

동북아 지역에서의 SO₂ 건성 침적에 관한 정량분석

A Study on the Quantitative Analysis of SO₂ Dry Deposition in the Northeastern Asia

홍민선 · 김순태 · 이등섭
아주대학교 환경공학과
(1997년 1월 27일 접수, 1997년 6월 20일 채택)

Min-Sun Hong, Soon-Tae Kim, Dong-Sub Lee
Department of Environmental Engineering, Ajou University
(Received 27 January 1997; accepted 20 June 1997)

Abstract

A tracer model was applied in the Far East Asia to investigate the dry deposition rates of air pollutants on Korean Peninsula originated from different countries including China and Japan. Wind direction was chosen to predict the maximum deposition rates and SO₂ was chosen as a tracer to estimate the source strength. Model simulation shows that inflow, deposition and airborne ratios of China-originated SO₂ were 50%, 8% and 30%, respectively, at most. Also it was found that deposition, outbounded and airborne ratios of Korea-originated SO₂ were 15~77%, 8~75%, and 3~30%, respectively. Model simulation also shows that inflow, deposition and airborne ratios of Kyushu-originated SO₂ were, 30~45%, 8~14% and 20~25%, respectively.

This study shows that tracer model can be applied on the estimation of air pollutants partitioning in regional scale and that more sophisticated modules and schemes can be developed and applied to better predict the transboundary amounts of air pollutants in this region.

Key words : tracer model, SO₂, inflow, deposition rate, airborne ratios

1. 서론

대기오염물질의 장거리 이동 및 침적현상은 한반도를 포함한 동북아 지역에서 오래 전부터 황사현상으로 확인되고 있었으나, 중국의 산업발전과 함께 다량 배출되어지고 있는 SO_x, NO_x, O₃ 등의 대기오염물질들은 최근 들어 국가간 대기오염물질 장거리 이동의 대상물질로 대두되고 있다. 인위적으로 배출된 이 오염물질들은 오염원으로부터 수백~수천

km에 이르기까지 이동, 침적될 수 있으며 (Schwartz *et al.*, 1989), NAPAP(1991) 연구에서 알 수 있듯이 이들 오염물질들은 실질적으로 산성우 등 산성강하물의 많은 부분을 차지하고 있다.

SO₂ 등 인위 발생적인 산성 오염물질들은 인체에 피해를 주며 토양 및 호수의 산성화, 시정장해를 유발하는 등 양적인 면에서 이들 대기오염물질의 인위적 배출량은 자연 발생적인 양보다 훨씬 많으며 자연 생태계에 커다란 악영향을 미치는 것으로 간주되고 있다 (Gorham *et al.*, 1989). 그러나 이들 오염

물질의 배출량 및 이동량, 그리고 침적량에 대한 조사나 연구 없이는 이들의 영향을 파악하기 어려우며, 이를 위해 북미나 유럽에서는 많은 연구와 투자를 하고 있다(McDonald *et al.*, 1996).

1987년 현재 아시아 지역의 1인당 에너지 소비량은 전세계 평균의 1/3 정도이나, 경제발전과 더불어 앞으로 많은 에너지 소비가 예상되고 있다. 국내와 이웃한 중국의 경우, 개방화 정책이후 에너지 소비 증가율은 연평균 5%로 전체 아시아 에너지 소비량의 40%를 차지하고 있으며, 일본의 경우도 에너지 소비량이 매년 1% 정도 증가하고 있으며 아시아 전체 에너지 소비량 중 23%를 차지하고 있다. 이는 남한이 전체 아시아 에너지 소비량의 4.1%를, 북한이 2.6%를 차지하는 비율로 볼 때 상대적으로 많은 양이다(Kato *et al.*, 1996). 더욱이 이들 지역의 석탄사용량은 전세계 이용량의 32%를 차지하고 있으며 유류 사용량보다도 많은 것으로 나타났다. 이로 미루어 볼 때 주변국가로부터 국내 대기질에 미치는 영향은 지대할 것으로 사료되며 1989년을 기준으로 할 때 중국의 황산화물 배출량은 약 1,500만 톤으로 국내의 약 15배에 해당하며 총부유분진(TSP)은 국내의 약 50배에 이르고(OECD, 1991), 앞으로도 대기오염물질의 배출량은 계속 증가할 전망이다(Kato *et al.*, 1996).

주변 생태계에 영향을 주는 대기오염물질의 분포를 조사하기 위해서는 인위적으로 발생된 대기오염물질의 배출 및 이동, 유입에 관한 자료가 중요하며(Charlson *et al.*, 1992), 국내의 생태계 피해를 알아보기 위해서는 국가간 이동량의 정량적 해석을 통한 기여도 산출 연구 등 이에 대한 보다 많은 연구나 대응노력이 요구되고 있다.

본 연구에서는 전성침적을 고려하여 주변국가 및 한반도 내에서 배출되어진 오염물질들이 이동, 제거되어지는 동안 국내에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 오염물질로는 대기 중에서 비교적 안정적인 SO₂ 배출량 자료를 이용하였으며, 오염원은 중국 동해안의 5개 지방과 한반도 내 5곳, 그리고 일본에 1곳을 두었다. 모사기간은 1995년~1996년 사이의 기간중 북서, 남서, 그리고 남동풍이 지배적인 기간을 표본으로 실제 기상자료를 분석하여 3일간 모사를 수행하였고 모사기간중 강우는 없었다.

2. 모델개요

2.1 모사 지역 및 기상 자료

모사 지역은 그림 1에서 볼 수 있듯이 동경 115~135도, 북위 30~40도로 1,649 km × 1,125 km의 크기이며 중국의 동부와 일본의 Kyushu를 포함하고 있으며 모사 지역의 격자는 동서로 21개, 남북으로 11개, 그리고 상층으로는 높이 3km까지 20개의 격자로 구성되어 있다. 각기 오염원에서 배출되어지는 오염물질들은 전체 모사 지역중 비교적 적은 부분에서 발견되어지므로 본 모델에서는 plume의 궤적을 따라 이동영역(moving domain)을 설정하였다.

이동영역은 주모사 영역(main domain)과 마찬가지로 21 × 11 × 20 (78.5 km × 102.3 km × 150 m)의 격자로 구성되어졌으며, 그 안에서 입자의 이동과 확산이 이루어진다. 이동영역에서의 격자 크기와 시간 간격(time step)은 계산상 안정성을 추구하기 위하여 plume의 크기에 의해 결정되어진다. 이 때, 계산상 최소 시간 간격은 0.1초로 가정하였다.

모사 영역에는 한국의 오산, 포항, 광주, 중국의 Beijing, Yancheng, Nanjing, Luda, Qingdao, Hangzhou, 그리고 일본의 Kumamoto 등 총 10개소의 기상측정소가 있으며 12시간마다 고층의 기상을 기압면별로 측정하고 있다(그림 1).

바람장은 위의 기상측정소로부터 측정된 자료를 매 12시간마다의 시간과 공간에 따라 내삽하여 u와 v성분을 계산했으며 아래 식 (1)과 같이 이차 내삽

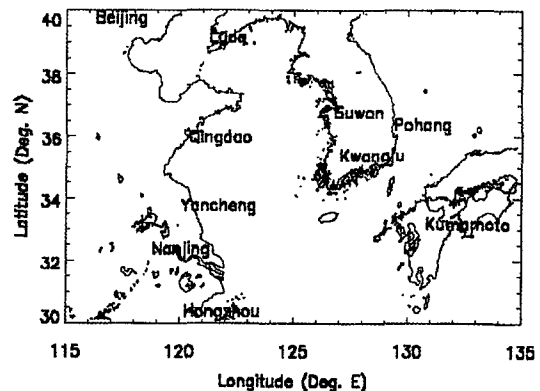


Fig. 1. Air sounding stations in model domain.

(quadratic interpolation)하여 구하였다. 모사시 각 격자의 시간과 고도에 따른 풍향 및 풍속의 계산은 식 (1)의 결과 값을 매 시간 간격마다 선형 내삽(linear interpolation)하여 모델 입력자료로 이용하였다(Lee, 1987).

$$u_{ij} = \bar{u} + c_1x_i + c_2y_j + c_3x_i^2 + c_4y_j^2 + c_5x_iy_j + c_6 \quad (1)$$

여기서 x_i, y_j 는 전체 기상관측소의 거리 평균 비교값을 나타내며, 상수 $c_1 \sim c_6$ 은 최소 자승법에 의해 구해진다(Clark *et al.*, 1971). 배출되어진 입자의 위치좌각 및 풍속 계산시 이용되는 지형 고도값은 각 격자의 값을 가지고 선형 내삽하여 이용하였다.

2.2 대기오염물질의 배출량 산정

모델 모사시 가정된 입자의 방출량은 시간 간격당 50개이고 시간 간격은 900초로서 3일 모사시 총 14,400개가 배출되며, 배출되는 입자들은 지름 50 km내의 원형 오염원내에 위치하게 되고 배출과 동시에 그 오염원 영역 안에서 완전 혼합됨을 가정하였다. 또한 입자는 화학적으로 안정하며 입자간 충돌에 의한 농도변화는 없다고 가정하였다.

표 1에 나타난 바와 같이 오염원은 중국 동해안에는 Tianjin, Hebei, Shandong, Jiangsu, Shanghai 등 5개 지방에 두었고, 한반도 내에는 비교적 SO₂의 배출량이 적은 강원도를 제외한 5개 지방에서 오염물질을 배출시켰으며, 일본에는 Kyushu 북부 후쿠오카 지방에 1개의 오염원을 두어 총 11개의 오염원으로부터 한반도에 미치는 영향을 모사하고자 하였

다. 배출량의 산정은 중국의 경우 1989년 SO₂배출량인 1,630만톤을 기준으로 하였으며 3일 동안 13만 4천톤이 배출된다(OECD, 1991). 한반도에서 배출되는 양은 환경통계연감(환경부, 1995)의 자료를 이용하였으며 일본의 SO₂ 배출량은 Akimoto *et al.* (1994)의 자료를 이용하였다.

표 1에서 볼 수 있듯이 중국 동해안의 Tianjin, Hebei, Shandong, Jiangsu, Shanghai 등 5개 지방은 앞으로 중국의 경제발전을 주도할 지역으로 국내로선 관심의 대상이 되고 있으며, 면적으로 볼 때 전체 중국의 5% 정도를 차지하나 황산화물 배출량은 89년 현재 연간 450만톤 정도로서 중국 전체의 대략 25%를 차지하고 있다.

2.3 오염물질의 이동

Particle-in-cell model은 난류확산을 해결하기 위한 한 방법(Warren *et al.*, 1976)으로서 전체 오염물질은 개개의 단위입자로 나누어지고 분리된 입자들을 중심으로 추적되어지며 governing equation은 다음 식 (2)와 같다.

$$\frac{\partial n}{\partial t} + U\frac{\partial n}{\partial x} + V\frac{\partial n}{\partial y} + W\frac{\partial n}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D_x\frac{\partial n}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D_y\frac{\partial n}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(D_z\frac{\partial n}{\partial z}\right) + S \quad (2)$$

여기서, n은 입자농도, U, V, W와 D_x, D_y, D_z는 x, y, z

Table 1. Sulfur dioxide emission rates in model domain.

Source	Location (Lon, Lat)	Region	Province or Major City	Provincial Area (km ²)	Sulfur Dioxide Emissions (ton/yr)
1	117,39	China	Tianjin	11,300	240,012
2	117,38		Hebei	188,000	900,520
3	121,37		Shandong	153,100	1,889,254
4	120,34		Jiangsu	102,600	1,019,844
5	121,32		Shanghai	6,200	389,980
6	127,37	Korea	Seoul	11,718	269,992
7	127,36		Teajon	16,296	209,774
8	127,35		Kwangju	20,366	327,721
9	128,35		Pusan	12,306	471,182
10	129,36		Teagu	19,904	211,619
11	130,33	Japan	Kyushu	42,136	108,200

방향으로의 이동속도와 난류확산계수를 나타내며 S는 입자의 배출량을 나타낸다.

위 식에서 이류항(advection term)과 확산항(diffusion term)은 x, y, z방향으로 식 (3)~(5)에서처럼 확산 속도(diffusion velocity)로 함께 정의되며,

$$u_d = -D_x \frac{\partial n / \partial x}{n} \quad (3)$$

$$v_d = -D_y \frac{\partial n / \partial y}{n} \quad (4)$$

$$w_d = -D_z \frac{\partial n / \partial z}{n} \quad (5)$$

여기서, 수평 난류확산 계수는 경험적으로 다음 식 (6)에서 계산되어 진다(Sheih *et al.*, 1983).

$$D_x = \exp[A \log \Delta x - B] \quad (6)$$

여기서, Δx 는 격자의 크기(m)를, 상수 A는 1.2857, B는 2.04433을 나타낸다.

이러한 값들은 경험적인 값(Gifford *et al.*, 1982)과 유사하며 수직 난류확산 계수는 다음 식(7)과 같이 Shir와 Sheih(1974)에 의해 제안된 계산에 의해 얻어진다.

$$D_z = k^2 \bar{u}_z [\ln(z/z_0) \exp(4z/H)]^{-1} \quad (7)$$

여기서, k는 Von Karman 상수(0.4), \bar{u}_z 는 고도 z에서의 수평바람 속도, H는 혼합층 고도를 나타내며 sine function을 이용하였다. z_0 는 지표면 거칠기 높이로 Sheih *et al.* (1979)의 값을 이용하였다.

위 식(3)~(5)는 난류 확산의 유효속도(effective velocity)로서 이동되는 오염물질의 총유효속도(total effective velocity)는 다음과 같다.

$$U = u + u_d \quad (8)$$

$$V = v + v_d \quad (9)$$

$$W = w + w_d \quad (10)$$

식 (8), (9), (10)에서 u, v, w와 u_d, v_d, w_d 는 deterministic과 stochastic component를 나타낸다. 또, 식 (2)는 다음과 같이 정의되며 개개의 입자들은 식 (11)에 의해 이동된다.

$$\frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Un) + \frac{\partial}{\partial y}(Vn) + \frac{\partial}{\partial z}(Wn) = S \quad (11)$$

이러한 tracer 모델은 반응성이 없거나 비교적 작은 입자상, 가스상 대기오염물질에 적용 가능하다.

2.4 오염물질의 침적

대기중의 오염물질은 주로 이 침적현상에 의해 대기중으로부터 분리되어지며 그 과정은 크게 습성 침적과 건성침적으로 나누어진다. 이러한 침적현상은 대기오염물질의 장거리 이동현상을 이해하는데 많은 도움이 되는 것으로 알려져 있으며 이동되는 거리가 증가할 수록 그 중요성도 비례적으로 커지는 것으로 알려져 있다(Zannetti, 1990).

가스상 오염물질의 경우, 건성 침적량은 기상조건과 지표면 및 오염물질의 물리적, 화학적 특성에 따라 영향을 받으며 모사영역의 가장 낮은 지표면 근처에서 이루어진다.

Chamberlain과 Chadwick(1953)는 다음과 같이 침적속도(deposition velocity)를 침적 flux와 오염물질의 대기중 농도를 이용하여 정의하였다.

$$V_d = F/c \quad (12)$$

여기서, F는 침적되는 오염물질의 flux(g/m²s)를 나타내며, c는 오염물질의 농도(g/m³)를 나타낸다. 배출된 오염물질 농도 c의 profile은 장우나 건성 침적에 의해 변화되며 인위 발생적인 대기오염물질은 습성 침적보다는 건성 침적에 의해 더욱 많이 제거되는 것으로 알려져 있다(Mareco *et al.*, 1976).

가스상 대기오염물질중 요오드와 SO₂의 침적속도에 대한 연구가 가장 많이 수행되었으며 요오드와 SO₂의 침적속도는 기상현상 및 표면 거칠기에 따라 각각 0.03~26 cm/sec와 0.04~7.5 cm/sec 사이 값에서 보고되고 있다(Sehmel, 1984). SO₂의 침적속도는 실험에 의해 얻어진 값들로서 여러 제한요소와 불확실성에 의해 값들이 다양한 범위에서 조사

Table 2. Dry deposition velocities at different land surface.

Area	Land	Water	Snow
Deposition Velocity (cm/s)	0.6	0.8	0.1

되고 있으나 국내의 경우 아직 건성침적에 관한 연구가 활발치 못해 한반도 및 주변지역의 지표면에 따른 침적속도 자료가 미흡하다. 또 풍속 등 기상자료에 따른 침적속도가 다르나 본 연구는 regional scale에서 장거리 이동된 오염물질이 지표근처에 대류(convection)와 난류 확산(turbulent diffusion)에 의해 도달하는 flux 계산에 주력한 바 표 2에서 처럼 지표면 상태를 크게 셋으로 나누어 대표값을 이용하고 완전 혼합(well-mixed)을 가정하여 모델 모사를 수행하였다(Langer et al., 1991). 모델 모사시 건성침적이 일어나는 높이는 모사영역 최하단층의 지표면에서부터 30 m까지로 가정하였으며, Feichter et al.(1996)는 본문의 건성 침적속도와 높이를 가정하여 연구를 수행한 바 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 바람장 해석

본 연구는 중국 동해안 및 한반도, 그리고 일본에서 배출된 대기오염물질이 한반도에 미치는 영향을 조사하기 위한 것으로 국내로의 유입량 및 침적량을 파악하기 위한 것으로 모사기간중 풍향 및 풍속의 영향이 지배적이다.

모사는 3개의 모사기간으로 나누어 실행하였고 풍향에 따른 영향을 알아보기 위하여 북서, 남서, 남동풍이 각각 3일 동안 지속된 기간을 선택하였으며 그 기간을 표 3에 나타내었다.

모사 영역내 10개소의 고층기상측정소에서 매 12

시간마다 고층기상을 기압면별로 측정된 자료를 이용하여 바람성분을 구하고 이를 다시 이차 내삽(quadratic interpolation)하여 구한 모사영역의 바람장을 그림 2에 나타내었다. 모사연구중 Case 1은 1995년 3월 4일~6일까지 3일 동안으로 그림 2에서 알 수 있듯이 북서풍계열의 바람이 지배적이었으며, 평균 풍속은 지표면 부근에서 3 m/sec 정도였다.

그림 2는 모사개시 첫날인 1995년 3월 4일 OUTC에 고도 1,000 m 부근에서의 바람장으로 오염물질이 배출되는 중국 동해안에서는 북풍이 불고 있으며 동쪽으로 이동함에 따라 점점 풍속이 약해지다가 한반도를 지나면서 일본 혼슈 이북지방에서는 동풍계열의 바람이, Kyushu 이남지방에서는 서풍계열의 바람이 불고 있음을 볼 수 있다. 이와 같이 동일 시간, 동일 고도에서의 풍향과 풍속은 위도와 경도에 따라 크게 차이가 있음을 알 수 있으며, 이로 미루어 볼 때 오염물질이 배출되어 지는 시간과 위치에 따라 한반도에 미치는 영향이 크게 변화함을 예상할 수 있다.

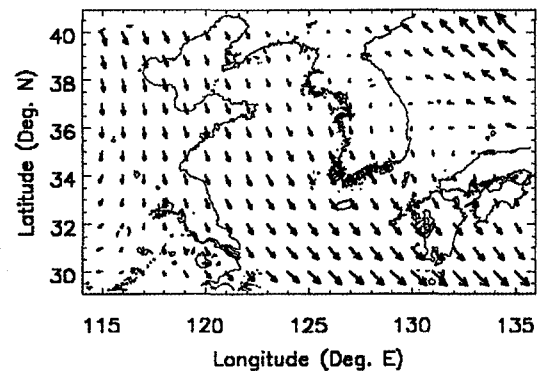


Fig. 2. Wind fields at 1,000 m on March 4th, 1995.

Table 3. Wind directions and model simulation periods.

Case	Wind Direction	Period	Wind Velocity	Source Area
1	Northwesterly	1995. 3. 4~3. 6	3 m/sec	Korean Peninsula, Northeastern China
2	Southwesterly	1996. 7. 19~7. 21	3 m/sec	Korean Peninsula, Southeastern China
3	Southeasterly	1996. 8. 10~8. 12	2 m/sec	Korean Peninsula, Japan

Case 2와 Case 3의 대표적인 풍향은 각각 남서풍과 남동풍으로 Case 2의 경우는 중국 남부지방으로부터, Case 3의 경우는 일본으로부터 대부분의 대기 오염물질이 유입될 것으로 예상할 수 있으며, 평균 풍속은 Case 2의 경우 3m/sec였고, Case 3의 경우는 2m/sec였다.

3.2 풍향별 영향분석

오염물질의 배출원을 중국에는 동해안의 Tianjin, Hebei, Shandong, Jiangsu, Shanghai 등 5개 지방에 오염원을 분포시켰으며, 한반도에는 서울, 인천지방을 중심으로한 경인지방과 대전을 포함한 충청지방, 광주와 호남지방, 부산과 경남지방, 대구와 경북지방 등 5개 지방에 오염원을 분포시켰고, 일본에는 Kyushu 북부의 후쿠오카에 1개의 오염원을 두어 총 11개의 오염원으로부터 한반도에 미치는 영향을 모사하였다.

위의 중국 동해안의 5개 지방중 오염물질의 배출농도($\text{ton}/\text{km}^2/\text{yr}$)를 기준으로 볼 때, Shanghai가 62.90으로 가장 높은 농도를 나타냈으며, 그 다음은 Tianjin, Shandong지방으로 각각 21.24와 12.34이었다. 또, 연간 배출량(ton/yr)을 기준으로 보면 Shandong 지방이 1,900천톤으로 가장 많았으며, Jiangsu 지방이 1,020천톤, Hebei 지방이 900천톤으로 그 다음순이었다.

한반도에서 연간 배출되는 오염물질의 양(ton/yr)은 부산을 포함한 경남지방과 광주를 포함한 호남지방에서 각각 471천톤, 328천톤이었으며, 그 다음이 서울, 인천을 포함한 경인지방으로 270천톤의 오염물질을 배출하였다.

3.2.1 북서풍에 의한 영향

그림 3은 Case 1 기간동안 모사된 결과로서 모사 개시 3일후의 모습을 나타낸다. Shandong지방에서 배출된 오염물질이 서해를 거쳐 한반도로 유입된 후 다시 동해를 거쳐 일본의 혼슈지방에까지 이동된 모습을 보이고 있다. 모사 시작과 동시에 배출된 오염물질들은 초기 풍향인 북서풍을 따라 일본의 Kyushu지방 너머에 까지 이동되었으며, 그 이후에 배출된 오염물질들은 풍향이 서풍으로 바뀔 때 따라 일본의 북쪽지방으로 이동되고 있음을 알 수 있다. 풍향이 바뀐 이후에도 초기에 발생된 오염물질들이

일본 남부지방에 많이 존재하는 이유는 이미 침적되어 더 이상 이동하지 못하거나, 비교적 풍속이 작은 지표면 가까이에 위치하기 때문이다.

그림 4는 Shandong반도에서 배출되어진 오염물질이 풍향을 따라 한반도로 이동되는 모습을 수직 단면으로 본 것으로 경도 122도 부근에서 배출된 오염물질들이 경도 123도 부근을 지나면서부터 지표면에 침적되기 시작하는 모습을 보여주고 있으며, 상층부로 이동되는 오염물질들은 모사영역 끝인 경도 135도에 다다르면서 모사 최고 높이인 3km에 까지 확산된 모습을 보여주고 있다. 또, 상층부에서 이동되는 오염물질이 지표면 부근에서 이동되는 오염물질보다 확연히 빨리 이동되는 것을 알 수 있으며, 같은 시각에 배출된 오염물질을 기준으로 볼 때, 상층부에서는 경도 133도 근처에까지 이동되어 있으며 지표면 부근에서는 경도 125도를 조금 지난 위치까지 이동된 모습을 볼 수 있다.

그림 5는 한반도내의 전라남도에서 오염물질이 배출되어 이동되는 모습을 보이고 것으로 초기 배출되어진 오염물질들은 그림 3에서와 마찬가지로 초기 주풍인 북서풍을 따라 일본의 Kyushu지방으로 이동된 모습을 볼 수 있으며, 점차 풍향이 서풍으로 변함에 따라 일본 혼슈지방으로 이동되는 모습을 볼 수 있다.

그림 6은 Hebei 지방에서 배출된 오염물질들이 이동 과정중 침적된 양을 나타낸 것으로서 배출원 부근에서 가장 높은 침적량을 보이고 있다. 배출원에서 동쪽으로 이동하면서 점점 침적량이 감소하다가 한반도에 이르러 지형고도값에 의한 영향으로 다시 침적량이 증가하는 것을 보여주고 있으며 동해로 빠져나가면서 감소하다가 일본열도에 이르러 다시 증가한다.

표 4는 각 오염원에서 배출되어진 오염물질이 한반도에 미치는 영향을 나타낸 것으로 중국으로부터 발생된 오염물질의 한반도 유입비를 살펴보면 Tianjin이 28.5%, Hebei가 21.2%, Shandong이 43.1%로 북쪽 지방으로부터의 유입되는 비율이 높았는데, 이는 모사 기간중 주풍향이 북서풍 내지는 서풍으로 이들 북쪽지방이 풍상에 위치했었기 때문으로 사료된다.

특히, Shandong지방으로부터의 유입량은 3일 모사기간동안 6,693톤으로 가장 많았는데 이는 Shan-

dong반도가 지리적으로 한반도와 가장 가까운 거리에 위치하고, 풍향을 따라 서해를 통한 대기오염물질의 직접적인 유입이 이루어졌기 때문에 사료된다.

Jiangsu와 Shanghai로 부터의 유입량이 적은 이유는 주로 이들 지방에서 배출된 오염물질들도 북서풍을 따라 제주도 이남의 남해나 저위도 지방으로 이동되었기 때문인 것으로 사료된다.

침적량 역시 표 4에서 볼 수 있는 바와 같이 북쪽지방으로부터 유입시 많은 침적이 일어나는 것으로 나타났으며 중국동부에서 오염물질이 배출되는 경우 배출량중 1.1%~4.2%가 침적되는 것으로 조사되었다. 유입량과 마찬가지로 Shandong반도로부터 오염물질이 유입될 시 침적율이 가장 높았는데, 이는 근거리에 위치한 지리적 여건과 서해를 거쳐 한반도로 유입된 양이 많기 때문인 것으로 사료된다.

한반도에서 오염물질이 배출된 경우 전체 배출량중 15~69%가 침적되는 것으로 나타났고 이 조사기간중 바람이 북서풍인 관계로 서울, 경기지방과 대전, 충청지방에서 배출된 오염물질이 높은 침적비를 보였으며 침적량도 서울, 경기지방에서 배출되는 경우 1,529톤이 3일 동안 침적되어 가장 많은 양을 보였다.

이 기간중 중국 동해안의 다섯 지방으로부터 한반도 내에 침적되는 SO₂의 전체량이 1,222톤이고 한반도 내에서 배출되어 침적되는 SO₂량이 4,420톤으로 한반도 침적량중 22%가 중국의 다섯 지방으

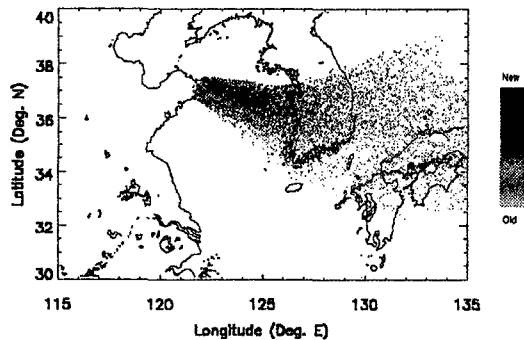


Fig. 3. SO₂ transport for 3 days from Shandong for Case 1.

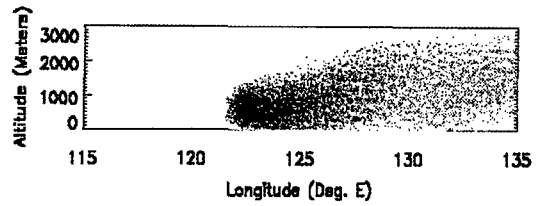


Fig. 4. Vertical profile of SO₂ transported from Shandong.

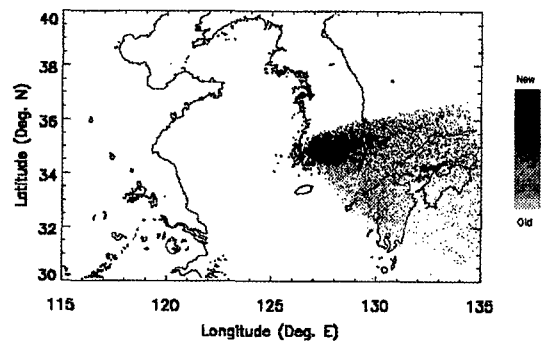


Fig. 5. SO₂ transport for 3 days from Chunnam for Case 1.

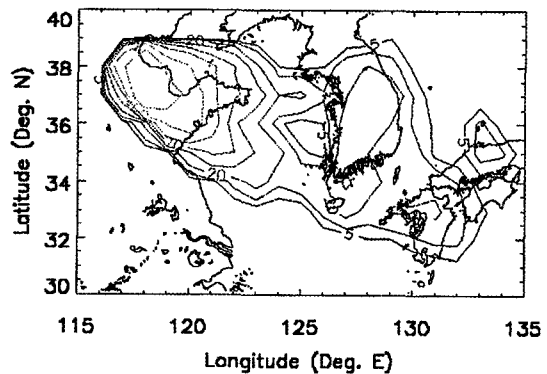


Fig. 6. Deposition contours from Hebei for Case 1.

로부터 영향을 받는 것으로 사료된다.

풍향이 북서풍인 관계로 일본으로부터의 영향은 없었으며 풍상방향에 위치하는 북부지방으로부터의 영향이 지배적임을 알 수 있었다.

Table 4. SO₂ influx variation for different sources with prevailing winds from N.W.

Source	Region	Province or Major City	Total Emission (ton/3days)	Inflow		Deposition		Air-Borne		Outflow	
				%	ton	%	ton	%	ton	%	ton
1	China	Tianjin	1,973	28.5	562	3.2	63	6.3	124	18.9	373
2		Hebei	7,402	21.2	1,569	1.4	104	8.2	607	11.6	859
3		Shandong	15,528	43.1	6,693	4.2	932	10.0	1,553	27.0	4,193
4		Jiangsu	8,382	16.2	1,358	1.1	117	1.9	159	12.8	1,073
5		Shanghai	3,205	2.0	64	0.2	6	0.4	13	1.4	45
6	Korea	Seoul	2,219	100	2,219	68.9	1,529	10.5	233	20.7	459
7		Teajon	1,724	100	1,724	60.3	1,040	11.0	190	28.7	495
8		Kwangju	2,694	100	2,694	18.8	506	20.1	541	62.5	1,684
9		Pusan	3,873	100	3,873	27.9	1,091	14.2	550	58.4	2,262
10		Teagu	1,739	100	1,739	15.2	264	5.1	89	75.3	1,309
11	Japan	Kyushu	889	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0

Table 5. SO₂ influx variation for different sources with prevailing winds from S.W.

Source	Region	Province or Major City	Total Emission (ton/3days)	Inflow		Deposition		Air-Borne		Outflow	
				%	ton	%	ton	%	ton	%	ton
1	China	Tianjin	1,973	0.7	14	0.0	0	0.7	14	0.0	0
2		Hebei	7,402	4.2	333	0.0	0	4.4	326	0.0	0
3		Shandong	15,528	49.7	7,717	7.8	1,211	28.7	4,457	26.4	4,099
4		Jiangsu	8,382	37.9	3,177	5.1	427	12.2	1,023	20.6	1,727
5		Shanghai	3,205	35.2	1,128	3.4	109	4.9	157	26.9	862
6	Korea	Seoul	2,219	100	2,219	76.8	1,704	8.2	182	15.0	333
7		Teajon	1,724	100	1,724	74.5	1,284	7.8	134	17.7	305
8		Kwangju	2,694	100	2,694	38.9	1,048	11.8	318	49.7	1,339
9		Pusan	3,873	100	3,873	46.4	1,797	7.1	275	46.8	1,813
10		Teagu	1,739	100	1,739	20.4	355	2.4	42	72.9	1,268
11	Japan	Kyushu	889	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0

3. 2. 2 남서풍에 의한 영향

Case 2 기간동안은 남서풍이 주풍향이였으며, 표 5는 각 오염원에서 배출되어진 오염물질이 한반도에 미치는 영향을 나타낸 것으로 중국으로부터 발생된 오염물질의 한반도 유입비를 살펴보면 Shandong이 49.75%, Jiangsu 37.9%, Shanghai 35.2%로 주로 남쪽지방으로부터 유입되는 비율이 높았으며, 3일 모사기간동안 SO₂ 유입량도 Shandong 7,717톤, Jiangsu 3,177톤, Shanghai 1,128톤으로 Shandong지방으로부터의 유입비 및 유입량이 가장 많았다. 이는 풍향이 북서풍일 때와 마찬가지로 Shandong반도가 지리적으로 한반도와 가장 가깝기 때문에 사료되며, Case 2 기간동안 Tianjin과 Hebei 지방으로부터 배출된 오염물질들은 두만강 이북으로 이동되어 한

반도에는 별 영향을 주지 못한 것으로 나타났다.

침적량도 Case 1과 마찬가지로 Shandong반도로부터 오염물질이 유입된 경우 전체 배출량중 7.8%가 한반도에 침적되어 가장 높은 침적비를 보였으며, Jiangsu 5.1%, Shanghai 3.4%순으로 Case 1과 비슷한 값을 보였다. 한반도에서 오염물질이 배출된 경우 전체 배출량중 20~77%가 침적되는 것으로 나타났으며 Case 1과 비교할 때 약간 높은 것으로 나타났다.

Case 2 기간중 중국 동해안의 다섯 지방으로부터 한반도에 침적되는 SO₂량은 1,747톤이었고, 한반도 내에서 배출되어 침적되는 SO₂량은 6,188톤으로 한반도의 SO₂ 침적량중 22%가 중국의 다섯 지방으로부터 이동되어 침적되는 것으로 나타났으며, Case 1

과 비슷한 정도였다. 역시 풍향이 남서풍인 관계로 일본으로부터의 영향은 없었으며 주로 중국 남부지방으로 부터의 영향이 컸다.

3. 2. 3 남동풍에 의한 영향

Case 3 기간동안 일본의 Kyushu 지방으로부터 배출된 오염물질이 3일 모사후 이동된 결과를 그림 7에 나타내었으며 주풍향은 남동풍으로 한반도로 이동된 오염물질들이 남한 전지역을 뒤덮고 있는 모습을 볼 수 있다. Case 3의 경우 모사 기간동안 평균풍속은 2m/sec 이하로 Case 1과 2에 비해 풍속이 낮아 그림 7에서 보는 바와 같이 이동된 거리도 짧았다.

표 6을 보면 Case 3의 경우 풍향이 동풍계열로 한반도의 동쪽에 위치한 중국으로부터는 전혀 한반도에 미치는 영향이 없음을 알 수 있으며 Case 1과

2와는 달리 침적비가 부산을 포함한 경남지방에서 오염물질이 배출되는 경우 60.4%, 대구, 경북지방에서 오염물질이 배출되는 경우가 63.0%로 다른 지방에서 오염물질이 배출되는 경우보다 침적비가 다소 높음을 알 수 있다. 이 경우 일본의 규슈지방으로부터의 유입비도 43.7%로 비교적 많은 SO₂가 유입되는 것으로 나타났는데, 그 이유는 이 지방이 Shandong반도와 마찬가지로 한반도와 거리적으로 가까운 곳에 위치하기 때문으로 사료되며 침적비도 14.1%로 중국에 비해 다소 높은 값을 나타내었다.

4. 결론 및 제언

본 연구에서는 주변국가들로부터 배출되어 한반도로 이동, 침적되는 대기오염물질의 양을 풍향변화에 따라 정량분석하기 위하여 3일간 모델 모사를 수행하였으며 그 결론은 다음과 같다.

모사결과 이들 풍향변화에 의한 영향이 지배적이었으며, 중국동해안 지방으로부터의 유입량은 배출량을 기준으로 할 때 ~50%의 범위에서, 침적량은 ~8%의 범위인 것으로 나타났다. 대기 중에는 배출된 오염물질의 ~30%가 존재하였으며, ~27% 정도가 한반도를 통해 동해나 일본, 그리고 남해 등으로 유출되는 것으로 나타났다. 특히, Shandong반도로부터의 유입이 가장 많았는데 이는 이 지역의 지리적 여건 때문인 것으로 사료된다.

Case 1, 2의 경우 한반도내 SO₂ 침적량중 20% 정도가 중국 동해안으로부터 유입된 것으로 나타났

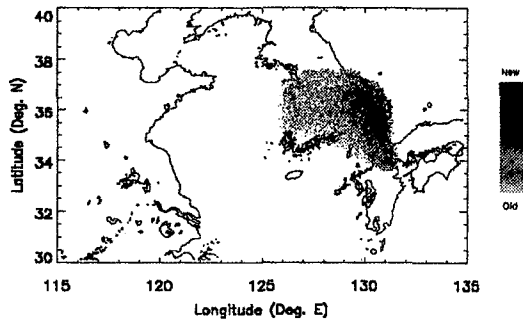


Fig. 7. SO₂ transport for 3 days from Kyushu for Case 3.

Table 6. SO₂ influx variation for different sources with prevailing winds from S.E.

Source	Region	Province or Major City	Total Emission (ton/3days)	Inflow		Deposition		Air-Borne		Outflow	
				%	ton	%	ton	%	ton	%	ton
1	China	Tianjin	1,973	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0
2		Hebei	7,402	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0
3		Shandong	15,528	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0
4		Jiangsu	8,382	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0
5		Shanghai	3,205	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0
6	Korea	Seoul	2,219	100	2,219	38.1	845	20.4	453	40.0	888
7		Teajon	1,724	100	1,724	34.2	590	18.9	326	44.5	767
8		Kwangju	2,694	100	2,694	21.6	582	18.5	498	57.2	1,541
9		Pusan	3,873	100	3,873	60.4	2,339	24.9	964	14.7	569
10		Teagu	1,739	100	1,739	63.0	1,096	29.3	510	7.6	132
11	Japan	Kyushu	889	43.7	388	14.1	125	24.5	218	5.1	45

다.

또, 한반도 내에서 오염물질이 배출된 경우 15~77%가 한반도에 침적되었으며 8~75% 정도의 오염물질이 외부로 유출되어졌고 그 나머지인 3~30% 정도가 대기 중에 남아 있었다.

일본 규슈지방으로부터 오염물질이 유입되는 경우에는 배출량의 30~45% 정도가 한반도로 유입되었으며 8~14%가 침적되었고, 대기중에 남아있는 오염물질의 양은 20~25% 범위였다

본 연구는 주변지역으로부터 한반도로 유·출입되는 대기오염물질의 경로 및 정량분석을 통하여 동북아시아지역의 대기오염물질 배출 및 환경기준을 마련하기 위한 것으로서, 이 지역의 대기질 개선에 이바지 할 것으로 예상되며 앞으로도 실제 대기오염물질의 측정과 병행하여 지속적인 연구가 필요하다고 사료된다.

본 연구는 추적자 모델을 이용해 지역적 규모에서 대기오염물질의 이동을 정량화할 수 있는 가능성을 보여주었으며, 보다 정교한 모델을 개발해 이 지역에서 월경하는 대기오염물질의 양을 보다 정확히 계산할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구(과제번호: 971-1106-039-2)는 한국과학재단의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사를 표합니다.

참 고 문 헌

환경부(1995) 환경통계연감 제8호

Akimoto, H. and H. Narita (1994) Distribution of SO₂, NO_x and CO₂ emissions from fuel combustion and industrial activities in Asia with 1° × 1° resolution. Atmos. Environ., 28, 213-225.

Chamberlain, R.C. and R.C. Chadwick (1953) Deposition of airborne radio-iodine vapor, Nucleonics, 8, 22-25.

Charlson, R.J., S.E. Schwartz, J.M. Hales, R.D. Cess, J.A. Coakley, J.E. Hansen, and D.J. Hoffman (1992) Climate forcing by anthropogenic aerosols. Science, 255, 422-430.

Clarke, R.H., R.R. Dyer, D.G. Brook, D.G. Reid, and A.J. Troup (1971) The wangara experiment: Boundary

layer data, tech, paper No.19, CSIRO, Div. Meteorol. Phys., Dale, Australia, 362.

Feichter, J., E. Kjellstrom, H. Rodhe, F. Dentener, J. Lelieveld, and G.J. Roelofs (1996) Simulation of the tropospheric sulfur cycle in a global climate model, Atmos. Environ., 30, 1693-1707.

Gifford, F.A.(1982) Horizontal diffusion in the atmosphere: A Lagrangian-Dynamic theory, Atmos. Environ., 16, 505-512.

Gorham, E.(1989) Scientific understanding of ecosystem acidification: A historical review, Ambio, 18, 150-154.

Langner, J. and H. Rodhe (1991) A global three-dimensional model of the tropospheric sulfur cycle, J. Atmos. Chem., 13, 225-263.

Lee, I.Y.(1987) Numerical simulations of cross-appalachian transport and diffusion, Boundary-layer Meteorology, 39, 53-66.

Kato, N.(1996) Analysis of structure of energy consumption and dynamics of emission of atmospheric species related to the global environmental change (SO_x, NO_x, and CO₂) in Asia, Atmos. Environ., 30, 757-785.

Mareco, F.J. and J. Fontan (1976) Influence of dry deposition on the residence time of particulate pollutants in the troposphere, in *Atmosphere-Surface Exchange of Particulate and Gaseous Pollutants*, ERDA symposium series, Richland, Wash., Set. 4-6, 1974, 54-61, CONF-740921, NTIS.

Mcdonald, K.M., L. Cheng, M.P. Olson, and R.P. Angle (1996) A comparison of box and plume model calculations for sulphur deposition and flux in Alberta, Canada, Atmos. Environ., 30, 2969-2980.

NAPAP (1991) *Acid Deposition: State of Science and Technology*, P. 2053. The NAPAP Office of the Director Washington, district of Columbia.

OECD (1991) *The State of the Environment*.

Schwartz, S.E.(1989) Acid deposition: Unravelling a regional phenomenon, Science, 243, 753-763.

Sehmel, G.A.(1984), Deposition and resuspension, in *Atmospheric Science and Power Production*. Edited by D. Anderson, Technical Information Center, Office of Scientific and Technical Information, U.S. Dept. of Energy, DOE/TIC-27601.

Sheih, C.M., P. Frenzen, and R.L. Coulter (1983) On the measurement of subgrid-scale eddy diffusivity, preprints, sixth symposium on turbulence and dif-

- fusion, March 22-25, Amer. Meteorol. Soc., Boston, MA. 253-254.
- Sheih, C.M., M.L. Wesely, and B.B. Hicks (1979) Estimated dry deposition velocities of sulfur over the eastern united states and surrounding regions, *Atmos. Environ.*, 13, 1361-1368.
- Shir, C.C. and I.J. Sheih (1974) A generalized urban air pollution model and its application to the study of SO₂ distributions in the St. Louis Metropolitan area, *J. Appl. Meteorol.*, 13, 185-203.
- Sinton, J.E.(1992) *China Energy Databook*, collaborated by Lawrence Berkely Laboratory and China State Planing Commission, Revised.
- Warren, B.J., R.C. Sklarew, and D.B. Turner (1976), Urban air quality simulation modeing, in *Air Pollution*, 3rd, vol. I. Edited by A.C. Stern, Academic Press, 522.
- Zannetti, P.(1990) *Air Pollution Modeling: Theories, Computational Methods and Available Software*, Van Norstrand Reinhlod, New York.