

## Development of air pollutants emission modeling system

김동영·김정욱<sup>1)</sup>·장영기<sup>2)</sup>기상연구소 응용기상연구실, <sup>1)</sup>서울대학교 환경대학원, <sup>2)</sup>수원대학교 환경공학과

## 1. 서 론

대기 확산 모형의 적용, 대기 오염 배출원의 관리 등을 위해서는 체계적인 배출량 자료체계가 필수적이다. 지금까지 국내의 대기오염물질 배출량 관련 연구는 1차 오염물질에 국한된 경우가 많았고, 배출량의 시, 공간적 해상도도 년단위, 행정구역 단위 등에 국한되어 수치모형에 의한 대기질 연구, 지역적 변동 양상에 대한 연구, 반응성 오염물질 연구 등에 사용되기에는 매우 부족한 형편이었다.

배출모형체계는 각종 대기오염물질에 대한 시·공간적 배출량 분포를 정량적으로 추정하는 모형으로 오염물질 발생과 관련된 각종 정보를 취합, 분석하여 배출량 산정에 이용할 수 있도록 하며, 결과를 분석하고 필요한 형태로 생성할 수 있도록 하는 하나의 통합된 체계를 의미한다.

대기오염물질의 배출은 인간의 각종 활동뿐 아니라 자연상태에서도 배출되는 복잡한 과정이므로, 배출모형체계는 인간의 활동유형을 분류하고 정형화할 수 있어야 하며, 배출에 영향을 미치는 자연환경의 복잡한 변수들도 동시에 고려할 수 있어야 한다. 또 배출모형체계는 배출원과 관련된 각종 정보를 통합하여 대상지역의 주요 오염원으로부터 일정 기간 동안 대기중으로 유입되는 오염물질의 종류와 양을 파악하여 자료체계를 구성하고, 배출원, 시간, 지역 등 필요한 범주별로 일목 요연하게 분석할 수 있어야 한다.

본 연구는 주요 배출원을 포함하여 배출모형 및 배출목록을 체계적으로 구성하고, 그 결과를 각종 대기오염관리 문제에 직접적으로 이용할 수 있도록 모형화하는 것을 주요 목적으로 하였다. 아울러 이 모형체계는 대기 오염 관리 및 관련 모형 연구에서 충분히 활용이 가능하도록, 자료의 해상도를 시간적으로는 1시간단위, 공간적으로는 기초 행정 구역 뿐만 아니라 1km×1km 격자별 산정이 가능하도록 충분히 확장하고, 오존과 같은 반응성 단기 농도를 다룰 수 있도록 오염물질의 종류도 대폭 보강할 수 있도록 구성하는 것을 목적으로 하였다.

본 연구에서는 대기오염물질 배출과 관련된 각종 정보를 정리·취합하여 자료체계를 구성하여 모형화하고, 배출원별로 배출량 산정모형을 수립·적용하여 배출목록 자료체계를 생성하며, 그 결과를 분석하는 과정을 통합하여 배출모형체계, SHEMS(Speciated, Hourly, gridded - Emission Modeling System)를 개발하였다.

## 2. 연구 범위 및 방법

SHEMS에서는 (1) 관련 기초 자료의 체계화 및 분석, (2) 배출원별 산정 모형, (3)산정결과의 취합 및 분석의 세단계로 크게 구분하고, 이들 각 단계들을 유기적으로 결합하여 하나의 모형 체계로 구성하는데 특히 중점을 두었으며, 대상지역에 대해 격자화된 형태로(grided), 매 시간별로(hourly), 규제 오염물질 및 각종 반응성 선구 물질의(speciated) 배출량을 산정하여 최종적으로 배출 목록 데이터베이스를 생성할 수 있도록 하였다.

SHEMS에서 다루는 대상물질은 규제물질인 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO와 반응성 오염물질중 특히 광화학스모그의 선구물질인 주요 휘발성 유기물질(VOC, volatile organic compounds)을 포함하였으며, 대상 배출원은 점배출원(point source), 면배출원(area source), 이동배출원(mobile source), 자연배출원(natural source) 및 기타 배출원으로 하였다. 이들 각 배출원들은 오염물질 배출을 결정하는 요인들의 특성이 매우 다르기 때문에 개별적인 모형을 구성한 다음 SHEMS에 통합하였다.

SHEMS의 유용성을 검토하기 위해 현재 대기오염 문제가 가장 심각한 수도권 지역, 서울을 중심으로 한 100km×100km의 영역에 걸쳐 적용하였다. 모형 적용 대상시기는 각종 자료 취합이 가능한 1994년

여름으로 하였으며, 오존과 같은 반응성 물질의 단기 농도 연구를 위한 관련 물질의 배출량 산정에 적용하였다.

SHEMS가 생성한 결과의 타당성을 검토하기 위해 산정된 자료 체계를 현재 반응성 대기질 모형 중 널리 쓰이고 있는 모형인 미국 EPA의 UAM-IV(Urban Airshed Model, ver. 621)의 입력자료로 하여, 주요 반응성 물질인 NO<sub>2</sub>와 O<sub>3</sub>에측에 적용하였으며, 그 결과를 검토하였다.

### 3. 모형체계의 개발 및 적용

#### 3.1 SHEMS의 구성 및 개발

SHEMS의 주요 구성 및 자료흐름은 그림 1과 같으며, 먼저 각 배출원별로 그 특성에 맞는 활동강도(activity level)와 배출계수(emission factor)를 이용하여 평균화된 배출량을 산정하고, 공간적 할당, 시간적 할당, 화학종(chemical species)의 구분을 순차적으로 처리할 수 있도록 하였다. 각종 대기오염 물질의 시간적, 공간적 배출 분포를 추정하기 위해서는 배출원별로 활동강도 자료가 체계적으로 정리되어 필요에 따라 가공될 수 있어야 한다. 이를 위해 SHEMS에서는 관련 공간정보, 통계 및 기술 정보 등을 지리정보체계(GIS, Geographical Information System)와 데이터베이스를 이용해 관리 및 분석하는 과정을 포함하였으며, 또 각 배출모형의 결과를 전체적으로 취합·분석할 수 있는 과정도 통합하였다. 특히 SHEMS는 다른 배출원이나 오염물질을 쉽게 통합할 수 있도록 유연성있게 설계하는데 중점을 두었으며, 최종 결과는 관련 모형 연구 및 정책 자료 등에 직접적으로 이용될 수 있도록 하였다.

배출량의 공간적 분포는 각종 공간정보의 분석에 기초하여 수행하였다. 점배출원은 개별적 좌표로 조사되지만, 면 및 이동배출원은 각각 관련 활동강도에 대한 공간정보를 분석하여 분포를 파악하였다. 면배출원은 토지이용형태, 인구 및 가구분포 현황을 사용하였으며, 이동배출원은 도로망의 분포 및 그에 따른 교통량 분포를 사용하였다. 자연배출원은 식생 종류 및 밀도의 분포, 휘발성 유기물질에서 중요한 유류 취급, 용제 사용 등과 같은 기타 배출원은 인구분포 같은 간접 지표를 사용하였다. SHEMS에서는 오염물질 배출 분포와 관련된 각종 공간정보를 GIS를 이용하여 구축한 다음, 다양한 공간분석을 통하여 지역 및 격자 할당과 같은 분석에 직접 이용할 수 있도록 하였다. 특히 본 연구에서는 GIS를 이용한 공간 모형화 과정을 포함하여 격자별 해상도를 자유자재로 설정할 수 있도록 하였다.

배출량의 시간적 변동 분석은 각 배출원별 활동강도의 월별, 일별, 시간별 분포자료를 체계화하여 수행하였다. 점배출원은 조업일, 조업시간과 같은 개별 시설에 따른 자료를 사용하였으며, 면배출원은 연료소비 시간의 변동, 이동배출원은 교통량의 시간별 분포 등을 지수화하여 사용하였다. SHEMS에서는 각 배출원별로 관련된 활동강도의 시간적 변동자료를 데이터베이스로 구축, 통합하여 모형내에서 이용할 수 있도록 하였다.

SHEMS가 대상으로 하는 물질 중에서 휘발성 유기물질의 배출량을 산정하기 위해서 배출원 범주별로 구분계수(speciation factor)를 작성하여 사용하였다. 지금까지 알려진 반응성 오염문제에 관여하는 선구물질은 종류만 해도 1,000여종에 달해 개별적인 배출계수 연구가 거의 불가능하기 때문이다. 최근 관련 연구에서는 물리, 화학적 특성에 따라 덩어리화(lumping)하여 취급하는 것이 일반적이므로, 본 연구에서는 23개 물질로 덩어리화하여 취급하였다. 이들 물질은 먼저 각 배출원 범주별로 총휘발성 유기물질(total VOC) 배출량을 구하고, 그 중에 포함된 세부물질들의 종류별 분율, 즉 구분계수를 구하여 적용함으로써 가능하다. 구분계수와 관련된 국내연구는 거의 없는 실정으므로, SHEMS에서는 미국 EPA자료를 이용하여 각 배출원별로 특성에 맞도록 재구성하여 적용하였다.

최종 결과는 해당 연도의 행정구역별 배출량을 요약 산출하고, 해당 일의 격자별-시간별-물질별 배출량을 데이터베이스로 산출할 수 있도록 구성하였다.

#### 3.2 SHEMS의 적용 및 검증

SHEMS는 수도권 지역에 대하여 1994년을 대상으로 오존농도 발생 기간인 6월 14일부터 16일까지 3일간 적용하였다. 표 1과 그림 2, 그림 3에 간략히 결과를 보였다.

SHEMS의 결과 검증에는 다양한 방법이 사용될 수 있으나, 본 연구에서는 SHEMS의 결과 자료를 입

력자료로 하여 수도권지역에 대해 UAM모형을 적용하여 NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>의 농도를 예측하고 실측치와 비교하는 방법을 사용하였다. 모형에 의한 검증은 배출모형, 대기유동 및 반응모형, 실측 등 각 단계마다 내재하는 불확실성의 누적으로 인해 엄밀한 검증이 불가능하지만, 전반적인 자료의 질을 유추할 수 있어 현재 간접적인 방법으로 많이 사용되고 있다. 적용 결과는 표 2와 같아서 전반적으로 상당히 유용한 결과를 보여 주고 있다.

### 참 고 문 헌

- 김동영, 장영기, GIS모형화를 통한 면오염원 배출모형의 개발, 1995년 한국대기보전학회 추계학술대회
- 김동영, 장영기, 조경두, 조규탁, GIS를 이용한 이동오염원 배출량 산정, 1997년 한국대기보전학회 춘계 학술대회
- 장영기, 김동영, 조규탁, 먼 및 이동오염원 조사방법 개발 및 지침서 작성에 관한 연구, 환경부, 1995. 12
- Dong Young Kim, Jung Wk Kim, Development of Gridded, Hourly, and Speciated Air Pollutants Emission Modeling System, Journal of Air and Waste Management Association, In Press
- ASC, EIIP, Biogenic sources preferred methods, Area Sources Committee, Emission Inventory Improvement Program, EPA, 1996. 5
- Constance M. Haga, The development and use of a integrated emission inventory database management system, in 「The emission inventory: application and improvement」, Air & Waste Management Association, 1995
- J. David Mobley, Mark Saeger, Concepts for emission inventory verification, In 「Emission Inventory Perception and Reality」, Ed. by A&WMA, et. al., 1994
- Ronald J. Dickson, James G. Wilkinson, Leonard Bruckman, Tom W. Tesche, Conceptual formulation of the emission modeling system, in 「Planing and managing regional air quality: modeling and measurement studies, a perspective through the San Joaquin valley air quality study and AUSPEX」, Ed. by Paul A. Solomon and Terry A. Silver, Lewis pub. 1994
- T. W. Tesche, Guidance for post-87 urban airshed modeling studies, In 「Tropospheric ozone and the Environment III」, Ed. by Ronald L. Berglund, et. al, A&WMA, 1991
- U. S. EPA, Compilation of air pollutants emission factors : AP-42, 5th Ed. 1995
- U. S. EPA, VOC/PM, speciation data system(SPECIATE), Radian corporation, 1993.2

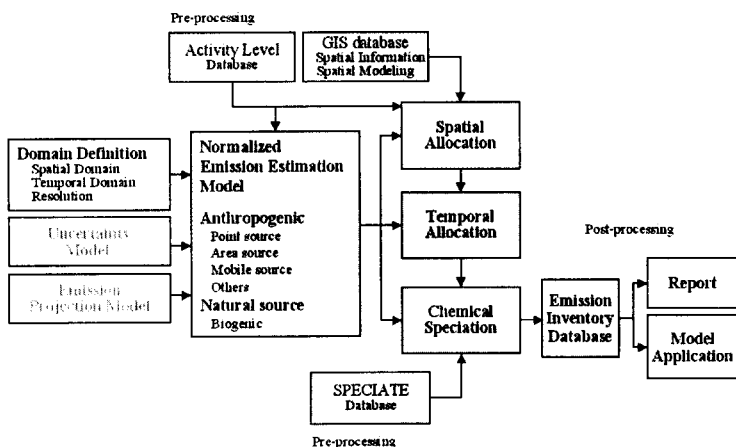


Fig. 1. The schematic diagram of SHEMS

Table 1. Emission rates of major pollutants in SMA domain

Source Type <sup>2</sup>	Pollutants(ton/3-days. %)			
	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	CO	total VOC
Point	521.5(34)	803.2(26)	357.1( 7)	428.1(16)
Area	858.9(56)	494.3(16)	459.1( 9)	152.7( 6)
Mobile	153.4(10)	1791.8(58)	4284.9(84)	1344.8(51)
Natural	-	-	-	98.7( 4)
Others				
Gas Station				230.9( 9)
Printing				120.7( 5)
Painting				50.1( 2)
Dry Cleaning				88.4( 3)
Pavement				107.5( 4)
Total	1533.7(100)	3089.3(100)	5101.1(100)	2621.8(100)

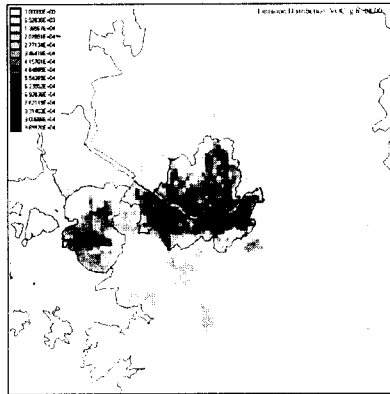


Fig. 2. Distribution of total VOC emission by anthropogenic sources in SMA, Jun.15/1994, 08:00

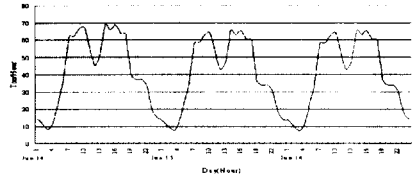


Fig. 3. Hourly variation of VOC emission in SMA domain

Table 2. Regression analysis of observed and predicted NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>.

Substance	Classification	Regression model	R <sup>2</sup>
NO <sub>2</sub>	Spatial	Y=0.45X+8.69	0.4289
	Temporal	Y=0.50X+17.1	0.4893
O <sub>3</sub>	Spatial	Y=0.43X+15.3	0.6056
	Temporal	Y=0.37X+16.0	0.7710

Y: Predicted, X=Observed