

## 4C2) 서울시 대기 중 미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)의 오염원과 건강영향 발생 평가를 위한 PMF모델의 적용

### Evaluation of Source of PM<sub>2.5</sub> and Health Effect Size in Seoul by PMF

허종배 · 서용석 · 김현선 · 김승희 · 이승욱  
서울대학교 보건대학원 환경보건학과

#### 1. 서 론

수도권을 비롯한 도시에서의 인구집중과 증가로 인한 운행 차량 수의 증가, 산업규모 확대 등에 기인하여 대기분진 중 호흡성분진 또는 미세먼지(PM<sub>2.5</sub>) 농도의 증가가 관찰되고 있으며 이로 인한 주민건강 위협의 가능성이 제기되고 있어 미세먼지에 대한 연구와 그 저감대책의 마련이 필요한 시점이다. 선진국의 경우, 다양한 연구를 통해 미세먼지에 대한 저감대책을 수립하고 있으며, 화학적 조성에 대한 정량적인 평가와 오염원 규명을 통한 규제를 마련하고 있으나, 우리나라의 경우 서울과 일부지역에서 제한적으로 미세먼지에 대한 화학적 특성평가가 조사되고 있을 뿐, 미세먼지에 대한 지속적인 연구를 통한 자료 축적이 극히 미비한 실정이다. 또한 각각의 오염물질 배출원에 대한 정확한 목록(source inventory)이 작성되지 못하고 있기 때문에 어떤 배출원에서 미세먼지가 얼마나 배출되고, 배출시의 배출원 구성 물질 성분비와 이들이 미세먼지의 오염도에 얼마나 기여하는 것인지에 대한 논의가 아직까지 이루어지지 못하고 있다.

본 연구에서는 서울 시내(종로구 연건동)를 수용지점으로 채집한 호흡성 미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)의 정성/정량적 분석 결과를 토대로 서울시내 미세먼지에 영향을 미치는 오염원의 종류를 파악하고, 그들의 기여도를 산출하기 위하여 배출원 목록 부재시에 적합한 수용모델로서 현재 오염원 파악과 기여도를 산정하는 연구에서 성공적으로 사용되고 있는 PMF (positive matrix factorization)를 적용하였으며, 오염원들을 종합적으로 평가하고 위해요인을 관리하기위한 기초자료를 제공하고자 한다.

#### 2. 실험 방법

본 연구를 위한 시료의 채취는 서울시 종로구 연건동에 소재한 서울대학교 보건대학원 옥상(지상 17 m)에서 2003년 3월부터 2005년 1월까지 24시간 동안 1회/3일의 간격으로 총 183회 이루어졌다. 측정된 시료의 분석항목은 대기 중 호흡성 미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)의 질량농도와 탄소성분, 이온성분, 미량원소이며, 시료 채취는 미국 URG(Universal Research Glassware)사의 4-Channel ADS(Annular Denuder System)를 사용하였다. ADS는 먼저 Cyclone에서 조대입자가 제거 되고, Denuder관을 통하여 대기 중 가스상 이온물질들이 선택적으로 채취된 후 PM<sub>2.5</sub> 이하의 입자만 여과지에 모이게 되는 기기로서 입자상과 가스상 물질의 농도를 정확하게 분석 할 수 있다.

시료분석방법은 이온성분의 경우 U.S. EPA방법을 이용하였으며, 이온크로마토그래피(Dionex DX-120)를 사용하였다. 27 mm 테프론 필터를 통하여 PM<sub>2.5</sub>의 질량농도 및 미량원소를 평가하였고, 질량농도는 테프론 필터를 채취 전·후에 항량시킨 후 무게차를 측정하였으며, 미량원소는 일종의 X-ray 형광분광법인 PIXE (proton-induced x-ray emissions)를 이용하여 분석하였다(EAC, 미국). PM<sub>2.5</sub>의 원소탄소(Elemental Carbon)와 유기탄소(Organic Carbon)성분은 450°C 로(furnace)내에서 구워진 석영섬유여지(Quartz microfibre filter)를 이용하여 채취된 시료를 TOT (Thermal/Optical Transmittance, Sunset Lab.사)방법으로 분석하였다(Clarkson University, 미국).

#### 3. 결과 및 고찰

PMF는 측정 데이터 값의 표준편차를 고려하여 인자 부하량이 항상 양의 값으로 계산되는 인자분석

의 한 종류로써 오염원에 대한 정성적인 분리와 함께 정확한 정량적인 판단을 가능하게 한다. 모델의 수행은 분석에 사용되는 각 데이터 값에 대한 오차(uncertainty)의 산정에 의존하며 오차에는 측정된 각각의 데이터에 대한 분석 오차, 특정 물질들의 검출한계치(MDLs) 이하 농도, 측정되거나 분석되지 못한 값(missing value)이 있다. 본 연구에서는 2003년 3월부터 2005년 1월까지 측정된 총 183개 시료와 20가지 화학종을 바탕으로 모델수행에 필요한 오차의 산정을 Polissar et al.(1998)에 의해 제안된 오차의 산정을 이용하였다. PMF 추정의 발전적 오차추정치(Heuristic error estimates)는 0.1, 특이점 거리는 0.3을 기본으로 모델을 수행하였으며, 정확한 정량분석에 어려움이 있었던 물질은 오차추정치를 높여 여러번 반복수행과정을 거쳤다. 또한 인자분석시 발생하는 회전의 모호성을 줄이기 위하여 FPEAK, FKEY, GKEY를 고려하였고, 각각의 오염원의 종류와 오염원의 기여도를 정량적으로 평가하기 위하여 scaling 상수를 이용하여 표준화시켰다. 본 연구를 통하여 산출된 서울시 대기 중 미세먼지에 영향을 미치는 오염원은 Episodic aerosol(19.20%), Secondary sulfate(summer)(16.25%), Gasoline(13.02%), Secondary nitrate/construction(11.54%), Sea salt(11.47%), Secondary sulfate (winter)(7.07%), Yellow-sand event/Soil(6.73%), Biomass(6.48%), Diesel(1.43%)로 총 9가지였으며, 모델을 통한 예측치가 실측치의 90%를 설명하였다.

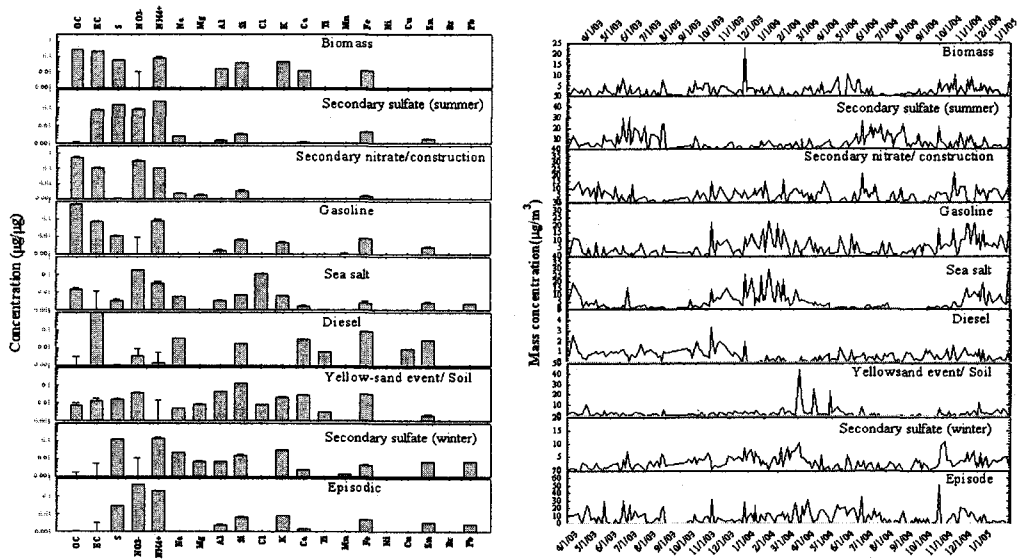


Fig. 1. Source profiles and contributions resolved from PM<sub>2.5</sub> samples

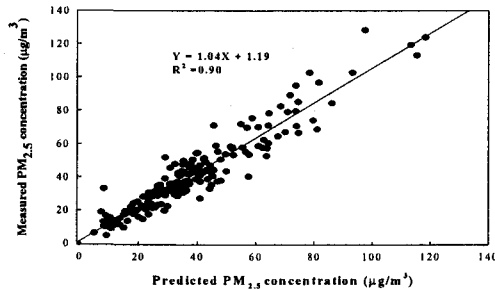


Fig. 2. Measured versus predicted PM<sub>2.5</sub> mass concentration.

PMF 모델을 통하여 산출된 서울시 미세먼지의 오염원 발생 가능지역을 각각의 오염원별로 파악하였으며, Episodic aerosol, Secondary sulfate, Secondary nitrate/construction, Yellow-sand event 등의 오염원은 광역적(regional area)인 오염원으로 서울시 대기의 미세먼지에 영향을 미치는 인자들은 단순히 국지적인(local area) 문제에 국한된 것이 아님을 나타내고 있고, 중국의 대단위 산업시설에서 발생하는 오염원이 우리나라에 많은 영향을 미치고 있는 것으로 나타났다(그림 3). 특히, 서울의 대기 상태가 짙은 스모그 상태일 때 특이하게 관찰되는 오염원인 episodic aerosol의 경우 정확하게 중국에서의 영향을 보이고 있는데, 이는 서울시 대기 중 미세먼지와 가스상 물질에 대한 선행연구와 본 연구의 비교에서 국지적인 특성이 강한 오염물질인 SO<sub>2</sub>의 양은 지속적으로 감소하고 있는 반면, 이차생성물질인 황산염의 농도는 변화 없이 일정한 수준을 유지하고 있는 것과 같은 맥락으로 중국 동지의 대단위 산업시설에서 발생한 오염물질이 지속적으로 우리나라에 영향을 나타내고 있음을 시사하고 있다.

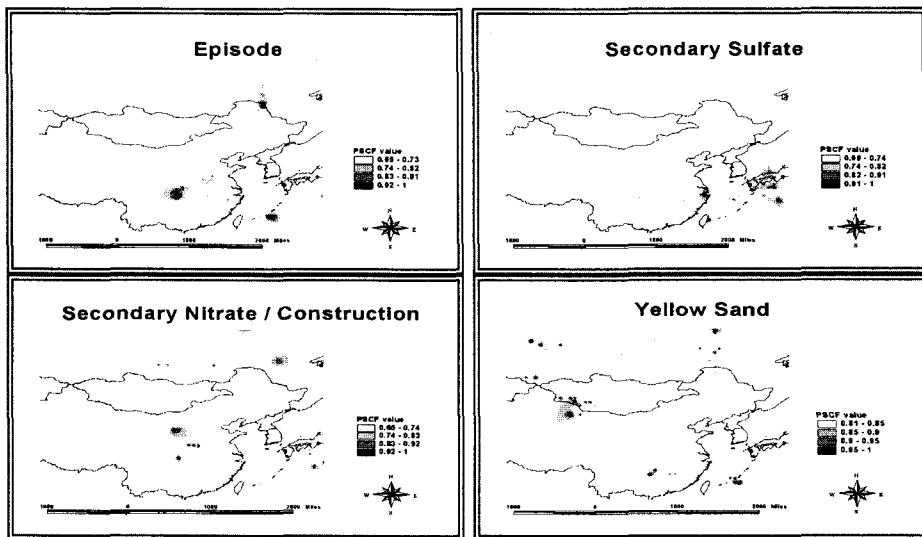


Fig. 3. Possible Source Locations for resolved PMF model using PSCF.

PMF를 통하여 얻어진 오염원 기여도와 측정망 주변에 거주하고 있는 주민들의 건강자료(지역의료보험)를 바탕으로 한 Health effect 조사 연구에서(백도명, 차세대 핵심 환경기술개발사업) episode aerosol, secondary sulfate(summer, winter), secondary nitrate가 큰 effect size를 가지는 것으로 나타났으며, 이는 서울의 경우 한 가지 오염물질의 영향보다는 대기 중 다양한 물질들(1차 오염물질+산화물질)이 반응하여 생성되는 오염물질들(2차 오염물질, 광화학 스모그)이 결국 건강에 위해를 나타낸다는 결과를 도출하고 있다.

## 사 사

본 연구는 한국 환경기술진흥원의 '차세대 핵심 환경기술개발사업 (과제번호: 2004-09001-0020-0, 과제번호: 2004-09001-0032-0)'으로 지원된 연구이며, 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- U.S.EPA, (1999) Compendium Method IO-4.2.
- Eugene Kim, Timothy V. Larson, Philip K. Hopke, et al. (2003) Atmospheric Research., 66, 291-305.
- Polissar, A.V., P.K. Hopke, W.C. Malm, J.F. Sisler. (1998) J. Geophys. Res. 103: 1147-1157.