

## 대기-19 동아시아 지역의 황산화물 배출원-피해지 관계

이재범\*, 김승범, 박지영, 김수연, 이태영

연세대학교 대기과학과/대기모형연구실 · 지구환경연구소

### 1. 서론

막대한 양의 대기 오염물과 산성비 유도 물질 배출 지역인 동아시아에서는 장거리 수송되는 대기 오염물의 영향 파악이 매우 중요한 과제가 되고 있다. 특히, 배출원-피해지 관계 (source-receptor relationship)는 이를 위해 가장 필수적인 요소가 되고 있다.

현재 동아시아에서 가장 중요한 산성 유도 물질은 이산화황으로서 황산화물에 대한 배출원-피해지 관계 파악은 매우 중요한 비중을 차지한다고 할 수 있다. 다행히 모형을 이용한 황산화물의 농도 예측과 배출원-피해지 관계 도출은 다른 물질 (예, 질소산화물)에 대한 것보다 상대적으로 불확실성이 적은 편이라, 의미있는 배출원-피해지 관계가 유도 될 수 있는 것으로 판단된다.

본 연구는 1994-1996년 (3년) 기간에 대해 동아시아 지역의 대기질과 산성 침착량 그리고 배출원-피해지 관계를 도출하였다. 이를 위해 중규모 기상 모형 CSU-RAMS를 이용하여 기상장을 도출하였고, 본 연구진이 개발한 산성 침착 모형 YU-SADM (Kim and Lee, 2001)을 이용하여 황산화물의 대기중 농도, 건성 및 습성 침착량, 배출원-피해지 관계를 도출하였다.

### 2. 연구방법

#### 2.1 기상장 도출

1994-1996년 (3년) 기간에 대해 기상장을 도출하였다. 초기 조건의 불확실성 문제와 배출원-피해지 관계 조사에 있어서의 일관성과 정확성을 확보하기 위하여 기상장을 연속적분 방식으로 수행하였다. 이를 위해 맑은 날 (한반도와 그 주변이 비교적 맑은 날들)들에 대해서는 nudging 방식의 자료 동화(data assimilation)를 통해 기상장을 모사하였고, 강수 기간 중에는 자료 동화 없이 모사를 수행하였다. 사용된 기상 모형은 CSU-RAMS (The Colorado State University's Regional Atmospheric Modeling System) (Pielke et al., 1992)이며, 모사된 기상장은 1시간 간격으로 저장되었다. 본 연구에서 설정한 모형 영역은 72(동서) × 56(남북) × 29(연직) 개의 격자를 포함하며 수평 격자의 크기는 60 km 이다. 연직 격자는 최하층을 110 m, 신장율을 1.18, 최대 격자 크기가 1000 m 가 되도록 하는 연직 신장형 격자 계 (stretching grid system)를 이용하였다. 모형의 최대 고도는 18.5 km 가 되도록 설정하였고 모형 영역은 4320 km × 3360 km 의 넓이를 갖도록 설정하였다. 모형의 초기장으로 1996년 3월 이전까지는 1.875° × 1.875° , 1996년 3월 이후 부터는 1.25° × 1.25° 의 일본 기상청의 6시간 간격 전구 객관 분석 자료 (GPV)를 사용하였다.

## 2.2. 배출원-피해지 관계 도출

1994-1996년 (3년) 기간 동안의 동아시아 지역의 대기질과 산성 침착량 그리고 배출원-피해지 관계를 도출하였다. 기상장 도출 방식과 마찬가지로 YU-SADM을 연속 적분 방식으로 가동하여 이들을 모사하였다.

본 연구에서 사용한 모형은 YU-SADM (Yonsei-University's Sulfuric Acid Deposition Model)으로서 국제 모형 비교 프로젝트 (Model InterComparison Study, MICS)를 통해 그 성능이 평가된 바 있다 (Carmichael et al. 2002). 이 모형의 골격은 종합적 산성침착모형 CADM (Kim and Lee, 2001)과 같은 것으로서, 장기간의 황산화물 농도, 침착량, 배출원-피해지 관계 도출을 위해 구름 및 화학과정을 단순화하여 황산화물에 대한 것만 포함하였다. YU-SADM의 특징은 Table. 1에 제시된 바와 같다.

Table 1. Major YU-SADM features

Meteorological field	Meso-scale meteorological model (CSU-RAMS) (on-line and off-line)
Eddy diffusion	Profile type (Brost et al., 1988)
Mixed layer depth	Diagnosis of $\theta$ profile
Dry deposition	Constant with seasonal variation
Wet deposition	Constant based on precipitation
Gas-phase chemistry	Constant chemical conversion rate with daily variation
Aqueous-phase chemistry	None
Consideration of microphysics	Implicit

기상장은 1시간 간격의 모사된 기상장을 내삽하여 사용하였다. SO<sub>2</sub> 배출량 자료는 EDGAR V2.0 (Emission Database for Atmospheric Research Version 2.0) (Oliver et al., 1996)에서 얻어진 것으로 이 자료는 1° × 1° 의 지구 배출량 자료로 1990년에 대해 산정되었다. 황 배출량 산정시 95%가 SO<sub>2</sub>로, 5%가 SO<sub>4</sub>로 배출되어진다고 가정하였다.

배출원-피해지 관계를 도출하기 위하여 동아시아 지역을 12개의 배출원 지역으로 구분하였다 (Fig. 1). 지역 구분은 다음과 같다: 중국 북서부 (I), 중국 중서부 (II), 중국 남서부 (III), 중국 북동부 (IV), 중국 중동부 (V), 중국 남동부 (VI), 북한 (VII), 남한과 그 주변 해양 (VIII), 동중국해 (IX), 일본 북부 (X), 일본 중부 (XI) 그리고 일본 남부 해양 (XII).

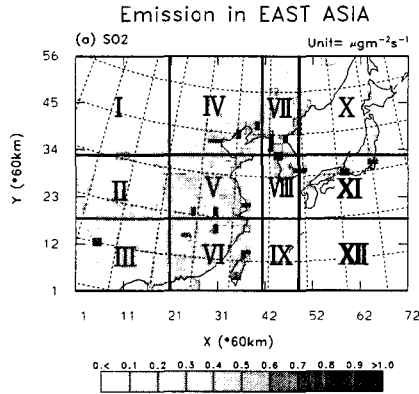


Fig. 1. Emission rates for SO<sub>2</sub> in East Asia.

임의의 피해지에 대한 각 배출원의 황 오염물의 기여도를 계산하기 위하여, 먼저 Fig. 1의 배출원 구역별로 황 배출량을 계산하였다. 이렇게 계산된 황 배출량에 그 지역의 번호를 부여한 후 식 (1)을 이용하여 배출원-피해지 관계를 도출하였다. 이 방법은 일명 "tagged species method"라 불리어지는 방법이다.

$$R_{ij} = \frac{H_{ij}}{\sum_{i=1}^n H_{ij}} \times 100 (\%) \quad (1)$$

여기서,  $R_{ij}$ 는  $i$ 번째 배출원이  $j$ 번째 피해지에 기여하는 기여율,  $H_{ij}$ 는  $i$ 번째 배출원만 고려할 경우  $j$ 번째 피해지의 오염물의 농도 또는 침착량을 나타낸다. 즉, 모든 배출원을 고려한 경우에  $j$ 번째 피해지에서의 농도 또는 침착량에 대한  $i$ 번째 배출원 지역만 고려한 경우에  $j$ 번째 피해지에서의 농도 또는 침착량으로 나타내어진다. 따라서  $i$ 번째 배출원에 의한  $j$ 번째 지역에 대한 기여도가 계산되어진다.

### 3. 침착량과 배출원-피해지 관계

3년(1994-1996년) 간의 평균 농도, 침착량, 배출원-피해지 관계가 도출되었다. 수치 모사 결과 중 SO<sub>2</sub>와 황산염의 1995년 평균 농도, 1995년 총 강수량과 습성 침착량, 건성 침착량 그리고 건성과 습성을 합친 총 침착량의 분포를 Fig. 2에 제시하였다. SO<sub>2</sub>와 황산염의 년 평균농도는 중국 동부 지역과 경인지역 부근에서 상대적으로 높은 값을 보였으며 최고 값은 SO<sub>2</sub> 농도가 약 12 ppb, 황산염이 약 3.5 ppb로 나타났다. 습성 침착량은 한반도에서 상대적으로 크게 나타났으며 최고치는 약 75 kg/ha로 나타났다. 1995년의 최고 총 침착량이 나타나는 곳은 90 kg/ha로 나타났다.

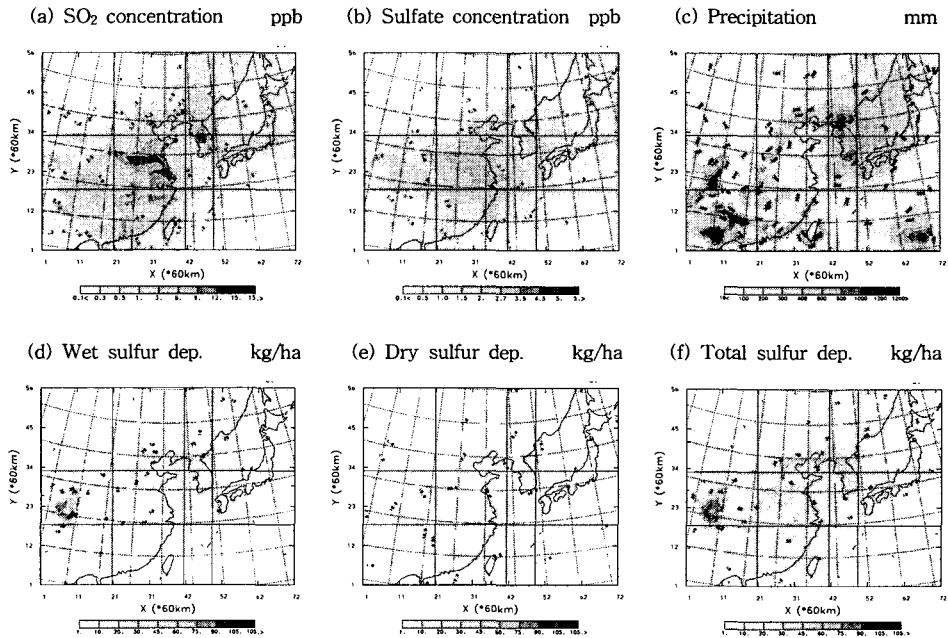


Fig. 2. Averaged concentration at  $z^* = 52\text{m}$  of (a)  $\text{SO}_2$ , (b) sulfate, (c) total precipitation (d) wet deposition of sulfur, (e) dry sulfur deposition and (f) total sulfur deposition in 1995.

도출된 배출원-피해지 관계에 따르면 건성 침착은 주로 자기 지역 배출량에 의해 그 양이 결정되는 반면, 습성 침착은 장거리 이동 오염물의 비중이 지배적인 것으로 나타났다. 한국과 일본에서의 황화물 습성 침착은 상당부분이 장거리 이동된 오염물에 의한 것으로 나타났다.

순수하게 남한에서 침착된 양에 대한 각 배출원의 기여도를 알아보았다. 남한 육지에서의 황 침착량은 1994년이 39.3 만톤, 1995년이 38.4 만톤, 그리고 1996년이 35 만톤으로 평균 년 37.6 만톤으로 나타났다. 이 침착량에 대한 자기(남한) 지역 배출의 기여율은 1994년의 경우 40 %, 1995년의 경우 38 % 그리고 1996년의 경우는 42.6 %로 나타났다. 다시 말해, 남한에 침착되는 황 침착량의 약 40 %는 한반도 자신의 배출에 기인한 것으로 나타났다. 나머지 양은 장거리 이동되어 온 것이다.

남한 육지에서의 침착량의 습성과 건성의 비중은 1.14 : 1로서 습성 침착이 전체 침착의 약 53.3 %를 차지하는 것으로 나타났다. 배출원-피해지 관계는 습성과 건성 침착이 매우 다르게 나타났다. 건성 침착은 남한 자체에서 배출된 오염물이 가장 큰 기여를 하는 반면, 습성 침착에서는 자기 지역 배출의 기여율이 작고 장거리 이동 오염물의 기여가 지배적인 것으로 나타났다. 습성 침착에서 남한에 영향을 많이 미치는 지역은 중국의 남동부, 중동부, 중서부 순으로 나타났고, 중국의 북부 지역은 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

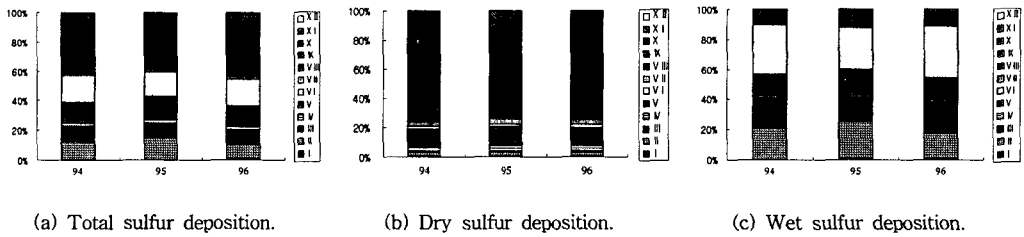


Fig. 3. Fractional contribution of each source region to the (a) total, (b) dry and (c) wet sulfur deposition in south Korea. The numbers in the right boxes represent the source region number.

#### 4. 결 론

동아시아 지역에 대해 1994-1996년의 황산화물의 농도, 침착량 그리고 배출원-피해지 관계를 도출하였다. 건성 침착은 주로 자기 지역 배출량에 의해 그 양이 결정되는 반면, 습성침착은 장거리 이동 오염물의 비중이 큰 것으로 나타났다. 습성 침착의 경우 중국의 남동부, 중동부, 중서부에서 배출된 오염물의 기여도가 비교적 큰 것으로 나타났다.

#### 참 고 문 헌

- Brost, R. A., P. L. Haagenson, and Y.-H. Kuo, 1988: The effect of diffusion on tracer puffs simulated by a regional scale Eulerian model. *J. Geophys. Res.*, **93(D3)**, 2389-2404.
- Carmichael, G. R., H. Hayami, G. Calori, I. Uno, S. Y. Cho, M. Engardt, S. B. Kim, Y. Ichikawa, Y. Ikeda, H. Ueda and M. Amann, 2001 : Model intercomparison study of long range transport and sulfur deposition in east asia (MICS-ASIA). *Water Air Soil Pollution*, **130**, 51-62.
- Kim, S-B., and T-Y. Lee, 2001 : Comprehensive acid deposition model and its application to episodic acid deposition in east asia, *Air pollution modeling and its application XIV*, 721-722.
- Kim, S.-B., and T.-Y. Lee, 2001 : A study on the sensitivity of long-term simulation of sulfur deposition and source-receptor relationship to model formation and parameters. *12th World Clean Air & Environment Congress and Exhibition*, Vol. 1, 33pp.
- Kistler, R. E., 1974 : A study of data assimilation techniques in an autobarotropic, primitive equation, channel model. M. S. thesis, Penn. State Univ., 84B.
- Oliver, J. G. J., A. F. Bouwman, C. W. W. van der Maas, J. M. Berdowski, C. Veldt, J. P. J. Bloos, A. J. H. Visschedijk, P. J. Zandveld, and J. L. Haverlag, 1996:

Descriptions of EDGAR Version 2.0 : A set of global emission inventories of greenhouse gases and ozone depleting substances for all anthropogenic and most natural sources on a per country basis and on 1° × 1° grid. National Institute of Public Health and the Environment (RIVM) report no. 77 1060 002/TNO-MEP report no. R96/119.

Pielke, R. A., W. R. Cotton, R. L. Walko, C. J. Trembeck, M. E. Nicholls, M. D. Moran, D. A. Wesley, T. J. Lee, and J. H. Copeland, 1992 : A comprehensive meteorological modeling system - RAMS. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 49, 69-91.