

# 대기환경관리의 관점에서 본 수도권 미세먼지 환경 개선

우정헌(건국대학교 융합인재학부/대학원 신기술융합학과)

## I. 서론

수도권은 전국 면적의 12%에 불과하지만, 총 인구의 48%가 살고 있고 자동차, 빌딩, 사업장 등 오염원이 집중되어 있어 대기오염도가 매우 심각한 수준이다. 최근 우리나라 전역에서 미세먼지의 오염이 심화되고 있어 이에 대한 대책을 강구하는 우려의 목소리가 높다. 이에 정부는 수도권의 대기오염을 획기적으로 개선하여 지역 주민의 건강을 보호하고 쾌적한 생활환경을 조성하고자 2003년 12월『수도권 대기환경 개선에 관한 특별법』을 제정하여 수도권의 지방자치단체와 함께 대기환경 개선을 위해 노력하고 있다(우정헌, 2009). 또 한편으로는 NASA와 협력하여 대규모 항공관측 캠페인을 실시함으로써(KORUS-AQ and MAPS-Seoul) 미세먼지의 생성과 이동에 대한 과학적인 원인규명에 노력하고 있다.

이러한 노력들에도 불구하고 미세먼지 오염은 나아지지 않고 있어, 여러 가지 우려의 목소리가 나오고 있다. 일각에서는 우리나라의 저감 대책이 제대로 시행되지 않아서 라고도 하고, 중국의 영향이 너무 커서, 또는 기후변화나 대기 중의 이차적인 생성이 문제라고도 한다. 과연

어느 것이 진정한 문제인지 아니면 위에 언급된 모든 것이 문제인지는 아직 명확하지 않지만, 우리나라가 막대한 예산을 써가며 야심차게 수행해 왔던 대기질 개선정책들이 아직은 미세먼지를 체감할 수 있을 만큼 개선하지 못했다는 것은 분명한 듯하다. 그렇다면 지금처럼 계속 미세먼지 개선에 막대한 예산을 쏟아 부어야 할까? 아니면 우리가 무엇을 어떻게 해야 할지에 대한 과학적 근거가 명확해질 때까지 기다려야 할까? 본문에서는 수도권 대기환경 개선 기본계획을 중심으로 미세먼지 문제에 대한 과학적 지식과 미세먼지 대책 현황을 검토해 봄으로써 우리나라 미세먼지 대기질의 개선 가능성을 살펴보고자 한다.

24

## II. 미세먼지의 정의 및 현황

### 1. 미세먼지의 정의 및 특성

미세먼지란 대기 중에 부유하는 공기역학적 직경이 10 $\mu$ m이하인 입자상 물질(PM10)을 의미하며, 초미세먼

지(PM2.5)란 직경이 2.5 $\mu\text{m}$ 이하인 입자를 말한다. 우리나라 “환경정책기본법”이나 “수도권 대기환경개선에 관한 특별법”에는 PM10과 PM2.5를 모두 미세먼지로 표기하고 있으나(감사원, 2016), 본문에서는 PM10을 미세먼지로 PM2.5를 초미세먼지로 구분하여 표기하기로 한다. 미세먼지에 비해 초미세먼지가 더욱 중요한 이유는 몇 가지를 들 수 있다. 미세먼지(PM10)가 사람의 머리카락 지름(50~70 $\mu\text{m}$ )보다 약 1/5~1/7 정도로 작은 크기라면, PM2.5는 머리카락의 약 1/20~1/30에 불과할 정도로 매우 작다. 이처럼 미세먼지는 눈에 보이지 않을 만큼 매우 작기 때문에 대기 중에 머물러 있다 호흡기를 거쳐 폐 등에 침투하거나 혈관을 따라 체내로 이동하여 들어감으로써 건강에 나쁜 영향을 미칠 수도 있다. 세계보건기구(WHO)는 미세먼지(PM10)와 초미세먼지(PM2.5)에 대한 대기질 가이드라인을 1987년부터 제시해 왔고, 2013년에는 세계보건기구 산하의 국제암연구소(IARC, International Agency for Research on Cancer)에서 미세먼지를 사람에게 발암이 확인된 1군 발암물질(Group 1)로 지정하였다(환경부, 2016).

미세먼지 농도는 공기 1 $\text{m}^3$  중 미세먼지의 무게(백만분의 1 $\text{g}$ 을 의미하는  $\mu\text{g}$ )를 나타내는  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  단위로 표시

하는데, 우리나라의 장기 환경기준에서 PM10은 연평균 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  이하, PM2.5는 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 유지되어야 한다. 미세먼지를 이루는 성분은 그 미세먼지가 발생한 지역이나 계절, 기상조건 등에 따라 달라질 수 있다. 일반적으로는 기체상 대기오염물질이 공기 중에서 반응하여 형성된 입자(황산염, 질산염 등)와 석탄·석유 등 화석연료를 태우는 과정에서 발생하는 탄소류와 검댕, 지표면 흙먼지 등에서 생기는 광물 등으로 구성된다.

## 2. 미세먼지의 발생 및 생성

미세먼지 발생원은 자연적인 것과 인위적인 것으로 구분되며, 굴뚝 등 발생원에서부터 고체 상태의 미세먼지로 나오는 경우(1차적 발생)와 발생원에서는 가스 상태로 나온 물질이 공기 중의 다른 물질과 화학반응을 일으켜 미세먼지가 되는 경우(2차적 발생)로 나누어 질 수 있다. 2013년의 경우 전국 1차 미세먼지 배출량은 PM10 약 12.2만 톤, PM2.5 약 7.7만 톤으로 산정되었다. 미세먼지 배출량이 가장 많은 배출원은 제조업의 연소공정이며, 그 다음으로 자동차를 비롯한 이동오염원에서 많이 배출되었다. 이동오염원에서 나오는 미세먼지는 대부분

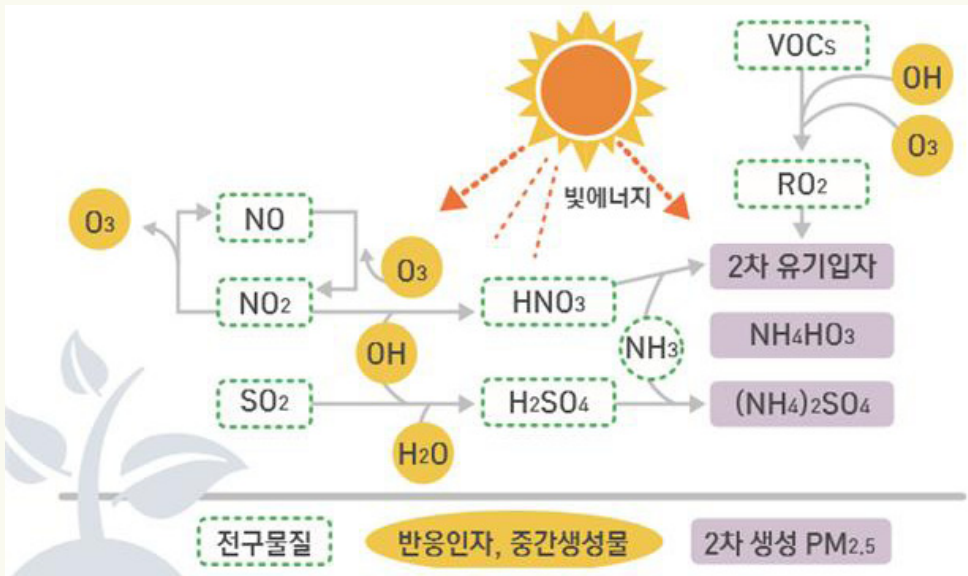


그림 1. 2차 미세먼지의 전구물질 및 생성과정 (환경부 2016)

이 PM2.5로 그 비중이 92%에 이른다. 도로이동오염원의 경우 화물차와 RV(SUV)차량에서 미세먼지 대부분이 배출되며, 비(非)도로이동오염원의 경우 선박과 건설장비 등에서 미세먼지가 많이 나온다. 이들 통계에 포함되어 있지 않은 것으로 날림먼지가 있다. 날림먼지는 일정한 배출구 없이 대기로 흩날리는 미세먼지를 말한다. 날림먼지로 인한 미세먼지 발생량은 매우 많은 것으로 추정되고 있으며, 전국의 날림먼지 배출량은 PM10 약 12만 톤, PM2.5 1.8만 톤에 달한다.

석탄·석유 등 화석연료가 연소되는 과정에서 배출되는 황산화물이 대기 중의 수증기, 암모니아와 결합하거나, 자동차 배기가스에서 나오는 질소산화물이 대기 중의 수증기, 오존, 암모니아 등과 결합하는 화학반응을 통해 미세먼지가 생성되기도 하는데 이것이 2차적 발생에 속한다(그림 1). 2차 미세먼지가 중요한 이유는 수도권만 하더라도 화학반응에 의한 2차 생성 비중이 전체 초미세

먼지(PM2.5) 발생량의 약 60%이상을 차지할 만큼 매우 높기 때문이다(환경부, 2016).

### III. 미세먼지 관리 정책

#### 1. 우리나라의 미세먼지 관리 정책

수도권 지역의 심각한 대기오염을 타개하고, 시민에게 보다 깨끗한 공기를 제공하기 위하여 정부는 수도권 대기환경개선에 관한 특별법(이하 특별법)을 제정하여 2005년부터 시행하였고, 2005년 11월 대기개선 목표 등 10년간의 대기관리 계획이 포함된 “수도권대기환경관리 기본계획”(이하 1차 기본계획)을 발표하였다. 이에 따라 서울과 인천, 경기도는 기본계획에 따른 시행계획을 수립하였고 2007년 1월 환경부의 승인을 거쳐 추진하였

표 1. 2차 수도권 대기환경관리 기본계획의 관리대책

구분	대책 분야	세부 대책
자동차 관리대책	운행차관리	원격측정장비(RSD)확충, 배출가스저감사업, DPF부착, 엔진개조, 조기폐차, 삼원촉매장치교체, PMNOx동시저감장치, 사후관리, 공해차량 운행제한지역(LEZ)관리 시스템 구축 및 운영
	건설기계 및 선박관리	건설기계 및 선박 배출가스 저감사업, 건설기계 DPF부착, 건설기계 엔진교체, 건설기계 엔진개조, 건설기계조기폐차, 선박 DPF부착, 사후관리
	교통수요관리	청정버스정류장 설치
배출시설 관리대책	사업장 총량관리시스템운영, 사업장 저녹스 버너 설치 및 검사	
생활오염원 관리대책	주유소 유증기 회수설비 설치 및 검사, 밀폐형 세탁기기 교체 및 관리, 지역공동재활용센터 설립 및 운영, 직화구이 음식점 방지시설 설치, 가정용 저녹스보일러 교체, 이동측정시스템 구축 및 운영, 먼지제거장비 보급, 건축물 옥상 및 벽면 녹화사업	
과학적관리 기반구축 및 홍보강화	수도권 대기관리 정책지원시스템 구축, 정책 추진을 위한 연구사업(R&D), 대국민 홍보	

출처 : 한국환경정책·평가연구원, 2013

표 2. 수도권 2차 기본계획 수행을 위한 대기오염물질 현황 및 저감 목표 농도

관리대상물질	2010년 평균농도 (수도권평균)	2024 목표(안)	저감농도
PM10( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	46.2	30	16.2
PM2.5( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	33.1	20	13.1
NO <sub>2</sub> (ppb)	26.1	22	4.1

출처 : 한국환경·정책평가연구원, 2013

다. 1차 기본계획의 시행으로 수도권 대기질이 일부 개선되었음에도 불구하고, 국가 대기환경기준이나 선진국 주요 도시의 대기질에 비하여 열악한 상황이기 때문에 2015년 이후의 대기관리가 필요하며, 이에 따라 2015년 이후 10년간의 수도권 대기관리를 위한 “2차 수도권 대기환경관리 기본계획”(이하 2차 기본계획)을 수립하여 시행하고 있다. 2차 기본계획의 주요 대책들로는, 1. 관리체계 및 관련 법 정비, 2. 자동차관리 대책 수립 및 운영, 3. 배출시설 관리 대책 수립 및 운영, 4. 생활오염원 관리 대책 수립 및 운영, 5. 과학적 관리기반 구축등이 있다(표 1). 10년 동안의 총 계획기간 동안 소요되는 재원을 보면 총 4.55조 원 중 자동차관리에 약 81%, 배출시설관리 7.9%, 생활오염원관리 9.3%, 과학적 관리기반 구축 및 홍보강화 1.6%로 구성되어 있다.

이를 통해 2024년까지 달성해야 할 대기오염 저감농도는 <표 2>와 같다. 2차 기본계획의 목표를 달성할 경우 건강의 편익을 9조 2천억 정도로 추정하였는데 이의 대부분은 초과사망감소로 인한 것이다.

## 2. 중국의 미세먼지 관리 정책

우리나라의 먼지오염에 지대한 영향을 주는 북경의 2010년 PM2.5 연평균 농도가 WHO 기준치( $25\mu\text{g}/\text{m}^3$ )의 3배 수준을 상회하는  $70\sim 80\mu\text{g}/\text{m}^3$  으로 심각해짐에 따라 중국 국무원은 ‘2013~2017년 대기오염방지 행동계획’을 발표(‘13.9.12)하였다. 발표된 계획은, 1) 2017년까지 전

국 지(地)급 이상 도시는 PM10 농도를 2012년 대비 10% 이상 감축하여 대기질이 양호한 일수를 점진적으로 제고하고, 2) 북경·천진·하북(징진지), 장강삼각주(상해일대) 및 주강삼각주(광둥일대) 등 3대 대기오염 심각지역은 PM2.5 농도를 2012년 대비 각각 25%, 20%, 15% 감축하고, 북경시는 PM2.5 연평균 농도를  $60\mu\text{g}/\text{m}^3$  수준으로 억제하는 것을 목표로 하고 있다.

또한 지방정부 차원에서도 ‘대기오염방지 행동계획’에 따라 주요도시별 (북경·천진·하북(징진지), 북경, 천진, 상해) 실행계획을 속속 발표하였는데, 2013년 9월에는 환경보호부와 북경, 천진, 하북, 산서, 산둥, 내몽고 등 6개 지방정부가 ‘대기오염방지 목표책임 서약서’에 공동 서명하였다(표 3). <표 3>에 나와 있는 바와 같이 북경의 대기오염 관리대책은 우리나라의 수도권 기본계획과 비슷한 대책들을 시행하려고 하고 있으나 좀 더 광범위하고 강력하다고 볼 수 있다. 중국 정부는 2017년까지 대기질 개선을 위해 1조 7,000억 위안(약 300조 원)의 예산을 투입할 계획이다.

## IV. 미세먼지의 관리에 대한 이슈와 평가

### 1. 수도권 미세먼지 관리정책: 실패인가 성공인가?

1차 수도권 대기환경 개선 기본계획 추진을 종료한

표 3. 북경시 청정공기 행동계획 (2013~2017년)

달성 목표	•오염 심각일수 대폭 감소 •2017년에 공기 중의 PM2.5 연평균 농도를 2012년 대비 25% 감축 •PM2.5 연평균 농도를 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 억제	
주요 시책	1) 오염원 단속 - 도시기능과 공간구조 최적화 - 개발강도 통제 - 인구총량 통제 조치 - 자동차 보유량(600만대) 억제 - 자원환경 진입기준 강화 - 환경영향 평가 강화  3) 자동차 구조조정 - 대중교통 보급 - 16년 6단계 기동차 배기기준 적용 - 낮은 자동차 100만대 퇴출 - 청정에너지 자동차 (20만대) 보급 - 업종별 자동차 구조조정 - 2017년까지 북경시 외곽순환 고속도로 건설  5)오염배출 관리 - 저유황 석탄 및 제품기준 발표 - 자동차제조 등 배출기준 제정 - 질소산화물 감축 (시멘트탈질,교외구역집중난방센터) - 공업먼지 감축 (시멘트, 석탄보일러, 공업요로 등) - 휘발성 유기물질 감축  7) 생태환경건설 - 녹화피복률 향상, 생태복원 등  9) 6가지 보장조치 - 법규체계 보완, 기술개발 지원 등	2) 에너지 구조조정 - 석탄총량 삭감 (2012년 대비 1,300만톤 삭감) - 가스발전소 건설 (가스 화력 발전센터 4개 건설) - 일정규모 제조기업의 생산용 에너지의 청정화 추진 - 도시 중심구역의 무석탄화 - 2016년 농촌지역의 가스취사 실현 - 석탄 비중 10% 이하로 감축 - 건물 에너지 이용효율 향상  4) 산업구조 최적화 - 3차산업 비중 확대 - 낙후산업 퇴출 (시멘트 산업) - 소형 오염기업 정리 (건설자재, 화학공업, 가구제조 등 1,200개) - 생태공업단지 건설 - 공업개발구등 전략환경영향평가 실시 - 청정생산심사 강화(400개 기업) - 철강, 시멘트, 화학공업 등 중점업종 오염배출량 감축  6) 도시 정밀화관리 - 공사현장 먼지, 도로 먼지, 생활쓰레기 발생량 억제 - 노천 바비큐와 요식업의 기름연기 억제  8) 오염심각일 비상대응 - 책임제 실시, 차량 2부제 등  10) 3가지 시민참여행동 - 기업, 시민의 자발적 감축행동

출처 : 주중대사관, 2015

2014년 서울의 대기오염도는 2005년 대비 NO<sub>2</sub>와 PM10의 농도는 감소하였으나 목표치(PM10 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , NO<sub>2</sub> 0.022ppm)에는 미달하였고, O<sub>3</sub>의 농도는 오히려 증가하였다. 환경부는 제2차 기본계획을 수립하면서 우리나라 대기오염 현황, 대기오염물질 배출량 및 오염물질 저감 목표 달성가능성 등을 고려하여 PM2.5의 목표농도를 국가 환경기준인 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 설정할 것을 검토하였다. 그러나 기본계획 확정을 위한 공청회에서 전문가가 제시한 대기환경개선 목표 강화 의견을 반영하여 PM2.5의 목표농도를 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 강화하여 확정하였다. 이와 관련하여 2015년 12월 한국대기환경학회에서 감사원에 제출한 자문의견서 등에 따르면 기본계획대로 수도권에서만 대기오염 저감대책을 시행할 경우 <표 4>와 같이 PM2.5와 PM10 농도가 각각 32.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 44.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 30.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 37.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 감소되나 목표농도인 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 는 달성하지 못하는 것으로 예측되었다. 또한 제2차 기본계획 외에 비산먼지 대책 등에 따른 추가 저감과 2024년까지 중국에서 환경 규제를 강화하여 대기오염물질 배출량을 저감하는 경우에도 PM2.5 농도가 26.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 예측되어 목표농도에 미치지 못하는 것으로 나타났다. 표에는 제시되어 있지 않지만, 보고서에는 목표농도를 달성하는 경우도 있었는데 이는 중국이 현재배출량의 50%를 일괄 삭감하는 시나리오로서 현실성이 떨어지는 것으로 평가된다.

<표 4>에서 제시된 바와 같이 2차 기본계획은 초미세먼지의 농도목표치를 달성하지 못하는 것으로 나타났다. 감사원의 감사에서 지적된 수도권 기본계획 수립 및

시행에서의 주요 문제점은, 1) 수도권 외 지역 오염원에 대한 관리 대책을 마련하지 않았고, 자동차 대기오염물질 배출량 산정 기준에 문제가 있어 기본계획 보완 필요, 2) 제2차 기본계획상 투자계획의 66.5%를 차지하는 디젤먼지필터(DPF)등 운행차 저공해화 사업이 비용-효율성 떨어져 사업구조 재편이 필요, 3) 제1차 기본계획의 배출 삭감량이 목표에 못 미치는데도 계산 오류 등으로 삭감량을 최대 87.4% 과다 산정하여 보고한 것을 제대로 확인하지 않고 인정하는 등 실적평가 부정확, 4) 운행차 저공해화사업 보조금을 적정단가의 최대 112% 상당으로 높게 산정·교부하고, 불법 탈거 등에 대한 점검·관리가 되지 않는 등 사업 관리 부실, 5) 우수사업장 선정을 잘못(9개소)하거나 자가 측정이 형식적으로 이루어지고 있는데도 관리·감독 부실, 6) 예보 및 대기질 관리분야에서 측정망 관리 등의 신뢰도 문제 등이 지적되었다(감사원, 2016)

이러한 목표달성 및 계획시행에서의 문제점들을 보면 수도권 대기환경 개선계획은 실패인 것으로 보인다. 하지만 이러한 평가는 정당한 것인가 하는 의문을 제기하지 않을 수 없다. 광주과학기술원의 송철환 교수의 기고문(한국일보, 2016년 8월 1일)에서 나타나듯이 중국 등 외부배출원에서의 기여를 제외하면 우리나라 미세먼지의 농도는 23~32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도로 도쿄, 런던, 파리와 비슷한 수준이다. 게다가 우리가 어쩔 수 없는 자연적인 오염원까지를 제외한다면, 우리가 제어할 수 있는 배출원만으로 관리하고 있는 농도의 수준은 그다지 나쁘지 않을지도 모른다. 어쩌면 너무나 과도한 환경목표의 설정이 문

표 4. 수도권 대기환경개선사업 추진에 따른 대기환경 개선 정도 예측 모델링 결과(단위:  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

구분	2024년 예측농도 (무대책 시)	수도권에만 제2차 기본계획 시행 시	제2차 기본계획 외 추가 저감과 중국 동시 저감	제2차 기본계획 목표
PM2.5	32.7	30.0	26.2	20.0
PM10	44.8	37.9	30.7	30.0

자료: 감사원, 2016



제는 아니었을까?

## 2. 미세먼지 오염 개선을 위한 이슈 및 제언

### (1) 질량위주 관리와 위해성중심 관리

2장에서 논의한 바와 같이 초미세먼지는 미세먼지에 비해 작기 때문에 폐와 혈관에 침투할 가능성이 더욱 높으며, 독성과 산성이 강한 성분의 비중이 높기 때문에 건강에 미치는 악영향이 높다고 볼 수 있다. 하지만 우리나라의 환경기준은 대기중에 존재하는 먼지의 질량으로 농도를 규제하고 있기 때문에 직경이 큰 먼지의 비중이 커지게 된다. 예를 들면 직경이 10 $\mu$ m인 먼지는 2.5 $\mu$ m인 먼지에 비하여 직경은 4배이지만 부피는 64배이며, 밀도가 같다면 질량도 64배가 된다. 즉, 미세먼지(PM10)과 같은 기준을 쓰게 되면 침투력도 강하고 독성도 높은 작은 입자를 오히려 정량할 수 있는 기회를 놓치게 될 가능성이 높다고 볼 수 있기 때문에 초미세먼지(PM2.5)를 위주로 하는 오염도 평가와 대기질 정책의 수립이 중요하다고 볼 수 있다. 실제로 도로에서의 날림먼지의 배출은 대부분 초미세먼지의 영역보다 더 큰 큰 입자들로 이루어져 있는데, 미세먼지의 배출량에서는 많은 부분(총 배출량 대비 50%정도)를 차지하고 있다. 이런 이유로 가장 실효성이 높은 미세먼지 저감정책이 도로청소차를 도입하는 것이 되는 현상이 벌어지기도 했다. 도로에서의 날림먼지를 저감하는 것이 중요하지 않은 것은 아니나, 감사원 지적에서와 같이 DPF등 보다 위해성이 높은 초미세먼지에 대한 대책이 비용-효율적으로 경쟁력이 떨어지는 것으로 보이는 것은 문제가 있다고 보인다.

### (2) 1차오염관리와 2차오염관리

제 1차 수도권 대기질 개선계획에서 미세먼지 저감을 위한 대책의 대부분은 오염원에서 직접적인 배출되는 물질인 1차 미세먼지 배출저감을 위한 것이었다. 1차 배출물질 저감의 핵심은, 1) 언제 어디서 어느 정도의 먼지가 배출되는 지 잘 정리되어 있는 인벤토리가 있는지와, 2)

저감정책이 얼마나 실효성 있게 오염물질의 배출을 저감시키는 지 일 것이다. 2차 기본계획을 수립하며 기준연도 배출인벤토리에 생물성연소로 인한 배출을 포함시키지 않았다가, 대책적용에 문제가 생기자 급작스럽게 인벤토리에 포함시키는 등의 문제를 드러냈다. 또한 어떠한 대책들은 이미 1차 기본계획에서 저감된 세부배출부문에 대한 것이어서 2차 대책에서 계획한 저감목표량을 달성할 수 없는 문제들을 드러내기도 했다. 그러므로 1차 오염관리의 핵심인 배출을 제대로 이해하는 것과, 배출과 대책을 구조적으로 연계시키는 것은 아주 기본적인 것으로 보이지만 아직도 끊임없는 개선이 필요한 부분이다. 특히, 우리나라의 배출인벤토리가 배출량 산정 방법의 고도화에 집중한 나머지 배출과 저감간의 투명한 연계성을 담고 있지 못함은, 향후 대기오염뿐만 아니라 기후변화 문제에 있어서도 개선되어야 할 점이라고 보인다.

대기 중에서 생성되는 2차 미세먼지에 관한 문제는 해당물질의 직접배출뿐만 아니라 전구물질의 배출, 대기 중의 반응조건, 대기중 농도 비의 변화에 따른 비선형적 화학 반응 regime의 변화 등을 모두 고려해야 되기 때문에, 또 다른 수준의 과학적 이해가 필요하다. 예를 들어 2차 초미세먼지의 생성에 대한 이해를 위해서는 전구물질인 SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>, NMVOC등의 1차 배출량을 이해해야 함은 물론, 어떠한 지역과 시점에 어떠한 화학종이 배출되는 지를 잘 알아야 한다. 게다가 식물이 배출하는 NMVOC는 수종의 분포와 잎의 활력도 뿐만 아니라 온도와 일사량 등의 기상요인도 고려해야 하기 때문에, 대기 중의 화학반응은 차치하고도 배출의 정량화만으로도 충분히 복잡한 과학이 동원되어야 한다. 일례로, 올해 실시된 NASA와 국립환경과학원은 KORUS/MAPS 항공 관측에서 우리나라 도시지역에서 다른 나라와는 달리 NMVOC중 톨루엔의 농도가 높게 관측되었다. 이는 환경부가 운영하는 지상의 광화학 측정망에서도 동일하게 관측되어 왔는데, 현재의 대기화학 모델링에서는 이러한 배출 화학종의 배출특징을 제대로 반영하고 있지 못한 실정이다. 여기에 저감대책까지 고려해야 한다면 문제는 더욱 복잡해지게 된다. 다른 예로는, 도로상 대기

오염의 직접측정에서 NO:NO<sub>2</sub>의 비율이 기존에 알려진 95:5 아니라 50:50에 가깝다는 보고가 있었는데, 그 이유가 자동차에 장착되어온 NO<sub>x</sub> 저감장치가 NO를 NO<sub>2</sub>로 미리 산화시키기 때문인 것 같다. 이것이 사실이라면 차량량의 NO배출이 일으키는 오존 소멸 (O<sub>3</sub> titration)현상이 약화가 일어나기 때문에 2차오염물질 농도를 증가시킬 수 있다. 즉, 앞으로는 대기오염의 저감을 위해서 배출대기화학-저감기술의 모든 부분을 체계적이고 과학적으로 이해하여 관리에 적용하는 고도화가 필요할 것이며, <그림 2>에서와 같이 저감기술의 저감 효율뿐만 아니라 저

감효율 비까지도 고려해야 할 것이다.

(3) 지역내 지역의 배출원의 기여(중국발 미세먼지)

2차 기본대책의 연구시 초미세먼지의 국외 기여율은 연평균 50% 정도의 수준으로 모사되며 계절별, 사례별로 80%를 상회하는 경우도 있다. 이 중 2차 초미세먼지의 구성요소인 황산염과 질산염을 보면, 질산염(NO<sub>3</sub>) 농도는 국내 배출원에 의한 영향이 크게 나타나는 반면 (서울의 경우 5 $\mu$ g/m<sup>3</sup> 내외), 황산염(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) 농도는 국내 배

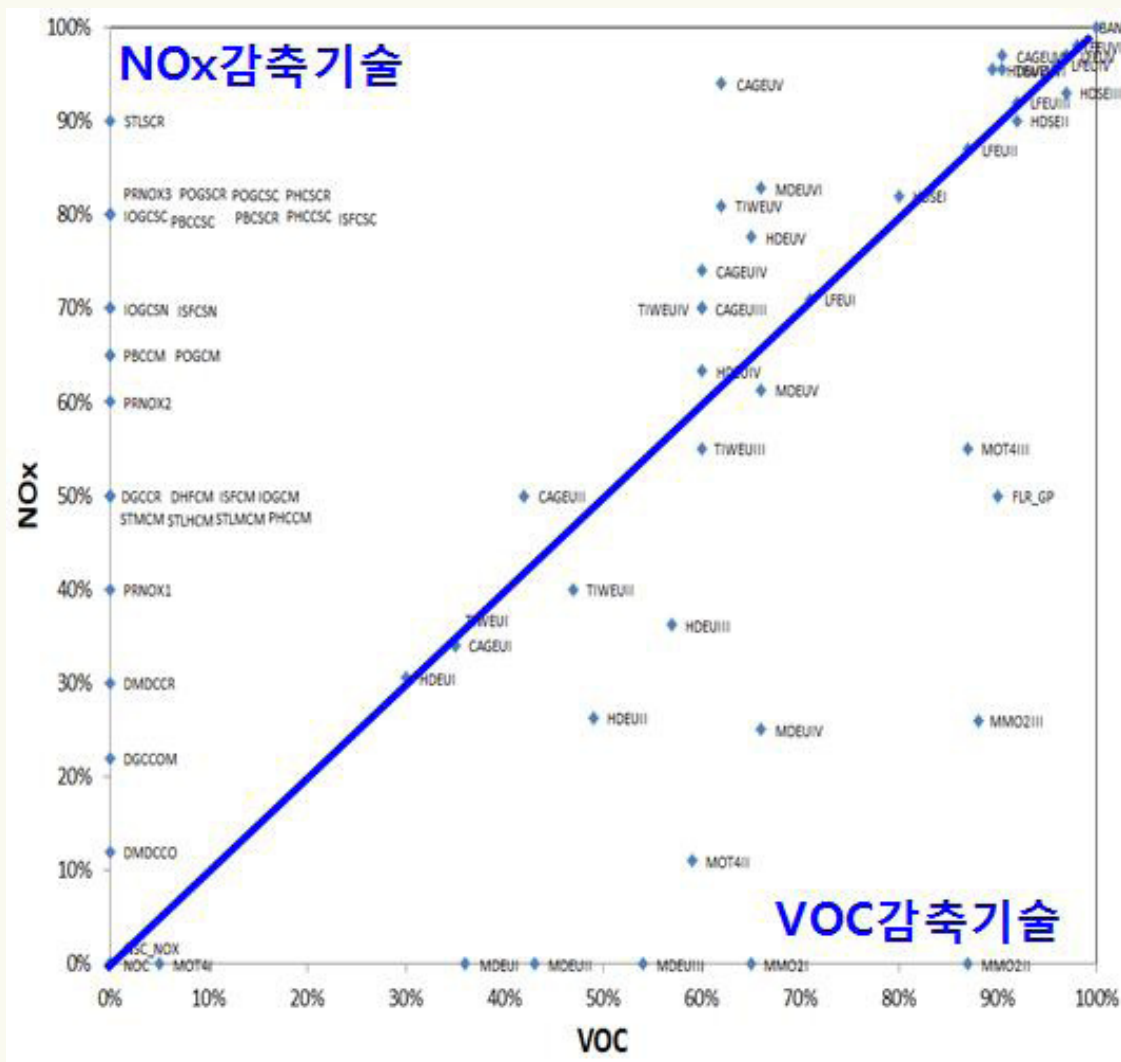


그림 2. 기술별 NOx와 VOCs 저감 효율 (J.-H. Woo, 2013)



출원에 의한 영향이 작게 나타났다(서울의 경우  $2\mu\text{g}/\text{m}^3$  내외).

2차 기본대책 모델링 보고서에서 밝힌 바와 같이 중국의 배출은 우리나라의 미세먼지 농도에 영향이 크기 때문에, 개선 목표 달성에도 지대한 영향을 미친다. 특히, 미세먼지의 농도가 높아지는 겨울철이나 고농도 사례를 살펴보면 그 기여도는 더욱 더 높게 나타나고 있다. 때문에 2차 대책의 계획 수립의 마지막 단계에서 급히 중국의 미래 배출저감을 단순 가정하여 우리나라의 개선 목표치를 달성하고자 하였다. 하지만 <그림 3>에 나타난 바와 같이 연구자와 시나리오별로 중국의 미래 배출량은 대단히 큰 편차를 보이고 있기 때문에, 중국과의 환경 개선 협력을 추진함과 동시에 중국의 초미세먼지 미래에 대한 주의 깊은 이해와 연구 역시 필요하다. 또한 배출정보의 불모지와 다름없지만 우리나라와 바로 인접한 북한으로부터의 영향 역시 주의 깊게 고려해야 할 것이다.

#### (4) 기후변화감축과 미세먼지관리

올해 발생한 여름철 폭염처럼 지속적인 기후변화가 일어나고 있으면 머지 않은 미래에 우리나라 기후는 온대에서 아열대로 변화할 것이라고 믿어지고 있다. 기후변화가 대기환경에 미치는 영향은 상당히 다양한데, 기온변화로 인한 대기화학의 변화나 기상 변화로 인한 장거리 오염의 전달 패턴의 변화는 아직도 많은 부분 과학적 연구가 필요한 실정이다. 이에 비해 보다 직접적이고 현실적인 변화는 기후변화로 인한 에너지 사용패턴의 변화나 기후변화 감축대책으로 인한 대기오염물질의 배출변화, 즉 동반감축(co-control) 효과 및 이로 인한 동반편익(co-benefit)효과일 것이다.

올해 같은 폭염으로 인해 전력의 수요가 급격히 증가하면, 이는 전력수급계획에 영향을 미치게 된다. 만약 단기적으로 급격한 전력 공급을 요구 받는다면 비용이 저

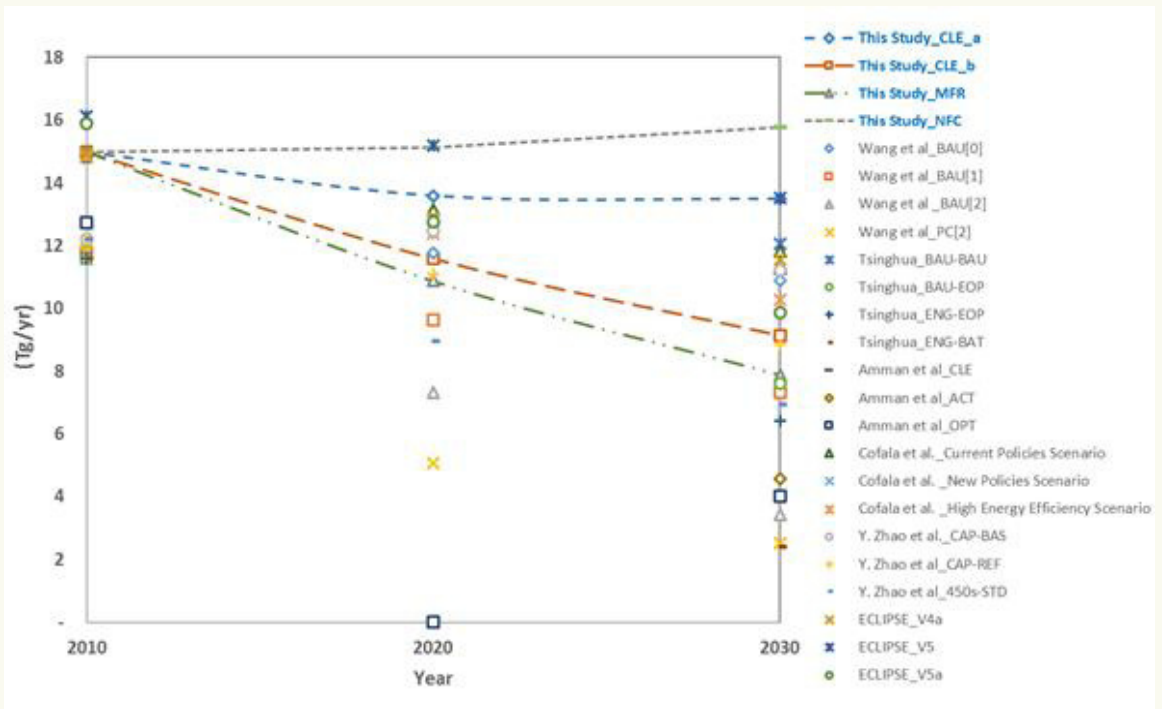


그림 3. 시나리오 및 연구자별 중국의 미래 PM2.5 배출량 전망(Kim, et al., 2016)

렵하고 기술적으로 안정된 고체연료 기반 발전시설의 확충에 무게가 실릴 수 있고, 이는 대기환경에 직접적인 영향을 미치게 된다. 장기적인 기후변화의 관점에서 보면, 파리협약을 통해 제출한 우리나라의 온실가스의 자발적 감축(INDC)등이 해당된다. 탄소저장기술(CCS)를 제외하면 대부분의 온실가스 저감 대책은 에너지 소비 구조의 변화로 이어지기 때문에 국제사회에 약속한 온실가스 감축계획은 막대한 동반감축 효과를 가져 올 수 있다. 게다가 INDC같은 경우는 2030년을 목표연도로 하고 있어 2024년이 목표연도인 2차 기본계획과 많은 기간 중첩된다. 때문에 기후변화 완화를 위한 여러 가지 감축대안들을 대기환경과 연계하여 고려하는 것은 아주 중요한 의미가 있다고 볼 수 있다.

(5) 과학기반과 관리기반

최근 국립환경과학원과 미국의 NASA는 공동으로 비행기와 위성, 지상과 해상관측망을 총동원한 대규모 항공관측 캠페인 (MAPS-Seoul/KORUS-AQ)을 시행하였다. 우리나라의 MAPS(Megacity Air Pollution Study-Seoul)은 이름에서 알 수 있는 것처럼, 과학에 기반한 대기현상의 이해와 환경정책의 평가 및 개선을 그 주 목적으로 한다. 이에 비하여 KORUS-AQ는 정지궤도 환경위성에 기반한 환경대기 관측기술을 검증하는 역할이 주

요하게 고려되었다(그림 4). 어떠한 목적이든 간에 3대의 비행기와 수많은 우주기반, 지상/해상기반 관측망과 모델링 예보기술이 총동원되어 이 지역의 대기환경에 대한 이해를 시도했다는 점에서 너무나 반가운 일이 아닐 수 없다. 하지만 이러한 과학관측 캠페인이 올해 시행되었다는 이유 때문에 대기환경과 개선대책의 인과관계에 대한 충분한 과학적 이해없이 무조건적인 계획을 수립하고 혈세를 투자했다는 식의 이의가 제기되기도 하였다(국립환경과학원, 2016).

2차 기본계획에서 R&D에 투자되는 비용은 1.1%정도이니, 이러한 비난이 아주 근거 없는 것은 아닐 것이다. 하지만 환경문제의 본질을 미래를 전망하고 지금을 준비하는 것이기 때문에, 과학적 이해가 완전해야만 개선을 시행할 수 있다는 주장은 설득력이 없다. 다만 거대한 비용이 소요되는 정책을 수립하고 시행하기 이전에, 현재 우리가 얼마나 과학적 이해를 하고 있는 지에 대한 냉철한 평가와 이에 기반한 계획수립은 정말로 중요하다고 보인다.

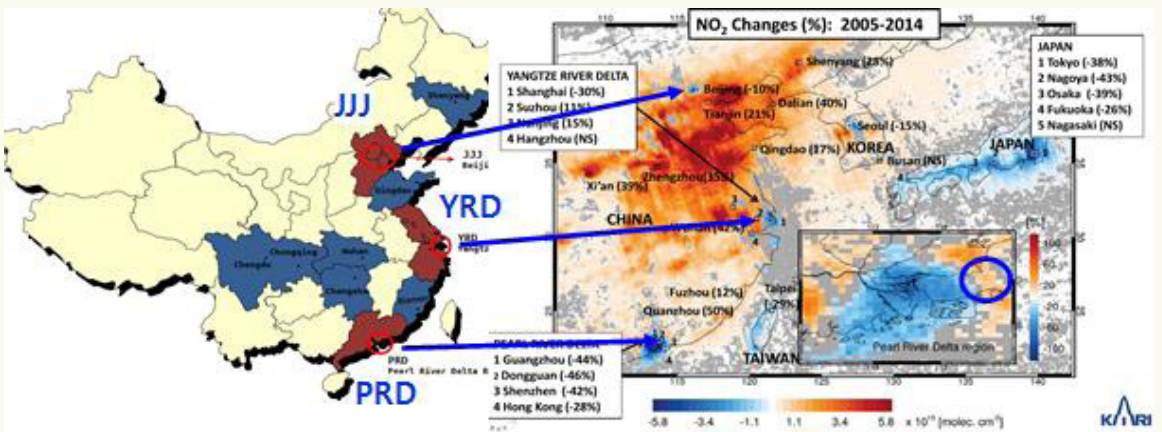


그림 4. 중국의 주요 대기오염 규제지역(좌)과 위성에서 관측된 10년간(2005~2014) 대기중 NO2 농도변화

## V. 맺는 말

우리나라, 특히 수도권의 미세먼지 오염을 걱정하고, 즉각적이고 효과적인 개선대책을 요구하는 목소리가 높다. 이에 정부는 올해 6월 3일에 정부합동 미세먼지 관리 특별 대책을 확정하여 발표하였다. 여기에는 “미세먼지가 국민의 안전과 건강을 위협하는 중차대한 환경난제임을 인식하고, 미세먼지 문제를 해결하기 위하여 관계 부처 합동으로 총력 대응하기로 하였다”와, 좀 더 과학적, 거시적, 총체적인 개선 대책을 세우기로 하였다는 반가운 소식이 들어있다. 하지만 이를 달성하기 위해 기존계획을 앞당겨 시행하고, 신규대책을 추가하여 “①제2차 수도권대기환경기본계획의 목표를 3년 앞당겨 조기 달성하고(20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  달성 '24년→'21년), ②10년 내에 유럽 주요도시의 현재 수준으로 초미세먼지를 개선(서울 기준, '15년 23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  → '26년 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )한다”는 목표를 설정하였다는 내용을 접했을 때 2차 기본계획의 감사에서 지적된 것이 재현된다는 우려를 하지 않을 수 없었다.

미세먼지 오염이 중차대한 환경난제임을 의식했음에도 불구하고, 그리고 그것이 우리만의 대책으로는 해결 불가능하여 주변국과의 긴밀한 협조가 필요함에도 불구하고, 왜 우리는 또다시 조기달성, 초과달성을 외치는 것일까? 만약 2021년의 수도권 초미세먼지 농도가 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  된다면, 수도권은 정말 유럽 주요도시 수준의 대기오염을 달성할 수 있고 계속 유지할 수 있을까?

최근 미세먼지와 관련하여 많은 일들이 일어났고 이로 인해 우리가 처한 환경에 대한 위기의식을 가지게 된 것은 바람직한 일이나, 지금은 조금 더 차분히 우리가 정말 무엇을 알게 되었고, 무엇을 관리할 수 있는지, 그리고 그를 위해서 어떠한 일들을, 어떠한 시점에, 누구와 함께 해야 하는 지를 정리하는 것이 우선이라는 생각이다. 미세먼지가 중차대한 문제가 되면서 누구나 많은 재원과 장비를 투입해야 한다고 주장하고 있지만, 지난 수 년 동안 이에 관련된 연구와 업무를 수행하면서 느낀 점은 아이러니 하게도 우리가 선진국에 비해 가장 뒤지지 않는 것이 예산과 장비이고, 그다음이 인력, 그리고 가장 잘 안 되는 부분이 계획과 관리 시스템이라는 것이다. 지금 단

기적으로 많은 돈과 장비를 투입하여 미세먼지를 해결하려고 하지만 - 그리고 그 결과로 미세먼지 문제를 온 좋게 개선할 수 있을지 모르지만 - 올바른 이해에 기초하지 않고, 개선을 위해 체계적으로 움직이는 제도적 시스템이 없다면 조만간 문제는 다시 나타날 것이다. 과학계가 현상을 연구하고, 발전된 과학과 안정된 자료DB를 기반으로 정부가 미래의 개선계획을 세우고, 지자체와 산업계가 협조하여 문제를 해결하고, 적절한 피드백 통해 지속적인 개선이 이루어지는, 너무나 당연하지만 잘 지켜지지 않는 우리의 문제가 이제는 나아지기를 기대해 본다.

## 참고문헌

감사원, 2016.4, 수도권 대기환경 개선사업 추진실태 감사보고서.

우정현, 2009, 수도권 미세먼지 환경 개선을 위한 미국의 대기환경정책 사례 조사 연구, 한국대기환경학회지 25(6).

주중대사관, 2015, 중국 대기오염방지 행동계획과 주요도시별 시책.

환경부, 2016.4, 미세먼지, 도대체 뭘까?

환경정책평가연구원, 2013.12, 제2차 수도권 대기환경관리 기본계획 수립.

국립환경과학원, 2016.6, JTBC 탐사플러스에 대한 보도 해명자료.

Younha Kim, Jung-Hun Woo, et al., 2016.8, Future scenario emission inventory for China by various control policy, IUAPPA Conference, Busan.

Jung-Hun Woo, 2013, Integrated Management of Climate Change and Air Quality- Building fundamental basis for GAINS-Korea, The 2nd Int. Workshop on Integrated Approach for Climate Change and Air Pollution, Seoul.