

초미세먼지 문제 해결을 위한 연구 및 정책 방향 Research and Policy Directions against Ambient Fine Particles

김 용 표*

이화여자대학교 화학신소재공학과

(2017년 4월 22일 접수, 2017년 5월 30일 수정, 2017년 6월 14일 채택)

Yong Pyo Kim*

Department of Chemical Engineering & Materials Science, Ewha Womans University

(Received 22 April 2017, revised 30 May 2017, accepted 14 June 2017)

Abstract

Concerns on the air pollution problem caused by ambient fine particles have become a big social issue in Korea. Important factors that should be addressed to develop effective and efficient air quality management policy, especially, against fine particles are discussed and research and policy directions to address these factors are suggested. It is suggested that two factors are in high priority; one is scientific understanding of the major formation mechanisms of fine particles and the other is the process of policy decision and implementation. For the scientific understanding, smog chamber measurement, intensive field study, and chemical transport model development that can simulate the characteristics of Northeast Asia are considered to be important. For the policy directions, priority setting of the proposed policies and development and implement of effective communication sytem are considered to be important.

Key words : Fine particles ($PM_{2.5}$), Science based policy making, Formation mechanisms, Communication

1. 서 론

초미세먼지 문제는 국민들의 큰 관심사이다. 초미세먼지와 관련하여 많은 정보들이 여러 곳에서 제공되고 있다. 5대 신문사의 미세먼지 관련 기사 건수가 2013년 4분기부터 예년에 비해 4.5배 정도로 폭발적으로 증가하였다(Kim *et al.*, 2015b). 그러나 언론에서는 중국의 영향이 미세먼지 농도의 주원인으로 강조하며 개인적 대응을 강조하였고, 미세먼지 문제를 해결하기

위한 제품 홍보도 계속되어 많은 국민들이 불안해하고 있다(Kim *et al.*, 2015a, b). 또한 Kim *et al.* (2016b)에 의하면 일반인은 미세먼지 위험에 대해 주관적이면서도 유해성에 대한 인식이 위해성을 과대 및 과소평가하는 양극화 정도가 전문가와 차이가 큰 것으로 나타나, 일반 국민들에 대한 미세먼지 정보 제공이 그다지 효과적이지 않았음을 보여주고 있다. 특히 2016년 봄에는 경유 가격, 경유자동차가 배출하는 오염물질의 종류와 양, 석탄 화력발전소의 영향, 고기구나 생선구이 문제, 외부로부터의 이동 등 많은 정보가 산발적으로, 그리고 단편적으로 언론에서 제공되고 있다. 더

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)2-3277-2832, E-mail : yong@ewha.ac.kr

구나 어떤 정보가 보도되면, 그에 대한 반대의 논리를 담고 있는 정보가 보도되는 경우도 있었다. 이들 정보 하나하나가 중요하기는 하지만, 국민들을 오히려 혼란에 빠뜨리고 있고, 국민들은 더 불안해하고 있다. 구체적으로는 어떤 정보가 믿을만한 것인지, 그 정보가 맞는다면 나와 내 가족은 어떻게 행동해야 초미세먼지 영향을 덜 받을 수 있는지, 지금까지 정부에서는 이런 오염물질 배출을 줄이기 위해 아무 대책도 시행하지 않았던 것인지 등에 대한 신뢰할 수 있는 정보를 원하고 있다.

정부에서는 2013년 12월에 미세먼지 종합대책을 수립하여 시행하고 있다(KLRI, 2015). 이 대책은 (1) 미세먼지 예보제 확대 및 경보제 실시, (2) 한중일 국제협력 강화, (3) 친환경자동차 보급 확대, 제작차 배출허용기준 단계적 강화, 교통수요 관리 강화, (4) 사업장 배출허용기준 강화, 대기오염물질 총량관리 강화, NO_x 저배출 보일러 등 교체 지원, (5) 오염측정망 확충 등의 내용을 담고 있다. 종합대책은 미세먼지 오염 저감을 위한 다양한 정책방향을 종합적으로 포괄하여 제시하고 있지만, 사업장 관리 외에는 대체로 구체성이 떨어지는 지원 강화, 협력 강화 등을 주요 내용으로 하고 있어 실질적인 미세먼지 오염 저감에 도움이 될 수 있을지 의문이라는 평가이다(KLRI, 2015). 또한 종합대책의 세부적인 내용은 비슷한 시기에 발표된 2차 수도권 대기환경관리 기본계획과 대동소이한 것으로 보인다는 평가이다(KLRI, 2015).

수도권 대기환경관리 기본계획(기본계획)은 우리나라 인구의 절반 정도가 살고 있는 수도권의 대기오염을 저감하기 위해 수립, 시행된 계획이다. 지난 2005년부터 10년간 3조원이 넘는 예산을 투입하여 수도권의 미세먼지와 이산화질소 농도를 줄이기 위한 정책(1차 기본계획)을 시행하여왔고(MOE, 2005), 2015년부터 10년간 2차 기본계획을 시행하여 4조5천억원이 넘는 예산을 투입해 미세먼지, 이산화질소와 함께 초미세먼지와 오존 농도를 줄이는 정책을 펴고 있다(MOE, 2013). 기본계획은 미세먼지 종합대책과 비슷하게 천연가스 버스 도입, 경유자동차의 제어장치 부착, 사업장 대기오염물질 총량관리제(배출권 거래제 포함), 노후 차량 조기폐차, 도로 청소 등 다양한 대책이 있다(MOE, 2013). 그러나 1차 기본계획의 효과가 어느 정도인지는 아직 확실하지 않고(Han *et al.*, 2017), 목표

와 시행 방법의 불일치성과 과학적 이해의 불확실성에 대해 지적을 받았다(BAI, 2015, 2008).

2016년 6월 정부에서는 국민의 불안을 해소하기 위해 범부처적으로 미세먼지 관리 특별대책을 발표하고, 이의 실효성을 확보하기 위해 국가전략프로젝트의 하나로 ‘과학기술기반(초)미세먼지 솔루션 개발 사업’을 기획하고 있다(MASC, 2016).

그러나 한 여론조사에 의하면 국민의 75%가 정부의 미세먼지 대책에 불만인 것으로 나타났다. 이는 정부가(초)미세먼지와 관련하여 국민과의 소통에서 성공적이지 않았다는 것을 뜻한다. 환경문제는 환경오염을 최소화하는 것이 중요하지만, 이와 함께 중요시되는 것은 국민의 불안을 최소화하는 것이다. 초미세먼지를 포함한 대기환경 문제는 국민이 걱정하고 개인적으로 대처할 수 있는 부분은 작다. 이 문제는 정부가 종합적으로 문제를 파악하여, 대책을 세우고 개선하여야 할 문제이다.

이 글은 (1) 왜 초미세먼지가 문제가 되는지를 이해하기 위한 과학적인 배경을 설명하고, (2) 과학적 이해가 초미세먼지 문제 해결, 그리고 국민 불안 해소에 어떻게 기여할지를 논의하고, (3) 초미세먼지 문제 해결을 위해 필요한 정책 및 연구 방향을 제안하였다.

2. 초미세먼지 문제의 과학적 배경

2.1 초미세먼지의 주요 배출, 생성원

초미세먼지(PM_{2.5})와 미세먼지(PM₁₀)는 각각 공기역학적 지름이 2.5 μm, 10 μm 이하의 먼지를 의미한다. 대기오염물질은 발생원에서 직접 배출되는 1차 대기오염물질과 대기에서 반응하여 생성되는 2차 대기오염물질로 구분된다. 일반적으로 지름이 2.5 μm보다 큰 먼지는 마찰 등의 기계적인 기작에 의해 생긴다고 알려져 있다. 황사나 공사장에서 날리는 흙먼지, 자동차 브레이크 마모 먼지가 대표적인 예이다. 이들은 모두 1차 대기오염물질이다. 지름이 2.5 μm보다 작은 먼지는 이와는 다르게 일반적으로 화학반응에 의해 생긴다고 알려져 있다(Seinfeld and Pandis, 2016). 경유자동차 엔진 연소에서 생기는 검댕(1차 대기오염물질)이나 대기에서 기체상 황산화물이 반응해서 생기는 황산염 입자(2차 대기오염물질)가 대표적인 예이다. 대기의 탄

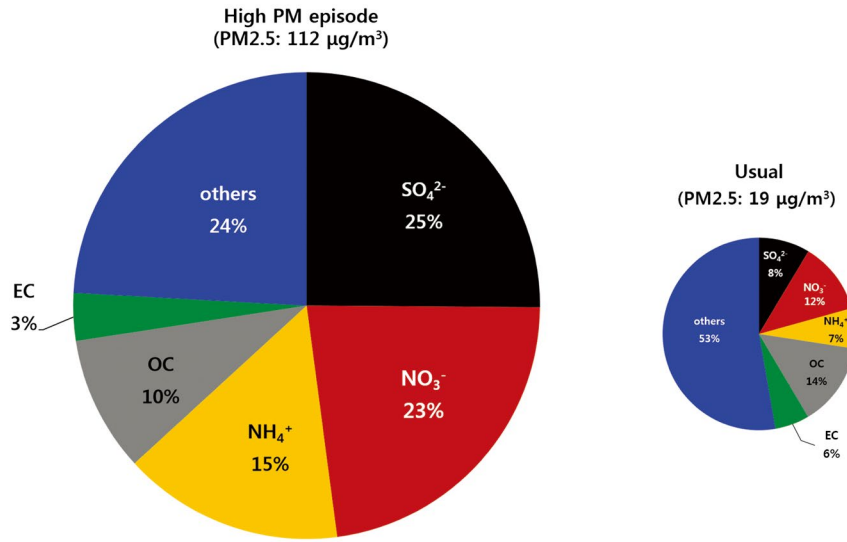
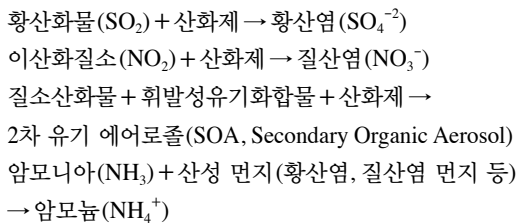


Fig. 1. A high PM₁₀ episode observed in Seoul, February, 2014 and comparison of chemical composition and mass concentration of the PM_{2.5} in usual case. The area of the circle is proportional to the mass concentration (Shin et al., 2014).

소 성분은 크게 원소상탄소(Elemental Carbon, EC)와 유기탄소(Organic Carbon, OC), 탄산염으로 나눌 수 있다. 원소상탄소의 대표적인 예가 검댕이며, 이는 1차 대기오염물질이다. 유기탄소는 직접 배출되는 성분(Primary Organic Aerosol, POA)과 대기에서의 화학반응에 의해 생기는 성분(Secondary Organic Aerosol, SOA)으로 구분된다. 대기에서의 반응에 의해 생기는 초미세먼지 주요 성분과 반응물질(전구물질)은 다음과 같다.



미세먼지와 초미세먼지는 1차 대기오염물질과 2차 대기오염물질로 구성되어 있으며, 특히 고농도사례에서는 2차 대기오염물질의 비중이 높다(Kim and Yeo, 2013). 따라서 대기의 초미세먼지 농도를 줄이기 위해서는 초미세먼지의 배출뿐만 아니라 이를 생성하는 전구물질의 배출도 같이 줄여야 한다. 예를 들어 2014년

2월 서울에서 스모그가 끼었던 기간과 그렇지 않은 기간의 초미세먼지 농도와 화학조성을 비교하면 그림 1과 같다(원의 면적은 질량농도에 비례하여 그렸음). 고농도 사례 때 질량 농도도 크게 증가하지만, 전구물질의 화학반응에 의해 생성된 황산염, 질산염, 암모늄 무기이온 농도가 크게 증가했고 OC의 상당 부분도 SOA 일 것으로 예상된다.

2.2 초미세먼지 영향

초미세먼지는 주로 인체 위해성이 큰 것으로 알려져 있다. 초미세먼지 농도와 호흡기, 심혈관계 질병과 사망률에 대해서는 여러 연구가 진행되었다. Pope and Dockery (2006)는 미국에서 수행된 (초)미세먼지 농도와 여러 질병과 사망률 사이의 연구결과를 종합하여 분석, 검토하여 그 영향이 어느 정도인지를 보였다. 우리나라에서도 초미세먼지 농도와 인체 위해성의 상관관계에 대한 연구가 진행되고 있다(MSIP, 2016).

초미세먼지의 인체 위해성 연구에서 중요한 문제는 초미세먼지의 화학조성이 위해성에 영향을 주는 것인가 하는 것이다. 이는 초미세먼지 저감 정책의 우선순위 설정과 연관되는 문제이다. 예를 들어 어떤 배출원에서 초미세먼지 배출량은 많지만, 위해성이 상대적으

로 낮은 성분의 초미세먼지인 경우 배출량은 적지만 위해성이 상대적으로 큰 배출원에 비해 저감 우선순위가 떨어질 수도 있는 것이다.

대기 중 초미세먼지의 화학적 조성 및 발생원에 따른 인체 위해성 평가 연구 결과는 2000년대부터 발표되기 시작하였다. Laden *et al.* (2000)은 초미세먼지의 화학적 성분에 따라 인체 위해의 정도가 다르다는 연구결과를 발표하였다. 이들은 1979년부터 1988년까지 미국 6대 도시에서 사망한 거주자를 대상으로 초미세먼지 발생원별 노출과 총 사망, 허혈성심질환 사망, 폐렴 사망 및 만성폐쇄성심질환으로 인한 사망과의 관련성을 분석하였다. 연구 결과 자동차로부터 배출된 초미세먼지 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가는 3.4%의 일별 사망 증가와 관련이 있고, 석탄 연소에서 배출된 경우 1.1%의 일별 사망 증가와 관련이 있으나, 흙먼지의 경우는 사망률 증가와 관련이 없음을 보여주었다. 이 연구 이후 대기 초미세먼지의 화학적 조성 및 발생원에 따른 건강영향에 대한 연구들이 다수의 지역에서 수행되기 시작하였다(NIER, 2009). Ito *et al.* (2006)은 1988년부터 1997년까지 미국 워싱턴주 워싱턴 DC에서 사망한 거주자 약 2백 4십만 명을 대상으로 초미세먼지 발생원별 노출에 따른 총 사망 및 심혈관계 사망률을 분석하였다. 그 결과 초미세먼지의 황산염 성분과 석탄 연소에서 배출된 성분이 통계적으로 유의하게 사망률을 증가시키는 것으로 나타났다. 이 외에도 여러 연구 결과 황산염과 도로이동오염원에서의 배출 성분이 인체 위해성이 있는 것으로 나타났다(Maynard *et al.*, 2007; Mar *et al.*, 2006).

우리나라에서도 초미세먼지가 인체에 미치는 연구가 2000년대 중반부터 연구되고 있으나(Heo, 2010), 최근에 들어서야 활발히 연구되고 있어 아직 선진국에 비해서는 연구 결과가 많지 않은 편이다. 한 예로 Bac (2014)는 서울시의 미세먼지와 초미세먼지 단기 노출로 인한 전체원인 및 심혈관계 사망영향을 통계적으로 조사하여 농도 증가가 초과사망발생위험을 통계적으로 유의하게 높인 것을 파악하였다(농도 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가 시 미세먼지와 초미세먼지는 전체 원인을 각각 0.44%, 0.95% 증가시키고, 심혈관계 사망영향을 각각 0.76%, 1.63% 증가시키는 것으로 나타났다).

최근 정부차원에서 장기적인 영향평가를 위한 연구를 본격적으로 수행하고 있다. 2012년부터 환경부와

식약처에서 학령전기 및 학령기 환경노출로 인한 건강 영향을 평가하기 위해 수도권에서 700명 규모의 추적 연구인 ‘환경과 어린이 발달 코호트(EDC)’를 활용하여 역학조사 연구를 수행하고 있고, 2016년부터 환경부에서 전국적으로 5,000명 규모로 수행 중인 ‘어린이 환경보건 출생 코호트(Ko-CHENS)’ 연구가 진행되고 있다(MSIP, 2016).

3. 초미세먼지 관리를 위한 과학적 이해의 필요성

어떤 지역에서 초미세먼지가 발생하여 여러 과정을 거쳐 사람에게 영향을 주는 과정을 그림 2에 모식화하였다. 그림에 제시된 것처럼 다수의 발생원에서 초미세먼지와 여러 전구물질들이 발생하고 있다. 이를 제어하여 배출량을 저감하기 위해서는 다양한 발생원에서의 다양한 물질의 배출허용기준을 설정하고, 이를 제어하기 위한 제어장치를 설치하여 운영하여야 한다. 그러나 제어장치 설치 및 운영에는 비용이 발생하며, 배출허용기준 수준에 따라 그 비용이 크게 차이가 날 수 있다. 전구물질의 배출허용기준을 설정하기 위해서는 그 물질 자체의 유독성뿐만 아니라 초미세먼지 생성에 얼마나 기여하는지에 대한 과학적인 이해가 필요하다. 뿐만 아니라 우리나라에서 대기에 있는 대기오염물질이 실제 사람의 활동공간이나 활동방법에 따라 어떻게 사람에게 흡입되는지의 상관관계도 명확하게 밝혀야만 노출량을 줄이기 위해 어떤 곳에 어떤 제어 기술을 적용하면 되는지 결정된다. 그러나 우리나라에서 대기농도와 노출량의 상관관계에 대한 이해는 거의 없는 실태이다(MASC, 2016). 다시 말하면 적절한 장소에 적절한 제어 수준을 결정하고, 이를 달성하기 위한 기술을 선정하기 위해서는 발생에서 배출, 배출에서 대기농도, 대기농도에서 노출량, 노출량에서 영향을 파악하는 과학적 이해가 필요하다.

그렇다면 지금까지 대기오염물질 관리는 어떻게 진행되었고, 초미세먼지를 포함한 대기오염물질의 농도는 그에 따라 어떻게 변화하였는지를 파악하는 것이 필요하다. 1960년대와 1970년대에는 대기관리 정책이 명확하지 않았다. 시민들의 경제 수준이 어느 정도 향상되자 1980년대부터 대기오염문제에 대한 관심이 높

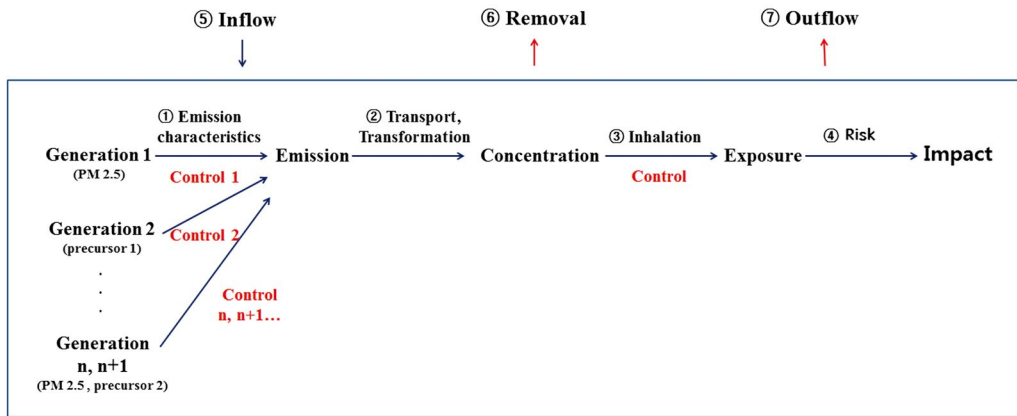


Fig. 2. Schematic diagram of the fate of PM_{2.5}.

아지고 대기오염물질의 배출을 줄이기 위해 연료 정책과 배출원 관리를 시작하였다. 연료 정책은 석유제품에서 황함량을 낮추는 저황유 보급 정책과, 싸지만 대기오염물질을 많이 배출하는 석탄이나 중유를 비싸지만 대기오염물질이 적게 나오는 LPG나 천연가스(도시가스), 등유로 전환하는 연료 전환 정책이다. 1980년대 후반부터 1990년대 초반까지 각 가정에서 연탄 사용을 제한하고 기름보일러를 가스보일러로 바꾸게 된 것이 바로 이 정책이다. 배출원 관리란 서울에 있던 생산시설을 다른 곳으로 이전하거나 생산시설에서 배출할 수 있는 허용 농도를 줄이는(배출허용기준 강화) 정책이다. 이 두 가지 정책으로 인해 1980년대 중반부터 서울의 1차 대기오염물질 농도는 2000년대 초까지는 획기적으로 줄어들었다(Kim and Yeo, 2013). 그러나 이들 정책들은 우리나라의 특성을 이해하여 수립, 시행되었다기보다는 선진국에서 성공한 정책들을 벤치마킹하여 시행한 것으로 보인다. 그림 2에 제시된 각 과정에서 성공적인 대기관리를 위해 우리가 과학적으로 더 이해하여야 할 부분에 대해 의견을 제시하였다.

3.1 배출 특성

정부의 대기환경정책 수립, 대기오염총량제 이행, 대기질 예보 등을 위해 국가 대기오염물질 배출량을 지자체 및 격자 단위 배출량으로 생산하여 대기환경개선 종합계획, 지자체 대기환경관리 시행계획 등의 근거자료 및 정책성과 평가 등에 기초자료로 활용하고 있다(NIER, 2017). 우리나라의 배출량 자료는 대기정책지

원시스템(Clean Air Policy Support System, CAPSS)이라 한다. CAPSS에서는 점·면·이동오염원 등에서 배출되는 8가지 대기오염물질(CO, NO_x, SO_x, TSP, PM₁₀, PM_{2.5}, VOC, NH₃)의 배출량을 매년 산정한다.

대기오염물질 배출량 자료는 과학적인 정책 수립과 시행에 필수적인 자료이며, CAPSS는 선진국에 비해서 뒤지지 않는 시스템으로 평가된다. 그러나 우리나라 현실에 적용 가능한지 검증이 아직 되지 않은 외국의 배출계수를 사용하고, 생물성 연소 등의 중요한 배출원은 아직 배출량의 정확도가 떨어지는 등 지속적인 개선, 보완의 여지가 있다. 특히 대기관리수단이나 정책의 효과평가를 위한 모델링의 필수자료이며, 배출량 자료의 신뢰성 확보는 매우 중요하다.

3.2 이동, 변환

그림 3에서 보듯이 초미세먼지 농도는 공식 자료가 있는 2003년부터 전반적으로 감소하여, 2015년부터 시행된 연평균 대기환경기준 농도인 25 µg/m³ 전후를 유지하고 있다. 미세먼지의 연평균 농도는 2003년부터 계속 감소하여 2010년에는 연평균 대기환경기준 농도인 50 µg/m³보다 낮은 49 µg/m³을 기록하였고, 2012년에는 1차 기본계획 목표인 40 µg/m³에 가까운 41 µg/m³을 나타냈다. 그러나 2013년에 초미세먼지와 미세먼지 농도가 증가하였다.

미세먼지와 초미세먼지 농도가 2003~2012년 사이에 감소한 이유나, 2013~2015년 사이에 증가한 이유는 명확하지 않다. 환경부에서는 2012년까지의 감소

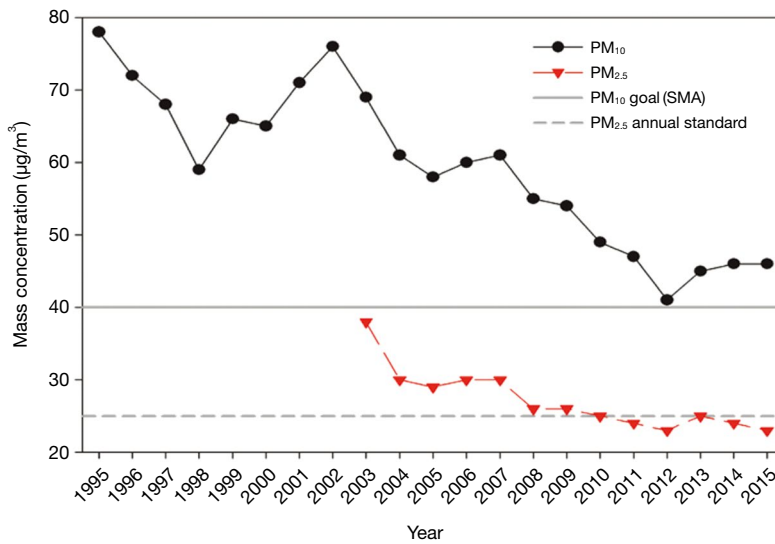


Fig. 3. Variation of the yearly average concentration of PM₁₀ and PM_{2.5} at Seoul.

추세는 1차 기본계획에 따라 서울과 수도권의 대기오염물질 배출량을 저감한 것이 주원인이라고 설명하였으나(MOE, 2013), 2013년부터 증가한 것에 대해서는 외부영향이 있다는 것 외에는 명확한 설명을 하지 않고 있다. 그러나 2013년 이전에도 외부영향은 있었을 것으로 보이고, 더구나 2012년까지의 감소 추세가 기상조건에 의한 것이라는 분석 결과도 있으며(Lim *et al.*, 2012), 2013년부터 증가한 것은 기상조건에 의한 것이라는 분석 결과도 있다(Kim *et al.*, 2016a). 또한 서울 등 수도권 지역과 다른 지방의 미세먼지 농도 추이 분석을 통해, 1차 기본계획이 성공적이라는 근거를 찾지 못하였다는 논의도 있다(Han *et al.*, 2017). 따라서 농도 추이를 합리적으로 설명할 수 있는 과학적 이해 및 근거가 필요하다.

한 예로, 질산염의 전구물질인 질소산화물은 연소과정에서 배출될 때에는 대부분 일산화질소(NO) 형태이나, 대기에서 빠르게 산화하여 이산화질소(NO₂)로 변화한다. 환경부는 1차 기본계획 평가에서 수도권의 질소산화물 배출과 농도 저감이 그다지 성공적이지 않았다고 평가하였다(MOE, 2013). 그러나 그림 4에서 보듯이, 서울의 이산화질소 농도는 그다지 감소하지 않았으나 질소산화물 농도는 상당히 감소하였다. 따라서 이산화질소/질소산화물 비도 같이 증가하였다. 이 같은

추이가 관측된 이유에 대해서는 (1) 배출량 자료의 미비, (2) 경유자동차의 제어장치 부착과 (3) 대기 산화상태 변화 등의 여러 논의가 있으나, 아직 명확하게 밝혀지지 않았다(Han and Kim, 2015). 예를 들어 Kim *et al.*(2011)은 우리나라의 2000년대 중반까지의 질소산화물 배출량이 비교적 정확함을 인공위성 관측 자료와 3차원 광화학모델을 활용한 역모델링(inverse modeling) 결과를 통하여 보고하였다. 또한 도로변과 일반대기 관측소 관측 결과를 바탕으로 경유자동차의 제어장치가 이 같은 질소산화물, 이산화질소 농도에 어느 정도는 기여하였으나, 큰 요인은 아닐 것으로 추정된 연구 결과도 있다(SI, 2011). 따라서 현재처럼 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs)보다는 질소산화물 배출 저감에 중점을 둔다면 대기 산화상태에 따라 어느 정도는 초미세먼지 생성 속도가 증가할 가능성이 있어(Jin *et al.*, 2012; Lee *et al.*, 2006), 대기에서 발생하는 이동, 변환 기작을 정확하게 이해하는 것은 초미세먼지 저감에 필수적이다.

동북아시아의 대기에서의 주요 반응 기작은 미국이나 유럽에서 연구하여 규명한 것과는 다를 것으로 예상되며, 이에 대한 이해 없이는 정확한 현상 규명이나 예보, 정책 수립에 큰 제약을 받게 된다. 예를 들어 중국 베이징에서 관측된 초미세먼지의 생성과정 가운데

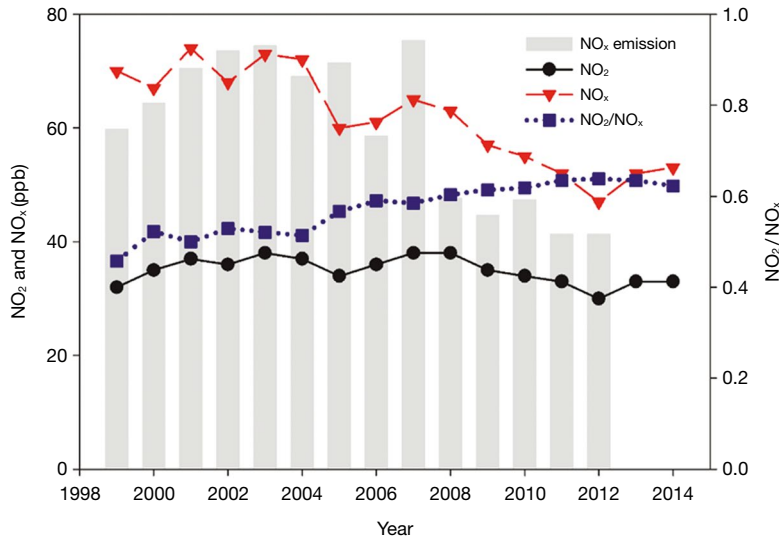


Fig. 4. The NO_x (NO_x = NO + NO₂) and NO₂ concentration, NO₂/NO_x concentration ratio and trend of NO_x in Seoul.

하나인 핵생성(nucleation) 과정은 다른 지역과는 달리 며칠에 걸쳐 지속되는 것으로 보고되었다(Guo *et al.*, 2014). 또한 동북아시아 지역은 토양 성분의 농도가 높아 미국에서는 중요 반응경로가 아닌 토양입자 표면반응이 중요할 가능성이 큰 것으로 보고되었다(Hong *et al.*, 2014). 우리나라나 중국 같은 동북아시아지역의 대기오염은 유럽이나 미국에서 겪지 않은 석탄과 생물성 연소와 함께 자동차 등에서의 연소, 그리고 토양 성분의 영향이 겹쳐, 유럽이나 미국에서 이해한 대기 특성만으로는 대기 특성 이해가 어려울 수 있다(Hallquist *et al.*, 2016). 최근 우리나라 오존 농도에 장거리 이동과 국지적 생성의 기여도 분석(Shin *et al.*, 2012)이나 초미세먼지 생성 제어를 위한 휘발성유기화합물 제어 정책(Shin *et al.*, 2013) 등의 연구 결과가 발표되었으나, 이들은 기존 미국의 연구 결과에 바탕을 둔 연구여서, 동북아시아 대기에서의 주요 반응 기작이 미국이나 유럽과 다른 경우 이 결과에 바탕을 둔 정책 결정은 효과적이지 않을 수 있다.

이러한 이동, 변환 기작 이해가 중요한 하나의 이유는 미국에서 개발된 모델들은 이러한 반응기작이 반영되지 않고 있어, 대기질 예보 정확도나 정책 효과 평가 등에서 신뢰할만한 결과를 내지 못하고 있기 때문이다(Ghim *et al.*, 2017). 현재 우리나라는 미국에서 개발된

CMAQ, CAMx 등의 3차원 대기화학모델을 사용하여 대기 현황 파악, 대기질 예보와 정책 결정에 사용하고 있다. 그러나 이 모델들은 미국의 상황에 맞게 개발된 것이어서(Heo *et al.*, 2010) 우리나라나 동북아시아 지역의 대기 특성을 반영하지 못할 가능성이 있다. 현재 우리나라의 모델 관련 연구는 미국에서 도입한 모델의 개선 연구이며, 주로 배출량과 기상자료 등의 입력자료의 개선에 중점을 두고 연구를 진행하고 있다. 이러한 연구는 대중적인 현상 파악 및 결과 해석 수준에 치우치고 있다.

또한 초미세먼지의 대기 생성반응에는 오존 등의 광화학 산화물질이 같이 생성되어, 초미세먼지 생성 기작 이해는 오존 등 다른 대기오염물질 저감에도 필수적이다. 마지막으로 초미세먼지는 대기오염물질이기도 하지만, 기후변화를 유발하는 단기체류기후변화물질로 그 생성, 변환, 제거 기작을 이해하는 것이 중요하다. 동아시아는 초미세먼지의 농도가 높은 지역이며, 우리의 과학적인 이해는 중국, 일본 등에서도 활용될 수 있을 것이다.

3.3 노출 및 위해도

영향 평가 기술은 (1) 초미세먼지에 의한 유독성 파악, (2) 초미세먼지 흡입에 의한 노출량 파악, (3) 초미

세먼지에 의한 위해도 파악의 세 부분으로 나눌 수 있다. 초미세먼지의 일반적으로 분석되는 화학성분의 유독성은 미국 남캘리포니아 지역 자료 등을 적극적으로 활용할 수 있다(Kim and Kim, 2017). 그러나 특정 배출원에서 배출되는 초미세먼지나, 대기에서 생성되는 초미세먼지의 화학성분, 특히 유기성분은 그 종류가 매우 많으며, 이들 성분의 유독성에 대한 연구는 아직 완전하지 않다. 예를 들어 초미세먼지의 유기질소성분 가운데 위해성이 밝혀지지 않은 성분이 아직 많다(Lee and Wexler, 2013). 따라서 주요 배출원에서 배출되었거나 우리나라에서 생성된 초미세먼지의 통합적인 유독성을 파악하는 연구가 필요하다.

초미세먼지가 실제 우리 국민이 활동에 따라 얼마나 흡입하는지를 평가하는 노출량 평가는 아직 연구가 활발하지 않아 구체적인 결과가 보고되지 않았다(MSIP, 2016). 이는 장기간에 걸쳐 많은 사람들의 활동을 관측하며 연구를 수행하여야 하며, 이런 관측대상(cohort) 연구가 본격적으로 수행된 것은 최근이다(MSIP, 2016). 앞으로 이 분야 연구에 보다 집중적인 투자가 필요하다.

4. 초미세먼지 관리를 위한 정책 방향

초미세먼지 관리를 위한 정책 수립 및 시행과정에

대한 모식도를 그림 5에 모식화하였다. 정책 수립 및 시행 과정을 제시하며 이에 필요한 요소 기술과 우리나라 기술 수준 현황을 같이 제시하였다. 각 요소의 선진국 대비 우리의 기술 수준(%)을 괄호 안에 표시하였고, 선진국 대비 70% 미만으로 평가한 분야는 밑줄로 표시하였다. 기술 분야는 관계부처 합동으로 작성한 과학기술기반 미세먼지 대응 전략(안)(MASC, 2016)에 제시된 기술 분야를 재구성하여 표시하였고, 기술 수준값은 제시된 기술 분야별 기술 수준을 재구성한 기술 분야에 맞추어 평균값이나 범위를 제시하였다. 이 결과로 보면 현재 우리나라에서 가장 취약한 분야는 초미세먼지 생성기작 규명과, 정책순위 결정 및 시행 분야이다.

문제를 파악하고, 이를 해결하기 위한 정책을 제시하기 위해서는 다양한 분야의 과학적, 기술적, 정책적 자료가 수집, 검토되어야 한다. 이 때 한 분야의 정확도나 기술 수준이 다른 분야에 비해 떨어지게 되면 다른 분야의 정확도에도 영향을 줄 수 있다. 예를 들어 우리나라 대기에서의 초미세먼지의 주요 생성기작을 규명하지 못하면 모델링 결과에서도 정확도가 떨어지고, 결과적으로 정확한 원인 규명이 이루어지지 않게 된다. 이는 효과적이지 않은 관리 정책이 제시될 가능성을 높여준다.

또 하나의 문제는 정책 결정 및 시행과정에서의 문제이다. 과학적인 이해를 통해 저감 대책을 수립할 때

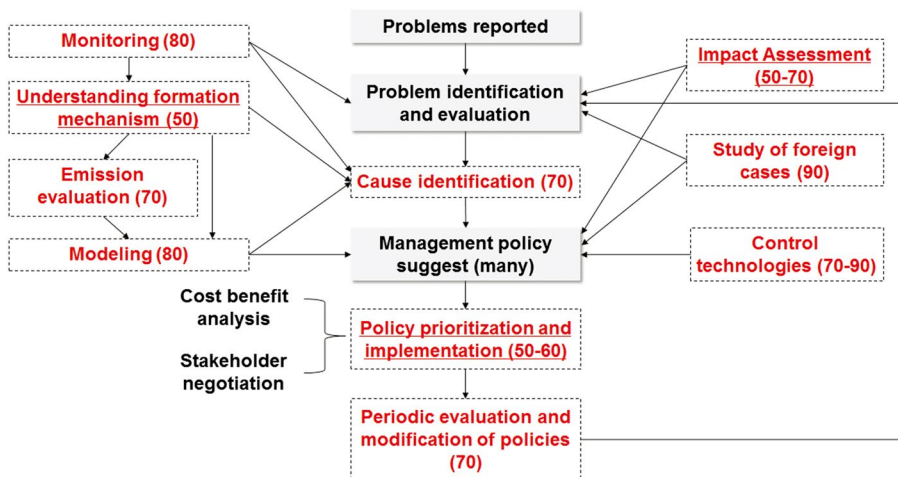


Fig. 5. The policy-making decisions diagram to reduce the ambient concentration of PM_{2.5}.

우선순위는 초미세먼지가 국민에게 미치는 영향을 최소화하고, 이를 통해 국민을 안심시키는 것이다. 그림 3에서 보듯이 2000년대 초부터 미세먼지와 초미세먼지 농도는 전반적으로 감소하는 추세에도 불구하고 많은 국민들이 초미세먼지 문제가 심각하다고 생각하는 데에는 소통이 잘되지 않은 것이 중요한 이유이다. 이는 정책에서의 방향과 자원 배분 등, 효과적인 정책의 수립과 시행에 큰 영향을 주게 된다.

따라서 정책 우선 순위는 (1) 현재 가장 미비한 분야인 초미세먼지 생성 기작의 과학적인 이해에 집중하여 기술을 개발하는 것과 (2) 정책 우선순위를 평가하고, 효율적인 정책을 수립, 시행하여 국민의 불안을 저감하는 것에 두어야 할 것이다.

4.1 과학적인 이해

생성기작을 이해하기 위해서는 우리나라에서 일어나는 광화학반응의 주요 반응물과 반응 경로를 이해하여야 한다. 이를 이해하여야 초미세먼지 농도에 기여하는 주요 기여원의 기여도를 정량적으로 파악할 수 있을 것이다. 생성기작을 이해하는 데 필수적인 도구는 스모그 챔버와 집중 관측, 대기화학 기작 모델링 기술이다.

스모그 챔버는 대기 반응조건을 인위적으로 재현하여, 실제 대기에서의 반응을 실험실 조건에서 연구하는 연구 방법이다. 스모그 챔버를 활용한 연구를 통해 그 지역의 실제 대기 조건과 비슷한 화학특성과 비율에서의 주요 반응물과 반응경로, 그리고 주요 생성물을 파악할 수 있다. 이와 함께 실제 대기에서의 대기화학 현황을 파악하기 위해, 3차원 집중관측과 모델링 결과 비교를 통해 그림 2에 나와 있는 여러 과정의 기여도를 정량적으로 파악하고, 신뢰도를 검증할 수 있다. 마지막으로 이런 실험과 관측 결과를 바탕으로, 우리가 이해하는 우리나라의 대기화학반응 조건을 모델로 구현하여, 미래의 정책 시나리오의 타당성을 검증할 수 있다.

미국과 유럽에서는 스모그 챔버에서의 실험 결과를 바탕으로 실제 대기에서의 관측 결과를 검증하고 대기화학 기작 모델 파라미터들의 값을 개선하는 종합적인 연구를 수행하고 있다. 중국에서도 EC의 변환과정을 스모그 챔버로 연구하여 베이징의 대기환경 특성을 연구하고 있다(Peng *et al.*, 2016). 미국과 유럽의 스모그

챔버 관련 연구에서 주목할 것은, 장치의 완성도보다는 전문 인력의 지속적인 연구가 더 좋은 연구 결과를 산출하고 있다는 것이다. 미국 캘리포니아대학 리버사이드 교정(UCR)의 스모그 챔버는 전세계 최고 수준으로 평가받고 있으나, 1970년대부터 지속적인 연구를 수행하고 있는 미국 CALTECH 스모그 챔버에서 더 많은 연구 결과 논문이 발표되고 있다. 이는 일본 국립환경연구소(NIES)나 중국의 중국환경과학연구소(CRAES)의 스모그 챔버가 규모나 시설로는 최고 수준이나 최근 결과가 많지 않은 것으로도 알 수 있다.

저자가 평가하기로는 우리나라에서는 스모그 챔버 연구는 KIST에서 2000년대 초부터 10여년의 연구 경험이 있으나, 기술 선진국인 미국에 비해 50% 정도 수준으로 평가할 수 있다. 집중관측은 2000년대 초와 2000년대 후반 각각 국립환경과학원과 서울시의 지원으로 수행되었고, 2015, 2016년에 국립환경과학원의 지원으로 집중관측 연구가 수행되었다. 2016년은 우리나라 여러 기관과 미국 NASA와 공동으로 연구를 수행하였다. 집중관측 연구 수준은 미국에 비해 70% 정도로 평가할 수 있다. 생성기작 모델링 분야는 개별 연구자의 연구 결과는 있으나 종합적으로 연구되지는 않았다. 우리나라의 이 분야 연구 수준은 최고기술 보유국인 미국에 비해 50% 정도로 평가할 수 있다.

일반 대기오염물질 관측 기술은 관측 및 분석 장비는 세계적인 수준이나 가시적인 결과는 미국이나 유럽에 비해 미흡한 수준이다. 초미세먼지 무기이온, 원소상탄소, 유기탄소 농도 분석은 여러 기관에서 일상적으로 수행하고 있다. 극미량성분의 기체상 및 초미세먼지의 화학성분 분석 기술은 한국기초과학지원연구원과 한국표준과학연구원에서 세계 수준의 장비와 인력을 보유하고 있으나 대기 분야의 지원이 미흡하여 다른 분야의 연구를 우선적으로 수행하고 있다. 그 외 국립환경과학원에서 세계적인 수준의 초미세먼지 관련 관측기기를 보유한 집중관측소를 6개소 운영하고 있으나 아직 가시적인 결과는 많지 않다. 조선대나 목포대 등에서 외국의 기술을 도입하여 기존 정량/정성 분석이 이루어진 초미세먼지 유기성분에 대해 분석 연구를 수행하고 있으나(Choi *et al.*, 2016; Hwang *et al.*, 2014; Lee *et al.*, 2009) 시작 단계이며 장기간의 지원이 필요한 분야여서 아직 가시적인 결과는 많지

않다.

우리나라 모델링 연구는 미국에서 개발된 모델을 사용하여 미세먼지 예보 및 정책 결정과정에 사용하고 있다. 그러나 이들 모델은 우리나라와 동북아시아의 대기 특성을 반영하지 못하여 정확도와 신뢰도가 떨어지고 있다(Ghim *et al.*, 2017). 또한 현재 초미세먼지 및 모델링 연구는 대중적인 현상 파악 및 해석하는 수준에 치우치고 있어, 과학적인 신뢰성을 갖는 이해를 제공하지 못하고 있다.

생성기작 규명, 집중 관측 결과 해석, 모델링 연구에 중요한 분야는 배출량 조사이다. 배출량 자료로부터 주요 반응물질에 대한 정보가 제공되므로 주요 반응 경로를 예상할 수 있다. 또는 정확한 배출량 자료는 모델링 연구의 정확도 향상에 필수적인 입력자료이다. 따라서 초미세먼지 생성, 제거과정의 과학적인 이해와 예보 정확도 향상을 위해서는 배출량 자료의 지속적인 유지, 보수가 필수적이다.

특히 우리나라 초미세먼지는 외부에서의 영향이 큰 것으로 알려져 있으므로, 이를 과학적으로 정량화하기 위해서는 동북아시아, 특히 중국과 북한의 배출량과 대기오염특성에 대한 연구가 진행되어야 한다. 중국의 대기오염 특성과 정책에 대해서는 우리나라와 중국측 연구자들의 연구가 상당히 있으나(예를 들어 Jeon and Kim, 2016), 북한의 대기환경 특성에 대해서는 연구가 매우 미흡한 실정이다(Kim *et al.*, 2013a, b).

4.2 효과적인 정책순위 결정 및 시행

과학적인 이해 부족과 함께 초미세먼지 저감을 위한 효과적인 대책 수립의 주안점은 이해 당사자와의 효과적인 협의와 소통 그리고 이를 위한 관리 체계수립에 두어야 할 것이다. 그림 5에 제시한 것처럼 초미세먼지 관리 정책의 우선순위는 국민들에게 미치는 영향을 최소화하는 것이며, 이를 바탕으로 국민을 초미세먼지로 인해 불안해하지 않게 하는 것이다. 이를 위해서는 대기관리의 목표를 농도 저감, 특히 대기환경기준물질의 농도 저감에서 영향 저감으로 변경하는 것이 필요하다. Yeo *et al.* (2016)에서도 제시하였듯이 미국 등 선진국에서도 대기오염물질이 사람과 생태계에 미치는 영향을 고려하여 대기오염관리 정책의 우선순위를 결정하는 등 정책 방향을 영향 저감에 중점을 두려는 움직임이 있다(Kim and Kim, 2017). 물론 현재로서는 각

대기오염물질의 독성이나, 노출 정도, 그리고 영향에 대한 연구가 많지 않아 영향 저감을 정량적으로 평가하기는 힘들다. 따라서 앞으로 이 방향으로 과학적인 연구가 집중되고 제거기술이 개발되면서, 이 방향으로 정책을 수립, 시행하여야 할 것이다.

또 하나는 효과적인 대기관리 체계 수립이다. 수질 관리에서는 수계별로 환경청이 설치되어 수계 관리를 하고 있으나, 대기 관리는 수도권 대기환경청을 제외하고는 지방자치별로 시행하고 있다. 수도권 대기환경청의 경우에도 미국 남캘리포니아 대기관리국(SCAQMD)와 같은 법적 권한이 미비하여, 강력한 대기관리 대책을 수립, 시행하기 힘들다(Kim and Kim, 2017). 따라서 대기 권역별로 법적 권한이 강화된 대기관리청을 설립하여 대기관리를 담당하는 것이 바람직하다.

이와 함께 효과적인 소통과 협업체계를 구축하는 것이 바람직하다. 국민의 불안을 해소하기 위해서는 과학적인 기반의 정책 수립과 시행뿐만 아니라 그 과정에서 지방자치단체, 시민단체, 취약계층에 대한 정책 홍보와 의견 수렴이 필수적이다. 특히 환경부의 경우에는 이러한 소통체계를 부처 내에 구축하여 활용하는 것이 중요하다.

마지막으로, 동북아시아 전체를 고려하는 대기환경 협력체 운영이 필요하다. 이는 중국뿐만 아니라 북한에서 이동하는 대기오염물질을 저감하기 위해서도 필수적이다.

5. 요약

우리나라의 대기환경 정책은 주로 연료 전환과 배출 허용기준 강화를 통한 대기오염물질 배출 저감 정책을 활용하였다. 이 정책은 1차 대기오염물질을 효과적으로 저감하였다. 그러나 초미세먼지는 발생원에서 배출되기도 하지만 대기에서 생성되는 비율이 높아, 대기 화학반응의 주요 생성기작을 이해하지 못하면 효과적인 저감 정책을 수립하기 힘들다.

미국이나 유럽은 일찍부터 자국의 환경을 반영한 대기에서 생성되는 초미세먼지의 유기성분 생성 수율 및 자국 내 전구물질의 물질별 기여도를 파악하여, 저감 대책 수립에 활용하고 있다. 또한 집중관측소(super-site) 연구를 통하여 얻어진 관측 자료를 활용하여, 수

용모델 등을 활용하여 주요 오염원을 파악하고, 오염원별 저감 정책을 수립하고 있다. 이런 과학적인 이해에 바탕을 둔 정책 수립 및 시행으로 미국은 악명이 높았던 로스엔젤레스 지역의 스모그도 많이 개선시켰다. 최근에는 (1) 국지적인 화학반응에 의한 유해 유기 에어로졸 성분 분석 및 위해성 평가와, (2) 아시아로부터 장거리이동된 초미세먼지와 오존의 생성, 이동 기작 규명에 중점을 두어 연구하고 있다. 유럽도 국지적인 유해성분(주로 유기 에어로졸)과 전유럽 지역의 초미세먼지와 오존 이동 및 영향에 대한 연구에 중점을 두고 과학적인 이해를 증진하는 연구를 수행하고 있다. 중국은 스모그 현상을 줄이기 위한 지역별 대기오염 특성 규명 및 배출원 저감에 중점적으로 연구를 진행하고 있으며, 정책적 면에서 우리나라의 2000년대 초와 비슷한 정책과 연구를 수행하고 있다.

외국 사례에서 보듯이 초미세먼지 문제를 해결하려면 (1) 초미세먼지의 생성과 사람에 대한 영향에 대한 과학적 이해 연구를 수행하여 불확실도를 줄이고, (2) 이를 바탕으로 초미세먼지와 그 전구물질을 효율적으로 저감하는 정책을 수립하고 효과적으로 시행하는 체계를 구축하여야 할 것이다.

우리는 초미세먼지 문제에서 생성기작, 위해성 평가, 모델링 분야에서 과학적 이해가 부족하여 신뢰성 있는 초미세먼지 저감 정책 수립에 어려움을 갖고 있다. 위해성 평가 같은 분야는 우리나라 결과가 아직 많지 않아 외국 결과를 주로 활용하고 있다. 이런 경우, 오차와 함께 외국 결과를 우리나라에 적용 가능한지, 적용이 가능하더라도 외국 결과를 시용할 때의 얼마나 우리 사례에 맞는 지 등의 불확실성도 발생한다. 또 우리는 아직 서울이나 우리나라에서 초미세먼지가 생성되는 대기에서의 화학반응에서 주요 반응물이나 반응 경로가 선진국에서 연구한 결과와 일치하는지 다르다면 어떻게 다른지 잘 이해하지 못하고 있다. 이러한 과학적 이해에 바탕을 둔 모델도 현재 우리가 사용하는 모델들은 미국의 대기를 잘 예측하도록 개발된 모델들이어서 우리나라 사례를 얼마나 잘 모사하는지 잘 모르고 있다.

또한 국민의 불안을 해소하기 위해서는 초미세먼지의 발생부터 사람에게 미치는 영향까지를 과학적으로 이해하고 이를 저감하는 것을 대기환경 관리의 목표로 설정하는 것이 필수적이다. 이를 수행하기 위해서는

보다 효과적인 대기관리 및 소통 체계 구축이 필요하다.

감사의 글

이 연구는 한국연구재단의 지원(NRF-2017R1A2B4006760)과 미래창조과학부의 지원(2016R2A1A1928779)을 받아 수행된 연구입니다.

References

- Bae, H.J. (2014) Effects of short-term exposure to PM₁₀ and PM_{2.5} on mortality in Seoul, *Journal of Environmental Health*, 40(5), 346-354. (in Korean with English abstract)
- BAI (The Board of Audit and Inspection of Korea) (2008) The policy efforts of diesel vehicle emission control scheme, *Administrative request for audit*.
- BAI (The Board of Audit and Inspection of Korea) (2015) The current status of the Metropolitan Air Quality Improvement Project Audit.
- Choi, N.R., S.P. Lee, J.Y. Lee, C.H. Jung, and Y.P. Kim (2016) Speciation and source identification of organic compounds in PM₁₀ over Seoul, South Korea, *Chemosphere*, 144, 1589-1596.
- Ghim, Y.S., Y. Choi, S. Kim, C.H. Bae, J. Park, and H.J. Shin (2017) Model performance evaluation and bias correction effect analysis for forecasting PM_{2.5} concentrations, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(1), 11-18. (in Korean with English abstract)
- Guo, S., M. Hu, M.L. Zamora, J. Peng, D. Shang, J. Zheng, Z. Du, Z. Wu, M. Shao, and L. Zeng (2014) Elucidating severe urban haze formation in China, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111, 17373-17378.
- Hallquist, M., J. Munthe, M. Hu, T. Wang, C.K. Chan, J. Gao, J. Boman, S. Guo, Å.M. Hallquist, J. Mellqvist, J. Moldanova, R.K. Pathak, J.B.C. Pettersson, H. Pleijel, D. Simpson, and M. Thynell (2016) Photochemical Smog in China: Scientific challenges and implications for air quality policies, *National Science Review*, 3(4), 401-403.

- Han, H., C.H. Jung, H.S. Kim, and Y.P. Kim (2017) The revisit of the PM₁₀ reduction policy in Korea: Focusing on policy target, tools and effect of first air quality management plan in Seoul Metropolitan Area, *Journal of Korea Environmental Policy and Administration*, 25(1), 49-79. (in Korean with English abstract)
- Han, S.H. and Y.P. Kim (2015) Long-term trends of the concentrations of mass and chemical composition in PM_{2.5} over Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(2), 143-156. (in Korean with English abstract)
- Heo, G., Y. Kimura, E. McDonald-Buller, W.P. Carter, G. Yarwood, and D.T. Allen (2010) Modeling alkene chemistry using condensed mechanisms for conditions relevant to southeast Texas, USA, *Atmospheric Environment*, 44, 5365-5374.
- Heo, J.B. (2010) Source apportionment receptor modeling for air quality management: Applications in public health studies, PhD Thesis, Seoul National University.
- Hong, H., Y.S. Wang, Q.X. Ma, J.Z. Ma, B.W. Chu, D.S. Ji, G.Q. Tang, C. Liu, H.X. Zhang, and J.M. Hao (2014) Mineral dust and NO_x promote the conversion of SO₂ to sulfate in heavy pollution days, *Scientific Reports* 4, Article number: 4172.
- Hwang, E.J., J.Y. Lee, and Y.P. Kim (2014) An internal thermal desorption-gas chromatography/Mass Spectrometry method for analysis of non-polar organic compounds in ambient aerosol samples, *Journal of the Korean Society for Environmental Analysis*, 17(1), 54-61. (in Korean with English abstract)
- Ito, K., W.F. Christensen, D.J. Eatough, R.C. Henry, E. Kim, F. Laden, R. Lall, T.V. Larson, L. Neas, P.K. Hopke, and G.D. Thurston (2006) PM source apportionment and health effects: 2. An investigation of intermethod variability in associations between source-apportioned fine particle mass and daily mortality in Washington, DC. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 16(4), 300-310.
- Jeon, S.H. and Y.P. Kim (2016) A Study on the smog reduction strategies in China, *Particle and Aerosol Research*, 11(3), 63-75.
- Jin, L., S.H. Lee, H.J. Shin, and Y.P. Kim (2012) A study on the ozone control strategy using the OZIPR in the Seoul Metropolitan Area, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 6(2), 111-117.
- Kim, I.S., J.Y. Lee, and Y.P. Kim (2013a) 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, N.K., Y.P. Kim, and C.H. Kang (2011) Long-term trend of aerosol composition and direct radiative forcing due to aerosols over Gosan: TSP, PM₁₀, and PM_{2.5} data between 1992 and 2008, *Atmospheric Environment*, 45, 6107-6115.
- Kim, N.K., Y.P. Kim, Y. Morino, J.I. Kurokawa, and T. Ohara (2013b) Verification of NO_x emission inventory over South Korea using sectoral activity data and satellite observation of NO₂ vertical column densities, *Atmospheric Environment*, 77, 496-508.
- Kim, S.T., E.H. Kim, S.H. Yoo, B.U. Kim, O.K. Kim, C.W. Park, and H.C. Kim (2016a) CMAQ Simulation study to analyze the long-term variations of criteria air pollutants in the Seoul Metropolitan Area, South Korea, during 2004~2015, 17th IUAPPA World Clean Air Congress and 9th CAA Better Air Quality Conference, Busan, Korea.
- Kim, Y.J. and Y.P. Kim (2017) Direction for the management of air pollutants based on health risk in Korea, *Particle and Aerosol Research*, 13(2), in press (in Korean with English abstract).
- Kim, Y.P. and M.J. Yeo, (2013) The trend of the concentrations of the criteria pollutants over Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(4), 369-377. (in Korean with English abstract)
- Kim, Y.W., H.S. Lee, H.J. Lee, and Y.J. Jang (2015a) A study of the public's perception and opinion formation on particulate matter risk - Focusing on the moderating effects of the perceptions toward promotional news and involvement, *Korean Journal of Communication & Information*, 52-91. (in Korean with English abstract)
- Kim, Y.W., H.S. Lee, Y.J. Jang, and H.J. Lee (2015b) How does media construct particulate matter risks?: A news frame and source analysis on particulate matter risks, *Korean Journal of Journalism & Communication Studies*, 59(2), 121-154.
- Kim, Y.W., H.S. Lee, H.J. Lee, and Y.J. Jang (2016b) A study on differences between experts and lay people about risk perceptions toward particulate matter: A focus on the utilization of mental models, *Communication Theories*, 12(1).
- KLRI (Korea Legislation Research Institute) (2015) A study

- on the improvement of air quality management legislation system to reduce the levels of fine particle, lows to reduce precirculate matters, Research report.
- Laden, F., L.M. Neas, D.W. Dockery, and J. Schwartz (2000) Association of fine particulate matter from different sources with daily mortality in six US cities, *Environmental Health Perspective*, 108, 941-947.
- Lee, D.Y. and A.S. Wexler (2013) Atmospheric amines - Part III: Photochemistry and toxicity (Review). *Atmospheric Environment*, 71, 95-103.
- Lee, J.Y., D.A. Lane, J.B. Huh, S.M. Yi, and Y.P. Kim (2009) Analysis of organic compounds in ambient PM_{2.5} over Seoul using Thermal Desorption-comprehensive Two Dimensional Gas Chromatography-Time Of Flight Mass Spectrometry (TD-GC×GCTOFMS), *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 25(5), 420-431. (in Korean with English abstract)
- Lee, S., Y.S. Ghim, Y.P. Kim, and J.Y. Kim (2006) Estimation of the seasonal variation of particulate nitrate and sensitivity to the emission changes in the greater Seoul area, *Atmospheric Environment*, 40, 3724-3736.
- Lim, D.Y., T.J. Lee, and D.S. Kim (2012) Quantity estimation of precipitation scavenging and wind dispersion contributions for PM₁₀ and NO₂ using long-term air and weather monitoring database during 2000~2009 in Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 28(3), 325-347. (in Korean with English abstract)
- Mar, T.F., K. Ito, J.Q. Koenig, T.V. Larson, D.J. Eatough, R.C. Henry, E. Kim, F. Laden, R. Lall, L. Neas, M. Stölzel, P. Paatero, P.K. Hopke, and G.D. Thurston (2006) PM source apportionment and health effects. 3. Investigation of inter-method variations in associations between estimated source contributions of PM_{2.5} and daily mortality in Phoenix, AZ, *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 16, 311-320.
- MASC (Multi-Agency Study Committee) (2016) Control strategy against ambient fine particle based on science and technology.
- Maynard, D., B.A. Coull, A. Gryparis, and J. Schwartz (2007) Mortality risk associated with short-term exposure to traffic particles and sulfates, *Environmental Health Perspective*, 115, 751-755.
- MOE (Ministry of Environment) (2005) Basic Plan Metropolitan Area Air Quality Management. (in Korean)
- MOE (Ministry of Environment) (2013) Basic Plan on the 2nd stage Metropolitan Area Air Quality Management. (in Korean)
- MSIP (Ministry of Science, ICT and Future Planning) (2016) R&D strategy against particulate matters pollution, Report Number 2016R2A1A1928779.
- NIER (National Institute of Environmental Research) (2009) A study for complementary measures of basic plan on the metropolitan area air quality management, Research report.
- NIER (National Institute of Environmental Research) (2017) National Air Pollutants Emission Service, Available at http://airemiss.nier.go.kr/mbshome/mbs/airemiss/subview.do?id=airemiss_010100000000 (accessed on Jan. 19, 2017).
- Peng, J., M. Hu, S. Guo, Z. Du, J. Zheng, D. Shang, M.L. Zamora, L. Zeng, M. Shao, Y.S. Wu, J. Zheng, Y. Wang, C.R. Glen, D.R. Collins, M.J. Molina, and R. Zhang (2016) Markedly enhanced absorption and direct radiative forcing of black carbon under polluted urban environments, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113(16), 4266-4271.
- Pope III, C.A. and D.W. Dockery (2006) Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56, 709-742.
- Seinfeld, J.H. and S.H. Pandis (2016) *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, third edition, John Wiley & Sons Inc, Hoboken, New Jersey, USA.
- Shin, H.J., J.C. Kim, S.J. Lee, and Y.P. Kim (2013) Evaluation of the optimum volatile organic compounds control strategy considering the formation of ozone and secondary organic aerosol in Seoul, Korea, *Environmental Science and Pollution Research*, 20, 1468-1481.
- Shin, H.J., K.M. Cho, J.S. Han, J.S. Kim, and Y.P. Kim (2012) The effects of precursor emission and background concentration changes on the surface ozone concentration over Korea, *Aerosol and Air Quality Research*, 12(1), 93-103.
- Shin, H.J., Y.J. Lim, J.H. Kim, H.J. Jung, S.M. Park, J.S. Park, I.H. Song, S.J. Seo, Y.D. Hong, and J.S. Han (2014) The characteristic of long term high PM episode occurred in Feb. 2014, *Journal of the Korean Society of Urban Environment*, 14(3), 223-232.
- SI (Soul Institute, formerly Seoul Development Institute) (2011)

Analysis of the reason for the slow reduction of nitrogen dioxide (NO₂) concentration and counter-measures in Seoul, Final Report.

Yeo, M.J., N.K. Kim, B.M. Kim, C.H. Jung, J.H. Hong, and

Y.P. Kim (2016) Direction for the management of hazardous air pollutants in Korea, Particle and Aerosol Research, 12(3), 81-94. (in Korean with English abstract)