

미세먼지 문제, 어떻게 해결할까?

과학적 연구 시스템과 효율적인 정책 결정을 위한 제언

[글] 김용표 교수 yong@ewha.ac.kr

이화여자대학교 화학신소재공학과

국가적 해결과제로 떠오른 미세먼지 문제

최근 들어 미세먼지 문제가 국민들의 우려와 불안을 낳고 있지만, 몇 년 전까지만 해도 미세먼지 농도는 줄어드는 추세였다. 지난 20여 년 동안 대기오염의 지표라 할 수 있는 가시거리도 꾸준히 늘어나, 서울은 1980년대 중반부터 개선되었고 전국적으로는 2000년대 중반부터 개선되어 왔다. 그러나 2013년 초부터 미세먼지와 초미세먼지 농도가 다시 증가하기 시작했고,¹ 환경부에서는 2013년 후반기에 초미세먼지 대기환경기준 설정을 발표하고 미세먼지 예보제를 시행하기로 하였다. 또 세계보건기구(WHO)가 미세먼지를 1군 발암물질로 지정한 이후로 언론에서도 미세먼지 관련 기사를 빈번히 보도하면서² 비로소 국민들은 ‘미세먼지’라는 용어를 인식하고 관심을 기울이게 되었다.

현재 미세먼지 현상이 심각한 불안요소가 되어 국가적 해결과제로 떠오르게 된 배경으로는 크게 세 가지를 꼽을 수 있다. 첫째는 우리나라(특히 서울)의 미

세먼지 농도가 선진국에 비해 높다는 점으로, 이러한 비교를 통해 미세먼지의 위해성에 대한 인식이 확산되었다. 둘째는 안전하고 쾌적한 대기환경에 대한 국민들의 요구 수준이 높아졌다는 점이다. 셋째는 미세먼지 문제에 대한 정부의 대처 노력이 미흡한 점이다. 정부는 이 부분에 대해 효과적인 소통체계를 구축하여 정보를 최대한 제공하고, 서로 다른 주장이 제시되었을 때 그 근거를 명확히 밝히려는 노력에 부족한 면이 있었다. 하물며 미세먼지 문제에 대한 정책적 불확실성에도 불구하고 지금까지 꽤 효과적으로 미세먼지를 저감시켜 왔던 사실조차 제대로 알려지지 않았다. 그 대표적인 예가 바로 우리나라에 영향을 끼치는 중국발 미세먼지에 대한 논란이다. 중국으로부터의 영향 정도를 계산하는 방법론이 다양하기 때문에 서로 다른 결과가 노정될 수밖에 없음에도 불구하고 이를 효과적으로 설명하지 못한 면이 있었다. 이에 미세먼지의 성분과 주요 배출원에 대해 상세히 알아보고, 그에 따른 효과적인 정책에 대해 모색해보고자 한다.

1 한상화·김용표, 2015

2 김영욱 등, 2015

미세먼지의 성분과 배출 원인은?

미세먼지를 저감하기 위해서는 상황에 맞는 정책 수립도 중요하지만, 미세먼지 생성에 대한 과학적 이해가 우선되어야 한다.

미세먼지와 초미세먼지는 각각 지름이 10 μm , 2.5 μm 이하의 먼지를 의미하며, 맨눈으로 볼 수 없을 정도로 작다. 서울의 미세먼지 농도는 여러 과정이 복합적으로 작용하여 결정된다. <그림 1 참조> 따라서 미세먼지 농도를 저감하기 위해서는 이들 각 과정을 과학적으로 이해하고, 효과적인 저감 대책을 수립하여야 할 것이다. 이 가운데 눈비나 자연적으로 침강하는 제거 과정(과정 ④)과 외부 유출(과정 ⑤)은 기상 현상에 따라 결정되는 것이다. 외부 유입(과정 ②)은 기상 조건과 풍상, 즉 지역의 대기오염 정도에 따라 결정된다. 따라서 국내에서는 미세먼지 배출(과정 ①)과 미세먼지의 반응 생성(과정 ③)에서 저감 노력을 시도할 수 있다. 이들 과정에 대해 더 알아보자.

그림1 서울의 미세먼지 농도를 결정하는 과정들

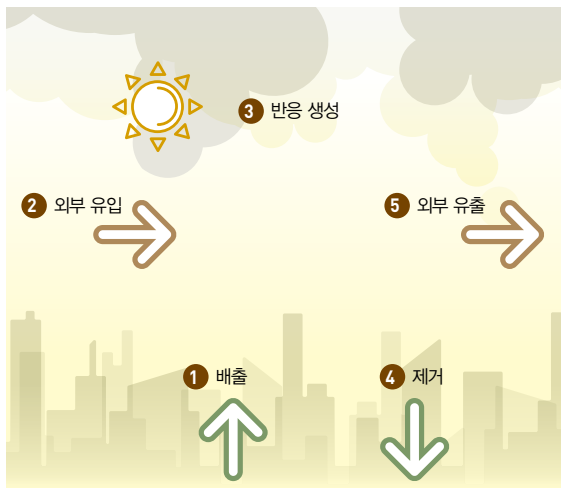


표1 배출에 의해 생기는 미세먼지 성분과 중요한 배출원 (1차 물질)

주요 배출원	미세먼지 성분(1차 물질)
유기물(화석연료, 생체 등)의 불완전 연소	원소상탄소 (EC, elemental carbon, 검댕이 대표적인 예임), 유기탄소 (OC, organic carbon)
여러 유기물 배출원 (나무 등)	유기탄소
토양, 바다 등 자연적 배출원	흙먼지, 바다먼지 등
고기구이 등 음식물 조리	원소상탄소, 유기탄소

표2 미세먼지 생성에 관여하는 오염물질(전구물질)의 중요한 배출원(1차 물질)

오염물질	주요 배출원
황산화물 (SOx)	석탄, 나무 등 황이 포함된 연료 연소
질소산화물 (NOx)	질소가 포함된 연료 연소, 공기의 질소가 연소과정의 고온에서 분해 (자동차, 가스보일러 등)
암모니아 (NH ₃)	가축 사육, 비료, 자동차 등
휘발성유기화합물 (VOCs, volatile organic compounds)	용매 사용, 자동차 연료, 인쇄소, 화장품, 방향제, 고기구이 등 다양한 배출원

미세먼지의 배출원을 살펴보면 다양한 자연적 인위적 요소가 있음을 알 수 있다. <표 1 참조> 주로 인위적 요소를 배출하는 도시의 경우 자동차나 건물의 보일러에서 화석연료를 연소하는 과정에서 미세먼지가 배출되며, 그 외에도 음식점이나 세탁소 등 여러 상업 활동을 통해서도 배출된다. <그림 1>의 ①배출 과정) 여러 배출원은 미세먼지뿐만 아니라 대기에서 미세먼지를 반응 생성하는(<그림 1>의 ③반응 생성 과정) 대기오염 물질들(전구물질)을 배출한다. <표 2 참조> 따라서 대기관리 정책은 미세먼지뿐만 아니라 전구물질의 배출까지 함께 저감하는 방식으로 이루어져야 한다. 그런데 전구물질들은 다양한 배출원에서 배출되기 때문에 효과적인 저감을 위해서는 저감 대책의 우선순위를 정할 필요가 있다.

먼저 서울에서 대기가 깨끗할 때와 스모그 현상이 발생했을 때 초미세먼지 질량농도와 화학조성을 분석한 결과를 보자. <그림 2 참조> 스모그 현상은 초미세먼지 농도가 높을 때 발생하고, 이때 여러 전구물질의 반응에 의해 생긴 2차물질의 농도와 상대적 비율이 깨끗할 때에 비해 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, 고농도 사례를 줄이고 미세먼지와 초미세먼지 농도를 저감하기 위해서는 전구물질의 배출을 줄이는 것이 효과적임을 알 수 있다. <표 3>은 전구물질이 미세먼지의 화학성분을 생성하는 반응을 나타낸 결과다.

표3 대기에서의 반응에 의해 생기는
미세먼지 성분과 주요 반응(2차 물질)

미세먼지를 생성하는 주요 반응과 반응물질 (1차 물질)	미세먼지 성분 (2차 물질)
황산화물 + 산화제	황산염
질소산화물 + 산화제	질산염
질소산화물 + 휘발성유기화합물 + 산화제	유기탄소
암모니아(기체) + 산성 먼지(황산염, 질산염 먼지)	황산암모늄, 질산암모늄 (먼지)

문제 해결의 첫걸음은 정확한 측정을 위한 모델 개발

앞에서 살펴보았듯이, 미세먼지를 대기에서 생성하는 반응의 주요 반응물질(전구물질)은 황산화물, 질소산화물, 휘발성 유기화합물, 암모니아이다. (전구물질의 주요 배출원은 <표 2 참조>) 따라서 대기의 초미세먼지 농도를 줄이기 위해서는 초미세먼지뿐만 아니라 이를 생성하는 전구물질을 저감하는 노력이 요구된다. 문제는 어느 분야에서 어떤 전구물질을 줄이

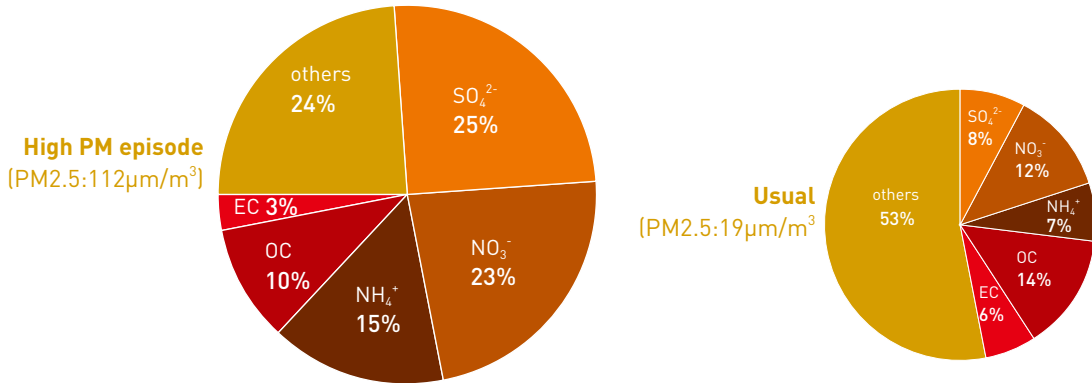
는 것이 가장 효과적인가에 대한 정책적 판단 과정에서 과학적 이해가 충분치 않다는 것이다. 최근 석탄 화력발전소와 경유 자동차, 경유 자동차와 휘발유 자동차 가운데 어느 배출 분야가 미세먼지 농도를 더 강화하는지에 대한 논란이 대표적인 예이다.

우리나라 초미세먼지 농도에 끼치는 중국의 영향에 대한 논란 역시 과학적 이해가 필요한 또 다른 경우라 할 수 있다. 중국의 영향이 연평균 20~30% 정도라는 주장,³ 심할 때는 80%를 넘는다는 주장,⁴ 연평균 40~50% 정도라는 주장⁵ 등이 보도되었다. 이런 차이는 모델링 방법론, 사용하는 모델의 종류, 모델링의 시기 그리고 영향도를 계산하는 방법의 차이로 나타난 것이다.

지역별 영향도를 산출하는 데 가장 널리 사용되는 방법은 3차원 광화학모델이다. 3차원 광화학모델은 대상 지역을 격자로 잘라, 각 격자에서의 대기오염물질 배출량과 기상 모델의 결과를 활용하여 초미세먼지가 광화학반응에 의해 생성되는 정도와 바람에 의해 확산되는 정도를 계산하는 것이다. 그러나 같은 3차원 광화학모델이라 해도 어떤 입력 자료를 사용하느냐에 따라 영향도가 다르게 계산될 수 있다. 비록 동일한 대기오염물질 배출량을 쓰더라도 사용하는 기상자료가 다르게 적용되면 영향도는 다르게 나타난다. 예를 들어, 바람이 없어 확산이 어렵고 온도, 습도, 일사량 등이 높아 광화학반응에 좋은 기상조건을 입력할 경우 자체적으로 발생하는 영향이 외부의 영향보다 더 크게 나타날 수 있다. 반대로 서풍 계열의 바람이 우세한 기상 조건을 입력하면 중국 등 외부의 영향이 더 크게 나타날 수 있다.

3 Kim et al., 2016
4 국립환경과학원의 연구 결과 참조 (<http://www.segye.com/newsView/20170607003028>)
5 서울특별시, 2016

그림2 서울 종합대기측정소에서 관측한 고농도 사례(2014. 2)



주 스모그 시기와 일반 시기의 초미세먼지 질량농도와 화학조성 비교.(원의 면적은 질량농도와 비례함)

자료 김용표, 2017에서 재인용.

우리나라에서 사용하는 3차원 광화학모델은 미국에서 개발한 CMAQ(Community Multi-scale Air Quality) 모델과 CAMx(Comprehensive Air quality Model-extended) 모델로, 중국과 일본에서도 사용하고 있는 모델이다. 그러나 동북아시아 대기환경의 특성을 제대로 모사하지 못할 수도 있다는 논의가 최근 제시되었고, 올해부터 우리나라에 적합한 모델 개발 연구가 시작되었다. 또한 올해 9월부터는 과학기술에 기초한 미세먼지 생성 기작을 이해하고, 인체에 대한 영향을 평가하며, 이를 저감하기 위한 기술개발 연구가 국가전략 프로젝트로 시행되었다. 그리고 미국과의 공동연구였던 KORUS-AQ(Korea-United States Air Quality Study) 같은 집중관측 연구를 계속하여, 보다 확실한 미세먼지 생성과정과 국내외의 영향 정량화 연구를 수행할 예정이다.

효율적인 연구 체계와 정책 방향을 위한 제언

미세먼지 문제에 관한 정책의 우선순위를 평가하고 효율적인 정책으로써 국민의 불안을 해소하는 것 역시 중요한 정책 방향이다. 우리나라의 (초)미세먼지 관리를 위한 여러 요소들의 선진국 대비 수준을 평가한 연구에 따르면, 가장 뒤쳐진 분야가 (초)미세먼지 생성에 대한 과학적인 이해 부족(선진국 대비 50% 수준)과 함께 정책 우선순위 결정과 시행(선진국 대비 50~60%)이었다.⁷ 이를 위해서는 효과적인 정책 결정과 시행 그리고 평가를 수행할 수 있는 체계가 구축되어야 한다.⁸

현재 환경부 산하의 국립환경연구원은 대기환경 분야 연구비 예산을 지원받아 많은 연구 과제를 수행하고 있다. 문제는 미세먼지 문제가 중요 현안으로 부각되면서 몇 년 사이에 연구비는 크게 증가하였으나, 연구 인력은 공무원 조직 내에서 약간 증가한 정도라는

7 김용표, 2017.

8 기존 미세먼지 정책의 효과분석은 한혁 등, 2017 참조.

점이다. 또한 환경부 산하기관이다 보니 환경부의 요청 사항을 즉각적으로 수행해야 하기 때문에 장기적인 연구 수행이 힘들다. 이에 따라 대기환경 분야 연구비의 상당 부분은 국립환경과학원이 직접 수행하지 못한 채 외부 연구자에게 용역 과제 형식으로 의뢰하고 있다. 따라서 투입되는 연구 예산에 비해 조직이나 연구자의 연속성이 약하여 효율성이 떨어질 수밖에 없다.

이런 문제를 해결할 방안 중 하나는 출연연구소 설립이다. 환경 정책과 평가 분야는 한국환경정책평가연구원이라는 출연연구소가 설립되어 연구와 환경부에 대한 정책 제안을 뒷받침하고 있다. 과학기술 분야에도 출연연구소를 설립하여 환경 분야 연구를 지원한다면 지속적인 연구 수행과 국립연구소를 통한 과학적 연구 수행이 가능하다. 일본에서는 국립환경연구소(National Institute for Environmental Studies, NIES: 우리나라 국립환경과학원의 벤치마킹 대상기관)가 2001년 국립기관에서 독립법인(우리나라 출연연구소와 비슷한 개념)으로 변화하면서 보다 다양한 분야의 연구를 수행하고 있다. 이때 기존 국립연구소에 있던 연구자는 공무원 신분(월급 체계나 연금 등)을 그대로 유지하면서, 독립법인 전환 이후 입사한 연구자들에게는 새로운 체계를 적용하였다고 한다.

또한 미세먼지를 포함한 대기관리를 효과적으로 수행할 수 있는 체계가 필요하다. 수질 관리에서는 수계별로 환경청이 설치되어 수계 관리를 하고 있으나, 대기 관리는 수도권 대기환경청을 제외하고는 지방자치별로 시행하고 있다. 또한 미국 사우스코스트 대기관리국(South Coast Air Quality Management District, SCAQMD)에서는 여러 법적 권한을 행사할 수 있는 반면 우리나라 수도권 대기환경청은 그렇지 못한 형편으로, 강력한 대기관리 대책을 수립하거나

시행하기가 어렵다. 따라서 대기 권역별로 법적 권한이 강화된 대기관리청을 설립하여 대기관리를 담당하는 것이 바람직하다.

이와 함께 효과적인 소통과 협업 체계를 구축하는 것이 바람직하다. 국민의 불안을 해소하기 위해서는 과학을 기반으로 정책을 수립하고 시행해야 할 뿐만 아니라 그 과정에서 지방자치단체, 시민단체, 취약계층에 대한 정책 홍보와 의견 수렴이 필수적이다. 특히 환경부의 경우에는 이러한 소통체계를 부처 내에 구축하여 활용하는 것이 중요하다.

이와 같이 대기의 미세먼지 농도를 저감하기 위해서는 생성·변환·이동·제거 등의 여러 과정에 대한 과학적인 이해와 기술적인 이해가 뒷받침되어야 한다. 그러기 위해서는 체계적인 연구 수행의 환경이 요구되며, 그 결과를 정책에 반영할 수 있는 체계가 마련되어야 한다. 효과적인 연구를 위해서는 다양한 분야의 여러 연구자들이 함께 종합적인 연구를 수행할 필요가 있다. 다행히도 현재 이러한 연구를 뒷받침할 여건과 기술개발이 진행 중이다.

미세먼지 문제는 여러 분야의 대응이 필요하기 때문에 대책의 우선순위를 정할 필요가 있다. 이를 위해서는 미세먼지 생성과 제어 과정을 과학적으로 이해하는 연구와 함께 정책을 효과적으로 수립, 시행하여 국민의 불안을 최소화할 수 있는 체계 구축이 시급하다.

또한 우리나라의 미세먼지는 중국, 북한, 몽골 등의 영향을 받으므로 동북아시아 전체를 고려하는 대기환경 협력체 운영이 필요하다. **W**

참고문헌

- 김영욱 등, 2015, 미세먼지 위험에 대한 수용자의 인식과 의견 형성에 관한 연구, 프로모션 기사 인식정도와 관여도에 따른 분석'한국언론정보학회지 통권72호, 52쪽
- 김용표, 2017, 초미세먼지 문제 해결을 위한 연구 및 정책 방향," 한국대기환경학회지, 33(3), 191-204
- 서울특별시, 2016, 초미세먼지(PM-2.5) 배출원 인벤토리 구축 및 상세모니터링 연구, 최종보고서
- 한상희, 김용표, 2015, 서울시 대기 중 초미세먼지(PM2.5) 질량과 화학성분 농도의 장기 변동 추이, 한국대기환경학회지, 31(2), 143-156
- 한현 등, 2017, 미세먼지(PM10) 저감정책의 비판적 검토: 1차 수도권 대기환경관리 기본계획의 정책 대상, 수단, 효과를 중심으로, 환경정책 25(1), 49-79
- Kim, BM et al., 2016, Transported vs. local contributions from secondary and biomass burning sources to PM2.5, Atmospheric Environment, 144, 24-36