

## 한반도 서해상으로 장거리 이동하는 SO<sub>2</sub>의 농도 및 연직분포 특징

### The Vertical Distribution Patterns of Long Range Transported SO<sub>2</sub> in Korea Peninsula

한진석 · 안준영\* · 홍유덕 · 공부주 · 이석조 · 선우영<sup>1)</sup>  
국립환경연구원 대기화학과, 건국대학교 환경공학과<sup>1)</sup>  
(2004년 8월 30일 접수, 2004년 10월 1일 채택)

J.S. Han, J.Y. Ahn\*, Y.D. Hong, B.J. Kong, S.J. Lee, and Y. Sunwoo<sup>1)</sup>  
*Atmospheric Chemistry Division, National Institute of Environmental Research,*  
<sup>1)</sup>*Department of Environmental Engineering, Konkuk University*

(Received 30 August 2004, accepted 1 October 2004)

#### Abstract

This study was carried out to understand long-range transport of SO<sub>2</sub> using aircraft measurements for the identification of its horizontal and vertical concentration and distribution pattern. Thirteen missions of aircraft measurements have been done around 37° 00' / 124° 30' from October 1997 to November 2001.

Concentrations of SO<sub>2</sub> was 1.5 ~ 2.0 ppb in the below mixing layer, 0.6 ~ 1.1 ppb in the above mixing layer. SO<sub>2</sub> was found to be relatively higher than marine background level, 0.08 ~ 0.2 ppb, indicating the western coast being influenced by long-range transport except for the summer season.

The vertical distribution of SO<sub>2</sub> was classified into 3 groups using its vertical sounding and meteorology pattern; the first is linear decay pattern, the second is exponential decay pattern, and the last is gaussian distribution pattern in the below mixing layer, 2 patterns of linear decay and gaussian distribution patterns in the upper layer. It is founded that vertical distribution pattern is strongly dependent on meteorological condition, for example atmospheric stability and predominant air flow.

**Key words** : Long range transport, SO<sub>2</sub>, Vertical distribution pattern

#### 1. 서 론

동아시아 지역의 경제는 지난 20년간 높은 성장률

을 보였으며, 급속한 경제성장으로 인해 SO<sub>2</sub>의 배출량은 1996년에 정점을 나타냈고 여전히 많은 양의 SO<sub>2</sub>가 배출되고 있다 (Street *et al.*, 2003; Akimoto and Narita, 1994; Akimoto and Kato, 1992). 아시아 지역의 2000년 SO<sub>2</sub> 총배출량은 34,940 Gg이며, 특히 중국의 배출량은 20,753 Gg으로 아시아 전체 배출량

\* Corresponding author  
Tel : +82-(0)32-560-7356, E-mail : nierair@hanmail.net

의 60%에 해당되며 동아시아지역 배출량의 90%를 차지한다(Carmichael, 2003).

대기중으로 방출된 황화합물은 강수나 에어로졸 생성에 중요한 역할을 한다. 대기중으로 배출된 SO<sub>2</sub>는 황산염으로 변환되어 산성우(Acid rain)와 건성침착(Dry deposition)등의 형태로 주변지역의 생태계와 자연환경 및 주민건강에 해로운 영향을 미친다. 또한 SO<sub>2</sub>와 황산염입자는 장거리 이동하여 주변 국가의 대기질에 영향을 주는 것으로 알려져 있으며(Prospero, 1999) 태평양은 물론 북아메리카대륙 서부까지 이동하여 대기질에 영향을 미치는 것으로 보고되었다(Jaffe *et al.*, 2003, 1999, 1997; Clarke *et al.*, 2001; Andreae *et al.*, 1997). 또한 대기중에 배출된 SO<sub>2</sub>가 변환된 황산염은 입자상인 에어로졸 상태로 존재하면서 직접적으로 빛을 산란 혹은 흡수시키며, 간접적으로는 구름의 응결핵으로 작용하여 구름 내 물리현상에 영향을 주고, 결국에는 지구복사 체계를 변화시키게 된다(Koch, 2001; Charlson *et al.*, 1991).

동아시아 지역의 대기오염물질의 장거리 이동문제는 국가간의 중요 현안 과제이며 이에 대한 현황 파악 및 정밀 조사가 요구되고 있다. 북미지역에서는 1980년대 후반부터 산성오염물질의 이동현상에 대한 연구가 수행되었으며 이웃 일본의 경우 1990년 초반부터 서해상 및 동해를 중심으로 대기오염물질의 장거리 이동현상에 관한 연구가 지속적으로 수행되고 있다(Hatakeyama *et al.*, 2001, 1997, 1995). 또한 1990년 중반에 수행된 NASA Pacific Exploratory Missions West (PEM-West phase A, phase B) 측정결과에 따르면 북태평양상공의 대기는 동아시아로부터 장거리 이동하는 SO<sub>2</sub>에 의해 오염되었음을 명확하게 보여주고 있다(Thornton *et al.*, 1999, 1997, 1996). 현재에도 SO<sub>2</sub>와 SO<sub>2</sub>가 변환된 황산염입자들의 수송(transport), 생성(formation)과 변환(conversion)은 대기오염물질의 장거리이동현상과 관련하여 주변지역의 대기질 문제와 건성/습성침착(wet deposition)으로 인한 생태계의 산성화문제 및 지구 복사에너지 수지에 큰 영향을 미치고 있어 ACE-Asia와 같은 연구사업이 수행되었으며(Huebert *et al.*, 2003), INDOEX, TRACE-P field measurement program와 같은 연구가 진행중이다(Tu *et al.*, 2003; Bates *et al.*, 2002).

동아시아지역의 광역적인 대기오염현상과 대기오염물질의 장거리 이동현상을 파악하기 위해서는 SO<sub>2</sub>

의 공간적 분포 및 연직분포를 조사하고 서해상을 중심으로 한 유입량 및 유출량과 침착량에 관한 조사가 필요하며 대기오염물질의 물질수지(budget)를 파악해야 하며, 이 과정에서 대기오염물질의 장거리 이동 과정에서의 가스상 물질의 입자 변환현상과 2차생성 입자상 물질에 대한 연구 또한 필요하다(국립환경연구원, 2001, 2000). 이런 목적으로 국내에서는 지상배경농도 측정소에서 장거리이동 대기오염물질을 측정하고 있으나 국지적인 오염에 의한 영향을 배제할 수 없고 오염물질의 연직분포에 대한 자료는 부족한 실정이다(국립환경연구원, 2001, 2000). 따라서 본 연구에서는 대륙으로부터 한반도 서해상으로 장거리 이동되는 SO<sub>2</sub>의 공간적 분포와 연직분포를 조사하여 장거리 이동하는 SO<sub>2</sub>의 이동현상 및 특징을 파악하고자 하였다. 구체적으로는 서해상으로 장거리 이동하는 SO<sub>2</sub>의 농도를 계절별, 고도별로 조사하였으며 이를 바탕으로 하여 연직분포 형태를 추정하여 보았다. 본 연구에서 추정된 SO<sub>2</sub>의 연직분포 형태는 SO<sub>2</sub> 이동량(유입량)을 보다 정확히 계산할 수 있는 기본적인 자료로 사용될 수 있다. 이를 바탕으로 계산된 유입량은 대륙으로부터 장거리 이동하는 오염물질이 한반도 서해안 배경농도지역에 끼치는 영향을 명확하게 규명하는 자료로 이용될 수 있을 것이다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 기상 측정

항공기를 이용한 서해상의 대기오염 측정기간 중 상층에서의 기류이동과 대기구조를 파악하기 위하여 태안 안면도 해안에서 상층기상측정 장비를 이용하여 측정된 고도별 풍향·풍속, 기온, 습도 등을 정리하였다. 충남 태안의 안면도 해안은 서해상 항공측정 경로 중 중간지점에 해당하는 곳으로 측정기간 동안의 기상상태를 대표할 수 있는 곳이다. 사용된 측정 장비는 미국 AIR사의 Radio Sonde System(Rawin sonde 및 Air sonde)이며 항공기 측정기간 동안 대기의 일변화를 연속적으로 파악할 수 있도록 일반적으로 대기가 가장 안정한 일출무렵인 07시, 혼합층이 급격히 성장하는 11시, 하루 중 혼합층이 가장 잘 발달되는 15시와 야간인 20시경 등 일일 4회의 측정

자료를 정리하였다. 한편, 측정기간 중 서해상을 포함한 동아시아 지역의 전반적인 기상특성과 기류의 이동경로를 파악하기 위하여 기상청으로부터 고층기상 자료 및 상층일기도(지상, 850 hPa, 700 hPa)를 분석하였다.

상층기상 측정자료를 이용하여 측정기간 중 태안 앞 서해상의 기온구조, 상대습도, 수분량, 풍향, 풍속 및 혼합층 발생특성을 조사하였다. 또한 지상 및 850 hPa 고도의 일기도를 통하여 당시의 날씨와 기압배치, 기단의 움직임을 파악하였다.

### 2.2 항공 측정

항공측정의 장점은 짧은 시간 내에 넓은 지역을 조사할 수 있다는 것과 다른 방법으로는 수행하기 어려운 상층에 대한 신속한 조사 및 시료 채취 등이 가능한 데 있다. 그러나 비행시간, 측정 범위의 제한, 탑재장비의 중량, 안전한 측정기의 가동을 위한 충분한 전원 확보, 탑재가 가능한 측정기의 크기 제한, 그리고 측정기의 응답시간 제한 등의 단점이 있다(국립환경연구원, 1999).

항공측정에 사용된 항공기는 쌍발 프로펠러 형식으로 항공측정을 위한 노즐의 장착에 적합한 기종으

로 선택되었다(Chiefstain, USA Piper Co). 노즐의 방향은 항공기의 진행방향으로 향하도록 하여서 측정 비행중 항공기의 양쪽 날개부분에 장착되어 있는 프로펠러와 배기가스가 측정에 미치는 영향이 거의 없도록 스테인레스 스틸 재질로 제작, 설치하였다. 항공기 내부에는 SO<sub>2</sub> 측정기(Thermo Inc, 43C, 정밀도 0.06 ppb (120 sec avg)), 지상에서의 GC 분석과 교정을 위해 캐니스터 및 테들러 백을 탑재하였다. 이 밖에 측정기들의 장착과 관련된 자세한 내용과 검·교정 그리고 분석방법은 김병곤 등(1999)의 방법과 동일하게 사용하였다(국립환경연구원, 1999). 입자개수 측정기(Optical Particle Counter, RION KC-01C)를 사용하여 입경이 0.3~10µm 범위의 입자들을 0.3~0.5, 0.5~1.0, 1.0~2.0, 2.0~5.0, 5.0~10.0µm의 5개로 구분하여 측정하였다.

항공측정은 중국과 한국사이의 서해상공에서 수행하였다. 전체 측정 횟수는 38회이며 이 중 김포공항을 출발하여 37.0N, 124.3E에서 36.0N, 124.3E 선상을 비행하며 고도를 500, 1,000, 2,000, 3,000m로 변화시킨 측정은 총 15회로 오염물질의 연직분포를 파악하기 위해 고도별 측정을 실시하였다. 그림 1에 비행경로를 나타내었다. 측정일시는 98년 봄철 2회(4

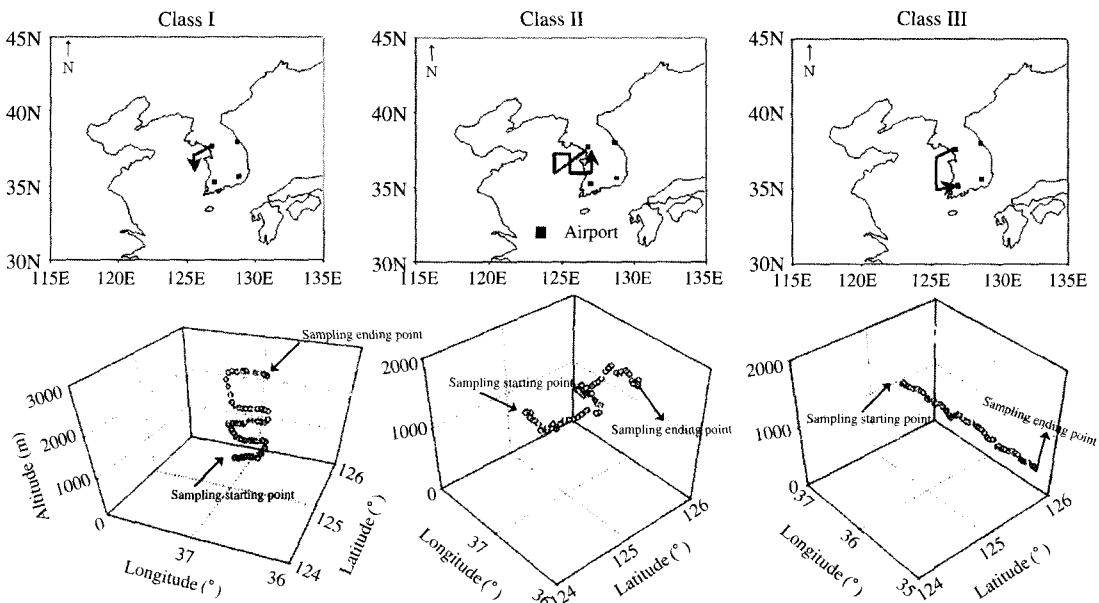


Fig. 1. Aircraft flight path for Class I (vertical section), Class II (crank), Class III (horizontal section).

월 27일 오전, 오후), 98년 가을철 4회(11월 8일 오전, 오후, 9일 오후, 10일 오후), 99년 봄철 1회(4월 11일 오후), 00년 여름철 4회(6월 9일 오후, 10일 오후, 11일 오전, 오후), 00년 가을철 1회(11월 15일 오후), 01년 봄철 2회(4월 13일 오전, 오후), 01년 가을철 1회(11월 7일 오후)이다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 서해상 SO<sub>2</sub>의 고도별 농도

서해상 37°N, 124°3'E 상공에 분포하는 SO<sub>2</sub>의 고도별 농도 분포를 O<sub>3</sub> 및 입자개수농도와 함께 표 1과 그림 2에 나타내었다.

SO<sub>2</sub>는 황화합물의 대기 순환과정에서(atmospheric sulfur cycle) 매우 중요한 역할을 수행한다. 새로운 입자의 생성과정에 가장 큰 원인물질로 작용하며 부유하고 있는 입자와 반응하여 황산염 입자를 생성한다. 이러한 SO<sub>2</sub>의 자연적 배출원으로는 화산이 큰 비중을 차지하고 있으나 서해상은 이러한 자연적 배출원에 대한 영향을 거의 받지 않는다. 또한 국립환

경연구원(1999)에 의하면 중국 Shandog 반도는 특히 SO<sub>2</sub> 배출량이 높은 지역이며, 항공 관측지점은 Shandog 반도로부터 약 300~500 km 떨어진 거리에 있다. 따라서 서해상에 분포하고 있는 SO<sub>2</sub>는 대부분이 인위적인 오염물질이며 비교적 가까운 거리에 있는 배출원으로부터 장거리 이동한 오염물질로 간주할 수 있다.

측정 결과 SO<sub>2</sub>는 1,000 m에서 가장 높은 2.0 ppb를 나타내었고 500, 2,000 m에서 1.5, 1.1 ppb를, 3,000 m에서는 0.6 ppb의 농도를 나타냈다. 500 m가 아닌 1,000 m 상공에서 가장 큰 농도를 나타내었으며 500~3,000 m 모든 고도에서 해양지역의 배경농도인 0.08~0.2 ppb보다 높은 농도를 나타내어 서해상공이 SO<sub>2</sub> 농도는 인위적인 오염원으로부터 배출된 SO<sub>2</sub>의 장거리 이동에 의한 영향을 뚜렷하게 받고 있는 것으로 나타났다. Hatakeyama *et al.* (2001)이 99/2월 32°N, 124°3'E 상공에서 측정한 SO<sub>2</sub> 농도를 보면 고도 500 m에서 4~12 ppb의 고농도가 측정되었고 97년 측정한 결과를 살펴보면 고도 500 m에서 평균 1.8 ppb, 1,000, 2,000, 3,000 m 고도에서 각각 ≈ 1.3 ppb, 0.5 ppb, 0.2 ppb의 SO<sub>2</sub> 평균 농도가 관측되어 배경농도를 넘는 농도값이 측정된 동일한 결과를 보여주고 있다. 또한 TRACE-P 실험(Tu *et al.*, 2003; Thornton *et al.*, 2002)에서 관측한 34°2'N, 124°5'E 부근의 농도는 4~10 ppb의 고농도가 관측되었고 30°2'N, 124°5'E 부근에서는 1,500 m에서 최대 8 ppb의 고농도가 관측되어 본 연구에서 관측된 고농도 SO<sub>2</sub>와 유사한 결과가 제시되었다. 기타 제시된 서해 인근의 지역에서 측정된 상층측정결과와 본 연구결

Table 1. Summary of SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, particle concentrations for different altitude during 1997~2001.

	Height (m)			
	500	1,000	2,000	3,000
SO <sub>2</sub> (ppb)	1.5(1.7)	2.0(2.0)	1.1(1.2)	0.6(0.6)
O <sub>3</sub> (ppb)	48.1(12.3)	49.7(14.3)	47.2(13.1)	51.3(12.7)
Particle (#/cm <sup>3</sup> )	56.1(41.9)	46.2(45.8)	15.7(14.7)	4.3(5.2)

parenthesis is standard deviation.

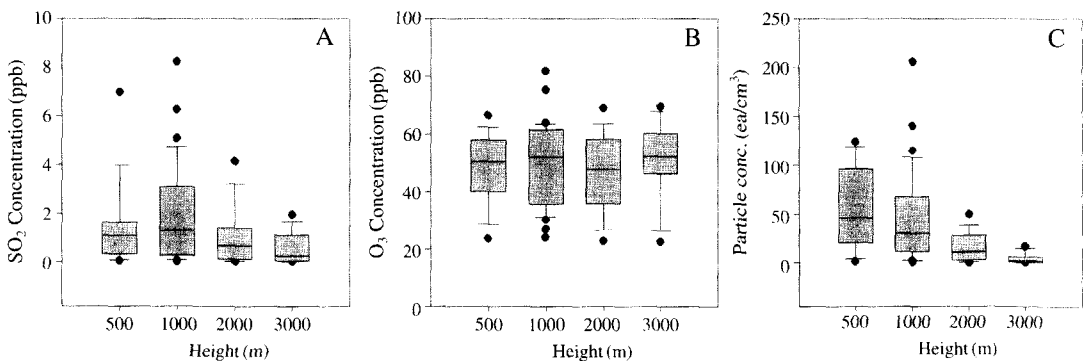


Fig. 2. The box plot of (A) SO<sub>2</sub>, (B) O<sub>3</sub>, and (C) particle number for different altitude.

과를 비교하면 고도 1,000~1,500 m SO<sub>2</sub>의 농도는 큰 차이를 보이지 않았다. 상층 1,000~1,500 m까지는 대략 혼합층 정도의 높이로써 대륙으로부터 배출된 SO<sub>2</sub>는 혼합층 높이까지 mixing되면서 이동하며, 그 이상의 고도에서는 혼합층과는 전혀 다른 기류에 의해 영향을 받으며 이동하는 현상으로 SO<sub>2</sub>농도의 연직분포 특징을 설명할 수 있다.

그림 3은 37°N, 124°3'E 구간에서 측정된 각 물질들에 대해 개별비행의 각각의 고도에서의 평균 농도를 나타낸 그림이다. SO<sub>2</sub>의 배경지역 평균농도는 0.08~0.2 ppb이나 서해상의 농도는 대부분의 측정고도에서 그 이상의 값을 나타내고 있어 서해상이 인위적으로 발생된 SO<sub>2</sub>에 의해 오염되어 있음이 뚜렷하게 나타나고 있다. 또한 SO<sub>2</sub>와 입자개수농도는 유사한 분포특성을 보이고 있어 서해상으로 함께 이동하는 것으로 추정할 수 있으며 모두 1,000 m 부근에서 최고농도를 나타내는 특징을 나타내고 있다. 대기 중에 존재하는 산화제는 SO<sub>2</sub>를 산화시켜 입자상 황산염으로 변환시킨다(Zhang and Carmichael, 1999; Dentener *et al.*, 1996; Zhang, 1994)고 알려져 있으나 O<sub>3</sub>은 뚜렷한 상관성을 나타내지 않아 SO<sub>2</sub>와 함께 증가하는 경향을 나타내는 입자개수농도를 명확하게 설명하기에는 어려우며 추후 자세한 연구가 필요하다. 본 연구에서 측정된 입자 개수 농도는 Osada *et al.*(2002)이 측정된 일본 배경지역의 입자 개수 농도에 비해 약 10% 수준이며 NDOEX 측정결과(Marian *et al.*, 2001)와 비교하면 accumulation 입자크기 영역에서도 역시 10% 수준으로 나타났다. 본 측정에

사용된 측정기는 0.3µm 이하의 입자를 측정할 수 없는 한계로 인해 이와 같은 차이가 나타난 것으로 판단되며 추후 항공측정에서는 보다 작은 영역의 입자개수 농도를 측정할 수 있는 측정 시스템을 준비하고 있다.

Tu *et al.*(2003)이 125.4°E 선상을 따라 위도 30~36° 지역을 측정한 결과, 2km 이하의 고도에서 SO<sub>2</sub>는 다양한 형태의 분포를 하고 있는 것으로 나타났다. 특히 36°N에서는 2,000 m의 고도에서도 4ppb에 달하는 고농도가 나타나 위도에 따른 SO<sub>2</sub>의 농도구배 (gradient)를 뚜렷하게 보여주고 있다. 이러한 농도 분포를 일으키는 여러 가지 요인들, 예를 들어 풍속, 습도, 수직적 난류의 세기, 안정도, 기류의 이동경로 등등, 이러한 요인들에 의해 서해상의 SO<sub>2</sub> 농도 역시 특정한 형태의 분포형태를 나타낼 것으로 추정할 수 있다. 고도에 따른 SO<sub>2</sub>의 분포특성은 대기오염물질의 이동량, 침적량(wet and dry) 등의 모델 모사에 중요한 자료이며 특히 이동량(유입량)의 계산에는 가장 기본적인 자료이다. 다음 절에서는 항공기를 이용한 고도별 측정자료와 태안의 안면도 해상에서 측정된 상층기상자료를 이용하여 서해상에 존재하는 SO<sub>2</sub>의 일반적인 분포 형태를 분류하였으며 간략하나마 실험적으로 수식화하여 이동량 계산의 기본적인 자료로 사용할 수 있도록 하였다.

### 3.2 서해상 SO<sub>2</sub>의 연직 분포형태

항공기를 이용한 고도별 측정자료와 태안의 안면도 해상에서 측정된 상층기상자료를 이용하여 서해

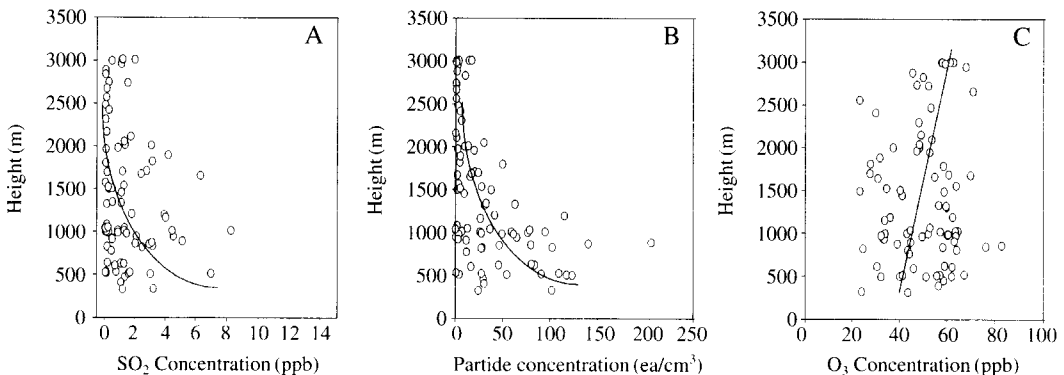


Fig. 3. Vertical profile of (A) SO<sub>2</sub>, (B) particle number, and (C) O<sub>3</sub> concentration for each aircraft measurement in 1997~2001.

상에 존재하는 SO<sub>2</sub>의 일반적인 분포 형태를 분류하고자 하였으며 이동량 계산의 기본적인 자료로 사용할 수 있을 것이다.

SO<sub>2</sub>의 연직분포형태를 추정하기 위해 사용된 항공관측 자료는 15회이다. 15회의 측정에서 관측된 연직분포 형태를 기상자료와 결합하여 형태를 분류하였으며 혼합층 이하와 이상을 분리하여 구분하였다.

혼합층 이하에서는 고도에 의해 농도가 결정되는 3가지 형태로 분류하였다. 3가지 형태는 고도가 증가함에 따라 농도는 선형으로 감소하는 형태(Linear Decay, 이하 Case 1로 함), 지수함수적으로 감소하는 형태(Exponential Decay, 이하 Case 2로 함), 혼합층 중간고도에서 정규분포의 형태(Gaussian Distribution, 이하 Case 3으로 함)를 갖는 형태이다.

Hatakeyama *et al.* (1995)은 SO<sub>2</sub>의 농도를 고도에 대한 지수함수의 형태로 표현하였고, Tu *et al.* (2003)이 측정한 결과에서는 선형감소 형태, 지수함수적 감소형태, 그리고 정규분포 형태와 같은 형태들이 나타

나고 있다. Tu *et al.* (2003)은 3차원 초음파풍향계를 이용하여 측정한 수직적 난류를 결정하는 인자의 하나로 설명하였으나 본 연구에서는 난류의 영향을 측정할 수 없었으므로 기상자료를 이용하여 구한 안정도를 형태를 판단하는 기준의 하나로 하였다. 또한 혼합고 이상의 상층에서는 거의 농도의 변동이 일어나지 않았으나 서서히 선형으로 감소하는 형태(Linear Decay, 이하 Case 5로 함)와 하층에서는 저농도이지만 상층에서 고농도가 나타나는 정규분포의 형태(Gaussian Distribution, 이하 Case 4로 함)의 2가지 형태로 구분하였다. 그림 4~7에 각각의 형태에 대한 농도 및 기상자료를 나타내었다.

### 3.2.1 선형 감소 형태

Case 1은 그림 4의 A)로, 고도가 증가하면서 SO<sub>2</sub>의 농도가 선형으로 감소하는 형태이다. 먼저 온위를 살펴보면 그림 B)에서와 같이 하층의 공기 밀도는 낮고 상층의 밀도는 높아 혼합이 쉬운 조건이었으며 안정도는 약한 불안정(moderately unstable, B)인 상

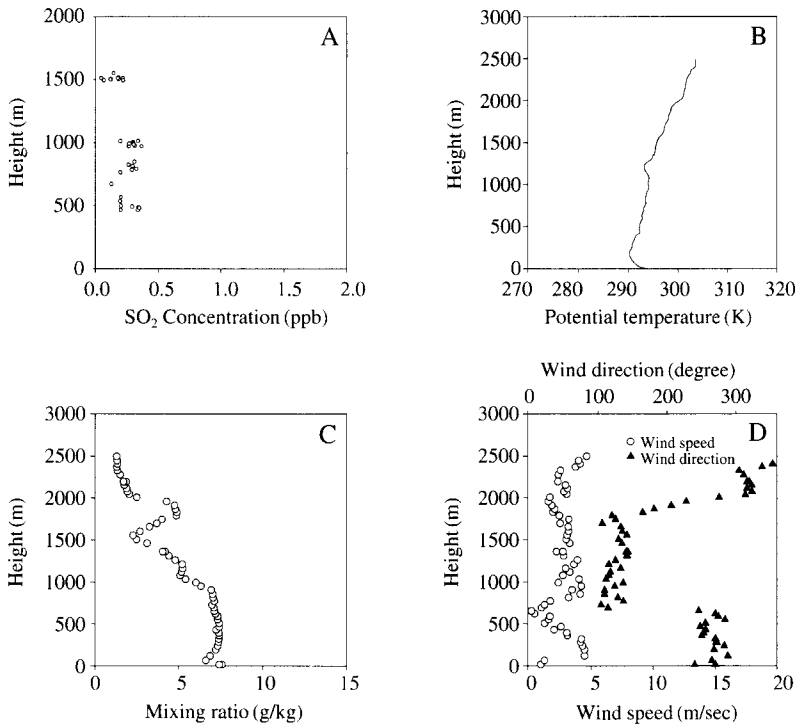


Fig. 4. Vertical profile of A) SO<sub>2</sub>, B) potential temperature, C) water vapor mixing ratio and D) wind speed & direction for Case 1 (1998.04.27.AM.).

태었다. 즉 대기가 불안정하여 수직적 혼합이 활발히 일어났을 것이며 평균 풍속은 3.5 m/s 정도로 비교적 약한 편이었으므로 배출된 SO<sub>2</sub>는 수직적인 혼합이 우세한 가운데 서서히 서해상으로 이동하였을 것이다. 대기중의 수증기량 역시 혼합층 고도인 1,000 m까지는 7 g/kg으로 일정하였고 혼합층 이상에서는 감소하였다. SO<sub>2</sub>의 산화반응을 일으키는 중요한 매개체인 입자역시 개수농도는 29~41 #/cm<sup>3</sup> 정도로 낮은 농도를 보였다. 따라서 수직적 혼합이 고도별 농도를 결정하는 주된 인자였으며 결과적으로 SO<sub>2</sub>는 선형적으로 감소하는 형태를 나타내었을 것으로 추정된다.

3.2.2 지수함수적 감소 형태

Case 2의 경우는 그림 5의 A)와 같이 고도가 증가 하면서 농도는 지수함수적으로 감소하는 형태이다 (Hatakeyama *et al.*, 1995). 안정도는 약한 안정 (slightly Stable, E)으로 대기의 수직적 혼합은 Case 1에 비하여 약한 편이며 풍속은 3.9 m/s로 약한 바람이 부는 조건이었다. 입자개수농도 역시 하층에서 25

#/cm<sup>3</sup>로 낮은 농도를 나타내었다. 이런 조건에서 배출된 SO<sub>2</sub>는 활발한 수직적 혼합 없이 서해상으로 이동하였을 것이며 그 결과 하층의 농도는 높고 고도가 증가함에 따라 농도가 급격히 감소하는 지수함수의 형태로 감소하는 농도형태를 나타내었을 것이다. 다만 수증기량은 8~10 g/kg으로 높게 나타나고 있으나 이는 부분적으로 형성된 구름층의 영향을 받은 것으로 추정된다.

3.2.3 정규분포 형태

Case 3의 분포 형태는 살펴보면 고도 1,000 m에서 SO<sub>2</sub> 농도가 측정기간 중 가장 높은 농도를 보이는 peak를 나타나며 다시 감소하여 그림 6의 A)와 같은 형태를 갖는 경우이다. 또한 혼합층 내에서 11.6 m/s 강한 풍속을 나타내며 수증기량은 6 g/kg으로 나타났으며 대기중에 구름층이 거의 발달하지 않은 기상조건을 나타내었다. 빠른 풍속으로 인해 배출된 SO<sub>2</sub>는 수직적 확산보다는 plume의 형태로 서해상으로 이동하는 것으로 볼 수 있다. 만약 중국의 Shandong 반도

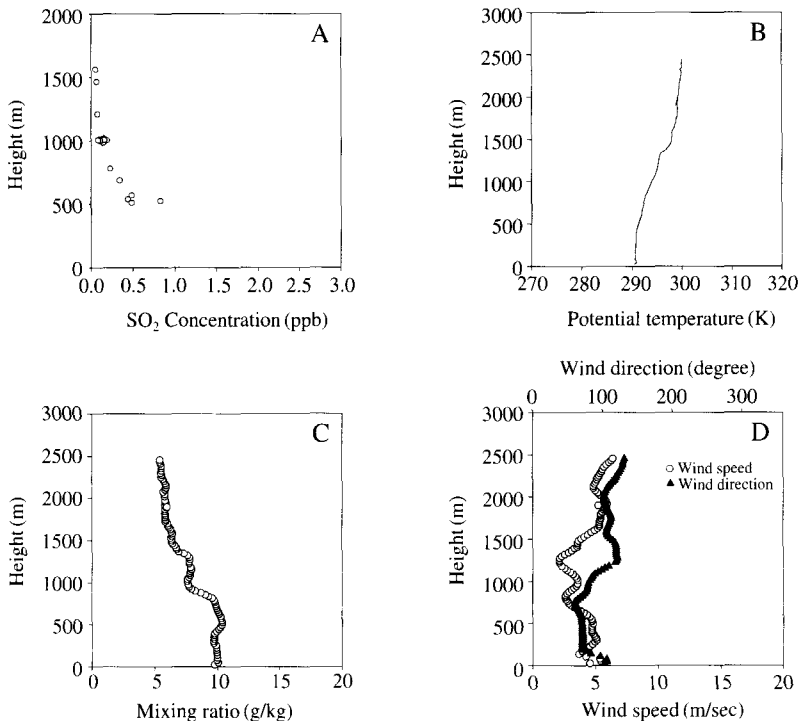


Fig. 5. Vertical profile of A) SO<sub>2</sub>, B) potential temperature, C) water vapor mixing ratio and D) wind speed & direction for Case 2 (2000. 06. 11. AM.).

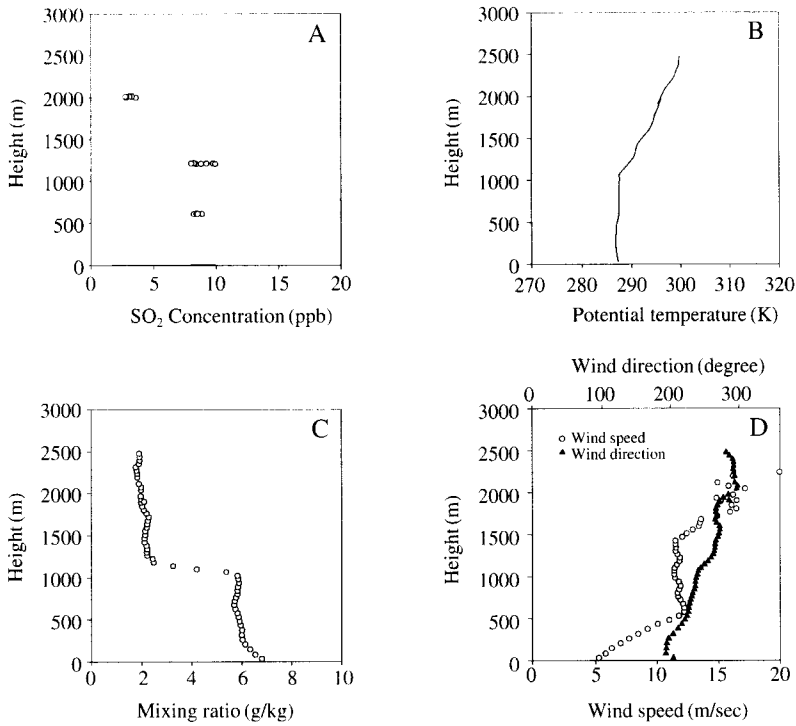


Fig. 6. Vertical profile of A) SO<sub>2</sub>, B) potential temperature, C) water vapor mixing ratio and D) wind speed & direction for Case 3 (1998. 11. 08. AM.).

지역의 오염물질이 이동하였다고 가정하면 평균 풍속이 11.6 m/s이므로 대략 7~12시간 후에 서해상에 도착하였을 것이므로(Chun, 2001) 수직적 확산보다는 이류(entrainment)에 의한 수송과정으로 특징을 설명할 수 있다. 따라서 분포형태를 Gaussian Distribution의 형태로 하였다. 이 경우에는 입자개수농도 또한 117~94 #/cm<sup>3</sup>로 나타나 입자와 함께 이동하는 현상이 뚜렷하게 나타나고 있고(Osada *et al.*, 2002) 풍향도 모든 고도에서 서풍이 일정하게 유지되고 있었다.

만약 같은 경우에서 풍속이 느려진다면 peak 농도가 낮아지면서 주변 고도의 SO<sub>2</sub> 농도는 높아지는 모습을 나타낼 것이다. 또한 이 과정이 진행되면 결국에는 Case 1의 형태를 나타낼 것이다. 항공측정이 고도 3 km의 제한적인 고도 내에서만 이루어졌고 측정 과정에서도 항공기의 제한으로 인해 더 자세하게 고도를 나누어 측정하지 못하였으므로 더 넓은 scale의 분포특성을 조사하지는 못하였지만, 그림 6을 참고할

때 Case 1의 경우는 Case 3의 경우가 시간이 경과한 후의 형태로 생각 할 수도 있다. 즉 SO<sub>2</sub>는 강한 풍속과 낮은 습도 조건에서 plume의 형태로 배출되나 이동하는 과정에서 수직적 혼합으로 인해 Case 1의 형태로 서해상에 도착하는 것으로 고려할 수 있고 이런 현상은 SO<sub>2</sub>의 수직적 농도 분포에서 1,000 m에서 최고 농도가 나타난 결과를 잘 설명해주고 있다. 혼합층 이하에서는 위와 같은 3가지 형태로 특징이 나타났다.

### 3.2.4 혼합층 상층에서의 연직분포 형태

혼합층 이상의 경우인 Case 4의 경우(그림 7)는 매우 특이하다. 2001년 4월 13일은 황사의 영향이 남아 있는 기간이었다. 농도분포를 살펴보면 하층에서는 지수함수의 형태로 감소하는 경향이 나타나고 있으며 고도 1,000 m에서는 농도가 매우 낮은 농도로 감소하는 Case 2의 형태를 보여주고 있으나 고도 2,000 m 부근에서 약 5 ppb의 고농도를 나타내는 형



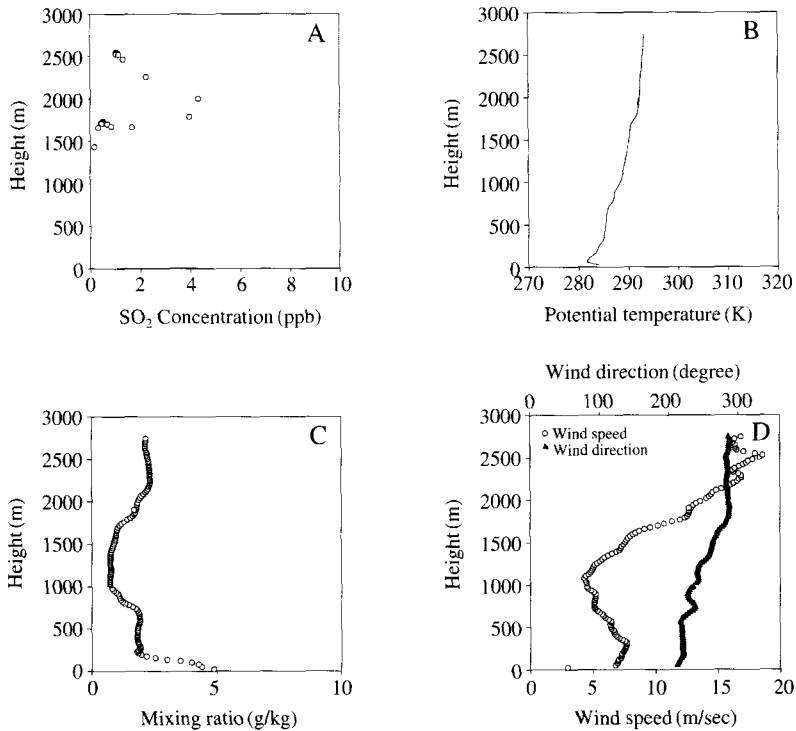


Fig. 7. Vertical profile of A) SO<sub>2</sub>, B) potential temperature, C) water vapor mixing ratio and D) wind speed & direction for Case 4 (2001. 04. 13. PM.).

태를 보여주고 있다. 고농도가 나타나는 고도의 폭은 약 500m 정도로 Case 3에 비해 폭이 작은 특징을 나타내며 역시 낮은 수증기량과 강한 서풍의 특징을 가지고 있다. 입자개수농도 또한 상층에서는 최고값을 나타내었다. Case 4의 경우는 Case 3과 같이 정규분포의 형태로 하였다. 이 측정결과는 서해상의 SO<sub>2</sub>가 서로 다른 두 개의 오염층에 의해 각각 다른 대기오염물질의 장거리이동현상을 잘 보여주고 있다 (Uematsu *et al.*, 2002).

혼합층 이상에서는 Case 4를 제외하고는 거의 농도가 일정하면서 감소하는 형태가 나타났다. 혼합층 이상에서는 혼합층 아래의 안정도보다 1단계 높은 정도의 안정도가 나타났으며 따라서 대부분의 경우 혼합층 이상은 비교적 안정한 상태이었고 습도는 급격하게 감소하며 풍향은 지균풍의 영향으로 거의 서풍 계열의 바람이었다. 혼합층 이상은 선형적으로 감소하는 형태의 Case 5로 분류하였고 이는 Case 1과 같은 형태이므로 그림은 나타내지 않았다.

표 2에 SO<sub>2</sub> 연직분포를 각각의 Case별로 나누어 정리하였고 혼합층 상층과 하층의 기상특징을 정리하여 함께 나타내었다. 혼합층 하층의 경우, Case 2의 형태로 분류된 경우가 모두 7회로 가장 많아 서해상에 분포하는 SO<sub>2</sub>는 고도가 증가하면서 농도는 감소하는 경향을 보여주고 있으나 기상조건에 따라서는 1,000m 부근에서 고농도의 peak를 가지는 연직분포 특징을 나타내는 것으로 판단된다. 혼합층 상층의 경우 Case 4는 1회만이 해당되어 황사와 같은 특이한 경우에 해당되었으며 Case 4를 제외하고는 모두 Case 5로 조사되어 혼합층 상층에서의 농도분포 특징은 하층에 비해 단순한 형태를 나타내는 것으로 조사되었다.

### 3.3 SO<sub>2</sub> 연직분포 형태의 수식화

앞 장에서 SO<sub>2</sub> 농도는 다양한 기상인자들에 의해 고도별로 다른 특징을 나타내는 것으로 확인되었다. 형태에 따라 구분한 5개의 Case는 고도(Z)에 대한

**Table 2. Summary of meteorological parameters and conditions for different SO<sub>2</sub> vertical profile in Case 1, 2, 3 and 4.**

Date	Item	Mixing height (m)	Pasquill stability class	Air mass flow direction	Wind speed (m/s)		Wind direction (degree)		Relative humidity (%)	
					Below <sup>1)</sup>	Above <sup>2)</sup>	Below	Above	Below	Above
Case 1										
98. 04. 27 AM		1200	B	Southerly	3.5 (1.2)	5.2 (2.7)	110 (50)	360 (60)	65 (6)	44 (23)
00. 06. 09 PM		1500	D	Northerly	1.9 (1.2)	5.3 (1.4)	262 (21)	247 (10)	99 (3)	84 (20)
00. 06. 10 PM		2000	C	Northerly	2.4 (1.3)	6.2 (0.8)	261 (18)	241 (6)	99 (2)	76 (21)
Case 2										
98. 04. 27 PM		1500	C	Southerly	2.8 (1.3)	3.8 (2.3)	196 (73)	300 (134)	62 (7)	31 (15)
98. 11. 09 PM		1800	C	Northerly	13.7 (1.7)	16.8 (3.8)	332 (8)	322 (13)	60 (15)	42 (13)
98. 11. 10 PM		1200	D	Westerly	6.5 (2.8)	3.1 (2.6)	358 (10)	328 (28)	41 (4)	29 (3)
99. 04. 11 PM		1300	E	Southerly	5.3 (1.7)	4.7 (4.0)	177 (21)	149 (17)	55 (4)	22 (3)
00. 06. 11 AM		1100	E	Easterly	3.9 (1.0)	5.2 (0.7)	90 (21)	129 (19)	84 (11)	80 (7)
00. 06. 11 PM		1600	E	Easterly	3.9 (1.0)	5.2 (0.7)	90 (21)	129 (19)	84 (11)	80 (7)
01. 04. 13 PM		1500	E	Westerly	6.6 (1.7)	16.0 (1.9)	238 (21)	286 (3)	22 (11)	53 (12)
Case 3										
98. 11. 08 AM		1100	C	Westerly	10.2 (2.3)	16.2 (4.1)	221 (17)	279 (15)	77 (9)	32 (6)
98. 11. 08 PM		1500	D	Westerly	11.6 (1.8)	23.2 (18.6)	230 (10)	298 (53)	80 (7)	34 (12)
00. 11. 15 PM		1000	E	Northwesterly	0.8 (0.2)	1.6 (0.7)	214 (81)	255 (24)	59 (6)	17 (13)
01. 11. 07 PM		1300	D	Northwesterly	5.2 (2.0)	7.7 (0.6)	353 (39)	318 (40)	61 (8)	22 (17)
Case 4										
01. 04. 13 PM		1500	E	Westerly	6.6 (1.7)	16.0 (1.9)	238 (21)	286 (3)	22 (11)	53 (12)

Parenthesis denotes the standard deviation.

<sup>1)</sup>: average value below mixing height, <sup>2)</sup>: average value above mixing height.

**Table 3. The equation expressions and constants of SO<sub>2</sub> vertical profiles for each Case.**

Case	R	Parameter			
		Coefficient	Standard error	P	
Case 1	0.69	z <sub>1</sub>	0.323	0.018	<0.0001
		a <sub>1</sub>	-1.0 × 10 <sup>-4</sup>	0.0000	<0.0001
Case 2	0.90	b <sub>2</sub>	2.624	0.556	<0.0001
		a <sub>2</sub>	0.003	0.0003	<0.0001
Case 3	0.97	z <sub>3</sub>	868.0	18.37	<0.0001
		b <sub>3</sub>	0.605	0.024	<0.0001
Case 4	0.75	a <sub>3</sub>	10.10	0.261	<0.0001
		z <sub>4</sub>	2101.7	26.09	<0.0001
Case 5	0.67	b <sub>4</sub>	242.0	24.01	<0.0001
		a <sub>4</sub>	4.041	0.695	<0.0001
Case 5	0.67	z <sub>5</sub>	0.294	0.026	<0.0001
		a <sub>5</sub>	-2.04 × 10 <sup>-5</sup>	-1.01 × 10 <sup>-5</sup>	<0.0001

C<sub>1</sub> = z<sub>1</sub> + a<sub>1</sub>Z Case 1

C<sub>2</sub> = a<sub>2</sub>e<sup>[-b<sub>2</sub>Z]</sup> Case 2

C<sub>3</sub> = a<sub>3</sub>e<sup>[-0.5 × (Z-z<sub>3</sub>)/b<sub>3</sub>]</sup> Case 3

C<sub>4</sub> = a<sub>4</sub>e<sup>[-0.5 × (Z-z<sub>4</sub>)/b<sub>4</sub>]</sup> Case 3

C<sub>5</sub> = z<sub>5</sub> + a<sub>5</sub>Z Case 5

각각의 Case에 대한 함수 f(z<sub>i</sub>)의 상수값 (constant) 들을 구하기 위해 비선형 회귀분석 (non-linear regression) 방법을 이용, 상수값들을 구하였고, 표 3에 각각의 상수값들을 정리하였다. 그림 8에 각 Case에 대한 측정값(circle)과 계산되어진 농도값(solid line)을 함께 나타내었다.

Case 2, 3, 4의 상관계수는 0.90, 0.97, 0.75로 구해져 측정값과 통계식이 잘 일치하고 있는 것으로 판단된다. Case 1, 5는 0.69, 0.67로 약간 낮은 상관성이 나타났다. Case 5의 가장 낮은 상관성은 혼합층 이상에서는 측정고도를 세분하지 않고 2,000 m와 3,000 m 고도만을 측정하였기에 나타난 결과로 해석된다. 각각의 상수들에 대한 유의수준은 모두 0.0001보다 작

농도(C)의 함수, C<sub>i</sub> = f(z<sub>i</sub>)로 표현할 수 있다. 구해진 농도 함수 C<sub>i</sub>는 서해안으로 유입(유출)되는 SO<sub>2</sub>의 이동량을 구하는 기본적인 자료로 이용될 수 있다.

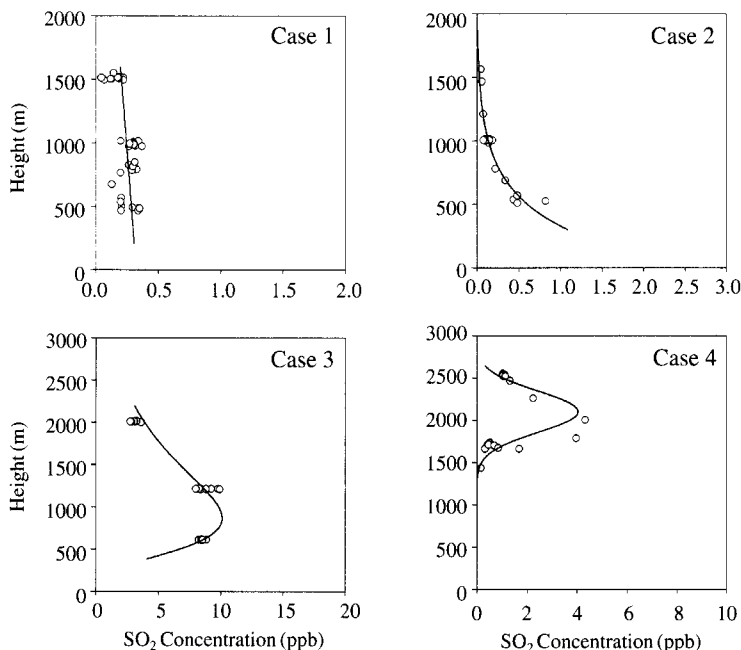


Fig. 8. Estimated SO<sub>2</sub> concentration (solid line) and measurement SO<sub>2</sub> concentration (circle).

아 구해진 통계식이 의미가 있는 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

한반도 서해상에서 SO<sub>2</sub>의 장거리 이동현상에 대한 이해를 높이기 위해 97년 10월부터 01년 11월까지 5년에 걸친 15회의 항공측정을 이용하여 SO<sub>2</sub>의 공간적 분포와 연직 분포 특징을 조사하였다.

서해상의 혼합층 내에서 이동하는 SO<sub>2</sub>의 농도는 1,000 m에서 가장 높은 2.0 ppb를 나타내었고 500, 2,000 m에서 1.5, 1.1 ppb를, 3,000 m에서는 0.6 ppb의 농도를 나타냈다. 이는 해양지역의 배경농도인 0.08~0.2 ppb 보다 높은 농도로서 인위적인 오염물질인 SO<sub>2</sub>가 서해상으로 장거리 이동하고 있음을 확인하였다.

SO<sub>2</sub>의 연직 분포특징을 조사하기 위해 고도별 비행자료와 상층기상 측정자료를 이용하여 농도의 형태를 혼합층 이하와 이상으로 구분하여 조사하였다. 혼합층 아래에서 3가지 형태가 특징적으로 나타났다. 각각의 형태는 선형으로 감소하는 형태(Linear Decay pattern), 지수함수적으로 감소하는 형태(Exponential

Decay pattern), 혼합층 중간고도에서 정규분포의 형태(Gaussian Distribution pattern)로 나타났다. 지수함수적으로 감소하는 형태는 가장 많은 횟수를 나타내었으며 고농도가 나타나는 정규분포의 형태는 1,000 m에서 가장 높은 농도를 나타내는 이유를 잘 설명하고 있다. 상층에서는 선형으로 감소하는 형태(Linear Decay pattern), 정규분포의 형태(Gaussian Distribution pattern)의 2가지로 분류할 수 있었고 Case 4에서는 한반도 서해상에서 하층과 상층이 서로 다른 기류에 의해 오염물질을 수송하고 있는 현상을 확인하였다.

#### 참 고 문 헌

국립환경연구원 (1999) 장거리이동 대기오염물질의 공간 분포 및 변화에 관한 연구(II).  
 국립환경연구원 (2000) 동북아대기오염 감시체계구축 및 환경보전협력사업(I).  
 국립환경연구원 (2001) 동북아대기오염 감시체계구축 및 환경보전협력사업(II).

- 김병곤, 안준영, 한진석 외 3명 (1997) 항공기를 이용한 서해 안에서의 SO<sub>2</sub> 및 NO<sub>x</sub>의 측정. 한국대기보전학회지, 13(5), 361-369.
- Akimoto, H. and N. Kato (1992) Anthropogenic emissions of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> in Asia. *Atmospheric Environment*, 26, 2997-3017.
- Akimoto, H. and H. Narita (1994) Distribution of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion and industrial activities in Asia with 1° × 1° resolution. *Atmospheric Environment*, 28213-28225.
- Andreae, M.O. and P.J. Crutzen (1997) Atmospheric aerosols : biogeochemical sources and role in atmospheric chemistry. *Science*, 276, 1052-1058.
- Bates, T.S., D.J. Coffman, D.S. Covert, and P.Q. Patricia (2002) Regional marine boundary layer aerosol size distributions in the Indian, Atlantic, and Pacific Oceans: A comparison of INDOEX measurements with ACE-1, ACE-2, and Aerosols99. *Journal of Geophysical Research*, 107, INX 25-1-25-15.
- Carmichael, G.R. (2003) Emission data. [http://www.cgrer.uiowa.edu/people/carmichael/ACCESS/Emission-data\\_main.html](http://www.cgrer.uiowa.edu/people/carmichael/ACCESS/Emission-data_main.html), University of Iowa.
- Charlson, R.J., J. Lagner, H. Rodhe, C.B.L. Eovy, and S.G. Warren (1991) Perturbation of the northern hemisphere radiative balance by backscattering from anthropogenic aerosols. *Tellus* 43AB, 152-163.
- Chun, Y.S., K.O. Boo, J.Y. Kim, S.U. Park, and M.H. Lee (2001) Synopsis, transport, and physical characteristics of Asian dust in Korea. *Journal of Geophysical Research*, 106, 18461-18494.
- Clarke, A.D., W.G. Collins, P.J. Rasch, V.N. Kapustin, K. Moore, S. Howell, and H.E. Fuelberg (2001) Dust and pollution transport on global scales: Aerosol measurements and model predictions. *Journal of Geophysical Research*, 106, 32555-32569.
- Dentener, F.J., G.R. Carmichael, Y. Zhang, J. Lelieveld, and P.J. Crutzen (1996) Role of mineral aerosol as a reactive surface in the global troposphere. *Journal of Geophysical Research*, 101, 22869-22889.
- Huebert, B., T. Bates, P. Russell, J. Seinfeld, M. Wang, M. Uematsu, and Y.J. Kim (2003) An overview of ACE-Asia: Strategies for quantifying the relationships between Asian aerosols and their climatic impacts. *Journal of Geophysical Research*, 108, 18361-18370.
- Hatakeyama, S., K. Murano, H. Bandow, F. Sakamaki, M. Yamato, S. Tanaka, and H. Akimoto (1995) The 1991 PEACAMPOT aircraft observation of ozone, NO<sub>x</sub>, and SO<sub>2</sub> over the East Sea, the Yellow Sea, and the Sea of Japan. *Journal of Geophysical Research*, 100, 12143-23151.
- Hatakeyama, S., K. Murano, H. Mukai, F. Sakamaki, H. Bandow, I. Watanabe, M. Yamato, S. Tanaka, and H. Akimoto (1997) SO<sub>2</sub> and sulfate aerosols over the Seas between Japan and the Asian continent. *Journal of Aerosol Research*, 12, 91-95.
- Hatakeyama, S., K. Murano, F. Sakamaki, H. Mukai, H. Bandow, and Y. Komazaki (2001) Transport of atmospheric pollutants from East Asia. *Water, Air and Soil Pollution*, 130, 373-378.
- Jaffe, D.A., A. Mahura, J. Kelley, J. Atkins, P.C. Novelli, and J. Merrill (1997) Impact of Asian emissions on the remote North Pacific atmosphere : Interpretation of CO data from Shemya, Guam, Midway, and Mauna Loa. *Journal of Geophysical Research*, 102, D23, 28627-28636.
- Jaffe, D.A., T. Anderson, D. Covert, R. Kotchenruther, B. Trost, J. Danielson, W. Simpson, T. Berntsen, S. Karlsdottir, D. Blake, J. Harries, G.R. Carmichael, and I. Uno (1999) Transport of Asian air pollutant to North America. *Geophysical Research Letters*, 26, 26711-26714.
- Jaffe, D.A., I. McKendry, T. Anderson, and H. Price (2003) Six 'new' episodes of trans-Pacific transport of air pollutants. *Atmospheric Environment*, 37, 3391-3404.
- Koch, D (2001) Transport and direct radiative forcing of carbonaceous and sulfate aerosols in the GISS GCM. *Journal of Geophysical Research*, 106, 20311-20332.
- Marian D.R., R. Krejci, J. Williams, H. Fischer, R. Scheele, and J. Strom (2002) Vertical and horizontal distributions of the aerosol number concentration and size distribution over the northern Indian Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 106, 28629-28641.
- Osada, K., M. Kido, C. Nishita, K. Matsunaga, Y. Iwasaka, M. Nagatani, and H. Nakada (2002) Changes in ionic constituents of free tropospheric aerosol particles obtained at Mt. Norikura (2,770 m a.s.l.), central Japan, during the Shurin period in 2000. *Atmospheric Environment*, 36, 5469-5477.
- Park, S.U. and H.J. In (2002) Simulation of long-rang transport of acidic pollutants in East Asia during the Yellow Sand event. *Atmospheric Environment*, 36,

- 4877-4893.
- Prospero, J.M. (1999) Long-term measurements of the transport of African mineral dust to the southeastern United States: Implications for regional air quality. *Journal of Geophysical Research*, 104, 15917-15927.
- Streets, D (2003) An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000. *Journal of Geophysical Research*, 108.
- Thornton, D.C., A.R. Bandy, B.W. Blomquist, A.R. Driedger, and T.P. Wade (1999) Sulfur dioxide distribution over the Pacific Ocean, 1991-1996. *Journal of Aerosol Research*, 104, 5845-5854.
- Thornton, D.C., A.R. Bandy, B.W. Blomquist, D.D. Davis, and R.W. Talbot (1996) Sulfur dioxide as a source of condensation nuclei in the upper troposphere of the Pacific Ocean. *Journal of Aerosol Research*, 101, 1883-1890.
- Thornton, D.C., A.R. Bandy, B.W. Blomquist, R.W. Talbot, and J.E. Dibb (1997) Transport of sulfur dioxide from the Asian Pacific Rim to the North Pacific troposphere. *Journal of Aerosol Research*, 102, 28489-28499.
- Thornton, D.C., A.R. Bandy, F.H. Tu, B.W. Blomquist, G.M. Mitchell, W. Nadler, and D.H. Lenschow (2002) Fast airborne sulfur dioxide measurements by atmospheric pressure ionization mass spectrometry (APIMS). *Journal of Geophysical Research*, 107, 4632.
- Tu, F.H., D.C. Thornton, A.R. Bandy, M.S. Kim, G.R. Carmichael, Y. Tang, L. Thornhill, and G. Sachse (2003) Dynamics and transport of sulfur dioxide over the Yellow Sea during TRACE-P. *Journal of Geophysical Research*, 108, 8790.
- Uematsu, M., A. Yoshikawa, H. Muraki, K. Arao, and I. Uno (2002) Transport of mineral and anthropogenic aerosols during a Kosa event over East Asia. *Journal of Geophysical Research*, 107, D7, AAC 3-1-3-7.
- Zhang, Y. (1994) The chemical role of mineral aerosol in the troposphere in east Asia. Ph.D Thesis, Department of Chemical and Biochemical Engineering, University of Iowa.
- Zhang, Y. and G.R. Carmichael (1999) Role of mineral aerosol as a reactive surface in the global troposphere. *Journal of Applied Meteorology*, 38, 353-366.