

위해성을 고려한 대기오염물질의 관리 방향

김영주¹⁾ · 김용표^{2)*}

¹⁾이화여자대학교 환경공학과

²⁾이화여자대학교 화학신소재공학과

(2017년 3월 12일 투고, 2017년 3월 23일 수정, 2017년 3월 29일 게재확정)

Direction for the management of air pollutants based on health risk in Korea

Young Ju Kim¹⁾ · Yong Pyo Kim^{2)*}

¹⁾*Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University*

²⁾*Department of Chemical Engineering & Materials Science, Ewha Womans University*

(Received 12 March 2017; Revised 23 March 2017; Accepted 29 March 2017)

Abstract

Policy direction for the management of air quality in Korea has been on the reduction of the average concentrations of the criteria air pollutants such as sulfur dioxide and fine particles. However, recently, risk based management of air pollutants becomes an important issue. In this study, to develop an effective air quality management policy direction in Korea, (1) the fourth Multiple Air Toxics Exposure Study (MATES IV) carried out in the South Coast Air Quality Management District (SQAQMD) in the USA is reviewed and (2) the results are compared with in these in Seoul and (3) policy directions are suggested. It was found that (1) systematic integrated study comprising of measurement, modeling, emission inventory estimation, and risk assessment was essential to estimate the health risk of air pollutants reliably, (2) cancer risk of diesel particle was dominant over other air pollutants, and (3) health risk based emissions were different from amount based emissions. It was suggested that (1) reducing the exposure from hot spots might important to reduce health risk from air pollutants and (2) an integrated air quality management administration system is important for the efficient management of air pollution.

Keywords: Air quality management, Risk based management, MATES IV, SQAQMD

* Corresponding author.

Tel : +82-(0)2-3277-2832

E-mail : yong@ewha.ac.kr

1. 서론

최근의 초미세먼지 문제로 국민들이 대기환경에 대해 불안해하고 있다. 초미세먼지, 오존 등의 대기 오염물질이 우리의 호흡기, 순환기 등에 악영향을 끼치는 것으로 알려져 있고 (KEI, 2013), 초미세먼지나 오존 농도가 높을 것으로 예보된 날에는 운동이나 야외활동을 취소하고 마스크를 쓴 가족이 착용하는 등 대처하는 가정이 늘고 있다. 대기오염물질 내 존재하는 블랙카본 등에 의해 가시거리가 감소하며(Ghim et al, 2005), 국민이 대기오염에 대한 심리적 악영향도 크다.

선진국의 환경 관리 패러다임이 종래에 매체별 오염물질 농도 관리에서 사람이나 생태에 미치는 영향을 저감시키는 방향으로 변하고 있다. 우리나라에서도 수용체 중심의 환경관리 방안이 마련되고 있다. 환경부에서는 유해대기오염물질 (Hazardous Air Pollutants, HAPs) 관리를 강화하기 위해 2012년 5월 대기환경보전법을 개정하여 유해성대기감시물질에 관한 내용을 추가하고, 특정대기유해물질의 개념을 정하였다 (MOE, 2012). 대기환경개선종합계획을 10년마다 수립할 때, (1) 대기오염이 국민 건강에 미치는 위해정도와 이를 개선하기 위한 위해수준의 설정에 관한 사항, (2) 유해성대기감시물질의 측정 및 감시·관찰에 관한 사항, (3) 특정대기유해물질을 줄이기 위한 목표 설정 및 달성을 위한 분야별·단계별 대책을 포함하도록 하고 있다 (MOE, 2012). 또한 제2차 수도권 대기환경관리 기본계획에서는 ‘맑은 공기로 건강한 100세 시대 구현’을 비전으로 제시하기도 하였다 (MOE, 2013).

따라서 대기환경을 관리하고 국민의 건강을 보호하기 위해서는 기존의 대기오염물질 관리 정책 현황을 파악하고, 현 상태에서의 문제점을 파악하여 관리 체계를 구축하고 정책적 방안을 마련하는 것이 시급하다. 이를 위해서는 선진국의 위해성에 기반한 대기오염물질 관리 사례를 파악하고, 이를 우리나라에 적용하기 위한 정책 타당성을 검토하는 것이 필요하다. 환경부에서도 유해대기오염물질 관리를 위한 연구를 수행하고 있고 (NIER, 2011, 2012, 2013), Yeo et al. (2016)은 선진국의 유해대기오염물질 관리 사례를 조사하여, 우리나라 유해대기오염물질 관리 방안을 제안하였다. 그러나 조사 사례가 대

체로 2010년 전의 자료여서, 최신의 연구나 정책방향을 파악하는데 제한이 있었다.

본 연구에서는 대기환경 관리 체계 구축에 선행되어야 할 선진국의 위해성에 바탕을 둔 대기 정책의 특징을 검토하고, 이를 우리나라에 적용하기 위한 관리 방향을 제시하였다. 선진국 사례는 대기환경 관리의 모범사례로 평가되는 남캘리포니아 대기질관리국(South Coast Air Quality Management District, SCAQMD)에서 수행하여 2013년도에 종료된 제 4차 다중 독성대기오염물질 노출연구(Multiple Air Toxics Exposure Study IV, MATES IV)를 중점적으로 검토하였다. MATES에 관련 자료는 특별한 언급이 없는 경우 SCAQMD (2015)에서 인용하였다.

2. 다중 독성대기오염물질 노출 연구 (MATES)

2.1 미국 남캘리포니아주 대기질관리국

미국 남캘리포니아주에 소재한 남캘리포니아 대기질관리국(SCAQMD, South Coast Air Quality Management District)은 남캘리포니아주 지역의 4개의 카운티(Orange, Los Angeles, Riverside, San Bernardino)를 관할하는 대기질 관리국이다. 남캘리포니아 지역은 미국 내 두 번째로 인구 밀집도가 높고, 고도의 산업화를 이룬 도시로서 미국에서 스모그가 가장 심한 지역 중 하나이다.



Fig. 1. Domain of the SCAQMD.

SCAQMD는 관할지역의 고정 오염원(점오염원, 면오염원)에 대한 허가 및 대기 오염물질 배출을 관리하며, 연방 정부와 주 법에 따라 운영한다. 대기오염배출에 대한 법적 권한을 가지나, 위반 행위에 대한 처벌은 SCAQMD의 직접 기소형태가 아닌 주 또는 카운티의 변호사가 대행한다. SCAQMD 운영예산의 약 73%는 평가 수수료, 연간 운영지원비, 배출 수수료, 청문회 비용, 벌금, 투자금 등으로 운영되며, 나머지 27%는 연방정부 보조금, 캘리포니아 대기 자원 보조금, 캘리포니아 청정대기 법에 의한 자동차 요금으로 운영된다(SCAQMD, 2015).

2.2 MATES 개요

The Multiple Air Toxics Exposure Study (MATES)는 다중 대기독성 노출 연구라고 불리며, 1986년 Air Quality Management Plans을 개정하기 위해 대기 중 유독성 물질 농도 측정과 유독성 물질에 노출되었을 시 암 발생 위험도(Carcinogenic Risk)에 대해 분석을 실시하였다.

1986년 시작된 MATES I 연구는 1986년 5월부터 1987년 4월까지 약 1여년간 10개의 고정 사이트에서 수행되었으며, 기술적 제약으로 인해 10가지 유독성 물질에 대해서 분석하였다. 이후 MATES II 연구는 1998년 4월부터 1999년 3월까지 동일한 10개의 고정 사이트에서 업데이트된 34개의 유독성물질에 대해 측정하였고 더불어 모델링 분석을 수행하였다. MATES III 연구는 2004년 4월부터 2006년 3월까지 실시되었고 MATES 연구 중 유일하게 2여년 동안 수행되었다. 수정된 10개 고정 사이트에서 35개의 유독성 물

질에 대해 측정 및 모델링을 실시하였다.

1986년 이후, MATES 연구가 진행과 동시에 미국의 국가, 주 차원의 많은 유독성 물질 배출제어 프로그램이 도입되었다. 또한 지속된 MATES 연구는 남캘리포니아 지역의 대기오염 물질 노출에 대한 흐름과 패턴 파악에 도움을 주었으며, 유독성 물질 관리 프로그램에 대한 평가를 가능하게 하였다.

MATES IV연구는 2012년 6월부터 2013년 7월동안 10개의 고정사이트를 대상으로 UFP(Ultrafine Particles), Acrolein, BC(Black Carbon)이 추가된 38개 유독성 물질에 대해 측정 및 모델링 연구를 수행하여 2015년 발표되었다.

MATES 연구의 핵심내용은 다음과 같다.

- 대기 중 유독성 물질 모니터링 및 분석
- 대기 중 유독성 물질 배출 인벤토리 구축
- 대기 중 유독성 물질에 대한 모델링 및 위험도 평가

2.3 MATES IV 측정

측정소 지역은 그림 1에 나타나 있으며, 지역의 지리적 특성과 토지 이용에 따른 대표성을 가진 10 곳에서 측정하였다. 측정은 매 6일마다 실시되었고, 대상 물질을 다음과 같다.

휘발성유기화합물

(Volatile Organic Compounds, VOCs)

그림 2와 3은 VOCs의 대표적인 유해대기오염물질인 벤젠(Benzene)과 1,3-부타디엔(1,3-Butadiene)의 농도 변화 추이이다. 벤젠과 1,3-부타디엔은 가솔린

Table 1. Substances measured in MATES IV.

Acetaldehyde	Dichloroethane	Organic Carbon (OC)
Acetone	Elemental Carbon (EC)	PAHs
Arsenic Ethyl	Formaldehyde	Perchloroethylene
Benzene	Hexavalent Chromium	PM2.5
Black Carbon (BC)	Lead	PM10
1,3-Butadiene	Manganese	Selenium
Cadmium	Methylene Chloride	Styrene
Carbon Tetrachloride	Methyl ethyl ketone	Toluene
Chloroform	MTBE	Trichloroethylene
Copper	Naphthalene	Ultrafine Particles (UFP)
Dibromoethane	Nickel	Vinyl Chloride
Dichlorobenzene	Acrolein	Xylene
		Zinc

사용에 따라 배출되는 1차 대기오염물질로 연 평균 농도가 감소하는 것으로 측정되었다. 이는 성분 배합변경 휘발유 사용과 새로운 동력방식의 자동차 보급으로 배기가스 배출 감소로 인한 결과로 추정한다. 특히 2차와 3차 MATES 기간 사이의 농도 감소율이 높다.

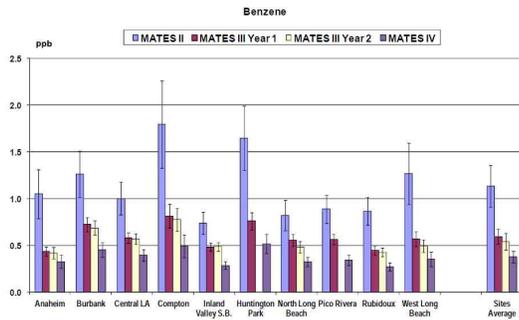


Fig. 2. Variation of the average concentrations of benzene at the MATES monitoring sites.

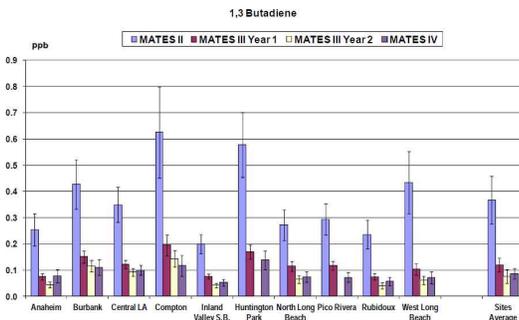


Fig. 3. Variation of the average concentrations of 1,3-butadiene at the MATES monitoring sites.

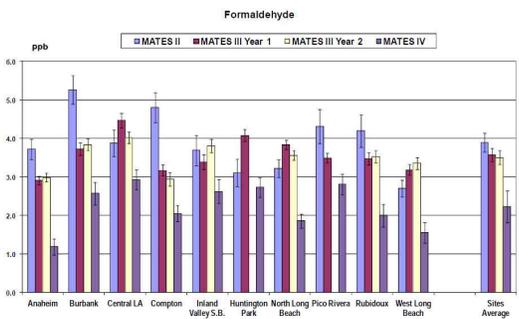


Fig. 4. Variation of the average concentrations of formaldehyde at the MATES monitoring sites.

그림 4는 카보닐그룹 유기화합물 가운데 대표적인 유해대기오염물질인 포름알데히드(Formaldehyde) 농도 변화 추이이다, 벤젠이나 1,3-부타디엔과 달리 3차와 4차 MATES 기간의 농도 감소가 가장 크다. 포름알데히드의 주요 기여원은 이동오염원과 대기 중 화학 반응을 통한 2차 오염물 생성이다. 따라서 MATES II에서 MATES III 사이에는 휘발유 자동차에서의 배출 관리로 1차 대기오염물질의 농도가 줄어들고, MATES III과 MATES VI 사이에는 광화학 반응의 관리로 2차 대기오염물질 농도가 감소하였을 가능성이 크다.

Elemental Carbon (EC)

원소상탄소 (EC)는 PM₁₀과 PM_{2.5}에서 각각 측정하였으며, 그림 5는 EC를 PM_{2.5}에서 측정한 결과이다. PM₁₀ EC농도는 MATES II부터, PM_{2.5} EC 농도는 MATES III부터 측정하였다. PM₁₀ EC농도는 MATES III과 MATES IV 사이에 약 20% 감소하였으며, PM_{2.5}에서의 EC 농도는 약 30% 감소하였다. PM_{2.5} EC의 감소율은 높지만, 수치상으로 볼 때는 PM₁₀이 약간 높다.

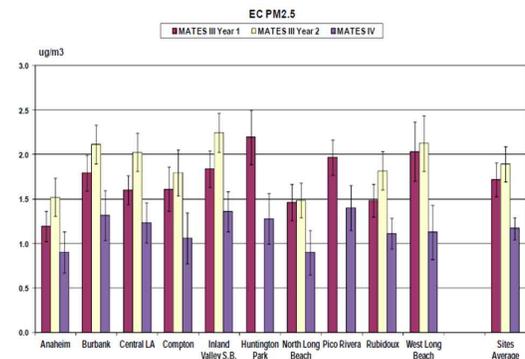


Fig. 5. Variation of the average concentrations of EC in PM_{2.5} at the MATES monitoring sites.

그림 6은 MATES II부터 IV까지의 농도 추이로 초기 PM₁₀ EC 농도가 평균 50%가량 감소하였으며, 이는 이동 오염원이나 Diesel을 사용하는 자동차를 포함한 다양한 배출 규제에 의한 결과로 추정할 수 있다. 원소상탄소도 대표적인 1차 대기오염물질이며, MATES II와 MATES IV 사이 기간 동안 디젤 자동차 등의 연소에 의한 배출을 크게 저감한 것을 알 수 있다.

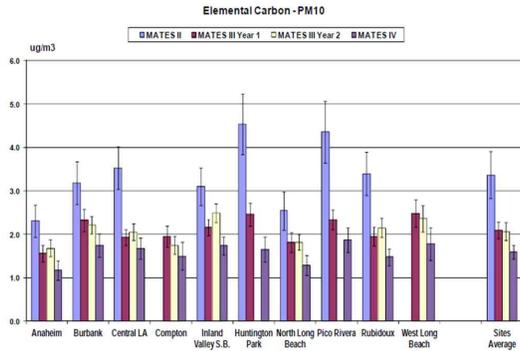


Fig. 6. Variation of the average concentrations of EC in PM₁₀ at the MATES monitoring sites

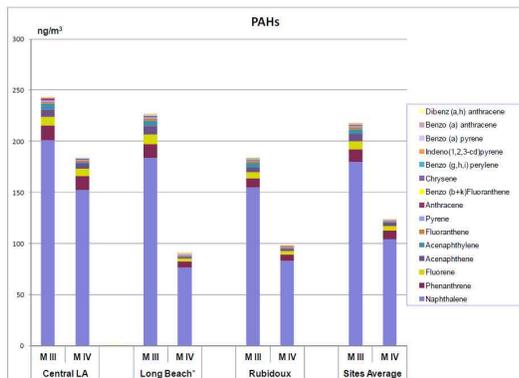
Diesel PM 추정

직접적인 측정이 불가능한 Diesel PM(DPM)은 CMB (Chemical mass balance) 수용 모델을 사용하여 추정하였다. Diesel PM은 MATES III에 비해 약 70% 가량 감소하였다.

나프탈렌(Naphthalene)과 다른

PAH(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons) 성분

그림 7은 나프탈렌을 포함한 PAHs에 농도추이이다. 나프탈렌의 경우 제한된 지역에서만 측정하였다. 전체 PAH 배출물질 중 나프탈렌이 차지하는 비율이 매우 높으며, PAHs 농도는 MATES III에 비해 감소하였다.



* MATES III site was at West Long Beach, and MATES IV site was at North Long Beach
 Fig. 7. Average concentration of PAHs for MATES III and MATES IV.

Ultrafine particle and Soot

초미세먼지라 불리는 UFP(Ultrafine particle)는 0.1 μm이하의 입자로서 유기물질, 검댕(soot), 미량의 금속물질 등이 포함된다. 초미세먼지는 심장이나, 뇌 속으로 전달되어 잠재적으로 건강에 영향을 끼칠 수 있다. 초미세먼지의 80% 이상이 DPM(Diesel particulate matter)에 의해 발생하며, DPM은 Diesel 연료로부터 배출된다. Soot은 우리말로 검댕이라 불리며, black carbon(BC)나 elemental carbon(EC)를 통해 측정한다. 최근 연방 정부, 주, 지역에서는 BC와 EC에 대한 규제와 관리 프로그램을 도입하여 diesel 배출 및 미세먼지 발생을 완화하고자 하며, 특히 SCAB(South Coast Air Basin)는 이 BC와 EC를 잠재적인 오염원으로 고려하여 주목하고 있다.

그림 8에 MATES III-EC와 MATES IV의 EC, MATES IV 평균을 보였다. 이렇게 따로 표시한 이유는 MATES III에서 BC(Black Carbon)의 농도를 측정하지 않았기 때문이다. 따라서 EC만을 비교했을 때 이전 연구에 비해 약 35% 감소하였다. BC는 West Long Beach, Inland Valley SB, Rubidoux, Burbank, Central Los Angeles 지역에서 평균보다 높은 결과를 보였다. 이 지역들은 도시와 주요 도로들이 인접한 위치적 특성을 가진다. 그림 9은 UFP 측정결과이다. 측정값의 평균과 비교했을 때 West. Long Beach와 Huntington Park가 높게 측정되었다. 이는 앞서 항구, 언급한대로 인접 주변에 항구나, 터미널, 고속도로, 유통시설과 같은 교통량이 많은 지역이다.

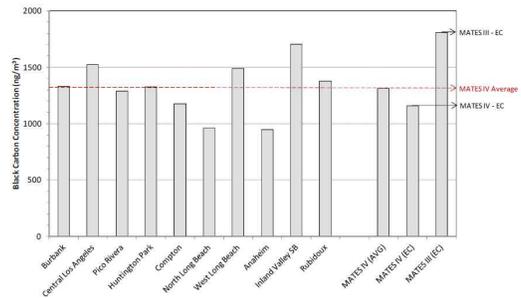


Fig. 8. Spatial variation of the average concentrations of BC during MATES IV and comparison with MATES IV and MATES III EC averages concentrations at the MATES monitoring sites.

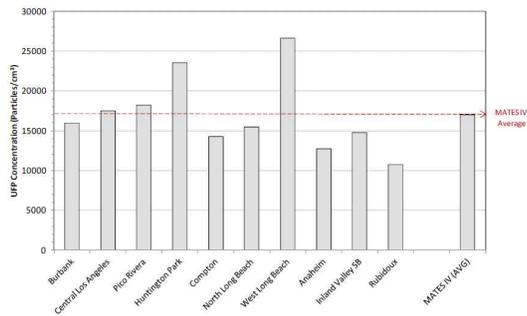


Fig. 9. Spatial variation of the average concentrations of Ultrafine Particle (UFP) during MATES IV at the MATES monitoring sites.

일변화 (Diurnal variation)

그림 10은 BC 농도의 일변화 추이로 출퇴근 시간에 교통량의 증가로 인해 농도가 증가했으며, 18시에서 20시 사이에는 교통량이 증가하지만 풍속이 약해지고 역전층의 영향으로 농도가 약간 증가하여 그 상태를 유지하는 것으로 나타났다. 이는 전형적인 1차 대기오염물질의 특성을 보여준다.

그림 11은 UFP 농도의 일변화 추이로 BC와는 다른 추이를 보인다. 6시에서 9시와 18시에서 20시 사이에는 출퇴근 시간의 영향을 받으며, 오후 12시에서 14시 사이에 증가하게 된 것은 햇빛의 영향으로 광화학 반응이 활발해져 농도가 증가하였다. 이는 UFP가 직접적인 배출과 대기에서의 반응에 의한 생성 영향을 다 같이 받고 있는 것을 보여준다.

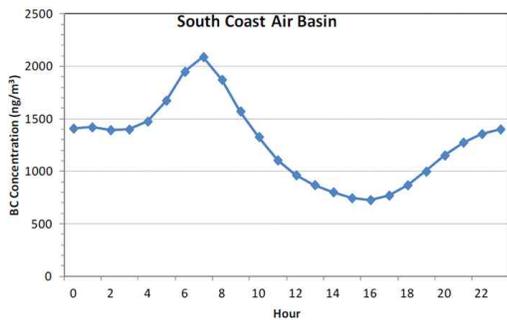


Fig. 10. Diurnal Variation of Black Carbon (BC) Concentration in the South Coast Air Basin During MATES IV.

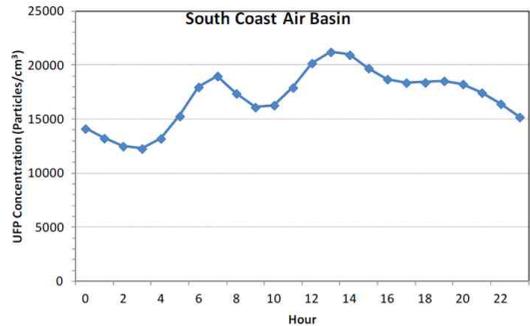


Fig. 11. Diurnal Variation of Ultrafine Particle (UFP) Concentration in the South Coast Air Basin During MATES IV.

2.4 MATES 모델링

2015년 발표된 MATES IV에는 2012 AQMP(Air Quality Management Plan)에 의해 이전 모델링 연구에서 사용하지 않았던 새로운 중규모의 기상모델, WRP(Weather Research Forecast)와 CAMx RTRAC (Comprehensive Air Quality Model with Extensions의 RTRAC버전, AER, 2002), 대기질 모델을 사용하였다. CAMx는 다양한 범주에 걸쳐 가스상, 입자상 대기오염물질에 대해 통합적으로 평가할 수 있는 있는 대기 확산 모델이며, RTRAC(Reactive Tracer)버전은 혼합가스과 입자상 추적자의 배출, 확산, 침적, 화학반응을 추적하며, 가스상/ 입자상 대기 독성모사가 가능한 모델이다.

MATES IV는 고정 사이트 10곳을 포함하여 남캘리포니아 주 남부지역에 위치한 연안과 항만지역 전 반을 2km x 2km 격자로 나누어 실시하였다. CAMx RTRAC 대기질 모델은 WRP를 이용한 기상 데이터와 앞서 측정된 데이터를 이용하여 모델링을 실시하였다. 2012년 7월 1일부터 2013년 6월까지 측정된 19개의 주요 화합물의 연평균농도를 이용하였다. 그 중 위해도에 높은 비율로 기여하는 물질은 DPM, 벤젠, 1,3-부타디엔, 포름알데히드이다.

그림 12은 PM_{2.5}의 DPM 농도 분포 모델링 결과이다. 가장 높은 농도 (2.9 μg/m³)로 추정된 곳은 LA의 항만지역과 Long Beach 지역으로 고속도로와 철도 건물목 등이 위치한 교통의 요지지역이다. 그러나 추정된 Diesel 농도가 가장 높은 수준조차 이전의 연구에 비해서는 현저히 낮은 수준에 해당한다.

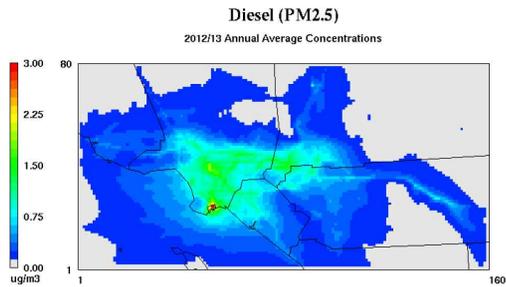


Fig. 12. Annual average concentration pattern for Diesel PM2.5.

그림 13의 포름알데히드의 경우 LA의 Central지역에서 주목할 만하게 높게 추정되었다. 오존 형성과 광화학적 영향 및 하강기류가 있는 공간적 특성으로 인한 결과로 추정할 수 있으며, 1차적인 오염배출은 지속적으로 감소하는 추이에서 높게 나타난 것은 화학반응으로 통해 2차적인 형성으로 농도가 우세한 것으로 보인다.

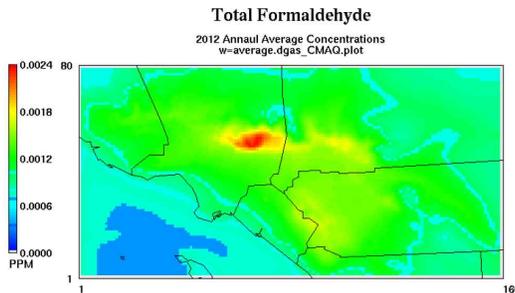


Fig. 13. Annual average concentration pattern for total Formaldehyde.

2.5. MATES 위해도 평가

2015년 발표된 암 발생 위해도는 2003 OEHH (The Office of Environmental Health Hazard Assessment, 캘리포니아 주 환경 보건 위해 평가국)의 Air Toxics Hot Spots Program Guidance Manual for Preparation of Health Risk Assessment 지침 매뉴얼에 따라 수행되었다. 위해도는 다음의 식 (1)을 이용하여 구한다.

$$Risk_{i,j} = \sum concentration_{i,j,k} \times \sum Risk\ Factor \quad (1)$$

관측 결과에 의한 위해도 추정

유독성 물질 측정을 통한 위해도 추정 결과는 MATES IV에서 480 per million이다. 이 수치는 이전 MATES III연구에서 1200 per million가 나온 추정된 값과 비교했을 때 약 84%로 감소한 수치이다. 예측된 418 per million에 기여하는 오염물질 가운데에는 Diesel PM이 약 68% 가량을 차지하고 있다(그림 14). 그림 15는 가장 높은 비중으로 위해도에 영향을 주고 있는 DPM의 배출의 오염원 비율을 볼 수 있다. 전체 DPM 배출은 도로 이동오염원과 비도로 이동 오염원이 비슷한 비율로 높게 차지하고 있다.

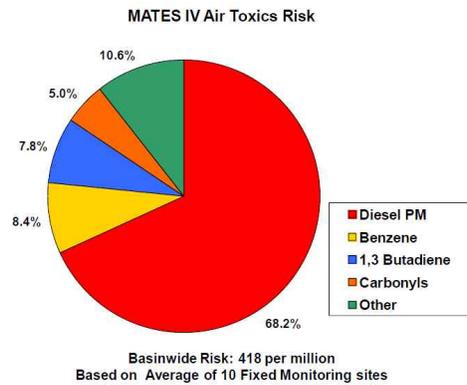


Fig. 14. Average risk of major toxic air pollutants from the measurement results.

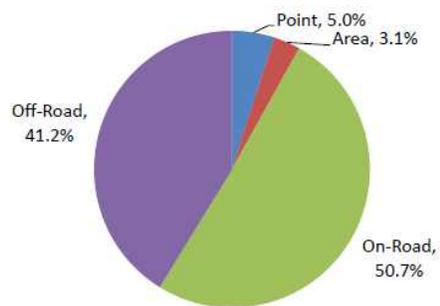


Fig. 15. Cancer potency weighted source apportionment of DPM for 2012 emissions.

초미세먼지 배출량 분류

그림 16은 암 발생 위험도에 기여하는 배출량의 변화를 보여주고 있다. 특히 MATES III에서 MATES IV 기간 동안의 오염원별 암 발생 위험도에 기여하는 배출량이 크게 줄어든 것을 알 수 있다. 기여율은 도로 이동오염원이 제일 큰 비중으로 약 50.7%를 차지하고 있으며 뒤를 이어 비도로 이동오염원, 점오염원, 면오염원 순이다. 도로 이동오염원의 경우 MATES III와 비교했을 때 49% 가량 감소하였다. 비도로 이동오염원은 74%, 점오염원은 21% 감소했으며, 가장 높은 비율로 감소한 오염원은 면오염원으로 78% 감소하였다. 일반적인 대기오염물질의 배출원을 관리하는 것과 암 발생 위험도가 큰 유해 대기오염물질의 관리 방안이 다를 수도 있다는 것을 의미한다.

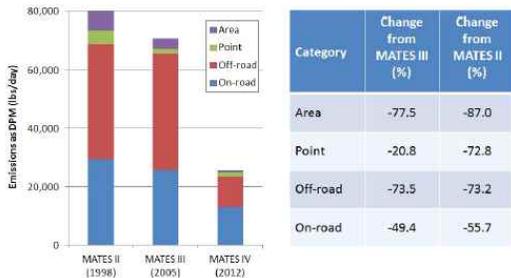


Fig. 16. Cancer potency weighted emission comparison for DPM of MATES II, MATES III and MATES IV.

모델링 결과에 의한 위험도 추정

모델링을 이용하여 평균 인구 증가를 고려한 (average population-weighted) 위험도를 추정하였다. MATES IV에서 인구를 고려한 위험도는 367 per million이다. MATES III는 853 per million 이었으며 약 57%가량 감소하였다.

그림 17은 MATES IV연구에서 주요 독성물질의 연 평균농도를 통해 구한 위험도를 지도상에 나타낸 것이다. 가장 높게 예측된 곳은 Los Angeles의 항만지역과 Long Beach 지역이다. 또한 내륙지역에도 위험도가 높게 평가되었다. 이는 1차 대기오염물질 배출이 위험도에 주요하게 기여하고 있으며, 2차 대기오염물질도 위험도에 영향을 주는 것을 의미한다.

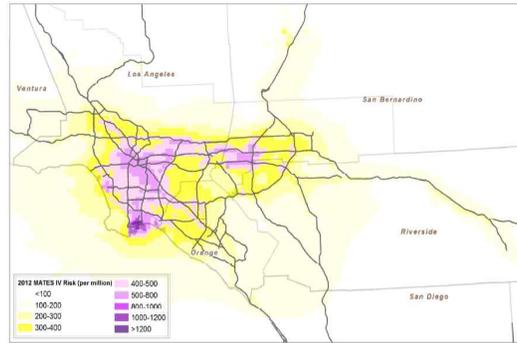


Fig. 17. 2012-2013 MATES IV CAMx RTRAC simulated air toxic cancer risk.

3. 서울의 대기오염도와와의 비교

MATES에서 관측된 결과를 서울에서의 결과와 비교하였다. 휘발성유기화합물 (VOCs)의 경우에는 환경부의 집중관측소인 서울 은평구 불광동 측정소에서 측정된 자료와 비교하였다. VOCs 자료에 대한 2000년대 중반까지의 추이와 자세한 분석 결과는 Shin et al. (2013)에서 제시되었다. 그리고 2009년-2015년 연평균 농도를 그림 18에 보였다. 벤젠은 2009년 0.5 ppb에서 2015년 0.2 ppb로 감소하였으며, 그 사이에 0.3과 0.4 ppb 수준에서 머물러 있다. 또한 국립환경과학원 (NIER, 2014)의 2013년도 서울 여러 지역의 평균 자료는 0.48 ppb이다. 이는 남캘리포니아 지역과 비교했을 때 벤젠농도는 낮은 편이다. 그러나 그림 17에서 보듯이 불광동에서 관측한 에틸벤젠(Ethylbenzene), 에텐(Ethene), 이소부탄(iso-Butane), 프로판(Propane), 톨루엔(Toluene) 농도는 남캘리포니아주에 비해 상당히 높은 수준이다.

국립환경과학원 (NIER, 2014)의 서울 여러 지역 관측 결과에 따르면 1,3 부타디엔은 평균 0.02 ppb 이하로 나타났으며, 서울에서의 검출빈도 5%로 높은 편은 아니다. 하지만 세계보건기구에서 발암물질로 분류하여 환경보건학적으로 중요성이 높은 물질 중 하나이다. 남캘리포니아의 경우 꾸준히 감소하였으나, 그림 3에서 볼 수 있듯이 약 0.09 ppb이며, 우리나라보다는 높게 검출되었다.

포름알데히드는 남캘리포니아 지역에서 그림 4와 같이 감소추이를 보이며, 평균 농도는 약 2.2 ppb이다. 서울의 경우 국립환경과학원 (NIER, 2014) 자료에 따르면 평균 농도는 2.96 ppb로 남캘리포니아 지역보다 25%가량 높다.

우리나라의 PAHs 농도 추이, 특히 서울의 농도 추이는 2002년 이후로 감소 추이를 보인다 (Chol et al., 2016). Choi et al. (2016)에 따르면 2010년 4월부터 1년간 관측한 서울의 평균 PAHs 농도는 11.62 ng/m³이다. 남캘리포니아의 경우 그림 7에서 알 수 있듯이 약 130 ng/m³으로 우리나라에 비해 10배 이상 높으며, 특히 나프탈렌의 비율이 매우 높다.

남캘리포니아지역의 PM_{2.5}에서의 EC 평균 농도는 MATES III 결과 (2004.04 - 2006.03)와 비교했을 때 MATES IV (2012.06 - 2013.07)이 약 35%가 감소하여 1 μg/m³ 정도이다. 서울의 경우 Han et al. (2015)에 따르면 우리나라의 EC농도는 2000년대 이후 지속적으로 감소하는 추이를 보여 2 μg/m³ 정도의 농도를 보이고 있으며, 이는 천연가스 버스의 보급화, 매연 저감장치 설치와 같은 정책들의 효과로 추정한다.

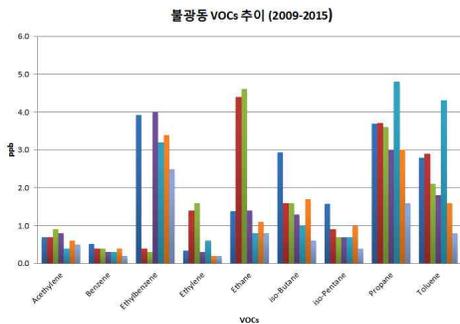


Fig. 18. Variation of the average concentrations of VOCs in Bulgwang.

4. 검토 및 제언

지금까지 미국 남캘리포니아주의 유해대기오염물질 관리를 위한 종합적인 관측, 모델링, 위해성 평가 체계를 검토하고, 서울의 농도 자료와 비교하였다. 미국 남캘리포니아주 MATES를 살펴보면, (1) 측정,

모델링, 위해도 평가가 종합적으로 진행된다는 것과 (2) 유해도가 큰 물질에 대한 집중 관리 정책을 펴고 있다는 것, (3) 실제 대기 관리를 통해 위해도가 얼마나 저감되었는지를 평가하여 정책 수요자인 주민들에게 알리고 있다는 것을 알 수 있다. 이를 위해서 고정오염원에 대해 강력한 권한을 갖는 대기관리국 (SCAQMD)을 설치하여 운영하고 있다.

우리나라의 대기관리 정책은 대기에서의 농도 (concentration), 그것도 평균 농도를 관리하는 것이었다. 이를 위해서는 발생원에서 발생량을 줄이고, 발생된 대기오염물질은 배출 저감시설을 설치, 운용하여 배출량을 줄이는 것이었다. 그러나 그림 19의 위해도 (risk)를 관리하는 것으로 대기관리 정책을 전환한다면, 대기 농도가 사람이나 자연에 미치는 영향 사이의 노출 (exposure)를 관리하는 것이 지금보다 중요해질 것이다. 다시 말하면, 농도보다는 노출 (exposure)를 저감하는데 목표를 세우는 것으로 바뀔 수 있다.



Fig. 19. The diagram of risk management.

또한 우리나라의 경우에도 수도권의 대기관리를 담당하는 수도권대기환경청이 설치되어 운영되고 있으나, 미국 SCAQMD에 비해 재정적인 면이나 권한적인 면에서 강한 권한을 갖고 있지 못하다. 따라서 우리도 수도권대기환경청에 재정과 심사, 허가 등의 기능을 강화시켜 보다 통합적이고 강력한 대기관리 정책을 수립, 시행하는 것이 바람직하다. 이는 수도권뿐만 아니라 우리나라 전역을 몇 개 대기관리권역으로 구분하여 권역별 대기환경청을 설립하는 것으로 확대되어야 할 것이다. 1980년대의 수질 악화로 인해 현재 환경부의 지방환경청은 수계별 환경청으로 운영되고 있다. 이를 대기 관리의 관점에서도 적용할 필요가 있는 것이다.

또 하나의 방향은 모델의 적극적인 활용이다. 제안된 정책의 성과를 판단하는 것은 모델이 유일한 방법이다. 그러나 우리나라는 아직 미국의 대기모델을 활용하고 있으며, 모델 결과에 대한 신뢰도가 그다지 높지 않은 실정이다. 환경영향평가에서는 대기

질 모델이 어느 정도 사용되고 있으나 (KEI, 2005), 대기 관리 정책 평가에는 아직 대기질 모델이 널리 활용되고 있지 않다. 모델링을 정책 평가 및 시행을 위한 방법으로 적극 활용하는 것이 필요하다.

사사

이 연구는 한국연구재단의 지원(NRF-2017R1A2B4006760)을 받아 수행된 연구입니다.

Reference

AER (Atmospheric and Environmental Research, Inc.) (2002). Air toxics modeling.

Choi, N.R., Lee, S.P., Lee, J.Y., Jung, C.H. and Kim, Y.P. (2016). Speciation and source identification of organic compounds in pm 10 over seoul, south korea. *Chemosphere*144: 1589-1596.

Ghim, Y.S, Moon, K.C, Lee, S.H and Kim, Y.P. (2005). Visibility trends in Korea during the past two decades, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 55: 73-82.

Han, S.H., Kim, Y.P., 2015. Long-term trends of the concentrations of mass and chemical composition in PM_{2.5} over Seoul (inKorean). *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* 31, 143-156.

KEI (Korea Environment Institute) (2005), The application of air quality models on environment impact assessment.

KEI (Korea Environment Institute) (2013). A study on

the health impact and management policy of PM2.5 in Korea (II).

MOE (Ministry of Environment) (2012). Revision of clean air conservation act, No. 11445.

MOE (Ministry of Environment) (2013). The 2nd special act on Seoul metropolitan air quality improvement (2015-2024).

NIER (National Institute of Environmental Research) (2011). KATOP, Korea Air Toxics Plan.

NIER (National Institute of Environmental Research) (2012). A study on the control strategy against Hazardous Air Pollutants (HAPs) in urban areas.

NIER (National Institute of Environmental Research) (2013). Establishment of the direction of Hazardous Air Pollutants (HAPs) management policy and development of the roadmap.

NIER (National Institute of Environmental Research) (2014) Monitoring of HAPs in urban areas (I).

SCAQMD (South Coast Air Quality Management District) (2015). Multiple air toxics exposure study in the South Coast Air Basin.

Shin, H. J., Roh, S. A., Kim, J. C., and Kim, Y. P. (2013b). Temporal variation of volatile organic compounds and their major emission sources in Seoul, Korea, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 20 (12), 8717-8728.

USEPA (United States Environmental Protection Agency) (2011). An overview of methods for EPA’s National-scale Air Toxics Assessment.

Yoe, M. J. Kim, N. K, Kim, B. M., Jung, C. H., Hong, J. H and Kim, Y. P. (2016). Direction for the management of hazardous air pollutants in Korea, *Particle and Aerosol Research*, 12(3), 81-94.