가 있다.

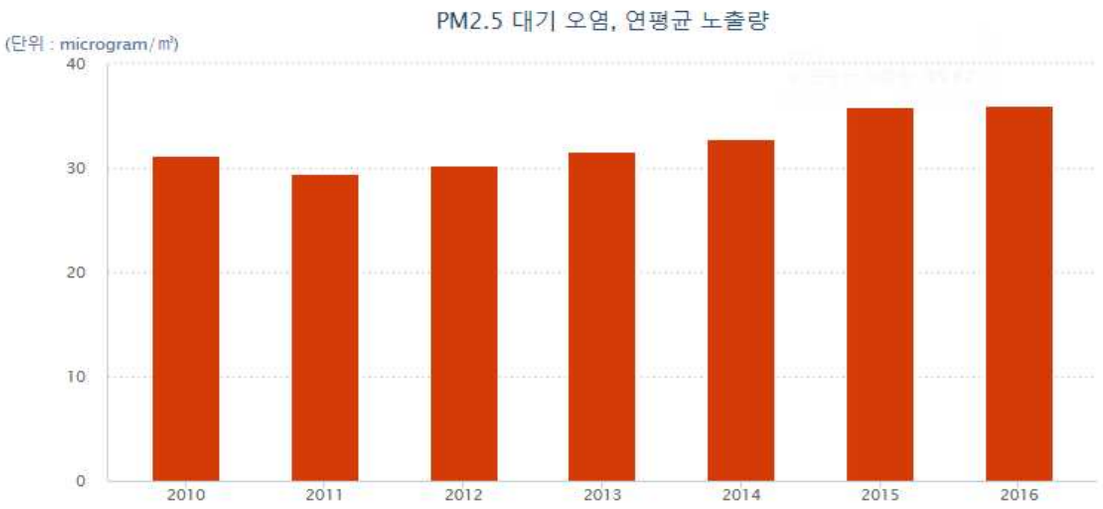


[그림 2.12] 동남아시아 국가의 주요 오염원에 의한 2015년 대기 중 PM-2.5 농도의 노출에 따른 건강 영향

자료: Watts et al. (2017)

대북지원정보시스템에서 제공하는 2010년 북한의 PM-2.5 연평균 노출량은 31.2㎍/㎥이며, 2011년에 소폭 감소한 후로 2016년까지 지속적으로 증가한다(그림 2.13). 2016년의 연평균 노출량은 36.0㎍/㎥으로, 대기 농도와 같다고 할 수는 없지만, 우리나라의 연평균 PM-2.5의 대기환경기준인 15㎍/㎥와 비교하면 약 2배 높은 수준이다.

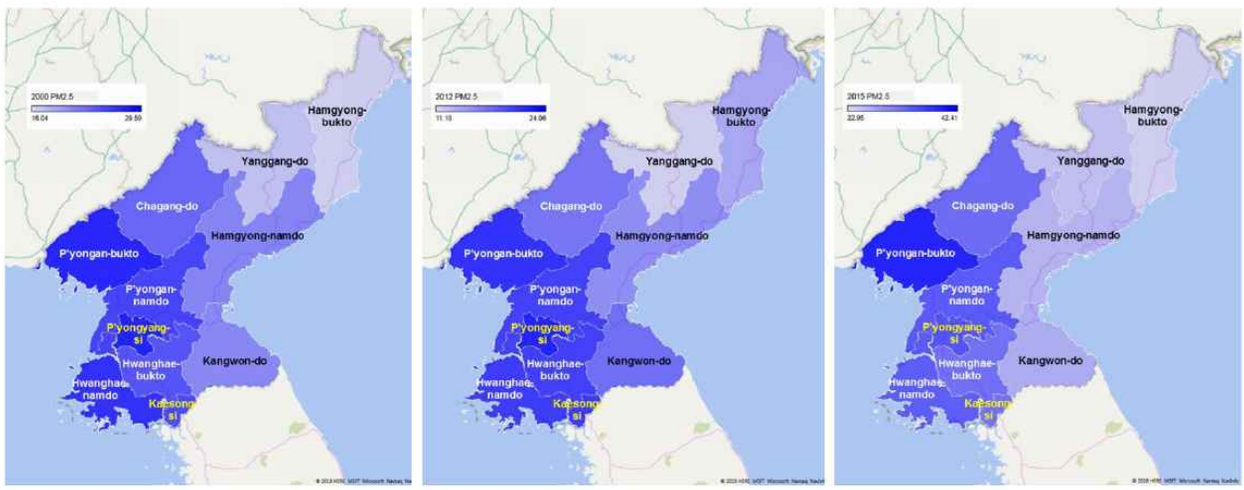
62) Watts et al. (2017), The Lancet Countdown on health and climate change: from 25 years of inaction to a global transformation for public health. The Lancet.



[그림 2.13] 북한의 PM-2.5 대기오염, 연평균 노출량

자료: 대북지원정보시스템

최근 연구에 따르면 2000년, 2012년, 2015년의 북한 시도별 PM-2.5 농도의 공간분포는(그림 2.14) 지역 간 차이를 보인다[63]. 북한의 서쪽 지역에는 석탄화력 발전소 및 다양한 오염원들이 위치하여 PM-2.5 농도가 높은 것으로 알려져 있다. 우리나라 수도권과 인접한 황해남도와 개성 또한 PM-2.5 농도가 높은데, 이 지역의 오염물질은 수도권 지역으로 이동하여 영향을 줄 가능성이 크다.



(a) 2000 (min 16.04, max 29.59) (b) 2012 (min 11.18, max 24.06) (c) 2015 (min 22.95, max 42.41)

[그림 2.14] 2000년, 2012년, 2015년의 지역별 PM-2.5 농도

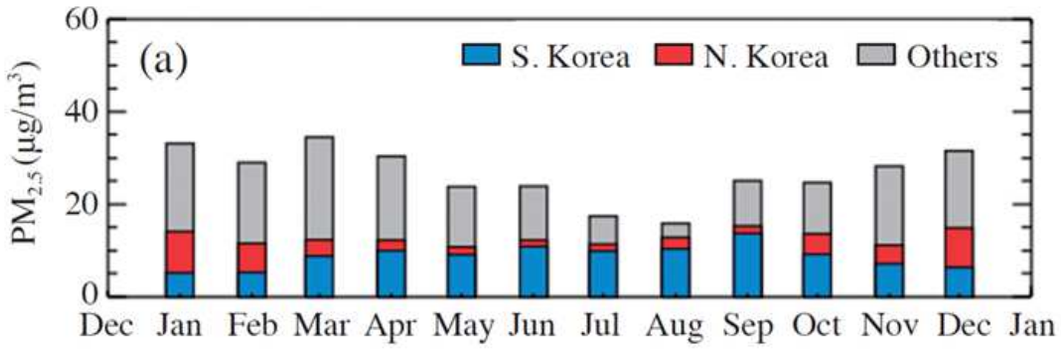
자료: 여민주와 김용표 (2019)

63) 여민주, 김용표 (2019), 북한 대기질 현황 및 개선방안. 한국대기환경학회지(국문), 35(3), 318-335

국가별 배출량을 비교하면, 북한의 이산화황(SO_2)와 질소산화물(NOx) 배출량은 중국의 약 0.7%, 0.8%에 해당하며, 우리나라 배출량의 50%, 22% 수준이다. 한편, PM-10 배출량은 중국 배출량의 1.6% 가량이나, 우리나라에 비해서는 200% 이상 높다. 즉, 북한의 경우 가스상 오염물질 배출량에 비해 PM-10과 같은 1차 미세먼지의 배출량이 높은 편으로, 고체연료 사용, 연소효율, 후단에서의 방지시설 등의 낙후 등이 주요 원인일 수 있다. 이처럼 북한의 배출량이 중국이나 우리나라에 비해 낮은 수준임에도 1차 미세먼지의 배출이 많기 때문에 PM-10 및 PM-2.5 농도가 높다.

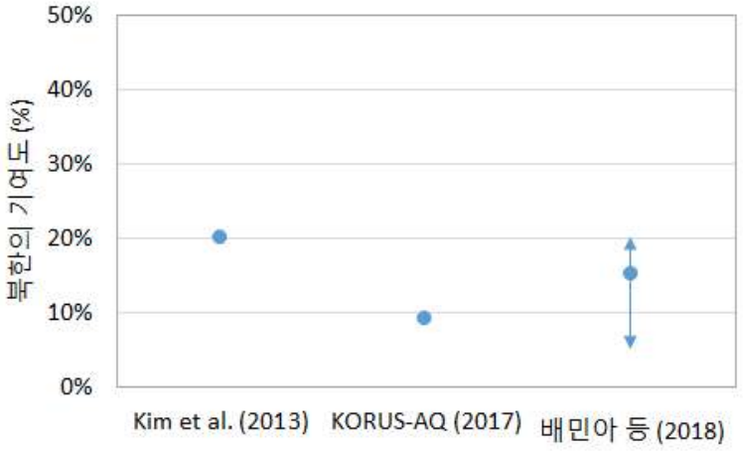
북한은 우리나라와 지리적으로 인접해 있기 때문에 배출량이 낮더라도 우리나라 대기질에 미치는 영향이 클 수 있다[64]. 최근 북한 배출량이 국내 대기질에 미치는 영향에 관련된 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 2007년 연구결과에서는[65] 북한의 바이오매스[66] 연소에 따른 국내 영향 가능성을 제기한 바 있으며, 또 다른 연구에서는[67] 서울 PAHs[68] 농도에 대한 북한의 기여도를 20%로 추정하였다. 한미대기질 공동연구(KORUS-AQ 2017) 결과에서는 PM-2.5 농도의 9%가 북한의 영향인 것으로 보고하였다[69]. 2016년 국내 연구[70]에서는 북한 배출량의 영향이 여름철에는 2㎍/㎥ 이하로 낮지만 1월에는 월평균 농도의 20% 수준으로 올라가고, 연평균 기여도는 약 15%에 이르는 것으로 분석하였다(그림 2.15). 그러나 북한 배출량의 과대평가가 의심되는 바, 다양한 연구 결과를 종합하면 북한 배출량의 국내 대기질에 미치는 영향은 5~10% 수준일 것으로 사료된다(그림 2.16).

64) 배민아 외 (2018), 수도권 초미세먼지 농도모사 : (V) 북한 배출량 영향 추정. 한국대기환경학회지(국문), 34(2), 294-305
65) Lee, J.Y., Kim, Y.P. (2007), Source apportionment of the particulate PAHs at Seoul, Korea: impact of long range transport to a megacity. Atmos. Chem. Phys., 10.
66) 바이오매스란? 생물 자원. 원래는 어떤 지역 내의 동식물의 총량을 뜻하고 있었으나, 최근에는 식물의 광합성에 의하여 고정화된 생산량 중에서 석탄·석유를 제외하고, 아직 이용되고 있지 않은 에너지 자원을 일컫는다.
67) Kim, I.S. et al. (2013), Impact of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) emissions from North Korea to the air quality in the Seoul Metropolitan Area, South Korea. Atmospheric environment, 70, 159-165.
68) PAHs (polynuclear aromatic hydrocarbons)란 2개 이상의 벤젠고리를 가지는 방향족 화합물로, 가장 널리 알려진 PAHs로는 나프탈렌·안트라센·페난트렌 등이 있다. 많은 PAHs 물질이 독성을 가지며 인체에 유해한 물질로 알려져 있다. 주로 연료가 연소되거나, 유기물질이 불완전 연소될 때 발생한다.
69) 환경부 보도자료 (2017), http://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?menuId=286&boardId= 803050&boardMasterId=1
70) 배민아 외 (2018), 수도권 초미세먼지 농도모사 : (V) 북한 배출량 영향 추정. 한국대기환경학회지(국문), 34(2), 294-305



[그림 2.15] 수도권 월평균 PM-2.5 농도의 우리나라, 북한 및 그 외 지역에 대한 영향

자료: 배민아 외 (2018)



[그림 2.16] 북한 기여도 종합

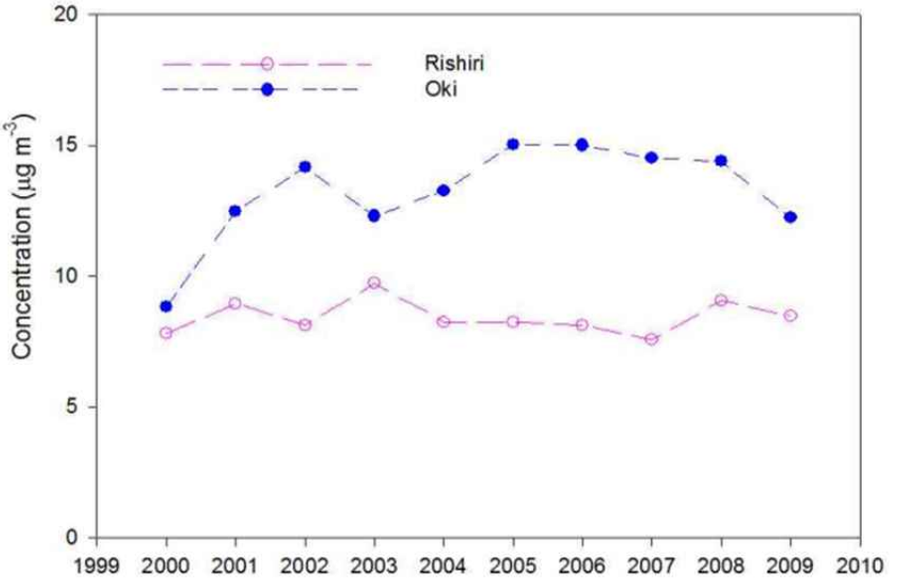
(단, 분석 방법, 대상물질, 기간에 차이를 보이며, 본문에 설명함)

국내 연구에 따르면 북한의 1인당 1차 에너지 소비량은 세계 평균의 47% 수준인 반면, 우리나라는 세계 평균보다 3배 이상 높아[71], 에너지 소비가 우리나라에 비해 매우 적은 수준이다. 앞으로 북한의 산업활동이 활발해지고 에너지 소비량이 증가하면 그에 따른 오염물질 배출량도 증가할 수 있다. 이는 국내 PM-2.5를 비롯한 대기오염에 영향이 커질 잠재력을 의미한다. 따라서 북한의 대기질과 국내에 대한 영향은 지속적으로 검토되어야 한다. 현재 북한은 대기 관측 농도를 공개하지 않을뿐더러 국가의 에너지 사용량을 비롯한 오염원 정보 등을 외부에 제한적으로 공개하고 있다. 따라서 앞서 추정된 기여도들은 여러 불확실성을 내포한다. 향후 남북한 공동 연구, 북한과 인접한 지역에서의 관측 및 실험 등을 통한 측정자료 확보 및 결과 분석을 통해 정확도 높은 분석이 가능해질 것이다.

71) 김인선 외 (2011), 북한 에너지 사용과 대기오염물질 배출 현황. 한국대기환경학회지(국문), 27(3), 303-312.

3) 일본의 영향

일본의 경우 PM-2.5 노출에 의한 조기사망자 수는 100만 명 당 약 300명 수준으로 우리나라보다 낮다(그림 2.12). 이는 일본이 우리나라에 비해 농도가 낮음을 의미한다. '동북아 장거리이동 대기오염사업'에서는 2000년~2009년 국외에서 일본으로 유입되는 농도를 추정하기 위해 우리나라의 백령도에 해당하는 일본의 리시리(Rishiri), 오키(Oki) 측정소에 대한 농도를 분석하였다[72]. 그림 2.17에 보인 연평균 PM-2.5 농도는 15㎍/㎥ 이하로 낮은 수준을 보였다.



[그림 2.17] 2000년~2009년 동안 리시리(Rishiri)와 오키(Oki)에서의 PM-2.5 농도

자료: 국립환경과학원(2012)

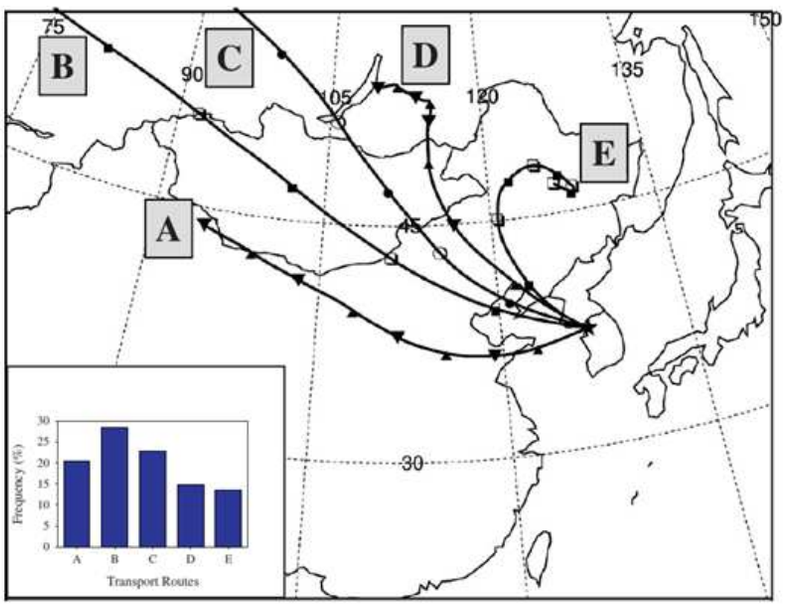
한중일 공동 연구의 결과[73]에 따르면 국내 PM-2.5 농도에 대한 일본의 기여도는 1% 수준이다. 한편 우리나라 배출량이 일본에 기여하는 농도는 5%로 더 높다. 이는 편서풍 지대에서 우리나라가 중국의 영향을 받듯, 일본이 우리나라 배출량의 영향을 받기 때문이다. 다만 여름철에는 남동풍의 빈도가 증가하지만 대기오염물질의 농도는 낮다.

72) 국립환경과학원 (2012), "동북아 장거리이동 대기오염사업 (LTP) 평가", 최종보고서
73) 국립환경과학원 (2013), "동북아 대기오염 국가간 상호영향 공동 연구 (I)", 최종보고서

4) 몽골의 영향

몽골의 고비사막은 황사의 주된 발원지이다. 31㎛ 이상의 입자크기인 황사 입자는 320km를 이동하며, 16~30㎛ 입자 크기의 황사는 1,600km까지, 그보다 작은 입자는 전 세계로 이동할 수 있다[74]. 1965년부터 2004년까지 40년 동안 우리나라에 발생한 황사는 많은 경우 몽골을 경유하여 유입되었다[75],[76](그림 2.18). 2000년부터 2018년까지 발생한 연간 황사 관측일수를 보면 (그림 2.19) 18년간 연평균 황사 관측일수는 약 10일이었으며, 2001년과 2002년에는 25일 이상 황사가 발생하였으나 그 이후로는 증감을 반복하며 2018년에는 5일 가량 황사가 관측되었다.

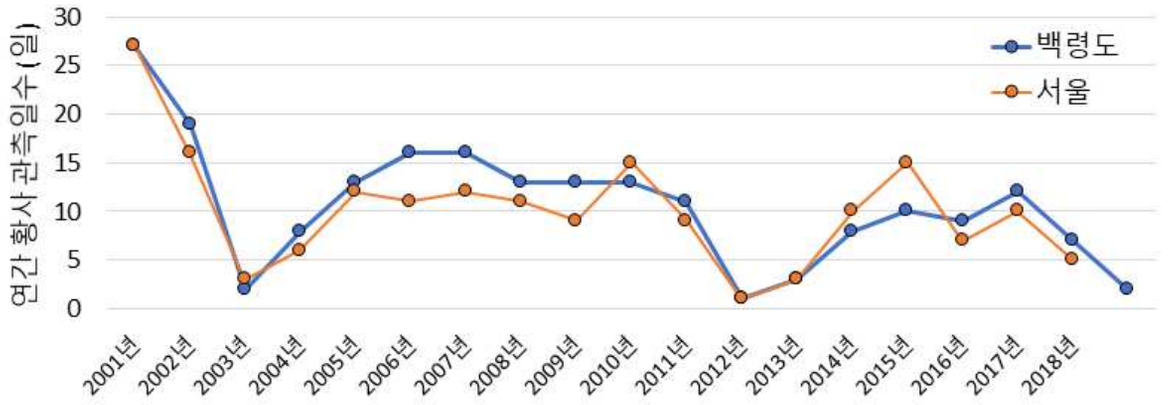
2008년 5월 30일, 몽골 및 만주 등에서 기원한 황사의 영향으로 서울의 시간 최대 PM-10 농도는 900㎍/㎥ 이상으로 관측되었으며, 대기의 이동에 따라 점차 전주, 대구 등의 지역에서도 순차적으로 600㎍/㎥ 이상 고농도를 보였다[77]. 몽골도 북한과 마찬가지로 현재는 인위적 배출량이 적은 수준이지만, 추후 에너지 사용 증가에 따라 황사가 유입되는 것처럼 대기오염물질 또한 유입되어 국내에 영향을 미칠 수 있다.



[그림 2.18] 1965년~2004년의 발생한 황사의 역궤적 분석

자료: Kim et al. (2010)

74) Goudie, A.S., Middleton, N.J., (2006), Desert dust in the Global system. Springer, printed in Germany, pp. 157-165.
75) 풍속 및 풍향을 고려하여 공기괴가 현재 위치에 도달하기까지의 과거 시간동안의 경로를 추적한다.
76) Kim (2008), Transport routes and source regions of Asian dust observed in Korea during the past 40 years (1965-2004). Atmospheric Environment, 12.
77) Kim et al. (2010), Asian dust event observed in Seoul, Korea, during 29-31 May 2008: Analysis of transport and vertical distribution of dust particles from lidar and surface measurements. Science of the Total Environment, 12.



[그림 2.19] 2001년~2018년의 황사 발생 횟수 (왼쪽)와 역궤적 분석의 구분

원자료 출처: 기상청 날씨누리(http://www.weather.go.kr)

5) 그 외 주변국의 영향

우리나라와 주변국이 대기질 농도에 얼마나 영향을 주고받는지 파악하는 것은 국제적 협력 차원에서 볼 때 매우 중요하다. 현재까지 아시아 국가간의 상호영향은 중국, 우리나라, 일본 등 동북아시아에 한정해서 이루어졌으나, 아시아에는 대기 오염도가 높은 국가들이 많은 것으로 보고되므로 이에 대한 평가 또한 필요할 것으로 사료된다. 이러한 측면에서 기상적인 요인이 중요해질 수 있는데, 최근 동북아 지역에서의 기후가 급변하고 있으므로 이에 대한 지속적인 관심과 연구가 필요하다.

6) 자연적 요인의 영향

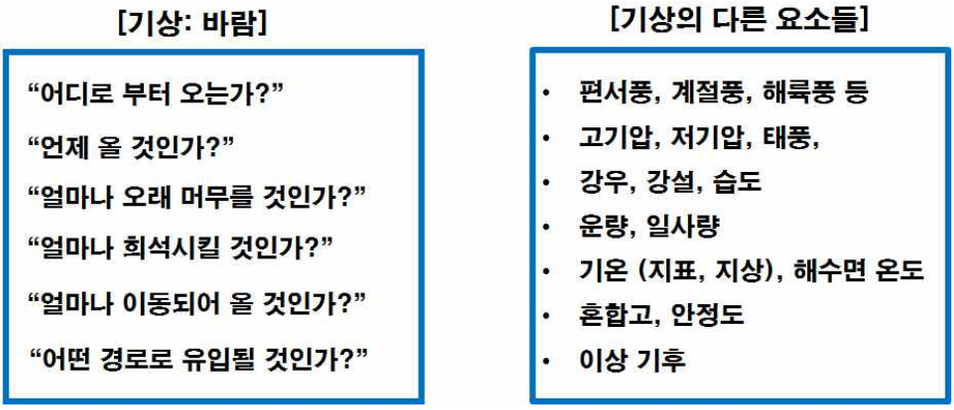
국내 미세먼지에 대한 주변국의 영향 추정 시, 인간 활동에 의해 발생되는 인위적 배출량 이외에 황사, 산불 등 자연적 배출에 의한 요인이 함께 고려되어야 한다. 황사의 경우 앞 절에서 몽골의 영향을 참고할 수 있다. 한편, 산불은 연소 과정에서 농도에 직접적인 영향을 줄 수 있을 뿐만 아니라, 산불 발생에 따른 대기오염물질의 농도 증가가 태양 복사량 감소 및 대기 조건 변화를 유발하여 간접적으로도 영향을 줄 수 있다. 최근 기후가 변화함에 따라 시베리아에서의 발생 빈도가 증가하는 것으로 보고되고 있다. 여러 연구에서 산불이 국내 대기질에도 영향을 줄 수 있음이 보고된 바[78),79)], 미세먼지 관리를 위해서는 자연적으로 발생하는 오염물질 또한 예의 주시되어야 한다.

78) 전상윤 외 (2008), 지역기후모형을 이용한 2003년 5월 시베리아 산불 사례 연구. 한국기상학회 학술대회 논문집, 172-173
79) Jung et al. (2016), Impact of Siberian forest fires on the atmosphere over the Korean Peninsula during summer 2014. 16, 6757-6770

4. 기상학적 요인은?

기상은 배출량과 함께 대기오염물질 농도 결정에 주요한 역할을 하는 요인이다. 예를 들어 '바람'의 경우 대기 중 오염물질이 '언제 오는가?', '어디로부터 오는가?', '얼마나 오는가?' 등에 대한 예측 및 분석을 가능하게 하며, 그 밖에 기압, 강우, 일사량, 온도 등 다양한 기상 요인이 대기 중 미세먼지 농도에 영향을 줄 수 있다(그림 2.20).

본 절에서는 미세먼지 발생에 대한 원인을 기상 측면에서 해석하기 위해 1) 기상 규모에 따른 대기오염 영향, 2) 기상 요소별 대기오염 영향으로 구분하여 살펴본다.



[그림 2.20] 대기오염물질 농도에 영향을 줄 수 있는 기상요인

1) 기상규모에 따른 대기오염 영향

기상은 시 공간적 영향 범위에 따라 전 지구 규모, 종관 규모, 국지 규모로 구분된다. 아래는 기상 규모에 따른 대기오염 영향을 보인 것이다(표 2.4).

[표 2.4] 기상 규모에 따른 대기오염 영향

	① 전 지구(Global)	② 종관(Synoptic)	③ 국지(Local)
시간 규모	수 개월 이상	수 시간 ~ 수 일	수 분 ~ 수 시간
공간 규모	전 지구	수 십 km ~ 수 천 km	수 km ~ 100 km
주요 현상	대기 대순환	기압, 전선, 태풍	산곡풍, 해륙풍, 열섬현상, 혼합고
대기오염도와 상관성 예시	• 편서풍에 의한 중국 대기오염물질의 국내 유입 • 기후 교란 물질로서의 초미세먼지 (BC) 영향	• 기압 배치 및 이동에 따른 대기오염물질의 유입/축적/해소 • 전선 및 태풍 등에 의한 강수 발생 시 오염물질 세정 효과	• 대기오염물질의 국지 순환 및 재순환 • 기온 역전에 의한 대기 안정도 증가 및 오염물질 누적

① 전 지구 규모 (지구 대순환)

대기 대순환이란 태양으로부터 지구에 유입되는 에너지와 지구로부터 방출되는 에너지 간의 불균형을 해소하기 위해 전 지구적인 규모에서 나타나는 대기의 흐름으로, 우리가 잘 알고 있는 편서풍이 대표적이다. 동북아 지역은 편서풍대에 위치하여 일정 고도 이상(~1km 이상)에서는 바람이 서쪽에서 동쪽으로 지속적으로 불어 가는데, 국내의 경우 풍상지역인 중국으로부터 바람이 유입됨에 따라 대기오염물질도 함께 이동될 수 있다[80]. 최근 국내 연구에서 검댕(Black Carbon)과 같은 대기오염물질이 전 지구적인 규모에서 기후변화에 영향을 미치는 것으로 보고된 바 있다[81].

② 종관 규모

종관 규모 기상은 수백 ~ 수천 km 영역에 대해 나타나는 기상현상으로, 기압 배치, 전선 이동, 태풍 등이 대표적이다. 고기압, 저기압 등의 기압 배치는 지표 근처의 풍향, 풍속을 포함한 지역적 규모의 대기 흐름을 바꿀 수 있다. 겨울철 '삼한사온' 현상도 이러한 종관 규모에서의 특징적인 패턴으로부터 발생하며, 이와 유사하게 최근 등장한 '삼한사미(삼일은 춥고 사일은 미세먼지)' 라는 신조어도 여기에서 비롯되었다고 할 수 있다. 또한, 한랭/온난, 습윤/건조 등 계절별로 영향을 미치는 기단의 특성에 따라서도 대기오염물질의 농도가 달라질 수 있다. 예를 들어, 춥고 건조한 겨울철은 미세먼지 중 질산염[82] 생성에 유리하며[83], 시베리아 고기압의 영향으로 국내에 중국으로부터의 유입 영향이 크게 나타날 수 있다. 한편, 덥고 습한 여름철에는 황산염 생성[84]이 유리해지는데, 장마 등 강우 빈도가 높으므로 대기오염물질의 제거 또한 높게 나타난다.

③ 국지 규모

내륙, 해안, 산, 계곡과 같은 지형적 특성이나 도시, 교외, 농촌 등과 같이 토지 이용에 따라 나타나는 국지적인 기상 현상 또한 대기 중 오염물질의 순환에 영향을

80) Kim, H.C. (2017), Regional contributions to particulate matter concentration in the Seoul metropolitan area, South Korea: seasonal variation and sensitivity to meteorology and emissions inventory. Atmospheric Chemistry and Physics, 17, 10315-10332.

81) Kim, M. J. (2019), Regional Arctic amplification by a fast atmospheric response to anthropogenic sulphate aerosol forcing in China. Journal of Climate

82) 질산염은 전구물질인 질소산화물(NOx)로부터 만들어지며, 주로 가스상 반응에 의해 생성된다. 따라서 추운 계절에도 조건만 맞으면 생성이 가능하나, 액체상과 기체상의 평형관계에 의해 더운 여름철에는 주로 가스상인 질산가스(HNO_3)로 존재하여 미세먼지의 구성 성분면에서는 겨울철에 그 비중이 높아진다.

83) Itahashi, S. (2017), Nitrate transboundary heavy pollution over East Asia in winter. Atmospheric Chemistry and Physics, 17, 3823-3843.

84) 황산염은 아황산가스(SO_2)로부터 생성되며, 질산염과는 다르게 가스상 반응과 함께, 액상에서의 산화반응 또한 대기 중 농도 형성에 있어 중요하다. 기온이 빙점 이하로 내려가는 겨울철의 경우 액상산화는 제한적이다.

주어 대기 오염물질의 농도 결정에 중요한 역할을 한다[85]. 국지 기상의 대표적 현상으로 해륙풍, 산곡풍, 도시 열섬현상이 있다. 해륙풍은 해상과 육지의 비열 차이에 의해 나타나는 대기 순환 현상으로 해안지역의 대기오염물질 순환 시 중요하며, 산곡풍은 산정상과 골짜기의 온도 차이에 의해 나타나는 대기 순환 현상으로, 산지, 분지 등 특징적인 지역에 대한 대기오염물질 농도 이해 시 고려되어야 한다. 한편, 도시 열섬현상의 경우 도시지역의 건축물, 포장도로 등에 의한 인공열 발생으로 일어나는 국지 순환이 대기오염물질의 확산을 방해하여 미세먼지를 축적시킬 수 있으므로 도시지역의 미세먼지를 가중시킬 수 있다.

④ 고기압 영향 아래에서 국내외 배출 영향

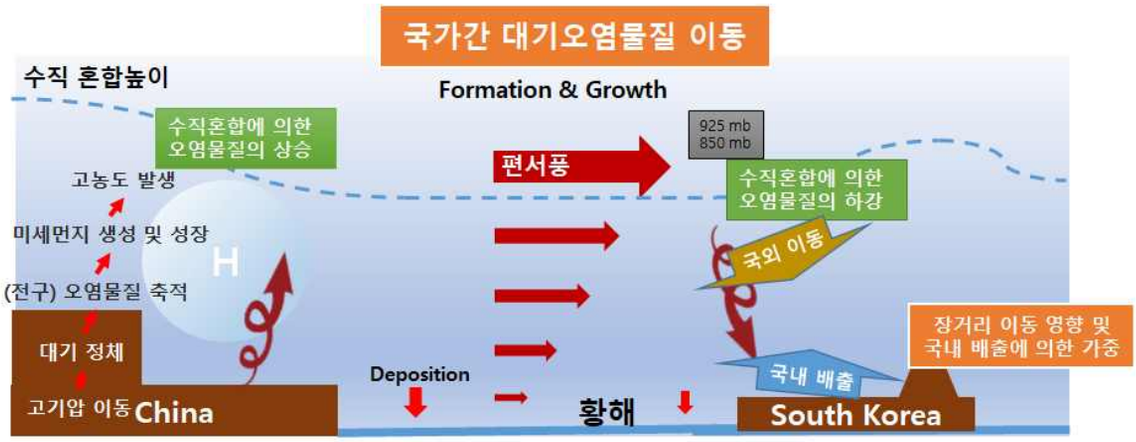
최근 국민들이 우려하는 장기간의 고농도 미세먼지 발생은 다양한 기상 영향이 작용하여 나타난다. 특히, 고기압이 우리나라로 통과할 때 발생하는데, 이와 관련된 이해를 돕기 위하여 아래와 같이 고기압 하 국내 고농도 미세먼지 발생에 대한 원인을 단계별로 정리하였다(그림 2.21).

- 1단계: 중국에서 배출된 대기오염물질 및 전구물질이 고기압의 풍속이 낮은 안정된 대기 하에 중국 지표 근처에 축적되면서 초미세먼지의 생성 및 성장을 촉진한다. 이 단계만 가정할 경우 중국 지표에 대한 농도만 증가한다.
  중국과 우리나라의 거리가 500km, 고기압 하의 지표 풍속을 1m/s로 가정할 경우, 지표면 부근에서 수평 이동을 통해 국내까지 도달하는 데 5일 이상이 소요된다. 이동 중 일어날 수 있는 침적[86]까지 고려하면, 국외 유입에 의한 국내 고농도 미세먼지 발생이 지표 이동에 의해서만 이루어졌다고 보기 어렵다.
- 2단계: 중국 지표 근처에 축적되었던 대기오염물질은 주간과 야간의 기온 변화에 따라 혼합되어[87] 1~2km 높이의 상층까지 이동한다.
- 3단계: 상층으로 이동된 대기오염물질은 편서풍을 타고 서쪽에서 동쪽으로 이동된다. 상층의 경우 지표 영향을 받지 않아 마찰력이 작용하지 않으므로 지표에 비해 풍속이 빠르다. 따라서, 대기오염물질 또한 장거리 수송이 빠르게 일어나 국내로 유입된다.

85) Wang X. et al. (2019), An overview of air-pollution terrain nexus. Chemical Engineering Transactions, 72, 31-36.
86) 대기 중 오염물질이 제거되는 과정으로, 건성침적(dry deposition)과 습성침적(wet deposition)으로 구분할 수 있다. 건성침적은 입자의 충돌, 중력에 의한 침강 등에 의해 이루어지며, 습성침적은 강우에 의한 세정 및 구름 생성 단계에서 응결핵으로서 작용하여 이루어진다.
87) 일반적으로 기온이 높아 대류 확산이 원활한 낮에는 높은 곳까지 혼합되며, 기온이 낮아 대기가 안정한 밤에는 낮은 높이에서 혼합되는 일간 변화 특성을 보인다.

- 4단계: 상층을 통해 중국으로부터 유입된 대기오염물질은 고기압 하에서 국내 수직 혼합에 의해 하층으로 이동되며, 지표층에 국외 영향을 미친다.
- 5단계: 고기압 역시 편서풍 지대에서 서서히 서쪽에서 동쪽으로 이동한다. 중국에 위치하던 고기압이 국내로 오면서, 국내의 경우에도 중국에서와 같이(1단계) 자체적인 대기오염물질의 배출 영향이 증가한다. 이때 상층을 통해 중국으로부터 유입된 대기오염물질의 하층으로의 이동 영향이 복합적으로 작용하여 국내에 고농도 미세먼지 현상이 지속된다.

단, 이러한 현상은 고기압의 강도, 이동속도 등에 따라 달라지므로, 국내외 기여도는 사례별로 차이를 보인다. 특히, 이러한 고기압이 우리나라 주변에서 장기간 머무를 경우, 국내외 요인이 뒤섞여 나타나기 때문에 고농도 사례 초반에는 국외 영향이 우세할 수 있으나, 후반에는 국내 요인이 높아질 수 있다.[88]



[그림 2.21] 고기압 영향 아래에서 기상-대기오염물질농도 국내외 배출 영향

2) 기상요소별 대기오염 영향

대기오염물질 농도에 주요한 영향을 주는 기상요소로 온도, 풍속, 풍향, 상대습도, 강수, 기압 등이 있다.[89),90),91),92)] 최근 미세먼지 저감을 위해 검토되고 있는 '인공

88) Kim, B.-U. et al. (2017), Spatially and chemically resolved source apportionment analysis: Case study of high particulate matter event. Atmospheric Environment, 162, 55-70.
89) Fuzzi, S. (2015), Particulate matter, air quality and climate: lessons learned and future needs. Atmospheric Chemistry and Physics, 15, 8217-8299.
90) Tai, A.P.K. et al. (2012), Impact of 2000-2050 climate change on fine particulate matter (PM_{2.5}) air quality inferred from a multi-model analysis of meteorological modes. Atmospheric Chemistry and Physics, 12, 11329-11337.
91) Elsasser, M. et al. (2012), Organic molecular markers and signature from wood combustion particles in winter ambient aerosols: aerosol mass spectrometer (AMS) and high time-resolved GC-MS measurements in Augsburg, Germany. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 12, 4831-4866.

증우'[93], '빌딩 강우'[94], '살수차 운행 확대' 등은 대기오염물질의 습성침적 특성을 바탕으로 미세먼지 세정을 유도하는 대책이라고 할 수 있다(그림 2.22).[95] 이와 아울러 '강풍기 설치' 또한 인공 바람을 통해 대기 확산을 유도하여 고농도 미세먼지를 희석할 수 있다는 가능성을 바탕으로 검토된 바 있다. 다만, 이러한 대책은 기상 조건에 따라 기대효과가 달라질 수 있으므로 주의 깊게 검토되어야 한다.

[그림 2.22] 미세먼지 개선을 위한 인공증우 (좌) 및 살수차 운행 (우)

자료: 경기도, 연합뉴스

한편, 기상요인이 대기오염물질 농도 증가 및 감소에 직접적으로 영향(direct effect)을 주는 것 이외에, 대기오염물질 농도 변화가 기상 및 기후 변화에 영향을 미치고 변화된 기상이 다시 대기오염물질 농도에 영향을 주는 간접 영향(indirect effect)이 나타날 수 있다.[96] 따라서 기상과 대기오염의 상관성은 단편적으로 해석하기 어려우며, 장·단기적 관점에서 이해되어야 한다.

92) Lee, S. et al. (2011), High-PM10 concentration episodes in Seoul, Korea: Background sources and related meteorological conditions. Atmospheric Environment, 45, 7240-7247.
93) 강수가 예측될 때, 요오드화은 등 물질을 살포하여 구름 생성을 촉진함으로써 강수량을 증가시키는 방법. 국내에서도 경기 알프스 프로젝트 등에서 인공 증우를 통한 미세먼지 제거가 검토된 바 있다.
94) 고층건물에서 살수하여 습성침적의 원리로 미세먼지를 제거하는 방식으로 중국에서 시도된 바 있다.
95) 경기 알프스 프로젝트 (2017)
96) Zhai, S. et al. (2019) Fine particulate matter ($PM_{2.5}$) trends in China, 2013~2018: contributions from meteorology. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 1-19.

5. 중국 등 국외영향은 얼마인가?

미세먼지에 대한 국민인식 조사에서 국내 미세먼지의 주요 발생원인에 대해 조사대상자의 80.3%가 중국 등 국외유입 때문이라고 응답할 정도로 우리나라 국민들은 중국을 포함한 국외의 수송영향을 크게 인지하고 있다.[97)]

국내 미세먼지에 대한 중국 등 국외영향 평가 시, 단기적인 고농도 발생 및 장기적인 평균농도 관점에서 각각 접근할 수 있다. 국내에 고농도 미세먼지가 발생하였을 경우 서울 또는 전국을 대상으로 그간 분석된 연구 결과를 살펴보면(표 2.5), 국내 고농도 미세먼지 발생은 주로 겨울철과 봄철에 나타난다. 여러 연구자가 다양한 방법을 적용하고, 대상 기간에도 차이를 보이나, 국내 고농도 미세먼지에 대한 중국 배출량의 영향은 최소 30%에서, 최대 75% 까지 나타난다.

한편, 국내 고농도 미세먼지 발생원인 중 하나로 중국 배출 영향이 자주 언급되기는 하나, 5일 이상의 고농도 미세먼지 발생 시, 지속일 후반에는 국내 배출 영향이 높아지는 사례가 보고된 적도 있다[98)]. 다만, 국외 배출 영향은 사례 기간 동안의 기상 조건에 따라 달라지므로 조사 대상 범위(예를 들면 지역과 기간)에 따라 차이가 나타나는 것은 너무나 당연하다. 또한 지금까지의 연구가 주로 수도권을 대상으로 단기간의 미세먼지 고농도 사례분석에 집중되어 있어 대표성에도 제한점이 있다.

[표 2.5] 고농도 사례기간 중국 대기오염물질이 국내에 미치는 영향 분석

	대상지역	대상기간	중국 영향	대상물질	연구 방법
Choi 외(2019)	전국	2016.5.1. ~ 2016.6.12	~ 70%	PM-2.5	GEOS-Chem
Jeong 외 (2011)[99)]	서울	2007.4 ~ 2008.3	30~75%	PM-10	PSCF
Lee 외(2017)	서울	2009 ~ 2013 (고농도 사례 기간)	~45%	PM-2.5	GEOS-Chem
Kim 외 (2017c)	서울	2014.2	70%	PM-2.5	CMAQ
Kim 외 (2017c)	서울	2014.2	70%	PM-2.5	PSAT
Kim 외 (2017a)	서울	2014.2	40%~54%	PM-10	CMAQ-HDDM

97) KBS1 (2019.6.9.),「新만민공동회 미세먼지 해법을 말하다」, http://program.kbs.co.kr/1tv/culture/dustdiscussion/pc/, 검색일: 2019.7.15

98) Kim, B.-U. (2017a), Spatially and chemically resolved source apportionment analysis Case study of high particulate matter event, Atmospheric Environment, 162, 55-70.

99) Jeong, U. (2011), Estimation of the contributions of long range transported aerosol in East Asia to carbonaceous aerosol and PM concentrations in Seoul, Korea using highly time resolved measurements: A PSCF model approach. J. Environ. Monitor., 13, 1905-1918.

표 2.6은 고농도 기간이 아닌 장기간에 걸친 중국 영향을 분석한 결과로, 최소 25%에서 최대 60%까지 제시되고 있으며, 고농도 사례만을 대상으로 한 결과에 비해 국외 영향은 낮아진다. 국내 PM-10 농도 중 국외 배출량 영향을 추정한 연구에 따르면(Kim 외, 2017c), 2014년 중 수도권 지역의 미세먼지 농도에 국외 배출량이 미치는 영향은 연평균 60% 수준이며 봄철에 국외 영향이 높아지고(3월에 최대 70%), 가을철에 감소(9월, 30%)한다. 대상 기간 평균 국내 영향은 40% 수준으로 월별 변화가 뚜렷하게 나타난다. 이러한 계절 변화는 어느 시기를 대상으로 국내외 기여도를 분석하는지에 따라 그 결과가 달라질 수 있음을 의미한다. 또한 연구자의 분석 방법에 따라 국내외 기여도가 큰 차이를 보인다. 결국 국내외 기여도를 한 값으로 제시하는 것에는 무리가 따르며, 미세먼지 농도 개선을 위한 원인 분석과 이해 과정, 그리고 어떻게 국내 배출량을 저감하여 대기질을 개선할지 참고자료로 이용하는 것이 바람직하다.

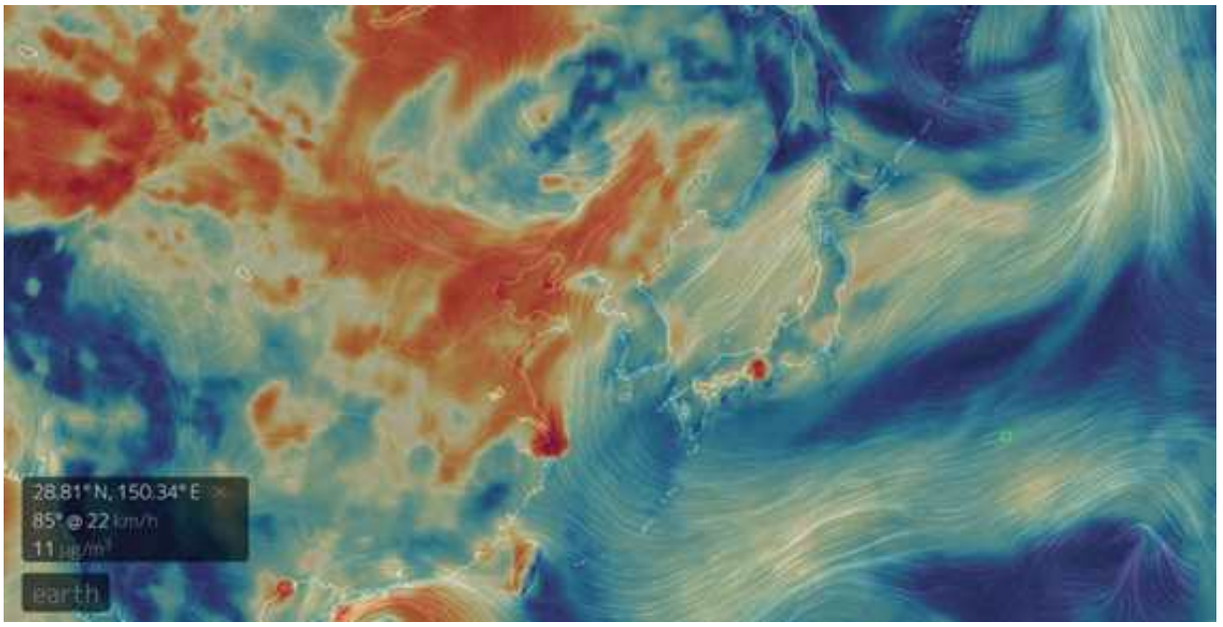
[표 2.6] 중국 대기오염물질이 장기간 국내 미치는 영향 분석

	대상지역	대상기간	중국 영향	대상물질	연구 방법
Yim 외 (2019[100])	전국 및 일본	2010	30%	PM-2.5	CMAQ
국립환경과학원 (2013)[101]	전국	2010년 (1, 4, 7, 10월)	60%	PM-2.5	BFM
Jeong 외 (2015)	서울	2007.4 ~ 2008.3	25%	PM-10	PSCF
Kim 외 (2017c)[102]	수도권	2014	30~70% (월평균)	PM-10	CMAQ

본 절에서는 국외 영향과 관련하여 현재 발표된 연구 결과를 일부 정리하였다. 그러나 앞서 언급하였듯이 이 결과만으로는 국내외 영향을 단정적으로 말할 수 없다. 오히려 미세먼지 문제를 중국 탓으로만 돌리기 보다는 우리나라에서도 적극적인 감축 노력이 필요하다. 최근 중국도 미세먼지 농도를 줄이기 위한 많은 노력을 수행 중이며, 이를 고려하면 국내 자체의 미세먼지 해결 노력의 효과는 현재보다 더 빠른 진전을 보일 수 있다.

100) Yim, S. H. L. et al. (2019), Air quality and acid deposition impacts of local emissions and transboundary airpollution in Japan and South Korea, Atmos. Chem. Phys. Discuss., 1-23.
101) 국립환경과학원 (2013), "동북아 대기오염 국가간 상호영향 공동 연구 (I)", 최종보고서
102) Kim, H.C. et al. (2017c), Regional contributions to particulate matter concentration in the Seoul metropolitan area, South Korea: seasonal variation and sensitivity to meteorology and emissions inventory. Atmospheric Chemistry and Physics, 17(17), 10315-10332.

그림 2.23은 소셜 미디어 등에서 많이 인용되는 자료로, 전 세계 날씨와 대기오염에 대한 예측 자료[103]이다. 해당 자료는 앞에서 설명한 대기질 모사와 유사한 과정을 거쳐 만들어 진다. 관심 지역의 농도와 기류 이동에 따른 농도의 시공간적 변화를 확인할 수 있다는 점에서 많이 참고하고 있다. 하지만, 현재 해당 자료 역시 미세먼지 농도에 대한 기여도, 즉 누가 얼마나 영향을 미치는지에 대한 정보는 제공하지 않는다. 정책적 활용을 위해서는 배출과 농도와의 관계는 정성적인 아닌, 정량적으로 설명되어야 한다. 과학에서 흔히, 상관관계와 인과관계가 구별되어야 한다 (“after this, therefore because of this”)고 말하는 것과 같은 맥락이다.



[그림 2.23] ’earth nullschool’의 PM-10 농도 (2019년 7월 31일 16시)

자료: https://earth.nullschool.net/ko/#current/wind/surface/level/orthographic=-181.70,-1.24,435

103) 기상 자료로 GFS(Global Forecast System)를, 대기오염 농도로 GEOS-5(Goddard Earth Observing System)를 이용한 전지구 규모의 예보 결과를 표출하는 웹

6. 미세먼지 발생원인에 대한 주요 이슈

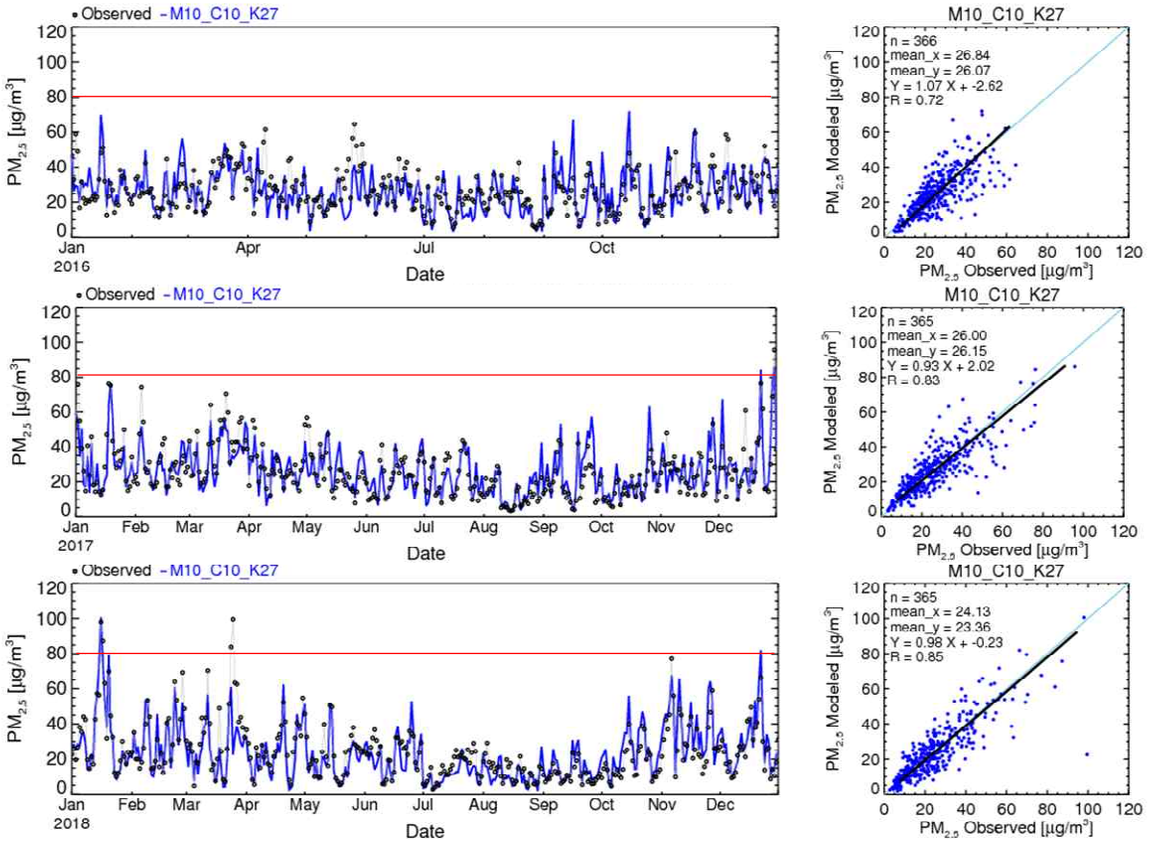
1) 동북아 기후변화가 미세먼지 농도에 미치는 영향은 무엇인가?

동북아시아의 기후변화는 미세먼지의 장기적 농도 변화 추세뿐 아니라 단기적으로는 미세먼지 고농도 발생에도 영향을 미친다. 먼저 장기적인 관점에서 살펴보면, 기후변화는 국내를 포함한 동북아시아의 미세먼지 농도를 증가시킨다.

최근 중국에서 발표된 2013년부터 2018년까지의 PM-2.5 농도에 대한 연구를 살펴보면, 중국의 PM-2.5 농도는 배출량 저감 노력으로 꾸준히 낮아지고 있으나, 기후변화(예로, 동북아시아의 계절풍 약화, 이후 설명)가 배출량 저감에 의한 PM-2.5 농도 감소세를 둔화시키는 것으로 보고하였다[104]. 국내의 경우에도 2012년까지 점차 감소하던 PM-10 농도가 최근 다시 증가한 이유를 바람이 느려졌기 때문으로 설명하였다[105].

또한 최근 3년 동안의(2016년~2018년) 수도권에 대한 일평균 미세먼지 관측 및 모사 농도를 살펴보면 (그림 2.24) 연평균 농도는 2016년 26.84㎍/㎥, 2017년 26.00㎍/㎥, 2018년 24.13㎍/㎥로 점차 감소하지만, 고농도 미세먼지 발생일은 해마다 증가하여 2018년에 가장 빈번하였다. 미세먼지의 연평균 농도는 개선되고 있으나, 건강 및 가시거리 등에 영향을 주는 고농도 미세먼지 발생 빈도 및 지속일 수는 오히려 높아진 것이다. 연평균 농도 감소는 주로 배출량이 감소하는 추세를 반영하나, 미세먼지 고농도 일은 기상 영향에 따라 발생할 수 있다는 점에서 국민들이 체감하는 농도 증가는 오히려 연평균 농도가 낮았던 해에 높은 예시를 볼 수 있다.

104) Zhai, S., et al. (2019), Fine particulate matter trends in China, 2013-2018: contributions from meteorology. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 1-19.
105) Kim, H.C.. et al. (2017b) Recent increase of surface particulate matter concentrations in the Seoul Metropolitan Area, Korea. Scientific Reports, 7.



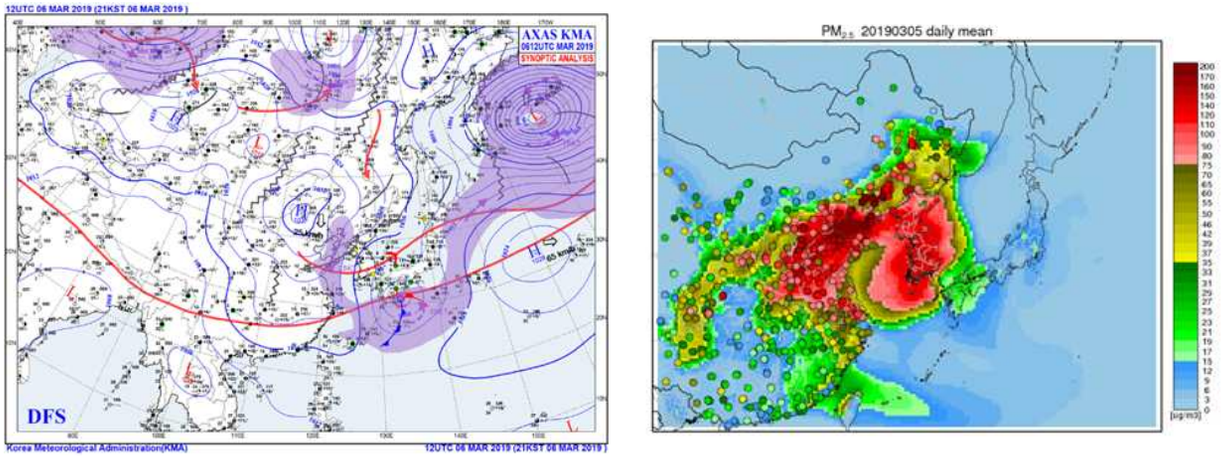
[그림 2.24] 2016년 ~ 2018년 국내 미세먼지 농도 변화 추세

자료: 아주대 김순태 교수

그렇다면, 과연 기후변화의 어떤 기상현상이 미세먼지 농도를 증가시키는 것일까? 중국에서는 1980년~2016년 겨울철 북경에서 4일 이상 지속된 고농도 연무 사례의 증가를 기후변화에 의해 동북아 주변의 해수 온도가 증가함에 따라 겨울철 계절풍이 약화되어 대기정체가 심해졌기 때문으로 분석한 바 있다.[106] 한편, 지구 온난화에 의해 북극의 해빙이 줄어들면서 대기정체를 유발하여 연무 사례가 증가 했다는 보고도 있다[107]. 2019년 3월 초 동북아시아에서 지속되었던 고농도 PM-2.5 또한 오호츠크해 주변의 비정상적인 기압 발달이 대기 확산을 방해하였기 때문으로 설명된다(그림 2.25).

106) Pei, L. (2018), Increasing persistent haze in Beijing: potential impacts of weakening East Asian winter monsoons associated with northwestern Pacific sea surface temperature trends. Atmospheric Chemistry and Physics, 18, 3173-3183.

107) Kim, M. J. (2019), Regional Arctic amplification by a fast atmospheric response to anthropogenic sulphate aerosol forcing in China. Journal of Climate.



[그림 2.25] 2019년 3월 6일 기압 배치(좌) 및 고농도 PM-2.5 관측 및 모의 결과(우)

자료: 기상청 날씨누리(http://www.weather.go.kr), 아주대 김순태 교수

미국 환경보호청(EPA)에 따르면, 기후변화에 따른 온도 증가는 대기 순환을 방해하고 가뭄을 유발하여 잦은 산불 발생을 일으킬 수 있다. 가뭄과 산불은 대기 중 미세먼지 농도를 증가시키므로 기후변화에 따라 전 세계적으로 대기 중 미세먼지 농도가 증가할 것으로 전망된다.[108]

한편, 중국에서 발생된 미세먼지가 북극의 온난화를 가속화 시키는 등 미세먼지도 기후변화에 영향을 미칠 수 있다.[109] 다시 말해, 기후변화로 인해 미세먼지 농도가 증가하면 미세먼지가 구름의 응결핵으로 작용하여 대기로 들어오는 태양복사를 줄이고, 이는 다시 기상을 변화시킬 수 있다.[110] 이러한 기후변화 – 미세먼지의 피드백은 앞으로의 미세먼지 농도 개선을 위해 미세먼지 배출 저감 노력뿐만 아니라, 기후변화를 최소화할 수 있는 대책이 동시에 필요하다.

2) 국내 미세먼지를 생성하는 핵심적인 기상/화학 메커니즘은 무엇인가?

일반적으로 겨울과 봄철 국민들이 불안해하는 대기오염물질의 고농도 현상은 고기압 하의 약한 풍속에 따른 오염물질의 희석 저하, 대기오염물질간 반응에 의한 2차 생성 촉진 등의 영향을 받는다.[111] 특히, 봄철의 경우 연무와 박무 등 안개 생성이 잘되는

108) https://www.epa.gov/arc-x/climate-adaptation-particulate-matter-and-health
109) Kim, M. J. (2019), Regional Arctic amplification by a fast atmospheric response to anthropogenic sulphate aerosol forcing in China. Journal of Climate.
110) Ghan, S. J, (2013), A simple model of global aerosol indirect effects. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 118(12), 6688-6707.
111) 신문기 외 (2007), 기상인자가 미세먼지 농도에 미치는 영향, 한국대기환경학회지, 23(3), 322-331.

대기 정체 조건과 맞물려 습도가 높은 상태에서 액상산화 반응까지 더해진다. 이로 인해 국내 미세먼지 농도는 공기의 이동과 확산 저하, 생성된 미세먼지 축적, 안개와 결합한 스모그 발생 등으로 인해 직접적인 국외요인을 배제하여도 '나쁨' 단계 이상으로 상승할 수 있다.[112] 하지만 실제로는 국내에서 고농도 미세먼지가 발생할 경우, 중국, 북한 등에서 배출된 미세먼지의 국외유입과 국내의 배출, 기상 영향이 모두 혼재되어 매우 복잡한 양상을 지닌다. 더욱이 중국에서 배출된 미세먼지와 전구물질이 장거리 수송될 경우 서해를 지나오면서 해염입자와의 물리·화학적인 상호작용이 예상되나 관련 연구가 없어 이에 대한 설명이 불가능하다.

2016년에 실시된 한-미 공동 대기질 연구(KORUS-AQ)에서는 국내 미세먼지의 75% 이상이 오염원에서 직접 배출된 1차 미세먼지가 아니라 기체 상태의 오염물질이 변환된 2차 미세먼지인 것으로 나타났다.[113] 하지만 2차 미세먼지 생성과 성장 비율은 온도와 습도 등 기상조건과 전구물질의 농도 조건에 따라 달라지므로 동북아 특성에 맞는 미세먼지 생성 및 성장 관련 연구가 필요하다. 예로, 수도권 집중측정소의 PM-2.5 농도 분석결과에서는 PM-2.5의 농도가 높아질수록 2차 무기성 이온농도의 비율이 증가하는 경향을 보였다. 더욱이 우리나라는 동북아 지역의 주요 배출원인 중국의 풍하지역에 위치하고, 계절풍이 존재하여 시기(계절)에 따라 고농도 미세먼지 발생에 중요 과정이 미국, 유럽 등과 상이할 수밖에 없다. 이를 규명하기 위해서는 미세먼지의 지속적 측정, 국내 배출/기상 환경을 재현한 챔버 실험, 3차원 기상-대기질 모델링 등을 활용한 다각적인 연구와 논의가 필요하다.

이상으로 미세먼지 발생원인에 관련된 주요 이슈를 제시, 분석해 보았다. 미세먼지 관련 자료축적과 분석 측면에서 꾸준한 발전이 진행되었으나, 국내 고농도 미세먼지 발생 메커니즘에 대해서는 갈 길이 멀다[114]. 미세먼지 관련 전문가 및 정책 결정자들이 미세먼지 발생원인에 대한 명확한 결론을 도출하고 이를 저감 대책에 적용하기 위해서는 앞으로도 상당한 시간이 필요하다.

이를 과학적이고 효율적으로 해결하기 위해서는 미세먼지를 생성하는 다양한 배출원별 성분 및 기여도, 정확한 배출량 산정, 고농도를 유발하는 기상·화학 메커니즘 등에 대한 연구가 유기적이고 체계적으로 진행되어야 할 것이다. 다만, 정책적인 관점에서는 국민들의 불안 해소와 정책 우선 순위를 판단하고, 현재 알려진 주요 미세먼지 발생원 등에 대한 관리는 지금부터라도 적극적으로 시행해 나가야 한다.

112) 박일수 (2016), 서울 수도권지역에서 미세먼지 고농도 발생의 근본 원인은 무엇인가?, 한국대기환경학회지, 32(3), 352-353.
113) NASA (2016), KORUS-AQ Rapid Science Synthesis Report, https://espo.nasa.gov/korus-aq/content/KORUS-AQ, 검색일자: 2019.7.15.
114) 박현욱, 배충식 (2019), 미세먼지 현황과 과제, 기계저널, 59(6), 55-58.

제2장 요약

- 동북아 지역의 미세먼지 장기적 농도 변화는 2014년 이후 감소 추세를 보인다.
- 하지만, 국민들이 우려하는 고농도 미세먼지 지속 사례가 고기압 정체 등 기상 조건에 의해 꾸준히 발생하고 있다.
- 현재까지 보고된 연구를 종합하면, 국내 미세먼지의 국외 영향은 연평균 30~60% 수준이며, 단기 고농도 미세먼지 발생 시에는 최대 70% 이상 높아질 수 있다.
- 이러한 국내외 기여도는 분석 방법 및 사례 선정 (대상지역, 기간, 년도, 계절, 배출량 변화 등)에 따라 달라지므로 한 값으로 단정하기는 어렵다.
- 북한의 경우 국내와의 인접성, 향후 에너지 수요 증가에 따른 배출 변화를 감안할 때 장기적인 대책 마련이 필요하다.
- 국내 배출 관리 관점에서 보면, 1차 미세먼지는 사업장 및 이동오염원에서, 황산화물은 발전, 사업장, 비도로이동오염원, 그리고 질소산화물은 도로이동오염원을 포함한 연소 과정에서 많이 배출된다.
- 따라서 다양한 배출 분야에 대한 국내 저감 노력이 필요하다.

03
미세먼지 저감

1. 정부의 상시저감 및 고농도 비상저감 대책 ····· 66
2. 그간 저감과 관련한 주요 이슈 ····· 80
3. 요약 ····· 104

국민정책참여단

미세먼지 정책제안 참고자료집

제3장 미세먼지 저감

한서대학교 | **김정수**
경기연구원 | **김동영**

2013년 국제보건기구(WHO)에서 미세먼지를 1군(Group 1) 발암물질로 지정한 이후 미세먼지에 대한 국민의 관심이 높아지기 시작하면서, 정부도 미세먼지 저감대책을 마련하고 지속적으로 강화해 왔다.

최근 미세먼지를 줄이기 위해 정부가 수립한 주요 대책들은 다음과 같다.

(1) 2024년까지 전국적인 환경기준[115] 달성을 목표로 12개 주요 추진과제를 제시한 환경부의 종합대책(2013.9월)

(2) 2026년까지 유럽 주요 도시 수준의 대기질 달성을 목표(PM-2.5 농도: 23→18㎍/㎥)[116]로 제시한 **「미세먼지 관리 특별대책(2016.6월, 일명 6.3 대책)」**

(3) 2022년까지 국내 미세먼지 배출량의 30% 감축(PM2.5 농도: 26→18㎍/㎥)[117]을 목표로 한 12개 정부부처 합동 **「미세먼지 관리 종합대책(2017.9월, 일명 9.26 종합대책)」**

(4) 지난 해인 2018년 기존의 미세먼지 감축 목표를 강화한 **「비상·상시 미세먼지 관리 강화대책(2018.11월, 일명 강화대책)」**

정부는 이러한 대책을 통해 2022년까지 미세먼지 배출량을 2014년 대비 35.8%까지 줄이고자 하고 있으며, 부문별로는 발전에서 23.7%, 산업에서 50.6%, 수송 및 건설기기 등에서 35.8%, 그리고 생활 등 기타부문에서 15.8% 감축을 목표로 하고 있다(표 3.1).[118]

이러한 정부 정책은 사회 전 부문에 걸쳐 정부가 추진할 수 있는 대책을 발굴하여 진행하고자 하는 의지를 담고 있다. 그러나 정부의 노력에도 불구하고 현 미세먼지 저감 대책에는 아직도 개선해야 할 부분들이 많은 것 또한 사실이다. 이 장에서는 정부가 수립하여 추진 중인 정책에 대해 먼저 살펴보고, 각 부문별로 제기되는 문제점과 개선 방향 등을 검토함으로써, 미세먼지 해소 대책을 마련하는데 시사점을 제시하고자 한다.

115) 국민의 건강을 보호하고 쾌적한 환경을 조성하기 위하여, 국가가 달성하고 유지하는 것이 바람직한 환경상의 조건 또는 질적 수준 (「환경정책기본법」 제3조 제8호 및 제12조)
116) 서울 PM-2.5 2015년 연평균 농도 23㎍/㎥ → 2026년 18㎍/㎥
117) 서울 PM-2.5 2016년 연평균 농도 26㎍/㎥ → 2022년 18㎍/㎥ (조기감축)
118) 국가 대기오염물질 배출량 통계를 이용하여 직접(1차) 배출과 2차 생성(SOx, NOx, VOCs 기인, 전환계수 적용)을 고려한 초미세먼지(PM-2.5) 배출량 기준이다(2장 참조). 그러나 정책설명의 편의성을 위해 추정된 2차 생성 미세먼지 배출량을 포함하여 감축목표를 설정하는 것을 비판적으로 지적하면서 1차 오염물질(PM-2.5, SOx, NOx, VOCs) 배출량을 기준으로 각 물질에 대한 감축량을 제시하는 것이 적합하다는 전문가 의견들도 있다.

[표 3.1] 최근 수립된 정부 미세먼지 정책의 부문별 감축 목표

(단위 : 톤, %)

부문	기준 배출량* (톤, 2014 기준)	'17.9.26 대책 후 (기준대비 △30.5%)			강화대책('18.11) 후 (기준대비 △35.8%)			최종 감축량 (전체 기준 감축비중)
		감축량	감축률	배출량	추가 감축량	추가 감축률	최종 배출량	
합계	**324,109** (100%)	**△98,740**	**△30.5**	**225,369** (100%)	**△17,375**	**△5.4%**	**207,994** (100%)	**116,115** (△35.8%)
발전	49,350 (15.2%)	△9,885	△20.0	39,465 (18%)	△1,796	△3.6%	37,669 (18%)	11,681 (△3.6%)
산업	123,284 (38.0%)	△52,791	△42.8	70,493 (31%)	△9,609	△7.8%	60,884 (29%)	62,400 (△19.3%)
수송	90,361 (27.9%)	△27,077	△30.0	63,284 (28%)	△5,282	△5.8%	58,001 (28%)	32,360 (△10.0%)
생활	61,114 (18.9%)	△8,987	△14.7	52,127 (23%)	△688	△1.1%	51,439 (25%)	9,675 (△3.0%)

* 초미세먼지 배출량(PM-2.5) 기준 = 1차(직접) PM-2.5 배출량 + 2차 생성(SOx, NOx, VOCs) 환산배출량

1. 정부의 상시저감 및 고농도 비상저감 대책

앞서 설명한 바와 같이 2013년 이후 정부는 미세먼지를 줄이기 위해 4차례에 걸쳐 정부대책을 수립하여 추진해 오고 있다. 이 절에서는 정부대책 중 최근에 수립된 6.3 대책(2016.6)과 9.26 종합대책(2017.9), 그리고 강화대책(2018.11)을 중심으로 부문별 주요 대책내용을 살펴보고자 한다.

1) 발전부문

발전부문은 전체 미세먼지(PM-2.5) 배출량의 15%인 49,350톤(2014년)을 차지하며, 전체 화력발전소 60기 중 30기가 충남지역에 집중되어 있다. 2015년 기준으로 전체 발전량 중 석탄화력발전의 비중은 39%로 다른 OECD 국가들에 비해 높은 수준이다(OECD 평균 30%). 발전부문은 소수의 대형시설이 미세먼지와 원인 물질을 많이 배출하는 특징 때문에 예전부터 미세먼지 배출 저감을 위한 주요 대상시설로 엄격한 관리를 받아 왔다.

□ 6.3 대책(2016년)

2016년 6.3 대책 중 눈에 띄는 대책은 노후 석탄발전소 일부를 가동 중단한다는 내용이다. 우선 노후 석탄 화력 10기[119]를 폐지하거나 LNG 발전소로 대체 건설 또는

바이오 연료로 전환하는 계획을 담고 있다. 또한 새로이 건설되는 석탄발전소 9기에 대해서는 가장 엄격한 배출허용기준이 적용되는 영흥화력 수준[120]을 적용하기로 했다.

그리고 기존 석탄화력발전소는 황산화물(SOx)과 질소산화물(NOx), 먼지의 배출을 저감하기 위해 방지시설을 보강하거나 대대적인 성능개선(retrofit)을 실시하도록 하였다. 당진·태안·보령 등 충남지역 3개 발전소에 대해서는 정부-발전사-지자체 간 '자발적 협약'으로 배출량을 감축해 나가기로 하였다.

6.3 대책에서는 환경비용(대기오염), 사회적 갈등(장거리 송전망 등) 등을 해소하기 위해 석탄발전 비중 축소와 태양광 등 재생에너지 비중 확대 등의 친환경 전원믹스[121]를 확대하는 방안을 담았다.

□ 9.26 종합대책(2017년)

2017년 9월 종합대책은 발전부문에서 2014년 대비 미세먼지(PM-2.5) 배출을 20% 줄이는 것을 목표로, 건설 공정률이 낮은 신규 석탄화력발전소의 건설을 재검토하여 석탄 화력의 비중을 축소하고 재생에너지 등 친환경 에너지원 확대를 추진해 나가는 내용을 담고 있다.

먼저, 공정률이 낮은 신규 석탄 화력(9기)[122] 건설을 재검토하거나 신규 건설을 금지하는 내용을 「제8차 전력수급계획('17)」에 반영하도록 하였다. 또한 미세먼지가 심한 봄철(3~6월)에는 노후 석탄화력발전소[123]의 가동을 일시적으로 중단하는 내용을 담고 있다.

39기의 석탄화력발전소 배출허용기준을 약 2배 강화하고, 대대적 성능개선과 2022년까지 7.2조원을 투입하여 환경설비를 전면 교체하는 등 운영 중인 석탄화력 발전소 관리를 강화하였다. 그리고 장기적으로는 30년 이상된 노후 석탄발전소 7기[124]를 2022년까지 폐지하기로 하였다.

또한 고형연료제품(SRF) 사용시설을 정기적으로 정밀하게 진단(연 1회)하고 매 5년마다 허가를 재검토하는 등 관리를 강화하며, 재생에너지 및 기후변화 대응 기술개발을 강화하기로 하였다. 그리고 친환경·분산형 에너지믹스 달성을 위해 재생에너지 비중을 2015년 6.4%에서 2030년까지 20%로 확대[125]하기로 하였다.

---

119) 호남화력(2기), 삼천포화력(2가), 보령화력(2기), 서천화력(2기), 영동화력(2기) 등 총 10기가 대상이다.
120) 영흥화력 3-6호기는 먼지 5㎎/Sm³, 황산화물 25ppm, 질소산화물 15ppm의 기준을 적용받고 있다.
121) 전원믹스(電源 Mix)는 전체 전력 생산에서 화석연료, 원자력 등 비재생가능에너지와 재생가능에너지가 차지하는 비율을 뜻한다.
122) LNG 등 전환 추진 협의 4기(당진 2기, 삼척2기), 최고수준 환경관리 협의 5기(신서천1기, 고성2기, 강릉 2기)
123) 영동(2호기), 보령(1,2호기), 삼천포(1,2호기) 등 5기에 대해 2018년 봄철 가동중단을 시행하였다.
124) 6.3대책에서 폐지 검토된 노후 석탄발전 10기 중 3기는 2017년 7월 기폐지(영동 1호기, 서천 1~2호기) 되었고 나머지 7기에 대한 폐지일정을 22년까지로 앞당기기로 하였다.
125) 제8차 전력수급기본계획('17) 및 제3차 에너지기본계획('18) 시 반영

발전용 에너지원에 대해서는 친환경적 세율체계로 조정하는 방안을 검토하기로 하였다. 또한 벙커C유 사용 발전소에 대한 배출허용기준을 강화하고 도서(섬)지역 발전소를 법적 관리를 받는 배출시설에 추가하여 체계적으로 관리하며, 고형연료제품(SRF) 시설과 같은 관리 사각지대에 대한 관리를 강화하는 내용도 담고 있다.

□ 강화대책(2018년)

강화대책은 발전부문에서 미세먼지(PM-2.5) 배출을 9.26 종합대책의 목표 대비 3.6% 더 줄여 2014년 대비 23.7% 줄이는 것을 목표로 한다. 먼저, 환경오염비용을 반영하여 유연탄과 LNG에 적용되는 연료 부과세율(원/kg)을 기존 1:2.5(유연탄:LNG)에서 2:1(유연탄:LNG)로 조정하였으며, 환경급전 세부방안 마련 등 LNG와 같은 친환경발전의 가격경쟁력을 높이는 조치를 취하였다.

30년 이상 노후 석탄발전소의 실제 미세먼지 배출량을 고려하여 봄철 가동중지 대상을 조정·강화하였으며, 비산먼지 발생 저감을 위해 관련 법령을 개정하여 야외 저탄장(석탄저장소)을 단계적으로 실내화하기로 하였다.

또한 도서 지역의 등유발전시설(1.5 MW 이상, 18기)에 대한 배출허용기준을 도입하고, 중유보다 미세먼지 발생이 적은 바이오중유[126]를 발전용 연료로 정식 사용하기로 하였다.

[표 3.2] 발전부문 주요 정부 정책 변화과정

6.3 대책(2016.6)	9.26 종합대책(2017.9)	강화대책(2018.11)
·노후 석탄화력 10기 폐지, LNG 대체, 바이오연료 전환	·3기 기폐지('17.7), 22년까지 7기 조기폐지	(지속 추진)
·신규 석탄발전 9기 배출 허용기준 강화	·신규 석탄발전소 9기 재검토 -석탄 5기, LNG 전환 4기	·9기 발전소 재검토 조정 - LNG 전환 4기 → 2기
·기존 석탄발전소 방지시설 보강, 성능개선	·39기 배출기준 30-50% 강화 7.2조원 투입 성능개선 추진	(지속 추진)
-	·노후석탄화력 봄철(3~6월) 가동중지	·노후석탄화력 배출량 기반 가동중지(강화)
<기존> 연료부과세율(유연탄<LNG) - 유연탄:LNG = 1:2.5		·유연탄 과세 강화 - 유연탄:LNG = 2:1
<기존> 경제급전 적용		·환경급전 적용(급전 우선순위 선정시 환경비용 반영)
-	-	·비상저감조치시 출력 80%로 제한
·재생에너지 '25년 11% 확대	·재생에너지 '30년 20% 확대	(지속 추진)

126) 바이오중유는 중유 대비 황산화물은 거의 배출되지 않으며, 질소산화물 39%, 미세먼지 28%, 온실가스 85%는 감소하는 등 환경개선 효과가 우수한 것으로 보고되고 있다.

2) 산업부문

산업부문의 미세먼지 배출량은 전국 배출량의 38%(123,284톤, 2014년 기준) 수준이며 2016년 말 기준 전체 사업장 수는 57.5천여 개소이다. 이 중 4종과 5종[127] 시설이 약 90%에 해당되는 52천여 개소로 관리상의 부실 및 사각지대가 발생되고 있어, 그간 이를 강화하는 대책이 중심을 이루었다.

□ 6.3 특별대책(2016년)

6.3 대책에서는 우선적으로 수도권 사업장의 대기오염 총량관리제[128] 강화를 주된 내용으로 하고 있다. 수도권 총량관리제 대상사업장을 '16년 1월부터 대형시설인 1종과 2종 시설에서 중형 시설인 3종 시설까지 확대하고, 배출허용총량 할당기준을 단계적으로 강화하여 배출 총량 감축을 추진하였다.

수도권 외 사업장에서 발생하는 미세먼지를 줄이기 위해, 미세먼지 다량배출 사업장에 최적의 방지시설을 설치했을 때를 기준으로 한 엄격한 배출허용기준을 마련하였다. 또한, 미세먼지 원인물질(황산화물(SOx), 질소산화물(NOx) 등)에 대한 배출부과금 개선방안을 마련하기로 하였다. 이 외에도 중소기업과 상업용 건물에 대한 저녹스버너 설치 지원사업도 지속 추진하는 내용을 담고 있다.

□ 9.26 종합대책(2017년)

9.26 종합대책은 2022년까지 산업부문의 미세먼지 배출량을 약 43%(2014년 대비) 줄이기 위하여 총량관리제를 확대하고 감시를 강화하는 등 관리 내실화를 추진하였다.

사업장 오염물질 배출총량제 내실화를 위해 먼지 총량제를 단계적으로 확대[129]하고, 1~3종 총량제 적용사업장에 굴뚝자동측정기기(TMS) 부착을 의무화하기로 하였다.

또한, 고농도 발생 시기(봄, 겨울)에 대기 오염물질 다량 배출업소를 집중점검하고, TMS 부착대상 대상이 아닌 사업장을 대상으로 드론 등을 이용한 실시간 감시를 실시하는 등 불법행위에 대한 엄격한 점검과 감시 방안을 마련키로 하였다. 제철·제강, 석유정제, 시멘트 등 미세먼지 다량배출 사업장의 배출허용기준을 강화하는 등 사업장 관리체계를 개선하며, 4·5종 소규모 사업장을 대상으로 한 환경개선 지원대책도 마련하였다.

---

127) 연간 대기오염물질(질소산화물, 황산화물, 먼지) 발생량 합계에 따라 배출사업장의 규모를 1~5종으로 구분하고 있다.
1종(80톤 이상), 2종(20~80톤), 3종(10~20톤), 4종(2~10톤), 5종(2톤 미만)

128) 모든 사업장이 배출허용기준 미만으로 대기오염물질을 배출하더라도, 사업장이 많다면 지역의 대기질은 개선되지 않을 수도 있다. 이러한 한계를 보완하기 위해, 지역 내 배출가능한 오염물질의 총량을 정하고 그 범위 안에서 사업장별로 배출 가능한 오염물질의 총량을 할당하여, 그 범위 내에서만 배출하도록 하는 제도가 총량관리제이다

129) '17년에는 먼지 총량제를 시범실시하고, '18년부터 수도권 공통연소시설부터 적용키로 하였다.

중장기적으로는 수도권 이외에 충청·동남·광양만권 등 미세먼지 배출원 밀집 지역을 '대기관리권역'으로 지정하고, 총량관리제 적용 대상지역을 확대해 나가기로 하였다.

아울러, 2차 미세먼지 생성의 원인 물질인 질소산화물에 대해 대기배출부과금을 부과하고, 석유제품저장시설 등 VOCs 비산배출 사업장의 배출기준을 현행 2,000 ppm에서 2019년부터 1,000 ppm으로 강화하여 시행하고, 이후 단계별 강화계획을 마련하는 등 시설관리기준을 강화하기로 하였다.

□ 강화대책(2018년)

강화대책은 산업부문 미세먼지 배출을 9.26 종합대책보다 7.8% 더 줄여, 2022년까지 2014년 대비 50.6% 줄이는 것을 목표로 하였다. LNG 집단에너지시설 및 복합발전소의 질소산화물 배출허용기준을 2배 이상 강화(40~60 ppm)하기로 하였다. 또한, 기존에는 도장・인쇄시설에만 적용되던 VOCs 배출허용기준을 석유・화학물질 저장・세정・건조시설 등에도 확대하여 적용하기로 하였다.

또한, 그동안 관리가 미흡했던 소규모 사업장 관리를 위해 배출허용기준을 약 25% 강화하는 것과 동시에 개선비용 지원대책을 마련하였으며, 사물인터넷(IoT) 등을 활용해 배출시설을 실시간 원격감시하는 방안을 마련하였다.

[표 3.3] 산업부문 주요 정부 정책 변화과정

6.3 대책(2016.6)	**9.26 종합대책**(2017.9)	**강화대책**(2018.11)
· 수도권 총량관리제 강화 - 1~2종 → 3종까지 확대 - 배출총량 할당기준 단계적 강화	· 총량관리지역 확대 계획 - 수도권→충청·동남·광양만권 · 먼지총량제 도입 · 굴뚝자동측정기기(TMS) 대상을 3종까지 확대	(지속 추진) (지속 추진) (지속 추진)
· 미세먼지 다량배출사업장 엄격 배출기준 마련	· 미세먼지 다량배출사업장 엄격 배출기준 강화	(지속 추진)
· NOx 배출부과금 신설 검토	·NOx 배출부과금 신설	(지속 추진)
<기존> LNG 시설 NOx 배출기준 (80~150ppm)		· LNG 시설 NOx 배출기준 2배 이상 강화(40~60ppm)
· 대형사업장 위주 굴뚝 감시 · 저녹스버너 설치 지원사업	· 중소사업장 방지시설 설치 지원	· 소규모사업장 배출기준 강화 및 방지시설 설치/개선 지원 · 소규모사업장 IoT 원격감시
-	· VOCs 비산배출사업장 기준 - 2000ppm →1000ppm	· VOCs 배출허용기준 적용 대상 시설 확대

3) 도로이동부문

전국적으로 도로이동오염원 부문이 미세먼지 배출에 기여하는 정도는 약 12%(39,005톤, 2014년 기준) 수준이지만, 서울처럼 발전소나 대형 산업시설이 거의 없는 대도시에서는 화물차 등에서 직접 배출된 미세먼지와 경유차가 많이 배출하는 질소산화물(NOx)에 의해 생성된 2차 미세먼지가 가장 많은 실정이다.

□ 6.3 대책(2016년)

6.3 대책에서는 경유차 미세먼지 감축과 친환경차(일명 그린카) 보급 확대를 중심으로 정부대책이 수립되었다. 먼저, 경유차의 질소산화물 저감을 위해 신차에 대한 실제 도로 인증기준을 신설하고 경유차 저공해차 지정기준을 휘발유·가스차 저공해차 수준으로 강화하기로 하였다.

[표 3.4] 차종별 실제 도로 조건 질소산화물 관리기준

차 종	실내 인증기준 대비 허용수준	
	1단계	2단계
대형차(3.5톤이상)	2.0배 이내('16.1~)	1.5배 이내('17.1~)
중·소형차(3.5톤미만)	2.1배 이내('17.9~)	1.5배 이내('20.1~)

운행중인 경유차는 제작사의 결함 시정조치(리콜) 이행의 실효성을 강화하고, 보증기간 이후에도 매연에 대한 배기가스 기준을 현행 15%에서 10% 내외로 강화하기로 하였다. 노후 경유차의 저공해화를 위해 9톤 이상 대형 경유차에 대한 미세먼지(PM), 질소산화물(NOx) 동시저감사업과 중소형차 조기폐차 지원 정책을 확대하고, 2005년 이전에 생산된 차량을 대상으로 2019년까지 조기폐차 지원사업을 완료하기로 하였다.

또한 모든 노선 경유버스를 단계적으로 CNG 등 친환경버스로 대체(Phase out)하기로 하고, CNG 유가보조금 지급과 충전 인프라 확충 등을 계획하였다.

2020년까지 전기차 25만대, 수소차 1만대, 하이브리드차 124만대 등 친환경차 누적 보급대수를 150만대(신차판매 중 30% 수준)까지 확대하기로 하였다. 행정·공공기관의 친환경차 의무구매비율은 30%에서 50%로 높이고, 위반기관에는 과태료를 징수하는 규정을 신설하였다.

2020년까지 주유소의 25% 수준으로 공공·민간(한전 등) 충전시설 총 3,100기(전기 3,000, 수소 100)를 확충하고, 공동주택, 대형마트, 수도권 환승주차장, 정유사 직영

주유소 및 전국 고속도로 휴게소 등을 대상으로 충전시설을 확대(설치의무화)하기로 하였다. 또한 국민과 사업자별로 맞춤형 선택이 가능하도록 충전방식을 다양하게 하고, 충전시설 보급에 관한 인센티브를 확대하기로 하였다.

친환경버스(전기・수소버스) 보급 확대와 수도권 광역급행철도 조기 도입, BRT(간선급행버스체계) 노선 확대, KTX 연계 광역환승센터 설치 등 친환경 대중교통체계를 구축하기로 하였다. 이와 함께, 친환경차(전기・수소차)에 대한 고속도로 통행료 한시적 감면, 공영주차장 주차요금 면제 등 인센티브를 확대하고, 전기·수소차 전용 번호판을 도입하기로 했다.

아울러, 평상시 공해차량 운행을 제한하기 위하여 노후 경유차에 대한 수도권 운행제한제도(LEZ)를 수도권 3개 시・도와 긴밀히 협의하여 시행방안을 마련토록 하고, 수도권 내 광역 경유시내버스의 저공해화를 추진하는 한편, 고농도 발생 시 차량부제 등의 비상저감조치 시행 여부를 관련 지자체와 협의하여 추진하기로 하였다.

□ 9.26 종합대책(2017년)

9.26 종합대책에서는 2022년까지 도로이동오염원 부문 배출량의 약 43%(2014년 대비)를 삭감하는 목표를 세워 2022년까지 221만대의 노후경유차를 저공해화하고 전기차・하이브리드차 등 친환경차 보급을 활성화하는 대책을 핵심으로 하고 있다.

먼저, 2015년 이전 노후경유차의 조기폐차 지원물량을 대폭 확대[130]하기로 했다. 노후 화물차를 집중적으로 지원하되 항만·공항 출입 빈도가 높은 15톤 이상의 대형 노후경유차는 저공해 조치명령(미이행시 운행제한)과 비용 지원을 우선적으로 추진하기로 했다.

운행중인 경유차에 대해서는 2018년부터 매연 배출기준을 대폭 강화[131]하고, 기존 3.5톤 이상 대형경유차에만 적용되던 실제 도로 인증기준('16.1월부터 시행 중)을 3.5톤 미만 신규 소형경유차에 대해서도 질소산화물(NOx) 배출기준을 추가하여 신설('17.9월부터 단계적으로 확대 적용)하기로 했다.

현행 승용(경형, 7인승 이상)・승합・화물차에 한정하여 보급하고 있는 LPG차량을 RV차량 등에 단계적으로 확대해 나가고, 서울에 들어오는 시내(광역)・마을 버스는 CNG 버스(전기, 수소 포함)에 한해 노선 신설이나 증차 허용을 추진하는 등 CNG 버스를 확대하여 대중교통수단을 친환경화하기로 했다. 공공기관의 친환경차

130) 2017년 8만대에서 2018년 이후 연평균 16만대로 확대하였다.
131) 정밀검사 기준을 15%에서 8%로, 정기검사 기준을 20%에서 10%로 강화하였다.

의무구매비율을 현재 50%에서 70%로 늘리고, 공동주택 등의 충전설비 개선을 추진하기로 했다.

또한, 서울시가 2017년 3월부터 한양도성 내부를 대상으로 시행 중인 특별대책지역 종합대책을 지원하고, '녹색교통특별대책지역[132]' 지정 활성화 방안을 강구하는 한편, 현재 대구 중앙로, 서울 연세로 등에서 운영 중인 승용차 운행제한을 위한 '대중교통 전용지구'를 확대하기로 했다.

노후경유차 운행제한 지역을 수도권에서 '20년까지 충청·동남·광양만권으로 확대하고, '22년까지 전기·하이브리드차 등 친환경차 200만대를 보급하기 위한 민·관 상설협의체를 구성하기로 했다. '20년까지 시행이 미뤄진 온실가스 대상 '저탄소차협력금제도'를 대기오염물질까지 포괄하는 '친환경차 협력금제도'로 확대·개편하는 방안을 마련하여 친환경차 대중화를 계획하였다.

[표 3.5] 친환경차 및 충전인프라 확대계획

구 분		현재	2020년(6.3대책)	2022년(종합대책)
친환경차 (누적)	합 계	총 25만대	총 150만대	총 200만대
	전기차	1.2만대	25만대	35만대
	수소차	0.01만대	1만대	1.5만대
	하이브리드차	23.8만대	124만대	163.5만대
충전 인프라 (누적)	합 계	총 764기	총 3,100기	총 10,310기
	전기(급속)	750기	3,000기	10,000기
	수소	14개소	100개소	310개소

2022년까지 대형마트와 주유소 등에 급속충전기 1만기를 설치하고, 160개소의 복합휴게충전소(전기·수소·CNG 등 복합충전소)를 구축하는 등 전기·수소차 충전소 설치를 확대하기로 했다. 한편, 2022년까지 우체국, 자치단체 사업소 등에 전기이륜차 5만대를 우선 보급하고, 전기이륜차 의무구매제도 도입 등을 검토하기로 했다.

기존 전기차 충전기를 활용한 충전 인프라 구축을 함께 추진하고, '21년부터 운행 경유차·이륜차 배출가스 검사항목에 질소산화물(NOx)을 추가하며, 이륜차 배출가스 정기검사 대상을 2018년 이후 제작 50cc 이상의 중·소형까지 확대하기로 했다.

132) 현 녹색교통진흥지역

아울러, 배출가스 검사 시 임의조작이나 부정검사 방지를 위해 대형버스 검사기관을 단계적으로 교통안전공단으로 일원화하고, 배출가스 관련 부품을 임의로 설정하거나 저감장치를 파손하는 경우 처벌하는 법적 조항을 마련하기로 했다.

□ 강화대책(2018년)

2030년까지 공공부문 경유차 제로화와 수소버스 보급 시범사업을 추진하기로 하였다. 신규 경유차 수요억제를 위해 저공해경유차 인정기준 삭제 등 클린디젤 정책을 폐기하였으며, 질소산화물(NOx)에 대한 실제 도로 배출허용기준을 유럽 수준으로 강화하였다.

또한 노후 경유화물차 조기폐차 지원제도 확대, 배출가스검사 부정 처분 강화 및 노후 사업용버스 사후검사 강화, 알뜰교통카드 도입, 대중교통망 확충 등 대중교통 편의를 증진하는 방안 등을 포함하였다.

[표 3.6] 도로이동오염원 부문 주요 정부 정책 변화과정

6.3 대책(2016.6)	9.26 종합대책(2017.9)	강화대책(2018.11)
· 친환경차 보급: 150만대 - 충전인프라: 3,100기	· 친환경차 보급확대: 200만대 - 충전인프라 확대: 10,310기	(지속 추진) · 수소버스 1천대 보급추가(~22)
· 노후경유차 조기폐차 - 21.2만대	· 노후경유차 조기폐차 확대 - 88.3만대	· 노후경유차 조기폐차 확대 - 88.3만대 + 6.9천대
· PM·NOx 동시저감 장치 - 9.7천대	· 노후경유차 DPF 부착 - 9만대	(지속 추진)
· 경유버스 CNG 교체 (CNG 유가보조금 지원)	· 대도시 노선버스 CNG 교체 - 1.2만대	(지속 추진)
· 공공 친환경차 의무구매 - 30%	· 공공 친환경차 의무구매 - 50%(1.3만대)	· 공공 친환경차 의무구매 - 100%(강화)
<기존> 수도권 중심 노후경유차 운행제한		· 수도권外 운행제한지역 확대
<기존> 경유승용차 위주 조기폐차 보조금		· 중·대형차 폐차보조금 현실화 · LPG 1톤 화물차 신차교체 보조금 신설
-	· LPG차 보급확대 (5인승 이상 RV)	· LPG차 보급확대 강화 (5인승 RV→일반승용차)
-	· 전기이륜차 보급확대(5만대)	(지속 추진)
· 운행경유차 매연기준 강화 - 15% → 10%	· 경유차·이륜차 배출가스 검사제도 강화	(지속 추진)

4) 비도로이동오염원 부문

비도로이동오염원 부문은 전국 미세먼지 배출량의 16%(51,355톤, 2014년 기준)에 달하지만 높은 배출 비율에 비해 관리가 미흡한 분야이다. 2014년 기준으로 선박 분야의 배출 비중은 질소산화물(NOx) 기준 비도로이동오염원의 49%, 황산화물(SOx) 기준 98%로 높은 수준이다.

□ 6.3 특별대책(2016년)

건설기계 등의 질소산화물 배출을 저감하기 위해 실제 도로 인증기준을 도입하고 이동식 배출가스 검사제도를 도입하기 위한 연구(～'18년)를 통해 관련규정을 제정('19년)할 계획을 수립하였다. 또한 노후 건설기계 매연 저감을 위한 저공해화 사업으로 배출기준 도입('05년) 이전 노후기계의 엔진을 새로운 기준(Tier-3, 4)에 맞춰 대상과 물량을 확대하여 교체해 나가기로 했다.

개발 중인 수소연료전지의 건설기계(지게차・굴삭기) 적용방안을 검토하고 운행조건 등 안전기준 마련하여 건설기계에 대한 차세대 저공해 엔진 도입을 추진하기로 했다.

□ 9.26 종합대책(2017년)

9.26 종합대책에서는 2022년까지 비도로이동오염원 부문 배출량의 24%(2014년 대비)를 삭감하는 목표를 세워 추진할 계획이며 그동안 배출기여율이 높음에도 포함되지 않았던 선박분야에 대한 대책이 강화된 점이 특징이다.

주요 대책을 살펴보면, 먼저 단기적으로는 2017년까지 주요 항구도시의 선박 및 항만의 획기적인 미세먼지 저감을 위해 미세먼지 종합대책을 수립하고, 항만 미세먼지 실태조사를 실시하기로 했다. 또한 항만 내 하역장비(야드트랙터, 총 581대)를 친환경연료로 전환(경유→LNG)을 하고, 선박용 미세먼지 저감장치 개발과 LNG 선박의 충전 인프라(벙커링) 기술개발을 진행하기로 했다.

중장기대책으로는 2022년까지 노후건설기계 15.7만대 중 20%에 해당되는 3.1만대를 대상으로 엔진교체, 배기가스 후처리장치(DPF) 부착 등 저공해조치를 추진하기로 했다. 또한, 비산먼지(날림먼지) 신고대상인 1,000㎡ 이상의 건설사업장에는 신형 또는 저공해 건설기계만 사용하도록 하는 한편, 미세먼지 사각지대인 경유철도차량에 대해 배출허용기준을 신설하기로 했다.

선박과 항만부문 배출관리 강화를 위하여 선박용 연료의 황 함량 기준을 현행 3.5%에서 0.5%로 강화하여 2020년부터 시행하며 LNG 선박 충전 인프라를 통영, 부산, 울산 3개 항에 구축해 나가고, 정박 중인 선박의 미세먼지 배출 저감을 위해 육상전력 공급시설(AMP) 구축하여 신규 건설 부두를 대상으로 운영할 계획을 수립하였다.

□ 강화대책(2018년)

주요 항만 인근에 배출규제해역 및 저속운항해역을 지정하여 일반해역보다 강화된 연료기준과 속도기준을 적용하고, 육상전원공급장치 설치확대 및 야드트랙터의 LNG 연료 전환 등의 선박·항만시설 친환경적 운영 개선 계획을 마련하였다. 또한 건설 및 농업기계에 대해 유럽수준(Stage V)으로 배출허용기준을 강화하고, 공항에 지상전원 공급장치 이용을 확대하고자 했다.

[표 3.7] 비도로이동오염원 부문 주요 정부 정책 변화과정

6.3 대책(2016.6)	**9.26 종합대책**(2017.9)	**강화대책**(2018.11)
<기존> 선박유 황함량(3.5%)		· 선박유 황함량기준 강화 - 일반해역 0.5%, - 배출규제 해역 0.1% · 친환경(LNG) 선박 확대(70척)
· 선박 대기오염물질 저감방안 마련	· 선박 저감장치 개발 및 상용화	· 소형선박 저감장치 상용화 · 배기정화장치 국산화
-	· 항만 육상전원공급장치 구축 - 신규 부두 대상	· 항만 육상전원공급장치 확대 - 부산4, 인천4, 광양2
-	· 하역장비 친환경연료 전환 - 경유→LNG(야드트랙터, 581대)	(지속 추진) · 하역장비 연료전환 의무화
-	· 경유철도차량 배출허용기준 신설	· 건설/농업기계 배출허용기준 강화(먼지)
· 노후건설기계 배출저감 - 저공해화(1만대, 4종) - 실도로 NOx 기준 도입계획	· 노후건설기계 저공해화 확대 - 3.1만대(5종)	(지속 추진) · 건설기계 실작업조건 배출가스 검사제도 도입
-	-	· 공항 지상전원 공급장치 이용 활성화 및 장비 교체

5) 생활부문

생활 주변에서 배출되는 미세먼지는 전국 배출량의 약 19%(61,114톤, 2014년 기준)를 차지하고 있다. 하지만 대부분 배출시설로 분류되지 않아 그동안 관리가 매우 미흡했던 부문으로 이와 관련된 비산(날림)먼지와 생활 VOCs 관리가 시급한 실정이다.

□ 6.3 특별대책(2016년)

도로 재비산먼지 감축 및 예방을 위하여 이동측정차량(6대)으로 차량 통행량과 노출인구가 많은 도로에 대해 상시 모니터링을 실시하고 먼지 지도를 제작하며, 도로먼지 청소차 476대('16~'20년)와 도로청소 가이드라인 보급, 도로설계 기준에 먼지날림을 예방하는 오목형화단 설치 등 토사유입 저감방안 반영, 저마모 타이어 기준 등을 마련하여 보급할 계획을 수립하였다.

건설공사장의 비산먼지 발생을 억제하기 위해 관리점검(방진막, 물뿌리기, 세륜 등)을 강화하고, 대형 건설사와 비산먼지 저감을 위한 자발적 협약을 맺어 1사 1도로 클린제, 풍속계 설치 등을 추진해 나갈 계획을 담았다.

폐기물 불법 소각에 의한 미세먼지 문제를 예방하기 위해 재활용 동네마당 163개소와 농촌지역 공동집하장 950개소를 2016년 확충하여 폐기물 수거체계를 개선하고, 지자체와 합동으로 불법소각 특별단속주간 운영 등 관리를 강화하기로 했다. 또한 전국 생물성연소 실태조사와 함께 생활주변 미세먼지 저감을 위한 대국민 캠페인도 전개해 나가기로 계획했다.

또한 실내 공기질 개선을 위해 미세먼지의 실내유입 차단을 위한 환기설비에 대한 미세먼지 측정방법 및 성능기준을 개선해 나가는 한편, 지하철 터널과 차량 내의 미세먼지 저감기술을 개발하여 적용하기로 했다.

□ 9.26 종합대책(2017년)

9.26 종합대책에서는 2022년까지 생활부문 배출량의 15% 삭감(2014년 대비)을 목표로 도로청소차 보급확대, 도료 중 VOCs 함유기준 강화 등 생활주변 오염원 관리강화를 핵심적으로 추진할 계획을 담았다.

먼저 생활부문 단기대책으로 도로 및 건설공사장 비산먼지 저감을 위해 도로설계기준 변경, 건설공사장 비산먼지 저감, 비산먼지 신고대상 확대 및 비산먼지 저감효과 증대를 위한 정량적 기준도입 등을 추진하기로 했다. 고농도 미세먼지 시즌에는 아파트 등 대규모 공사장을 대상으로 방진막, 살수시설 적정 설치 및 운영에 대한 집중점검을 실시하기로 했다. 이 외 미세먼지 농도를 낮추기 위한 도시숲 조성을 추진하고, 도심내 녹지 1평 늘리기 사업도 계획하였다.

중장기로는 도로 재비산먼지 관리를 위해 저마모타이어 기준을 마련하고, 도로먼지 청소차를 2016년 대비 2배('22년 2.1천대)를 보급하는 계획을 제시하였다. 또한 도료(건축용, 공업용 등) 중 VOCs 함유기준을 강화하고 관리대상을 확대(목공용 도료

등 추가)하기로 했다. 주유소 유증기(VOCs) 관리를 강화하기 위해 유증기 회수설비 의무화 지역을 인구 50만 이상 10개 도시(대전, 울산)로 단계적으로 확대해 나가기로 했다.

그리고 쓰레기 분리·보관용 '재활용 동네마당' 설치를 확대('17년 447개소→ '21년 1,080개소)하고, 농촌지역 공동집하장을 2021년까지 매년 1,000여개씩 확충하기로 했으며, 농업잔재물의 파쇄·살포 지원사업을 통해 불법소각을 차단하는 계획을 세웠다.

□ 강화대책(2018년)

미세먼지를 적게 배출하는 가정용 저녹스(Low-NOx) 보일러 설치 지원사업을 전국으로 확대하는 등 난방시설에 대한 관리를 강화하였다. 주유소의 유증기 회수시설 설치 의무지역을 수도권 이외 대기관리권역으로 확대하는 방안을 추진하고, 아파트 등 공동주택 공사장에서 분사방식의 도장을 금지하는 등 휘발성유기화합물 관리를 강화하였다. 또한 옥상습지 조성 등 도심내 Eco-인프라를 확충하기로 하였다.

[표 3.8] 생활 부문 주요 정부 정책 변화과정

6.3대책(2016.6)	9.26 종합대책(2017.9)	강화대책(2018.11)
<기존> 수도권 가정용 저녹스보일러 지원	· 저녹스보일러 지원 - 저녹스보일러 112.5천대	· 저녹스보일러 지원 전국확대 - 저녹스보일러 160천대 (가정 47,500대 추가) - 신축 의무화 - 저녹스 버너 도심건물 보급확대(1,892대 추가)
· 비산먼지 주요 배출원 집중 관리(단속, 사전예방 등)	· 비산먼지 주요 배출원 관리 강화(단속, 사전예방 등)	· 비산먼지 발생사업 관리대상 확대
· 도로청소차 보급(1천대)	· 도로청소차 보급 확대(2.1천대) · 도로설계 기준 마련	(지속 추진)
-	· VOCs 관리 강화 - 도로함유기준 20% 강화 - 유증기 회수시설 의무지역 10개 대도시 추가 확대	· VOCs 관리 강화 - (지속추진) - 유증기 회수시설 의무지역 확대, 분사방식 도장금지 등
· 건설공사 비사먼지 저감 자발적 협약	· 건설공장 비산먼지 저감 자발적 협약	(지속 추진)
· 불법소각 관리 · 생물성연소 실태조사 추진	· 불법소각 관리 강화 · 농업 잔재물 처리사업 추진	(지속 추진)

6) 고농도 미세먼지 비상저감조치 강화(2018년 11월 강화대책)

2018년 강화대책에서는 다양한 상황에서 비상저감조치가 발령될 수 있도록 발령기준을 확대하고 공공부문 예비저감조치 등 선제 대응체계를 확립하였다. 또한 길거리 노출 저감을 위해 자동차 배출가스 등급제, 공회전 단속 등 자동차 운행제한과 배출가스 단속, 도로·지하철 먼지 선제적 저감 등을 포함시켰다. 뿐만 아니라 미세먼지 다량배출원과 사각지대 관리 강화를 위해 발전상한제를 도입하고 공사장, 비상발전기 등을 대상으로 한 긴급 감축을 유도하는 방안, 생활주변 공사장, 영농폐기물의 노천(야외)소각 등 불법행위 감시를 강화하는 내용을 추가하였다.

[표 3.9] 고농도 미세먼지 비상저감 강화 대책

9.26 종합대책(2017.9)	강화대책(2018.11)
참여대상 : 공공부문 중심	참여대상 : 민간 의무참여 확대(강화)
조치사항 - (수송) 차량2부제 - (생활) 옥외배출원 저감 위주 - (발전) -	조치사항 - (수송) 배출가스등급 운행제한(강화) - (생활) 지하역사 등 미세먼지 집중제거(강화) - (발전) 석탄발전 상한제약 등(신규)
-	공공기관 예비저감조치(신규)

2. 그간 저감과 관련한 주요 이슈

그간 정부의 대책은 미세먼지 배출이 큰 부문을 중심으로 배출허용기준을 강화하거나 배출총량제 적용, 고농도 시기에 발전소 등 일부 다량 배출시설의 조업 및 가동 제한, 노후 경유차량 폐차와 저감장치 부착, 오염물질 배출이 적은 신차 구매 지원 등으로 요약될 수 있다.

이러한 대책들은 미세먼지를 줄이는데 일정 정도 기여한 것으로 판단되나, 국민이 일상에서 느끼고 기대하는 만큼 획기적으로 줄이고 있는 지에 대해서는 부정적 비판을 받아오고 있는 것도 사실이다. 정부가 지향하는 감축목표 달성 등 미세먼지 저감을 성공적으로 이끌어내기 위해서는 부문별로 해결해야 할 문제점들이 다수 제기되고 있다.

이 절에서는 기존의 정부정책에 대한 분석과 개선방안을 검토하고, 아울러 국민과 정책 시행자들이 고민해 봐야 할 과학적 사실들을 짚어봄으로써 정책수용성과 효과를 높일 수 있는 방향을 찾는데 시사점을 제공하고자 한다.

1) 발전부문

(1) 석탄화력발전소 가동 조정

발전부문의 미세먼지 대책은 주로 석탄화력발전소에 대한 것으로, 기본방향은 발전소 배출허용기준 강화와 노후 발전소 폐지 및 가동 제한, 신규 발전소에 대한 건설계획 폐지 또는 LNG 등으로 전환하는 것이다. 보다 구체적으로는 미세먼지가 심한 3~6월에 노후 석탄발전소 가동을 일시 중단[133]하고, 일부 석탄화력발전소의 배출허용기준을 현재보다 2배 강화[134]하는 한편 대대적인 성능개선과 환경설비 교체를 추진하는 것이다. 아울러, 30년 이상된 노후 석탄발전소의 일부는 2022년까지 폐기[135]하고, 재생에너지 비중을 확대[136]해 나갈 예정이다.

정부대책 중 상대적으로 오염물질 배출이 많은 노후 석탄화력발전소에 대한 기준 강화와 고농도 기간 중 가동중단 등은 필요한 조치로 평가되며, 필요시 추가 확대도

133) 30년 이상 가동으로 노후화된 4기(삼천포 2기 및 보령 2기)를 대상으로 하고 있다.

134) '96년 이전 설치된 석탄화력발전소는 먼지 25㎎/Sm³, 황산화물 100ppm, 질소산화물 140ppm인 반면, 2001~2015년 설치된 시설은 먼지 20㎎/Sm³, 황산화물 80ppm, 질소산화물 70ppm을, 영흥화력 3-6호기 및 신규 발전소는 먼지 5㎎/Sm³, 황산화물 25ppm, 질소산화물 15ppm의 기준을 적용받고 있다.

135) 최근 폐쇄된 노후 석탄발전소는 영동 1호기와 서천 1·2호기('17.7), 영동 2호기('19.1) 등 4기가 있으며, 2022년까지 6기를 추가로 폐쇄할 계획에 있다.

136) 정부는 2030년까지 재생에너지 비중을 전체 전력생산량의 20%까지 확대할 계획이다.(제8차 전력수급기본계획, 2017)

검토해 볼 수 있을 것으로 판단된다. 한편 고농도 시 발전상한제약(최대출력의 80%)을 실시하고 있으나, 저감효과는 의문이 있으므로 발전상한제약 대신 겨울철 전력수급에 지장이 없는 범위 내에서 오염물질의 배출량이 많은 발전소부터 가동을 중단하는 것이 효과적인 것으로 판단되므로 이에 대한 적극적인 검토가 필요하다.

이를 실행함에 있어서는 전력생산비용의 증가가 수반되므로 그 비용을 누가 부담할 것인지에 대한 검토도 필요하다. 다시 말해 전력생산비용의 상승분을 기존의 전기요금에 반영하는 방안에 대해서도 논의되지 않으면 안된다. 다만, 개별 시설에 대한 정확한 발전 및 오염물질 배출량 진단과 전체적인 발전설비 용량, 시기별 전력수요 규모, 전력수요 분산과 저감 등의 전력수요 관리, 송배전 용량[137], LNG 수요/공급 역량 등에 대한 정확한 분석을 통하여 정책 수용성과 배출저감 효과가 극대화될 수 있도록 하여야 할 것이다.

아울러, 재생에너지 확대와 관련해서는 장기적으로 에너지 전환을 위해 꼭 필요한 정책이나, 일부 지역에서 태양광 발전시설의 무분별한 설치로 발생한 산림파괴와 산사태, 에너지저장장치(ESS, Energy Storage System) 화재 등 기존의 문제점을 살펴 인근 주민들에게 피해를 주는 부작용이 나타나지 않도록 적절한 관리가 필요하다.

(2) 비상발전기 관리

도서지역에 설치된 발전설비는 비상발전기라는 명목으로, 모든 시설이 방지시설도 없이 가동하고 있는 실정이다. 따라서, 발전용량 1.5MW이상 등유발전시설(18기)에는 배출허용기준을 도입하고, 1.5MW 미만의 소규모 발전시설들은 배출시설로 포함시켜 방지시설을 설치토록 할 필요성이 제기되고 있다.

아울러 도심내에 설치된 비상발전기에 대해서는 미세먼지 고농도 발생시 일시 가동중단 등의 조치 외에 배출허용기준을 적용하여 관리함으로써 방지시설 설치를 유도하는 방안도 검토할 필요가 있다. 현재 도시지역 건물 등에 설치, 가동되고 있는 비상발전기는 법적관리 대상에서 제외되어 있어 배출량 정보 등 정확한 시설설치 및 운영 현황을 확인할 수 없으므로 국가 대기오염물질 배출량을 산정하는 국가대기정책지원시스템(CAPSS)에도 반영되어 있지 않는 등 누락배출량에 해당되므로, 정확한 통계관리 또한 함께 이루어져야 할 것이다.

137) 전기를 생산하고 이것을 수용가에게 공급하는 일련의 설비를 전력 계통이라한다. 송배전은 '송전'과 '배전'을 합친 단어이고, 중간에 '변전'을 거친다. 송전(Transmission)은 발전소에서 변전소가지 전력을 전달한다. 변전(Substation)은 송배전 과정에서 전압을 조절한다. 배전(Distribution)은 변전소에 도달한 전력이 강압되어서 낮은 전압으로 소비자들에게 전달되는 과정이다.

2) 산업부문

(1) 총량관리제 확대

특정지역에서 모든 사업장이 배출허용기준을 준수하더라도 배출시설이 다수 존재하고 계속 늘어난다면 그 지역의 대기질은 개선되지 않을 수 있다. 총량관리제는 이러한 한계를 보완하기 위해 지역단위로 배출허용총량을 설정하고 다시 사업장별 배출허용총량을 할당하여 그 범위 내에서 배출하도록 하는 제도이다.

수도권에서는 2006년 수도권 대기환경개선 특별대책이 시행되면서 질소산화물, 황산화물에 대해 사업장 총량관리제를 시행해 오다가 최근 미세먼지를 대상물질에 추가하였다. 2018년 12월 말 기준으로 수도권에 위치한 사업장 중 총 407개소가 총량관리대상 사업장으로 서울 34개소, 경기도 300개소, 인천 73개소가 있다(표 3.10). 그리고 2019.4월 「대기관리권역의 대기환경개선에 관한 특별법(대기관리권역법)」이 시행됨에 따라 총량관리제는 수도권에서 중부·동남·남부권까지 확대될 예정이다.

[표 3.10] 총량관리사업장 현황(2018년 12월 말 기준)

(단위 : 개소)

구분	사업장	물질별			
		소계	황산화물 대상	질소산화물 대상	먼지(TSP) 대상
계	407	569	84	374	111
서울특별시	34	40	1	34	5
경기도	300	427	70	272	85
인천광역시	73	102	13	68	21

자료 : 환경부 제공자료

지금까지 수도권에서 운영해 온 총량관리제의 문제점으로는 과잉할당이 지적되고 있다. 초기에는 수용성 문제로 완화된 할당량을 적용하고 점차적으로 사업장별 할당량을 줄여나가고[138] 있으나, 여전히 제도의 취지에 맞지 않게 과다 할당되어 있다는 지적[139]이 나오고 있다. 배출총량이 과다하게 할당될 경우 기업은 추가적인 저감 노력을 하지 않아도 목표를 달성할 수 있게 되므로 배출권거래제가 작동하지 않게 되어 제도 도입 취지를 약화시키는 원인이 되기도 한다.

138) 2010년 수도권 사업장에 할당된 총량은 질소산화물 56,278톤, 황산화물 25,494톤이었으나, 2018년에는 질소산화물 37,178톤, 황산화물 13,023톤으로 감소하였다.

139) 2018년 총량제 관리대상 사업장의 배출량의 경우 질소산화물은 총량대비 69.0%, 황산화물은 총량대비 70.1%로 실제 산업체가 배출하는 오염물질이 총량에 비해 크게 낮은 수준으로 조사되었다.

이에 연도별 배출허용총량을 산정할 때 적용되는 할당계수 단위량 적용방법을 개선[7년간 최고→6년간 최고('12년)→5년간 평균('17년)]하고, 할당계수 부여 방식을 동일 그룹별에서 개별 사업장 단위로 개선('12년)하였다. 또한 최적방지시설 기준을 단계적으로 강화('15년)하여 배출량 감축을 유도하고 있다.

총량관리제의 개선방향으로 지금까지는 배출량 할당을 무상으로 시행하고 배출부과금이 면제되었으나 유상으로 전환하여 배출 원인자의 책임을 강화하는 것이 바람직하다. 해당 배출시설에 적용할 수 있는 최적방지시설을 설치하여 배출되는 농도까지는 무상으로 할당하되 그 이상 배출하는 농도에 대해서는 유상 할당하고, 신규 사업장은 배출권을 유상으로 구입토록 하는 방안도 검토해 볼 필요가 있다.

아울러, 각 사업장은 자체 여건을 고려하여 배출권거래제에 활발히 참여할 수 있어야 한다. 배출권거래제는 사업장의 자발적 감축과 기술개발을 촉진하고, 사업장 간의 배출권 거래를 통해 비용효과적으로 권역의 목표를 달성할 수 있는 제도이다. 배출권거래제가 활성화되어야 목표 달성을 위한 사회적 비용을 최소화할 수 있다.

(2) 배출허용기준 강화

정부는 2015년 이후 발전 및 소각시설 등 대형배출시설에서 발생하는 먼지, 질소산화물 등에 대한 배출허용기준을 강화해 오고 있다(표 3.11). 이에 따라 연간 10톤 이상의 특정대기유해물질 다량 배출시설을 대상으로 엄격한 배출허용기준(소량 배출사업장의 50% 수준)이 적용되고 있으며, 2019년 1월 1일부터는 발전소 및 제철소 등 대기오염물질 다량배출업종의 배출허용기준이 2배 이상 강화되었다.

[표 3.11] 대형배출시설 배출허용기준 강화 주요 내용

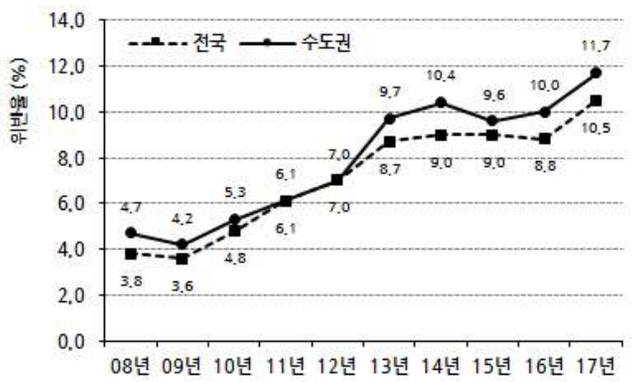
(단위 : mg/㎥, ppm)

구분(종전→강화)	먼지(TSP)	NO_2	SO_2
화력발전소	20~25 → 10~12	70~140 → 50~70	80~100 → 50~60
제철업(소결로)	30 → 20	130~200 → 90~140	120~200 → 100~130
석유정제업(가열시설)	30 → 15	70~180 → 50~130	180 → 120
시멘트제조업 (소성·냉각시설)	30 → 15	330 → 270	30 → 15

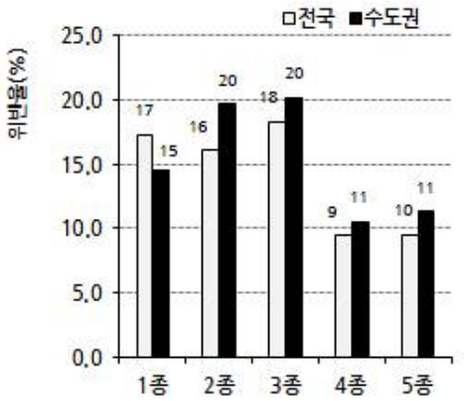
자료:「대기환경보전법 시행규칙」제15조 [별표 8])

사업장의 대기오염물질 배출은 기본적으로 배출허용기준을 통해 직접적으로 규제하고 있으나, 감시, 보고, 검증 기능이 원활히 이루어지지 않음에 따라 규제 준수 수준이 낮은 문제점이 있다.[140] 배출시설 단속 결과와 조치사항을 보면(그림 3-1), 지도점검 위반율은 2008년 전국 3.8%, 수도권 4.7%에서 2017년 전국 10.5%, 수도권 11.7%로 증가하였고, 위반 내역은 배출허용기준 초과, 비정상 가동, 무허가 등이었으며, 대기 배출사업장 규모별로는 아래 그림 3.1에서 보는 바와 같이 대규모 사업장(1~3종)의 위반율이 높았고, 4종 사업장은 비정상 가동(9.7%), 5종 사업장은 무허가(29.0%) 위반율이 높았다. 수도권도 비슷한 형태를 보이나, 특히 4,5종 사업장의 무허가 위반율이 29.7%로 매우 높은 것으로 나타났다.

<대기 사업장 배출시설 지도점검 위반율>



<대기 사업장 배출시설 규모별 위반율>



자료: 통계청 (2019), 대기배출시설 단속 및 행정조치 현황.

[그림 3.1] 배출시설 단속 조치 현황

최근 감사원의 "산업시설 대기오염물질 배출관리 실태" 보고서[141]에 따르면, 일부 사업장 배출시설에서 최근 배출허용기준이 강화되었음에도 불구하고, 기준이 강화되기 이전의 수준으로 관리하여 초과 사실을 확인하지 못하는 사례가 확인되었다. 또 자가측정대행업체와 배출사업자의 부정행위로 인해 자가측정 관리제도상의 문제점이 드러나기도 했다. 따라서, 사업장별 배출관리 방법 보완, 지자체 관리감독 인력 확충, 자가측정대행업체 관리강화 등을 통해 배출허용기준의 준수율을 높여 나가야 한다.

140) 김현석 (2019).『정책토론회 : 깨끗한 환경, 더 나은 삶의 질』.
141) 감사원 (2019.03). "산업시설 대기오염물질 배출관리 실태"

(3) 산업시설 공정부문 배출 관리

2015년 기준 CAPSS 자료(표 3.12)에 의하면, 산업시설의 생산공정에 의한 연간 배출량은 PM-10 6,658톤, PM-2.5 5,132톤, 황산화물 105,385톤, 질소산화물 59,830톤, CO 26,069톤, VOCs 182,899톤, NH_3 39,432톤으로, 제철제강업, 석유제품산업, 유기화학제품 제조업 부문의 배출 기여도 큰 것으로 나타났다.

PM-10, PM-2.5 및 질소산화물 배출량은 제철제강업에 의한 배출이 전체 배출부문의 70% 이상을 차지하였으며, 제철제강업 중에서도 PM은 고로장입 부문, 질소산화물은 소결로 부분에서의 배출이 많았다. 황산화물와 VOCs의 경우 석유제품산업에 의한 배출 기여도가 각각 54.8%, 30.6%으로 컸고, 석유제품산업 중에서도 황산화물은 유황회수시설 부문, VOCs는 석유제품 저장 및 취급 과정에서의 배출이 많은 것으로 조사되었다. 그리고 화학물질 배출량 조사 결과에서도 유해대기오염물질을 포함하여 연간 5만4천톤 정도가 대기 중으로 배출되며, 이 중 약 61%가 굴뚝을 제외한 시설·공정 등에서 비산 배출되고 있다.[142)]

[표 3.12] 생산공정 부문 대기오염물질 배출량(2015년)

(단위 : 톤, %)

배출원 중분류		PM-10	PM-2.5	SOx	NOx	CO	VOCs	NH_3
생산공정	기타 제조업	377 (5.7)	340 (6.6)	9,781 (9.3)	6,462 (10.8)	272 (1.0)	544 (0.3)	-
	목재,펄프 제조업	27 (0.4)	18 (0.3)	122 (0.1)	-	2,469 (9.5)	1 (0.0)	-
	무기화학제품 제조업	348 (5.2)	194 (3.8)	1,706 (1.6)	4,882 (8.2)	487 (1.9)	564 (0.3)	-
	석유제품산업	133 (2.0)	29 (0.6)	57,789 (54.8)	4,799 (8.0)	12,069 (46.3)	56,021 (30.6)	23,384 (59.3)
	식음료 가공	-	-	-	-	-	61,943 (33.9)	-
	암모니아 소비	-	-	-	-	-	-	14,320 (36.3)
	유기화학제품 제조업	940 (14.6)	846 (16.5)	448 (0.4)	16 (0.0)	5,011 (19.2)	44,417 (24.3)	-
	제철제강업	4,833 (72.6)	3,705 (72.2)	35,538 (33.7)	43,671 (73.0)	5,761 (22.1)	19,408 (10.6)	1,728 (4.4)

자료: 국립환경과학원 (2018), 국가대기오염물질 배출량(CAPSS) 2015

142) 환경부 (2017). “비산배출 저감을 위한 시설관리기준 세부이행지침”

사업장 대기오염 관리가 굴뚝같은 배출구에서의 농도 및 배출량 관리에 편중되면서 유해대기오염물질을 비산 배출하는 시설·공정 등에 대한 관리에서는 여전히 사각지대가 많다[143]. 공정부분은 사업장 별로 오염물질을 배출하는 시설 종류가 다양하여 배출허용기준을 통해 관리하기가 어렵다. 따라서 공정의 운영에 필요한 시설관리기준을 적용함으로써 비산배출을 최소화하게 된다.

그러나 중소 사업장은 여전히 기술력 부족, 열악한 재정여건 등으로 비산배출관리에 어려움이 있다. 이를 개선하기 위하여 중소 사업장에 대한 기술지원 체계를 운용하고 있다. 사업장이 환경공단, 지역 녹색환경기술센타 등에 지원을 신청하면 사업장별로 시설 내역, 관리대상물질 등을 파악하고, 시설 및 운영과 관련된 기술 및 비용을 지원하도록 하고 있다.

(4) 고체연료 사용제한(무연탄, SRF 등)

전통적으로 대기오염은 연료연소, 그 중에서도 고체연료 연소에 의한 영향이 가장 컸다. 이로 인한 대기오염을 줄이기 위해 고체연료 사용 제한지역을 설정하고(「대기환경보전법 시행령」 제42조), 해당 지역에서는 석탄류, 코크스, 땔나무와 숯, 폐합성수지 등 가연성 폐기물 등 고체연료의 사용을 제한해 오고 있다. 현재 「대기환경보전법」에 따라 서울특별시를 비롯하여 6대 광역시와 경기도 13개시(수원시, 부천시, 과천시, 성남시, 광명시, 안양시, 의정부시, 안산시, 의왕시, 군포시, 시흥시, 구리시, 남양주시)에서 고체연료 사용을 제한하고 있다.

SRF(Solid Refuse Fuel)는 「자원의 절약과 재활용에 관한 법률」에 따른 고형연료 제품으로 고체연료 사용제한 제도와는 상관없이 사용되고 있다. SRF는 폐기물 중에서 폐지류, 플라스틱류 등 가연성 폐기물을 원료로 사용하여 만든 제품이며, 주요 사용시설로는 시멘트 소성로, 화력발전시설, 열병합발전시설 및 발전용량이 2MW 이상인 발전시설, 석탄사용량이 2톤/h 이상인 지역난방시설, 산업용 보일러, 제철소, 고형연료제품 사용이 200kg/h 이상인 보일러 시설 등이 있다. SRF 제조시설로 유입되는 폐기물은 연간 약 2,621천톤(전체 폐기물 발생량 1.7%)이며, 1,923천톤의 SRF를 생산하여 발전소, 제지회사, 시멘트소성로 등 사용시설에서 연간 3,358천톤(수입 1,445천톤 포함)의 SRF를 사용하고 있다.[144]

143) 환경부 금강유역환경청 (2018.05). 『2018년 비산배출시설 관리제도 설명회』.
144) 환경부 보도자료(2017.09.22.), “고형연료제품 환경관리 기준 대폭 강화, 제도 개선 추진”.

수도권 대기환경개선 특별대책에서는 고체연료 사용제한지역을 확대하고 민수용 무연탄 등을 청정연료로 전환하는 정책을 계획하고 있으나, 세부시행 방안이 마련되지 않아 추진되지 못하고 있다. 저황유 및 청정연료 사용대상지역 확대를 위하여, 수도권 지역 중 서울, 경기지역의 주거용 시설에서 연료원으로 사용하고 있는 민수용 무연탄을 도시가스로 전환하고, 수도권지역 비산업연소 부문에서 연료원으로 사용하고 있는 경유의 황 함유량을 0.1% 이하로 제한하여 공급하는 것이 필요하다.

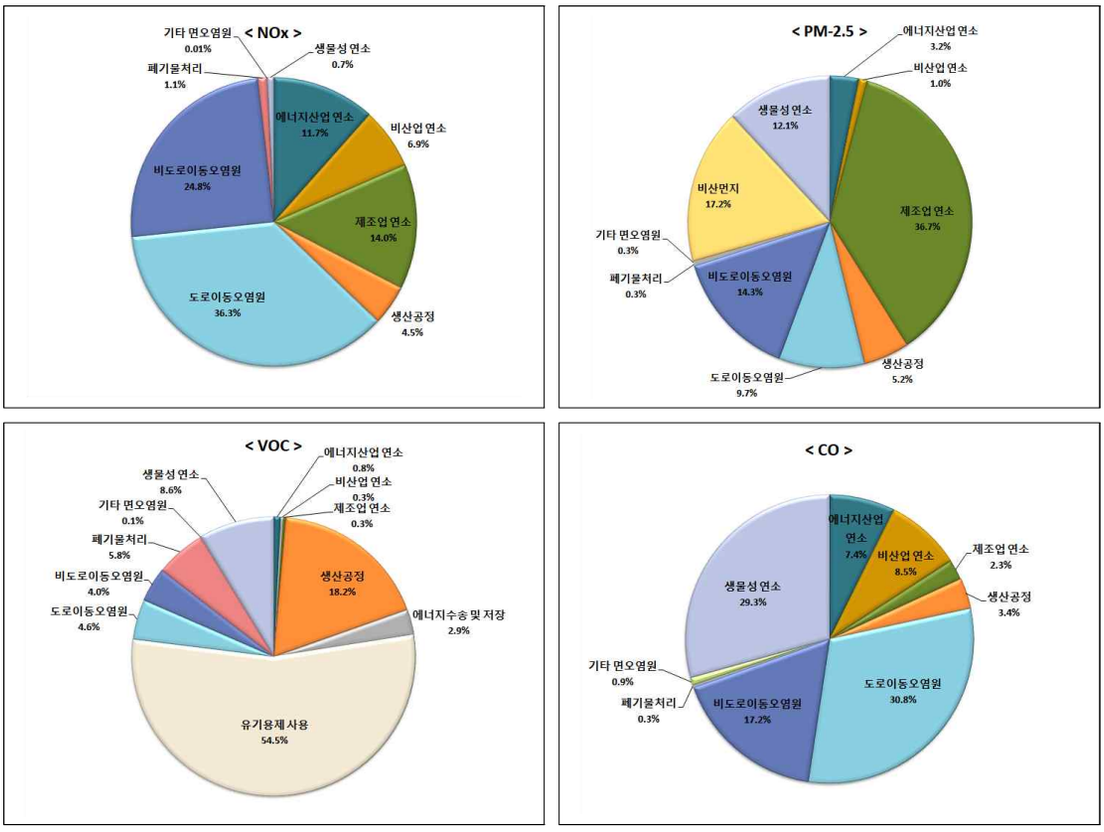
또한 수도권지역 비산업연소 부문에서 연료원으로 사용하고 있는 중유의 황 함유량을 0.3% 이하로 공급하고, 연료원으로 사용하는 민수용 무연탄을 난방용인 도시가스로 전환할 필요가 있다. 이 외에 채소·화훼시설 등 비가정 부문에서 연료로 사용하는 무연탄 소비시설에 대해서도 청정연료 전환이 필요하다.

SRF는 사용량이 매년 증가 추세에 있으며, 폐기물처리 체계상 SRF 사용이 불가피한 상황에서 대기오염물질 발생과 폐기물 고형연료의 환경성, 안정성에 대한 논란이 발생하고 있다. 특히 SRF는 소각 시 미세먼지, 유해대기물질이 다량 발생하고, 중소규모 시설에서는 관리부실 문제가 있어 지역민원이 발생되고 있다. 따라서 사용제한 고체연료 대상에 SRF를 포함시키고, 불가피한 사용시설에 대해서는 배출허용기준을 강화하고 감시체계를 구축하는 노력이 필요하다.

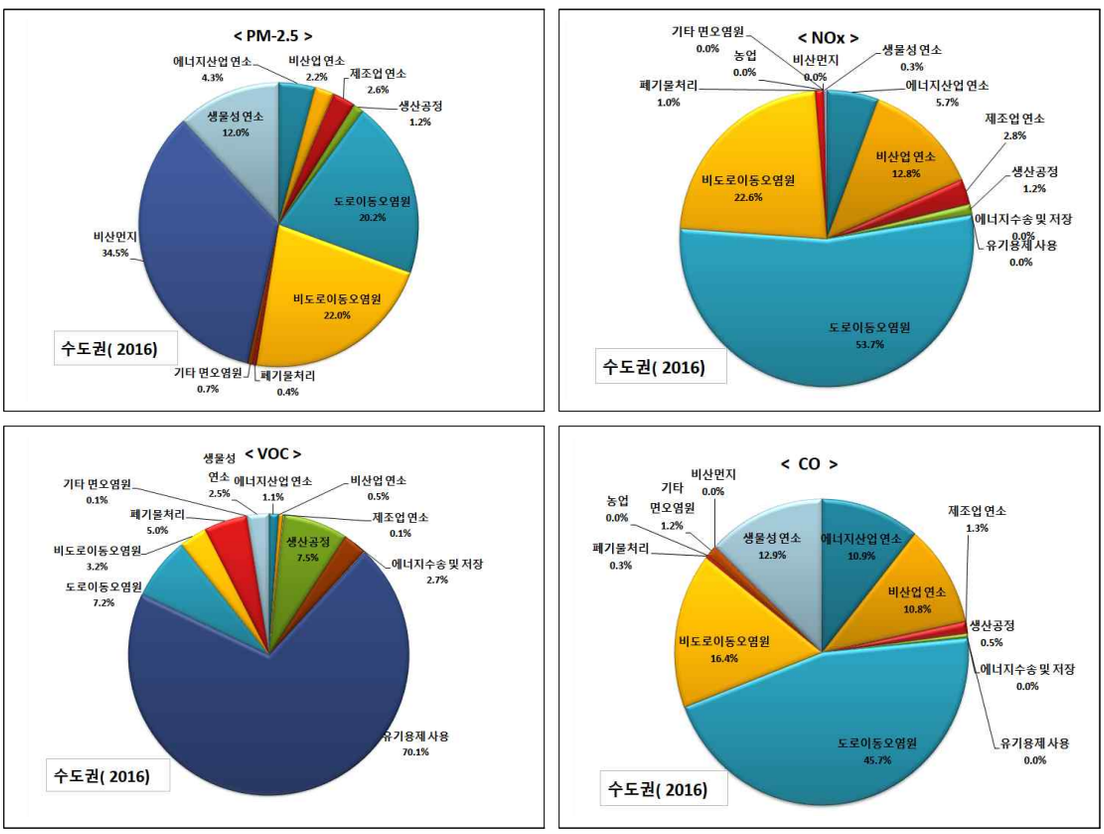
3) 도로이동오염원 부문

(1) 도로이동오염원 대책이 중요한 이유?

우리나라의 배출량 통계를 살펴보면 전국적으로는 사업장에서 배출되는 오염물질의 양이 가장 많으나, 수도권 등 인구가 밀집된 대도시에서는 시민과 활동공간을 공유하는 자동차에 의한 영향이 발전/산업시설보다 크게 나타난다. 그림 3.2와 그림 3.3은 각각 2016년도 전국과 수도권의 주요 대기오염물질에 대한 대분류별 배출기여도를 비교한 것으로써, 자동차 등 수송분야에 대해서 엄격한 관리대책이 필요함을 보여주고 있다. 그리고 세계보건기구(WHO)에서 1군(Group 1) 발암물질로 지정한 경유차 미세먼지의 인체위해도를 고려한다면 도시내 자동차 영향은 더욱 심각하게 다루어야 할 것이다.

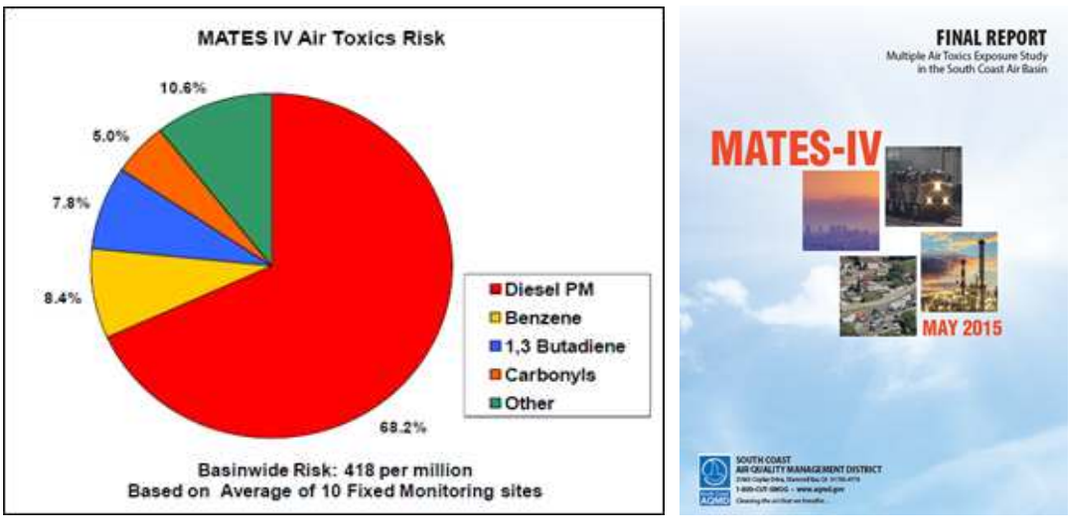


[그림 3.2] 주요 대기오염물질의 부문별 배출기여도(전국, 2016년도)



[그림 3.3] 주요 대기오염물질의 부문별 배출기여도(수도권, 2016년도)

그림 3.4는 LA를 중심으로 한 캘리포니아 남부지역의 대기오염 노출연구 보고서[145]를 인용한 것으로, 경유 승용차가 3% 이하에 불과한 미국에서 경유차 PM에 의한 인체 위해도가 68.2%에 달한다는 결과로서, 경유차 구성비가 50%를 넘는 우리나라 입장에서는 미세먼지 대책에서 가장 우선적으로 추진해야 할 대책임을 시사해 준다.



[그림 3.4] 미국 캘리포니아 남부지역의 대기오염 노출연구 결과(2015)

(2) 경유승용차 배출특성과 문제점

자동차의 대기오염물질 배출특성은 연료종별, 운전조건(차속, 부하, 차량무게), 연료품질 등에 따라 크게 달라질 수도 있다. 따라서 자동차의 배출가스 시험은 차대동력계 및 이동식배출가스측정장비(PEMS) 등 운전조건을 표준화할 수 있는 시설이 갖춰진 기관에서만 실시할 수밖에 없는 한계가 있다[146].

유로4 기준[147]이 적용되기 시작한 2005년 이후부터 소형경유차에 대한 배출허용기준이 대폭 강화되면서 엔진기술 개선만으로는 배출허용기준과 소비자의 주요 관심사인 고효율연비를 동시에 맞추는 것이 어려워지게 되었다. 이에 제작사들은 인증시험조건에서만 배출허용기준 준수 여부를 확인하는 검사방식에 착안하여, 운전조건을 조절하는 전자제어장치(ECU)[148]에 실주행시에는 저감장치(EGR)[149]의

145) South Coast Air Quality Management District(SCAQMD) (2015), Multiple Air Toxics Exposure Study in the South Coast Air Basin(MATES-IV). https://www.aqmd.gov/home/air-quality/air-quality-studies/health-studies/mates-iv
146) 이에 따라, 본 보고서에서 제시된 배출가스 측정자료들의 대부분은 국립연구기관인 교통환경연구소의 연구결과와 유럽의 JRC에서 발표한 자료를 인용한 것이다.
147) 유로4(Euro4)는 경유차에 적용되는 배출허용기준 단계 중 하나로써 우리나라에는 2005년부터 적용되었으며 유로5는 2009년, 유로6는 2015년부터 적용되었다.
148) ECU(Electronic Control Unit) : (자동차) 전자제어장치

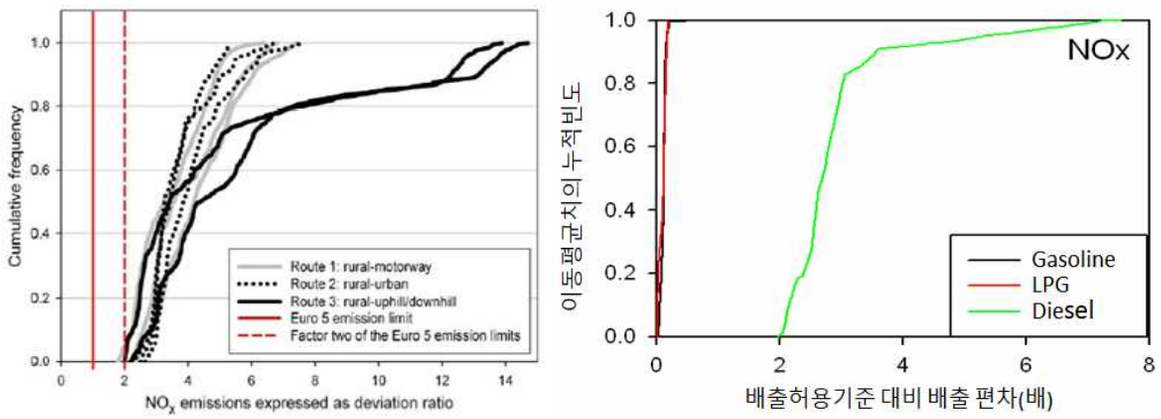
작동을 중단 또는 최소화하는 프로그램을 설계함으로써 질소산화물 배출이 기준치의 2~16배에 이르는 상황이 일반화되게 되었다.

그 당시에는 국내는 물론 유럽에서도 이에 대한 제재조항이 없었으며, 제작사 측은 과부하로 인한 엔진보호를 위해서는 불가피한 조치라는 식의 변명으로 일관하였으나, 결국 2016년 말에 자동차 인증에 관한 UN산하 국제 협의기구(WP-29)의 제안을 받아들여 유럽연합(EU)과 국내에서는 2017년 9월부터 단계적으로 강화된 실제 도로 주행(RDE) 시험 기준을 정하여 신규로 인증받는 차량부터 적용하게 되었다.

이 과정에서 나타난 경유승용차의 질소산화물 과다배출 시험결과는 매우 충격적이었다. 그림 3.5는 유럽 경유승용차(유로5 차량)가 다양한 조건의 실제 도로 주행 시험을 반복하였을 때 어느 정도 배출하는 지를 누적빈도로 표현한 것과 국내에서 동일 방법으로 경유차와 LPG 및 휘발유차를 비교한 그림이다.

그림에서 알 수 있듯이 유럽 및 국내 경유차는 실제 도로 운전조건에서 질소산화물 배출허용기준의 2배 이상을 배출하고 상위 20%의 악조건에서는 기준의 4~10배 이상을 배출하는 것을 확인할 수 있었던 반면, 국내 실험에서 확인된 휘발유차와 LPG차는 어떠한 운전조건에서도 기준치보다 훨씬 낮은 수준만을 배출함을 알 수 있다.

경유차의 경우 모든 차량이 대부분의 운전조건에서 배출허용기준의 2배 이상을 배출하고 시골의 언덕길을 주행하는 경우는 20% 이상의 차량이 최소한 6배 이상을 배출하는 것으로 나타났다. 이는 국내 실험에서도 유사하게 확인된 결과이다. 하지만, LPG 및 휘발유 차량에서는 거의 모든 차량이 기준치의 10% 이내의 배출을 하는 것으로 조사되었다.

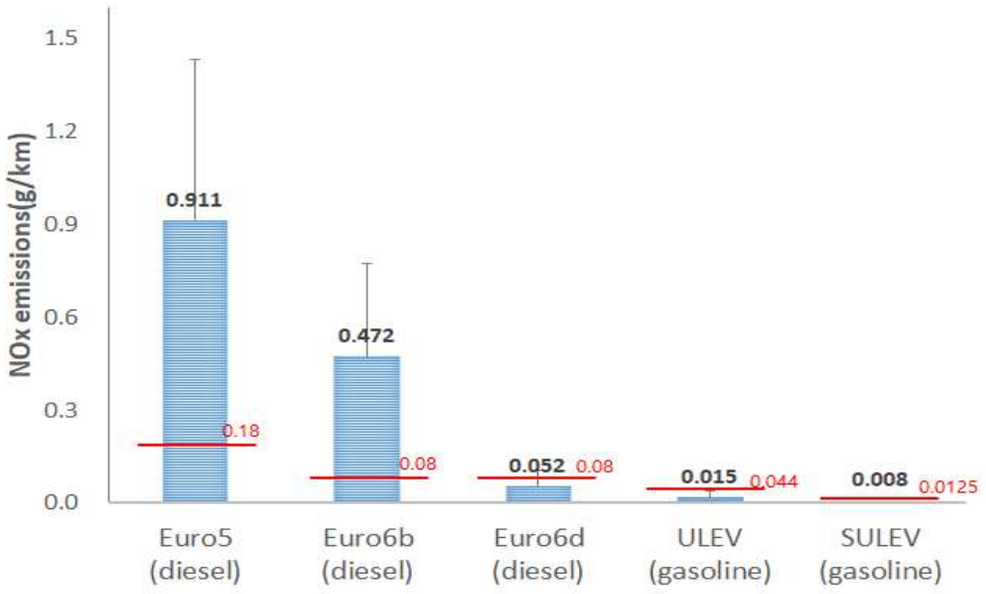


(source : JRC 2011) (source : NIER 2012)

[그림 3.5] 실제 도로 주행 조건에서의 차종별 질소산화물 배출량의 누적평균

149) EGR(Exhaust Gas Recirculation) : 배출가스재순환장치

그림 3.6은 실제 도로 주행조건(RDE)을 만족하는 최신형 경유승용차의 시험결과를 포함한 자료로써 향후 2020년 이후에 출시되는 대부분의 경유승용차는 매연과 질소산화물 배출이 기준치를 만족할 수 있을 것으로 예상된다. 그러나 이미 판매된 차량은 판매 당시의 배출허용기준을 적용받는 현실을 감안할 때, 기존의 실제 도로 주행(RDE) 시 문제점을 안고 있는 차량의 경우는 폐차될 때까지 여전히 문제가 존재할 것으로 우려된다. 특히 10년 이상된 노후차량의 구성비가 30%를 넘는 현실에서 노후경유차에 대한 특단의 조치가 필요하다는 주장이 설득력이 있어 보인다.

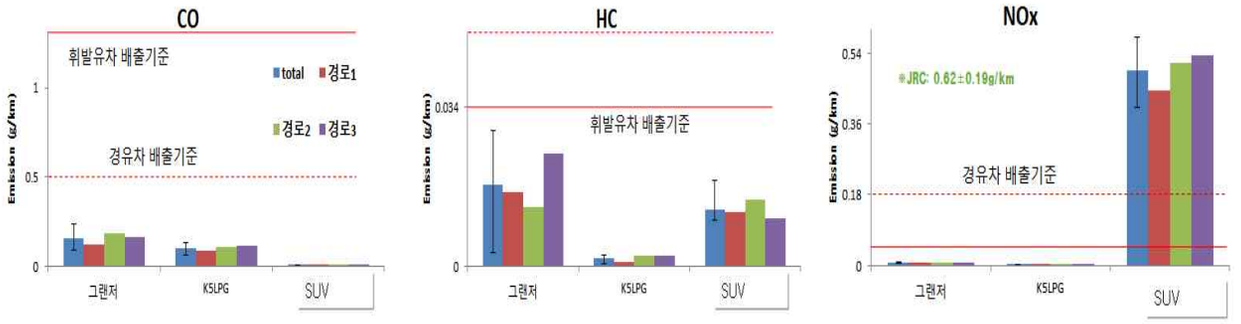


[그림 3.6] 최신 경유차종(유로6d)의 배출특성을 포함한 질소산화물 배출 비교.

자료: 국립환경과학원 교통환경연구소 (2019)

한편, 경유차가 연비 외에도 휘발유차보다 일부 오염물질 측면에서 유리하다는 주장이 있으나 그것은 침소봉대된 측면이 있다. 교통환경연구소 시험결과인 그림 3.7에 의하면, 불완전연소 과정에서 주로 배출되는 일산화탄소(CO)와 탄화수소(HC)는 연소효율이 높은 경유차가 유리한 것은 사실이다. 그러나 국내에서의 CO는 이미 환경기준을 안정적으로 달성하고 있는 물질이며, VOCs의 주요 배출원은 앞의 그림 3.1에서 알 수 있듯이 유기용제와 생산공정부문으로 이들 부문의 배출량은 전체 배출량의 72% 이상을 차지하고 이동오염원은 휘발유차와 경유차를 합하여 4.6% 정도에 불과한 실정이다. 그러나 질소산화물(NOx)의 경우는 경유차가 주요 배출원임을 쉽게 알 수 있으며, 유로5 경유차의 경우도 휘발유차의 약 100배 이상을 배출하는 것으로 조사되었고, 앞에서 설명했듯이 경유차 중에서도 노후경유차가 주요 개선 대상임을 확인할 수 있다.

이러한 이유로 경유차가 탄생된 독일을 비롯한 유럽에서도 경유차 퇴출 움직임이 구체화[150] 되고 있다. 또한, 앞에서 설명한 경유차의 문제점 이외에도 휘발유차 역시 온실가스인 CO_2와 대기오염물질을 다량 배출한다는 측면에서 궁극적으로 화석연료 자동차를 퇴출시켜야 한다는 목소리가 커지고 있다.



[그림 3.7] 연료종별 소형차의 실제 도로 주행시 오염물질 배출특성 비교.

(3) 미세먼지와 관련된 경유차 배출특성의 과학적 사실

가. 경유차가 클린디젤로 둔갑하게 된 경위

디젤엔진은 휘발유보다 에너지 함량이 높은 경유를 사용하며 연소효율이 높아 개발 초기부터 최근 10여년 전까지 자원이 부족한 유럽 등에서 널리 보급되어 왔다. 그러나 경유차는 시커멓게 눈에 보이는 매연을 많이 배출하는 치명적 약점이 있어 미국, 일본 등에서는 환경보호를 위해 배출기준을 강화하여 규제해 왔다.

2000년대 들어 경유차에 전자식으로 연료를 정밀하게 분사하는 커먼레일이라는 장치가 개발·장착되고 유로3 기준부터 매연여과장치(DPF; Diesel Particulate Filter)가 보급되어 유로4 기준(2005년)부터는 본격적으로 장착하면서 매연에 대한 우려가 줄어들게 되었다. 그리고 전세계적으로 중요한 환경이슈였던 기후변화 문제와 연계하여 자동차 제작사를 중심으로 휘발유차보다 연비가 좋다는 점을 부각하기 시작하면서 자동차 제작사들은 연비경쟁을 통해 경유차의 우월성을 강조하며 판매량을 늘려 갔다. 그리고 소비자 입장에서도 매연문제가 해결되었으니 연비가 좋은 경유차에 대한 선호도가 높아진 것은 당연한 결과로 보여진 것이다. 이에 유럽과 국내에서는 '클린디젤'이라는 이름으로 각종 특혜를 받는 계기가 되기도 하였다.

150) 독일에서는 '18년부터 경유차 통행을 단계적으로 금지하기로 결정하였고 '19년 9월부터는 유로5 차량도 운행할 수 없다. 프랑스도 2001년 이전에 생산된 경유차 운행이 파리시내에서 금지된데 이어 '19년 7월부터는 외곽 79개 소도시로 확대되며 올림픽이 열리는 2024년까지는 모든 디젤차의 파리시내 운행이 금지된다. 노르웨이와 네덜란드는 2025년 이후, 프랑스와 영국은 2040년 이후 경유차 판매 자체를 허용하지 않기로 해 디젤차 수가 빠른 속도로 줄어들 것으로 보인다.

나. 경유차 딜레마와 폭스바겐 디젤게이트

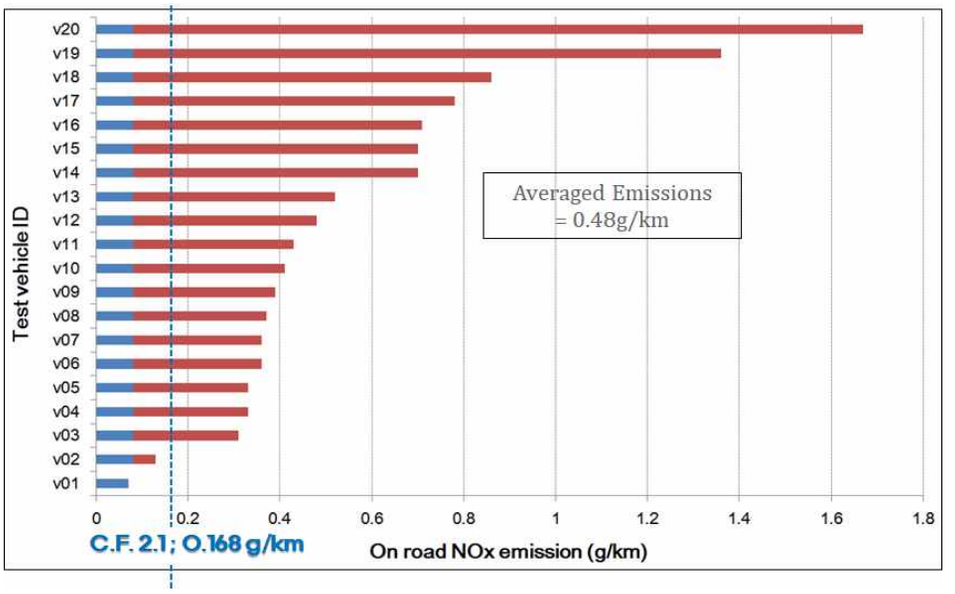
그러나 그 이면에는 불편한 진실이 숨겨져 있었는데 그것은 바로 '폭스바겐 디젤게이트'라고 하는 배출가스 조작 사건으로, 실내 인증검사 조건에서는 법정기준을 준수하지만, 운전자가 실제 도로를 주행하는 과정에서는 연비 극대화를 위해 질소산화물을 법에서 정한 배출가스 인증조건보다 과다하게 배출하도록 배출가스 제어장치(ECU)를 조작한 것이다.

질소산화물(NOx)은 자동차 엔진과 같이 고온연소과정에서 공기 중의 질소와 산소가 반응하여 생성되는 물질로 자체 위해성도 높으며, 여름철 광화학반응을 통해 오존을 생성하기도 하고, 특히 암모니아와 반응해서는 2차 생성 미세먼지인 질산암모늄염을 다량으로 만드는 중요한 대기오염물질이다.

소형경유차의 질소산화물 배출허용기준이 단계적으로 강화되면서 저감장치인 배출가스재순환장치(EGR; Exhaust Gas Recirculation)를 추가로 부착해야 하는 문제가 발생하게 되었는데, 이러한 장치의 추가부착으로 차량가격이 오르게 되었고 장치 가동으로 인해 연비가 나빠지는 역효과가 나타나게 되었다. EGR은 엔진내에서 연소된 배출가스 일부를 다시 엔진 속으로 주입하여 섞어 넣음으로써 부분적인 불완전 연소를 유발시키고 이로 인해 연소온도를 낮추어 질소산화물 생성을 조절하는 기술적 장치인 것이다. 제작사 입장에서는 불완전연소가 되면 연비가 나빠지는 결정적인 문제가 있으므로 EGR의 작동을 인증시험 조건에서만 정상작동하도록 전자제어장치(ECU; Electronic Control Unit)를 설계하는 방식으로 대응하게 되었던 것이다.

이러한 행위는 일부 제작사만의 문제가 아니라 정도의 차이는 있지만 모든 경유차 제작사에서 확인된 것이었고, 폭스바겐사의 경우는 배출허용기준 검사방법이 우리와 다른 미국의 확인검사과정에서 적발된 사례였다.

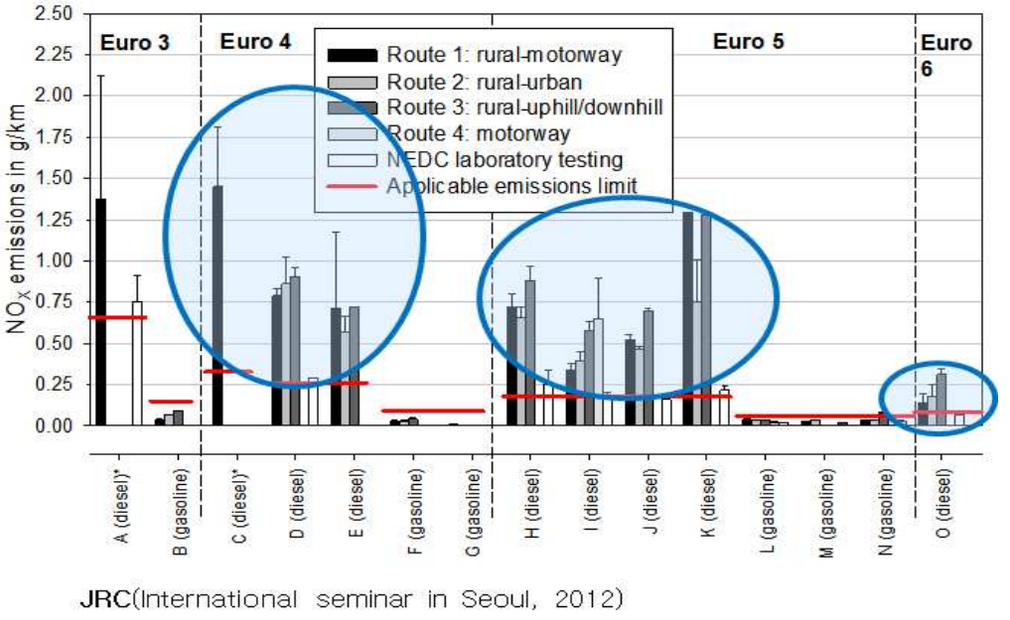
다행히 우리나라는 경유차 배출조작사건을 계기로 기존의 인증방식에 실제 도로 주행 검사(RDE-LDV; Real Driving Emission- Light Duty Vehicle) 방식이 법제화되어 2017년 9월부터는 단계적으로 강화된 기준을 적용하여 시행 중에 있다. 아울러 국내외 소형경유차에 대한 배출가스 조작여부를 확인하는 다양한 시험을 통하여 경유차 배출 특성을 정확히 파악하게 된 것도 중요한 성과 중의 하나로 평가할 수 있다. 당시 국내에서 운행 중인 국산 및 수입사의 20개 주요 소형경유차에 대한 이동식 배출가스측정장비(PEMS)를 이용한 실제 도로 주행 시험(RDE) 결과를 비교한 결과(그림 3.8), 대부분의 차종이 질소산화물에 대한 유로6 배출허용기준을 초과하였고, 평균 배출량은 0.48 g/km로써 기준치의 6배에 해당하였으며 적합계수(conformity factor) 2.1배를 만족한 차종은 2종에 불과하였고, 최대 약 21배를 초과하는 차량도 확인된 바 있었다.



[그림 3.8] 국내 운행중인 20개 주요 경유승용차에 대하여 PEMS로 측정한 실제 도로 운전 중 질소산화물 배출특성 비교

자료 : 국립환경과학원 교통환경연구소(2012)

그림 3.9는 EC JRC(유럽연합 집행위원회 산하 공동연구센터)에서 발행한 보고서에 나타난 배출기준 강화에 따른 휘발유차와 경유차의 인증조건과 RDE 시험에서의 질소산화물 배출량을 비교한 것이다. 휘발유차의 경우는 인증조건과 RDE 배출특성이 유사하면서 기준을 만족하고 있는 반면, 경유차는 배출허용기준은 강화되고 있으나 RDE 배출량은 거의 개선되지 않고 있는 모습을 확인할 수 있다.

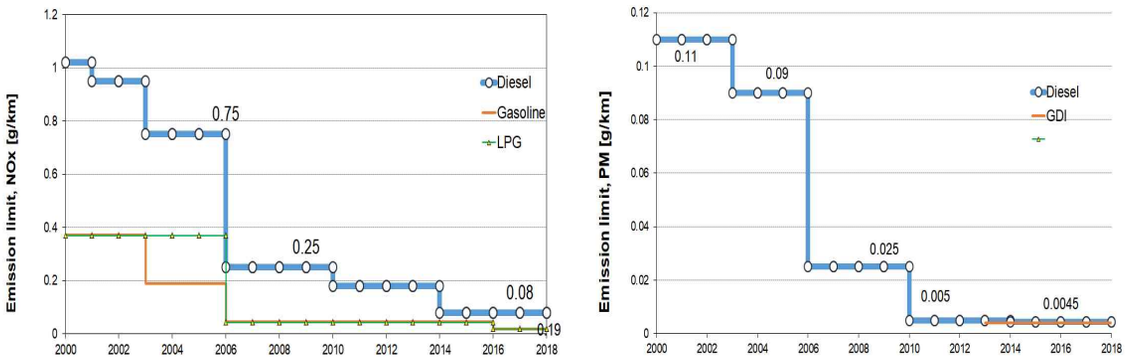


[그림 3.9] 휘발유차와 경유승용차의 RDE 질소산화물 배출특성 비교

자료: 국립환경과학원 교통환경연구소(2012)

다. 경유차 연비에 대하여

많은 사람들은 경유차가 휘발유차에 비해 연비가 훨씬 우수하다고 생각하고 있다. 그것은 엔진의 연소 특성만을 고려할 때에는 옳지만 환경의 중요성을 강조하고 있는 현재에는 상황이 많이 달라진다. 그림 3.10은 2000년 이후부터 자동차의 배출허용기준이 지속적으로 강화되어 왔음을 보여주고 있다.



[그림 3.10] 소형차의 PM(좌) 및 질소산화물(우) 배출허용기준

먼지(PM)의 경우, 경유차의 분사방식을 활용한 직접분사(GDI; Gasoline Direct Injection) 방식의 휘발유차가 본격적으로 보급되고 있는 2013년부터 배출허용기준이 적용되고 있으며 그 이전의 MPI(Multi-Point Injection) 방식의 차량은 PM 자체가 거의 배출되지 않아 기준조차 설정하지 않고 있었다. 실제로 DPF가 부착된 신형 경유승용차와 3원촉매로 조절되고 있는 휘발유차의 실주행시 PM 배출량은 기준치의 약 1/4수준으로 유사한 것으로 조사되고 있다.

그림에서 주목할 것은 질소산화물 기준으로서 경유차와 휘발유차의 배출허용기준의 격차는 예전부터 상당한 차이를 보이고 있으며, 최신 차종에 대해서도 약 4배 이상의 차이를 보이고 있다. 여기에 앞서 언급한 실제 도로 주행시(RDE) 배출량을 고려한다면 그 차이는 더욱 크게 나타난다. 결과적으로 경유차의 배출허용기준을 휘발유차와 동일하게 하고 RDE 조건의 배출량도 유사하게 저감장치를 정상작동한다면 결코 경유차의 연비가 더 좋을 것이라고 단언하기 힘들 수도 있다는 설명이 된다.

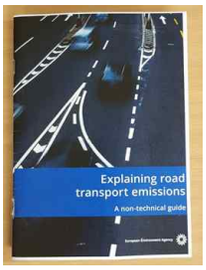
경유차의 본고장인 유럽의 연구에서도 그림 3.11과 같이 흥미로운 결과를 제시하고 있다.

경유차가 아직도 CO_2 감축의 해법인가?

경유는 가솔린보다 에너지밀도가 높고 디젤엔진의 연소효율이 휘발유엔진보다 높은 것을 함께 고려할 때 경유차의 연비가 좋다고 전통적으로 알려져 왔다. 연비가 좋다는 것은 단위 거리를 주행할 때 CO_2 배출을 줄일 수 있다는 것으로써 많은 나라에서 지난 수십년간 디젤차 보급을 위해 금전적 지원을 해 왔다.

그러나 공식 시험에 의하면, 경유차와 휘발유차의 효율 차이는 근래에 계속 줄어들고 있다. 과거 2000년에 경유차와 휘발유차의 CO_2 배출량 차이가 17g CO_2/km 이던 것이 2014년에 EU에 신규 등록한 경유차의 평균치는 123.2g CO_2/km 으로써 그 차이는 2.5g CO_2/km 에 불과한 것으로 나타났다.

이와 같이 차이가 크게 감소한 이유는 경유차의 평균무게가 계속 증가한데 기인하는 것으로 보인다. 2004년에 휘발유차 평균보다 100kg정도 더 무겁던 것이 최근에는 약 310kg이나 더 무거운 것으로 나타나 무게의 증가가 경유차 연비의 장점을 대부분 상쇄해 버린 결과를 초래하였다.



Introduction of Real Driving Emission (RDE) testing

To help address the gap between legislative and real-world NO_x emissions, the European Union has recently agreed a Real Driving Emission (RDE) test procedure for cars and vans. Following its introduction, the EU will become the first region in the world to use on-road emissions testing methods for legal compliance purposes.

The new RDE procedure will measure emissions of NO_x, and at a later stage particle numbers, using portable emission measuring systems (PEMS) attached to the car. The new protocol requires the real driving emissions from cars and vans to be lower than the legal limits multiplied by a 'conformity factor'. This factor expresses the ratio of on-road PEMS emissions to the legal limits. At the time of writing, the NO_x conformity factor has been set to 2.1 (i.e. 110 % above the Euro 6 limit) from 1 September 2017 for new models and two years later for all new vehicles. In a second step, it will be reduced to 1.5 (i.e. 50 % above the Euro 6 limit) from 1 January 2020 for new models and one year later for all new vehicles. These factors remain subject to scrutiny by the European Parliament, and therefore potentially remain subject to change.

Is diesel still a solution for reducing carbon dioxide emissions?

Diesel fuel contains more energy per litre than petrol and, coupled with the fact that diesel engines are more efficient than petrol engines, diesel cars have traditionally been more efficient to run. This means that diesel cars typically have a better fuel economy, producing less CO_2 per kilometre driven. In a number of countries, financial incentives have been used over the past decades to encourage the uptake of diesel vehicles.

However, on the basis of the official test cycle measurements, the efficiency gap between diesel and petrol cars has been decreasing in recent years. In 2014, the average new diesel car registered in the EU emitted 123.2 g CO_2/km, only 2.5 g CO_2/km less than the average petrol vehicle. By comparison, in 2000, the emissions difference between diesel and petrol vehicles was 17 g CO_2/km.

This diminishing gap can largely be explained by the increase in mass of diesel cars over time. The average diesel car registered in the EU is now about 310 kg heavier than the average petrol car, i.e. around 100 kg heavier than in 2004. This increased mass has largely offset the inherent higher efficiency of the diesel engine, diminishing the average fuel economy benefits of diesel cars.

(EC JRC, 2015)

[그림 3.11] 경유차 연비에 관한 EC JRC의 홍보 책자의 설명

(4) 미세먼지 감축을 위한 경유차 대책 제언

정부의 종합대책('17.9.26 대책)에서는 기존의 수도권 대기환경개선 특별대책부터 시행해 오던 경유차 저공해화 사업을 확대 추진하는 것으로 되어 있다. 다만 그동안 DPF 부착 등 비교적 용이한 차량 선정은 대부분 마무리되었고 사업 추진이 곤란한 차종이나 연식 제한 등으로 저공해화가 진행되지 못한 물량이 많을 수 있다. 따라서 사업계획 실적만을 높이기 위하여 무리한 사업 진행은 미세먼지 개선에 별 도움이 되지 않을 것이라는 지적이 있다. 경유차 대책으로는 노후경유차 조기폐차가 가장 큰 효과가 있겠으나, 이들 차량을 친환경차로 대체할 수 있는 유인책이 충분히 될 수 있도록 현재 미흡한 인프라 확충사업을 차질 없이 진행하는 등의 유연한 대책 보완이 필요하다.

비상저감조치 시 차량 운행제한, 노후경유차 운행제한 등 교통수요관리 대책은 미세먼지 문제를 함께 해결하겠다는 성숙한 선진 시민의식을 고취하는 데에는 큰 역할을 하겠지만, 낮은 참여율로 개선효과가 미미하고 국민불편만 야기한다는 불만이 계속 될 수 있는 상황임을 감안하여 명확한 분석결과를 근거로 한 대국민 홍보와 설득이 필요할 것이다.

2022년까지 전기・하이브리드차 등 친환경차 200만대를 보급하고, 대형마트(500여 개소)와 주유소(12,000여 개소) 등에 급속충전기 1만기를 설치하는 의욕적인 계획과 2021년부터 운행경유차·이륜차 배출가스 검사항목에 질소산화물을 추가 확대하고 배출가스 검사기관을 일원화하여 시험결과의 임의 조작을 근절하기 위한 계획도 중요하지만, 제도 도입 후 운영과정에서의 사후관리까지 성공적으로 추진되었을 때 효과를 기대할 수 있을 것이다. 실제로 사후관리를 위한 예산편성 및 인력 운영계획, 지자체 지원방안 등은 구체적인 설명이 없다는 지적이 많다. 즉, 다양한 사업의 시작은 있지만 마무리(사업평가, 유지관리 등)를 어떻게 하겠다는 계획이 미흡하다는 설명이다.

교통수요관리대책과 관련하여 “공해차량운행제한구역(LEZ, Low Emission Zone)” 또는 “녹색교통진흥지역”을 지정・운영하거나 도로의 재(再)비산먼지 제거를 위한 물청소차량의 운영과 비상저감 조치시 차량 2부제 등에 대해서는 국민에게 얼마나 효과가 기대되는지를 공감할 수 있도록 대책별 감축효과를 계량화하여 방송 등을 통해 적극 홍보하여 자발적인 참여를 유도하도록 노력하여야 할 것이다.

아울러, 오염물질 배출이 많은 것으로 확인된 정차 중 공회전과 파손된 저감장치를 수리하지 않은 채 운행하는 차량 등에 대한 지도단속을 강화해야 한다는 지적도 있다. 이와 더불어 차량 크기에 비례하여 연료소비량이 커지고 아울러 대기오염물질도 다량 배출된다는 단순한 사실에 따라 자원이 부족한 우리나라에서는 대형차보다 소형차 타기 문화를 정착시키기 위한 시민운동을 지속적으로 해나가야 할 것이다.

4) 비도로 이동오염원 부문

(1) 항만과 공항부문의 대책

비도로 이동오염원 부문에서는 선박에서 배출되는 오염물질이 질소산화물(NOx)의 52%, 황산화물(SOx)의 92%를 차지(‘16년 기준)하고 있다. 많은 선박들이 주로 수도권과 부산권 등 대도시 인근 해역을 운항하므로 선박관리는 매우 중요한 분야이나 그동안 미세먼지 대책에서는 소홀하게 다루어져 온 것이 사실이다.

선박 배출의 가장 큰 문제는 국제해사기구(IMO)의 해양오염방지협약(MARPOL)에 따라 완화된 연료 기준을 적용하고 있다는 점이다. 현재 선박은 황함량이 3.5%에 이르는 저질 연료를 사용하고 있으며 사실상 배출허용기준 관리가 전혀 이루어지지 않고 있는 실정이다.

현재 선박의 연료 황함량 기준을 현행 3.5%에서 2020년부터 0.5%로 강화할 예정이나, 자동차용 연료의 황함유 기준인 10ppm과 비교하여 여전히 높은 수준이므로 더 엄격하게 관리하는 방안을 모색하여야 할 필요가 있다.

이와 관련하여 미국, 캐나다, 프랑스의 경우는 자국 영해(Emission Control Areas로서 200 해리에 해당)를 진입하는 모든 선박은 강화된 품질기준의 연료(황함량 0.1% 이하) 사용과 질소산화물 배출허용기준을 2005년부터 적용하고 있다. 질소산화물 배출규제를 위하여 2016년부터는 130kW 규모 이상의 선박에 대하여 Tier Ⅲ의 배출허용기준[151]을 적용하고 있는데 이는 자국의 환경보호를 위해 국내외 선박의 차별 없는 규제를 시행하는 것이기에 가능한 것이다[152].

이와 함께, 정박 중인 선박의 배출저감을 위하여 육상전력공급시설(AMP)을 구축하는 것도 필요하며, 항만에 통행하는 차량과 항만 내에서 설치·운영 중인 장비 중 노후경유차와 경유를 사용하는 엔진들에 대한 친환경개조 사업 등도 미세먼지 저감을 위해 필요한 대책으로 판단된다.

(2) 기타 비도로 이동오염원 대책

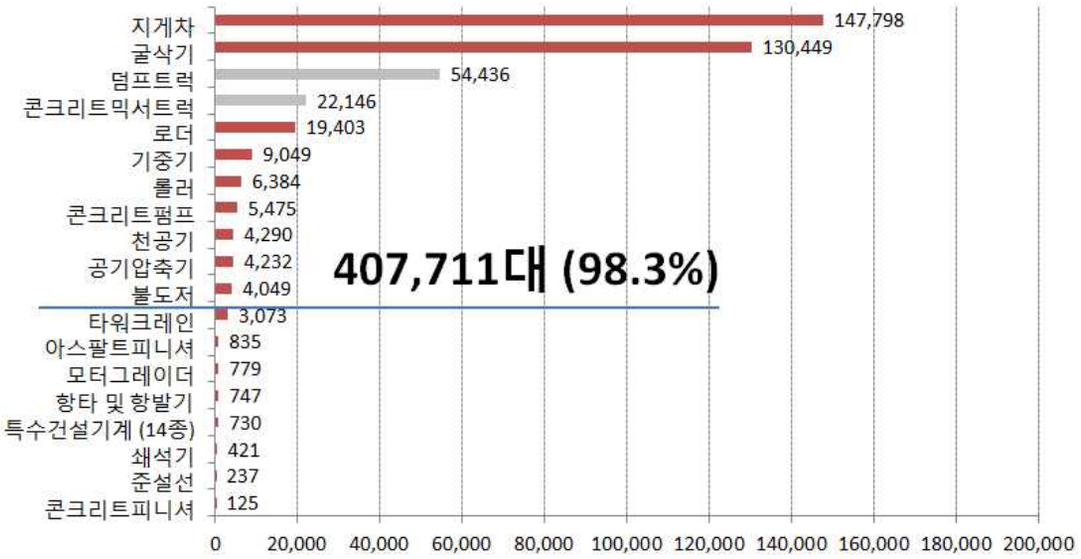
과거 20~30년전 자동차와 건설기계가 매우 적었던 시절에는 자동차 대책만으로도 충분할 수 있었다. 그러나 경제규모가 커지고 건설기계와 비도로용 장비 등이 급증하였으므로 자동차 관리제도에 더하여 비도로 이동오염원에 대한 대책도 시급히 강화할 필요성이 대두되고 있다.

우리나라에서는 그간, 건설기계 등 비도로 이동오염원에 대한 관리가 상대적으로 소홀하게 다뤄지면서, 2001년부터 2011년 기간 중 도로이동오염원에서는 배출량이 질소산화물 26%, PM 52%가 감소된 반면, 건설기계의 경우는 질소산화물 58%, PM 64%가 증가하였으며, 이러한 경향이 최근에도 지속되고 있어 대책이 시급하다.

국내 건설기계 보유 현황을 보면(그림 3.12), 지게차와 굴삭기가 전체의 67% 이상을 차지하고 있으며 도시 내 건설현장이나 사업장의 물건 운반 등의 용도로 널리 쓰이고 있다. 2009년부터 건설기계/농기계에 적용된 배출허용기준은 Tier Ⅲ였으며 2015년부터 Tier Ⅳ 기준을 적용하고 있는데, 이 새로운 기준은 Tier Ⅲ 대비 PM은 92%(0.3→0.025g/kWh), 질소산화물은 90%(4.0→0.4g/kWh) 강화된 것이다. 이들

151) Tier 1 규정 대비 약 80%의 질소산화물(NOx)을 저감한 상태로 기준 제정
152) https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/international-standards-reduce-emissions-marine-diesel 인용

건설기계에 대한 사후관리는 엔진을 분리하여 시험하는 방식에 따르고 있으나 실제 야외에서 운전 과정의 시험은 사실상 이루어지지 못하고 있으며, 현재 사용되고 있는 건설기계의 절반 정도는 10년 이상 된 것이라서 노후장비 퇴출과 함께 DPF 부착사업이 시급히 요구되고 있다.



[그림 3.12] 건설기계 기종별 등록 대수(2013)

그동안 미세먼지 관리의 사각지대인 경유철도차량에 대한 배출허용기준이 신설('18년)되었으나 배출기여율이 전체 비도로이동오염원 중에서 질소산화물 1.9%, PM-2.5 2.5%로 매우 적고, 고압선이 흐르는 선로 위에서 운행과정의 배출가스 시험이 불가능하여 실효성이 적을 것이라는 지적도 있다.

항공부문의 경우도 배출기여율이 매우 낮고 상층으로 비행한다는 특성 때문에 관리가 어려운 문제가 있지만, 항만 시설과 유사하게 공항내 하역·운반 장비 등에 대한 관리는 필요할 것이다.

5) 생활부문

(1) 노천소각 관리

2015년 기준 생물성연소에 의한 연간 대기오염물질 배출량은 PM-10 14,552톤, PM-2.5 12,060톤, 황산화물 79톤, 질소산화물 8,883톤, CO 232,455톤, VOCs 86,012톤, NH_3 15톤이었다.

이중 농업잔재물 및 생활폐기물 노천소각에 의한 배출량 PM-10, PM-2.5 각각 10,101톤(69.4%), 8,436톤(69.9%)으로 생물성 연소부분의 주요 요인이었다.

[표 3.13] 생물성연소 부문 대기오염물질 배출량(2015년)

(단위 : 톤, %)

배출원 중분류		PM-10	PM-2.5	SOx	NOx	CO	VOCs	NH_3
생물성연소	고기 및 생선구이	626 (4.3)	574 (4.8)	2 (2.5)	9 (0.1)	13 (0.0)	154 (0.2)	-
	노천 소각	919 (6.3)	815 (6.8)	-	550 (6.2)	4,200 (1.8)	4,488 (5.2)	2 (15.3)
	농업잔재물 소각	9,183 (63.1)	7,621 (63.2)	-	5,606 (63.1)	157,616 (67.8)	61,408 (71.4)	5 (34.3)
	목재난로및보일러	1,958 (13.5)	1,298 (10.8)	60 (76.6)	2,195 (24.7)	57,772 (24.9)	17,071 (19.8)	6 (41.5)
	숯가마	1,757 (12.1)	1,664 (13.8)	8 (9.8)	10 (0.1)	7,000 (3.0)	1,254 (1.5)	-
	아궁이	111 (0.8)	89 (0.7)	9 (11.2)	513 (5.8)	5,856 (2.5)	1,638 (1.9)	2 (11.6)

자료: 국립환경과학원 (2018), 국가대기오염물질 배출량(CAPSS) 2015

농촌지역은 쓰레기 수거 처리를 위한 인력 및 장비, 예산이 매우 부족하고 주민들의 환경에 대한 인식도 상대적으로 낮아 불법소각이 일상화되어 있다. 그리고 읍·면 소재지 이외 자연부락 지역은 가옥이 산재되어 있어 도시지역과 같이 종량제 봉투 사용도 쉽지 않은 것이 현실이다. 과수 전정가지, 보리, 옥수수, 콩, 고추 등 작물의 잔재물도 별도의 처리과정 없이 노천에서 대부분 소각하고 있다.

따라서, 농어촌, 단독주택 등 분리 배출 취약지역을 대상으로 재활용품 등을 분리·배출·보관할 수 있는 상설 거점수거시설인 '재활용 동네마당'을 설치 지원하고, 농업잔재물은 수거처리 체계를 마련하거나 현장 파쇄처리 등을 통해 노천소각을 방지하여야 한다. 지도단속을 강화하고 노천소각 행위 신고 시 인센티브(신고포상금)를 지급하거나, 홍보를 강화하여 주민 인식을 개선해 나갈 필요가 있다.

(2) 직화구이 음식점 관리

직화구이 음식점에 의한 대기오염물질 배출은 2015년 기준 PM-10 626톤, PM-2.5 574톤이었다. 직화구이 과정에서 발생하는 미세먼지에는 각종 유기성 에어로졸 및 다환방향족탄화수소(PAH) 등 유해대기오염물질을 다량 포함하고 있어 인체에 직접적인 독성물질로 작용할 뿐만 아니라 장기노출 시 암 발생원인으로 작용할 수 있다.

생활 주변의 직화구이 음식점에 대해서는 그간 여러번 배출가스의 위해성에 대한 지적이 되풀이되었으나, 법적 근거가 마련되지 않아 관리대상에 포함되지 못하고 있다. 대형 직화구이 음식점은 배출시설에 준하여 관리할 필요가 있다. 수도권에서는 면적 200㎡ 이상의 대규모 직화구이 음식점을 대상으로 2017년부터 시범사업을 추진한 바 있고, 2018년부터 신청을 받아 방지시설 설치 보조금을 지원하고 있다. 그러나 직화구이 음식점 방지시설 설치는 법적 규정이 없어 사업을 추진하는데 애로가 있으며, 음식점주의 환경인식 부족, 경영악화에 따른 비용 부담 등을 이유로 여전히 소극적이다.

따라서, 앞으로는 이들 음식점이 배출시설로 관리되어 방지시설을 설치 운영하게 함으로써, 미세먼지 저감 등 환경개선을 이끌어내야 하며, 영세업체임을 감안하여 방지시설 설치 지원도 병행해야 할 것이다.

(3) 화목난로 및 보일러 관리

겨울철 난방에 사용하는 목재 난로・보일러에서도 상당량의 오염물질이 발생한다. 화목난로 및 보일러 사용에 의한 대기오염물질 배출량은 2015년 기준 PM-10 1,958톤, PM-2.5 1,298톤, 황산화물 60톤, 질소산화물 2,195톤, CO 57,772톤, VOCs 17,071톤이었다. PM-10, PM-2.5, CO 및 VOCs는 화목난로에 의한 배출이 많았고, 질소산화물은 펠렛난로 사용에 의한 배출이 많았다.

[표 3.14] 화목난로 및 보일러 부문 세부 대기오염물질 배출량(2015년)

(단위 : 톤)

배출원 소분류	PM-10	PM-2.5	SOx	NOx	CO	VOCs	NH_3
합 계	1,958	1,298	60	2,195	57,772	17,071	6
펠렛난로 및 보일러	457	344	25	1,830	18,073	5,673	2
화목난로 및 보일러	1,501	953	36	365	39,698	11,397	4

자료: 국립환경과학원 (2018), 국가대기오염물질 배출량(CAPSS) 2015

화목난로와 보일러는 주로 농촌지역에서 난방용으로 사용하는데 해가 갈수록 증가하는 추세이다. 농업지역 주민 설문조사에 따르면, 농업가구의 7.2%가 화목난로, 1.5%가 화목보일러를 사용하고 있고, 화목난로・보일러와 펠릿난로・보일러는 초가을이 시작되는 10월부터 다음 해 초봄인 4월까지 주로 사용하고 있는 것으로 조사되고 있다.

국내에서는 이와 관련된 대기오염물질 배출규제가 없기 때문에 관리 사각지대에 머무르고 있다. 또 현장에서는 장작이 아닌 폐기물을 연료로 사용하는 경우도 많아 유해물질도 다량 발생 우려되고 있다.

따라서, 우리나라도 선진국 사례와 같이 난로에는 인증제도를 도입하고 배출허용기준을 마련할 필요가 있으며, 화목난로 사용 시 연료절감과 오염물질 배출감소 가이드라인을 마련하여 주민들에게 홍보할 필요가 있다.

(4) 농축산 암모니아 관리

농촌지역에서 1차적인 미세먼지 배출원은 생물성 연소, 농경지 비산먼지, 농기계 등이 있다. 이외에도 미세먼지의 2차 생성에 기여하는 전구물질로 축산분뇨와 화학비료로 인한 암모니아와 생물성연소로부터 발생되는 휘발성유기화합물이 중요하다.

암모니아는 미세먼지의 2차 생성에 직접 관여하기 때문에 암모니아 저감 없이 질소산화물, 황산화물 감축만으로 미세먼지를 줄이기에는 한계가 있다. 2015년 암모니아 배출량의 77.8%인 231,263톤이 농업 부문에서 배출되었으며, 세부적으로는 분뇨관리(축산분뇨) 및 거름을 뿌린 농경지(화학비료)에서의 배출량이 각각 91.4%(211,362톤), 8.6%(19,901톤)를 차지하는 것으로 나타났다.

현재 암모니아 배출량 통계 등 과학적 정보가 불충분하여 정량적 분석에는 어려움이 있으나, 농업분야 배출량 저감을 위해 가축 사육방식이나 분뇨처리방식에 대한 대책이 필요하다. 축산분야 암모니아 배출을 줄이기 위해서는 가축분뇨의 관리와 퇴비처리시설, 비료의 양분상태와 흐름 파악 등 양분현황 조사 등이 필요하다.

6) 기타 부문

(1) 사업장 지도점검 인력 확충

전체적으로 미세먼지 기여도가 가장 높은 배출원은 사업장이지만 관리인력은 만성적으로 부족하여 사업장으로부터의 배출량 파악, 지도단속 등에서 사각지대가 발생되고 있다. 경기도의 사례 조사에 따르면, 관리인력 1인당 관리하여야 할 사업장은 206개소(전국 기준은 관리인력 1인당 110개)로, 관리인력이 부족하여 지도점검이 제대로 되지 않는 배출시설이 곳곳에 산재해 있는 것으로 나타나고 있다.[153] 특히

전문 환경기술인을 고용해야 하는 1~3종 사업장과 달리 소규모 사업장(4~5종)은 기술자격을 요구하지 않아 전반적으로 전문인력 확보가 어렵고 자체 관리역량도 매우 부족하다.

이러한 문제를 해결하기 위해서는 우선 사업장 배출시설 관리인력을 점검하고 부족인력을 확충해 나갈 필요가 있다. 대형 사업장은 원인자 책임 원칙을 적용하여 엄격하게 관리하고, 중소 사업장은 행정·재정적인 지원을 병행하여 방지시설을 제대로 운영하도록 하는 것이 필요하다.

또한, 전반적으로 사업장 관리감독 효율을 높이기 위하여 매년 사업장의 배출시설을 조사하고 데이터베이스를 구축하여 활용하는 것이 필요하다.

(2) 중소사업장 방지시설 설치운영 비용 및 기술지원

대형 사업장은 오염물질 방지시설이 대부분 갖추고 있으나 대기배출시설의 90% 이상을 차지하는 4, 5종 사업장은 제대로 된 방지시설이 없거나 노후화된 곳이 많고, 비용 문제로 비전문가가 운영하여 배출허용기준을 준수하기 어려운 경우가 많다. 방지시설의 설치 및 운영비용은 용량이 클수록 저렴하고 작을수록 단위 비용이 많이 소요되는 특징이 있다. 중소 사업장은 대부분 영세하기 때문에 환경오염물질 방지시설 설치 및 시설개선은 기업에 큰 부담으로 작용하는 경우가 많다. 환경부에서는 환경개선부담금제도를 운영하여 환경개선특별회계로 지원하고 있으나 공공투자 외에 개별 사업장에 대한 지원은 여전히 부족한 상황이다.

기술과 자금이 부족한 중소기업을 대상으로 대기오염 방지시설 설치 및 개선에 자금 지원이 필요하다. 중소사업장에 대해서는 비용과 함께 전문가와 전문기관을 동원하여 필요한 기술을 지원하는 것도 필요하다. 전문성이 부족한 사업장에 방지시설 설치, 개·보수 및 생산 공정 개선 등에 대해 자문하거나 시설을 진단하고, 필요시 금융 지원을 해주는 등의 대책을 추진하면 중소사업장의 어려움을 해소하면서도 대기오염물질의 배출 저감을 함께 기대할 수 있다.

153) 조성호 외 (2019), 미세먼지 개선의 핵심과제는 사업장 배출시설 관리역량의 강화, 경기연구원.

제3장 요약

■ 그동안 정부의 미세먼지 대책은 배출기여도가 큰 부문을 중심으로 배출허용기준을 강화하거나 총량관리제 적용, 고농도 시기에 발전소 등 일부 대형 배출시설의 조업 및 가동 제한, 노후 경유차량 폐차와 저감장치 부착 등을 중심으로 추진되어왔다.

■ 그러나 정부가 감축 목표 달성 등 미세먼지 저감을 성공적으로 이끌어 내기 위해서는 아직까지 배출원 부분별로 해결해야 할 문제점들이 다수 제기되고 있으며 주요 개선 방안들을 검토하면 다음과 같다.

- (발전부문) 고농도 시기에는 배출량이 많은 발전소부터 가동중단을 검토하는 것이 필요하며, 이에 따른 전력생산비용 부담에 대한 검토가 필요하다. 또한, 기존 재생에너지 확대 사업의 부작용을 최소화하는 방안이 필요하며, 비상발전기에 대한 관리강화 등도 요구된다.
- (산업부문) 사업장 총량관리제도는 개별 사업장 단위로 총량 할당을 원칙으로 하고 최적방지시설 농도 이상에 대해서는 유상할당, 배출권 거래 활성화 등의 제도 개선이 필요하다. 또한 사업장 배출관리 방법 개선, 관리감독 강화 등을 통해 배출허용기준 준수율을 높이는 것도 필요하다. 공정관리에서의 배출량 저감을 위해 중소사업장에 대한 지원 확대와 고체연료 사용시설에 대한 관리 강화 등이 요구된다.
- (도로이동오염원) 우리나라 도시지역에서는 경유차 대책이 중요하다. 노후경유차 조기폐차 등의 기존의 주요 대책 이외에도 친환경차 보급 인프라 확충, 사후관리 개선 등의 제도보완이 필요하며, 국민들의 자발적 참여를 적극 유도할 수 있는 교통수요관리 대책이 요구된다.
- (비도로이동오염원) 선박, 항만하역장비 등 항만 배출원 관리, 공항 특수장비 저공해화 대책들이 요구되며, 노후 건설·농업기계에 대한 실효성 있는 대책들이 필요하다.
- (생활부문) 노천소각, 직화구이 음식점, 화목난로 및 보일러 등에 대해 보다 적극적인 관리 및 개선지원 대책이 필요하며, 농·축산 현장에 적합한 암모니아 배출 관리 대책이 요구된다.
- 이외에도 사업장 관리감독 인프라(인원, 재정 등) 확충과 중소사업장에 대한 방지시설 및 기술 지원 등이 강화될 필요가 있다.

04

미세먼지 건강보호

1. 국민건강 보호 ····· 107
2. 민감계층(영.유아, 어르신) 대책 ····· 117
3. 근로자 대책 ····· 121
4. 국민불안 해소 ····· 127
5. 건강보호와 관련된 주요 이슈 ····· 131
6. 요약 ····· 135

국민정책참여단

미세먼지 정책제안 참고자료집

제4장 미세먼지 건강보호

연세대학교 | 임영욱

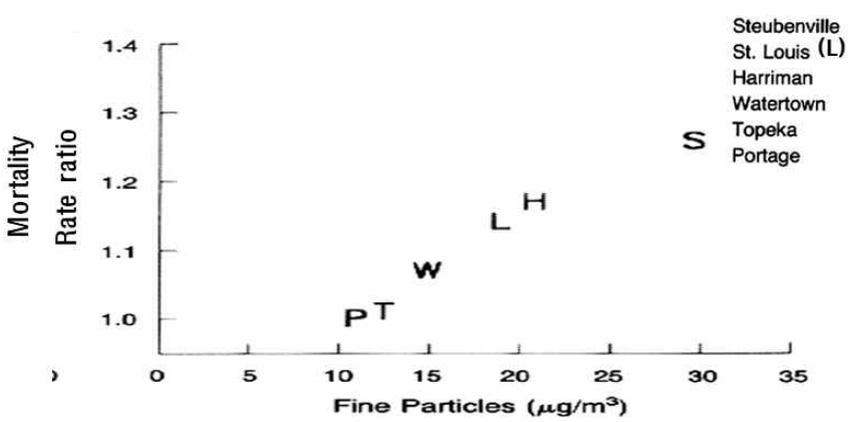
1. 국민건강 보호

미세먼지는 작은 크기의 다양한 화합물 복합체로 체내에 쉽게 침투하여 인체 건강을 해친다. 건강한 일반 성인부터 민감 계층(어린이, 노인 등)까지 다양한 성격의 불특정 다수가 동시에 노출되고 있어 일괄적인 대책 적용보다는 대상별 맞춤 방안이 제시될 필요가 있다. 또한, 미세먼지로부터 국민의 건강을 보호하기 위해서는 노출 수준을 최소화해야 한다.

미세먼지의 노출은 다양한 질병으로 이어질 수 있다. 미세먼지는 주로 호흡기 및 심·뇌혈관 질환과 밀접한 관련이 있으며, 입자의 크기가 작을수록 독성의 영향이 크다. 입자 크기가 작을수록 동일한 질량 대비 입자의 수가 많기 때문에 더 많은 입자가 인체 특정 부위에 흡착할 수 있으며, 폐포를 거쳐 체내 혈관으로 침투해 다른 기관 및 조직으로 이동할 수 있기 때문이다. 입자 크기가 5~10㎛인 경우 안구에 알레르기성 결막염이나 각막염이 유발될 수 있으며, 2~5㎛인 경우 코에 알레르기성 비염이 발생될 수 있다. 입자 크기가 1~2㎛인 경우 기관지에 염증이나 폐기종 또는 천식이 발생할 수 있으며 0.1~1㎛인 경우 폐포가 손상될 수 있다.

미세먼지와 사망의 인과관계를 밝힌 대표적인 연구는 하버드 대학 연구(Harvard Six Cities Study)이다. 미국 오하아오 주 6개 도시(Steubenville, St. Louis, Harriman, Watertown, Topeka, Portage)에 거주하고 있는 25세부터 74세까지 8,111명의 백인들을 대상으로 미세먼지와 사망에 대한 획기적인 연구(landmark study)를 수행한 결과, 깨끗한 선형관계가 확인되었다. 이를 계기로 미세먼지는 사망에 영향을 미친다는 것이 정설로 여겨졌다.[154]

154) Dockery DW, Pope CA, et al. (1993), An Association between Air Pollution and Mortality, N Engl J Med. 9;329(24): 1753-9



[그림 4.1] 하버드대학 6개 도시연구(Harvard Six Cities Study)_
미세먼지와 사망 간의 관계

2017년 WHO 보고서[155]에선 미세먼지(PM-10)의 급성피해로 10㎍/㎥이 증가할 때마다 사망률이 0.7% 증가하고 만성적으론 14% 증가한다고 보고했다. 또한 어린이, 임산부, 환자, 노약자 등 민감집단은 동일한 미세먼지 조건 속에서 일반 집단보다 더 민감하게 반응할 수 있어 민감집단 위주의 미세먼지 관리를 목표로 삼을 필요가 있다고 하였다.

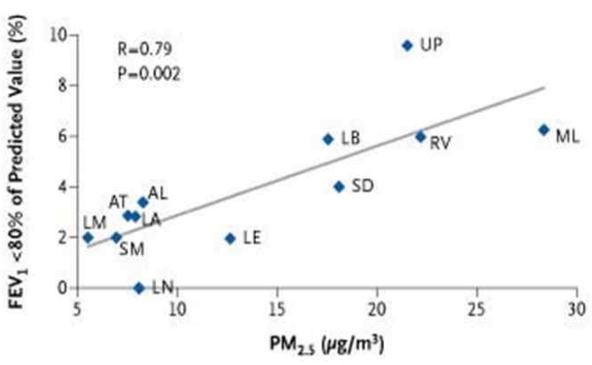
[표 4.1] 미세먼지(PM-10) 급성/만성 인체 영향

구분	유형
	PM-10 (10㎍/㎥ 증가 시)
급성피해	· 기관지 확장제 사용 3.1% 증가 · 기침 3.6% 증가 · 하기도 질병 3.2% 증가 · 호흡기 질환 관련 병원 입원률 0.8% 증가 · 사망률 0.7% 증가
만성피해	· 사망률 14% 증가 · 기관지염 34% 증가 · 어린이 강제호기량(FEV1) 1.9% 감소

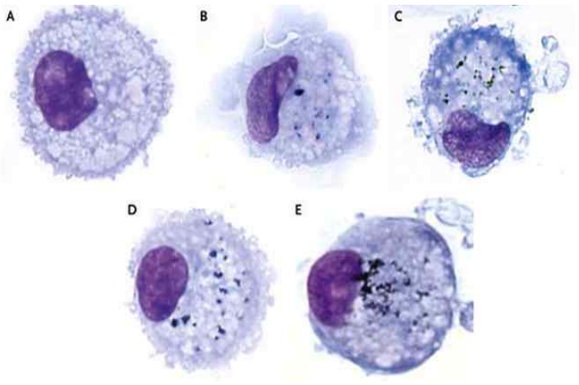
미세먼지는 호흡기 질환과 밀접한 관련성이 있다. 미국 남부캘리포니아 지역 12개 초등학교 1,759명을 대상으로 1993년부터 8년간 호흡기능 발달을 추적 조사하였다. 그 결과 정상 예측치 80% 수준 이하의 1초간 노력성 호기량이 미세먼지(PM-2.5) 저노출집단에서 1.6%, 고노출집단에서 7.9%로 나타나 저노출대비 고노출일 때 4.9배

155) WHO (2017), Evolution of WHO air quality guidelines: past, present and future.

증가하는 것을 확인할 수 있다.[156] 또한 대기오염이 높은 도로변 지역에 거주하는 어린이의 대식세포(체내 모든 조직에 분포하여 면역을 담당하는 세포)를 관찰한 결과 탄소 농도가 높았으며, 탄소 농도가 증가할수록 폐기능이 감소하는 것을 확인할 수 있었다.[157]

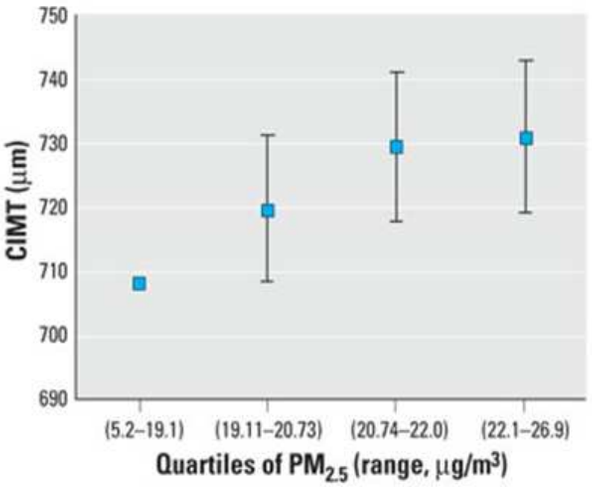


[그림 4.2] 미세먼지(PM-2.5) 노출에 따른 1초간 노력성 호기량(FEV1) 예측값



[그림 4.3] 대식세포 내 관찰된 탄소

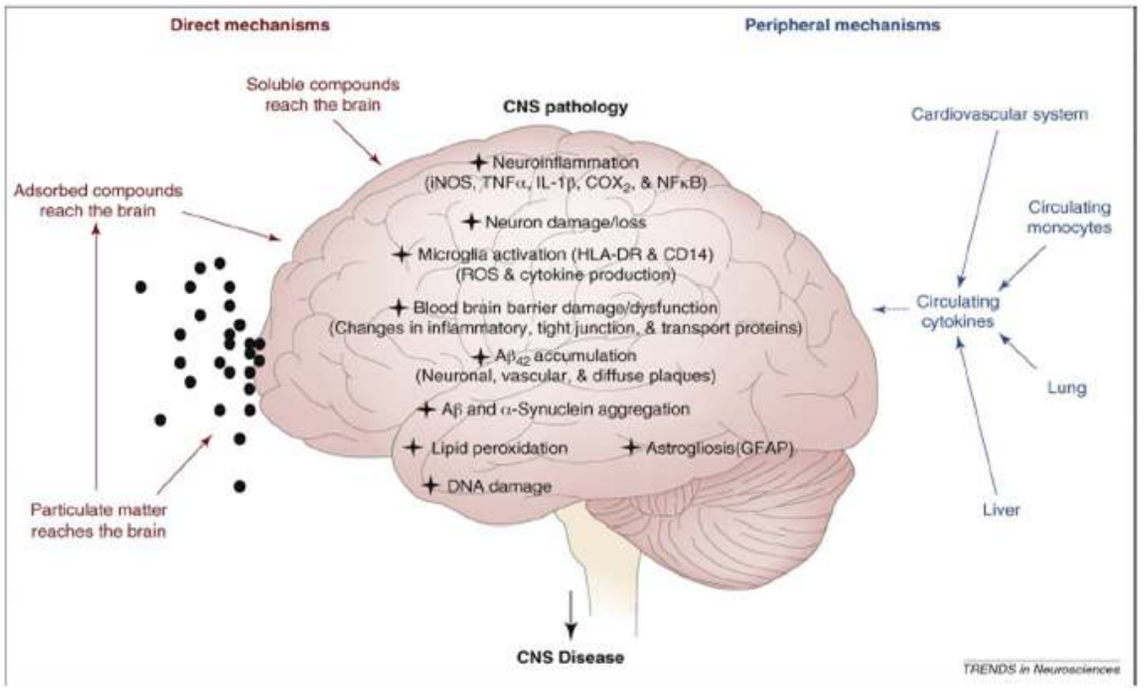
미세먼지는 심혈관 질환과도 관련성이 높다. 미국에서 2005년 발표된 연구는 798명 대상으로 임상시험을 통해 심혈관 질환의 주요 예측인자인 경동맥 내피 두께(CIMT)와 거주자의 미세먼지(PM-2.5) 농도간의 상관관계 분석을 통해 최초로 미세먼지가 동맥경화와 관련성이 있다는 것을 밝혔다. 이 연구에서는 미세먼지(PM-2.5)가 10㎍/㎥ 증가시 경동맥내피두께가 5.9%, 20㎍/㎥ 증가시 12.1% 증가한다고 발표했다.[158]



[그림 4.4] 미세먼지와 경동맥 내피 두께(CIMT) 간의 관계

156) Gauderman WJ et al. (2004), N Engl J Med, 351, 1057-1067.
157) Kulkarni N.(2006), N Engl J Med 6, 355, 21-30.
158) Kunzli et al. (2005), Ambient Air Pollution and Atherosclerosis in Los Angeles. Environ Health Perspectives, 113, 201-206.

미세먼지는 뇌질환과 연관성이 있다고 밝혀졌다. 크기가 매우 작은 미세먼지는 후각세포 신경경로를 따라 뇌에 도달한다고 알려져 있고 또 미세먼지에 의해 생성된 염증매개물질이 신경계에 도달한다. 따라서 뇌세포에 염증반응을 유발하며 혈액 뇌장벽(Blood brain barrier, BBB)에 손상을 일으키거나, 세포 내 DNA 손상을 일으킬 수 있는 것으로 확인되었다.[159]



[그림 4.5] 미세먼지로 인한 중추신경질환 발생 기전

이와 같이 미세먼지는 다양한 질병을 유발한다. 따라서 건강 피해를 줄이기 위해서는 미세먼지 노출을 최소화해야 한다. 미세먼지 노출을 줄이기 위해 정부 및 학계에서는 다양한 행동요령을 제시했다.

환경부에서는 고농도 미세먼지 발생시 7가지 행동요령(① 외출은 가급적 자제하기, ②외출시 보건용 마스크 착용하기, ③외출시 대기오염이 심한 곳은 피하고, 활동량 줄이기, ④외출 후 깨끗이 씻기, ⑤물과 비타민C가 풍부한 과일・야채 섭취하기, ⑥환기, 실내 물청소 등 실내공기질 관리하기, ⑦대기오염 유발행위 자제하기)을 제시하고 있다.[160]

159) Block ML, Calderon-Garciduenas. (2009), Air pollution: mechanisms of neuroinflammationand CNS disease. Trends in Neroscience; 32: 506-516.
160) 환경부, 고농도 미세먼지 7가지 대응요령, http://www.me.go.kr/cleanair/index.do

[표 4.2] 고농도 미세먼지 발생시 7가지 행동요령(환경부)

행동요령	상세
1) 외출은 가급적 자제하기	야외모임, 캠프, 스포츠 등 실외활동 최소화
2) 외출시 보건용 마스크 착용하기	보건용 마스크(KF80, KF94, KF99)의 올바른 사용법
3) 외출시 대기 오염이 심한 곳은 피하고, 활동량 줄이기	미세먼지 농도가 높은 도로변, 공사장 등에서 지체시간 줄이기 호흡량 증가로 미세먼지 흡입이 우려되는 격렬한 외부활동 줄이기
4) 외출 후 깨끗이 씻기	온몸을 구석구석 씻고, 특히 필수적으로 손,발,눈,코를 흐르는 물에 씻고 양치질하기
5) 물과 비타민C가 풍부한 과일·야채 섭취하기	노폐물 배출 효과가 있는 물, 항산화 효과가 있는 과일·야채 등 충분히 섭취하기
6) 환기, 실내 물청소 등 실내공기질 관리하기	실내·외 공기 오염도를 고려하여 적절한 환기 실시하기 실내 물걸레질 등 물청소 실시, 공기청정기 가동하기
7) 대기오염 유발행위 자제하기	자가용 운전 대신 대중교통 이용 등

고농도 미세먼지 발생 단계(1단계 고농도 발생, 2단계 비상저감조치, 3단계 비상저감조치 시행, 4단계 주의보 발령, 5단계 경보 발령, 6단계 주의보·경보 해제)별 행동요령을 아래와 같이 제시하고 있다.[161]

161) 환경부, 고노도 미세먼지 단계별 대응요령, http://www.me.go.kr/cleanair/index.do

[표 4.3] 고농도 미세먼지 발생시 단계별 행동요령(환경부)

<table>
<tr><th>단계별
행동요령</th><th colspan="2">상세</th></tr>
<tr><td>1단계
고농도
발생</td><td colspan="2">• 가급적 외출 자제하기
• 외출시 보건용 마스크 착용하기
• 외출시 대기오염이 심한 도로변, 공사장은 피하고 활동량 줄이기
• 대기오염 유발행위 자제하기(대중교통 이용 등)</td></tr>
<tr><td>2단계
비상저감조치</td><td colspan="2">• 에어코리아 우리동네대기질 모바일 앱 활용 미세먼지 농도 수시 확인
• TV방송(기상예보) 미세먼지 확인
• 차량 2부제 대비 교통수단 점검하기
• 보건용 마스크(KF80, KF94, KF99) 준비하기</td></tr>
<tr><td>3단계
비상저감조치
시행</td><td colspan="2">• 홀수날에는 홀수 차량만, 짝수날에는 짝수 차량만 운행
• 서울특별시 공공기관 주차장 폐쇄, 체육·문화·의료시설 주차장은 차량 2부제(인천, 경기 자율참여)</td></tr>
<tr><td>4단계
주의보
발령</td><td><민감계층>
• 실외수업(활동) 단축 또는 금지
• 이용시설 내 기계, 가구류 세척 등 식당 위생관리 강화</td><td rowspan="2"><일반국민>
• 가급적 외출 자제하기
• 외출시 보건용 마스크 착용하기
• 외출시 대기 오염이 심한 도로변, 공사장은 피하고 활동량 줄이기
• 대기오염 유발행위 자제하기(대중교통 이용 등)</td></tr>
<tr><td>5단계
경보
발령</td><td><민감계층>
• 등·하교(원) 시간 조정, 휴교(원) 조치 검토
• 질환자 파악 및 특별관리(진료, 조기귀가 등)</td></tr>
<tr><td>6단계
주의보·경보
해제</td><td colspan="2">• 외출 후 깨끗이 씻기
• 물과 비타민C가 풍부한 과일·야채 섭취하기
• 실내공기질 관리하기</td></tr>
</table>

환경부에서 제시하고 있는 행동요령에서 확인할 수 있는 사항은 고농도 지역은 피하고, 오염된 지역을 빠르게 개선하는 등 미세먼지 노출 최소화이다. 미세먼지 노출 최소화를 위하여 정부에서는 사람들이 공공으로 이용하는 실내 및 실외에 미세먼지 관리기준을 제시하고 있다.

「실내공기질 관리법 시행규칙」에서는 24개 다중이용시설을 수용체, 이용 특성, 시설특성 등을 고려해 4개(일반시설, 민감시설, 실내주차장, 공중이용시설) 시설로 구분하고 각각 다른 미세먼지 관리기준을 적용하고 있으며, 2019년 7월 1일부로 강화된 미세먼지 기준을 각 시설에 적용하고 있다.[162] 중요한 점은 강화된 관리 기준을 준수할 수 있는 시설 환경 조건이 갖추어져 있는지와, 지속적 자가 관리의 가능 여부라고 볼 수 있다. 이에 시설 관리자의 자가 관리 능력을 갖출 수 있는 정기적이고 효과적인 교육 제공과 함께, 실제 농도 개선이 미흡한 시설 대상으로 정부의 일부 지원의 필요성이 제기되고 있다.

[표 4.4] 「실내공기질 관리법 시행규칙」미세먼지 관리 기준

오염물질 항목 / 다중이용시설	<개정 2016. 12. 22.>		<개정 2018. 10. 18.> 2019년 7월 1일 시행	
	미세먼지 (PM-10) (㎍/㎥)	미세먼지 (PM-2.5) (㎍/㎥)	미세먼지 (PM-10) (㎍/㎥)	미세먼지 (PM-2.5) (㎍/㎥)
	유지기준	권고기준	유지기준	
가. 일반시설	150 이하	-	100 이하	50 이하
나. 민감시설	100 이하	70 이하	75 이하	35 이하
다. 실내주차장	200 이하	-	200 이하	-
라. 공중이용시설	200 이하	-	200 이하	-

가. 일반시설 : 지하역사, 지하도상가, 철도역사의 대합실, 여객자동차터미널의 대합실, 항만시설 중 대합실, 공항시설 중 여객터미널, 도서관·박물관 및 미술관, 대규모 점포, 장례식장, 영화상영관, 학원, 전시시설, 인터넷컴퓨터게임시설제공업의 영업시설, 목욕장업의 영업시설
나. 민감시설 : 의료기관, 산후조리원, 노인요양시설, 어린이집
라. 공중이용시설 : 실내 체육시설, 실내 공연장, 업무시설, 둘 이상의 용도에 사용되는 건축물

「환경정책기본법 시행령」에서는 대기환경기준과 통합대기환경지수 행동요령을 아래와 같이 제시하고 있다. 미세먼지(PM-10)는 연평균 50㎍/㎥ 이하, 24시간 평균 100㎍/㎥ 이하로 관리되고 있으며, 미세먼지(PM-2.5)는 연평균 15㎍/㎥ 이하, 24시간 평균 35㎍/㎥ 이하로 관리되고 있다.[163] 통합대기환경지수 미세먼지(PM-10, PM-2.5)에

162) 환경부, 「실내공기질 관리법 시행규칙」 제3조
163) 환경부, 「환경정책기본법 시행령」 제2조

대한 구간별 행동요령에서는 고농도 미세먼지 발생시 실외활동을 최대한 자제 또는 금지할 것을 권장하고 있다.[164]

[표 4.5] 「환경정책기본법 시행령」미세먼지 대기환경기준

구분	미세먼지 대기환경기준	
	연간 평균치 (㎍/㎥)	24시간 평균치 (㎍/㎥)
미세먼지 (PM-10)	50 이하	100 이하
미세먼지 (PM-2.5)	15 이하	35 이하

[표 4.6] 통합대기환경지수 미세먼지(PM-10, PM-2.5) 구간별 행동요령

지수 구간	지수구간에 따른 행동요령	
	일반인	민감군
좋음	-	-
보통	-	실외활동시 특별히 행동에 제약을 받을 필요는 없지만 몸상태에 따라 유의하여 활동
나쁨	장시간 또는 무리한 실외 활동 제한, 특히 눈이 아픈 증상이 있거나, 기침이나 목의 통증으로 불편한 사람은 실외활동을 피해야 함	장시간 또는 무리한 실외 활동 제한, 특히 천식을 앓고 있는 사람이 실외에 있는 경우 흡입기를 더 자주 사용할 필요가 있음
매우 나쁨	장시간 또는 무리한 실외 활동제한, 목의 통증과 기침 등의 증상이 있는 사람은 실외 활동을 피해야 함	가급적 실내 활동; 실외 활동시 의사와 상의
	실외에서의 모든 신체활동 금지	심장질환 혹은 폐질환이 있는 사람, 노인, 어린이는 실내에 있어야 하며 활동정도를 약하게 유지

164) 에어코리아, 통합환경대기지수 행동요령, https://www.airkorea.or.kr/web/pollutant?pMENU_NO=177

서울시 시민건강국에서는 미세먼지 예·경보 상황에 따라 취약계층 미세먼지 행동매뉴얼을 제공하고 있으며, 아래 표는 그 일부를 발췌하였다.[165]

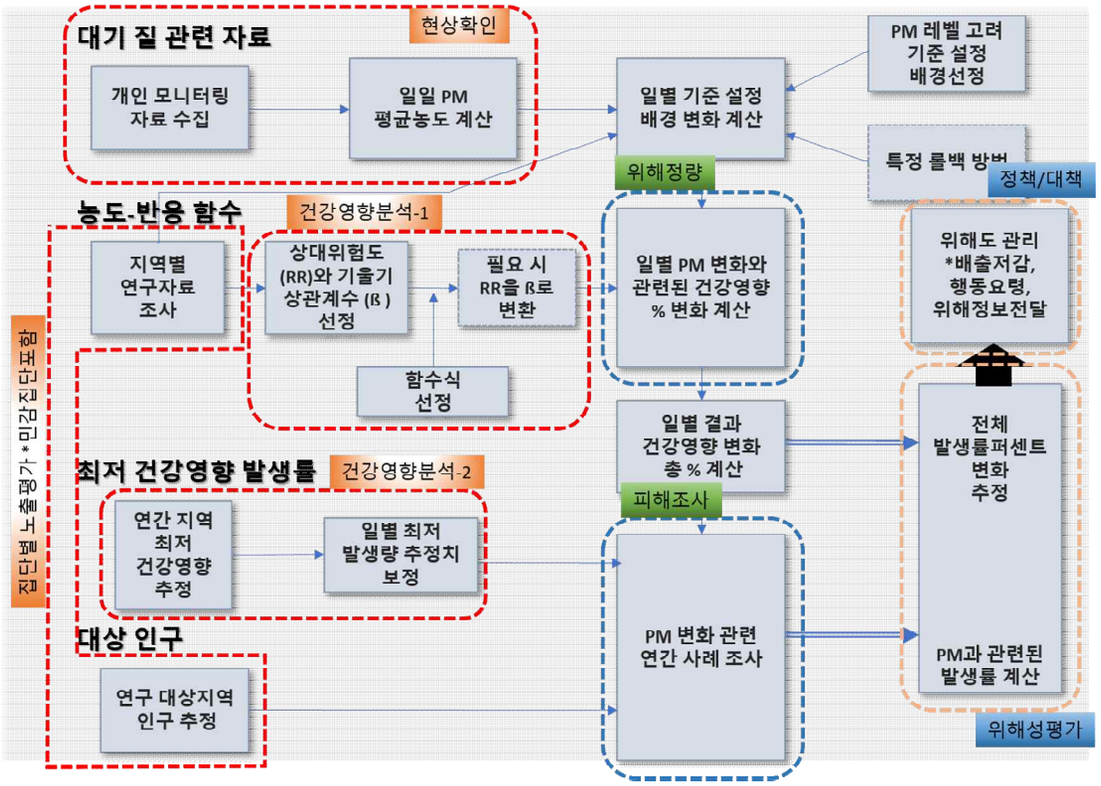
[표 4.7] 실내 및 실외 행동요령

실내	• 실내 공기를 청정하게 유지하도록 공기질 관리 →공기청정장치 가동, 청소기 대신 물걸레 청소, 공기정화 식물 등 • 음식조리 시 초미세먼지가 급증하므로 환풍기를 가동 • 몸속의 노폐물을 배출하도록 물을 충분히 마시기 • 항산화 작용이 있는 비타민이 풍부한 과일·야채 섭취하기 • 외출 후 깨끗이 씻기(온몸 특히 손발눈코를 흐르는 물에 씻고 양치질하기) • 호흡기심혈관 및 알레르기질환 관리 철저히 하기(치료약 복용 등 기존질환 관리)
실외	• 모자, 긴소매 옷, 보안경 등 착용 신체 노출부위 최소화 • 미세먼지를 방지하기 위한 보건용 마스크는 보호자의 지도하에 올바른 사용법에 따라 착용 • 교통량이 많은 도로, 공장 등 미세먼지 농도가 높은 지역 이동 자제 • 보호자 등 운전 시 창문을 닫고, 실내순환모드로 전환 • 눈이 가려울 땐 손으로 만지지 말고 물로 씻거나 점안제 사용 • 집에 들어가기 전에는 옷, 가방 등을 꼼꼼히 털어주기 • 미세먼지를 증가시키는 간접흡연 피하기

국내 미세먼지 관리기준 수준 설정은 미세먼지와 다양한 질병(호흡기, 심혈관 등) 및 사망 간의 인과관계를 규명한 다수의 역학연구를 체계적으로 고찰하고 국내 미세먼지 농도현황 등을 고려하여 설정하였다. 특히 실내 기준 중 어린이집, 노인요양시설 등과 같은 민감계층 시설은 수용체의 24시간 활동 특성을 고려하여 기준을 설정하였다.

그러나 그 외 다중이용시설 기준은 다양한 시설 이용자에 대한 행동 패턴이 고려되어 있지 않아, 기준이 현실을 충분히 반영하지 못 하는 부분이 존재한다. 이에 수용체별 노출량 평가를 통해 시설별, 공간별 노출량 기여도 분석 연구가 추가적으로 필요한 상황이다.

165) 서울시, 2017, 예·경보 단계별 건강취약계층 등 미세먼지 행동매뉴얼



[그림 4.6] 수용체 중심으로 접근하기 위한 단기노출연구

결국 미세먼지는 수용체 중심으로 접근하여 인체에 유해한 농도로 노출되는 것을 사전에 차단하여 국민건강을 보호할 수 있도록 관리되어야 한다.

2. 민감계층(영·유아, 어르신) 대책

미세먼지 관리의 주 대상은 민감계층이다. 영・유아 및 어린이는 면역체계가 완전히 발달하지 못하여, 피부, 호흡기와 같은 신체조직이 미세먼지에 민감하게 반응한다. 노인의 경우 약한 면역력, 폐기능, 심혈관 기능과 방어체계, 혹은 질병으로 진단되지는 않은 심혈관이나 폐의 문제로 인해 미세먼지에 취약하다.

특히 2017년 8월 기점으로 '고령화(aging) 사회'를 넘어 '고령(aged) 사회'를 맞이한 대한민국은 기대 수명이 늘어남에 따라 2020년 65세 이상 노인인구 비율은 15.7%, 2030년에는 24.3%, 2040년에는 32.3%에 도달할 것으로 예측된다. 이에 노인에 대한 미세먼지 관리는 매우 중요한 이슈로 부각된다.

영・유아, 어린이 및 노인을 대상으로한 국내 미세먼지 관련법을 살펴보면 환경부 「실내공기질 관리법」에서는 어린이집과 노인요양시설을 대상으로 미세먼지 유지기준과 권고기준을 제시하고 있다. 2016년 12월 22일에 개정된 노인요양시설 미세먼지(PM-10과 PM-2.5) 관리기준은 2019년 6월 30일까지 각 100㎍/㎥, 70㎍/㎥이며, 2019년 7월 1일부로 75㎍/㎥, 35㎍/㎥로 강화된다. 또한 권고 기준이었던 미세먼지(PM-2.5)는 유지기준으로 변경된다.[166]

[표 4.8] 환경부 -「실내공기질 관리법」 민감시설 미세먼지 관리 기준

오염물질 항목 / 다중이용시설	<개정 2016. 12. 22.>		<개정 2018. 10. 18.> 2019년 7월 1일 시행	
	미세먼지 (PM-10) (㎍/㎥)	미세먼지 (PM-2.5) (㎍/㎥)	미세먼지 (PM-10) (㎍/㎥)	미세먼지 (PM-2.5) (㎍/㎥)
	유지기준	권고기준	유지기준	
나. 민감시설(노인요양시설)	100 이하	70 이하	75 이하	35 이하

나. 민감시설 : 의료기관, 산후조리원, 노인요양시설, 어린이집

교육부의 「학교보건법 시행규칙」에 따른 공기 질 등의 유지・관리기준에서는 미세먼지 (PM-10)는 75㎍/㎥ 이하로, 미세먼지(PM-2.5)는 35㎍/㎥ 이하로 관리하고 있다.[167]

166) 환경부, 「실내공기질 관리법 시행규칙」 제3조

[표 4.9] 교육부 – 「학교보건법 시행규칙」미세먼지 유지기준

구분	미세먼지 유지기준 (㎍/㎥)	
미세먼지 (PM-10)	75	(모든 교실)
미세먼지 (PM-2.5)	35	(모든 교실)

2019년 2월 15일에 시행된 「미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법(약칭: 미세먼지법)」에서도 민감계층에 대한 미세먼지 관련 법을 명시하고 있다. 제22조 (미세먼지 집중관리구역의 지정 등)에 따르면 시·도지사, 시장·군수·구청장은 미세먼지 오염이 심각하다고 인정되는 지역 중 어린이·노인 등이 이용하는 시설이 집중된 지역을 미세먼지 집중관리구역(이하"집중관리구역")으로 지정할 수 있다. 이에 1) 「대기환경보전법」 제3조에 따른 대기오염도의 상시 측정, 2) 살수차· 진공청소차의 집중 운영, 3) 어린이 등 통학차량의 친환경차 전환, 4) 학교 등에 공기 정화시설 설치, 5) 수목 식재 및 공원 조성을 지원한다. 또한 제23조(취약계층의 보호)에서 정부는 어린이·노인 등 미세먼지로부터 취약한 계층(이하"취약계층")의 건강을 보호하기 위하여 일정 농도 이상 시 야외 단체활동 제한, 취약계층 활동공간 종사자에 대한 교육 등 취약계층 보호대책을 마련해야 한다.[168]

환경부와 보건복지부는 고농도 미세먼지 발생시 어린이집 및 노인요양시설 대응요령을 제시하고 있다. 평상시 시설 담당자는 고농도 미세먼지 발생시 대처방안을 숙지하고 있어야 하며, 어르신의 비상연락망을 구축해야 하고, 어르신 및 보호자 대상 대기오염 피해예방, 대응조치, 행동요령을 지도화해야 한다. 또한 보건용마스크(KF80, KF94, KF99), 상비약을 상시 비치해야 하고, 실내 미세먼지 유지기준을 준수하기 위한 노력이 필요하다. 고농도 미세먼지가 발생한 경우 시설 담당자는 어르신 및 어린이들을 대상으로 행동요령(외출자제, 외출시 마스크 착용, 도로변 이동 자재 등)을 교육 시켜야 한다. 주의보와 경보가 발령된 경우 시설 내 기계, 기구류 세척 등 식당 위생관리를 강화해야 하고, 질환자를 파악해야 한다.[169]

167) 교육부, 「학교보건법 시행규칙」 제3조제1항제3호의2관련
168) 환경부, 「미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법」
169) 환경부, 고농도 미세먼지 계층별 대응요령, http://www.me.go.kr/cleanair/index.do

[표 4.10] 환경부 – 고농도 미세먼지 발생시 어린이집 단계별 행동요령

단계별 행동요령	상세
평시	• 고농도 미세먼지 발생시 대처방안 숙지 • 미세먼지 문자알림 서비스 신청 • 보호자 비상연락망 구축 및 보호자 대상 피해 예방, 대응조치 지도 • 고농도 미세먼지 상황 대비 실외 활동 대처를 위한 사전 계획 마련 • 관심이 필요한 영·유아 관리대책 마련 • 보건용마스크(KF80, KF94, KF99), 상비약 비치 및 점검 • 실내 미세먼지 유지기준 준수 노력
1단계 고농도 예보	• 보호자 비상연락망, 안내문 등을 통한 예보상황 및 행동요령 공지 • 익일 예정된 실외활동에 대한 점검 • 미세먼지 예보 상황 및 농도변화 수시 확인
2단계 고농도 발생	• 시설담당자는 미세먼지 농도를 수시로 확인, 기관 내 상황 전파 • 영·유아 대상 행동요령 교육 및 실천 • 실외활동 자제/바깥공기 유입 차단 • 호흡기 질환 등 미세먼지 민감군 및 고위험군 영·유아 관리대책 이행 • 실내공기질 관리
3단계 주의보	• 실외활동 단축 또는 금지, 등·하원 시간 조정 등 실시 • 시설 내 기계, 기구류 세척 등 식당 위생관리 강화
4단계 경보	• 질환자 파악 및 특별관리
5단계 주의보, 경보 발령 해제	• 기관별 실내·외 청소 실시 • 미세먼지 농도가 낮은 시간에 도로변 외의 창문을 통한 환기 실시 • 환자 발생여부 파악, 휴식 또는 조기 귀가
6단계 조치결과 등 보고	• 어린이집은 조치결과 시·도 담당자에게 보고 • 보건복지부는 어린이집의 경보 조치 결과를 환경부에 보고

앞서 언급했듯이 국내 법·제도 및 대응요령에서 공통적으로 확인할 수 있는 사항은 미세먼지 노출의 최소화다. 미세먼지로부터 노출을 최소화해야 민감계층의 건강을 보호할 수 있기 때문이다. 그러나 미세먼지 관리기준이 강화되었음에도, 민감계층이 머무르고 있는 공간(개인 가정부터, 다중이용시설 및 공중이용시설을 포함한 모든 시설)의 미세먼지를 기준 이하로 관리할 수 있는 인프라 구축 부분에선 아직 의문점이 많으며, 실증 연구가 필요하다.

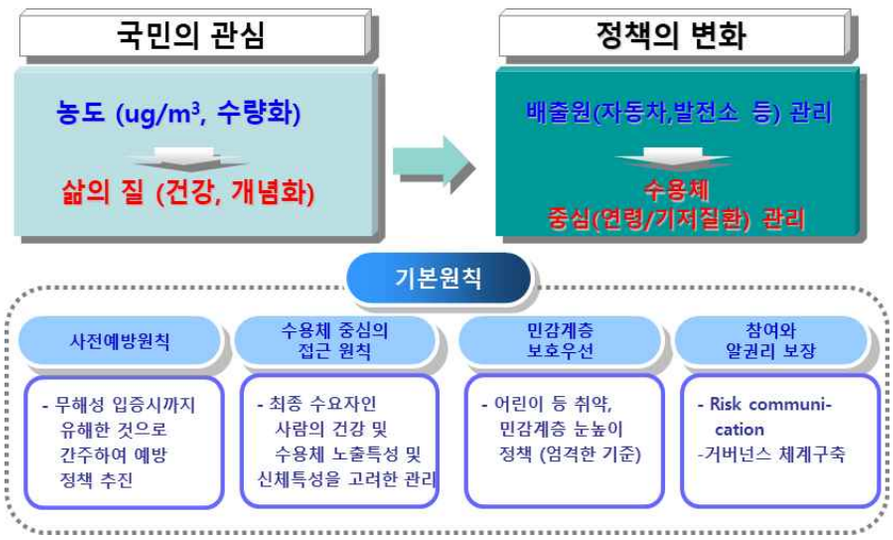
또한 미세먼지법을 통해 미세먼지 집중관리구역을 지정하더라도 국내 미세먼지 배출원 및 배출량이 명확하지 않고, 민감계층에 대한 객관적인 미세먼지 노출량 및 노출 기여도 평가가 부족하다. 게다가 관리주체가 범부처적이며 민감계층 시설 및 기관이 다양하기 때문에 그 실효성이 떨어질 수 밖에 없다.

[표 4.11] 민감계층 관리대책의 문제점 및 대책

문제점	대책
• 관리주체가 범부처적임 • 민감계층 시설 및 기관이 다양함 • 민감계층 노출 저감을 위해 관리할 상황이 다양함	• 효율적으로 대처할 수 있도록 명확한 지침이 필요

따라서 수용체 별로 학교, 병원 등 다양한 기관 및 시설이 대상이 되며, 이로 인해 민감계층 분야에 대해서는 범부처적으로 관리하고 있다. 하지만 시설에 따라 다른 법령을 근거로 설정된 미세먼지 농도기준과 부처별 대응매뉴얼은 현장에서는 미세먼지 관리 대책을 이행하는데 혼란을 주고 있다.

즉 민감계층 관리 대책은 인체위해성 관점에서 사전예방원칙, 수용체 중심의 접근원칙, 민감계층 보호우선, 참여와 알권리 보장 등 기본 원칙 아래에서 과학적 근거를 바탕으로 확고한 방향을 제시하여 현장에서 미세먼지 관리 대책을 실제로 이행할 수 있도록 지원해주어야 한다.



[그림 4.7] 민감계층을 위한 미세먼지 관리대책의 방향성

3. 근로자 대책

고용노동부「산업안전보건법 시행규칙」제5편 근로자의 보건관리 제1장 작업환경의 측정 제93조(작업환경측정 대상 작업장 등)에 따르면 고용노동부령으로 정하는 아래와 같은 작업환경 측정 대상 유해 인자에 노출되는 근로자가 있는 작업장을 대상으로 작업환경 측정을 수행할 수 있다.[170]

[표 4.12] 고용노동부 –「산업안전보건법」작업환경측정 대상 유해인자

구분	작업환경측정 대상 유해인자 중 분진 7종		
분진 (7종)	가. 광물성 분진 (Mineral dust)	1) 규산(Silica)	가) 석영(Quartz) 나) 크리스토발라이트(Cristobalite) 다) 트리디마이트(Trydimite)
		2) 규산염 (Silicates)	가) 운모(Mica) 나) 포틀랜드 시멘트(Potland cement) 다) 솝 스톤(Soap Stone) 라) 활석(Talc) 마) 흑연(Graphite)
		3) 그 밖의 광물성 분진(Particulate)	
	나. 곡물 분진(Grain dust)		
	다. 면 분진(Cotton dust)		
	라. 나무 분진 (Wood dust)	1) 연목(Soft Wood)	
		2) 강목(Hard wood)	
	마. 용접 흄(Welding fume)		
	바. 유리섬유(Glass fiber dust)		
	사. 석면분진(Asbestos dust)		

환경부「대기환경보전법 시행령」제44조 및「대기환경보전법 시행규칙」제57조에서는 아래와 같이 비산먼지 발생사업을 11개로 구분하고 있다. 옥외근로자가 주로 일하는 사업장에는 비산먼지가 많이 발생할 수 있다. 2013년부터 2015년까지 비산먼지 발생 신고사업장은 2015년 기준 건설업이 84%, 비금속물질 채취・ 제조・가공업에서 7% 정도 발생하는 것으로 확인된다. 비산먼지가 많이 발생한다는 것은 결국 공정 가운데 고농도의 먼지가 발생한다는 점이고, 1차 노출자인 근로자는 다량의 먼지에 노출될 수밖에 없는 환경이다.[171][172][173]

170) 고용노동부,「산업안전보건법 시행규칙」제93조
171) 환경부,「대기환경보전법 시행령」제44조

[표 4.13] 비산먼지 발생사업 및 신고사업장 현황('15)

비산먼지 발생사업

1. 시멘트, 석회 관련 제품 제조·가공업
2. 비금속물질 채취·제조·가공업
3. 1차 금속 제조업
4. 비료, 사료제품 제조업
5. 건설업(지반 조성공사, 건축물 축조 및 토목공사, 조경공사로 한정한다)
6. 시멘트, 석탄, 토사, 사료, 곡물 및 고철의 운송업
7. 운송장비 제조업
8. 저탄시설의 설치가 필요한 사업
9. 고철, 곡물, 사료, 목재 및 광석의 하역업 또는 보관업
10. 금속제품의 제조업 및 가공업
11. 폐기물 매립시설 설치·운영 사업

사업 구분	계	시멘트, 석회 관련 제품 제조·가공업	비금속 물질 채취·제조·가공업	1차 금속 제조업	비료, 사료제품 제조업	건설업 (공사장)	운송 장비 제조업	저탄 시설	고철·곡물·사료 등 하역업	금속 제품 제조·가공업
2015	40,613 (100%)	1,621 (4%)	2,693 (7%)	392 (1%)	422 (1%)	34,175 (84%)	323 (1%)	62 (0%)	122 (0%)	803 (2%)

또한 환경부 「대기환경보전법 시행규칙」제57조에서는 비산먼지 배출공정에 대해 언급하고 있다. 비산먼지가 배출되는 분야도 다양하지만, 여러 공정에서 비산먼지가 발생하고 있어 옥외 및 야외 근로자의 건강을 보호하기 위해선 분야별, 공정별 특성이 고려된 맞춤형 대책이 제시되어야 한다.[174]

172) 환경부, 「대기환경보전법 시행규칙」 제57조
173) 환경부, 환경통계포털, '비산먼지발생 신고사업장 현황' 자료
174) 환경부, 「대기환경보전법 시행규칙」 제57조

[표 4.14] 비산먼지 배출공정

비산먼지 발생 억제시설 설치 및 필요한 조치에 관한 기준		비산먼지 발생 억제시설 설치 및 필요한 조치에 관한 엄격한 기준
(1) 야적 (2) 싣기 및 내리기 (3) 수송 (4) 이송 (5) 채광 및 채취	(6) 조쇄 및 분쇄 (7) 야외 절단 (8) 야외 탈청 (9) 야외 연마 (10) 야외 도장 (11) 그 밖의 공정	(1) 야적 (2) 싣기 및 내리기 (3) 수송

옥외작업장에서 일하는 근로자는 대기오염 등으로 인하여 높은 위험군(high risk group)임이 많은 연구자들을 통해 입증되었다. 이들 근로자들은 실외에서 격렬한 활동을 하면서 많은 시간을 보내게 되는데 이때 제대로 된 보호장비 착용 없는 환경에서 근무할 경우 다량의 미세먼지에 노출될 수밖에 없다. 또한 공사기계는 대부분 경유차량이기 때문에 경유에서 배출되는 오염물질에 노출될 경우 건강영향의 피해는 가중될 수 있다.

따라서 작업환경의 개선이 절대적으로 필요하다. 근무 지역 중 교통량이 많거나 중장비 사용 지역에서는 근무하지 않는 것이 좋으며, 중장비를 사용하지 않을 때는 가동을 멈추고 배출량을 최소로 할 수 있는 기술을 적용해야 한다.

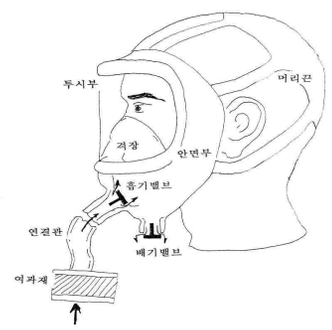
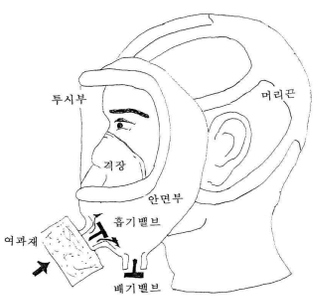
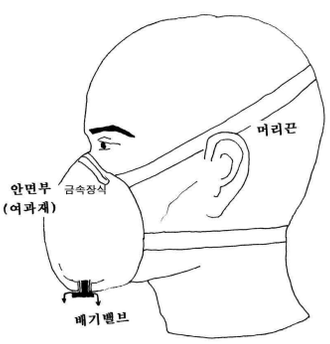
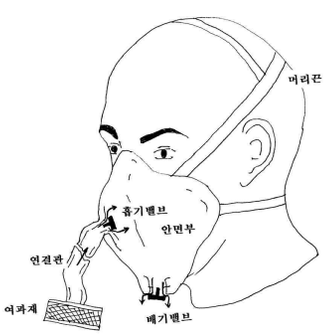
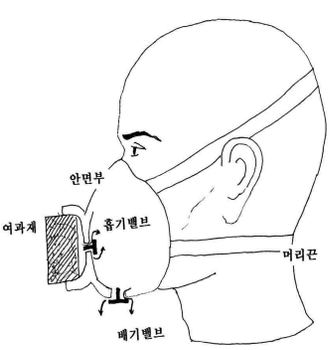
우선 노출을 최소화 할 수 있는 방법으로 보호구 착용을 들 수 있다. 개인보호구는 작업환경에서 유해물질의 노출을 완전히 제거하지 못하더라도 가장 효과적인 방법 중 하나이다. 개인 보호구의 규격, 성능, 착용 및 관리방법 등은 다음과 같은 고용노동부 고시나 안전보건공단 KOSHA GUIDE 등으로 명시하고 있다.

[표 4.15] 개인보호구 규격, 성능, 착용 및 관리방법 고시

보호구 의무안전인증 고시(고용노동부고시 제2012-83호) KOSHA GUIDE G-12-2013「개인보호구의 사용 및 관리에 관한 기술지침」 KOSHA GUIDE H-82-2012「호흡보호구의 사용지침」 KOSHA GUIDE G-39-2012「송기식 마스크의 사용에 관한 기술지침」 KOSHA GUIDE H-150-2014「화학물질 취급 근로자의 호흡보호구 선정 기술지침」

"호흡보호구"는 산소결핍 또는 유해물질로 오염된 공기 등을 흡입함으로써 발생할 수 있는 건강장해를 예방하기 위하여 고안된 보호구로, 흡입공기 중 입자상(분진, 흄, 미스트, 스프레이 등) 유해물질을 막아주기 위해 착용하는 호흡보호구는 "방진마스크"라 하며 흡입공기 중 가스/증기상 유해물질을 막아주기 위해 착용하는 "방독마스크"로 구분할 수 있다. 분진에 노출될 수 있는 작업환경인 옥외작업장에서 일하는 근로자들이 착용해야 할 호흡보호구는 방진마스크이며 아래 그림과 같이 오염공기가 호흡기에 도달하기 전에 방진필터 또는 정화통을 통과시켜 제거하는 공기정화식인 안면부 여과식 방진마스크를 포함한다.[175]

[표 4.16] 방진마스크 형태

<table>
<tr><th rowspan="2">종류</th><th colspan="2">분리식</th><th rowspan="2">안면부여과식</th></tr>
<tr><th>격리식</th><th>직결식</th></tr>
<tr><td>형태</td><td><전면형>
 
</td><td><전면형>
 
</td><td rowspan="2"><반면형>
 
</td></tr>
<tr><td><반면형>
 
</td><td><반면형>
 
</td></tr>
<tr><td>사용조건</td><td colspan="3">산소농도 18% 이상인 장소에서 사용하여야 한다.</td></tr>
</table>

작업장에서 분진이 발생될 때 적합한 보호구의 등급은 아래와 같이 고용노동부 「보호구 의무안전 인증고시」에 명시된 등급 기준을 확인하고 사용장소에 맞게 사용해야 한다.[176]

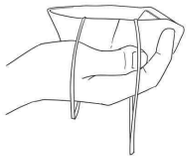
175) 고용노동부, 「보호구 안전인증 고시」 제12조 방진마스크 성능기준

[표 4.17] 방진마스크 등급

등급	특급	1급	2급
사용 장소	• 베릴륨 등과 같이 독성이 강한 물질들을 함유한 분진 등 발생장소	• 특급마스크 착용장소를 제외한 분진 등 발생장소 • 금속흄 등과 같이 열적으로 생기는 분진 등 발생장소 • 기계적으로 생기는 분진 등 발생장소(규소 등과 같이 2급 방진마스크를 착용하여도 무방한 경우는 제외한다)	• 특급 및 1급 마스크 착용장소를 제외한 분진 등 발생장소
	배기밸브가 없는 안면부여과식 마스크는 특급 및 1급 장소에 사용해서는 안 된다.		

방진마스크 최대 효과를 얻기 위해선 근로자들의 올바른 착용은 필수적이다. 한국산업안전보건공단에서는 호흡보호구의 올바른 착용방법에 대한 지침을 제공하고 있다.[177]

[표 4.18] 컵식 마스크 착용방법

		
1. 그림과 같이 밴드를 밑으로 늘어뜨리고 밀착 부분이 얼굴 부분에 오도록 가볍게 잡아준다	2. 마스크가 코와 턱을 감싸도록 얼굴과 맞춰준다	3. 한 손으로 마스크를 잡고 다른 손으로 마스크 위의 끈을 머리의 상단에 고정시킨다
4. 마스크 아래 끈을 목 뒤에 고정시킨다	5. 양손 손가락으로 클립부분을 눌러서 코와 밀착이 잘 되도록 조절한다	6. 양손으로 마스크 전체를 감싸안고 밀착도 자가 점검을 실시하여 조절한다

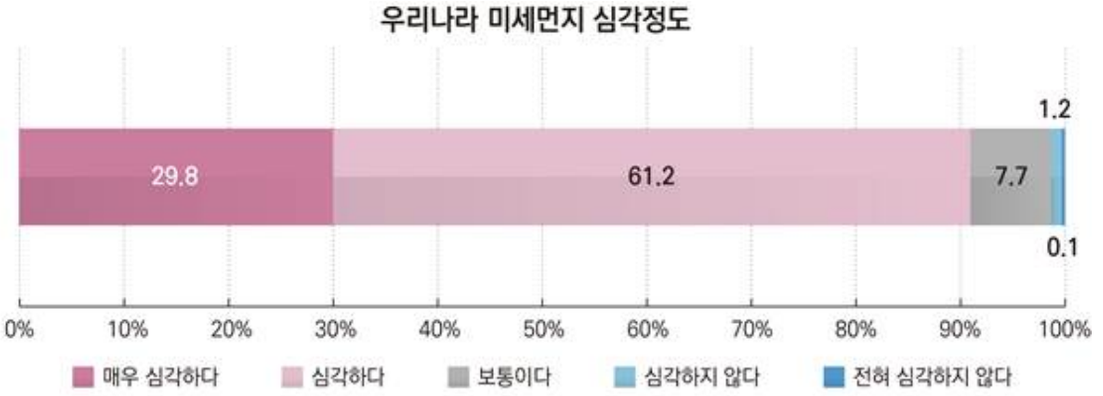
176) 고용노동부, 「보호구 안전인증 고시」 제12조 방진마스크 성능기준
177) 한국산업안전보건공단, KOSHA GUIDE H-159-2014, '호흡보호구의 올바른 착용방법 및 관리에 관한 지침'

그 외에도 근로자들을 대상으로한 미세먼지 노출 저감 대책이 존재하지만, 그 실효성에 대해서는 아직까지 미지수라고 볼 수 있다. 분야별, 작업별 근로자의 미세먼지 노출 정도는 다르며 표준화할 수 있는 미세먼지 노출량을 확인한 연구가 아직 없기 때문이다. 업종에 따라 발생하는 미세먼지의 독성은 다르기 때문에 정밀한 성분 분석을 통한 업종별/작업별 위해도를 산출하고, 이를 토대로 세밀한 관리원칙과 기준을 정립해야 한다.

다만, 농어업인 등은 농어업 작업이 대부분 야외에서 이뤄지고 있어 미세먼지에 노출될 빈도가 매우 높고, 생산활동에 제약을 많이 받는 것으로 조사되어 취약계층의 범위를 '옥외근로자'에서 '옥외작업자'로 변경하여 근로자가 아니면서 농어업 작업 등 옥외(야외)에서 장기간 활동이 필요한 사람들도 취약계층 범주에 포함되도록 현재 미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법 시행령 제14조2를 개정 추진 중으로 '19.9월 시행될 예정이다.

4. 국민불안 해소

미세먼지가 인체에 악영향을 끼친다는 연구결과가 잇따라 발표되는 가운데 미세먼지로 인한 국민의 불안감은 해마다 증폭되고 있다. 환경부는 2018년 8월 31일부터 9월 2일까지 만 19세 이상 전국 성인 남·녀 1,091명을 대상으로 미세먼지에 대한 인식도를 조사하였다. 우리나라 미세먼지 심각 정도를 조사한 결과, 매우 심각함 29.8%, 심각함 61.2%, 보통 7.7%, 심각하지 않음 1.2%, 전혀 심각하지 않음 0.1%로 응답자 대다수(91%)가 국내 미세먼지 오염도가 심각하다고 밝혔다.[178]

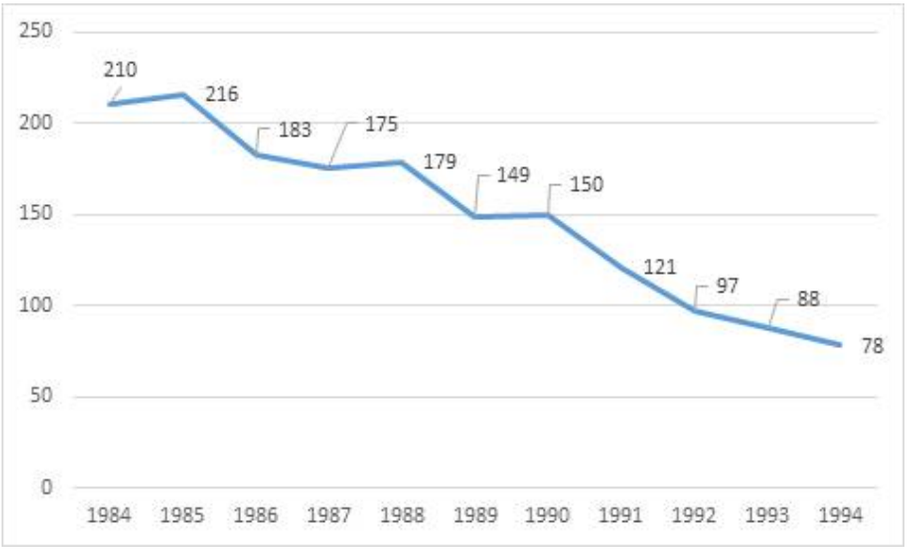


[그림 4.8] 환경부 – 우리나라 미세먼지 심각정도 설문조사 결과

과거부터 미세먼지 개선에 대한 국민의 요구는 있었으나, 최근에는 삶의 질이 개선되고 정보 공유의 속도가 빠르다보니 국민들은 미세먼지에 대한 체감이 더 큰 것으로 사료된다.

그러나 국내 미세먼지 농도는 과거에 비해 많이 개선되었다. 환경부에서 제시한 자료에 따르면 1984년부터 1994년까지 서울시 연도별 총먼지(TSP)에 대한 절대농도를 확인한 결과, 1984년 210㎍/㎥였던 총먼지 농도는 1994년 78㎍/㎥로 10년 만에 3배 정도 감소되었다.

178) 환경부 보도자료 (2018.10.12.)



[그림 4.9] 환경부 - 연도별 서울 총먼지(TSP) 농도, ㎍/㎥

2000년부터 2017년까지 전국 미세먼지(PM-10)의 농도를 확인한 결과, 2000년 56㎍/㎥에서 2017년 45㎍/㎥으로 개선된 것을 알 수 있다. 개선 폭은 크지는 않으나, 해가 거듭될수록 국내 미세먼지가 개선되고 있음은 분명한 사실이다.[179]

[그림 4.10] 연도별 PM-10 평균 농도, ㎍/㎥ ('00 ~'17)

30년 전인 '88 서울올림픽'을 앞둔 서울의 대기오염은 전 세계 도시 중에서 몇 손가락 안에 들었다. 그 당시 환경청은 '비산먼지 저감대책'을 통해 올림픽 기간 중 먼지를 많이 배출하는 공장 1,000여개를 특별 지도하고, 생활먼지를 줄이기 위해 목욕탕까지 영업을 중지했었다. 이런 노력을 시작으로 정부와 지자체가 배출원 및 배출량 관리를 한 결과 국내 미세먼지가 많이 개선된 것이다.

179) 에어코리아, 대기환경 연간보고서, https://www.airkorea.or.kr/web/detailViewDown?pMENU_NO=125

국내 평균 농도가 개선되고 있는 여러 이유 중에 하나는 정부와 학계의 노력이라고 볼 수 있다. 물론 제시된 정책의 실효성 부분에선 국민의 불만을 일으켰다. 이에 국회에서는 국내 미세먼지의 총체적 해결을 위해 2019년 3월 13일 미세먼지 관련 법안 8개를 통과시켰다.

[표 4.19] 미세먼지 관련 법안 8개

1. 재난 및 안전관리기본법 개정안
2. 액화석유가스(LPG) 안전관리사업법 개정
3. 학교보건법 개정
4. 미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법 개정
5. 대기관리권역의 대기환경개선에 관한 특별법 제정
6. 대기환경보전법 개정
7. 실내공기질관리법 개정
8. 항만대기질특별법 제정

「재난 및 안전관리기본법」개정안에서는 미세먼지를 사회 재난 범주에 포함하였다. 따라서 앞으로 미세먼지 해결에 추가경정 예산이 투입될 수 있으며, 재난 시 사용할 수 있는 특별교부금도 미세먼지 저감에 쓸 수 있게 되었다. 행정안전부는 이 법에 근거해 향후 고농도 미세먼지 발생 시 민간 차량 2부제 도입도 추진하기로 하였다.

「액화석유가스(LPG) 안전관리사업법」 개정안을 통해 택시, 렌터카, 장애인 차량에만 허용되었던 LPG차량을 일반인도 구매할 수 있게 되었다.

「학교보건법」이 개정되면서 학교교실에 미세먼지 측정기와 공기정화기 설치가 의무화되었으며, 필요한 비용은 국가와 지방자치단체가 분담하기로 하였다.

「미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법」 개정안은 지난해(2018년) 8월 제정돼 지난달 15일 시행됐으며, 시행되자마자 개정되어 국가 미세먼지 정보센터의 설치・운영 규정이 현행 임의 규정에서 강행 규정으로 변경되었다. 정보센터는 미세먼지 배출원 파악과 배출량 산정 방법 개발, 배출원별 비중(기여도) 분석, 비상저감조치 등 미세먼지 관련 정책 효과 분석, 배출량 산정 등을 맡게 되었으며, 조사・연구・교육과 기술개발 등의 업무를 수행하는 기관・단체를 '미세먼지 연구・관리센터'로 지정하고, 이 비용의 일부 또는 전부를 지원할 수 있게 되었다.

「대기관리권역의 대기환경개선에 관한 특별법」 제정안을 통해 대기오염이 심각하다고 인정되는 지역이나 인접 지역 등을 대기관리권역으로 지정 및 환경 개선을 추진할 수 있게 되었다. 대기관리권역 내에서는 대기오염물질 배출 사업장을 대상으로 오염물질 총량관리를 시행할 예정이며, 배출 사업장에 자동측정기를 부착하고, 이에 대한 비용을 지원할 수 있게 되었다. 또한 노후 경유차에 대해서는 배출가스 저감장치 부착 등을 하도록 하고, 저감 장치를 부착하지 않은 차량에 대해서는 지방자치단체 조례로 운행을 제한하게 되었다.

「대기환경보전법」 개정안에서는 노후 건설 기계에 대해 저공해 조치를 명령할 수 있게 되고, 저공해 조치 때 예산을 지원할 수 있다. 발전소·사업장 등 미세먼지 대량배출 사업장에 설치된 굴뚝자동측정기기(TMS) 측정 결과는 실시간으로 공개되며, 자동차 배출가스 관련 부품을 떼내거나 훼손하는 행위, 설정을 임의 변경하거나 촉매제(요소수 등)를 사용하지 않는 행위를 금지하고, 위반 시 1년 이하의 징역이나 1,000만원 이하의 벌금을 부과할 수 있게 되었다.

「실내공기질관리법」 개정안에서는 2021년 3월 31일까지 지하역사에 실내공기질 측정기기 설치를 완료하고, 다중이용시설에서 측정한 실내공기질 측정기록의 보존기간이 3년에서 10년으로 연장되었다. 어린이집과 노인요양시설 등 민감계층이 이용하는 다중이용시설에는 실내공기질 유지기준이 강화되었고, 가정어린이집과 협동어린이집, 실내어린이 놀이시설에도 이 법이 적용되었다.

「항만대기질특별법」 제정안에서는 선박 배출 규제 해역에서의 황 함류량 기준을 초과한 선박 연료유를 사용할 수 없게 제한하였고, 항만 하역 장비의 배출가스 허용기준을 신설하였으며, 화물운송 항만사업자는 비산먼지 방제시설을 설치해야 한다. 또한 해양수산부 장관과 환경부 장관이 공동으로 항만지역의 대기질 현황 및 변화에 대한 실태조사를 실시하고, 항만지역 등의 대기질 개선을 위해 5년마다 '대기질 개선 종합계획'을 수립해야 한다.

정부에서는 국내 미세먼지 개선을 위해 8개 법을 일괄적으로 수정하였다. 그 실효성에 대해서는 100% 좋다고 볼 수는 없겠으나, 미세먼지를 해결하기 위한 다양한 노력을 기울이고 있다는 부분에서는 충분히 고무적이라고 볼 수 있다.

5. 건강보호와 관련된 주요 이슈

1) 초미세먼지(PM-2.5) 중심의 관리 전환 필요성

우리나라는 초미세먼지(PM-2.5)에 대한 대기환경 기준이 2015년에 법제화되어 비로소 국민건강에 기반한 정책수립을 위한 측정과 연구가 가능해졌다. 우리가 미세먼지라고 명명한 PM-10(크기가 10마이크론 이하의 먼지)에는 PM-2.5도 포함되어 있지만 흙이나 식물에서 유래하는 크기의 먼지를 많이 포함하고 있어 건강영향을 대변할 수 있는 지표로는 적절하지 않다.

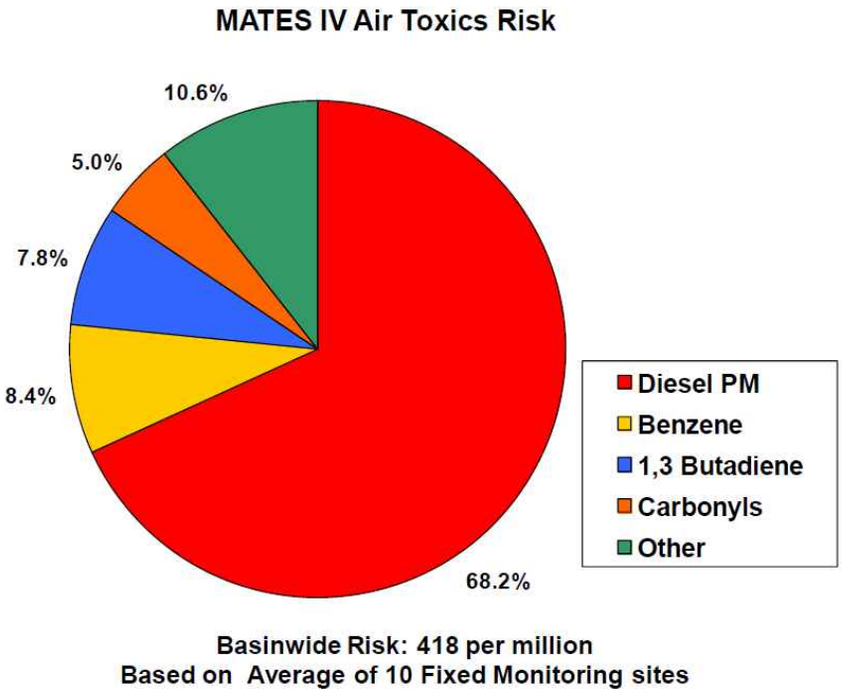
또한 미세먼지의 원인을 파악할 때도 초미세먼지를 중심에 놓고 이에 기여하는 원인을, 배출자료와 측정자료 그리고 대기 중 2차 생성연구 등을 통하여 진행할 때, 자연 유래가 아닌 연소과정에서 발생하는 크기와 종류를 적합하게 추계할 수 있다. 따라서 미세먼지 관련 대책은 연소과정에서 생성되고 인체 유해성이 큰 초미세먼지 즉, PM-2.5를 기본으로 수립해야 한다.

결론적으로 초미세먼지의 원인, 배출량, 대기 중 변환을 규명하고 궁극적으로 인체 노출로 인한 건강의 위험을 평가하여 국민건강 위험을 최소화할 수 있는 정책의 우선순위를 정하여 실행에 옮기고 실행 후 건강 이득에 대한 평가로 이어질 수 있어야 한다. 결국 미세먼지를 줄이는 다양한 투자로 인하여 국민의 건강이득이 실질적으로 얻어 질 수 있음을 평가하여 지속가능한 정책으로 정착시켜야 하며 이러한 모든 과정을 논리적으로 포함하는 과학, 기술, 보건, 경제 분야의 융합적인 평가와 분석을 “미세먼지의 위험분석”으로 발전시켜 나가야 한다.

2) 미세먼지와 경유자동차

미세먼지 배출원 및 배출량과 함께 강조되어야 할 것은 경유차를 포함한 자동차 배기가스 관리다. 우리나라는 현재 2,300만 대가 넘는 자동차가 운행되고 있는 나라이고, 매해 거의 수십만 대의 자동차가 증가하는 추세이며 이중 절반 이상이 경유차량의 증가로 확인되고 있다. 2019년 3월 국토교통부 통계자료를 기준으로 국내 경유차량은 9,967,516대로 전체의 42.7%를 차지했다. 경유차가 문제가 되는 이유는 경유차에서 발생하는 DPM(diesel particulate matter)[180]의 위해성이 압도적으로 높기 때문이다.[181]

180) 경유 배기가스 입자, 경유 입자상물질, 디젤입자 등으로 불림.
181) South Coast Air Quality Management District (2015), Multiple Air Toxics Exposure Study in the South Coast Air Basin.



[그림 4.11] 대기 독성물질 노출연구(MATES IV) – 경유 배기가스 입자(DPM)의 위해성

주: SCAQMD (2015)

반면에 경유차의 문제점이나 배기가스의 건강피해 등의 요인들은 차종선택의 근거로 작용하지 못하고 있는 실정이다. 우리가 타고 다니는 자동차의 배기가스는 WHO의 구분으로 발암물질에 해당한다. 휘발유 배기가스는 2B등급의 동물발암물질이고, 경유차의 배기가스는 1등급의 인체발암물질로 구분하여 제시하고 있다. 결국 자동차 내연기관으로부터 발생하는 배기가스는 우리에게 치명적인 피해를 일으킬 수 있는 대표적인 유해물질이며, 배기가스의 성분 중 특히 먼지가 바로 건강영향의 주범인 것이다. 전 세계적으로 대부분의 국가에서 자동차 배기가스의 상태를 법으로 규제하고 있는 실정이다. 우리나라는 유럽의 유로 6 등을 근간삼아 경유차 배출물질 및 양을 관리하고 있고 여기에 먼지 개수농도 관리기준은 1km 주행 시 6천억(6×10E11)개로 관리하고 있다. 이는 우리가 일반적으로 접하는 먼지의 기준인 무게기준과는 상이한 관리기준이라고 할 수 있다.

경유차 등에서 배출되는 배기가스 중 먼지는 굉장히 작아서 미세먼지의 무게에는 크게 영향을 미치지 않으나, 반면 자동차 선진국에서는 개수라는 지표를 중심으로 활발하게 연구가 진행하고 있다. 현재 개수농도와 건강영향의 인과관계를 살펴본 연구로 Henning 외(2018년)는 독일 Ruhr 지역에서 급성피해로 입경사이즈 100~250㎛의 미세먼지가 903.2개씩 증가할 때마다 일반사망이 1.12%, 심혈관 사망이 1.63%

증가한다는 연구 결과를 발표한 적이 있다.[182] Samet 외(2009년)는 극미세먼지 노출에 따른 혈전증이나 혈액응고에 관한 연구를 진행하기도 하였다.[183] 또 극미세입자의 개수농도 증가에 따른 심혈관질환과 허혈성심질환의 사망률증가 연구 등이 진행되고 있다.

경유차 미세먼지를 관리하기 위하여 우리나라는 고농도 미세먼지 발생 시 배출가스 5등급 경유차 운행 제한, 친환경차 구매 비율 확대, 노후경유차 폐차에 따른 보조금 지원 등 다양한 정책안을 제안하고 있다. 그럼에도 불구하고 경유자동차의 관리 원칙을 명확히 정하지 못하고 있다. 계속해서 경유차는 증가하고 있고 국민들의 미세먼지에 대한 관심은 식지 않고 있어 정부로서도 국민의 눈높이에 맞는 자동차 정책을 추진해야할 때이다.

앞으로도 우리나라의 자동차 증가는 지속될 것이다. 이중 경유차의 증가세가 꺾이지 않는다면 자동차 도로와 근접한 생활권을 갖고 있는 많은 사람들 대상으로 미세먼지로 인한 건강피해가 늘어만 갈 가능성이 크다고 해야 할 것이다. 향후 담배와 같이 경유차와의 소송도 곧 벌어질 현안일 것이다. 정부는 미세먼지의 효과적 관리를 위해서 경유차의 운영에 대한 안을 빨리 결정하여 자동차 제조사들과의 적절한 타협안을 만들어 우리의 생활권 안의 미세먼지 발생원 관리를 시작하여야 할 것이다.

3) 미세먼지와 마스크

또 하나 마스크에 대해서 언급하고자 한다. 미세먼지로 인해 마스크를 착용하는 사람들을 많이 보게 된다. 마스크는 1차적으로 미세먼지를 걸러주는 역할을 하는데 효과적이다. 단, 제대로 착용했을 때만 가능하다. 가장 먼저, 구입하려는 마스크가 식품의약품안전처에서 인증하는 제품인지 확인해야 한다. 그리고 'KF94', 'KF99'와 같은 문자가 쓰여 있는지 봐야 한다. KF는 'Korea Filter'의 줄임말로, 국내 식품의약품안전처가 인증하는 입자 차단 성능을 의미한다. 'KF94', 'KF99'는 평균 0.4㎛ 크기의 먼지 입자를 각각 94%, 99% 이상 걸러낸다는 뜻이다. 그러나 무조건 수치가 큰 마스크를 고집한다고 해서 좋은 것만은 아니다. 미세먼지 차단 성능이 뛰어나면, 호흡이 어렵다는 단점이 있다. 따라서 미세먼지 수준과 자신의 호흡량을 고려해 적절한 제품을 선택하는 것이 좋다. 특히 노인이나 유아, 환자의 경우에는 주의해야 한다.

182) Hennig, F. et al. (2018), Ultrafine and fine particle number and surface area concentrations and daily cause-specific mortality in the Ruhr Area, Germany, 2009-2014, Environmental health perspectives, 126(2), 027008.
183) Samet, J. M. et al. (2009), Concentrated ambient ultrafine particle exposure induces cardiac changes in young healthy volunteers. American journal of respiratory and critical care medicine, 179(11), 1034-1042.

4) 미세먼지와 환기

마지막으로 언급하고 싶은 것은 올바른 환기의 중요성이다. 실외 미세먼지가 청정한 날에는 자연환기에 대한 염려가 없다. 그러나 실외 고농도 미세먼지가 발생하였을 때 사람들은 자연환기보단 공기정화장치(공기청정기 등)를 활용한다. 공기정화장치는 분명 미세먼지 제거에 도움이 된다. 단, 공기정화장치의 장단점을 이해하고 바르게 사용해야 한다. 한국소비자원에 따르면 공기청정기는 사용공간의 130% 정도를 적정용량으로 제안하였다.[184] 그러나 어린이집과 같이 재실인원이 많은 공간은 150%까지(공기청정기 2대) 사용하는 것이 효과적이다. 공기청정기 흡입구에 방해되는 것이 없어야 공기의 흐름이 원활하여 효과적이며, 필터는 주기적으로 관리해야 필터 부하가 걸리지 않는다. 실내에서 요리하는 경우에는 공기청정기만으로는 발생하는 미세먼지를 제거하기 어렵다. 이런 경우 요리 전부터 후드장치와 공기청정기를 가동해야 하고, 요리가 끝난 뒤에도 가동해야 한다. 아무리 실외 고농도 미세먼지가 발생하더라도, 실내에서 요리할 때에는 실내 미세먼지 농도가 훨씬 높다. 따라서 요리할 때 만큼은 창문을 열고 자연환기를 수행해야 미세먼지 노출을 최소화할 수 있다.[185]

고농도 미세먼지 발생시 창문을 계속 닫은 상태로 공기청정기만 가동하면 과연 안전하다고 볼 수 있을까? 미세먼지는 분명 해결할 수 있다. 그러나 실내에서는 미세먼지 외에도 다양한 가스상 오염물질이 공존해 있으며, 공기청정기는 가스상 오염물질을 해결할 능력이 부족하기 때문에 자연환기가 필수적이다. 따라서 정기적으로 3~5분 정도 짧은 자연환기를 수행해야 하며, 창문을 닫은 후에는 공기청정기를 가동해 실내로 유입된 미세먼지를 제거해야 한다.

184) 한국소비자원 보도자료(2016.11.28.)
185) 환경부 (2019), “실내공기 제대로 알기 100문 100답”

제4장 요약

■ 초미세먼지(PM-2.5) 중심의 관리 전환 필요성

- 우리가 미세먼지라고 명명한 PM-10(크기가 10마이크론 이하의 먼지)에는 PM-2.5도 포함되어 있지만, 흙이나 식물에서 유래하는 크기의 먼지를 많이 포함하고 있어 건강영향을 대변할 수 있는 지표로는 적절하지 않으며, 연소과정에서 생성되고 인체 유해성이 큰 초미세먼지 즉, PM-2.5를 기본으로 미세먼지 관리대책을 수립해야 한다.

■ 미세먼지와 경유자동차

- 경유차에서 발생하는 DPM(디젤입자, diesel particulate matter)의 위해성은 압도적으로 높다. 여기에 국내 경유차량은 9,967,516대(2019년 3월 국토교통부 통계자료 기준)로 전체의 42.7%를 차지하는 것을 고려한다면 경유자동차에 대한 규제는 절대적으로 필요하다.

■ 미세먼지와 마스크

- 미세먼지 마스크는 노출을 최소화하는데 도움을 준다. 단, 올바른 제품(식품의약품안전처 인증 제품)을 구매하고 제대로 착용할 때 가능하다. KF수치가 높은 마스크는 효과적이지만 호흡기 질환자, 영·유아, 노인 등은 호흡곤란의 문제가 발생할 수 있어 주의해야 한다.

■ 미세먼지와 환기

- 실내 미세먼지 관리는 올바른 환기 방법에서 시작된다. 실외 미세먼지가 좋은 날에는 자연환기를 수행하는 것이 좋다. 고농도 미세먼지가 발생하면 창문을 닫고 공기청정기를 사용해야 한다. 그러나 실내 가스상 오염물질 농도는 높아질 수 있어, 3~5분 짧은 자연환기를 병행해야 한다. 실내에서 요리할 경우 가급적 자연환기, 공기청정기, 후드를 동시에 활용하면 더 효과적으로 미세먼지를 제거할 수 있다.

05
국제협력

1. 한·중 양자 협력 ····· 139
2. 동북아시아 다자간 협력 ····· 160
3. 국제협력 부문 주요 이슈 ····· 166
4. 요약 ····· 168

국민정책참여단

미세먼지 정책제안 참고자료집

제5장 국제협력

한국환경정책·평가연구원 | **추장민**

우리나라는 미세먼지 문제를 해결하기 위한 주요 대책으로 국제협력 사업을 진행해 왔으며, 국제협력을 강화하기 위한 여러 가지 대책을 수립하고 있다. 언론 보도에 따르면 국민들도 정부가 하고 있는 국제협력에 대해 궁금해 하고 있다. 특히 미세먼지 해결을 위해 현재 우리나라는 중국과 어떤 협력을 진행하고 있으며, 앞으로 어떻게 협력을 강화할 지에 대한 관심이 매우 크다. 따라서 향후 수립될 대책은 국제협력 현황에 대해 정확한 이해와 소통에서 출발해야 할 것이다.

제5장에서는 1990년대 초부터 우리나라가 미세먼지 문제를 포함한 대기오염에 공동 대응하기 위해 진행해 온 한중 양국간 협력과 동북아 지역 국가들의 다자간 협력의 현황에 대해 살펴볼 것이다. 그리고 미세먼지 국제협력 과정에서 나타나고 있는 주요 이슈에 대해서도 간략히 정리하고자 한다.

1. 한·중 양자 협력

1) 환경협력의 개괄

우리나라와 중국의 환경협력은 1993년 「대한민국 정부와 중화인민공화국 정부간의 환경협력에 관한 협정(이하 '환경협력협정')」을 체결하면서 시작되었다. 당시 우리나라는 황사와 서해오염 문제로 인해 중국과의 협력이 시급한 상황에서 중국이 환경협력에 적극적인 자세를 보이면서 본 협정을 체결하게 되었다.

본 협정에서 양국은 대기오염규제, 수질오염물질 총량관리를 포함하여 포괄적 환경협력을 추진하기로 하였으며, 협력 활동의 용이한 조정을 위해 협정 제4조에 근거하여 1994년 '한중환경협력공동위원회'를 설치하였다.[186]

현재(2019.7)까지 총 16건의 환경협력협정(합의서, 의향서 포함)을 체결하였는데, 2000년대까지는 황사 및 철새보호 분야 협력에 중점을 두었고, 2010년대부터는 폐기물, 야생생물, 기후변화, 대기질 및 미세먼지 등으로 협력 범위를 확대하였다.

186) 국가기록원. "한-중환경협력협정", http://www.archives.go.kr/next/search/listSubjectDescription.do?id=002962&pageFlag=(검색일: 2019.7.11).

특히, 2014년 이후부터는 미세먼지 공동대응을 위하여 대기오염 문제가 양국간 환경협력에서 핵심적으로 다뤄지고 있다.

[표 5.1] 한중 정부간 환경협력약정 체결 현황(2019년 7월 10일 현재)

체결일	협정 명칭	종료 여부
1993.10.28	대한민국 정부와 중화인민공화국 정부간의 환경협력에 관한 협정	유효
2003.07.08	대한민국 환경부와 체결된 중화인민공화국 환경보호부 간 환경협력에 관한 양해각서	종료
2005.06.07	한중 황사관측과 정보공유를 위한 양해각서	유효
2007.04.10	대한민국 정부와 중화인민공화국 정부간의 철새보호에 관한 협정	-
2008.08.25	중국 따오기 기증 및 한·중 따오기 증식·복원 협력 강화를 위한 양해각서	유효
2012.08.30	한중 폐기물협력 양해각서	유효
2013.06.27	한·중 공동 따오기 보호 협력 양해각서	유효
2014.07.03	한·중 야생생물 및 자연생태계 보전 협력에 관한 양해각서	유효
2014.07.03	한·중 환경협력에 관한 양해각서	유효
2015.01.29	한중 기후변화 협력에 관한 정부간 협정	유효
2015.10.31	한중 판다 보호협력공동 추진 양해각서	유효
2015.10.31	대기질 및 황사 측정자료 공유합의서	유효
2016.04.27	한중 환경협력 강화 의향서	유효
2017.12.14	한중환경협력계획(2018~2022)	유효
2019.02.26	미세먼지 예보 정보 및 기술 교류협력사업 업무계획 양해각서	유효
	한중환경협력센터 운영규정 마련을 위한 업무계획 양해각서	유효

자료: 추장민 (2019.6.19), "미세먼지 대응 한·중 협력 강화 전략"

미세먼지 등 대기오염 문제에 관한 본격적인 협력의 시작은 2013년 양국 정상회담이 계기가 되었다.

2013년 6월 27일 양국 정상은 「한중 미래비전 공동성명」 채택을 통해 한중간 전략적 협력동반자 관계를 발전시켜 나가기 위한 미래비전을 제시하였는데, 그 부속서인 '한중 전략적 협력동반자 관계 내실화 이행계획'에서 "양측은 대기환경, 황사, 생물다양성 및 환경산업 분야에서 교류와 협력을 강화"하고, "기후변화대응 정책에 관한 교류와 협력을 전개하기로 합의"하였다.[187]

이듬해인 2014년부터 대기오염 문제 대응을 위한 양국간 협력이 보다 구체화되기 시작했다.

187) 중앙일보 (2013.6.27), "[전문]'한중 미래비전 공동성명' 부속서 https://news.joins.com/article/11925690

2014년부터 2017년까지 협력강화를 위해 체결한 주요 합의문서로는 「한중 환경협력에 관한 양해각서」(2014.7), 「대기질 및 황사 측정자료 공유합의서」 (2015.10), 「한중 환경협력 강화 의향서」(2016.4), 「한중 환경협력 계획(2018~2022)」(2017.12) 등 총 4건이다.

「한중 환경협력에 관한 양해각서」(2003년판 대체)는 2014년 7월에 개최된 양국 정상회담을 계기로 양국 환경부 장관이 포괄적인 환경협력 방향을 담아서 체결하였다.

여기에서 대기오염물질 저감과 대기질 예보 정확성 제고를 위한 협력 추진에 합의하였다. 본 양해각서에서 양측은 농촌환경 보호, 황사와 사막화 완화, 환경표지제도 인증 기준 및 절차 상호인정 등을 촉진하기 위한 협력을 추진하기로 하였으며, 특히 양국 간 월경성(越境性) 대기오염물질을 줄이고 대기질 예보의 정확성을 제고하기 위한 구체적인 협력사업 추진에 합의하였다.[188]

양측이 합의한 대기분야 협력사업은 ▲대기오염물질 관측자료 공유, ▲대기오염예보모델 및 대기오염물질 발생원인 규명 공동연구, ▲대기오염방지 실증사업이다.[189]

그리고 이러한 합의를 이행하기 위하여 2015년 「대기질 및 황사 측정자료 공유합의서」를 체결하고 대기오염물질 관측자료 공유 대상과 방법을 정하였으며, '한중대기질공동연구단'을 구성하여 대기오염예보 모형 개발과 대기오염물질 발생원인규명 연구를 공동으로 추진하고, 중국 내 제철소에 우리나라의 집진, 탈질・탈황기술을 적용하는 대기오염방지 실증사업을 추진하기로 하였다.[190]

'한중대기질 공동연구단'은 현재 '맑은 하늘(청천) 프로젝트'를 통해 중국 북부지역 대기질 공동관측 및 오염원인 규명 등의 활동을 추진 중이다.

2016년에는 「한중 환경협력 강화 의향서」를 체결하였으며, 여기에서 양국간 중장기 협력계획의 수립과 한중환경협력센터 설치를 합의하였으며 한중 환경국장급 대화채널을 신설하기로 하였다. 그리고 2017년 12월 14일 의향서에 따라 양국 환경장관은 「한중환경협력계획(2018~2022)」에 서명하였다.

「한중환경협력계획(2018~2022)」의 이행과 사무국 역할은 한중환경협력센터에서 맡고, 양국 환경부처 국장급이 공동의장으로 하는 운영위원회를 개최하여 이행 현황 및 성과를 정기적으로 평가할 계획이다.

188) 환경부 (2014), "대한민국 환경부와 중화인민공화국 환경보호부간 환경협력에 관한 양해각서"
189) 환경부 보도자료 (2014.7.4), "정상회담 계기로 한-중 환경 상생의 동반자 시대 열어".
190) 환경부 보도자료 (2014.7.4), "정상회담 계기로 한-중 환경 상생의 동반자 시대 열어".

[표 5.2] 한중 환경협력 계획(2018년~2022년)

항목	주요내용
우선협력분야	대기, 물, 토양 및 폐기물, 자연보호
협력방식	정책교류, 산업·기술 협력, 기타 양국이 합의한 협력형태
관리체계	실무회의(과장급) ↔ 환경국장급회의 ↔ 장관회의
이행기관	한중환경협력센터

최근, 2019년 2월 26일에는 제3차 한중 환경협력 국장회의(2019.1.22)에서 합의한 한중 양국의 대기질 예보 및 기술교류, 맑은 하늘(청천)프로젝트의 확대, 동북아 장거리이동 대기오염물질(LTP) 보고서 발간 등 합의사항의 이행을 촉진하기 위해 한중환경장관회의가 개최되었다.

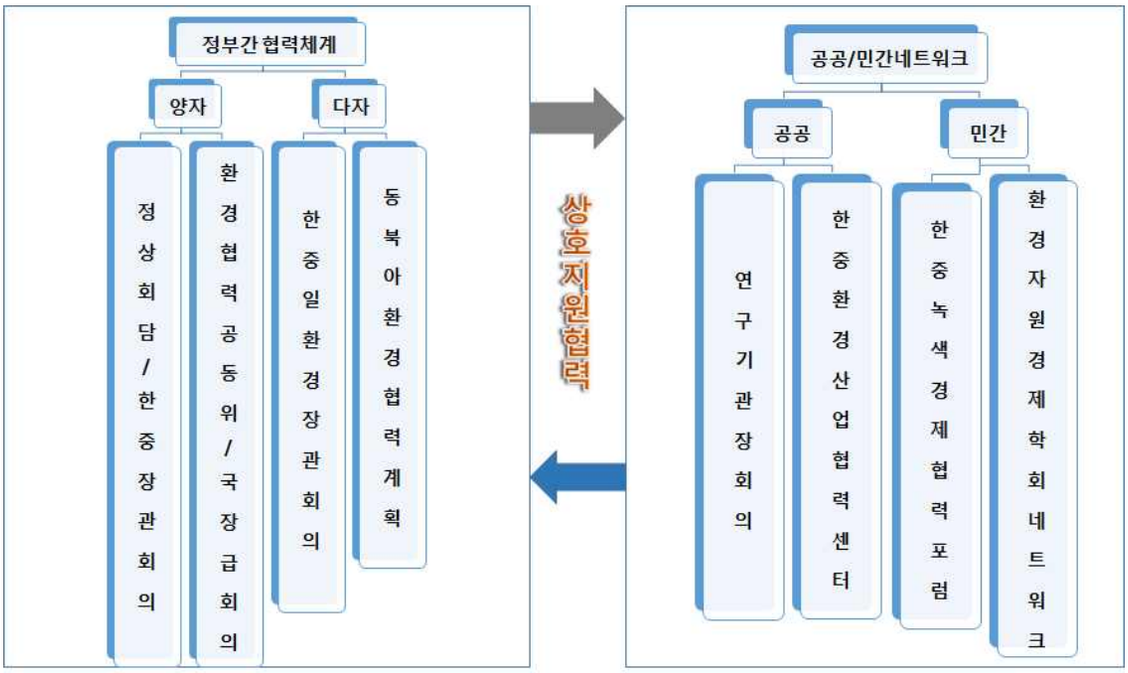
이 자리에서 「미세먼지 예보 정보 및 기술 교류협력사업 업무계획 양해각서」와 「한중환경협력센터 운영규정 마련을 위한 업무계획 양해각서」가 체결되었다.

이 중 「미세먼지 예보 정보 및 기술 교류협력사업 업무계획 양해각서」에서는 양측의 대기질 예보센터간 모니터링한 예보 데이터를 공유하고, 필요한 경우 대기질 예보기술 교류를 진행하여 양국의 대기질 예보 수준을 높이는데 기여하기로 하였다.[191]

2) 환경협력의 체계

한중환경협력은 환경분야 대중국 정책과 사업을 개발하는 정부간 협력체계와 정부 주도의 추진체계를 보완하는 공공/민간부문 협력체가 상호 지원하는 구조로 추진되고 있다.

191) 한중 환경부와 중국 생태환경부 간 대기질 예보정보 및 예보기술 교류 협력사업 방안



[그림 5.1] 한중 환경협력 추진체계

자료: 추장민 (2019.6.19), "미세먼지 대응 한·중 협력 강화 전략"에서 저자 수정

정부간 협력으로는 한중 양자간 정상회담과 한중환경장관회의 등 고위급 회의와 한중환경협력공동위원회, 한중 환경협력 국장회의 등 국장급 회의가 운영되고 있으며, 한・중・일 환경장관회의(TEMM), 동북아환경협력계획(NEASPEC) 등 지역차원의 다자협력체계를 통해 양자간 협력을 촉진하고 있다.

한중정상회담에서는 경제, 사회, 정치 전 분야의 협력관계를 논의하고 있는데 2009년 한중일 정상회담에서 '한중일 지속가능개발을 위한 공동성명'을 채택한 이후 환경협력을 정상회담의 상설의제로 다루고 있다.

특히 2013년에 개최된 한중정상회담에서「한중 미래비전 공동성명」의 채택을 통해 환경분야에서 교류와 협력을 강화하기로 명문화함으로써 발전의 기반을 마련하였다.

그리고 2015년에 개최된 한중일 정상회담에서 '동북아 평화협력을 위한 공동선언문'을 채택하고 환경보호 협력의 중요성을 재확인하고 3국 대기오염 정책대화를 추진하여 각국의 대기질 개선 노력을 공유하기로 합의하였다.

2017년에는「한중환경협력계획(2018~2022)」을 채택하였을 뿐만 아니라 산업통상자원부(한국)-공신부(중국)간 친환경생태산업개발 양해각서(MOU)를 체결하고 양국 생태산업단지 개발과 청정생산・에너지효율 관련 기술 및 정보교류 등의 협력하기로 하였다.[192]

[표 5.3] 한중/한중일 정상회담 환경 관련 합의사항

일시	주요 내용	비고
2009.10.10	▪ 한중일 지속가능 개발을 위한 공동성명(Joint Statement on Sustainable Development) 채택 - 순환경제시범단지 조성협력 추진 : 3R원칙에 입각한 '한중일 순환경제시범단지 조성' 방안 모색 및 자원 순환과 환경친화적 산업구조 촉진을 위한 협력사업 발굴 - 산림 관리 및 야생동물 보호 협력강화 - 기후변화(코펜하겐 회의) 공동대응	제2차 한중일 정상 회담
2013.6.27 ~6.30	▪ 한·중 미래비전 공동성명(中韩面向未来联合声明) 채택 - 한중 전략적 협력동반자 관계 내실화 이행계획(부속서) 합의 - 대기환경, 황사, 생물다양성 및 환경산업 분야에서 교류와 협력 강화 약속 - 기후변화 대응, 멸종 위기종 복원을 위한 양국 간 협력 강화 약속 ▪ <에너지절약 분야 협력 강화에 관한 양해각서> 체결	한중 정상 회담
2014.07.03	▪ 공동성명: 미세먼지 등 대기오염 감축, 사고·천재지변 등에 대한 긴급구호·지원, 원전안전, 구제역·조류인플루엔자 등을 포함한 동물 질병과 인체 감염병 대처 등에서의 협력 강화, 기후변화 대응 및 해양 분야의 협력 확대·심화 약속 - 미세먼지 등 대기오염에서 대기오염수치 정보공유와 대기오염 예·경보 모델 공동연구 등 협력 실시 - 한중 환경산업포럼 및 철강 등 분야에서 대기오염 방지 시설 실증 시범 프로젝트 공동 추진, 동북아지역차원에서 협력체제 강화를 위한 공동 노력 합의 - 기후변화 공동 대응 약속	한중 정상 회담
2015.11.01	▪ 동북아 평화협력을 위한 공동선언문 채택 - 재해 예방 및 구호 능력 향상을 위해 3국간 협력 강화 - 환경보호 협력의 중요성 재확인 - 역내 대기오염 문제 해결 중요성 인식, 3국 대기오염 정책대화를 통해 대기질 개선을 위한 모범사례와 노력 공유 격려 - 황사분야 협력 강화 촉구	제6차 한중일 정상 회담
2017.12.14	▪ 미세먼지 저감 등 환경, 에너지 분야 협력강화 합의 -「한중환경협력계획(2018~2022)」 채택 ▪ 韓산업부-中공신부간 친환경생태산업개발 MOU 체결 ▪ 韓산업부-中국가에너지국간 국장급 에너지 민관채널 신설 합의	한중 정상 회담
2018.5.9	▪ 공동선언 - UN SDGs 관련 협력 강화 - 한중일 3국 환경장관회의 협력활동지지 - 순환경제 및 자원효율성 추진, 해양쓰레기와 대기오염방지 등 공동이슈 공동해결 노력 촉진 - 환경오염방지 및 통제기술 3국 협력 네트워크 발전 - 해양 생물자원 지속가능한 이용 등 생물다양성 분야 협력 - 기후변화 대응 강화 및 파리협정 이행 결의 확인	제7차 한중일 정상 회담

자료: 추장민 (2019.6.19), "미세먼지 대응 한·중 협력 강화 전략"

192) 에너지신문 (2017.12.24), "한-중, 에너지분야 협력 본격화된다"

한중환경장관회의는 한중일환경장관회의 개최 기간 중 한중 양국 장관 간에 별도로 진행하는 협의체이며, 핵심적인 환경협력에 관한 협정이 체결되고 있다.

한중환경협력공동위원회는 앞서 설명한 바와 같이 1993년 체결한 '환경협력 협정'을 계기로 1994년에 설립된 한국 외교부와 중국 환경부간 국장급 협의체이다.

한중환경협력공동위원회는 매년 양국이 교대로 개최하고 있으며, 본 회의에서 양자간 환경협력 사업을 발굴하고, 활동이행 현황과 성과를 평가・관리하고 있다.

최근 2019년 1월 서울에서 제23차 한중환경협력공동위원회를 개최하여 7개 기존 협력사업 지속과 3개 신규사업 추진을 결정하였다.

[표 5.4] 한중환경협력공동위원회 협력사업

구분	협력사업	비고
1	황해 해양환경 공동조사	기존
2	환경오염의 건강영향 연구	
3	환경기술·산업협력	
4	농촌지역 환경협력	
5	한중 철강 등 환경기술시범센터	
6	생물다양성협약(CBD) 전략계획 실천을 위한 경험 교류	
7	한중 해양쓰레기 공동 모니터링 연구	
8	대기질 예보 정보 및 예보 기술 교류	신규
9	한중 광산 지역 토양오염 관리 공동연구사업	
10	지속가능발전을 위한 한중간 환경정책 공동연구	

자료: 환경부 보도자료 (2019.1.24), "한중간 미세먼지 조기경보체계 공동 구축 등 미세먼지 대응·협력 확대 추진"

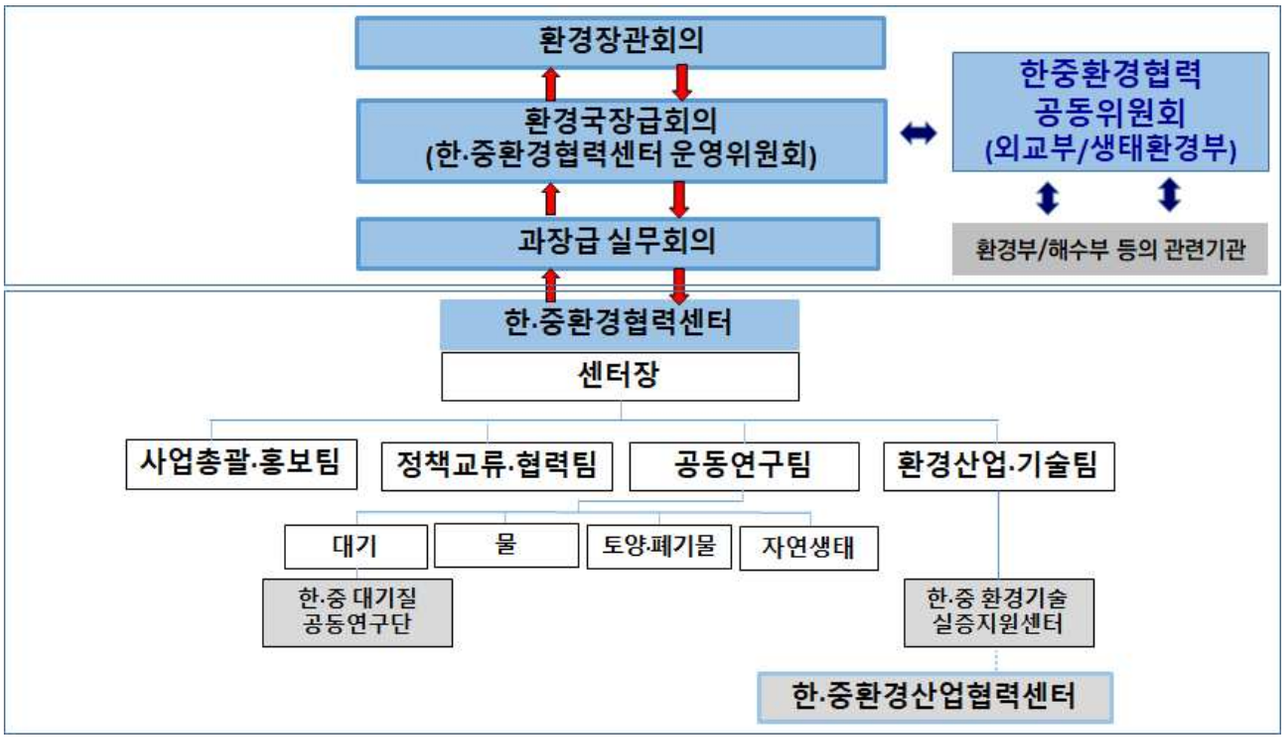
한중 환경협력 국장회의는 2016년 「한중 환경협력 강화 의향서」체결을 계기로 시작된 양국 환경부처 국장급 대화채널로 연1회 개최하고 있다.

2016년 11월에 제1차 회의를 개최하고 한중 중장기협력계획 수립 방안 등을 논의하였으며, 2019년 1월 22일 한중환경협력공동위원회와 연계하여 제3차 회의를 개최하였다.

한편, 2016년 체결된 「한중 환경협력 강화 의향서」의 합의에 따라 2018년 6월 중국 북경에 설치된 '한중환경협력센터'가 양국의 모든 환경협력 사업의 이행을 지원・조정하는 실행조직으로 자리잡아가고 있다.

양국 환경장관은 2019년 2월 개최된 한중환경장관회의에서 '한중환경협력 센터'가 환경협력의 중추적인 역할과 기능을 발휘할 수 있도록 운영규정에 합의·서명함으로써 동 센터가 규범화·체계화된 협력사업을 추진하고 인력과 예산 관리를 할 수 있도록 제도적 기반이 마련되었다.[193]

이상과 같이 한중 환경협력의 정부간 협력체계는 장관회의-국장회의-실무회의 3단계 의사결정 및 이행체계를 구축하고 있으며, 국장급 협의체는 외교부(한국) - 생태환경부(중국)간, 환경부(한국) - 생태환경부(중국)간의 2개 협의체가 운영 중이다.



[그림 5.2] 한중 환경협력 정부간 의사결정 및 이행 체계도

자료: 추장민 (2019.6.19). 미세먼지 대응 한·중 협력 강화 전략

공공/민간 협력네트워크는 정부 산하 기관, 기업 및 전문가/학술단체가 중심이 된다. '한중일 환경과학원 원장회의', '한중환경산업협력센터' 등이 공공부문의 대표적 협력체이며, 민간부문은 '한중녹색경제협력포럼', '환경자원경제학회네트워크' 등이 있다.

한중일 환경과학원장회의(TPM)는 2004년에 구축된 우리나라 국립환경과학원, 중국 환경과학연구원, 일본 국립환경연구소간 정기적 교류협의체이다. 3개 기관은 동북아

193) 환경부 보도자료 (2019.02.26). "한중환경장관 회담 결과보고".

환경질 개선을 위한 연구기관 간 환경연구 협력증진을 목적으로 우선협력 분야와 사업을 정하고 공동연구, 워크숍, 정보 및 인력 교류 등의 활동을 추진하고 있다. 2015년부터 추진 중인 환경재난에 관한 공동연구는 현재 한중일환경장관회의(TEMM) 공동행동계획(2015~2019)의 협력사업으로 등록·관리되고 있다.

한중환경산업협력센터는 2003년 12월 개최된 한중환경장관회의 결과에 따라 양국의 환경산업협회 주관으로 2011년 7월부터 한국환경산업기술원의 중국 대표처로서 기능하고 있다. 동 센터는 양국 환경산업협력 및 국내 환경기업의 효과적인 중국 환경시장 진출을 목적으로 운영되고 있으며, 주요 업무는 중국 중앙정부/지방정부 협력사업 발굴, 중국 유력 바이어 발굴을 통한 국내 우수 환경기업 직접 연계, 환경기술 국제공동화 중국사업 지원 등이다.[194]

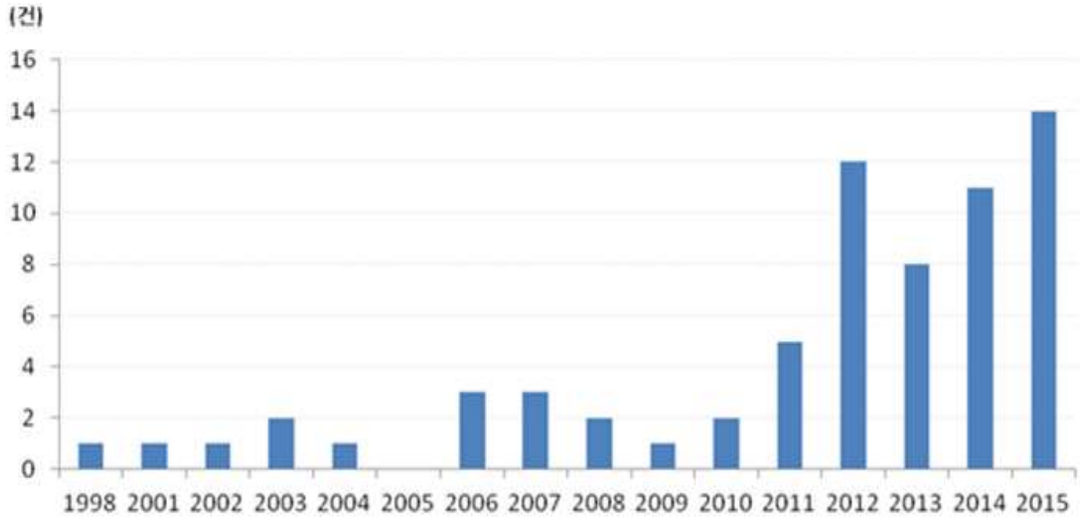
한중녹색경제협력포럼은 대한상공회의소가 중국국제무역촉진위원회와 함께 운영 및 개최하는 협의체로 에너지 및 환경기술 분야 협력강화를 위한 양국 경제인의 교류 기반이 되고 있다.[195]

3) 대기분야 협력활동

한중간 환경협력활동은 2000년대 중후반부터 증가하는 추이를 보이다 2011년 이후 크게 증가하고 있다.

추장민 외(2016)에 따르면 1998년부터 2015년까지 수행된 기관 간 협력사업이 총 67개이고, 이 중 74.6%의 활동이 2011~2015년 사이에 집중적으로 수행되었다. 67개 협력사업은 대부분이 양자간 협력협정 체결에 따른 세부 이행사업이며, 그 외에 기관 자체의 협력사업도 포함되었다.

194) 추장민 외 (2016), “한·중 환경협력 확대를 위한 중국 환경관리 정책 및 체계 분석 연구”, 환경부.
195) 뉴시스 (2014.10.16), “대한상의 韓中녹색경제협력 포럼 개최”

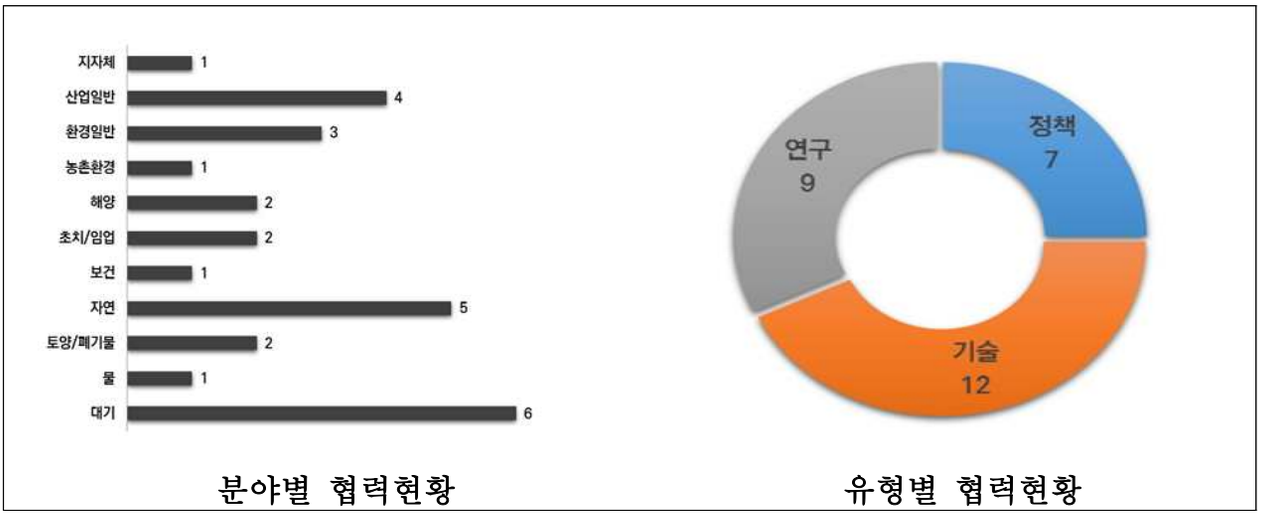


주: 협력 개시년도(MOU 체결일)를 기준으로 산출

[그림 5.3] 연도별 환경협력사업 추진 현황(1998~2015)

자료: 추장민 외 (2016) "한·중 환경협력 확대를 위한 중국 환경관리 정책 및 체계 분석 연구"

또한『한중환경협력계획 2018-2022』하에서 추진할 협력사업 도출을 위해 2018년 5월 기준으로 양국 간 현재 진행 중인 협력사업 현황을 조사한 보고서에 따르면, 당해 연도에 총 28개 협력사업이 진행 중이며 분야별로는 대기분야 21%, 물 분야 4%, 토양・폐기물 분야 7%, 자연생태 분야 18%, 기타 분야 50%로 분포된 것으로 확인되었다.[196]



[그림 5.4] 분야별/유형별 한중 환경협력 추진현황(2018.5 기준)

자료: 이현우 외 (2018), "한중환경협력계획 세부사업 및 협력방안 마련 연구"

196) 이현우 외 (2018), "한중환경협력계획 세부사업 및 협력방안 마련 연구".

양국 환경부와 한중환경협력센터는 이상의 조사결과를 토대로 『한중환경협력계획 2018-2022』하에서 관리 및 추진할 양국간 협력사업을 재정리하였으며, 상호 수요가 있는 45개 협력사업에 대한 협의를 진행하고 최종적으로 26개를 추진하기로 합의하였다.

[표 5.5]『한중환경협력계획 2018-2022』세부 협력사업

구분	협력사업	비고
대기	공동연구(5건), 산업기술(2건)	7
물/해양	공동연구(2건), 정책교류(1건), 산업기술(1건)	4
자연생태	공동연구(2건), 정책교류(1건), 산업기굴(2건)	5
농촌	공동연구(1건)	1
보건	공동연구(1건)	1
산업기술	공동연구(2건), 정책교류(2건), 산업기술(4건)	8
합계	공동연구(13건), 정책교류(4건), 산업기술(9건)	26

자료: 추장민 (2019.6.19), "미세먼지 대응 한·중 협력 강화 전략"

양측이 합의한 26개 협력사업 중에는 양국간 민감하고 수요가 높은 대기 및 산업기술 분야의 협력사업 비중이 높은 편이다. 특히, 대기분야 협력사업에는 우리측의 수요가 높은 분야가 반영되었고, 표 5.5는 현재 추진 중인 대기분야 등의 주요 협력사업 현황을 보여주고 있다.

(1) 대기오염방지 실증협력사업

대기오염방지 실증협력사업은 한중정상회담(2014.7)의 합의에 따라 중국 미세먼지 저감과 우리나라 환경산업의 對중국 수출확대를 목적으로 국내 우수기술을 적용하여 중국 내 가동 중이거나 건설예정인 제철소에 대기오염 방지시설을 설치·운영하는 사업이며, 양국 정부가 공동으로 기획·투자하였다.[197]

2015년 사업 개시 이후 단계적으로 대상 지역과 업종을 확대해오고 있는데, 현재는 중국 내 16개 지역에서 제철소, 발전소, 중형보일러 등을 대상으로 사업을 추진하고 있다.

197) 환경부 보도자료 (2014.11.17), "중국 철강분야, 대기오염방지 실증협력사업 공동 추진"

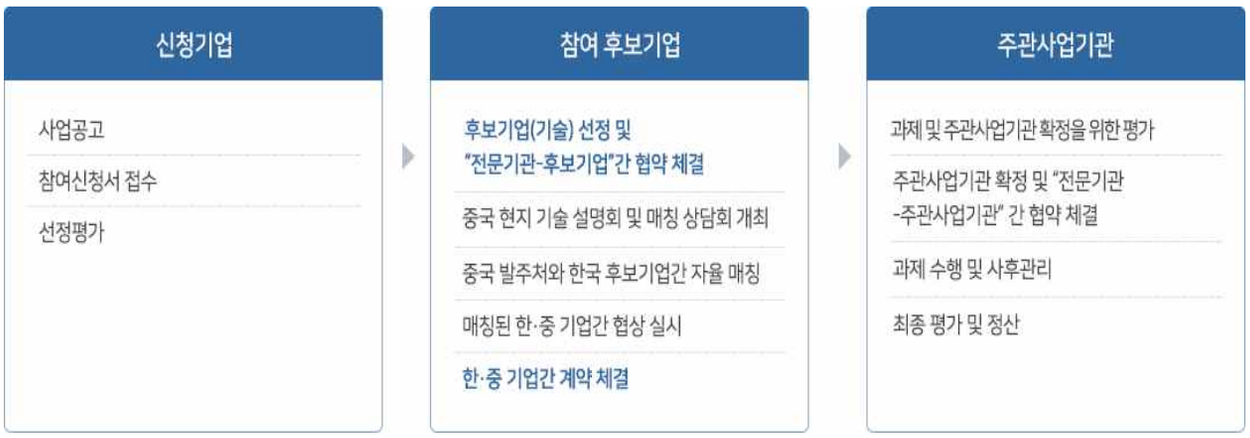
[표 5.6] 대기오염방지 실증협력사업 개요

구 분	내 용	
사업내용	중국 내 대기환경설비 구축	
대상지역	산둥성, 허베이성, 산시성, 산시(陝西)성, 랴오닝성, 네이멍구자치구, 지린성, 헤이룽장성, 장쑤성, 허난성, 베이징시, 톈진시, 안후이성, 상하이시, 저장성, 후베이성 (16곳)	
대상산업	제철소, 석탄화력발전소, 소각발전소, 시멘트, 석유화학, 중형보일러 등 집진, 탈질, 탈황, VOCs 저감기술 수요가 있는 산업	
사 업 비	• 연간 100억원 - 한국측 정부지원금 : 계약된 단위 프로젝트 금액의 20% 범위(최대 40억원) 내에서 지원	

자료: 환경부 보도자료(2018.4.23), "국내 우수기술을 활용한 한중 공동 미세먼지 저감 사업 본격화"

사업의 추진방식은 현지 기술설명회 및 1:1 사업수주 상담회를 통해 중국 발주처와 한국 기업을 매칭하고 한중 기업간 계약이 체결되면 계약된 단위 프로젝트 금액의 20% 범위(최대 40억원) 내에서 한국측 정부가 지원하고 있다.

현지 기술설명회 및 1:1 사업수주 상담회를 개최할 때에 중국 지방정부로부터 중국 기업 모집 및 설명회 공동 개최를 위한 협조를 받고 있다.[198]



[그림 5.5] 대기오염방지 실증협력사업 추진절차

자료: KEITI 홈페이지

198) 대한민국 정책브리핑 (2018.4.17), "국내 우수기술을 활용한 한-중 공동 미세먼지 저감 사업 본격화"

본 사업을 통해 2016년 5개 협력사업(650억 원)의 계약을 체결하였고 2017년부터는 중국 생태환경부 대외합작센터 온라인 기반을 활용하여 현지 홍보를 병행하고 있다.[199]

우리 정부는 실증사업이 성공적으로 추진될 경우 국내 기술의 우수성을 인정받아 중국 진출에 도움이 될 것으로 기대하며, 국내 환경기술을 적용하여 양국 미세먼지 저감에 기여할 것으로 기대하고 있다.

(2) 한중대기질공동연구사업

한·중 정상회의('14.7.3)에서 「한·중 환경협력 양해각서」(개정)의 합의를 토대로 대기오염예보모델 및 대기오염물질 발생원인 규명을 위한 공동연구사업이 시작되었다. 공동연구 추진기구로 한중대기질공동연구단이 2015년 6월 12일 중국 북경소재 중국환경과학원 내에 사무소를 설치하였다.

연구단은 '한중 월경성 미세먼지 저감을 위한 공동연구(2014.12~2016.6)'를 수행하였으며 2016년부터는 연구단 제3차 워크숍('16.11)에서 중국측 공동연구 단장(중국환경과학연구원 멍판 박사)이 중국 북부지역의 대기질 공동 관측을 제안 하면서 2017년 5월부터 '맑은 하늘(청천) 프로젝트'를 추진하고 있다.

'맑은 하늘(청천) 프로젝트'는 중국 북부지역(베이징 등 6개 도시)의 대기오염물질 특성 파악과 오염원인 규명, 대기질 모델링 개선에 목적이 있다. 지상관측과 항공관측을 통해 대기질 모니터링을 수행하고 대기질 성분 측정·분석, 모델링 평가를 진행하는 것이 주요 내용이다.

[표 5.7] 맑은 하늘(청천) 프로젝트 개요

구분	지상 관측	항공관측	참고
지역	베이징, 바오딩, 창다오, 다롄, 탕산, 선양		
기간	'17년 상반기~'20년	항공관측 인프라 구축('17~'18년) 춘절기, 동절기 항공관측('19년)	
측정 항목	SO_2, NO_2, O_3, CO, PM-2.5	SO_2, NO_2, O_3, CO, PM-2.5, BC(Black Carbon), VOCs	
모델링	CMAQ – CAMx 모사능력 개선 (고농도 사례 모사성능평가)		

자료: 환경부(2019), "한중환경장관회의 참가자료집"

199) 한국환경정책평가연구원 (2018), "한중환경협력계획 세부사업 및 협력방안 연구"

2017년에는 관측기반을 구축하고 북경 내 2개 지점을 대상으로 PM-2.5 시료 채취・분석, 수용모델을 이용한 PM-2.5 발생원별 기여율 추정, 역궤적 분석을 통한 오염원의 위치 추정, 고농도 PM-2.5 사례의 발생원인 분석활동을 수행하였고, 그 결과 타이위엔, 정저우, 스좌장 등 공업지역에서 배출한 오염물질이 베이징 대기질에 영향을 미치고 있음을 확인하였다.[200]

2018년에는 북경 외 바오딩, 창다오, 다롄 등 4개 도시를 대상으로 지상 장기 및 집중 관측을 시작하였고 대기오염 확산 모델링 평가를 수행하였다.[201]

2019년부터는 대상지역을 탕산, 선양을 포함한 6개 지역으로 확대하고 동절기 항공관측을 진행할 계획이다.[202]

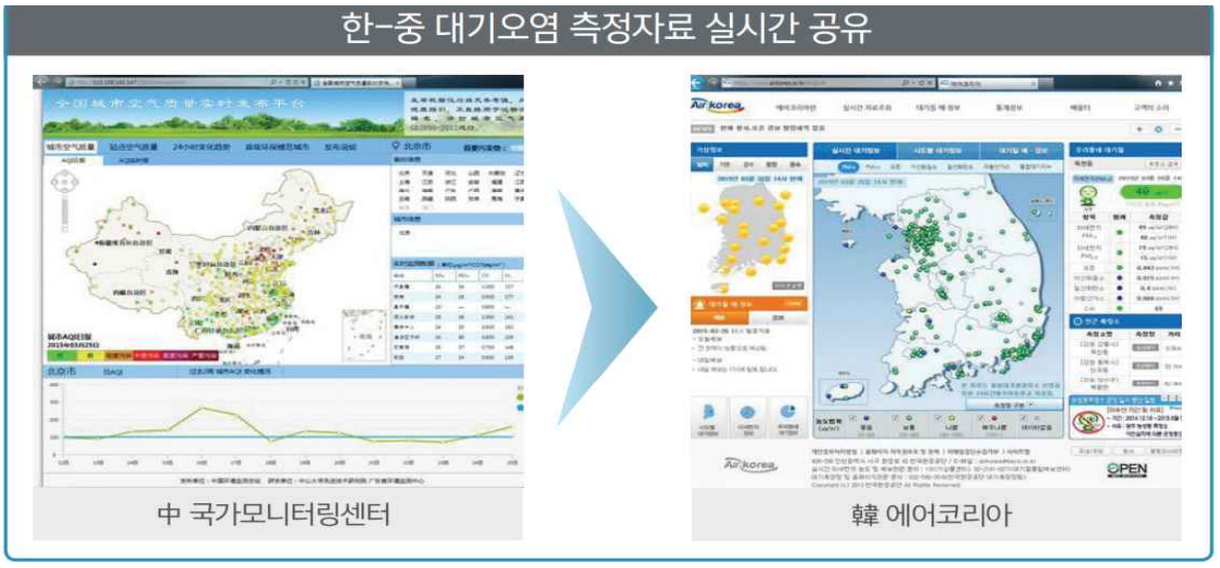
(3) 한중 대기질 측정정보 공유체계

2015년에는 「대기질 및 황사 측정자료 공유합의서」를 체결하고 위에서 합의한 대기오염물질 관측자료 공유 대상과 방법을 정하였는데, 우리나라 서울, 인천, 경기도 등 수도권 3개 시・도의 대기질 정보와 중국 베이징, 텐진 등 35개 도시의 실시간 대기질 측정자료를 전용선(FTP, File Transfer Protocal)을 이용해 공유하기로 하였다.

우리나라의 국립환경과학원(환경공단 서버)과 중국의 국가모니터링센터 간에 전용선을 연결하여 2015년 12월 10일부터 자료전송을 해오고 있다.

양국은 6개 대기질 항목(PM-10, PM-2.5, SO_2, NO_2, CO, O_3)의 1시간 평균 측정자료를 실시간 공유하여 양국 현지에서 측정한 대기질 정보를 1시간 내에 상대국에서 확인할 수 있게 되었다.

200) 전권호 (2018.11.15), “中韩大气质量共同研究现状”
201) 환경부 보도자료 (2019.2.26), “실질적 조기경보체계 구축을 위한 이행계획 마련”
202) 전권호 (2018.11.15), “中韩大气质量共同研究现状”



[그림 5.6] 한중 대기오염 측정자료 실시간 공유

자료: 환경부(2019), "바로 알면 보인다. 미세먼지, 도대체 뭘까"

중국의 실시간 대기오염자료 공유는 우리나라의 미세먼지 예·경보 정확도 향상 등 실질적인 미세먼지 대응 효과를 높일 수 있다는 점에서 의미가 있지만, 양국 합의에 따라 지정된 기관만 측정자료를 공유하도록 제한되어 있다.

[표 5.8] 한중 대기질 측정정보 공유대상 중국 도시 현황

순번	도시명(영·한)		순번	도시명(영·한)	
1	Baoding	바오딩	19	Qinghuangdao	친황다오
2	Beijing	베이징	20	Shenyang	선양
3	Cangzhou	창저우	21	Shijiazhuang	스자좡
4	Changchun	창춘	22	Suqian	쑤첸
5	Changzhou	창저우	23	Suzhou	쑤저우
6	Chengde	창더	24	Taiyuan	타이위안
7	Dalian	다롄	25	Taizhou	타이저우
8	Handan	한단	26	Tangshan	탕산
9	Hefei	허페이	27	Tianjin	톈진
10	Hengshui	헝수이	28	Wuxi	우시
11	Huaian	화이안	29	Xingtai	싱타이
12	Huhehaote	후허하오터	30	Xuzhou	쉬저우
13	Jinan	지난	31	Yancheng	옌청
14	Langfang	랑팡	32	Yangzhou	양저우
15	Lianyungang	롄윈강	33	Zhangjiakou	장자커우
16	Nanjing	난징	34	Zhengzhou	정저우
17	Nantong	난퉁	35	Zhenjiang	전장
18	Qingdao	칭다오	-	-	-

자료 국립환경과학원(2019), "한중 대기질 측정자료 공유 개요"

(4) 대기질 예보정보 및 예보기술 교류[203)]

제3차 한중 환경협력 국장회의(2019.1.22)에서 고농도 미세먼지 발생 시 대응능력 제고를 위해 대기질 예보 정보 및 예보 기술 교류에 합의하였다.

이후 실무협의를 통해 그 방안이 구체화되었는데, 양국 대기질 예보센터(韓 국립환경과학원, 中 환경관측종합센터)의 모니터링 예보 데이터를 공유하고, 필요에 따라 교육훈련, 기술교류, 전문가 교환, 협력연구 등의 방식을 통해 대기질 예보기술 교류를 진행하기로 하였다.

사업은 두 단계로 나누어 진행되는데, 1단계에는 먼저 양국의 대기질 예보발령 체계에서 대외에 발표하는 대기질 예보정보의 교류가 추진된다.

중국 10개 성·직할시, 11개 도시의 예보(향후 24시간, 48시간, 72시간) 정보, 우리나라의 11개 시·도의 예보 정보가 교류대상이다. 이와 함께 대기질 모니터링 정보도 공유한다. 중국측의 정보공유범위는 2015년 양측이 체결한 '환경 대기질 및 황사 모니터링 데이터 공유 협약' 중 11개 성(직할시) 35개 도시의 정보이다.

우리나라의 정보 공유범위는 경기도, 강원도, 충청북도, 충청남도, 전라북도, 전라남도, 경상북도, 경상남도 8개 도와 부산, 대구, 인천, 광주, 대전, 울산 6개 도시의 정보이다. 2단계에는 1단계 결과를 토대로 양측의 예보 업무 진행상황에 따라 대기질 예보데이터 공유구역과 예보내용을 협의를 통해 확정한다.

이상의 합의에 따라 공유하는 양측의 데이터는 대기질 예측과 예보 업무에만 사용할 수 있으며, 별도의 합의 없이 제3자에게 제공해서는 안되지만, 미세먼지 예보자료는 대국민 서비스를 목적으로 공개할 수 있다.

양국의 사업수행기관은 전문가연합그룹을 구성하여 공동 워크숍, 세미나 등을 개최하여 기술문제를 토론하고 구체적인 실행방안을 마련할 예정이다.

203) 환경부 제공자료. "한국 환경부와 중국 생태환경부 간 대기질 예보정보 및 예보기술 교류 협력사업 방안"

[표 5.9] 대기질 예보정보 및 예보기술 교류 협력사업

	대기질 예보	대기질 모니터링
중국측 공유범위	대기질 예보가 발령된 10개 성·직할시 11개 도시 - 베이징시, 지린성(창춘), 랴오닝성(다롄, 선양), 허베이성(친황다오), 톈진시, 산둥성(칭다오), 장쑤성(난징), 상하이시, 저장성(닝보), 안후이성(허페이)	'환경 대기질 및 황사 모니터링 데이터에 관한 공유 협약' 중 11개 성(직할시) 35개 도시
한국측 공유범위	대기질 예보가 발령되는 17개 시·도	8개도와 부산, 대구, 인천, 광주, 대전, 울산 6개 도시

자료: 환경부 보도자료 (2019.2.26.)

자료: 저자 작성

[그림 5.7] 한중 대기질 예보정보 공유범위

(5) 청천(晴天, 맑은 하늘) 계획[204]

2019년 2월 26일 양국 환경부 장관회담에서 합의한 바에 따라, 양국 정부는 '청천계획'을 통해 기존의 한중 대기오염방지 협력사업을 통합하고 한중 미세먼지 협력 기반으로 확대 발전시키기로 하였다.

이로써 현재 한중대기질 공동연구단에서 연구사업으로 진행 중인 '청천계획'을 정책 및 기술, 공동연구, 기술산업화, 정보교환 등 대기분야 협력사업과 하나로 통합하여 종합적이고 체계적인 미세저감 협력사업으로 발전할 수 있는 전기를 마련하였다.

현재 한중 양국간 협의 중에 있는 '청천계획'의 주요 사업 영역은 ▲대기오염방지 정책교류 강화, ▲한중 대기오염 형성원리 및 발생원에 대한 과학적 인식 제고, ▲상호 이익이 되는 대기오염방지기술의 양방향 산업화 협력모델 실현, ▲양국 대기질 개선 목표의 실현을 위한 토대 제공 및 동북아 지역 대기질 개선 기여에 목적을 두고 있다.

이제 '청천계획'은 개별적인 프로젝트를 추가하거나 집합하는 수준을 벗어나서 한중 양국간 대기분야에서 진행 또는 추진할 측정자료 공유 시스템 확대, 고농도 미세먼지 긴급대응 공동행동 조직, 미세먼지의 실질적인 감축 협력 등의 다양한 분야의 사업을 통합하여 발전해 나갈 과제를 갖게 되었다.

자료: 저자 작성

[그림 5.8] 북경 소재 한중 환경협력 시설 전경

204) 환경부 (2019). "한중환경협력사업 "청천(晴天, 맑은 하늘) 계획" 이행방안"

4) 중국의 대기정책과 국제협력에 대한 입장

한중 양국간 미세먼지 공동대응을 위한 협력 강화방안을 마련하기 위해서는 중국 정부가 자기 나라에서 실시하고 있는 대기정책과 관련된 국제협력에 대한 중국 정부의 입장을 알아둘 필요가 있다.

(1) 중국의 대기정책

중국 정부가 대기오염 방지정책을 크게 강화한 시점은 2013년이다. 당시 중국 전역에 걸쳐 고농도 스모그가 자주 발생하였다. 이에 대응하기 위하여 중국 정부는 2013년에 5년 계획으로 「대기오염방지행동계획(2013~2017)」을 수립하여 실시하였다. 「대기십조(大氣十條)」라고 부르는 행동계획의 10가지 주요 조치는 중국 정부가 시행한 가장 강력한 대기오염 방지대책으로 평가받고 있다.

10가지 주요 조치는 1) 대기오염 종합관리역량 강화, 2) 에너지 다소비・오염물질 다량배출 업종 도태 등 산업구조 조정, 3) 기업 생산기술 발전 가속화 및 에너지절약/환경보호 산업 발전, 4) 에너지 소비구조 전환 및 청정에너지를 확대하여 1차 에너지 소비구조에서 석탄의 비중 65%로 감축, 5) 대규모 개발투자사업의 환경관련 심사강화 및 환경민감지역 투자제한, 6) 세제 및 금융 정책 등 환경관리의 경제적 수단 및 시장메커니즘 도입, 7) 관련 법규체계 완비 및 중점오염기업 환경정보 공개 등 관리감독 강화, 8) 지방정부간 협력체계 구축 및 성급 지방정부의 책임제 도입, 9) 모니터링 및 긴급대응 예・경보 시스템을 구축하여 각 도시의 일일 평균 및 시간당 평균 대기질 등급(AQI)과 각 대기질 측정소의 PM-2.5 등 6개 대기오염물질 시간당 평균 농도 실시간 공개, 10) 정부, 기업 등 관련 당사자의 책임 명확화 및 국민 참여 등이다.

이러한 조치를 통해 2017년까지 지급(地級)[205] 이상 285개 도시의 PM-10 농도를 2012년 대비 10% 이상 저감, 광역차원의 대기질 개선 및 고농도 미세먼지 저감을 위해 징진지 지역(북경시-천진시-화북성), 장강삼각주 지역(상해시, 강소성/절강성/안휘성의 주요도시), 주강삼각주 지역(광동성 중남부 주요도시)의 PM-2.5 농도를 2012년 대비 각각 25%, 20%, 15% 저감, 그리고 2017년 베이징 PM-2.5 연평균 농도를 60㎍/㎥로 저감한다는 목표를 설정하고 총 1.7억 위안을 투자한다는 계획을 세웠다.

위와 같은 계획에 따라 중국 정부는 표 5.10과 같이 산업, 에너지, 교통 분야의

205) 지급 도시는 중국의 행정체계 상 현(縣)급과 성(省)급의 중간 행정단위를 말함

구조 조정 등 여러 가지 조치를 실시하였다. 이러한 조치는 강력한 행정력을 바탕으로 실시됐는데, 2016년에 '중앙 환경보호 감독감찰팀'을 설치하고 매년 지방에 수천 명의 감독감찰팀을 파견하여 주요 오염배출원을 관리 감독하고 있다. 2018년의 경우에는 10월 30일부터 12월 6일 사이에 산서성, 요녕성, 산동성 등 10개 성에서 총 37,669건의 법규를 위반한 사안을 적발하여 12,240개 기업은 개선을 명령하고, 2,991개 기업에 대해서는 행정 및 사법적으로 처벌하였다. 특히 법규를 위반한 기업에 대해서는 벌금 부과뿐만 아니라 구속 또는 구류 등 사법적 처벌을 한 경우도 88명에 달했다. 또한 「징진지 및 주변지역 2017-2018 추/동계 대기오염방지 종합방안」 등 구체적인 실행대책을 수립하여 가을과 겨울에 집중적으로 실시되고 있다.

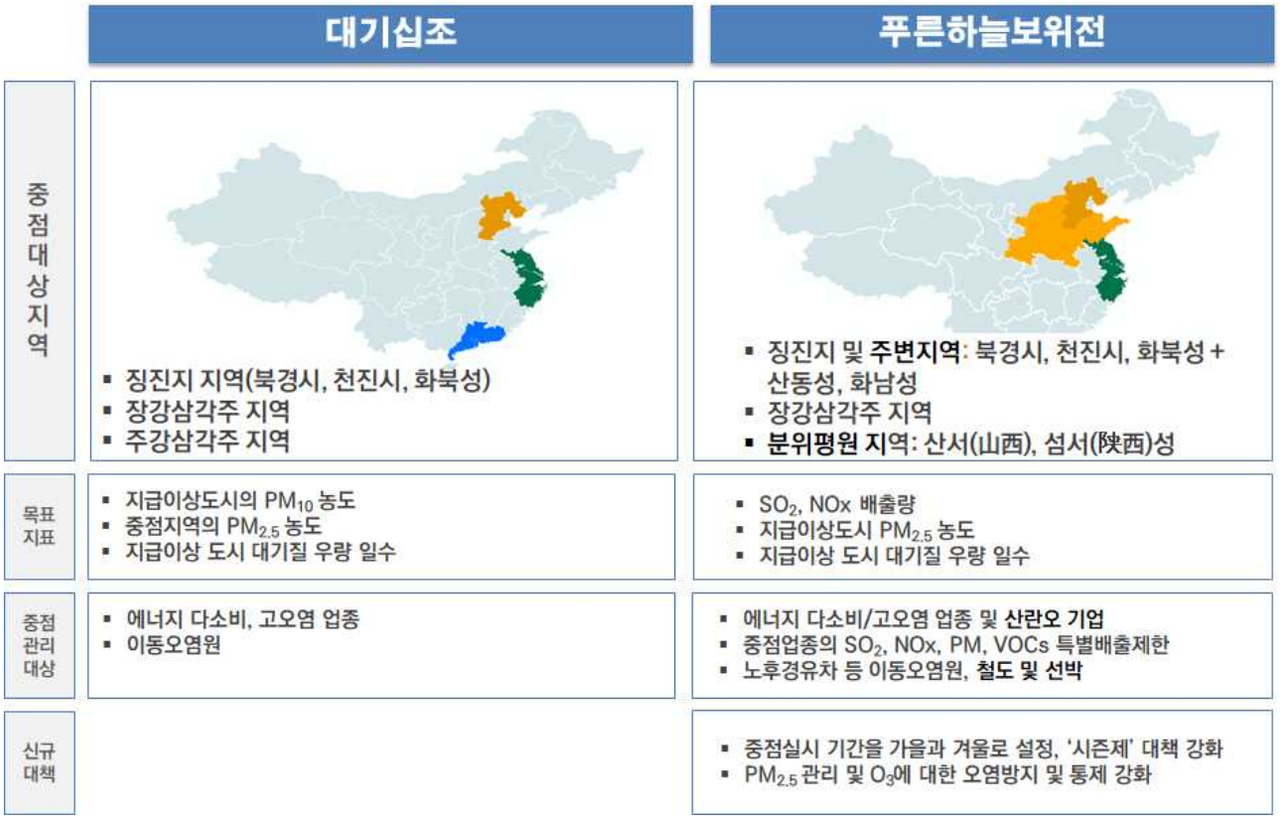
'시즌제' 미세먼지 대책이라고 할 수 있는 종합방안은 2017년 10월부터 2018년 3월까지 5개월 동안 실시된 것으로 생산 및 운송을 제한하고 고농도 미세먼지 발생 시에는 기업 조업 중단, 차량 2부제 등의 대책을 포함하고 있다.

[표 5.10] 중국「대기오염방지행동계획(2013~2017)」주요 조치 및 실적

분야	조치	실적
산업 구조 조정	과잉 및 노후 생산시설 폐쇄	과잉생산능력 철강 2억 톤, 석탄 5억 톤, 시멘트 2억 5천만 톤, 유리 1억 1300 상자, 화력발전 2,500만 kW 폐쇄, "산란오(散亂汚) 기업" 정돈 및 폐쇄 등
에너지 구조 조정	초저배출시설 개조	8억1천만 kW 석탄화력발전시설 초저배출시설로 개조(전체 80%)
	에너지시설 개조	석탄화력발전 4억 6천 kW에너지 절약 시설 개조
	친환경에너지 도입	- 석탄 1차 에너지소비 비중 8.5% 감소, 석탄소비량 3 억 톤 절감 - 2만2천4백80개 마을 겨울철 난방 석탄에서 가스로 전환 - 비화석연료 에너지 생산량 비중 17.8%, 2012년 대비 6.4% 증가
교통 구조조정	육해 복합운송	- 천진항 도로이용 석탄운송 금지 - 환발해 항구 디젤 화물차 도로이용 석탄운송 금지
	자동차/연료/도로 통합관리	- 황표차(배출기준 미달 차량) 폐차, 신차 증가 규제 - 자동차 배기가스 기준 및 연료기준 강화 - 대형화물차 관리감독 강화, 연료품질 및 디젤차 검사
배출원 관리감독	다배출 공장 및 굴뚝 감시망 구축	- 2만여 개 주요 관리대상 기업체 실시간 모니터링 - 징진지 및 주변 지역 45m 이상 굴뚝 TMS 설치
지역 공동 예방/통제	지역간 공동관리 강화 및 긴급 대응	- 징진지지역 대기오염 수송 플러스 '2+26' 확정 - 지역관리 기반 고농도 긴급 대응조치 강화
지역 책임제	각급 정부 및 간부 책임 강화	- 책임평가제 실시(지방정부 간부의 성과에 반영) - 지방정부와 국무원간 '대기오염방지 목표달성 서약서' 체결

자료: 추장민(2019.7.05.), "중국 대기정책 사례"

「대기오염방지행동계획(2013~2017)」 다음으로 중국 정부가 실시하고 있는 미세먼지 종합대책은 「푸른하늘보위전3년행동계획(2018~2020)」(일명, 푸른하늘보위전) 이다. 이 계획과 이전계획 차이점은 첫째, 중점 대상지역에 기존의 주강삼각주 지역이 제외되고 징진지 주변지역(산동성/화남성)과 분위평원(汾渭平原)지역(산서성/섬서성의 분위평원 지역)이 추가되었다. 둘째, SO_2와 NOx 배출량을 2015년 대비 15% 저감하는 목표를 정하고, PM-2.5의 연평균 농도 저감에 초점을 둠과 동시에 오존(O_3) 오염방지 대책도 강화하기로 하였다. 셋째, 광범위한 지역에 무질서하게 분산되어 있고 오염물질을 많이 배출하는 기업(산란오(散亂汚) 기업)과 철도 및 선박도 중점관리 대상에 포함되었다. 넷째, 계획을 실시하는 중점기간을 가을과 겨울로 설정함으로써 '시즌제' 미세먼지 대책의 내용을 보다 구체화하였다.



[그림 5.9] 대기십조와 푸른하늘보위전 비교

자료: 추장민(2019.5.02.), "중국 대기오염 방지정책". 저자가 수정보완함.

(2) 중국의 대기관련 국제협력에 대한 입장

중국의 국제환경협력에 대한 입장은 첫째, '공동 하지만 차별적인 책임(common but differentiated responsibilities)'이라고 하는 국제환경협약에서 공통적으로 채택되고

있는 기본 원칙을 견지하고 있다. 둘째, 참여하는 국가에게 의무를 부여하는 방식의 협력보다는 참여국이 자발적으로 실천하는 방식의 협력을 선호하고 있으며, 구속력 있는 의무가 있는 합의에는 소극적이다. 셋째, 중국은 개발도상국의 위치에 있기 때문에 선진국과는 달리 경제를 계속 발전시켜야 하는 이른바 발전의 권리(發展權)를 갖고 있다고 주장한다. 이러한 국제환경협력에 대한 중국 정부 입장은 대기관련 국제협력에서도 기본적으로 적용되고 있다.

한중 양자간 그리고 동북아 지역 다자간 환경협력에서 중국 정부가 취하고 있는 태도는 다음과 같다. 첫째, 국제협력의 동기와 목적은 기본적으로 중국 내부의 미세먼지 정책에서 필요한 기술적 정책적 수요를 해결하기 위한 것에 두고 있다. 둘째, 국내 정책의 강화에 따른 국제협력의 수요가 증가하면서 과거에 비해 보다 적극적이고 개방적으로 나서고 있다. 하지만 중국은 한중 양자 협력과 동북아 지역의 다자간 협력을 주도하는 역할을 하고 있지 않으며, 중립적인 위치에서 참여하고 있다. 셋째, 최근 중국의 기술발전과 미세먼지 정책수요를 반영하여 기술과 장비 등 하드웨어(hardware) 분야에서 정책 및 시스템 등 소프트웨어(software) 분야로 협력의 관심이 변하고 있다. 넷째, 다자간 협력보다는 협상과 합의가 보다 용이한 양자간 협력을 선호하며, 양자간 사업을 보다 활발하게 진행하고 있다. 다섯째, 미세먼지 문제와 관련하여 대기오염물질의 장거리 이동에 따른 국가간 영향 문제와 '책임논란'에 대해 매우 민감하며 거부감을 보이고 있다.

2. 동북아시아 다자간 협력

동아시아 지역 차원에서 노력 중인 대기환경개선 노력은 정부간 협의체와 국제기구 주도의 협의체를 통해 구체화하고 있다.

가장 활발히 활동 중인 협의체는 한중일 환경장관회의(TEMM)과 동북아환경협력계획(NEASPEC)이 대표적이며, 한·중·일 3국 연구기관간 협력사업인 동북아 장거리월경성대기오염물질연구사업(Research project for Long-range Transboundary Air Pollutants in Northeast Asia, LTP)도 오랜 협력을 통해 성과를 공유하고 연구자간 네트워크를 구축하고 있다.

1) 한중일환경장관회의(TEMM)

한중일환경장관회의(TEMM)은 급속한 경제성장이 초래한 동북아 지역의 환경악화에 대응하기 위해 동북아 지역경제와 협력에 중요한 역할을 하는 3국의 밀접한 협력 필요성에 따라 1999년부터 운영 중인 정부간 협의체이다.

3국은 기후변화, 대기오염, 생물다양성 등 주요 환경현안에 대한 정책과 경험을 공유하고 있으며, 3국의 관심의제에 맞춰 우선협력 분야를 정하고 5년 단위의 'TEMM 공동행동계획'을 채택하여 분야별 협력사업을 선정·추진하고 있다.

현재는 'TEMM 공동행동계획 2015-2019'에 따라 9개 우선 협력분야에서 37개 협력사업을 이행하고 있다.

[표 5.11] TEMM 우선 협력분야

	제1차 TEMM	TEMM TJAP 2010-2014	TEMM TJAP 2015-2019
우선 협력 분야	–동일한 환경공동체 내에 속한다는 인식 증진 –정보교환 활성화 –환경연구협력 –환경산업 및 환경기술 협력 –대기오염 방지 및 해양환경 보호 –생물다양성과 기후변화 등 글로벌 환경협력이슈 해결	–환경교육, 인식증진 및 대중참여 –기후변화 –생물다양성 –황사 –오염관리 –환경친화사회/3R/건전한자원순환사회 –전자폐기물의 국가간 이동 –화학물질관리 –동북아 환경거버넌스 –환경산업 및 기술	–대기질개선 –생물다양성 –화학물질관리, 환경재난 대응 –자원의 순환적 관리/3R/E-waste 국경간 이동 –기후변화 대응 –물.해양환경보전 –환경교육, 대중인식개선 및 기업의 사회적 책임 –농촌 환경관리 –녹색경제로의 전환

자료: TEMM 홈페이지. http://www.temm.org/sub03/11.jsp?commid=TEMM1

우선협력분야 중 하나인 대기질개선 분야에서는 황사 대응 협력을 포함하여 총 7개 협력사업을 이행 중에 있다.

이 중 대기오염 저감을 위한 협력사업은 '대기오염 한중일 정책대화', '예방·통제분야 과학연구(실무그룹 Ⅰ)', '대기질 모니터링 및 예측분야 기술/정책(실무그룹 Ⅱ)' 등 3건이다.

[표 5.12] TEMM 제2차 한중일 환경협력 실행계획(TJAP) 대기분야 협력

우선협력분야 1 : 대기질 개선

우선협력분야	하위분야	번호	협력활동	설명
1. 대기질 개선	A. 대기오염	1-A-1	대기오염에 관한 한·중·일 정책 대화	3국은 대기오염에 관한 한·중·일 정책대화를 매년 개최할 것이며, 그 의제는 다음과 같다. 1) 각국 대기오염 관련 조치의 진전 2) 지역 대기질 개선 우수사례 및 노력 공유 3) 실무그룹I/II 회의 결과 4) 특정 주제에 관한 정보 교환 5) 향후 활동에 관한 논의 6) 정책대화의 요약문은 TEMM 국장급회의(DGM)에 보고될 것이다.
		1-A-2	실무그룹 I (예방과 통제에 관한 과학 연구)	3국은 대기오염 예방 및 통제겸험, 배출 측정 및 산정의 방법론과 수단, CBA 기반 통제모델을 교환하기 위해 매년 실무그룹 I 회의를 개최할 것이다.
		1-A-3	실무그룹II (대기질 모니터링 및 예측에 관한 기술/정책)	3국은 신기술 및 QA QC기술, 대기질 기준 및 평가방법, 대기질 예측 기술을 교환하기 위해 매년 실무그룹II 회의를 개최할 것이다.
	B. 황사	1-B-1	황사 국장급 회의	3국은 활사문제에 관한 협력을 모색하기 위해 황사에 관한 한·중·일 3국 국장급회의(DSS DGM)를 TEMM하에서 계속해서 매년 개최할 것이다.
		1-B-2	황사 운영위원회	3국은 실무협의체로서의 황사운영위원회를 계속해서 운영하며, 운영위원회 회의를 매년 개최할 것이다.
		1-B-3	황사 WG I, WGII 및 관계 회의	3국은 실무그룹 I,II의 중기실행계획(2016-2019)에 따라 WG I (모니터링, 예측 및 조기경보)과 WGII(예방 및 통제)의 공동연구를 계속해서 추진할 것이다.
		1-B-J1	한·중·일 WG I, WGII 공동 워크숍	각 실무그룹의 유관활동을 연계시켜 황사 공동 연구(WG I, WGII)의 시너지 효과를 효과적 및 효율적으로 증대시키기 위해서, 3국은 황사 대응 복원조치의 예방 및 통제 효과 평가 기법을 공동으로 개발할 것이다.

자료: 추장민(2019.6.19), "미세먼지 대응 한·중 협력 강화 전략"

대기질 개선분야의 협력사업은 2013년 개최된 제15차 TEMM에서 한국의 제안으로 만들어졌는데, 당시 3국은 초미세먼지, 오존, 휘발성유기화합물 등 대기오염물질로 인한 국민건강 위협과 환경피해 저감을 위해 3국의 협력이 필요하고, 대기 관련 현안 문제를 논의할 수 있는 3국 실무급 협력체계를 강화하기로 하였다.

이에 따라 환경부 과장급 협의채널인 '대기오염 한중일 정책대화'가 만들어졌고 이 틀 안에서 대기오염 관리 정책을 공유하고 관련 과학연구를 체계적으로 시행하기 위하여 두 개의 실무그룹이 신설되었다.

실무그룹 I 은 휘발성유기화합물(VOCs) 관리, 도로 및 비도로 이동오염원 관리에 중점을 두고 대기오염물질 배출저감 및 관리에 관한 정책을 공유하고 연구활동을 추진하고 있으며, 실무그룹 II 는 오존(O_3), 초미세먼지(PM-2.5)에 대한 대기오염물질의 모니터링 기법, 배출 인벤토리 기술 및 방법, 대기오염물질 원격측정 및 모델링 등 대기질 감시 및 예측에 중점을 두고 관련 정책과 정보를 교환하고 있다.

[표 5.13] 대기질 개선분야 2개 실무그룹 논의진전

구분	WG 1 VOCs(대기오염 방지·관리 과학연구)	WG 2 PM-2.5, O_3(대기오염 감시·예측 기술·정책)
'17년	- VOCs 오염관리 인센티브·페널티 공유 합의 - 도장.코팅 분야 VOCs 배출 인벤토리 연구 강화	- 비도로 이동오염원 배출계수 산정방법론 공유 합의 - 대기질 측정, 모니터링 및 예경보 표준화 연구 강화
'18년	- 인쇄·도장 분야 VOCs 오염관리 경험 공유 및 VOCs 배출 인벤토리 연구 논의	- 대기오염물질(O_3, PM-2.5) 데이터 관리 및 비도로 이동오염원 배출량 인벤토리·산정방법론 논의
'19년	- 차량 배출 관리 사례 및 인벤토리 구축 정책 공유	- 고농도 발생시의 모니터링 및 모델링 결과 공유, 3국간 실시간 모니터링 데이터 공유 계획 논의

2) 동북아환경협력계획(NEASPEC) 동북아청정대기파트너십(NEACAP)

동북아환경협력계획(NEASPEC; North-East Asia Subregional Programme for Environment Cooperation)은 1993년 황사, 대기오염 등 동북아 환경문제 대응협력을 위해 유엔아태경제이사회(UNESCAP)가 주도하는 역내 유일의 포괄적 정부간 협의체이다. 현재 한국, 중국, 일본, 북한, 러시아, 몽골이 참여하고 있다.

NEASPEC은 "현재와 미래세대의 삶의 질 제고를 위해 지역환경협력과 지속 가능발전 노력을 촉진하는 것"을 목표로 정하고, 중장기 비전인 「NEASPEC Strategic Plan 2016-2020」에 따라 월경성 대기오염, 자연보전, 해양보호구역, 저탄소도시, 사막화 및 토지황폐화 등 역내 환경이슈에 대한 협력방안을 논의하고 있다.[206]

206) NEASPEC (2016), "Strategic Plan 2016-2020"

매년 정례적인 고위급회담(SOM, Senior Official Meetings)을 개최하여 협력 확대방안을 논의하고 있으며, 2018년 10월 개최된 제22차 고위급회의에서 역내 대기오염저감에 목적을 둔 동북아 청정대기파트너십(NEACAP, North-East Asia Clean Air Partnership)을 출범시키는 성과를 거두었다.

NEACAP은 NEASPEC 회원국이 참여하는 NEASPEC 산하의 대기 협의체로서 동북아 지역 과학・정책・기술협력, 연구결과 기반 정책개발 기여 등을 목표로 하고 있다.

NEACAP 운영규정에 명시된 NEACAP의 세부 목적은 ▲ 과학, 정책, 기술부문을 포함한 환경협력 촉진, ▲국가 및 월경성 대기오염 문제에 관한 정보와 경험 공유 확대, ▲동아시아 월경성 대기오염문제를 해결하기 위한 자발적인 협력 틀(framework) 마련, ▲지역과 국가의 과학연구에 기초하여 대기오염을 해결하는 국가 및 지역 정책 개발 지원, ▲동북아 지역 대기오염의 환경과 인간건강 영향에 대한 지식을 증진하는 것이다.

NEACAP은 목적 실현을 위해 회원국간 정기 및 비정기적 회의 개최, 매년 또는 격년의 지역 리뷰 리포트 작성, 세미나・워크숍・교육훈련, 연구프로젝트의 방식의 협력활동을 진행할 예정이다.[207]

최근 NEACAP 사무국을 중심으로 각국 전문가로 구성된 과학정책위원회(Science and Policy Committee)와 기술센터(Technical Center)를 구성하였으며[208], 2019년 7월 4일~5일에 'NEACAP 동북아대기협력 라운드테이블'과 '제1차 NEACAP 과학정책위원회(SPC) 및 기술센터(TC) 회의'를 개최하며 활동을 본격화하였다.[209]

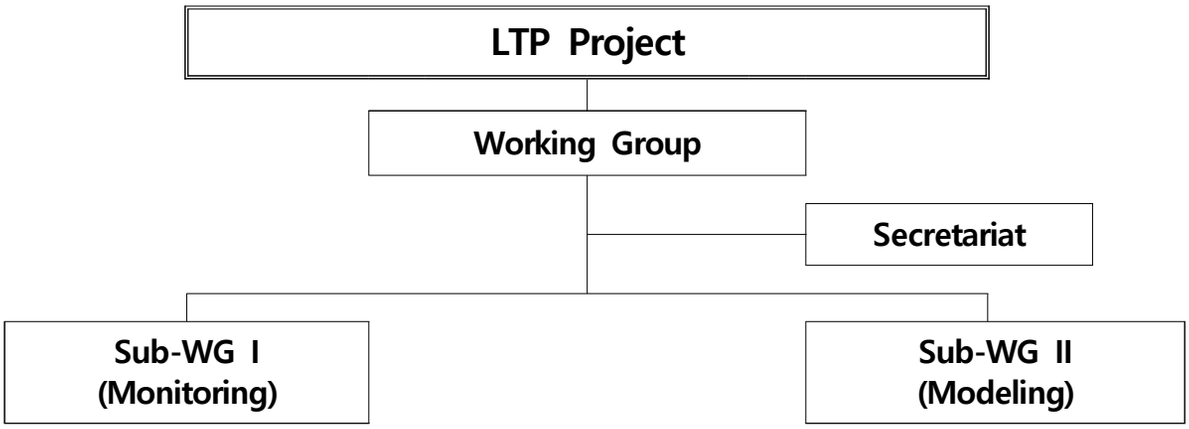
이번 제1차 회의에서는 NEACAP의 구체적인 활동으로 배출인벤토리 구축, 과학분석보고서 작성, 통합평가모델링 수행, 정책대화 추진 방향 등이 논의되었다.[210]

3) 동북아장거리월경성대기오염물질연구사업(LTP 프로젝트)

LTP 프로젝트는 1995년 한국의 제안으로 시작된 사업으로 동북아 장거리이동 대기오염물질(미세먼지, 질소산화물, 황산화물 등)의 국가간 배출・이동・침적에 관해 공동 연구하여 동북아 장거리 대기오염물질에 대한 모니터링 체계를 구축하고 장거리이동 대기오염물질에 대한 효과적인 대응책을 마련하는 것을 목적으로 하며 우리나라 국립환경과학원이 사무국 역할을 수행하고 있다.

---

207) UNESCAP (2018), "Review on programme planning and implementation"-Annex. Terms of Reference for NEACAP
208) 외교부 보도자료 (2018.10.26.), "제22차 동북아환경협력프로그램(NEASPEC) 고위급 회의 개최"
209) 외교부 보도자료 (2019.7.3), "동북아청정대기파너십(NEACAP) 제1차 회의 및 동북아대기협력라운드테이블 개최"
210) UNESCAP (2019), "Discussion Paper on the Workplan of the NEACAP"



[그림 5.10] LTP 추진 체계

자료: 국립환경과학원(2019.7.10), "LTP 사업 개요 및 LTP 전문가회의 개최결과"

본 사업은 단계별 연구계획에 따라 이행되고 있는데, 본격적인 연구활동을 추진한 것은 2005년부터이며 황산화물, 질소산화물, 초미세먼지의 배출원-수용지 관계를 분석하고 있다.

배출원-수용지 분석은 장거리 이동한 대기오염물질이 정량적으로 어느 지역으로부터 얼마만큼의 영향을 받았는지 분석하는 것이다.

3국은 매년 전문가회의에서 각각 모니터링 지점에서 대기오염을 측정하고 장거리 이동 대기오염물질을 산정할 수 있는 모델링의 결과를 논의하고 있다.

한중일 3국이 합의한 모니터링 지점은 중국 다롄, 샤먼, 투지와 일본 리시리, 오키, 한국의 강화, 태안, 고산, 백령이다. 각국의 모델링 결과는 3국이 합의한 경우 대외에 공개하는 것을 원칙으로 한다.

2004년에 제1단계(2000~2004) 연구결과가 한중일 3국 합의에 의해 자국의 연구결과를 공개한 바 있는데, 해당 연구에서 우리나라에 1년 동안 침적되는 전체 황산화물의 20%가 중국으로부터 이동한 것으로 확인되었다.[211]

이후의 연구결과는 공개되지 않고 있는데, 2017년 8월 개최된 제19차 한중일 환경장관회의에서 LTP 연구결과보고서를 발간 및 공개하는 것에 합의가 되어 2017년 10월에 개최된 제20차 LTP 전문가회의에서 그 동안의 사업결과를 담은 종합평가보고서 발간을 중점적으로 논의하였다.

3국 합의에 기초하여 2018년에 개최된 제20차 한중일 환경장관회의까지 요약

211) 이혜경 (2017), "동북아 장거리이동 대기오염물질 공동연구(LTP)", 「지료로 보는 이슈」 국회입법조사처

보고서를 발간할 예정이였으나, 중국측의 반대로 연기되었고, 다시 중국측의 의견을 반영하여 수정된 요약보고서를 2019년 11월 개최예정인 제21차 한중일장관회의 전까지 발간하기로 재합의한 상태이다.[212)]

[표 5.14] LTP 사업 단계별 연구 내용

단계	기간	내용
Preparatory stage	1995년~1999년	- 사무국 설치 및 공동연구 합의, 단계별 공동연구 채택
Stage 1	2000년~2004년	- 공동연구 기반 구축(모니터링, 모델링, 배출목록에 대한 국제협력 체계 구축) - 대기오염물질 농도 및 배출량 데이터베이스 구축, 모델링 시스템 구축 - 측정지점 선정 및 대기오염농도 상시측정
Stage 2	2005년~2007년	- 각국 대표 측정지점(3국 각 1개에서 대기오염농도 동시 집중측정 시작(`07~) - 한·중·일 대기오염의 상호영향 연구를 위한 3국 합의 배출량 산정 - 황산화물의 배출원-수용지 관계 모의 연구
Stage 3	2008년~2012년	- 대기오염농도 상시 측정 및 각국 대표지점에서의 집중측정 - 황산화물, 질소산화물에 대한 배출원-수용지(S-R) 관계 분석
Stage 4	2013년~2017년	- 모니터링 및 모델링 분야 가이드라인 마련 - PM-2.5 장기 관측 결과 분석(`14~) 및 집중측정 시행(`15~) - PM-2.5에 대한 배출원-수용지(S-R) 관계 분석
Stage 5	2018년~2022년	- 장거리이동 대기오염물질의 지역 간 상호영향 연구·규명

자료: 국립환경과학원(2019.7.10), "LTP 사업 개요 및 LTP 전문가회의 개최결과"; 환경부 보도자료(2018.11.22), "동북아 장거리 대기오염물질 한중일 전문가 회의 개최"

3. 국제협력 부문 주요 이슈

미세먼지 문제를 해결하기 위한 국제협력의 과정에서 나타나고 있는 주요한 이슈는 다음과 같다.

212) 환경부 보도자료 (2019.2.26), "실질적 조기경보체계 구축을 위한 이행계획 마련"

1) 미세먼지의 국가간 장거리 이동 및 영향

국제적으로 대기오염물질의 국가간 장거리 이동과 영향에 대한 연구결과는 국제협력을 위한 과학적 근거로 활용되어 왔다. 그런데 동북아 지역에서는 이와 관련한 연구가 많지 않고, 일부 연구결과는 공개되지 않고 있다. 연구결과도 서로 다르고 그 차이도 크다. 또한 미세먼지의 발생 원인이 다양하고 복잡하기 때문에 과학적으로 밝혀내지 못한 부분도 적지 않다.

때문에 이 문제에 대한 국가간, 연구자간 상호 신뢰하는 정도가 높지 않고, 미세먼지의 국가간 장거리 이동과 영향에 대한 과학적 공감대가 형성되어 있지 않은 상황이다.

오랫동안 과학적인 연구조사의 결과를 바탕으로 국제협력을 추진해 온 유럽과 북미의 사례와 비교해 보면 동북아 지역은 국제협력을 위한 과학적인 기반이 매우 취약하다고 할 수 있다. 이러한 여건은 동북아 지역에서 미세먼지 해결을 위한 국제협력의 제약요소로 작용하고 있다.

2) 국제협력의 방향

국내에서 논의되고 있는 미세먼지를 해결하기 위해 정부가 중국과 인근 국가들에게 취해야 할 국제협력의 방향에 대해 다음과 같은 주장이 있다.

첫째, 중국에게 책임을 추궁하고 미세먼지 배출량을 더욱 줄일 것을 요구해야 한다.

둘째, 중국과의 '책임공방' 보다는 미세먼지 기술협력 등을 강화해야 한다.

셋째, 한중 양국간 협력보다는 일본, 러시아, 몽골 등이 참여하는 동북아 지역의 다자간 협력을 강화하여 문제를 해결해야 한다.

넷째, 동북아 지역 국가들과의 협력에만 머물지 말고 UN 등 국제기구를 활용하여 전 지구적 차원으로 협력 범위를 확대해야 한다.

다섯째, 미세먼지뿐만 아니라 미세먼지-기후변화-에너지 문제를 서로 연계하여 환경과 경제가 상생하는 협력을 해야 한다.

3) 미세먼지 저감 협력체계

미세먼지 저감 협력체계는 미세먼지 국제협력의 전략과 정책선택에 관한 이슈이다.

첫 번째 이슈는 협력체계에 참여하는 국가의 범위에 관한 것으로, 한중 양자간 협력에 초점을 둘 것인가 아니면 동북아 다자간 협력에 초점을 둘 것인가에 관한 논의이다.

두 번째 이슈는 협력체계에 관한 국가간 합의(협정)의 성격에 관한 것으로, 유럽이나 북미의 사례처럼 참여하는 국가에게 강제적으로 저감의무를 부여할지 아니면 기후변화 파리협약과 유사하게 국가가 스스로 저감을 결정하게 할 것인가에 대한 논의이다.

세 번째 이슈는 미세먼지 감시와 평가 체계, 미세먼지 감축 체계, 고농도 미세먼지 긴급대응 체계의 3개 영역으로 구성된 협력체계의 세부적인 구축방안과 우선순위에 관한 논의이다.

이러한 논의에서는 기존의 협력체계의 활용 가능성, 협력체계 구축의 실효성, 각국의 관심사 및 수요, 한중 관계 및 동북아 지역의 국가간 관계와 특수성 등의 요소가 핵심적으로 고려되고 있다.

제5장 요약

- 우리나라는 1990년대 초부터 미세먼지 문제를 해결하기 위하여 중국과 양자간 협력과 동북아 지역 국가들과 다자간 협력을 진행하여 왔다.
- 한중 양자간 협력사업으로는 대기오염방지 실증인증사업, 한중대기질 공동연구단, 한중 대기질 측정정보 공유체계 구축 운영 등이 대표적이다.
- 2019년 2월 한중 환경장관회의에서는 기존의 한중 대기오염방지 협력사업을 '한중 청천(晴天) 프로젝트'에 하나로 통합하여 한중 미세먼지 협력 기반으로 확대 발전시키기로 합의하였다.
- 향후 대기질 측정자료 공유 시스템 확대, 고농도 미세먼지 긴급대응 공동행동 조직, 미세먼지의 실질적인 감축 협력 등 종합적이고 체계적인 미세저감 협력사업으로 발전시켜야 하는 과제를 갖게 있다.
- 2018년 북경에 설치된 한중환경협력센터가 앞으로 한중 양자간 미세먼지 협력사업의 컨트롤타워로서 총괄 조정하는 역할을 담당한다.
- 동북아 지역의 다자간 협력은 한중일환경장관회의(TEMM) 공동행동계획(2015~2019)의 대기질 개선 사업, 동북아환경협력계획(NEASPEC)의 동북아청정대기파트너십(NEACAP), 동북아장거리대기오염물질연구사업(LTP) 등이 있다.
- 미세먼지 국제협력의 강화를 위하여 국내에서는 미세먼지의 국가간 장거리 이동 및 영향, 국제협력의 방향 및 협력체계 구축 방안에 대해 주로 논의하고 있다.

06
과학적 기반 강화

1. 배출량 산정 ····· 171
2. 미세먼지 측정 ····· 175
3. 미세먼지 원인규명 개선 ····· 179
4. 미세먼지 예보 고도화 ····· 181
5. 건강 영향 ····· 187
6. 국제공동 연구 ····· 189
7. 과학적 기반 강화 관련 주요 이슈 ·· 191
8. 요약 ····· 194

국민정책참여단

미세먼지 정책제안 참고자료집

제6장 과학적 기반 강화

울산과학기술원 | **송창근**

우리나라도 이제 국민소득 2만 불을 넘어 3만 불 시대에 접어들면서 미국, 유럽 등 선진국과 같이 미세먼지 문제 등으로 대표되는 환경과 안전에 대한 특단의 대책, 특히 과학적 수단을 통한 문제해결을 요구하는 국민적 목소리가 높아지고 있다. 특히, 우리나라의 미세먼지 오염은 단순히 국내 오염원의 영향만이 아닌 중국 등 주변 국가들과도 밀접한 상호연계가 있어 이를 올바르게 모니터링하고, 배출량을 산정하며, 저감을 위한 상호협력과 공동노력 등의 중요성이 커지면서 과학적 기반을 구축해 나가는 노력이 무엇보다도 절실하다.

제6장에서는 현재 정부가 추진하고 있는 미세먼지에 대한 배출량 산정, 미세먼지 측정, 원인규명 과정과 방법, 미세먼지 예보, 건강영향 연구와 국제공동 연구 등에 대해 살펴보고 그 한계와 문제점, 개선방안 등을 살펴보고자 한다. 현재 정부는 나름 과학적 기반 하에 미세먼지 문제를 풀기 위한 해결책을 마련해 나가고 있으나, 많은 국민들이 정부정책에 대한 불신이 심각한 상황에서 정부는 정책 신뢰도를 높이기 위해 보다 적극적인 노력을 할 필요가 있다.

1. 배출량 산정

미세먼지 문제 해결의 과학적 첫 단추는 미세먼지와 원인 물질[213]이 어디서 얼마나 배출되는지를 정확히 아는 것이 중요하다. 즉, 분야별로 정확한 배출 현황을 파악함으로써, 감축정책을 입안하는 정책결정자와 모델 등을 통해 예보를 생산하는 연구자 등의 수요자에게 신뢰성 있는 자료를 생산하여 제공하는 것이 필요하다.

대기오염물질의 국가 배출 통계는 국립환경과학원의 기후대기연구부에서 담당하여 매년 발표해 오고 있다. 국립환경과학원에서는 배출통계를 생산하기 위해 굴뚝

213) 미세먼지는 배출원에서 처음부터 미세먼지로 배출되기도 하며, 질소산화물(NOx), 황산화물(SOx), 암모니아(NH_3), 휘발성유기화합물질(VOCs) 등이 광화학반응 등을 통해 미세먼지를 생성하기도 한다. 국립환경과학원 발표와 전문가들의 연구결과에 따르면, PM-2.5의 경우 미세먼지로 배출되는 양에 비해 이들 원인물질이 결합하여 2차적으로 생성되는 미세먼지가 60~75%로 더 큰 양을 차지하고 있다. 이러한 결과는 단순히 미세먼지 통제만으로는 문제 해결이 어려우며, 이들 가스상 물질도 함께 줄이는 노력이 필요하고 중요함을 보여주고 있다.

관리시스템(CleanSYS)[214], 대기배출원관리시스템(SEMS)[215] 데이터를 활용하여 대기오염물질 배출목록(Emission Inventory)을 구축하고, 이를 근거자료로 이용하여 국가대기정책지원시스템(CAPSS)[216]을 통해 국가 배출량을 추정, 생산하고 있다.

[그림 6.1] 국가대기정책지원시스템(CAPSS) 개요

좀 더 구체적으로 살펴보면, 에너지, 산업연소, 사업장(유기용제 포함) 중 점오염원의 경우는 대기배출원관리시스템(SEMS)에 취합되는 직접적인 측정자료 기반으로 배출량이 산정되고 이를 제외한 나머지 연료 연소에서 발생되는 배출량은 석유공사, 석탄협회, 도시가스 회사 등의 통계자료를 활용한다. 수송(도로 및 비도로) 부분은 도로이동오염원으로 분류되는 데 국내 자동차 관리법 규칙에 따라 분류된 차종별 경형, 소형, 중형, 대형으로 나누어 사용 연료 별로 개발된 배출계수와 운행 거리를 이용하여 배출량이 산정된다.[217]

정부가 매년 배출량 통계를 작성하여 발표해 오고 있으나, 산정된 배출량의 정확도, 신뢰도에 대한 문제가 지속적으로 제기되고 있다. 이러한 문제의 원인으로는 다음과

214) 굴뚝원격감시체계(CleanSYS) : 사업장 굴뚝에서 배출되는 대기오염물질을 자동측정기기로 상시 측정하고 이를 관제센터와 온라인으로 연결하여 배출상황을 24시간 관리하는 시스템
215) 대기배출원관리시스템(SEMS) : 대기환경보전법 제17조 및 동법 시행규칙 제16조에 따라 체계적인 조사를 위하여 대기배출원조사 중장기계획을 수립하여 국가 대기보전 정책수립 및 관련 연구에 필요한 기초자료를 확보하고, 신뢰성 있는 대기배출원 DB를 구축하고 관리하기 위하여 웹기반 배출원 관리 시스템
216) 대기정책지원시스템(CAPSS) : 국가 대기보전 정책수립 및 관련 연구에 필요한 기초자료 확보를 위하여 점면·이동오염원 등에서 배출되는 8가지 대기오염물질 배출량을 매년 산정 오염물질별, 배출원별, 지역별 다양한 배출량 통계와 배출량에 적용된 세부정보 제공하는 시스템
217) 국립환경과학원 (2018), 2015 국가 대기오염물질 배출량

같은 내용들이 제기되고 있다.

① 어느 정도 배출량을 산정하는 방법론이 구축되어 있다 할지라도 산업시설 변동과 신차 출시와 차량 폐차 등 계속 변화하는 오염원과 배출정도에 대한 정밀한 추적이 어렵다는 문제

② 모든 배출원을 상시 측정하기 어려움에 따라 대푯값으로 적용하는 배출계수가 현실과 괴리되는 점

③ 현재 정부(국립환경과학원)가 오염원과 배출현황에 대해 충분히 파악하지 못해 미확인 또는 누락되는 배출원이 존재하는 점

④ 앞서 설명한 바와 같이 미세먼지는 이차 생성물의 영향이 더 큰데, 대기 중에서 나타나는 미세먼지 생성과 소멸 등 반응메커니즘을 충분히 파악하지 못하고 있다는 점

⑤ 미세먼지 문제가 국내요인뿐만 아니라, 해외에서의 이동도 중요한데, 중국 등 주요국의 배출량 통계를 제대로 파악하지 못하고 있다는 점

⑥ 그리고 마지막으로 배출량을 산정하는 조직의 기반이 매우 취약하다는 점

이러한 문제 중 현 통계 체계내에서 수시로 발생되는 변동에 대해서는 정부도 통계자료 개선과 국내외 연구결과 등을 이용하여 매년 개선해 나가고 있으며, 가스상 물질로부터 2차적으로 생성·소멸되는 미세먼지에 대해서는 지속적인 전문가 연구 등을 통해 풀어야 할 숙제로 판단된다.

따라서, 국가배출량 통계의 신뢰도 확보 및 정확도 개선을 위해 우선 보강해야 할 과학적 기반은 ①현행 통계체계에서 누락된 배출량을 시급히 발굴하고 새로운 배출계수를 보완하여 기존 배출량을 개선하는 것과 ②중국 등 주변국과 협력을 통해 국내외 배출량과 영향을 보다 정확하게 파악하는 작업, ③국가 배출량 정보를 체계적으로 생산·관리하는 전문적 조직을 시급히 설립·운영하는 것 등을 들 수 있다.

□ 누락 배출원 및 배출계수 보완

현재 전문가들이 제기하고 있는 주요 누락 배출원과 배출량으로는 고기구이, 숯가마, 화목연료 등 국가에서 관리가 이루어지지 않고 있는 시설 등에서의 연소 부분과 나대지 및 도로에서 바람이나 차량이동 등의 영향으로 발생하는 비산먼지, 그간 오염원 관리가 제대로 이루어지지 못했던 항만·공항, 농·축산부문, 국방부분 배출 등을 들 수 있다.

또한 검댕(black carbon)이나 경유차 실제 도로 주행 등의 분야에서는 실제 발생량을 고려할 수 있는 새로운 배출계수 개발과 기존 배출계수를 보완하는 작업도 필요한 것으로 제기되고 있다.

아울러, 그간 상대적으로 배출량 산정에서 소홀했던 소규모 사업장[218]에 대해 배출원 전수조사 주기[219]를 현행 4년에서 매년으로 강화할 필요가 있으며, 소규모 사업장 기본정보를 포함한 업종·공정·시설정보 및 운영기록 정보가 입력 가능한 배출원 조사 시스템을 구축해야 할 것이다.

그리고 현행 상향식(bottom-up) 국가 배출량 통계를 보완하고 미확인 또는 누락 배출원의 정성적 파악을 위해 위성자료[220] 등을 이용하여 산출 가능한 하향식(top-down) 배출량을 적극적으로 활용할 필요가 있다.

[그림 6.2] 국가 대기오염물질 배출량 산정방법 개요

□ 국가 배출량 정보 관리 전문 조직 설립 및 운영

미세먼지를 포함한 오염물질의 배출량을 정확히 파악하기 위해서는 사업장 등 오염원에 대한 상시조사와 산업 및 기술변화 등을 반영한 배출계수 개발, 누락된 오염원을 찾는 조사작업의 착수, 2차 생성물질에 대한 과학적 규명, 국내외 배출량 산정에 대한 파악과 협조 등 많은 부문에서 전문적인 연구와 노력을 필요로 한다. 그러나 우리나라는 현재 전문인력과 예산 등이 이들 작업을 수행하기에는 많이 부족한 현실이다.

218) 연간 대기오염물질 발생량에 따라 대기환경보전법에서 4종(2~10톤), 5종(2톤 미만)으로 구분된 사업장으로, 전국적으로 5만여 개소로 추정하고 있다. 이들 사업장은 수시로 신규 등록과 폐업 등이 이루어지고 있어 정확한 통계 파악에 제한이 있다.
219) 배출원규모(오염물질 발생량)에 따라 단계별로 조사로 1, 2, 3종은 매년 조사, 4, 5종은 매 4년마다 조사(단, 대기배출사업장 현황은 매년조사)
220) 우리나라는 2020년 세계 최초로 정지궤도 환경위성(GEMS)을 발사할 예정으로 있다.

이에 최근 시행(2019.2.15)된 '미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법'에서는 배출량 정보의 체계적인 관리를 위해 국가미세먼지정보센터를 설치토록 규정하고 있다. 미세먼지에 대한 통계적 정확성과 신뢰성을 높이기 위해서는 동 법률에 따른 전담조직을 시급히 설치하여 제대로 된 역할을 수행토록 해야 할 것이다. 그리고 새롭게 설립·운영될 센터는 배출량 정확도 향상을 통해 신뢰도를 높이고, 중국을 포함한 동아시아 지역의 배출량 생산 절차, 기준, 체계 등을 표준화하는 노력을 통해 국내·외 배출량 거버넌스를 선도해야 할 것이다.

2. 미세먼지 측정

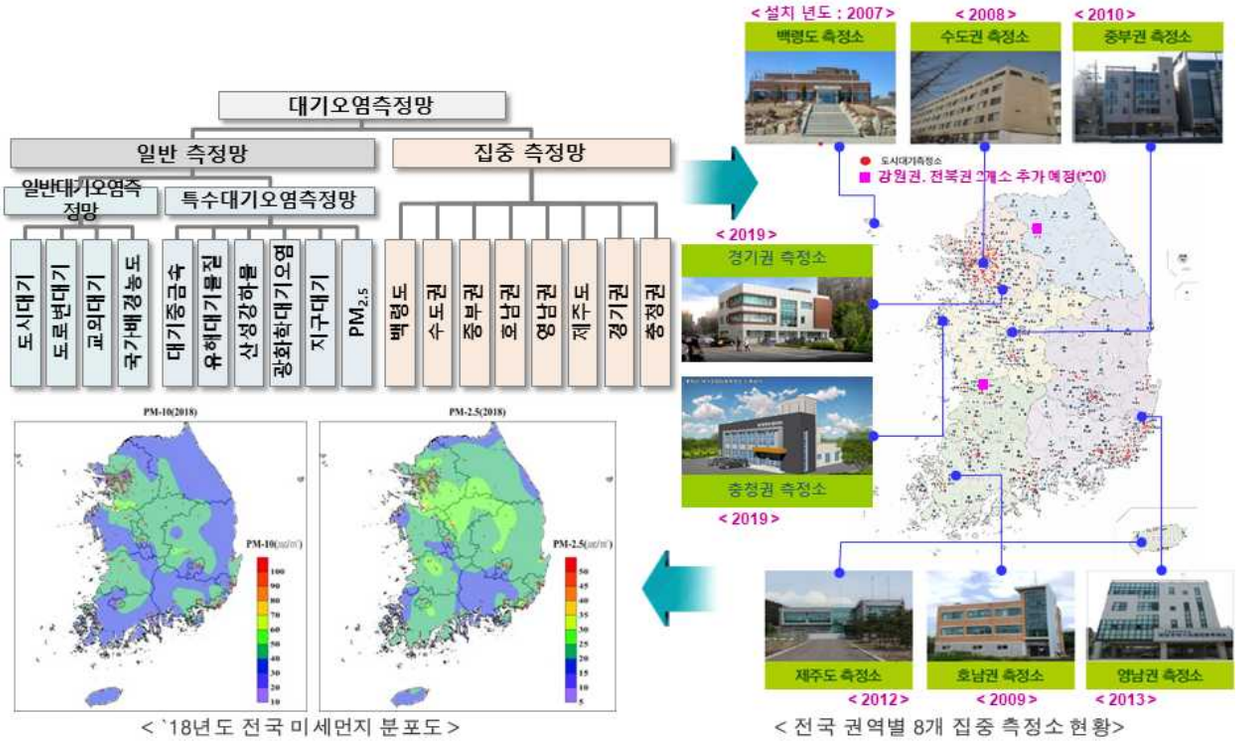
현재 우리나라는 중앙정부와 지자체가 운영하는 기준성 대기오염물질 측정소(도시대기, 도로변대기, 교외대기, 국가배경)(441개), 산성강화물측정망(42개), 중금속측정망(56개), 초미세먼지 성분측정망(42개), 유해대기측정망(37개), 광화학오염물질측정망(18개)을 운영하고 있다.[221] 최근 미세먼지에 대한 국민들의 건강피해 우려가 높아짐에 따라 정부는 미세먼지 등 대기오염물질 측정을 위한 측정소를 추가로 신설(2012년: 250개소 →2019년: 30여 개소 증설 → 2022년: 500개소로 확대)할 계획에 있다. 그러나 수도권 외 지역에서는 측정망이 상대적으로 부족[222]하여 국민이 체감하는 미세먼지 오염도와 측정망이 제공하는 미세먼지 농도 차이가 발생한다는 의견이 많다.

또한 산업단지 등 직접 배출원 주변에 거주하는 주민들은 도시대기 측정망에서 미세먼지 농도 관측값의 신뢰도에 대해 문제를 제기하곤 한다. 이는 기존 도시대기 측정망이 산단/도심지/거주지 등 도시 전체 농도를 대표할 수 있도록 각 측정소의 입지가 선정되었기 때문에 특정 배출원 특성 및 배출량을 상시 감시할 수 있는 능력이 크게 부족하기 때문이다.

그간 정부의 노력에도 불구하고 측정소의 배분, 측정망의 밀도 등에는 많은 개선의 여지가 있다. 고농도 미세먼지 현황 및 물리·화학적 특성 파악, 저감 정책 및 피해 예방 대책 수립/이행 등에 가장 기초적인 정보를 제공하는 미세먼지 측정 체계를 개선하기 위해, ① 국가 대기 측정망 데이터의 공감/체감도를 높여 대국민 신뢰도 향상 및 소통, ② 고농도 현상의 이해를 위한 다각적이고 통합적·과학적인 분석, 그리고 ③ 사용자(정책결정자, 연구자 등)에 측정 자료를 신속히 제공함으로써 국가

221) 환경부/국립환경과학원 (2018), 대기오염측정망 설치·운영지침
222) 도시대기 측정소는 인구수에 비례하여 설치하기 때문에 인구수가 적고 면적이 큰 지역은 측정소 밀도가 낮다.

미세먼지 측정 데이터의 활용을 극대화할 필요가 있다.



< '18년도 전국 미세먼지 분포도 >

< 전국 권역별 8개 집중 측정소 현황>

[그림 6.3] 국가 대기오염측정망 현황

1) 국가 대기 측정망 데이터의 공감/체감도 향상 및 소통

우선 수요자(특히, 미세먼지 민감/취약계층)가 미세먼지 농도 측정치의 신뢰도를 공감할 수 있도록 맞춤형 측정 데이터를 제공할 필요가 있다. 이를 위해 향후 확충(2022년 500개소)될 도시대기 측정망은 어린이집, 학교 주변 등 취약계층을 보호할 수 있는 지역 그리고 수도권 외 미세먼지 다배출 우심지역(예, 화력발전소, 소각장 주변)에 우선적으로 배치할 필요가 있다. 즉, 주민의 실생활에서 확인하고 감시할 수 있는 측정망의 확충과 측정치의 신뢰도 향상을 위한 노력이 필요하다는 것이다.

한편, 측정망의 확충에도 존재할 수밖에 없는 측정의 사각지대에 대해서는 대체 측정방법(예, 환경위성 등)을 활용하여 보완할 수 있는 방법에 대한 연구개발도 병행해야 할 것이다. 또한 최근 초미세먼지 관심이 높아짐에 따라 민간 기업(KT, SKT 등)이 국가측정소의 수배에 달하는 측정소를 운영하고 자료를 제공하고 있다. 그러나 민간 측정에 사용되는 간이 측정 장비는 미세먼지특별법의 엄격한 규정에도 불구하고 아직 오차가 크다는 지적이 있어, 지속적인 정도관리가 필요하다는 의견이 대다수 전문가에 의해 제시되고 있다.

2) 고농도 현상의 이해를 위한 다각적이고 통합적·과학적인 분석

미세먼지 측정망을 늘린다고 모든 문제를 해소할 수는 없다는 것이 전문가들의 대다수 견해이다. 따라서, 다양한 시·공간적 고농도 미세먼지 등의 과학적이고 통합적인 현상 이해를 위해서는 항공기와 선박, 지상원격탐사, 환경위성 등을 활용한 미세먼지 입체 측정과 함께, 집중측정소 구축 및 광화학오염물질 측정망 등을 활용하여 미세먼지의 화학적 성분 측정을 강화할 필요가 있으며, 생산된 자료에 대한 체계적인 분석도 강화할 필요가 있다.

이를 위해서는 현재 정부가 계획 중인 2단계 한·미 공동조사 및 연구(KORUS-AQ)[223], 중국과의 청천프로젝트 항공측정 공동연구[224]를 통한 3차원적 입체적 측정 자료와 2020년 발사될 정지궤도 환경위성(GEMS)에서 생산되는 위성 자료를 활용하여 미세먼지 발생원인, 장거리이동영향 등에 대한 과학적 증거자료를 확보할 연구·개발 추진이 중요하며, 시급하다.

[그림 6.4] 한·미 대기질 공동연구(KORUS-AQ) 개요

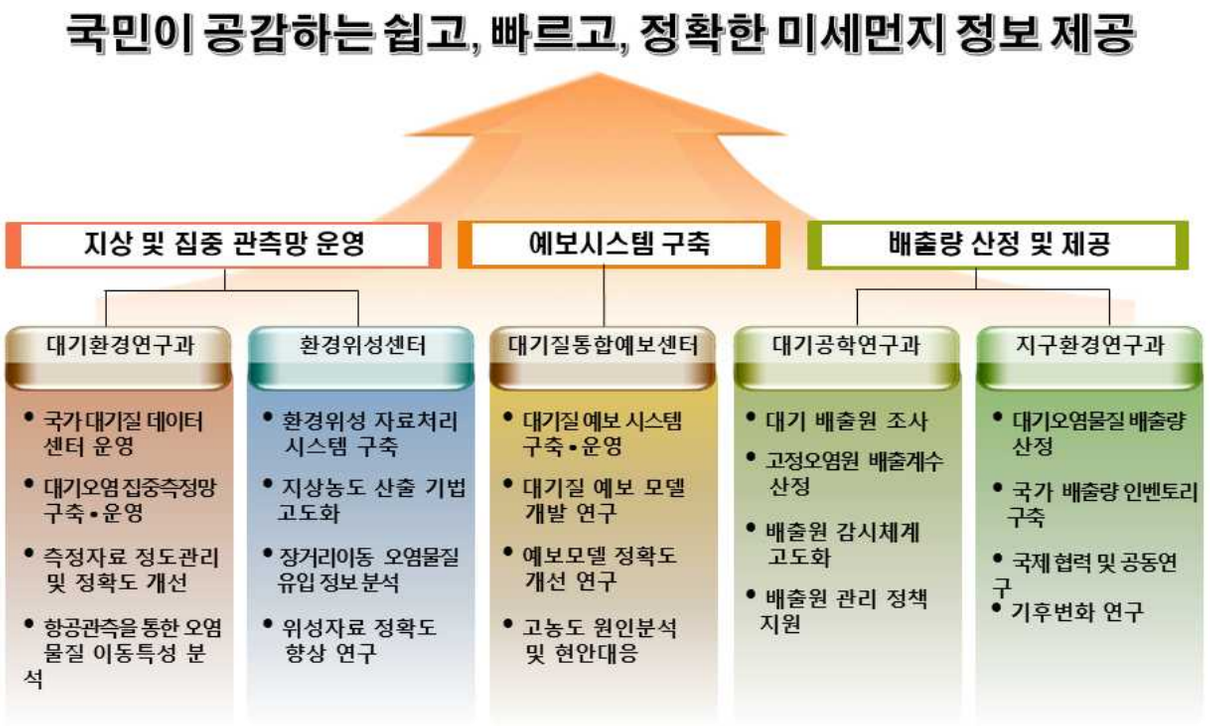
223) 국립환경과학원 (NIER)과 미국항공우주국 (NASA)에 의해 수행된 한미 대기질 합동 연구 (KORUS-AQ)로 2016년 5월부터 6월 초까지 항공기, 지상 관측소, 선상에서 관측을 수행되었다.
224) 환경부 (2019). “한중환경협력사업 ”청천(晴天, 맑은 하늘) 계획“ 이행방안”

3) 사용자에 측정 자료 신속히 제공

신뢰성 있는 대기질 진단자료를 정책결정자와 관련 연구자에 신속히 제공하기 위해, 국가 미세먼지 측정결과 공개시스템을 구축하고, 국내 전문가 그룹과의 공동연구를 추진하는 것이 바람직하다. 이를 위해서는 현재 국립환경과학원에 분산된 데이터의 연계・통합을 위한 통합 플랫폼을 구축하고 미세먼지 측정결과를 확정, 발표하는 주기를 현행 평균 6개월에서 3개월 이내로 단축하여 보다 신속하게 전문가 및 일반 국민에게 공개할 필요가 있다.

이를 위해서는 권역별 대기오염집중측정소 협력기관을 지정하여 자료 확정에 가장 많은 시간이 소요되는 집중측정소의 화학 성분분석 등에 전문가그룹을 활용하는 게 바람직하다.

또한 실질적인 미세먼지 측정망을 운영하고 측정 데이터 생산, 확정을 담당하는 국립환경과학원의 인적・물적 기반을 획기적 보강함과 동시에 데이터 가공을 통한 맞춤형 정보를 제공하게 될 국가 미세먼지정보센터와의 유기적 협력 체계를 구축하는 것이 중요하다.



[그림 6.5] 미세먼지 통합 데이터 플랫폼 개념도

3. 미세먼지 원인규명 개선

최근 겨울철, 봄철 고농도 발생 일수 증가로 국민 불안감이 증가함에 따라 이에 관한 과학적 검토가 필요하다. 특히, 국민들은 미세먼지 농도 추이가 증가하고 있다고 인식하고 있는데, 이에 대해 측정 자료에 나타나는 통계 분석 결과를 살펴보면 미세먼지의 장기적 추이(연평균, 고농도 빈도수)는 감소하는 것으로 나타났다.[225] 다만 초미세먼지는 과거 측정 자료가 불충분(2015년부터 측정자료 존재)하여 농도 추이의 판단이 어려움이 있다.

또한, 미세먼지 발생 원인을 근본적으로 규명하기 위해서는 미세먼지의 생성・변환 메커니즘의 과학적 연구와 국외 유입/국내 주요 오염원별 기여도를 정량적으로 파악하기 위한 확산・이동 패턴 분석이 선행되어야 한다. 특히, 한반도 내 고농도 현상에 대한 분석을 위해서는 국가 배경 농도 및 장거리 이동을 감시할 수 있는 신뢰도 높은 측정 자료의 확보와 이를 활용한 모델링 연구가 중요하다는 게 연구계와 학계 전문가들의 중론이다. 그리고 미세먼지 발생 원인에 대한 규명과 병행하여 각 원인별 저감 시나리오를 발굴하고 효과를 평가하여 개선하는 선순환 체계를 구축할 필요가 있다.

1) 입체적 측정자료 확보

2016년 한·미 공동조사 및 연구(KORUS-AQ)에서는 수도권 미세먼지/오존 발생 특성, 산업단지의 대기질 영향, 미세먼지 장거리이동 영향 등 5개 분야의 미세먼지 원인 규명 연구가 수행된 바가 있다. 다만 2016년 수행된 조사는 봄철(5~6월)에 수행되어 겨울철 고농도 현상에 대한 실증적인 분석에는 한계를 보였다는 전문가들의 지적이 있었다. 그러나 이러한 대규모 특별 관측 캠페인은 미세먼지의 생성・변환 메커니즘과 국내/외 유입량 등 기여도의 정량적 파악을 위한 관측적・과학적 기초자료 생산에 매우 효과적인 것을 감안하면 3~5년 주기로 연속적으로 수행하는 것이 바람직하다.

또한 미세먼지 원인 규명을 위한 연구에 핵심적으로 활용되는 지상원격 측정망(예, 라이다, 판도라 네트워크)은 3차원 입체 정보를 (준)실시간으로 지속적으로 제공 가능하다는 장점과 설치 지역 부근에만 한정된 정보를 제공한다는 단점을 동시에 가지고

225) Kim, H. C. et al. (2017b), Recent increase of surface particulate matter concentrations in the Seoul Metropolitan Area, Korea, Scientific Report, 7.

있다. 따라서 지상원격 측정소를 좀 더 광범위하게 확대, 설치할 필요가 있으며, 기존 측정망으로 관측이 어려운 지역(국외, 해양, 산간지역 등)에 대해서는 정지궤도 환경위성과 항공기 등을 활용하여 광역 단위의 실시간 입체 관측을 주기적으로 실시할 필요가 있다.

2) 대기질 모델을 통한 기여도 및 영향 정량적 분석

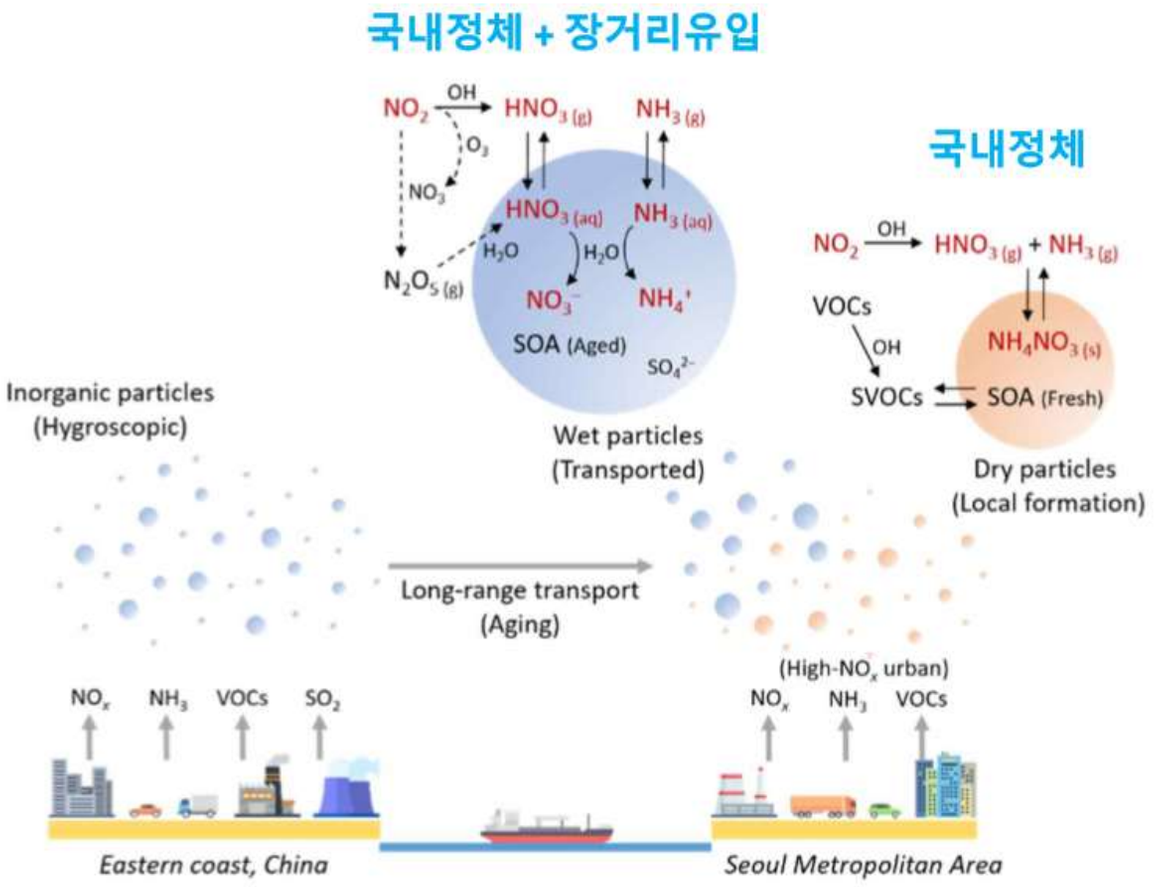
미세먼지 원인물질의 1차 배출 및 2차 생성을 규명하고, 정량적인 기여도를 산출하기 위해서는 특별 입체관측, 원격관측, 위성관측 등의 정보와 더불어 3차원 대기질 모델을 활용하여 각각의 발생원별 기여도 및 외부 유입량을 정량적으로 산정하여야 한다.

특히, 그간 한반도 규모의 기여도 산정에 그쳤다면, 향후에는 광역시·도 단위 등 좀 더 상세 규모에 대한 기여도 산정을 통해 각 권역별 최적의 감축대책을 수립·이행할 수 있도록 지원하는 것이 중요하다. 또한 대기질 모델을 활용한 지역별, 계절별 대기질 영향 파악과 저감 정책 추진의 효과를 분석할 수 있는 대기질 영향예측 시스템[226]을 구축할 필요가 있다.

더불어 국외 영향에 대한 기여도는 주로 확산 모델링을 통해 정량적으로 추정하고 있으나, 그간 연구에 따르면 사용모델 간의 차이, 즉 불확실성이 매우 큼을 확인할 수 있다. 이러한 특정 사례별, 기간별 기여도의 차이는 모델 및 입력자료의 한계, 즉 과학적 한계에 기인한 것이긴 하지만 간혹 불필요한 사회적 논쟁화가 되고 있는 것도 사실이다.

따라서 기여도 산정의 과학적 근거를 확실히 하기 위해 위성·집중측정 등 정성적/관측 기반 정보를 추가적으로 제시하여 정량적 기여도 분석의 불확실성을 보완할 필요가 있으며, 국외 영향에 대한 정보 제공 방식에 대한 지속적 논의와 불확실성을 줄이기 위한 연구개발 및 투자가 필요하다고 전문가들은 지적하고 있다.

226) 기상·배출량·화학반응을 고려하여 지역규모에서의 원인 및 개선효과를 평가할 수 있는 「대기질영향예측시스템(K-MEMs: Korea-Monitoring Emission Modeling system)」



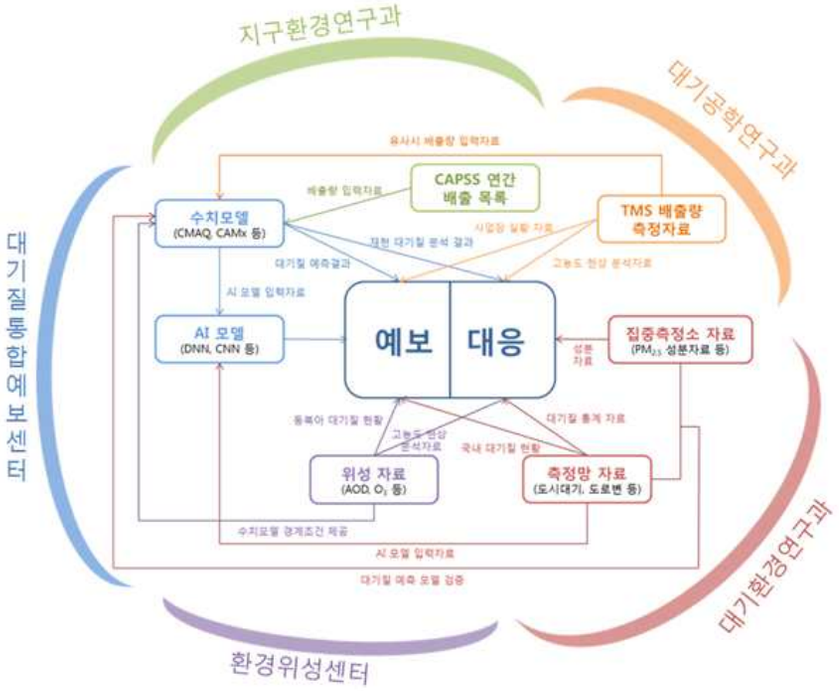
[그림 6.6] 국내 미세먼지 2차 생성 메커니즘 개요

4. 미세먼지 예보 고도화

미세먼지 문제에 대응하는 것은 원인물질을 근본적으로 제거하거나 고농도 노출위험으로부터 효과적으로 회피하는 행동을 하는 것이다. 특히 고농도 현상이 나타날 것을 미리 예측하여 전 방위적인 비상저감 조치를 취하고 어린이, 노약자 등 취약계층에 대해서는 그 위험으로부터 안전한 보호 조치를 취해야 한다. 이를 위해서 고농도 미세먼지 현상에 대한 예측이 선행되어야 하는데 우리나라는 2013년부터 '국가 대기질 예보제'를 법정업무로 수행하고 있다. 19개 광역 시/도를 대상으로 미세먼지 2종(PM-10 & PM-2.5)과 오존을 4등급(좋음/보통/나쁨/ 매우나쁨)으로 나누어 예측결과를 6시간 간격으로 하루 4번 발표하고 있다.

통합 대기질 예보 협업 체계

▪ 대기질 예보는 **다분야(배출, 관측, 모델, 대기화학 등) 전문인력의 통합적 협업**을 기반으로 운영



[그림 6.7] 국가 통합 대기질 예보체계 (국립환경과학원)

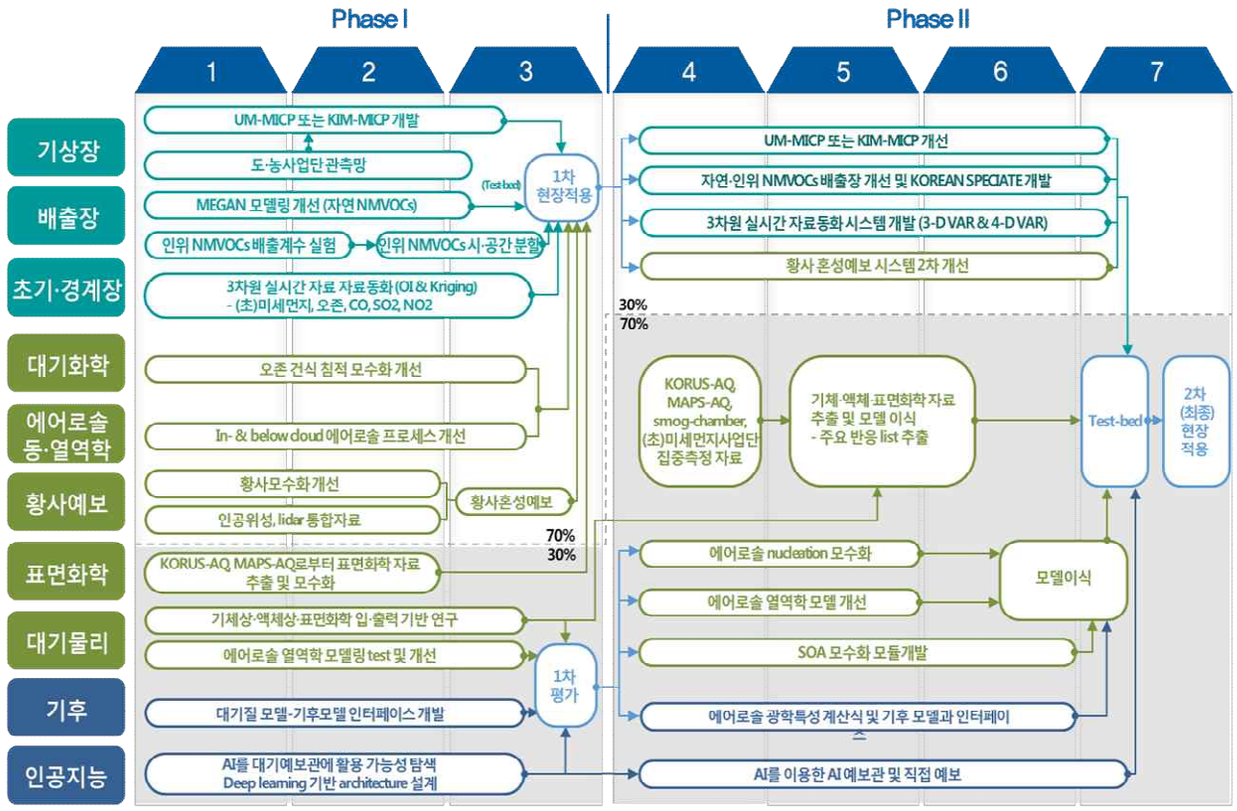
국립환경과학원 대기질예보센터에 의하면 현재 고농도 사례 기준 예보 정확도는 72%, 연평균 기준으로는 80% 수준으로 확인된다. 그러나 일반시민들이 체감하는 예보 정확도는 위 수치보다는 낮은 것이 사실이다. 현재 국가 대기질 예보는 상시예보(4회/일) 및 주간예보(시범/주1회) 이외에도 비상저감조치 발령 및 화력발전소 상한 제약, 미세먼지 재난 지원에 활용하기 위한 고농도 상황 및 정책지원 예보 등으로 운영되고 있으나 예보 인력 및 기술적 인프라 부족으로 인해 상세한 맞춤형 예보정보 제공 부족, 낮은 예보 정확도 등의 한계를 보이고 있다. 한편, 국민들은 더 높은 고농도 미세먼지 예보 정확도, 일주일 이상 장기 예보 확대를 요구하고 있다.

미세먼지 예보 고도화를 통해 이러한 요구를 만족시키기 위해 전문가들은, ① 해외 예보모델 한계 극복을 위해, 국내 실정에 맞는 한국형 수치예보 모델 개발, ② 인공지능 기반 대기질 예보시스템 도입을 통한 중기(7일 이내) 예보 체계 구축, ③ 예보관 역량강화, 예보관 확충 등 예보인프라 선진화가 필요함을 강조하고 있다.

1) 한국형 수치예보 모델 개발

먼저, 단기 고농도 예측 정확도를 일정 수준(예, 75%) 이상 지속적으로 달성할 수 있어야 국민들의 체감 예보 정확도를 만족시킬 수 있다.

이를 위해서는 한국형 미세먼지 수치예보 모델을 개발[227]이 필수적인데, 먼저 입력자료가 정확해야 모델의 결과물의 정확도가 높아진다. 즉, 상향식 및 하향식 고해상도 배출량의 고도화, 기체, 액체, 입자 표면 반응 교체를 통한 한국형 대기화학 메커니즘 개발, 인공위성 자료와 지표측정 자료를 동화할 수 있는 자료 동화 시스템 고도화 등 개발이 필요하다. 그리고 이를 모두 포괄할 수 있는 한국형 미세먼지 수치예보 모델 체계에 대한 지속적인 연구·개발이 이루어져야 하며, 한국형 모델 개발의 각 단계마다 도출된 결과는 즉각적으로 예보업무 현장에 적용·운영하면서 개발-응용의 선순환 구조를 갖출 필요가 있다.



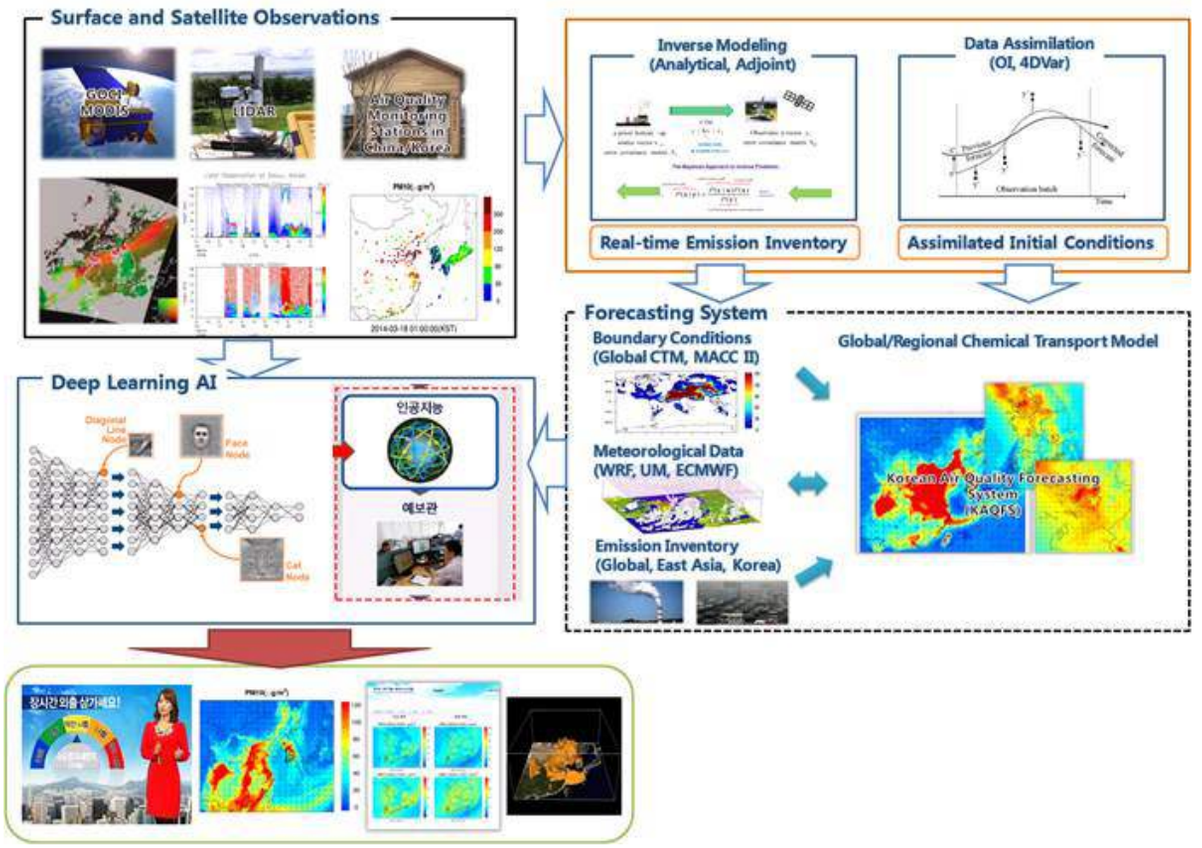
[그림 6.8] 한국형 미세먼지 수치예보 모델 개발 체계

227) 과학기술정통부 등 (2017), 미세먼지 관리 종합대책

2) 인공지능 기반 중·장기 예보 체계 구축

장기 대기질 예보(예, 7일 예보)는 국민 편익 제공을 위해 실행하는 것은 바람직하나, 과학적으로 충분한 수치예보 정확도 확보(50% 이상)가 선행되어야 한다는 게 관련 전문가들의 대체적인 의견이다. 이에, 미세먼지 중·장기예보 체계를 구축하기 위해서는 시간에 따라 오차가 증폭되는 수치예보 한계를 보완하기 위해 인공지능(AI) 기반의 대기질 예·경보 시스템[228] 구축 제안이 부각되고 있다.

수치예보 결과와 머신 러닝(machine learning) 기술을 접목한 인공지능 예측시스템을 구축하여 현재의 수치모델을 보완함으로서 미세먼지 중·장기 예보의 정확도를 향상시킬 수 있다. 인공지능 중기 예측시스템 구축으로 유치원, 학교 등 교육기관, 공공기관 및 대국민 참여 행사 진행 등 국민 건강 보호를 위한 주간 예보로 확대가 가능할 것이다.



[그림 6.9] 인공지능 예보시스템

자료: 국립환경과학원 (2017) "인공지능을 활용한 예보기반 구축 연구(I)에 관한 연구"

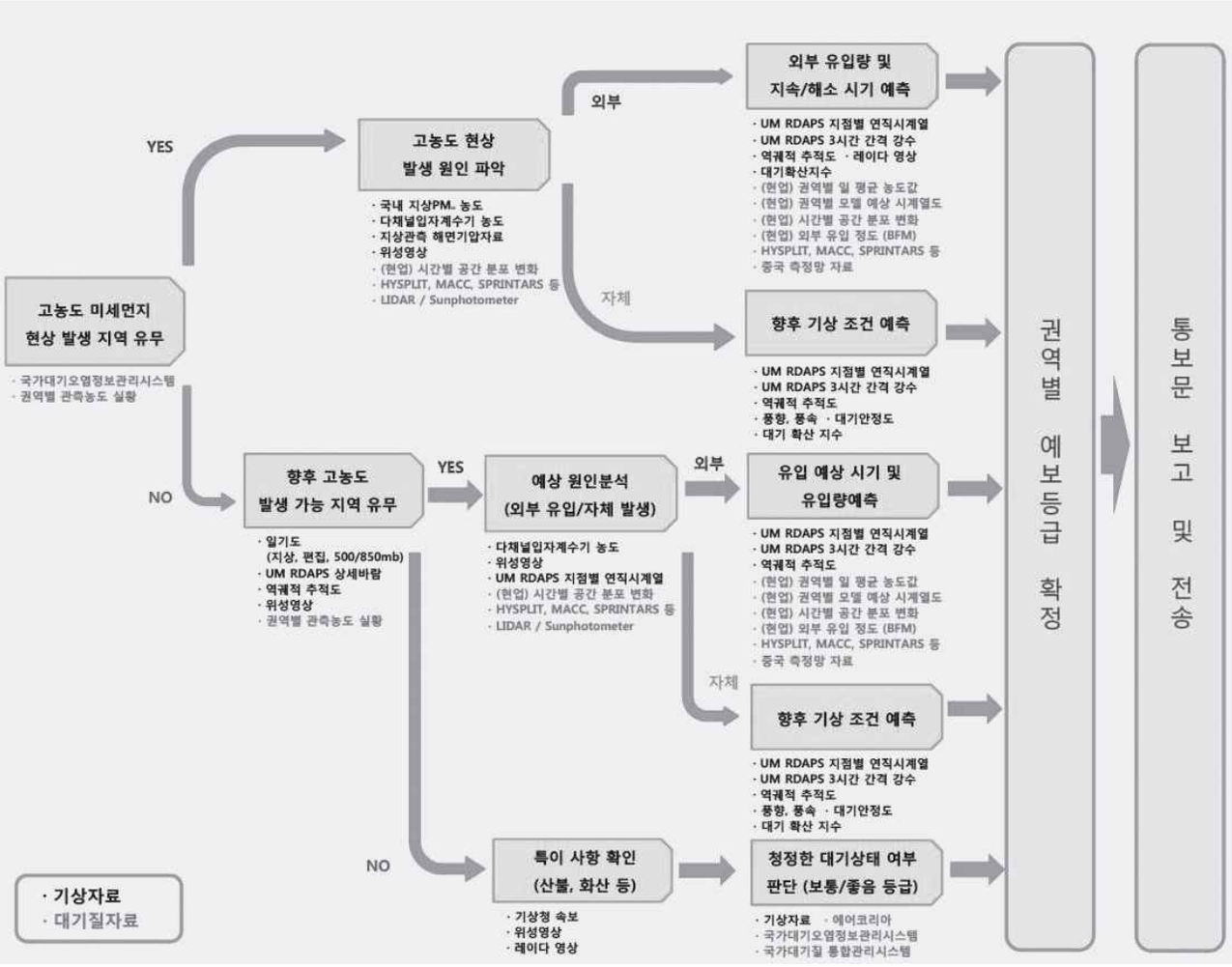
228) 다양한 지상 및 위성 관측자료와 여러 형태의 수치예보모델결과를 종합하여 인공지능 big data를 구성하고, 이를 활용한 심층학습 인공지능기법을 개발하여 예보를 수행하는 것. 이를 위해서는 관측자료를 수집 분석하고, 자료동화가 적용한 대기질 예보모형을 보완하여 품위가 높은 1차 및 2차 big data를 구축하고, 이를 활용하여 동북아지역과 국내 예보권역 간의 공간적 연계성과 시계열 변화 특성을 반영하는 시스템이 필요함

3) 예보관 역량강화, 예보관 확충 등 예보인프라 선진화

국가 예보의 정확도는 수치 모델과 예보관의 능력에 의해 결정된다. 수치 모델은 여러 기상 조건 하에서 배출량을 물리/화학법칙에 따라 농도로 환산시켜 주기 때문에 기상 및 배출량 자료의 불확도와 모델 자체의 한계로 인해 오차가 발생한다. 또한 예보관의 능력은 지식, 경험 및 노하우를 쌓기 위한 긴 시간을 필요로 하지만 국가 예보제는 기상예보에 비해 짧은 기간의 한계를 가지고 있다. 이러한 요인들이 예보가 잘 맞지 않는 주요 원인으로 작용한다.

따라서, 예보모델(객관예보)의 정확도가 충분히 높아져 예보관의 역할(주관예보)이 없어질 때까지는 예보관의 개인적 역량이 정확도에 큰 영향을 미친다. 즉, 예보관의 역할은 예보제의 근간을 지탱하는 핵심적 요소이다. 또한 상시적인 개황예보 수요에 더하여 고농도 시 특보형태 예보의 수요가 가중되는 상황에서 현행 국립환경과학원의 예보 인력은 2인 1조로 4개조 총 8명 체제에 머물러 있어, 모든 수요를 맞추기 위해서는 예보 인력 확충이 시급하다.

한편, 현재의 기상-환경 통합예보 체계(기상청 합동 근무)는 예보제 초기/안정화 단계의 소기 목적을 달성한 것으로 평가됨에 따라 해당 정보 시스템 연계로 대체하고, 보다 미래 지향적인 환경위성-미세먼지 통합예보 체계(위성센터-예보센터 간 합동근무 및 시스템 연계)로 전환하기 위한 물적·인적 인프라를 확충할 시점이 되었다.



[그림 6.10] 예보등급 확정을 위한 의사 결정 단계

자료: 장임석 (2016), "미세먼지 모니터링 및 예경보제 운영 현황과 개선 과제"

5. 건강 영향

미세먼지는 흡입시 기도, 폐, 심혈관, 뇌 등 우리 몸의 각 기관에서 염증반응 발생으로 알레르기·천식, 호흡기, 심혈관계 질환 등 유발하는 것으로 알려져 있으며, 특히 노인, 유아, 임산부, 심장질환자 등 취약계층은 미세먼지로 인한 영향을 더 심각하게 받을 수 있다고 보고되고 있다. 또한 미세먼지 입자의 크기가 작아질수록 건강 위해도가 크게 증가함에도 불구하고 기반 인프라 등의 제약으로 최근까지 정부는 PM-10을 기준으로 정책을 추진해 왔으며 PM-2.5 이하 미세먼지에 관해서는 상대적으로 대응이 미흡한 것이 사실이다.

이를 개선하기 위한 대책으로 전문가들은 미세먼지 대응 환경보건 연구개발 추진을 적극적으로 제안하고 있다. 예를 들어, 미세먼지 등으로 인한 환경성질환 예방을 위한 역학조사, 노출평가 및 건강영향조사를 강화하고, PM-2.5, PM-1.0 이하 매우 작은 크기의 미세먼지에 대해 구성성분 및 입자 크기별 미세먼지의 인체 유해성 연구 및 위해성 평가 대책 보완이 필요함을 강조한다.

1) 코호트 연구 강화

기존 미세먼지 건강 역학연구는 대부분 시계열, 단면 연구 형태 위주로 수행되어 낮은 수준 인과관계 추론만을 제시할 수 있는 한계를 가지고 있다. 즉, 장기간 환경변화에 따른 건강 영향을 관찰하고 분석해야 미세먼지 장기노출과 질병, 사망률 등의 시간적 선후관계를 명확히 밝힐 수 있어, 미세먼지 장기노출에 의한 영향평가도 가능하여 높은 수준의 과학적 근거를 제시할 수 있는 코호트 연구(cohort study)를 강화할 필요가 있다.

2) 안전성 연구 강화 및 노출 평가 모델 개발

또한 미세먼지의 구성 성분은 계절별, 지역별로 크게 다르기 때문에 국내의 초미세먼지에 대한 안전성 자료 확보가 반드시 필요하다. 또한 한국인의 미세먼지 노출 관련활동의 표준화를 통해서 미세먼지 노출을 정량화 할 필요가 있는데, 이를 위해 다양한 실내/외 활동별 미세먼지 노출평가를 실시하고 다양한 오염원의 유해화학성분 분포 특성을 파악, 개인별 미세먼지 노출평가 모델을 개발하는 것이 중요하다.

3) 매우 작은 크기의 미세먼지 인체 유해성 연구

미세먼지 위해도가 PM-10보다 상대적으로 훨씬 큰 PM-2.5, PM-1.0, 나노PM에 대한 화학성분, 입자개수·표면적 정보 등을 상시적으로 확보하여 인체위해성과의 통합적 연구개발이 필요하다.

[그림 6.11] 환경보건 분야 미세먼지 연구개발 사례(미세먼지 국가전략 프로젝트)

6. 국제공동 연구

미세먼지로 대표되는 대기오염은 특정 지역 내의 문제가 아니고 같은 대기흐름을 공유하는 비교적 넓은 지역의 공동의 문제이다. 즉, 한반도의 미세먼지는 적어도 동북아시아 규모에서의 배출-수송-확산 과정 등이 영향을 미친다. 따라서 주변국과의 공통의 문제 해결을 위해서는 국제공동 연구가 매우 중요하다고 할 수 있다.

특히, 한반도 대기오염에 가장 큰 영향을 미치는 중국과의 공동연구는 2014년 한·중 정상회의 후속 대책으로 2015년 한·중 공동연구단 협력 양해각서 서명 및 연구단 구성을 통해 공동 연구를 진행 중이다[229]. 또한 최근 2년간 한·중 정상회의 의제로 미세먼지 문제 논의(종전 장관회의 의제)가 되고 있으며 한·중 양국간 미세먼지 협력의지 공동선언 등으로 인해 공동연구의 기반은 더욱 강화되었다 볼 수 있다.

1) 한·중 공동연구 강화 및 조기경보체계 공동 구축[230]

이러한 공동연구의 실질적인 성과를 도출하기 위해서는 국내 영향이 큰 중국 지역(화북지역·산동성 등) 대기질 공동조사·연구에 집중할 필요가 있다. 또한 현행 한국 3개, 중국 35개 도시로 한정된 한·중 대기질 측정자료 공유 지역을 한국과 중국 주요 도시 전역으로 확대하는 등의 정보공유를 강화할 필요가 있다. 또한 한·중 고농도 미세먼지에 대한 공동대응을 강화하기 위해 한·중 대기질 예보정보 교환 및 미세먼지 조기경보체계 공동 구축을 서두를 필요가 있다. 이를 통해 고농도 미세먼지에 대한 책임감을 공유하고 저감 대책 및 피해 예방 조치를 사전에 이행함으로 그 효과를 높일 수 있을 것이다.

229) 2014.7월 서울에서 개최된 한중 정상회의에서 양국 환경부 간 '한중 환경협력 양해각서'가 개정된 것을 계기로, 대기오염 예보모델 및 대기오염물질 발생원인 규명 등에 대한 공동연구가 시작되었다. 이 공동연구를 뒷받침하기 위한 기구로 '한중대기질공동연구단'이 2015.6월 중국 환경과학연구원에 설치되었다. 국립환경과학원과 중국 환경과학연구원이 담당기관으로 지정되었다. 공동연구단의 목적은 국내 미세먼지에 대한 효과적인 저감 및 관리대책 마련을 위해 국외에서 유입되는 오염물질의 영향을 과학적으로 규명하고, 또한 중국 북경을 중심으로 한 동북부지역의 대기오염 및 대기질 모델개선을 위한 공동연구를 수행하는 것이다. 즉, 중국 주요 도시의 발생원과 확산경로 등을 확인해서 중국으로부터 유입되는 미세먼지 영향을 과학적으로 규명하는데 있다.

230) 환경부 제공자료. "한국 환경부와 중국 생태환경부 간 대기질 예보정보 및 예보기술 교류 협력사업 방안"

[그림 6.12] 한·중 대기질 공동연구(청천 프로젝트)

2) 국제 협정으로 나아가기 위한 대안

현재 동북아 국가 간 구속력 있는 형태의 미세먼지 등 대기오염 협력관련 협정이 부재한 상태에서 향후 미세먼지 문제 해결을 위한 실제적 국제 협력을 위해서 ①책임공방 탈피, ②미세먼지의 탈정치화, ③참여주체의 다양화 원칙하에 건설적인 대안을 제시할 필요가 있다. 이를 위해 양국의 미세먼지 대응 성공사례(best practice) 및 관련 최신 기술 동향을 공유함으로써 협력가능성 및 해법을 모색해 나가는 것이 중요하며, 지방정부 · 시민사회 · 산업계의 소통/협력 플랫폼을 마련하여 상향식(bottom-up) 접근 노력을 병행할 필요가 있다.

[표 6.1] 월경성 대기오염물질에 관한 국제 협약 사례

	협약 대상국	체결 시기
CLRTAP (Convention on Long-range Transboundary Air Pollution)	체결 당시 소련을 포함한 유럽과 미국, 캐나다를 포함한 총 38개 회원국 2017년 기준 51개 회원국	1979. 체결 1983. 발효
CUAQA (Canada-United States Air Quality Agreement)	캐나다-미국	1991. 체결 및 발표
AATHP (ASEAN Agreement on Transboundary Haze Pollution)	ASEAN(동남아시아 국가연합) 소속 10개 회원국	2002. 체결 2014. 인도네시아 비준

7. 과학적 기반 강화 관련 주요 이슈

과학적 수단을 통해 미세먼지 문제 해결의 실마리를 찾아야 한다는 것은 일반국민, 언론, 전문가 등 사이에서 논란의 여지가 없다. 그러나 구체적인 접근 방법에 대한 의견에는 약간의 차이가 있다. 때문에 아래에 소개된 이슈(저감 수단 등에 관한 내용은 제외)와 관련해서 앞으로 전문가들의 심도 있는 토론, 국민과의 소통을 통해 의견 차이를 좁히는 노력이 필요하다.

① 미세먼지 배출량 관련 통계를 전국적으로 조사하여 매년 새로 만들어야 할까?

- 미국 등 해외에서는 국가적으로 배출량 관련 공식 통계를 약 3년 주기로 발표한다. 그리고 공식 통계가 발표되지 않는 사이의 기간에는 대략적으로 배출량을 추정해서 계산한 추계(推計) 배출량을 산정해서 정책에 활용한다.
- 미국과 같은 선진국에서도 매년 공식 배출량 통계를 발표하지 않는 이유는 대기환경정책을 일관되게 시행하기 위해서다. 통계는 정책의 과학적 근거가 되므로 통계가 매년 바뀌게 되면 정책도 매년 수정되어야 할 것이다. 그렇게 되면 수립된 대기환경 정책이 잘 이행되었는지, 어떠한 효과가 있었는지, 보완해야 하는 점은 무엇인지 등의 정책 이행 평가는 사실상 불가능하게 된다. 따라서 통계를 발표할 때는 정책적으로 흔들리지 않는 과학적 근거를 제공하기 위해 정책의 수립, 이행, 평가에 걸리는 기간을 고려해야 한다.
- 따라서 대기환경개선 계획 등의 주기(예, 3~5년)에 맞춰 국가 통계로서 배출량을 공식 통계로 발표하는 게 바람직하다. 그리고 특별대책을 수립할 경우에도, 사용된 배출량 통계는 특별대책의 이행 평가가 완료될 때까지 반드시 국가 통계로 관리해야 한다.

② 미세먼지 농도는 장기 추세(10년 이상)와 단기 추세(5년 이내) 중 어느 것이 더 중요하고 대표성을 갖는가 ?

- 장기적으로 보면 우리나라 미세먼지 농도는 감소하고 있으나, 단기 추세(최근 5년)는 그렇지 않다. 그렇다면 우리나라 미세먼지 농도 변화 모습을 설명할 때는 둘 중 어떤 자료를 활용해야 할지 생각해 보자.
- 장기 추세와 단기 추세는 각각 활용되는 영역과 중요하게 봐야 하는 점이 다르다. 예를 들어 미세먼지가 건강에 미치는 영향을 고려할 때는 어떤 질환을 조사할 것인지에 따라 봐야 하는 자료가 다르다. 긴 기간 동안 미세먼지에 노출되어

생긴 만성질환을 조사한다면 장기 추세를 보아야 할 것이고, 고농도 미세먼지에 단기간 노출되어 생긴 급성질환을 조사한다면 단기 추세를 검토해야 할 것이다. 여기서 알 수 있는 것은 중·장기 추세에서는 평균적인 농도 변화가 중요하고, 단기 추세에서는 고농도 수치가 중요할 것이라는 점이다. 따라서 정부에서 미세먼지 농도 추세를 발표한다면, 장기 추세는 평균 농도 분석자료가, 단기 추세는 고농도 수치 분석 결과가 의미 있을 것이다.

○ 최근 측정소 위치와 관련하여 측정기 높이가 적절한지 등에 대해 사회적 논쟁이 있었다. 하지만 미세먼지 농도 자료의 대표성을 지키기 위해서는 측정소 이전과 같은 극단적 조치는 바람직하지 않다. 미세먼지 농도 추세가 대표성을 가지기 위해서는 '측정 장소를 대표적인 공간에 설치했는지(공간적 대표성)'와 '지속적으로 측정했는지(시간적 지속성)'가 가장 중요하기 때문이다. 따라서 사회적 논쟁을 해소하기 위해서는 기존 측정소는 유지하면서 새로운 측정소를 추가로 설치하는 것이 바람직하다.

③ 미세먼지 측정망의 적절한 분포는 ?

√ 판단 기준 : 다른 선진국과 비교 결과 vs. 국민의 체감도 ?
√ 측정망을 확대 시 : 기준성 측정망 확충 vs. 성분측정망 확대 ?

○ 우리나라의 미세먼지 측정소 개수와 밀도는 미국, 일본 등의 선진국과 비교해도 손색이 없는 수준이다. 하지만 실제 거주지역 주변의 미세먼지 수치에 대한 관심이 높아지면서 현재 측정망으로는 국민적 관심에 대응하기 어려운 감이 있다. 따라서 국민 눈높이에 맞게 측정망을 보완할 필요가 있다. 아주 정확한 측정치를 낮은 밀도로 제공하는 것보다는 정확도가 다소 떨어지더라도 높은 밀도로 측정값을 제공하는 것이 바람직하다고 판단된다.

○ 그러나 측정 방법에서 초저가 센싱 기술보다는 기술집약적 고난도 센싱(위성 등) 기술을 이용한 보완적 방법이 더 과학적이며 결과적으로 저비용일 수 있다. 초저가 센싱 기술과 IoT 기술이 융합된 정보의 경우는 초기 투자 비용은 매우 낮으나 품질보증/관리(QA/QC)의 경우 자동화가 매우 어렵고 전수조사/보정이 불가피하여 추후 지속적으로 고비용이 소요되며 소모품인 초저가 센서의 경우 내구연한이 매우 짧아 교체비용도 고려해야 하므로 결코 저비용 방법이 아닐 수 있다.

④ 미세먼지 측정이나 예보에서 사용되는 용어('나쁨','보통' 등)는 적절한가?

√ 미세먼지(PM-10), 초미세먼지(PM-2.5), 향후 PM-1.0은 ? √ 예보에 사용되는 좋음-나쁨의 가치판단 기준은 ? 오히려 무가치적인 낮음-높음 사용 ?

○ 미세먼지, 초미세먼지 용어는 과학적으로는 적절하지 않지만, 부지불식간에 사회적으로 동의되어 이미 성문법에 활자화된 용어이므로 변경을 위해서는 사회적 합의가 필요할 것으로 판단된다. 즉 추후 불필요한 논쟁을 피하기 위해서는 과학자의 의견도 중요하지만, 사회구성원을 대표하는 언론, 입법/행정 차원에서 공개적인 논의와 합의를 거쳐야 할 필요가 있다.

○ 현재 사용하고 있는 미세먼지 정보는 농도의 높/낮이에 따라 건강에 대한 영향이 포함된 용어인 '좋음', '나쁨'이 포함되어 있다. 그러나 이러한 용어는 과학적 근거가 매우 취약하다. 따라서 농도를 국민들에게 공개할 때는 농도값을 그대로 제시하고 '환경기준 보다 높음, 또는 낮음'으로 표현하는 게 바람직하다. 다만 건강영향을 포함한 개념을 제시할 때는 환경보건 전문가에 의해 연구 개발된 '환경 지수(AQI)' 형태로 별도로 제시하는 게 바람직하다.

⑤ 미세먼지 국외 영향에 대한 상시 발표는 과학적으로 가치 있는 것인가?

○ 우리나라 미세먼지에 미치는 인접 국가들의 영향은 미세먼지의 종류, 발생 원인, 측정 기간 등에 크게 영향을 받기 때문에 불확실성이 매우 크다. 어떤 예측 모형을 사용해서 영향을 측정했는지, 어떤 시기에, 어디에서 측정된 자료를 입력했는지에 따라 편차가 매우 크게 나타난다. 따라서 과학적인 근거를 보다 확실히 하기 위해서는 위성측정, 집중적인 측정 등의 관측 기반의 정보를 추가하여 예측 모형에 의한 불확실성을 보완할 필요가 있다. 또한 분석의 불확실성을 줄이기 위한 지속적인 연구개발과 투자뿐만 아니라, 적극적인 대외 협력을 통한 국가 간 정보 교류 방식 논의가 필요하다.

제6장 요약

미세먼지 현안문제(미세먼지에 대한 배출량 산정, 미세먼지 측정, 원인규명 과정과 방법, 미세먼지 예보, 건강영향 연구, 국제공동 연구)의 한계점을 검토하고, 과학적 기반의 해결책을 모색하였다.

- (배출량) 산정된 배출량의 정확도, 신뢰도 개선을 위해, ① 누락된 배출량 발굴, 새로운 배출계수를 보완 ② 중국 등 주변국 협력을 통해 국내외 배출량과 영향을 보다 정확하게 파악 ③ 국가 배출량 정보 생산·관리 전문 조직 시급히 설립·운영
- (측정) 수도권 외 지역 측정망 상대적 부족, 측정값 신뢰도 문제 해결을 위해, ① 측정망 데이터의 공감/체감도 및 대국민 소통 향상 ② 고농도 현상 다각적, 통합적·과학적인 분석 ③ 사용자(정책결정자, 연구자 등)에 측정 자료 신속히 제공
- (원인 규명) 미세먼지의 생성·변환 메커니즘의 과학적 연구, 국내/외 주요 오염원별 기여도 정량적 파악을 위해, ① 국가 배경 농도 및 장거리 이동 감시 3차원 입체측정 자료 확보 ② 모델링 연구 강화 ③ 각 원인별 저감 시나리오 발굴 및 효과 평가 체계 필요
- (예보) 고농도 미세먼지 예보 정확도, 장기 예보 확대 등 미세먼지 예보 고도화를 위해, ① 한국형 수치예보 모델 개발 ② 인공지능 기반 대기질 예보시스템 도입으로 중기(7일 이내) 예보 체계 구축, ③ 예보관 역량강화, 예보관 확충 등 예보인프라 선진화 필요
- (건강 영향) 미세먼지 대응 환경보건 연구개발 적극적 추진을 위해, ① 역학조사, 노출평가 및 건강영향조사 강화 ② PM-2.5 등 초미세먼지 이하 구성성분 및 입자 크기별 미세먼지의 인체 유해성 연구 및 위해성 평가 대책 보완
- (국제공동연구) 한·중 공동연구 강화 및 조기경보체계 공동 구축, 구속력 있는 형태의 미세먼지에 대한 실제적 국제협력 원칙(책임공방 탈피, 탈정치화, 참여주체 다양화 등) 확립

참 고 문 헌

국민정책참여단

미세먼지 정책제안 참고자료집

참 고 문 헌

감사원 (2019), “산업시설 대기오염물질 배출관리 실태”.

강병욱, 이학성 (2015), 충주시 초미세먼지 (PM 2.5) 의 배출원 기여도 추정에 관한 연구. 한국대기환경학회지, 31(5), 437-448.

국립환경과학원 (2012), “동북아 장거리이동 대기오염사업 (LTP) 평가”

국립환경과학원 (2013), “국가대기오염물질 배출량 산정방법 편람 (Ⅲ)”

국립환경과학원 (2013), “동북아 대기오염 국가간 상호영향 공동 연구 (Ⅰ)”

국립환경과학원 (2017), “한·중 공동연구단 운영지원 사업”, 고려대학교.

국립환경과학원 (2018), “국가대기오염물질 배출량(CAPSS) 2015”

국립환경과학원 (2018), “대기환경연보 2017”

김순태 외 (2017), 수도권 초미세먼지 농도모사: (II) 오염원별, 배출물질별 자체 기여도 및 전환율 산정, 한국대기환경학회지, 33(4), 377-392.

김인선 외 (2011), 북한 에너지 사용과 대기오염물질 배출 현황. 한국대기환경학회지(국문), 27(3), 303-312.

김종희 외 (2016), 2014년 2월 서울의 고농도 미세먼지 기간 중에 CMAQ-DDM을 이용한 국내외 기여도 분석, 한국대기환경학회, 32(1), 82-99.

김현석 (2019). ”정책토론회 : 깨끗한 환경, 더 나은 삶의 질”.

김현철 외 (2018), 중국 산둥반도 배출량 변화와 한국 대기질의 연관성 검토. 한국대기환경학회지, 34(2), 356-365.

대한민국 정책브리핑 (2018.4.17), “국내 우수기술을 활용한 한-중 공동 미세먼지 저감 사업 본격화”

문광주 외 (2018), 중국 초미세먼지 현황 및 정책 동향. 한국대기환경학회지, 34(3), 373-392.

박일수 (2016), 서울 수도권지역에서 미세먼지 고농도 발생의 근본 원인은 무엇인가?, 한국대기환경학회지, 32(3), 352-353.

박현욱, 배충식 (2019), 미세먼지 현황과 과제, 기계저널, 59(6), 55-58.

배민아 외 (2018), 수도권 초미세먼지 농도모사 : (V) 북한 배출량 영향 추정. 한국대기환경학회지(국문), 34(2), 294-305

서울시 (2017), “예·경보 단계별 건강취약계층 등 미세먼지 행동매뉴얼”

서울시 (2018), “대기질 평가보고서 2017” http://cleanair.seoul.go.kr/air_pollution.htm?method=average

신문기 외 (2007), 기상인자가 미세먼지 농도에 미치는 영향, 한국대기환경학회지, 23(3), 322-331.

에너지신문 (2017.12.24), “한-중, 에너지분야 협력 본격화된다”

여민주, 김용표 (2019), 북한 대기질 현황 및 개선방안. 한국대기환경학회지(국문), 35(3), 318-335

우정헌 외 (2018), 중국 대기오염물질 배출의 시공간적 변화 분석. 한국대기환경학회지, 34(1), 87-100.

이현우 외 (2018), "한중환경협력계획 세부사업 및 협력방안 마련 연구".

이혜경 (2017), "동북아 장거리이동 대기오염물질 공동연구(LTP)", 「지료로 보는 이슈」 국회입법조사처

전권호 (2018.11.15), "中韩大气质量共同研究现状"

전상윤 외 (2008), 지역기후모형을 이용한 2003년 5월 시베리아 산불 사례 연구. 한국기상학회 학술대회 논문집, 172-173

조성호 외 (2019), "미세먼지 개선의 핵심과제는 사업장 배출시설 관리역량의 강화", 경기연구원.

추장민 외 (2016), "한·중 환경협력 확대를 위한 중국 환경관리 정책 및 체계 분석 연구", 환경부.

추창민 (2015), "중국의 대기오염 저감대책 최근 동향", 한국환경정책·평가연구원

통계청 (2019), 대기배출시설 단속 및 행정조치 현황

한국환경정책평가연구원 (2016), 최근 미세먼지 농도 현황에 대한 다각적 분석, Korea Environment Institute (KEI) 포커스, 4(3), 통권 제15호, 14-15.

한국환경정책평가연구원 (2018), "한중환경협력계획 세부사업 및 협력방안 연구"

홍철, 박인권. (2017), 중국 지방정부 역량이 대기오염 개선성과에 미치는 영향. 지역연구, 33(4), 29-42.

환경부 (2014), "대한민국 환경부와 중화인민공화국 환경보호부간 환경협력에 관한 양해각서"

환경부 (2016), "바로 알면 보인다: 미세먼지, 도대체 뭘까?"

환경부 (2017). "비산배출 저감을 위한 시설관리기준 세부이행지침".

환경부 (2019), "미세먼지 팩트 체크, 미세먼지! 무엇이든 물어보세요"

환경부 (2019), "실내공기 제대로 알기 100문 100답"

환경부 (2019), "한중환경협력사업 "청천(晴天, 맑은 하늘) 계획" 이행방안"

환경부 금강유역환경청 (2018.05). "2018년 비산배출시설 관리제도 설명회".

환경부 제공자료 (2019), "한국 환경부와 중국 생태환경부 간 대기질 예보정보 및 예보기술 교류 협력사업 방안"

환경부/국립환경과학원 (2018), "대기오염측정망 설치·운영지침"

Block, M.L., & Calderon-Garciduenas, L. (2009), Air pollution: mechanisms of neuroinflammation and CNS disease. Trends in neurosciences, 32(9), 506-516.

Brauer, M. et al. (2016), Ambient Air Pollution Exposure Estimation for the Global Burden of Disease 2013. Environmental Science & Technology. 50, 79-88.

Choi, J.K. et al. (2013), Source apportionment of PM2. 5 at the coastal area in Korea. Science of the Total Environment, 447, 370-380.

Elsasser, M. et al. (2012), Organic molecular markers and signature from wood combustion particles in winter ambient aerosols: aerosol mass spectrometer (AMS) and high time-resolved GC-MS measurements in Augsburg, Germany. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 12,

4831–4866.

Fuzzi, S. (2015), Particulate matter, air quality and climate: lessons learned and future needs. Atmospheric Chemistry and Physics, 15, 8217–8299.

Gauderman, W. J. et al. (2004), The effect of air pollution on lung development from 10 to 18 years of age. New England Journal of Medicine, 351(11), 1057-1067.

Ghan, S.J, (2013), A simple model of global aerosol indirect effects. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 118(12), 6688-6707.

Goudie, A.S., Middleton, N.J., (2006), Desert dust in the Global system. Springer, printed in Germany, pp. 157–165.

Hennig, F. et al. (2018), Ultrafine and fine particle number and surface area concentrations and daily cause-specific mortality in the Ruhr Area, Germany, 2009-2014. Environmental health perspectives, 126(2), 027008.

Heo, J.B. et al. (2009), Source apportionment of PM2.5 in Seoul, Korea. Atmospheric Chemistry and Physics, 9(14), 4957-4971.

Hu, L.-W. et al. (2017), Ambient Air Pollution and Morbidity in Chinese, 1017, 123-151.

Huang, J. et al. (2018), Health impact of China's Air Pollution Prevention and Control Action Plan : an analysis of national air quality monitoring and mortality data. Lancet Planet. Heal. 2, 313-323.

IPCC Working Group I. (2013), Climate Change 2013-The Physical Science Basis: Summary for Policymakers. Intergovernmental Panel on Climate Change.

Itahashi et al. (2012), Source Contributions of Sulfate Aerosol over East Asia Estimated by CMAQ-DDM. Environmental Science & Technology, 46, 6733–6741.

Itahashi, S. (2017), Nitrate transboundary heavy pollution over East Asia in winter. Atmospheric Chemistry and Physics, 17, 3823–3843.

Jacob, D. (1999), Introduction to Atmospheric Chemistry, Princeton University Press. 280 pp.

Jeong, U. et al. (2011), Estimation of the contributions of long range transported aerosol in East Asia to carbonaceous aerosol and PM concentrations in Seoul, Korea using highly time resolved measurements: A PSCF model approach. J. Environ. Monitor., 13, 1905-1918,

Jung, J. et al. (2016), Impact of Siberian forest fires on the atmosphere over the Korean Peninsula during summer 2014. 16, 6757–6770

Kaiser, J. (2005), Mounting Evidence Indicts Fine-Particle Pollution, Science, 307, 1858-1861.

Kang, E. et al. (2012), Characterization of atmospheric particles in Seoul, Korea using SEM-EDX, Journal of Nonoscience and Nanotechnology, 12, 6016-6021.

Kim, B.-U. et al. (2017a), Spatially and chemically resolved source apportionment analysis: Case study of high particulate matter event. Atmospheric Environment, 162, 55–70.

Kim, H. C. et al. (2017b), Recent increase of surface particulate matter concentrations in the Seoul Metropolitan Area, Korea, Scientific Report, 7.

Kim, H.C. et al. (2017c), Regional contributions to particulate matter concentration in the Seoul metropolitan area, South Korea: seasonal variation and sensitivity to meteorology and emissions inventory. Atmospheric Chemistry and Physics, 17(17), 10315-10332.

Kim, I.S. et al. (2013), Impact of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) emissions from North Korea to the air quality in the Seoul Metropolitan Area, South Korea. Atmospheric environment, 70, 159–165.

Kim, J. (2008), Transport routes and source regions of Asian dust observed in Korea during the past 40 years (1965–2004). Atmospheric Environment, 12.

Kim, M.J. (2019), Regional Arctic amplification by a fast atmospheric response to anthropogenic sulphate aerosol forcing in China. Journal of Climate

Kim, S. et al. (2017d), PM 2.5 Simulations for the Seoul Metropolitan Area: (I) Contributions of Precursor Emissions in the 2013 CAPSS Emissions Inventory. Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 33, 139–158.

Kim, S. et al. (2017e), PM2.5 Simulations for the Seoul Metropolitan Area: (II) Estimation of Self-Contributions and Emission-to-PM2.5 Conversion Rates for Each Source Category. Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 33, 377–392.

Kim, S.W. et al. (2010), Asian dust event observed in Seoul, Korea, during 29–31 May 2008: Analysis of transport and vertical distribution of dust particles from lidar and surface measurements. Science of the Total Environment, 12.

KORUS-AQ (2018), Rapid Science Synthesis Report.

Kulkarni, N. et al. (2006), Carbon in airway macrophages and lung function in children. New England Journal of Medicine, 355(1), 21-30.

Kunzli, N. et al. (2004), Ambient air pollution and atherosclerosis in Los Angeles. Environmental health perspectives, 113(2), 201-206.

Lee, H. et al. (2008), Source identification of PM2. 5 particles measured in Gwangju, Korea. Atmospheric Research, 88(3-4), 199-211.

Lee, J.Y., Kim, Y.P. (2007), Source apportionment of the particulate PAHs at Seoul, Korea: impact of long range transport to a megacity. Atmos. Chem. Phys., 10.

Lee, S. et al. (2011), High-PM10 concentration episodes in Seoul, Korea: Background sources and related meteorological conditions, Atmospheric Environment, 45(39), 7240-7247.

Lei, Y. et al. (2011), Primary anthropogenic aerosol emission trends for China, 1990–2005. Atmospheric Chemistry and Physics, 11(3), 931-954.

Lelieveld, J. et al. (2015), The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale, Nature, 525, 367-371.

Li et al. (2017), MIX: a mosaic Asian anthropogenic emission inventory under the international collaboration framework of the MICS-Asia and HTAP. Atmospheric Chemistry and Physics, 17, 935–963.

Lim, J.M. et al. (2010), Source apportionment of PM10 at a small industrial area using Positive Matrix Factorization. Atmospheric Research, 95(1), 88-100.

Lim. S. et al. (2012), Ionic and carbonaceous compositions of PM10, PM2.5 and PM1.0 at Gosan ABC superstation and their ratios as source signature, Atmospheric Chemistry and Physics, 12, 1–18.

NASA (2016), KORUS-AQ Rapid Science Synthesis Report, https://espo.nasa.gov/korus-aq/content/KORUS-AQ

NEASPEC (2016), "Strategic Plan 2016-2020"

Pei, L. (2018), Increasing persistent haze in Beijing: potential impacts of weakening East Asian winter monsoons associated with northwestern Pacific sea surface temperature trends. Atmospheric Chemistry and Physics, 18, 3173–3183.

Pope III, C.A. & Dockery, D. W. (2006), Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect, Journal of Air & Waste Management Association, 56, 709-742.

Samet, J.M. et al. (2009), Concentrated ambient ultrafine particle exposure induces cardiac changes in young healthy volunteers. American journal of respiratory and critical care medicine, 179(11), 1034-1042.

SCAQMD(South Coast Air Quality Management District) (2015), Multiple Air Toxics Exposure Study in the South Coast Air Basin(MATES IV). https://www.aqmd.gov/home/air-quality/air-quality-studies/health-studies/mates-iv

Tai, A.P.K. et al. (2012), Impact of 2000–2050 climate change on fine particulate matter (PM_{2.5}) air quality inferred from a multi-model analysis of meteorological modes. Atmospheric Chemistry and Physics, 12, 11329–11337.

U.S. EPA (1996), Air Quality Criteria for Particulate Matter.

U.S. EPA (2006), National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) for Particulate Matter ($PM_{2.5}$)

U.S. EPA (2019), Guidance on the Development of Modeled Emission Rates for Precursors (MERPs) as a Tier 1 Demonstration Tool for Ozone and PM2.5 under the PSD Permitting Program, EPA-454/R-19-003

UNESCAP (2018), "Review on programme planning and implementation"-Annex. Terms of Reference for NEACAP

UNESCAP (2019), "Discussion Paper on the Workplan of the NEACAP"

3Wang X. et al. (2019), An overview of air-pollution terrain nexus. Chemical Engineering Transactions, 72, 31–36.

Wang, S.X.B. (2014), Emission trends and mitigation options for air pollutants in East Asia. Atmospheric Chemistry and Physics, 14(13), 6571-6603

Watts, et al. (2017), The Lancet Countdown on health and climate change: from 25 years of inaction to a global transformation for public health. The Lancet.

World Health Organization(WHO), International Agency for Research on Cancer(IARC), (2014), World Cancer Report 2014, Edited by B. W. Stewart and C. P. Wild,

Yi, S.M., & Hwang, I. (2014), Source Identification and Estimation of Source Apportionment for Ambient PM 10 in Seoul, Korea. Asian Journal of Atmospheric Environment (AJAE), 8(3).

Yim, S.H.L. et al. (2019), Air quality and acid deposition impacts of local emissions and transboundary airpollution in Japan and South Korea, Atmos. Chem. Phys. Discuss., 1–23.

Zhai, S. et al. (2019) Fine particulate matter (PM2.5) trends in China, 2013-2018: contributions from meteorology. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 1–19.

Zhang, Q. et al. (2007), NOx emission trends for China, 1995–2004: The view from the ground and the view from space. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 112(D22).

Zhang, Q. et al. (2009), Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission. Atmospheric Chemistry and Physics, 9(14), 5131-5153.

Zheng, B. et al. (2018), Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions. Atmospheric Chemistry and Physics, 18, 14095–14111

용 어 해 설

국민정책참여단

미세먼지 정책제안 참고자료집

용어 해설

- **건성침적(건식침적, dry deposition)** : 대기 중의 어떤 물질이 확산, 흡착, 충돌, 중력낙하 등에 의해 지면에 도달하는 과정을 말함. 대기 중에 부유하는 기체나 입자상물질이 눈이나 비로 지면에 도달하는 과정은 습성침적(습식침적, wet deposition)이라고 함. 이 둘을 합쳐 총대기침적이라 부르며 생태계나 건강에 미치는 영향을 평가하는 데 중요하게 활용됨
- **검댕(soot) :** 탄소함유물질의 불완전 연소로 형성된 입자상 오염물질로서 탄소입자 덩어리(응집체)를 말하여, 지름이 보통 1㎛ 이상임. 경유차 등 화석연료 연소나 소각 등에 의해 대기 중으로 직접 배출됨. 원소탄소(Elemental Carbon, EC), 블랙카본(Black Carbon, BC), 검은 연기(black smoke) 등으로도 불리고 있음
- **경유차 실도로 배출가스 관리제도(Diesel Vehicle Real Driving Emission Management) :** 기존의 실내 실험실에서 배출가스를 측정하는 것과 달리 차량에 이동식(휴대용) 배출가스 측정장치를 탑재하고 실제 도로를 달리면서 오염물질을 측정하여 적합여부를 판정하는 제도. 2017년 9월 우리나라와 유럽연합(EU)에서 시행됨
- **고형연료제품(SRF, Solid Refuse Fuel) :** 폐기물 중에서 폐지류, 플라스틱류 등 가연성 폐기물을 원료로 사용하여 만든 제품. 「자원의 절약과 재활용촉진에 관한 법률」에서 일반 고형연료제품은 「폐기물관리법」 제2조제4호의 지정폐기물이 아닌 가연성 고형폐기물을 사용하여 제조한 것을 말함
- **공해차량운행제한구역(LEZ, Low Emission Zone) :** 공해를 유발하는 노후차량에 대해 통행을 금지하는 구역 ☞ 노후경유차 운행제한제도
- **공회전제한장치 :** 자동차에서 배출되는 대기오염물질을 줄이고 연료를 절약하기 위하여 자동차에 부착하는 장치를 말함
- **광화학 스모그(photochemical smog) :** 질소산화물과 탄화수소가 대기 중에 농축되어 있다가 자외선과 화학반응을 일으키면서 2차 오염물질인 광산화물을 만들어 대기가 안개 낀 것처럼 뿌옇게 변하는 현상. 주로 자동차 배기가스가 원인이며, 로스앤젤레스 스모그로 잘 알려져 있음
- **구름 응결핵(CCN, Cloud Condensation Nuclei) :** 대기의 작은 구름방울의 핵 역할을 할 수 있는 흡습성의 에어로졸 입자. 즉 일반적인 대기의 구름에서 도달할 수 있는 과포화도(1% 내외)하에서 물이 응결하여 활성화될 수 있는 입자. 구름 응집핵
- **국가대기오염 정보관리 시스템(NAMIS, National Ambient Air Quality Monitoring Information System) :** 국가 및 지자체에서 운영하는 전국의 대기오염 측정소에서 매 시간별 측정되는 아황산가스, 일산화탄소, 이산화탄소, 오존, 미세먼지 등 대기오염도 자료를 수집 관리하는 시스템. NAMIS에 수집된 자료는 에어코리아 웹사이트(www.airkorea.or.kr)를 통해 실시간으로 국민에게 제공됨

- **국가대기정책지원시스템(Clean Air Policy Support System; CAPSS) :** 국가 대기보전 정책수립 및 관련 연구에 필요한 기초자료 확보를 위하여 점·면·이동오염원 등에서 배출되는 8가지 대기오염물질 배출량을 매년 산정 오염물질별, 배출원별, 지역별 다양한 배출량 통계와 배출량에 적용된 세부정보 제공하는 시스템. 일반적으로 우리나라 국가대기오염물질 배출량 자료를 지칭할 때 CAPSS 자료라고도 칭함
- **굴뚝원격감시시스템(TMS, Tele-Monitoring System) :** 사업장 굴뚝에서 배출되는 대기오염물질을 자동측정기기로 상시 측정하고 이를 관제센터와 온라인으로 연결하여 배출상황을 24시간 원격관리하는 시스템으로 CleanSYS(클린시스)라고도 불림. 발전소, 소각시설, 화학제품 제조시설 등의 배출시설에 설치되어 먼지, 황산화물, 질소산화물 등의 항목을 측정
  ☞ 굴뚝원격감시체계(CleanSYS)
- **굴뚝원격감시체계(CleanSYS) :** 사업장 굴뚝에서 배출되는 대기오염물질을 자동측정기기로 상시 측정하고 이를 관제센터와 온라인으로 연결하여 배출상황을 24시간 관리하는 시스템
  ☞ 굴뚝원격감시시스템(TMS)
- **기후변화(climate change) :** 일정한 지역에서 장기간에 걸쳐서 진행되는 기후의 평균적인 변화를 의미함. 이러한 변화는 태양복사 에너지의 변화 등 지구 외적인 요인에 의해서 일어나기도 하고, 지구를 둘러싸고 있는 대기 조성의 변화나 지구 표면 상태의 변화 등에 의해서 일어날 수 있음. 최근에는 온실가스 배출 증가 등 인위적 요인에 따른 지구온난화를 가리키는 경우가 일반적임
- **기후변화에관한정부간협의체(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change) :** 기후변화에 대한 정부간 패널로서 1988년 지구환경 가운데 특히 온실화에 관한 종합적인 대책을 검토할 목적으로 UN 산하 각국 전문가로 구성된 조직
- **노력성 호기량(FEV1, Forced Expiratory Volume in one second) :** 숨을 최대한 들이쉰 다음에 자기의 노력을 다해 내쉴 때 첫 1초간 내쉰 양. 1초간 노력성 호기량
- **노후경유자동차 폐차 지원제도(조기폐차) :** 노후될수록 더 많은 대기 오염물질을 배출하는 노후 경유 차량에 대해서 조기폐차 보조금을 지원하는 제도. 노후차량을 조기 폐차하도록 유도하여 대기질을 개선하는 데 목적이 있음
- **노후경유차 운행제한제도(LEZ, Low Emission Zone) :** 수도권 대기관리권역 내에서 저공해조치명령 미이행 차량 및 종합검사 불합격 차량의 운행을 제한하는 제도. 대상지역은 2017년(I단계) 서울전역을 시작으로, 2018년(II단계) 인천과 경기 17개 시가 추가되며 2020년(III단계)에는 서울, 인천, 경기 28개시를 포함한 대기관리권역 전체로 확대되고, 단속지점은 2016년 13개에서 2020년 157개로 확대될 예정임. ☞ 공해차량운행제한구역
- **녹색교통진흥지역(녹색교통진흥특별대책지역) :** 녹색 교통의 발전과 진흥을 위해 「지속가능교통 물류발전법」에 의거, 특별대책지역으로 지정해 관리하는 지역을 말함. 녹색교통진흥지역에서는 온실가스, 대기오염물질 배출량, 교통혼잡 등을 고려해 자동차 운행제한 등 강력한 교통수요관리

조치를 시행할 수 있음. 서울시가 2019.7월부터 서울 사대문 안 지역(한양도성 내부)에 배출가스 5등급 차량의 통행을 제한하기 위해 설정함

- **다환방향족탄화수소(PAHs, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons) :** 2개 이상의 벤젠고리를 가지는 방향족 화합물로 가장 널리 알려진 PAHs로는 벤조피렌·나프탈렌·안트라센 등이 있음. 많은 PAHs 물질이 독성을 가지며 인체에 해로운 물질로 알려져 있음. 주로 연료가 연소하거나, 유기물질이 불완전 연소할 때 발생
- **대기배출원관리시스템(SEMS, Stack Emission Management System) :** 전국의 사업장, 배출구 등 대기오염배출원과 배출량을 파악하여 대기환경 관리에 활용하기 위한 시스템. 체계적인 조사를 위하여 대기배출원조사 중장기계획을 수립하여 국가 대기보전 정책수립 및 관련 연구에 필요한 기초자료를 확보하고, 신뢰성 있는 대기배출원 DB를 구축하고 관리하기 위한 웹기반 배출원 관리시스템
- **대기오염 측정망(air pollution monitoring networks) :** 전국적인 대기오염 실태, 변화 추이 및 대기 환경기준 달성여부 등을 파악하기 위해 대기 오염물질 측정장비를 설치·운영하는 것임. 도시대기 측정망, 교외대기측정망, 국가배경농도 측정망, 도로변대기측정망 등의 종류가 있음
- **대기오염물질(air pollutants) :** 대기 중에 존재하는 물질 중 대기오염의 원인으로 인정된 가스・입자상물질로서 환경부령으로 정함(현재 질소산화물, 황산화물, 입자상물질 등 64개 물질)
- **대기오염물질 총량관리제 :** 사업장에 연도별로 배출할 수 있는 대기오염물질의 양을 할당하고, 사업장이 할당량 이내로 오염물질을 관리하도록 함으로써 기존 농도규제에서는 관리가 어려웠던 배출총량을 체계적으로 줄여나가기 위한 대기정책
- **대기오염물질 배출시설 :** 대기오염물질을 대기에 배출하는 시설물, 기계, 기구, 그 밖의 물체로서 환경부령으로 정함. 발전시설, 보일러, 제1차 금속제조시설, 도장시설 등
- **대기오염방지시설 :** 대기오염물질 배출시설로부터 나오는 대기오염물질을 연소조절에 의한 방법 등으로 없애거나 줄이는 시설로서 환경부령으로 정함. 대표적인 방지시설로 전기집진시설, 여과집진시설, 흡수탑 등이 있음
- **도로이동오염원(on-road mobile source) :** 도로에서 주행하는 자동차로 인한 대기오염물질 배출량을 산정하는 부문. 차종에 대한 분류는 국내의 자동차 관리법 규칙에 따라 구분(승용차, 승합차, 화물차, 특수자동차, 이륜차 등) 하며, 차종에 따라 경형, 소형, 중형, 대형으로 나누고, 차종별 엔진가열(hot-start), 엔진미가열(cold-start), 증발 배출량 등으로 분류하여 산정
- **동북아 장거리 이동 대기오염사업 :** 1995년 한국의 제안으로 시작된 사업으로 동북아 장거리 이동 대기오염물질(미세먼지, 질소산화물, 황산화물 등)의 국가간 배출·이동·침적에 관해 공동 연구하여 동북아 장거리 대기오염물질에 대한 모니터링 체계를 구축하고 장거리 이동 대기오염물질에 대한 효과적인 대응책을 마련하는 것을 목적으로 하며 우리측 국립환경과학원이 사무국 역할을 수행하고 있음

- **동북아 청정대기파트너십(NEACAP, North-East Asia Clean Air Partnership) :** NEASPEC 회원국이 참여하는 NEASPEC 산하의 대기 협의체로서 동북아 지역 과학·정책·기술협력, 연구결과 기반 정책개발 기여 등을 목표로 ▲ 과학, 정책, 기술부문을 포함한 환경협력 촉진, ▲국가 및 월경성 대기오염 문제에 관한 정보와 경험 공유 확대, ▲동아시아 월경성 대기오염 문제를 해결하기 위한 자발적인 협력 틀(framework) 마련, ▲지역과 국가의 과학연구에 기초하여 대기오염을 해결하는 국가 및 지역 정책개발 지원, ▲동북아 지역 대기오염의 환경과 인간건강 영향에 대한 지식 증진을 목적으로 하고 있음
- **동북아환경협력계획(NEASPEC, North-East Asia Subregional Programme for Environment Cooperation) :** 1993년 황사, 대기오염 등 동북아 환경문제 대응협력을 위해 유엔 아태경제이사회(UNESCAP)가 주도하는 역내 유일의 포괄적 정부간 협의체. 현재 한국, 중국, 일본, 북한, 러시아, 몽골이 참여하고 있으며, "현재와 미래세대의 삶의 질 제고를 위해 지역환경 협력과 지속가능발전 노력을 촉진하는 것"을 목표로 정하고, 중장기 비전인「NEASPEC Strategic Plan 2016-2020」에 따라 월경성 대기오염, 자연보전, 해양보호구역, 저탄소도시, 사막화 및 토지황폐화 등 역내 환경 이슈에 대한 협력방안을 논의하고 있음
- **매연여과장치(DPF, Diesel Particulate Filter) :** 경유차의 엔진 연소실에서 배출되는 입자상물질을 필터로 걸러내어 대기 배출량을 저감하는 장치
- **먼지(PM, Particulate Matter) :** 「대기환경보전법」에서 '먼지'는 대기 중에 떠다니거나 흩날려 내려오는 입자상물질로 정의하고 있으며, 본 자료집에서도 같은 의미로 지칭함. 참고로, 일반적으로 먼지(dust)는 비교적 큰 고체 입자(1~100㎛)를 의미함. ☞ 입자상물질, 미세먼지
- **무기이온(inorganic ion) :** 무기 분자가 이온화되어 전하를 띤 물질. 주로 탄소나 수소가 없는 비금속 또는 금속의 이온들로 Ca^{2+}, K^{+}, Cl^{-} 따위가 있음
- **미국 환경보호청(U.S. EPA, United States Environmental Protection Agency) :** 미국 환경에 관련한 모든 입법 제정 및 법안 예산을 책정하고 미국 국민의 건강과 환경 보전을 목적으로 1970년에 설립된 미국의 정부기관
- **미세먼지 관리 종합대책 :** 국무회의에서 환경부 등 12개 관계부처 합동으로 마련한 대책으로 종전의 미세먼지 관리 특별대책(2016년 6월)보다 목표가 강화되고 구체화됨. 단기(2017년 9월~2018년 상반기) 대책으로 고농도미세먼지 발생 시 긴급감축 조치 실시, 차량부제 등 고농도 비상저감조치, 민감계층 활동공간 개선등이 있고, 중장기(2018년 하반기~2022년)대책으로는 2022년까지 미세먼지배출량 30% 감축을 목표로 사회 전 분야에 대한 전 방위적인 감축대책 추진을 내용으로 함.
- **미세먼지 관리 특별대책 :** 국내 미세먼지 오염도가 심각한 문제로 대두되어 관계부처 합동으로 2016년 6월 수립된 대책. 경유차에 대한 실도로기준 인증, 노후 경유차의 조기폐차, 경유버스의 CNG버스로의 단계적 대체, 노후 석탄화력에 대한 친환경적 처리 등의 내용이 담겼음
- **미세먼지 예경보제 :** 전국의 대기오염 측정소에서 관측된 미세먼지 농도 및 기상변화 등을 고려하여

예측한 다음 미세먼지를 예보하며, 미세먼지 농도가 일정 기준 이상 높게 나타났을 때 신속히 경보를 발령함으로써 인체 및 생활환경 상의 피해를 최소화하고 대기오염에 대한 시민의 관심과 환경의식을 높이기 위해 시행하는 제도

- **미세먼지(PM-10, PM-2.5) :** 대기 중에 떠다니거나 흩날려 내려오는 미세한 입자상물질로, 입자 지름이 10㎛ 이하인 미세먼지(PM-10)와 2.5㎛ 이하인 미세먼지(PM-2.5)로 구분할 수 있음

  - 「미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법」(2019.2.15. 시행)에서,
    미세먼지는 입자의 지름이 10마이크로미터(㎛) 이하인 먼지(PM-10: 미세먼지), 입자의 지름이 2.5마이크로미터(㎛) 이하인 먼지(PM-25: 초미세먼지)를 포함하고, PM-2.5를 법률로서 초미세먼지로 정의함

  ☞ 입자상물질, 먼지, 초미세먼지

- **바이오매스(biomass) :** 바이오매스(biomass) : 태양 에너지를 받아 유기물을 합성하는 식물체, 그리고 식물을 식량으로 하는 동물과 미생물 등 생물유기체를 지칭하며, 화학적 에너지로 전환할 수 있는 생물 에너지 자원을 의미함. 일반적으로 땔나무, 숯, 생물의 사체 등도 포함하여 폭넓은 의미로도 사용됨. 대표적인 바이오매스에는 곡물과 식물, 폐목재, 해조류, 동물의 분료나 음식물 쓰레기 등이 있음

- **바이오중유 :** 고기 기름이나 폐식용유 등과 같은 동·식물성 유지 혹은 바이오디젤 공정 부산물 등을 원료로 제조한 연료를 일컫는 말. 중유 대비 오염물질 배출 감소 등 환경개선 효과가 우수한 바이오에너지 중 하나로 알려져 있음

- **배출가스 재순환장치(EGR, Exhaust Gas Recirculation) :** 내연기관에서 발생하는 대기오염물질(질소산화물)을 줄이기 위한 장치로 배기가스 일부분을 냉각시켜 일반 공기와 함께 엔진의 연소실로 주입하는 기능을 함

- **배출가스저감장치 :** 자동차에서 배출되는 대기오염물질을 줄이기 위하여 자동차에 부착 또는 교체하는 장치로서 저감효율에 따라 1종과 2종으로 구분함. ☞ 매연여과장치(DPF)

- **분산모델(dispersion model)** ☞ 확산모델

- **비도로이동오염원(non-road mobile source) : 자**동차 이외의 내연기관을 장착한 철도, 해상선박과 항공기, 건설장비, 농기계 배출량 등으로 분류하여 산정

- **비산먼지(날림먼지, fugitive dust) :** 일정한 배출구 없이 대기 중에 직접 배출되는 먼지(대기 중에 떠다니거나 흩날려 내려오는 입자상물질)를 말함. 자동차의 도로운행으로 인한 재비산 먼지와 사업장 또는 공정상에서 날리는 먼지를 말하며, 건설공사, 나대지, 하역 및 야적, 농업 활동, 축산활동, 건설폐기물 재활용으로 인해 발생하는 비산먼지도 포함됨

- **산성강화물 :** 화력발전, 제련소, 공업단지, 자동차 배기가스 등에 의해 산성 물질이 대기 중으로 날아가 비나 구름, 안개 등의 형태로 땅에 내리는 것

- **상한제약 :** 석탄화력 발전소 출력을 80%로 제한하는 제도. 미세먼지 특별법에 의해 고농도 미세먼지 발생시 시·도지사가 화력발전소의 출력상한을 80%로 요청할 수 있음.
- **생물성 연소(biomass burning) :** 고기 및 생선구이, 노천소각, 농업잔재물 소각, 목재난로 및 보일러, 아궁이, 숯가마에서 대기로 배출되는 오염물질.
- **수용모델(receptor model) :** 수용체를 중심으로 대기오염 배출원이 주변 지역에 미치는 영향 혹은 기여도를 수리통계학적으로 추정하는 학문 또는 방법. 측정지점(수용체, receptor)에서의 오염물질 농도와 성분분석을 통하여 배출원별 기여율을 구하는 모델링 기법
- **스모그(Smog) :** Smoke(연기)와 Fog(안개)의 합성어. 연기는 매연, 안개는 기상현상으로서의 안개를 지칭하며, 매연과 안개가 공존하는 대기오염을 의미함. 역사적 대기오염사건을 분류하는 관점에서는 로스엔젤레스형 스모그, 런던형 스모그 등으로 분류하기도 함. 자동차의 배기 가스가 주요 원인이 된 스모그에는 로스앤젤레스형의 스모그가 대표적임.
- **습성침적(습식침적, wet deposition) :** 대기 중에 부유하는 기체나 입자상물질이 눈이나 비로 지면에 도달하는 과정을 말함. (☞ '건성침적' 참조)
- **액화석유가스(LPG) 안전관리사업법 :** 액화석유가스의 수출입·충전·저장·판매·사용 및 가스용품의 안전관리에 관한 사항을 정하여 공공의 안전을 확보하고 액화석유가스사업을 합리적으로 조정하여 액화석유가스를 적정하게 공급·사용하게 함을 목적으로 1983년 제정
- **에너지저장장치(ESS, Energy Storage System) :** 생산된 전기를 전력 계통에 저장했다가 전기가 가장 필요한 시기에 공급해 에너지 효율을 높이는 시스템으로, 발전소, 송배전시설, 가정, 공장, 기업 등에서 활용됨
- **에어로졸(aerosol) :** 액체나 고체의 입자가 주로 공기와 같은 기체 내에 미세한 형태로 균일하게 분포된 상태. 학술적으로 입자상물질을 간단하게 에어로졸로 지칭하기도 함.
- **에어코리아(AIRKOREA) :** 한국환경공단에서 운영하는 전국 실시간 대기 오염도 공개 홈페이지로 우리동네대기 정보, 시도별 대기정보, 미세먼지 경보, 주간 대기 분석정보 등을 제공. 대기오염도 실시간 공개시스템(www.airkorea.or.kr)
- **역궤적 분석(back-trajectory analysis) :** 풍속 및 풍향을 고려하여 공기가 현재 위치에 도달하기까지의 과거 시간 동안의 경로를 추적하는 분석방법
- **염화불화탄소(CFCs, Chloro Fluoro Carbons) :** 염소와 불소를 포함한 일련의 유기화합물을 총칭하며 보통 프레온가스(Freon Gas, 듀폰사의 상표명)라고 불림. 매우 안정적인 화합물로 다른 물질과 반응하지 않기 때문에 성층권까지 올라가며, 성층권에서 자외선에 의해 염소가 분리되고 이 염소가 오존층을 파괴함. 주요 온실기체임. 냉매, 발포제, 분사제, 세정제 등으로 산업계에 폭넓게 사용되었으나, 오존층 파괴 원인으로 밝혀져 생산과 소비가 금지됨.
- **원소탄소(Elemental Carbon, EC) :** Black Carbon(BC, 블랙카본)이나 검댕이라고 불리는 물질. 연소과정이나 노천소각 등을 통해 발생하며, 중금속의 경우 금속 가공 공장, 쓰레기 소각 과정

등에서도 배출

- **유기탄소(organic carbon, OC) :** 물에 녹지 않는 특성이 있으며, 유기화합물 형태로 존재하는 탄소. 화석연료의 연소 등에 의해 직접 배출될 뿐 아니라 대기 중 휘발성유기화합물의 광화학 반응 과정을 통해 생성됨.
- **육상전력공급시설(AMP, Alternative Maritime Power Supply) :** 육상 부두에서 선박에 전기를 공급하는 고압 육상전력공급 설비
- **이동식배출가스측정장비(PEMS, Portable Emission Measurement System) :** 실험실이 아닌 자동차에 탑재하여 실제 도로에서 차량 주행 중 배출되는 오염물질 양을 측정할 수 있는 시험장치
- **인류세(anthropocene) :** 퇴적된 지층을 기준으로 지구의 시대를 나누어 과거 1만 년 전부터를 '홀로세'로 명명하는데, 21세기 현재는 인간이 지구환경에 막대한 영향을 끼치는 시대임을 강조해 만들어진 단어(성층권 오존 구멍 생성 원인을 규명한 공로로 1995년 노벨 화학상을 받은 폴 크루첸 박사가 제안)
- **입자상물질(PM, Particulate Matter) :** 고체상 및 액체상의 미세입자를 총칭하는 의미로 사용되는데, '입자상(오염)물질' 또는 '분진' , '먼지' 등의 명칭으로 부르고 있으며, 학술적으로는 간단히 에어로졸(aerosol)이라고도 함. 본 자료집에서는 「대기환경보전법」정의를 기준으로 이해의 편의상 '먼지'로 지칭함. ☞ 먼지, 미세먼지
  - 먼지 지름이 10㎛ 이하인 먼지는 PM-10(또는 PM_{10}), 2.5㎛ 이하인 먼지는 PM-2.5(또는 $PM_{2.5}$)로 표기함.
  - 「대기환경보전법」에서는 '입자상물질'을 물질이 파쇄・선별・퇴적・이적(移積)될 때, 그 밖에 기계적으로 처리되거나 연소・합성・분해될 때에 발생하는 고체상 또는 액체상의 미세한 물질로 정의하고 있음.
- **장거리이동 대기오염물질 :** 황사, 먼지 등 발생 후 장거리 이동을 통하여 국가 간에 영향을 미치는 대기오염물질
- **저공해엔진 :** 자동차에서 배출되는 대기오염물질을 줄이기 위한 엔진(엔진 개조에 사용하는 부품을 포함)으로서 배출허용기준에 맞는 엔진을 말함.
- **저녹스(Low-NOx) 보일러 :** 연료 및 공기 혼합특성을 조절하여 연소강도를 낮추고 연소초기 영역의 산소농도와 화염온도를 낮추어, 열에 의한 NOx(Thermal NOx) 및 연료의 질소 성분에 의한 NOx(Fuel NOx)의 생성을 억제 시키는 기능을 갖춘 버너 및 보일러. 중소사업장의 경우 환경부로부터 저녹스 버너로 인정받은 제품을 설치 시 설치비의 지원을 받을 수 있음.
- **저탄소차협력금제도 :** 자동차 수요를 저탄소, 친환경차로 이전하여 자동차 부문의 석유 소비와 온실가스를 줄이고, 국내 자동차 소비문화를 개선하기 위한 정책. 이산화탄소 배출량이 적은 자동차를 사는 소비자에게는 보조금을 지급하는 반면, 이산화탄소 배출량이 많은 자동차를 살 때는 부담금을 내도록 하는 제도

- **전구물질(precursor) :** 일반적으로 화학에서 다른 화합물을 생성하는 화학반응에 참여하는 화합물을 말함. 여기서는 2차 미세먼지를 생성하는 화학반응에 참여하는 황산화물(SOx), 질소산화물(NOx), 휘발성유기화합물(VOCs), 암모니아(NH_3) 등을 지칭하는데, 2차 미세먼지를 생성하는 재료물질로도 불림
- **전원믹스(電源 Mix) :** 전체 전력 생산에서 화석연료, 원자력 등 비재생가능에너지와 재생가능에너지가 차지하는 비율. 에너지 믹스(energy mix)
- **정도관리(QA/QC) :** 신뢰성 있는 검사결과를 얻기 위하여 분석 및 분석 전후의 과정에 관여되는 모든 요소를 관리, 오류를 최소화하고자 하는 일련의 과학적인 과정. 일반 산업, 경영 분야 등에서는 QA(Quality Assurance)는 품질보증, QC(Quality Control)는 품질관리 기법 및 활동을 말함
- **질산염(nitrate) :** 대기 중으로 배출된 질소산화물(NOx)이 물리·화학적 반응을 거쳐서 입자상으로 전환된 형태. 주로 가스상 반응으로 생성. 따라서 추운 계절에도 조건만 맞으면 생성될 수 있으나, 액체상과 기체상의 평형관계에 의해 더운 여름철에는 주로 가스상인 질산가스(HNO_3)로 존재하여 미세먼지의 구성 성분 면에서는 겨울철에 그 비중이 높아짐
- **질소산화물(NOx) :** 연료의 고온 연소 시에 대기 중 질소의 일부가 산소와 반응하여 생성되는 물질로 대표적인 오염물질이 일산화질소(NO)와 이산화질소(NO_2)임. 자연적으로 토양과 수중 미생물의 작용과 번개에 의해 생성되며, 인위적인 주요 배출원은 자동차, 발전소, 시멘트 공장, 화학물질 제조공장, 보일러, 소각로 등임
- **청천(晴天, 맑은 하늘) 계획 :** 2019년 2월 26일 양국 환경부 장관회담에서 합의한 바에 따라, 양국 정부는'청천계획'을 통해 기존의 한중 대기오염방지 협력사업을 통합하고 한중 미세먼지 협력 기반으로 확대 발전시키기로 하였음. 현재 한중 양국간 협의 중에 있는'청천계획'의 주요 사업 영역은 ▲대기오염방지 정책교류 강화, ▲한중 대기오염 형성원리 및 발생원에 대한 과학적 인식 제고, ▲상호 이익이 되는 대기오염방지기술의 양방향 산업화 협력모델 실현, ▲양국 대기질 개선 목표의 실현을 위한 토대 제공 및 동북아 지역 대기질 개선 기여에 목적을 두고 있음
- **초미세먼지(PM-2.5) :** 입자 지름이 2.5㎛ 이하인 미세먼지 ☞ 미세먼지
- **최적방지시설(BACT, Best Available Control Technology) :** 대기오염방지시설 중 현재 사용되고 있거나 향후 기술발전 가능성을 고려하여 적용가능한 대기오염물질 저감기술 중 저감효율이 우수하다고 인정되는 시설을 말함(「수도권 대기환경개선에 관한 특별법」 제2조제5호). 최적방지시설 종류에는 배연탈황시설, 저Nox버너, 선택적 촉매환원장치, 선택적 비촉매환원장치, 여과집진시설, 전기집진시설 등이 있으며, 황산화물, 질소산화물, 먼지별로 개별 배출시설에 맞는 기준농도를 준수해야함(「수도권 대기환경개선에 관한 특별법 시행규칙」 제2조의2 및 별표1).
- **코호트 연구(Cohort Study) :** 특정 요인에 노출된 집단과 노출되지 않은 집단을 추적하고 연구 대상 질병의 발생률을 비교하여 요인과 질병 발생 관계를 조사하는 연구 방법으로 요인 대조 연구(factor-control study)라고도 불림

- **특정대기유해물질(HAPs, Hazardous Air Pollutants) :** 저농도에서도 장기적인 섭취나 노출에 의하여 사람의 건강이나 동식물의 생육에 직접 또는 간접으로 위해를 끼칠 수 있어 대기 배출에 대한 관리가 필요하다고 인정된 물질로서 환경부 령으로 정하는 것을 말함.
- **프레온가스(Freon Gas)** ☞ 염화불화탄소(CFCs)
- **한-미 공동 대기질 연구(KORUS-AQ, Korea United States Air Quality study) :** 2016년에 실시된 한-미 공동 대기질 연구를 말함. 우리나라 국립환경과학원(NIER)과 미국 항공우주국(NASA)이 공동으로 한국의 대기질에 대한 현장 조사를 수행하기 위해 다수의 측정 및 모델링 전문가를 초청하여 대규모 연구단을 구성하고 현장관측을 수행함. 한국의 대기질 악화에 영향을 미치는 원인들을 정확히 파악하는 것이 연구의 주요 목표였음.
- **한중일환경장관회의(TEMM, Tripartite Environment Ministers Meeting among Korea, China and Japan) :** 급속한 경제성장이 초래한 동북아 지역의 환경 악화에 대응하기 위해 동북아 지역경제와 협력에 중요한 역할을 하는 3국의 밀접한 협력 필요성에 따라 1999년부터 운영 중인 정부간 협의체. 3국은 기후변화, 대기오염, 생물다양성 등 주요 환경 현안에 대한 정책과 경험을 공유하고 있으며, 3국의 관심 의제에 맞춰 우선협력 분야를 정하고 5년 단위의 'TEMM 공동행동계획'을 채택하여 분야별 협력사업을 선정·추진하고 있음
- **해양오염방지협약(MARPOL, MARine POLlution treaty) :** 1973년 국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)에서 선박 및 해양 시설에서 해양에 배출되는 기름, 유해액체 물질, 폐기물 따위를 규제하고 해양의 오염물질을 제거하여 해양 환경을 보전하기 위해 만든 국제협약. 1973년 런던에서 제정한 후 1978년 이 협약의 개정 의정서가 채택되어 1984년 발효됨
- **해염 입자(sea salt particle) :** 대기 상의 응결핵 중에서 그 생성 원인에 따라 해양지역에서 물보라의 증발로 공기 중에 잔류하게 된 입자
- **혼합고(mixing height) :** 대기 중 오염물질이 섞일 수 있는 높이. 일반적으로 기온이 높아 대류 확산이 원활한 낮에 높아지며 기온이 낮아 대기가 안정한 밤에 낮아지는 일간 변화 특성을 보임
- **화목난로 :** 나무를 여러 조각으로 나누고 쪼개 땔감(화목)으로 만들어 때는 난로나 보일러
- **확산(분산)모델(dispersion model) :** 오염원(source)과 기상 정보를 바탕으로 난류확산과 혼합과정 등 대기운동역학에 관한 이해와 일련의 수학적 가정을 설정한 후 대기질을 평가하는 모델링 기법.
- **황산염(sulfate) :** 대기 중으로 배출된 황산화물(SOx)이 물리.화학적 반응을 거쳐서 입자상으로 전환된 형태. 질산염과는 다르게 가스상 반응과 함께, 액상에서의 산화반응 또한 대기 중 농도 형성에 있어 중요함.
- **황산화물(SOx) :** 이산화황(SO_2) 등 황(S)과 산소와의 화합물을 총칭하며, 물에 잘 녹는 무색의 자극성이 있는 불연성 가스. 황산화물은 황을 함유하는 석탄, 석유 등의 화석연료가 연소할 때 인위적으로 배출되며, 주요 배출원은 발전소, 난방장치, 금속 제련 공장, 정유 공장 및 기타 산업

공정 등에서 발생. 대기오염물질로서 산성비의 원인이 되거나 기체 자체로 사람의 몸속의 점막에 작용해 호흡기 질환을 일으킴.

- **휘발성유기화합물(VOCs, Volatile Organic Compounds) :** 쉽게 증발하는 액체 또는 기체상 유기화합물로서, 대기 중에서 질소산화물(NOx)과 함께 광화학반응으로 오존 등 광화학산화제를 생성하여 광화학스모그를 유발하는 물질을 통틀어 일컫는 말. 벤젠과 같은 물질은 발암성물질로서 인체에 매우 유해하며, 스티렌을 포함하여 대부분의 VOCs는 악취물질로 분류할 수 있음.
- **3차원 광화학 수치 모델 :** 배출량 자료, 기상 자료를 바탕으로 대기 중 오염물질의 화학 반응, 수송, 침적 등 대기 중 오염물질의 거동을 방정식을 통해 계산하는 모델
- **AATHP(Asean Agreement on Transboundary Haze Pollution) :** 아세안 지역 10개국이 2002년부터 '월경성 연무오염 아세안 협정(AATHP)'을 결성하여 준수 노력 중임
- **CLRTAP(Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution) :** 국경을 넘는 '장거리 이동 대기오염물질에 관한 협약의 줄임말로서 1979년 유엔유럽경제위원회(UNECE) 34개 회원국 가운데 31개국(51개국)이 서명한 협약으로 국가 간 대기오염 문제를 해결한 대표적 모델로 꼽힘
- **CUAQA(Canada-United States Air Quality Agreement) :** 1991년 3월 체결된 미국과 캐나다간 대기질 협정. 1970년대 미국-캐나다 국경 부근(오대호) 산성비 피해에 대한 문제제기로 시작해, 양국 대기오염문제 해결을 위한 실질적·효과적 공동대응책 마련을 위해 체결한 협정임. 전문 및 16개 조항으로 구성되어 있으며, 황산화물과 질소산화물 등 대기오염물질 감축을 위한 구체적인 의무 규정을 두고 있음

국민정책참여단

미세먼지 정책제안 참고자료집

National Council on Climate and Air Quality

참 고 자 료

국민정책참여단

미세먼지 정책제안 참고자료집

□ 대기오염물질의 특징, 발생원 및 인체 영향

구 분	특 징	발 생 원	인 체 영 향
아황산가스 (SO_2)	▪ 물에 잘 녹음 ▪ 무색의 자극성있는 불연성 가스 ▪ 산성비 원인물질 ▪ 미세먼지(황산염)로 전환	▪ 황을 함유한 연료의 연소 ▪ 금속제련 등 산업공정	점막을 자극, 콧물·담·기침·호흡곤란 초래, 기관지염·폐수종·폐렴 등 유발 가능
일산화탄소 (CO)	▪ 무색, 무취의 유독성 가스	▪ 수송 및 산업공정 연료연소 (탄소성분의 불완전연소) ▪ 산불, 화재 등 자연발생 ▪ 주방, 담배연기, 지역난방 등	혈액속 산소운반역할 저해, 고농도는 매우 유독성
이산화질소 (NO_2)	▪ 적갈색의 반응성이 큼 ▪ 오존생성 전구물질 ▪ 산성비 원인 ▪ 잎에 흑갈색 반점	▪ 자동차, 파워플랜트(발전소) ▪ 화학물질 제조공정	눈·코 등 점막자극, 만성기관지염·폐렴·폐출혈·폐수종 발병
오존 (O_3)	▪ 농작물 수확량 감소 ▪ 잎의 고사	▪ 질소산화물과 휘발성 유기화합물*(VOCs) 등이 자외선에 의한 광화학반응으로 생성 * 자동차, 화학공장·정유공장 등 산업시설과 식생 등 자연발생원 (BVOCs)	가슴통증·기침·메스꺼움·목자극·소화불량 유발 심장질환·폐기종 및 천식 악화, 폐활량 감소
미세먼지 (PM-10/ PM-2.5)	▪ 고체, 액적의 혼합상태 ▪ 시정을 악화 ▪ 식물 신진대사 방해 ▪ 건축물 퇴적되어 부식	▪ 배출원* 직접배출 * 도로·공사장, 사업장, 생물성 연소(소각), 자동차·선박·건설장비 등 ▪ 가스상 물질의 반응 ▪ 황사, 해염, 산불 등 자연발생	천식등 호흡기 질병 악화 폐기능의 저하를 초래
납 (Pb)	▪ 실온에서 청백색의 광택을 내는 매우 연한 금속	▪ 금속공정(철제련, 비철제련, 배터리 제조 등)	간장·신장·신경계통 영향, 발작·지적 성장력 부진, 행동장애 등
벤젠	▪ 향긋한 냄새로 휘발성 强 ▪ 안정적인 분자구조 ▪ WHO에 의해 발암물질 분류	▪ 유기물질 및 화석연료 연소 ▪ 주유소, 석유저장 및 수송 ▪ 자동차 배출가스	단기노출시 졸음, 두통 및 눈 귀 피부 영향, 고농도 노출시 의식장애, 장기노출시 적혈구 수 감소

□ 국내 및 해외 대기환경기준

가. 우리나라 대기환경기준 (환경정책기본법 제2조)

항 목		기 준	
아황산가스(SO_2) (ppm)		연간 평균치	0.02이하
		24시간 평균치	0.05이하
		1시간 평균치	0.15이하
일산화탄소(CO) (ppm)		8시간 평균치	9이하
		1시간 평균치	25이하
이산화질소(NO_2) (ppm)		연간 평균치	0.03이하
		24시간 평균치	0.06이하
		1시간 평균치	0.1이하
먼지 ($\mu g/m^3$)	미세먼지 (PM-10)	연간 평균치	50이하
		24시간 평균치	100이하
	초미세먼지 (PM-2.5)	연간 평균치	15이하
		24시간 평균치	35이하
오존(O_3) (ppm)		8시간 평균치	0.06이하
		1시간 평균치	0.1이하
납(Pb)($\mu g/m^3$)		연간 평균치	0.5이하
벤젠($\mu g/m^3$)		연간 평균치	5이하

나. 국가별 미세먼지 대기환경기준 비교

항목	기준시간	환경기준 비교						환경기준 달성률('17)
		국내	WHO	EU	미국	일본	중국	
PM-10 ($\mu g/m^3$)	연간	50	20	40	-	-	70	79.9%
	24시간	100	50	50	150	100	150	25.1%
PM-2.5 ($\mu g/m^3$)	연간	15*	10	25	12, 15	15	35	60.9%**
	24시간	35*	25	-	35	35	75	8.6%**

* '18.3.27. PM-2.5 환경기준 강화·시행

** PM-2.5 환경기준 달성률('17)은 강화 前 대기환경기준을 토대로 산정한 것임

다. WHO 권고기준 및 잠정목표

구분	PM-2.5(㎍/㎥)		PM-10(㎍/㎥)		각 단계별 연평균 기준 설정시 건강영향
	연평균	일평균	연평균	일평균	
잠정목표 1	35	75	70	150	권고기준에 비해 사망위험률이 약 15% 증가 수준
잠정목표 2	25	50	50	100	잠정목표 1보다 약 6%(2~11%) 사망위험률 감소
잠정목표 3	**15**	**37.5**	**30**	**75**	**잠정목표 2보다 약 6%(2~11%)의 사망위험률 감소**
권고기준	10	25	20	50	총 사망위험률, 심폐질환과 폐암에 의한 사망률 증가가 가장 낮은 수준

라. 우리나라 대기환경 관련 예·경보 기준

항목	환경기준		예보1)		경보2)		
	기간	기준	등급	기준	등급	발령	해제
PM-10 (㎍/㎥)	24시간	100 이하	좋음	0~30	예비주의보	2시간 100 이상	1시간 80 미만
			보통	31~80	주의보	2시간 150 이상	1시간 100 미만
	연간	50 이하	나쁨	81~150	경보	2시간 300 이상	1시간 150 미만
			매우나쁨	151이상			
PM-2.5 (㎍/㎥)	24시간	35 이하	좋음	0~15	예비주의보	2시간 50 이상	1시간 40 미만
			보통	16~35	주의보	2시간 75 이상	1시간 35 미만
	연간	15 이하	나쁨	36~75	경보	2시간 150 이상	1시간 75 미만
			매우나쁨	76이상			
항목	**환경기준**		**예보**		**경보**		
	기간	**기준**	**등급**	**기준**	**등급**	**발령**	**해제**
황사 (㎍/㎥)			약한황사	0~400	경보	2시간 800이상	
			보통황사	400~800			
			강한황사	800이상			
오존 (O_3) (ppm)	1시간	0.1 이하	좋음	0~0.03	주의보	0.12이상	0.12미만
			보통	0.031~0.09	경보	0.3이상	0.12이상~0.3미만
	8시간	0.06 이하	나쁨	0.091~0.15	중대경보	0.5이상	0.3이상~0.5미만
			매우나쁨	0.151이상	-	-	-

1) 예보 : 대기환경보전법 제7조의2 및 대기오염 예측.발표의 대상지역 및 기준과 내용 등에 관한 고시('18.3.27. 개정시행)

2) 경보 : 대기환경보전법 제8조, 시행규칙 별표7(대기오염경보단계별 대기오염물질의 농도기준)('18.7.1. 개정시행), 건강 취약계층보호를 위한 고농도 미세먼지 대응매뉴얼

3) 기상법 제13조, 시행령 제8조

□ 수도권 먼지총량제 시행 개요

○ **(법적 근거)** 수도권대기법 제14조(사업장설치의 허가) 및 같은 법 시행령 별표2

< 사업장설치의 허가를 받아야 하는 자의 배출량 >

법 제14조에 따라 사업장설치의 허가를 받아야 하는 자의 배출량은 다음 각 호의 어느 하나와 같다.
1. 연간 질소산화물 배출량이 4톤 초과
2. 연간 황산화물 배출량이 4톤 초과
3. 연간 먼지 배출량이 0.2톤 초과

비고: 배출량은 「대기환경보전법 시행령」 제13조에 따른 1종사업장, 2종사업장 및 3종사업장에 설치된 배출시설에서 배출되는 오염물질의 양을 말한다.

○ **(시행 계획)** 대상사업장을 3개 시설군으로 구분하여 단계적으로 시행('18년~)
- 공통연소시설(발전, 소각 등 108개소)부터 시행 후, 다른 시설군 확대 검토

【수도권지역 먼지 총량관리제 적용시점(단위:개소, 톤)】

단계	시설군	적용시점	사업장수 (할당량)	적용 시설
1단계	공통연소	'18년	108 (463)	발전, 소각, 보일러, 고형연료
2단계	공정연소	'19년 이후	-	용해로, 소성로, 가열로, 건조시설 등
3단계	비연소			도장, 분쇄, 연마, 목재, 혼합가공 등

□ 운행차 배출가스 특별단속 개요

○ **(사전대응)** 봄철·겨울철 미세먼지 고농도 시기 대비하여, 미세먼지의 주요 발생원인 자동차 배출가스로부터 국민 건강을 보호하기 위해 수도권 등 대도시의 경유차 밀집지역(차고지·학원가·물류센터·병원 등)을 중심으로 특별단속을 실시

○ **(비상저감조치)** 미세먼지 비상저감조치 발령일에는 지차제 협조를 통해 해당 시·도 지자체의 단속반 투입하여 09~17시까지 고농도 발령지역 해당 지자체에서 운행차 수시점검(노상단속)을 강화함

※ 배출가스 허용기준을 초과한 차량에 대한 조치사항
- (정차식) 배출가스 측정 장비로 측정하여 「대기환경보전법」 제57조 배출허용기준 초과시 개선명령, 개선명령 미 조치시 운행정지 명령
- (비디오) 검사원 3명이 육안으로 매연초과여부 확인, 초과시 개선권고 조치

□ 노후 경유차 운행제한

○ 차량 정밀검사에 불합격한 노후 경유차의 수도권 도심 내 운행을 제한하고, 미세먼지 고농도 시에는 배출량이 일정량 이상인 차량의 운행도 임시로 제한

① 수도권특별법과 환경부-지자체(서울, 경기, 인천) 업무 협약에 따라 수도권에서 노후경유차 운행제한 확대 (서울 → '18년 인천·경기)

② '고농도 미세먼지 비상저감조치'가 발령되면 시·도 지자체의 조례로 정하는 등급의 차량은 해당 지자체 내 운행을 제한

* 미세먼지 등 오염물질 배출량 차이에 따라 5개 등급으로 구분 (전기차·수소차 1등급, 휘발유차 1~3등급, 경유차 3~5등급에 해당)

< 추진(시행) 중인 차량 운행제한제도 간 비교 >

구분	근거법(소관)	지역	제한대상	시행시기
비상시 (年 7~15일 수준)	도시교통정비촉진법 (국토교통부)	서울 전지역	▪ '05년 이전 노후경유차 (경유차 5등급 해당)	'18.6월~
	미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법(환경부)	전국	▪ **등급제**, 2부제 등 지자체 선택	'19년 예정
상시	수도권 대기환경개선에 관한 특별법(환경부)	수도권	▪ 종합검사 부적합 ▪ 저공해조치명령 미이행	서울 '12~ 인천·경기 '18.下~
	지속가능교통물류 발전법 (국토교통부)	서울 한양도성	▪ **등급제** 4~5급('08년 이전 등록 경유차 포함)	'19.上 예정

□ 환경친화적 자동차 및 저공해 자동차 의무구매제도

구 분	환경친화적 자동차	저공해 자동차
대상차종	○ 31종(전기차 11, 전기버스 6, 일반 하이브리드차 7, 플러그인하이브리드차 6, 연료전기차 1) * 환경친화적 자동차의 요건 등에 관한 규정(산업부 고시)	○ 103종(전기차 28, 수소차 1, 하이브리드차 22, 플러그인하이브리드차 5, 내연기관 47) * 수도권법 시행규칙 별표2(저공해차 배출허용기준)
의무구매 대상기관	- 공공기관 및 지방공기업 * 729개 기관(공공 321, 공기업 408) < 예외 > - 5대 이하 차량 보유기관 - 승합자동차, 특수자동차 등	- 수도권 내 행정·공공기관 * 233개 기관(행정 100, 공공 133) < 예외 > - 10대 미만 차량 보유기관 * 시행규칙 개정안 · (예외 추가) 특수자동차
구매의무 비율	- 70% (80% 전기·수소차) * '16년~'17년: 50% (40% 전기·수소차)	- 50% * '17년~'18년: 50%, '19년: 70%
공표	- 구매 미이행 기관의 위반사실	- 저공해 자동차 구매실적
벌칙	- 없음	- 300만원 이하 과태료