

STEM II를 이용한 한국과 중국동부 지역의 대기오염물질 이동/화학/침착 모사에 관한 연구 II. 한·중간 SO₂와 sulfate의 이동에 관하여

Application of the STEM II to air pollutant transport/ chemistry/deposition in the Korea and Eastern China Area II. Transport of SO₂ and sulfate between the Korea and Eastern China Area

이 상 인¹⁾ · 조 석 연 · 심 상 규²⁾

인하대학교 환경공학과, ¹⁾LG 생산기술원, ²⁾한국 과학기술 연구원
(1994년 12월 29일 접수, 1995년 4월 1일 채택)

Sang-Rin Lee¹⁾, Seog-Yeon Cho, Sang-Gyoo Shim²⁾

Department of Environmental Engineering, Inha University, Incheon, Korea

¹⁾LG Production Engineering Research Center, Korea

²⁾Korea Institute of Science and Technology, Seoul, Korea

Abstract

The STEM II(Sulfur Transport Eulerian Model II) was adapted to investigate air pollutant transport phenomena between Eastern China and Korea. The movement of the high concentration region was clearly identified for the sulfate but was not visible for SO₂. The 10~16 times more amount of SO₂ is transported to Korea compared to that of the local emission while the amount of the sulfate transported to Korea is 1~1.3 times more than that of the sulfate produced by photo-chemical reaction in Korea. APTIs(Air Pollutant Transport Indices) for SO₂ and sulfate are approximately 0.85, which implies that the most of the SO₂ and sulfate existed in Korea are transported from Eastern China.

1. 서 론

중국의 산업화 및 개방화 정책이 진행되면서 중국의 동해안지역에 공업단지조성이 활발하게 추진중에 있다. 서울과 중국 산둥반도의 주요 도시와의 거리는 약 500 km 이고, 북경 주변도시와의 거리는 약 900km 이다. 따라서 중국의 공업도시에서 배출된 대기오염물질이 풍속이 5m/sec인 서풍하에서 약 1~2일 만에 국내에 도착한다. 중국에서 배출된 SO₂, NO_x, 탄화수소 등의

일차대기오염물질은 물론이고 이로부터 생성된 sulfate, HNO₃ 등의 이차 대기오염물질도 국내에 유입되리라 사료된다.

과거 연구에서는 기상자료를 이용하여 대기오염물질의 이동현상을 조사하는 trajectory analysis¹⁾⁻³⁾가 행하여졌다. 그러나 trajectory analysis는 고도에 따른 풍향 풍속의 변화와 대기확산 현상의 연계성을 고려할 수 없다. 또한 광화학 반응을 포함할 수 없으므로 1차 대기오염물질의 소멸과 광화학 반응으로 생성되는 2차 대기오염물질의 거동을 모사할 수 없다. 이 등⁴⁾⁻⁵⁾은 대기오염

물질 이동/화학/침착을 모사하는 Sulfur Transport Eulerian Model II⁶⁾(이후는 STEM II로 언급함)를 사용하여 중국으로부터의 대기오염물질 이동을 연구하였다. 그러나 모델에 사용된 초기조건, 건조침착속도와 소용돌이 확산계수가 부정확하게 선정되어 모델결과의 정량적 정확도가 낮았다. 본 연구의 전단계로 수행된 이 등⁷⁾의 연구에서 모델 입력자료를 작성하고 모사결과를 서울, 부산과 인천 3개 도시의 실측치와 비교 분석하였다. 본 연구는 이 등⁷⁾이 개발한 모델과 입력자료를 이용하여 중국 동부지역으로부터의 대기오염물질 이동현상을 조사하였다.

2. 모델 개요

본 연구에서 채택된 모델은 3차원 Eulerian 대기확산 모델인 STEM II이며 광화학 반응기작으로는 Atkinson Lloyd Wings Mechanism⁸⁾이 사용되었다. 모사기간은 한반도를 포함한 중국 동부지역이고 가로 61(1220 km) 세로 46(920 km)개의 수평 격자와 11(4km)개의 수직 격자를 갖고 있다.

입력자료의 작성에 있어서는 바람장, 온도분포, 압력분포, 습도분포 등의 기상자료는 중규모 기상모델을 사용하였고 수직방향 바람속도, 소용돌이 확산계수와 건조침착속도는 연속방정식, 대기안정도, 지표 근처의 공기저항 등을 이용하여 산출하였다. 대기오염물질 배출속도는 한국환경연감과 중국연감의 자료를 이용하여 산출하였고, 초기조건은 측정치를 이용하여 구하였으며, 마지막으로 경계조건은 1차원 STEM II 모사를 통하여 계산하였다. 보다 자세한 내용은 이 등⁷⁾의 논문에 나타나 있다.

모사기간은 1989년 11월 25일 오전 9시부터 1989년 11월 26일 오후 5시까지 32시간으로 설정하였다. 11월 25일부터 24시간 동안은 서쪽에서 다가오는 고기압이 지배하여 한반도 주변지역은 구름이 없는 맑은 날씨였으며 다음 12시간은 한반도 북부지방에서부터 기압골이 형성되어 중북부 지역에 50% 정도의 구름이 끼었다. 대류권의 하층에서는 고기압이 지배하던 처음 24시간 동안 5m/s정도의 서풍이, 다음 12시간 동안은 5~10m/s의 서풍이 불었다. 이기간 동안에는 서풍이 주풍이므로 중국에서 한국으로 대기오염물질의 이동이 예견되는 사례이다.

3. 결과 및 분석

본 모사에서 농도가 계산되는 화학종은 51개로 NOx,

SOx, Ox, 탄화수소 및 각종 자유기를 포괄하나 중국으로부터 이동이 중요하고 선형특성을 갖고 있어서 해석이 용이한 SO₂와 sulfate만을 본 논문에서 검토하였다.

3.1 SO₂와 sulfate 농도의 계산 결과

대기오염 자동측정망의 측정치를 이용하여 작성한 지표층에서의 SO₂ 농도의 초기분포는 그림 1-a와 같다. 그림 1-b는 15시간이 경과한 11월 26일 0시에 지표층 SO₂ 농도의 분포인데, 대기순환이 원활하여져서 중국지역과 한국지역 모두 SO₂ 농도가 낮아졌다. 단, 서울지역 SO₂의 농도가 280ppb(농도분포 곡선상에 나타나지 않음) 나타난 이유는 서울지역에서만 바람속도가 적어서 대기가 정체되었기 때문이다. 15시간이 더 경과한 11월 26일 낮 3시에는 바람이 보다 강해지고 대기순환이 활발하여지면서 한국과 중국지역 모두 SO₂ 농도가 낮아지는데(그림 1-c) 이러한 경향은 측정치와 일치한다⁷⁾. SO₂의 고농도 지역은 배출원 주변에 국한되어 나타나서 한반도로 SO₂가 이동하는 현상이 뚜렷하게 나타나지 않는다. 그러나 고농도 지역 자체가 이동하지 않아도 많은 양의 SO₂가 한국내로 유입될 수가 있는데 이에 관한 보다 자세한 내용은 다음절에 설명되어 있다.

SO₂가 광산화되어 형성되는 sulfate는 기준 대기오염물질에 속하지 않아서 측정치가 없다. 본 연구에서는 sulfate농도가 형성되는 과정을 연구할 수 있도록 초기에는 sulfate가 모델기간 내에 없다고 가정하였다. sulfate 자체는 광화학 반응성이 없으므로 이러한 가정은 sulfate 농도에만 영향을 미치고 다른 화학종의 농도 및 대기의 광화학 반응성에는 영향을 미치지 않는다. 15시간이 경과한 11월 26일 0시에는 SO₂ 농도가 한국에 높게 나타나는 반면(그림 1-b), sulfate 농도는 중국에서 높게 나타나는데(그림 2-b), 그 이유는 한국에서는 SO₂가 좁은 지역에서 집중적으로 배출되기 때문이다. 이와 같이 형성된 sulfate는 편서풍이 강해지면서 한국으로 이동하게 된다. 그림 2-c는 11월 26일 낮 3시에 sulfate가 한국내로 이동하여 온 것을 보여주고 있다.

3.2 대기오염물질 유입량 계산

한반도 내에 존재하는 대기오염물질의 물질수지를 파악하기 위해서, 그림 3과 같이 한반도지역 전체를 포괄하는 직사각형 지역을 한반도 지역으로 설정하고, 대기오염물질의 유입속도, 지역배출속도, 광화학반응 생성속도, 건조침착속도 등을 산출하였다.

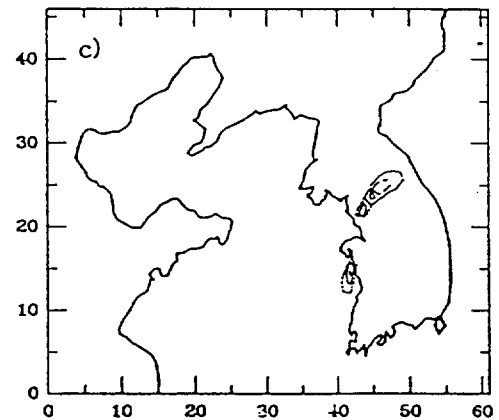
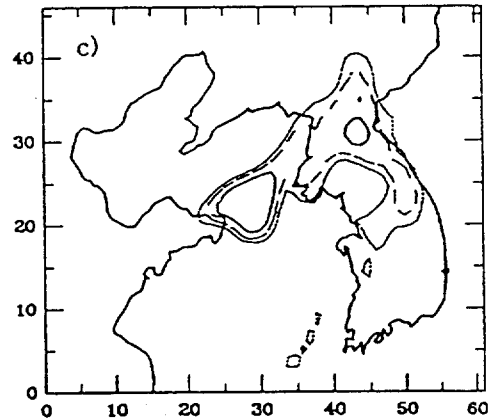
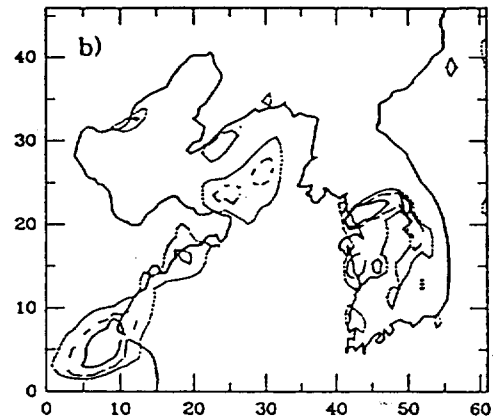
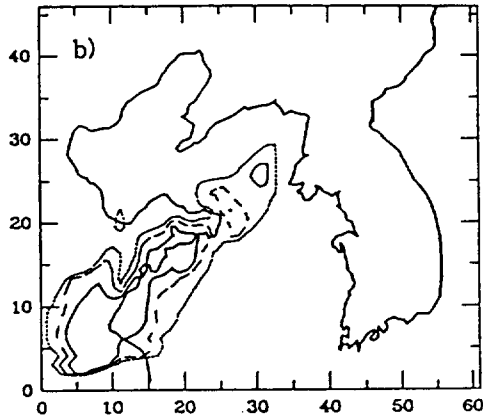
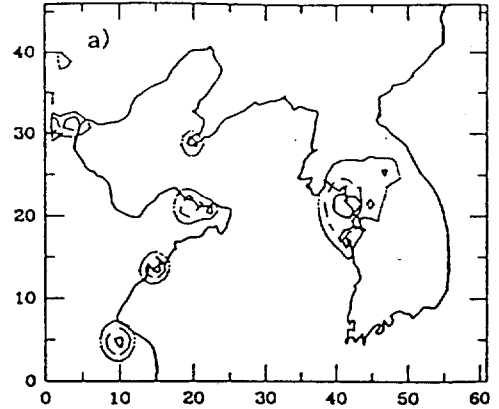
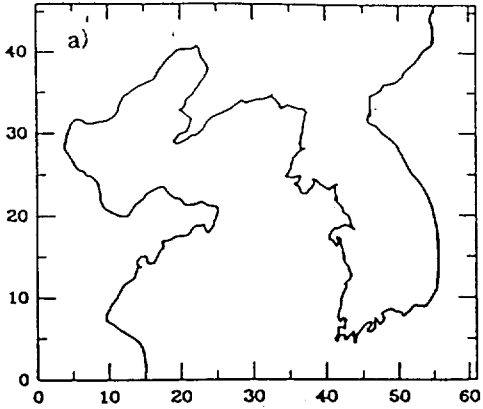


Fig. 1. The calculated hourly SO_2 concentration contours(ppb).

- a) 9 A.M. 11.25 —200-----180.....160
- b) 0 A.M. 11.26 —120-----100..... 80
- c) 3 P.M. 11.26 — 80----- 75..... 70

Fig. 2. The calculated hourly sulfate concentration contours(ppb).

- a) 9 A.M.
- b) 0 A.M. 11.26 —2.2-----2.0.....1.8
- c) 3 A.M. 11.26 —2.8-----2.5.....2.3

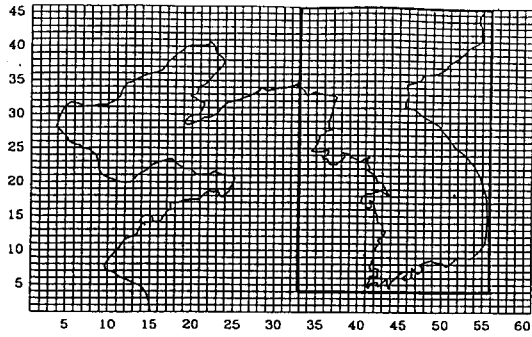


Fig. 3. The subdomain representing Korea.

SO₂

그림 4는 한반도 내에 존재하는 SO₂의 물질수지를 나타낸 것이다. 그림에서 유입속도는 중국 동부지역에서 배출된 SO₂가 한반도에 유입되는 속도이고 건조침착속도, 광화학반응속도, 지역배출속도는 한반도 지역 내에서 SO₂가 생성/소멸되는 속도이다. 초기에는 SO₂농도가 낮은 황해지역의 대기가 유입되므로 초기에 SO₂유입속도가 적다가 시간이 지날수록 SO₂농도가 높은 중국지역의 대기가 유입되면서 SO₂유입속도가 증가한다. 그러나 11월 26일 새벽 3시에서 부터 SO₂유입속도는 감소하는데 이는 앞절에서 설명한 바와 같이 중국내 SO₂농도가 감소하기 때문이다.

지역배출속도는 낮에 증가하고 밤에 감소하는 경향을 보이고 있으며 지역배출원의 영향을 많이 받는 건조침착속도도 지역배출속도와 유사한 변화를 보이고 있다. 광화학반응속도는 SO₂가 sulfate로 변환되는 속도를 나타내는 것으로 햇빛의 강도가 강한 낮 12시에 최대값을 갖

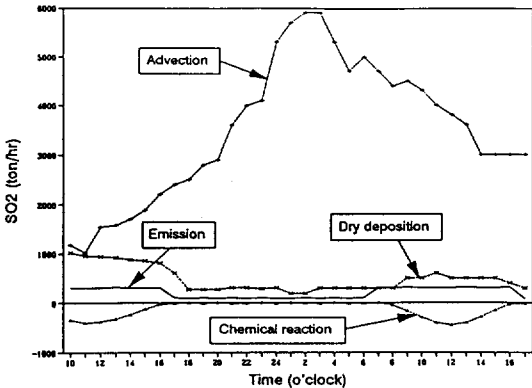


Fig. 4. The mass balance for SO₂ in the subdomain of Korea.

는다.

물질수지에서 건조침착속도와 광화학 반응속도는 한반도 지역내에서 SO₂의 양을 감소시키는 요소이고 유입속도와 지역 배출속도는 한반도 지역내의 SO₂의 양을 증가시키는 요소이다. SO₂의 유입속도는 중국에서 이동하여 오는 속도를 의미하고 지역 배출속도는 한반도 자체에서 배출되는 속도를 의미한다. 그림 4에는 유입속도가 지역 배출속도에 비하여 최고 50배 정도로 매우 크다는 것을 보여 주고 있다. 그림 5에서는 SO₂의 총유입량과 한반도 지역 배출원에 의한 총지역 배출량의 비를 나타내었다. 초기에 총유입량이 총지역배출량에 비해 4배이던 것

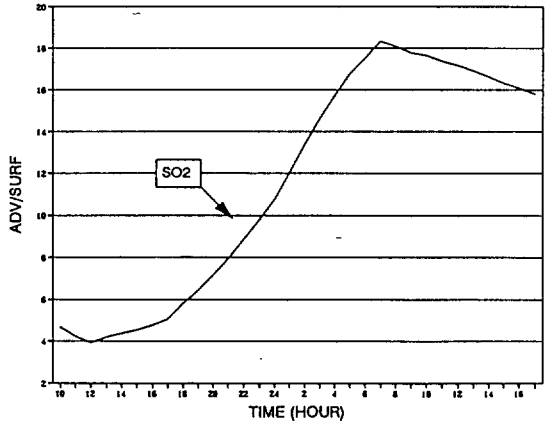


Fig. 5. The ratio of the amount of advection to that of surface emission for SO₂.

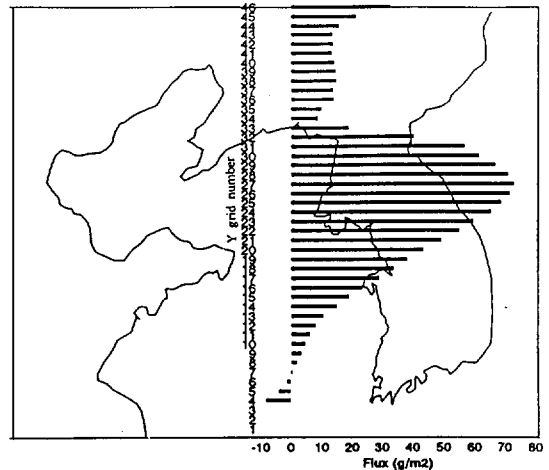


Fig. 6. The amount of SO₂ advected into the surface layer at each grid point per unit area(unit: g/m²).

이 시간이 지날수록 증가하여 32시간 후에는 16배에 이르고 있다. 그러므로 한반도내에 존재하는 SO₂의 총량을 결정하는 주된 요소는 중국으로부터의 유입이라는 것을 알 수 있다.

중국으로부터의 SO₂의 유입형태를 보다 상세히 알아보기 위하여 표면층에서 32시간 동안 지점별 누적 유입량을 그림 6에 도시하였고 전체 수직구간에서 32시간 동안의 지점별 누적 유입량을 그림 7에 도시하였다. 여기서 누적유입량은 모사 시작부터 유입량을 누적한 값을 언급한다. 표면층에서 유입량이 가장 많은 지역은 한반도 중부이북 지역(Y축 22~31)이며 전체 수직구간에서 지

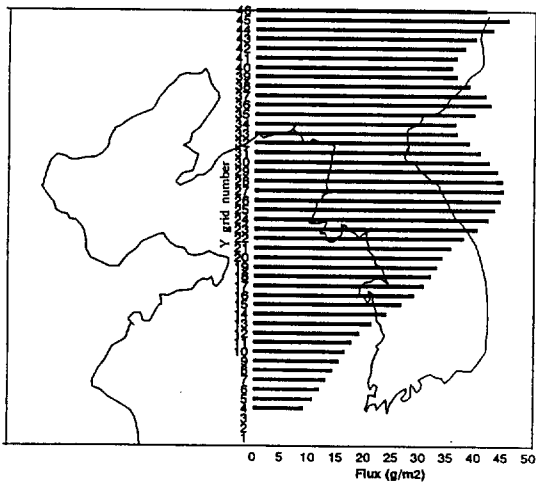


Fig. 7. The total amount of SO₂ advected at each grid point per unit area.

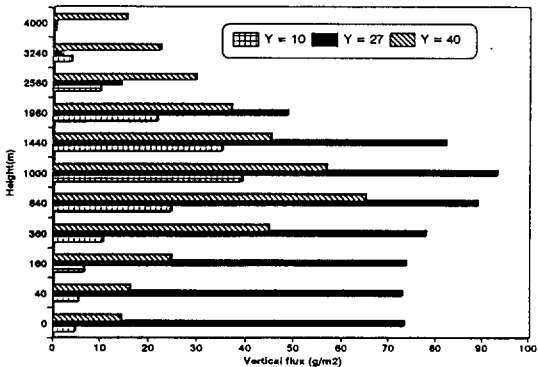


Fig. 8. The amount of SO₂ advected at each vertical grid point per unit area.

점별 누적 유입량도 중부이북지역에서 최대값을 지나 한반도 북부지역에서도 많이 유입이 되고 있다. 유입량의 수직 분포를 조사하기 위하여 유입량이 가장 많은 Y축 27번 지역과 한반도 북부지역인 Y축 40번 지역, 한반도 남쪽지역인 Y축 10번 지역을 선택하여 그림 8과 같이 수직 유입량 분포를 그려보았다. Y축 27번 지역은 1000meter 지점에서 최대 유입량을 가지고 표면층에서도 많은 유입량이 있다. 한반도 북부지역인 Y축 40번 지역은 640meter에서 최대 유입량을 가지고 2km이상의 고공에서도 많이 유입되고 있음을 볼 수가 있다. 한반도 남쪽지역인 Y축 10번 지역은 1000meter에서 최대값을 가지고 표면과 고공에서 유입이 적다. 이러한 수직 유입량에 있어서 지상 1440meter 까지의 유입량이 전체수직유입량의 58%에 해당하고 유입량이 가장 많은 Y축 27번 지역에서는 지상 1440meter 까지의 유입량이 Y축 27번 지역 전체수직 유입량의 67%에 해당한다.

sulfate

그림 9는 한반도내 sulfate의 물질수지를 나타낸 것이다. sulfate의 경우는 지역 배출속도는 없다고 가정하였으므로 지역 배출속도를 제외시켰다. 초기에는 체류시간이 충분하지 않아서 광화학적으로 생성된 sulfate가 거의 없으므로 유입속도의 낮밤의 변화가 나타나지 않다가 하루가 지난 11월 26일에 sulfate가 어느 정도 생성된 후에는 유입속도가 낮에 증가하고 밤에 감소한다. 광화학 반응속도는 햇빛이 강한 정오에 최대가 되며 건조 침착속도도 이와 비슷한 경향을 보인다.

그림 10에서는 중국으로부터의 sulfate 총유입량과 한반도 지역내에서 총 광화학반응 생성량의 비를 나타내

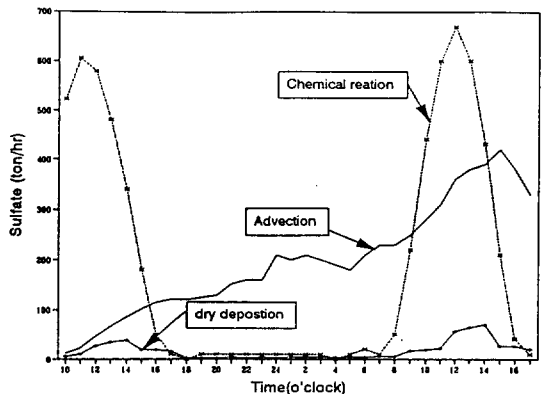


Fig. 9. The mass balance for sulfate in the sub-domain of Korea.

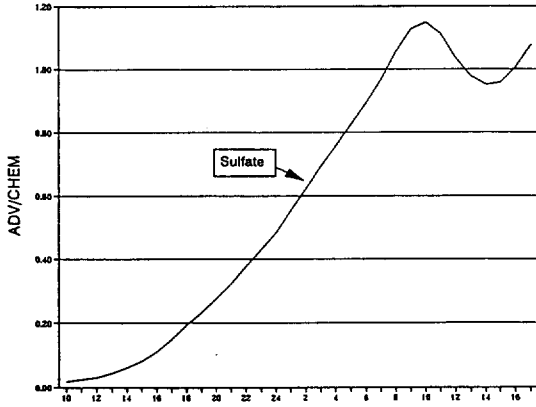


Fig. 10. The ratio of the amount of advection to that of chemical reaction surface.

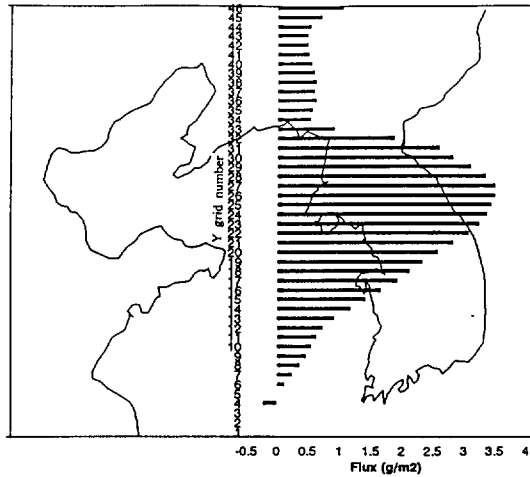


Fig. 11. The amount of Sulfate advected into the surface layer at each grid point per unit area(unit: g/m²).

었다. 초기에 총 광화학 반응 생성량의 5%도 못미치던 총유입량이 시간이 지날수록 증가하여 24시간 이후에는 115%에 이르고 있다. 그러나 sulfate는 SO₂와는 달리 sulfate의 유입량이 중국으로 부터의 영향을 나타내는 유일한 지표가 되지 못하며 유입된 SO₂가 sulfate로 변화하는 광화학 반응속도도 고려하여야 한다.

그림 11은 표면층에서 32시간 동안 지점별 누적 유입량을 도시하였고 전체 수직구간에서 32시간 동안의 지점별 누적 유입량을 그림 12에 도시하였다. 두 그림 모두

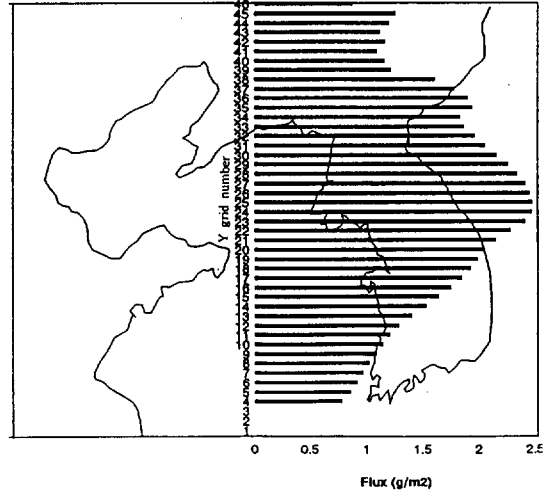


Fig. 12. The total amount of Sulfate advected at each grid point per unit area.

한반도 중부이북지역(Y축 22~31)에 유입량이 많다는 것을 알 수가 있다.

유입량의 수직 분포를 조사하기 위하여 앞서의 SO₂와 같이 유입량이 가장 많은 Y축 27번 지역과 한반도 북부 지역인 Y축 40번 지역, 한반도 남쪽지역인 Y축 10번 지역을 선택하여 그림 13과 같이 수직 유입량 분포를 그려보았다. 세지역 모두 1000m 근처에서 최대 유입량을 나타내고 있다. 이러한 수직 유입량에 있어서 지상 1440meter 까지의 유입량이 전체 수직 유입량의 49%에 해당하고 유입량이 가장 많은 Y축 27번 지역에서는 지상 1440meter 까지의 유입량이 Y축 27번 지역 전체 수직 유입량의 58%에 해당한다.

3.3 중국 동부의 오염물질 배출량에 대한 한국의 영향 분석

앞절의 물질 수지의 분석만으로는 중국 동부지역의 대기오염물질 배출량에 의한 한반도내의 대기오염물질량에 대한 영향을 정확히 파악하기 어려우므로 다음과 같이 APTI 지수(Air Pollutant Transport Index)를 정의하여 사용하였다.

$$APTI = \frac{\frac{N_1 - N_0}{N_0}}{\frac{E_1 - E_0}{E_0}}$$

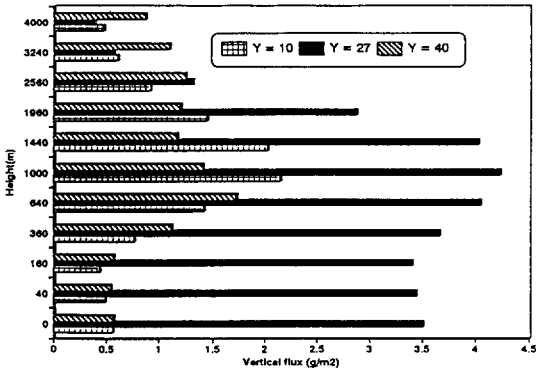


Fig. 13. The amount of sulfate advected at each vertical grid point per unit area.

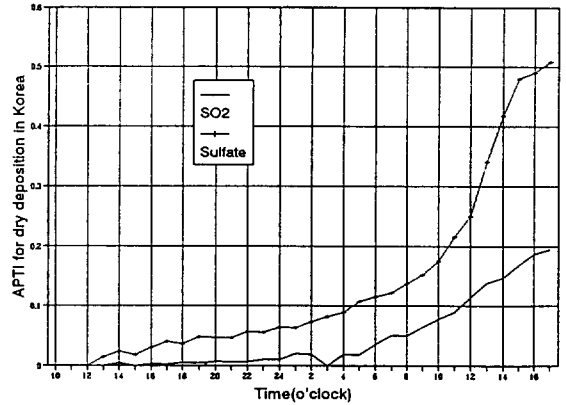


Fig. 15. The APTI for the amount of dry deposition for SO₂ and sulfate in the sub-domain of Korea.

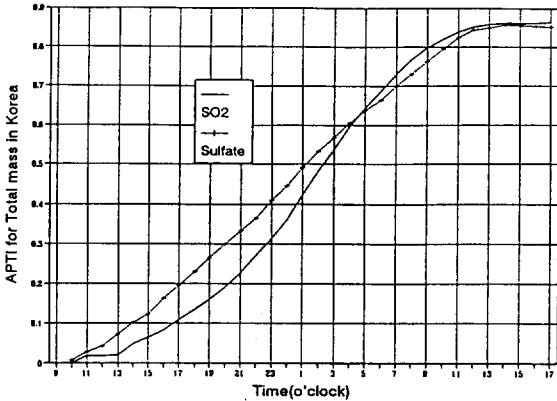


Fig. 14. The APTI for total mass for SO₂ and sulfate in the sub-domain of Korea.

화에 대해 한반도 내의 대기오염물질의 변화는 없는 것을 뜻하고 APTI가 1이면 한반도 내의 대기오염물질이 100% 변화하였다는 것을 뜻한다.

그림 14와 그림 15는 중국 배출원이 50%로 감소하였다고 가정했을 때 한반도 내에 존재하는 SO₂와 sulfate의 총량에 대한 APTI지수와 건조침착속도에 대한 APTI지수를 나타낸 것이다. 그림 14의 경우 시간이 지날수록 중국의 영향을 받으므로 APTI지수 값이 지속적으로 증가하다가 24시간이 지난 후에는 중국의 변화된 배출원에 의한 영향을 충분히 받아서 SO₂와 sulfate의 APTI 지수 모두 0.85로 접근하였다. 그러므로 한반도 지역내의 SO₂와 sulfate는 중국 배출원의 영향을 많이 받는다는 것을 알 수가 있다.

그림 15에서는 SO₂와 sulfate의 건조침착속도 모두 24시간이 지나기 전까지는 거의 변화를 보이지 않다가 24시간 이후에 값의 변화를 보이면서 SO₂의 경우는 0.2에, sulfate의 경우는 0.5에 수렴하는 것을 볼 수가 있다. 이와 같이 중국의 영향을 24시간이후에 받는 이유는 건조침착속도의 경우 지표에서의 바람의 속도에 영향을 많이 받는데 지표에서의 바람속도는 다른 층에 비하여 속도가 느리기 때문이다. SO₂보다 sulfate가 더 큰 영향을 받고 있는 이유는 SO₂는 지역 배출원이 있고 sulfate는 지역 배출원이 없기 때문이다.

4. 결 론

본 논문에서는 한국과 중국 동부 지역간의 대기오염물질 이동현상을 연구하였다. SO₂의 경우 고농도 지역이 한반도로 이동되는 현상이 뚜렷하지 않으나 이는 한반도

APTI 지수는 배출원(source)에서 배출속도를 변화하였을 때에 수용원(receptor)의 대기오염이 변화되는 정도를 나타내는 것이다. 즉, 배출원의 배출속도가 E₀에서 E₁으로 변화하였을 때, 수용원에서 대기오염을 나타내는 변수인 N₀가 변화하는 정도를 표시한 것이 APTI 지수이다. 여기서 E₀는 실제 배출원에서 배출속도, E₁는 배출원에서 변화시킨 배출속도, N₀는 E₀하에서 산출된 수용원에서 대기오염을 나타내는 변수의 값(예: 대기오염물질농도, 건조침착속도 등)이고 N₁은 E₁하에서 산출된 수용원에서 대기오염을 나타내는 변수의 값이다. 본 논문에서는 배출원을 중국 동부지역으로 수용원을 한국 지역으로 선정하였다. APTI는 중국의 배출량의 변화에 대한 한반도내의 대기오염물질의 변화율을 나타내는 것으로 APTI가 0이면 중국 동부지역의 배출량의 변

내에 고농도 지역이 존재하기 때문이다. 반면 sulfate의 경우는 이동하면서 점점 고농도를 형성하는 과정이 뚜렷하게 나타난다. 그러나 이러한 고농도 지역의 이동현상은 한반도에 유입되는 대기오염물질량의 지표가 되지 못한다. 이는 고농도 지역이 이동하지 않고도 대기오염물질이 넓은 지역에 확산되어서 이동할 수도 있기 때문이다.

SO₂와 sulfate의 이동량을 계산하여 본 결과 SO₂의 경우 유입량이 한반도 지역배출량에 비해 10~16배에 이르렀고 sulfate의 경우 유입량이 한반도 지역내의 화학반응 생성량에 비해 1~1.3배이었다. 그러므로 한반도내의 SO₂, sulfate는 모두 대류에 의한 유입량이 많다는 것을 알 수 있었다. 수직 유입량 중 1440m이하의 유입량이 SO₂의 경우 전체의 58%이고 sulfate의 경우 49%이었다. APTI지수 분석결과 중국의 배출량의 변화에 대한 한반도에 존재하는 SO₂와 sulfate의 APTI지수가 0.85에 접근하므로 한반도내의 SO₂와 sulfate는 대부분이 중국의 배출량에 의한 것이라고 할 수 있다.

본 연구는 하나의 기상 시나리오의 결과에 의한 것이다. 대기오염물질의 이동현상은 기상 조건에 밀접한 관계를 갖고 있으므로 본 연구의 결과를 한국과 중국 동부 지역간의 대기오염물질 이동현상의 일반적인 형태라고 단언하기는 어렵다. 그러므로 이를 위해서는 더욱 많은 기상 시나리오에 STEM II를 적용시켜 종합하여 일반성을 얻어야 할 것이다. 본 연구는 이러한 한국과 중국 동부지역간의 대기오염물질 이동현상을 STEM II와 같은 종합적인 모델을 이용하여 정성 및 정량적으로 최초로 규명하여 보았다는데 그 의의가 있을 것이다.

사 사

본 연구는 1993년도 후기 인하대학교의 교내 연구비의

지원을 받아서 이루어졌습니다.

참 고 문 헌

- 정용승 외, 대기오염물질의 장거리이동사례 및 황사발원지 추적, 대기오염물질의 장거리이동과 산성비 강하에 관한 연구(II)(과학기술처), 195-253
- Soon Chang Yoon, Kyung Sun Park and In Goo Kang(1992) Isentropic Analysis for the Long Range Transport of Yellow Sands in East Asia, Second IUAPPA Regional Conference on Air Pollution, Seoul, Korea.
- 강동근, 김선태, 김정욱(1992) 동북아시아 대기오염물질 장거리 이동에 관한 연구(I), 대기보전학회, 10, 30-31.
- 이상인, 조석연, 심상규(1993) 오일러리안 이동/확산/퇴적 모델을 이용한 한·중간 SO₂와 sulfate 이동 연구, 대기보전학회, 4, 16-17.
- 이상인, 조석연, 심상규(1993) 한·중간 대기오염물질 Eulerian 이동/화학/퇴적 모델 개발에 관한 연구, 대기보전학회, 11, 12-13.
- Carmichael, G.R., L.K.Peters and R.D. Saylor(1991) The STEM II regional scale acid deposition and photochemical model, Atmos. Environ, 25A, 2077.
- 이상인, 조석연, 심상규(1994) STEM II를 이용한 한국과 중국동부 지역간의 대기오염물질 이동/화학/침착 모사에 관한 연구-I. 입력자료의 작성 및 모델 검증, 대기보전학회, 10, 260-280.
- Lurman, F.W., Lloyd, A.C. and Atkinson, R.(1986) A chemical mechanism for use in long range transport/acid deposition computer modelling, J. of Geophy. Res., 91, 10905.