

인공위성 (SCIAMACHY) 데이터를 이용한 대류권 SO₂, NO₂ 측정: 2006년 동북아시아 지역의 계절적 SO₂, NO₂ 변화 추세

Satellite (SCIAMACHY) Measurements of Tropospheric SO₂ and NO₂: Seasonal Trends of SO₂ and NO₂ Levels over Northeast Asia in 2006

이철규^{1),2)} · Andreas Richter¹⁾ · John P. Burrows¹⁾ · 김영준^{2),*}

¹⁾독일 브레멘대학교 환경물리/원격탐사연구소,

²⁾광주과학기술원 환경공학과 환경모니터링 신기술연구센터

(2007년 7월 17일 접수, 2008년 2월 20일 채택)

Chulkyu Lee^{1),2)}, Andreas Richter¹⁾, John P. Burrows¹⁾ and Young J. Kim^{2),*}

¹⁾*Institute of Environmental Physics and Remote Sensing, University of Bremen, Bremen, Germany*

(Now at Department of Physics and Atmospheric Science, Dalhousie University,

Halifax, Nova Scotia, B3H 3J5, Canada),

²⁾*Advanced Environmental Monitoring Research Center, Gwangju Institute of Science and
Technology, Gwangju 500-712, Korea*

(Received 17 July 2007, accepted 20 February 2008)

Abstract

Anthropogenic emissions of nitrogen oxides and sulfur dioxide in Northeast Asia are of great concern because of their impact on air quality and atmospheric chemistry on regional and intercontinental scales. Satellite remote sensing based on DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy) technique has been preferred to measure atmospheric trace species and to investigate their emission characteristics on regional and global scales. Absorption spectra obtained by the satellite-born instrument, SCIAMACHY (Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography) have been utilized to retrieve the information of SO₂ and NO₂ over Northeast Asia. SO₂ levels over Northeast Asia were in order of East China, Yellow Sea, South Sea and Korean Peninsula with mean vertical columns of $1.78(\pm 1.0) \times 10^{16}$, $1.11(\pm 0.67) \times 10^{16}$, $0.60(\pm 0.63) \times 10^{16}$, $0.71(\pm 0.65) \times 10^{16}$ molecules/cm², respectively. NO₂ levels were in order of East China, Yellow Sea, Korean Peninsula, and South Sea with mean vertical columns of $1.2(\pm 0.56) \times 10^{16}$, $0.38(\pm 0.19) \times 10^{16}$, $0.48(\pm 0.28) \times 10^{16}$, $0.26(\pm 0.16) \times 10^{16}$ molecules/cm², respectively. High levels of SO₂ and NO₂ were observed over East China, in particular in winter by the contribution of heating fuel combustion exhausts. The SO₂ and NO₂ levels over East China were the highest in January with 34% and 42% higher over the annual means. Low levels of SO₂ ranged over Korean peninsula, while NO₂ levels were relatively high, in particular in winter. The SO₂ and NO₂ levels over Yellow Sea were relatively

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)62-970-3401, E-mail : yjkim@gist.ac.kr

higher compared to those over Korean peninsula and South Sea, which could be mainly attributed to their transport from East China.

Key words : Satellite remote sensing, DOAS, SO₂, NO₂, Air pollution

1. 서 론

지난 10여 년 동안 인공위성 원격측정 기술을 이용한 대기환경 모니터링은 대기 중 미량물질을 측정하는 데 새로운 방향을 제시하였다(Buchwitz *et al.*, 2005; Bovensmann *et al.*, 1999; Burrows *et al.*, 1999). 원격측정기술은 수 년 이상의 오랜 시간 동안의 전 지구적 분포를 측정할 수 있는 장점이 있으나, 지점 모니터링 측정기술 등과 같이 공기를 포집 혹은 흡입하여 분석하는 기술들에 비해 대기 산란의 조건에 크게 의존하는 단점이 있다(Richter *et al.*, 2005; Chance, 1998; Wagner and Platt, 1998; Platt, 1994). 원격측정기술에서 흡수 분광학은 대기기준물질 및 미량물질(예, BrO, CH₄, CHOCHO, ClO, CO₂, HCHO, H₂O, NO₂, O₃, OCIO, SO₂)의 측정에 적용되어 왔다(Lee *et al.*, 2008; Wittrock *et al.*, 2006; 이철규와 김영준, 2006; Lee *et al.*, 2005; Richter *et al.*, 2005; 이철규 등, 2005; Wagner and Platt, 1998; Platt, 1994). 이러한 흡수 분광학 기술 중 DOAS(Differential Optical Absorption Spectroscopy, 차등흡수분광법) 기술은 1970년대부터 실시간으로 대기 중 미량물질을 검출하는데 우수한 기술로 인정되어 왔고, 특히 DOAS기술이 결합된 인공위성 측정기술은 전지구적, 지역적 규모에서 대기미량물질 측정에 이용되어 왔다. DOAS 기술은 자외선-가시광선 영역에서 인공위성 자료로부터 BrO, CHOCHO, HCHO, NO₂, O₃, OCIO, SO₂ 등의 많은 물질의 검출, 측정에 적용되었다(Wittrock *et al.*, 2006; Richter *et al.*, 2005; Afe *et al.*, 2004; Bogumil *et al.*, 2003; Chance, 1998; Wagner and Platt, 1998). 인공위성자료를 이용한 SO₂, NO₂ 수준 및 변화에 대한 연구는 지역적, 대륙적 규모에서 발생량, 발생원 및 장거리 이동을 연구하는 데 중요한 방향을 제시하고 있다(Lee *et al.*, 2008; Richter *et al.*, 2005).

동북아시아 지역, 특히 중국에서의 빠른 산업화의 결과로 인한 SO₂ 및 NO₂의 배출과 동아시아 여러

나라로의 이동이 관심의 대상이 되고 있다(한진석 등, 2006; Guttikunda *et al.*, 2005; Richter *et al.*, 2005; 한진석 등, 2004; Beirle *et al.*, 2003; Koike *et al.*, 2003; Tan *et al.*, 2002; Leue *et al.*, 2001; 김용표, 1999). 현재까지 지점모니터링 방식에 의한 동아시아 대도시의 지표면 혹은 항공 SO₂, NO₂ 측정 자료가 보고된 바 있으나 지역적, 대륙적 규모의 보고는 미흡하다. 본 연구에서는 인공위성자료를 이용하여 2006년 동북아시아 지역의 SO₂ 및 NO₂의 수준 및 계절적 변화를 제시하였다.

2. SCIAMACHY 데이터 및 분석

인공위성측정기기인 SCIAMACHY(Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography, <http://www.iup.uni-bremen.de/sciamachy/>)는 2002년 3월에 발사된 유럽연합의 인공위성 ENVISAT(Environment Satellite)에 탑재되어 자외선, 가시광선, 근적외선 영역에서 태양직사광, 태양산란광, 지구에 의해 반사된 태양광 등을 다양한 방향에서 측정하고 있다(Bovensmann *et al.*, 1999; Burrows *et al.*, 1999). SCIAMACHY 기기는 GOME(Global Ozone Monitoring Experiment, <http://www.iup.uni-bremen.de/gome/>)의 확장 형태로 Nadir, Limb, Occultation 모드에서 측정을 수행한다. 측정 파장 영역은 220~2,400 nm이고 자외선 영역에서 0.25 nm, 가시광선 영역에서 0.4 nm, 근적외선 영역에서 >0.4 nm의 스펙트럼 분해능을 가진다(Bovensmann *et al.*, 1999; Burrows *et al.*, 1999). SCIAMACHY는 Nadir 모드에서 한국, 중국 동부, 일본 지역을 지역시간으로 오전 11시경, 11시 30분경, 10시 30분경에 통과하고 전 지역을 6일을 주기로 스캔한다(Bovensmann *et al.*, 1999).

본 연구에서 이용된 Nadir 측정모드는 인공위성 아래 지역의 대기를 통과하여 지표면에 의해 반사되거나 대기에 의해 산란되는 태양광들을 측정한다. 이러

한 광들은 측정과장영역에서 흡수밴드를 가지는 물질들의 대기 중 농도 및 분포에 대한 정보를 가지고 있다 (Platt, 1994). SCIAMACHY Nadir 측정의 지표면 픽셀 (Pixel) 크기는 파장범위와 태양고도각에 따라 다르지만 보통 약 30 × 30 km²이다. SCIAMACHY 자료로부터 여러 대기물질 (예, BrO, NO₂, CHOCHO, HCHO, SO₂, OClO, O₃, CO₂, CH₄ 등)이 분석되었다 (Lee et al., 2008; Wittrock et al., 2006; Richter et al., 2005; Afe et al., 2004; Burrows et al., 1999; Wagner and Platt, 1998; Eisinger and Burrows, 1998).

SCIAMACHY 데이터로부터 SO₂와 NO₂ 분석은 DOAS 방법에 근거하였으며 (Richter et al., 2005; Afe et al., 2004; Richter and Burrows, 2002; Eisinger and Burrows, 1998), 피팅 (Fitting) 조건은 표 1과 같다. 배경스펙트럼 (Background spectrum)은 SCIAMACHY의 ASM diffuser에 의해 매일 기록된 태양직사광을 사용하였다 (Bovensmann et al., 1999). 분석에서 구름에 의한 영향을 제거하기 위하여 지상픽셀에서 구름 분포율 0.6 이하인 측정 데이터만을 분석에 사용하였고, 구름분포율은 SCIAMACHY 측정으로부터 SACURA 알고리즘에 의해 얻어졌다 (Kokhanovsky et al., 2006). 측정된 총 SO₂ 및 NO₂의 양에서 성층권 존재하는 부분 및 위도별로 존재하는 오프셋 (Offset)을 제거하기 위하여 RSM (Reference Sector Method, 기준구역방법)을 사용하였다 (Martin et al., 2002; Richter and Burrows, 2002). RSM 방법은 총 칼럼 (Total column)의 양으로부터 태평양 지역인 경도 180~230° 상에서 같은 위도와 동일한 날짜에 측정된 칼럼의 양을 빼주는 방법으로, 동일한 위도 상의 성층

권에 존재하는 SO₂ 및 NO₂의 양은 일정하다는 가정 을 하고 있다 (Sierk et al., 2006; Richter and Burrows, 2002). RSM 방법을 이용한 대류권 SO₂, NO₂ 칼럼 계산은 성층권 내에 SO₂는 거의 존재하지 않고 NO₂는 대류권의 경우보다 더욱 균일하게 분포되어 있기 때문에 가능하다 (Martin et al., 2002; Richter and Burrows, 2002; Leue et al., 2001; Velders et al., 2001). 위 방법에 의해 계산된 대류권 경사칼럼 (Slant Column, SC)은 AMF (Airmass factor)를 사용하여 수직칼럼 (Vertical Column, VC)로 전환되었으며, AMF는 독일 환경물리연구소의 복사전달모델 SCIATRAN2.0으로 계산되었다 (Rozañov et al., 1997). SO₂ AMF는 다중 산란, 지표알베도 0.05, 40° 태양천정각 (Solar zenith angle), 해양 (LOWTRAN) 에어로솔 (Maritime (LOWTRAN) aerosol), 대기경계층용 SO₂ 수직분포도를 이용하여 계산되었다. 대기경계층용 SO₂ 수직 분포도에서 SO₂ 농도는 지표면에서 지상 1km까지 농도는 일정하고 1km에서 10km까지 지수함수로 감소하다가 11km에서 농도가 0으로 되었다. NO₂ AMF 계산에도 다중산란, 태양천정각, 지표알베도, 에어로솔, 대류권 용 NO₂ 수직분포도가 이용되었고, NO₂ AMF 계산을 위한 이러한 변수들은 대기화학이동모델 MOZART-2 (Horowitz et al., 2003)에 의해서 계산되었다 (Richter et al., 2005).

인공위성에 의한 대류권 SO₂와 NO₂ 측정에서의 에러는 피팅, 성층권에 존재하는 SO₂와 NO₂ 양의 제거, 잔여구름, AMF에 의해 주로 발생한다. NO₂ 피팅에서 발생하는 오차는 3 × 10¹⁵ molecules/cm² 이하 수준이나, SO₂ 피팅에서 발생하는 오차는 1 × 10¹⁶ molecules/cm²까지 이른다 (표 2 참조). SO₂ 피팅 파장 영역에는 대기 중에 다량으로 존재하는 O₃의 흡수 영역도 존재한다. SO₂ 피팅은 이런 오존에 의한 스펙트럼 간섭 영향을 받고 피팅 파장영역인 자외선 영역에서 위성센서 (Nadir 모드) 검출기에 기록되는 광양도 적어 상대적으로 큰 오차를 보인다 (Khokhar et al., 2005; Afe et al., 2004). 그러나 NO₂ 피팅 파장 영역은 가시광선 영역에 존재하고, 이 영역에는 NO₂ 이외에 큰 흡수량을 가지는 물질이 존재하지 않는다. 이로 인하여 NO₂ 피팅은 다른 물질들에 의한 스펙트럼 간섭현상이 적고 신호대잡음비 (Signal to noise ratio)가 높아 상대적으로 작은 오차를 보인다 (Martin et al., 2002; Richter and Burrows, 2002). 성층권에 존

Table 1. Specifications for SO₂ and NO₂ spectrum evaluations from SCIAMACHY data.

Molecule	Wavelength range (nm)	Polynomial order	Cross-sections included in the fitting procedure
SO ₂	315 ~ 327	4	SO ₂ ^a , O ₃ ^b , Ring ^c , BS ^d , USamp ^e
NO ₂	425 ~ 450	3	NO ₂ ^f , O ₃ , O ₄ ^g , H ₂ O ^h , Ring, BS, USamp

^aSO₂ at 295K (Vandaele et al., 1994); ^btwo O₃ cross-sections obtained at 223K and 243K were included in the fitting (Bogumil et al., 2003); ^cRing spectrum; ^dbackground spectrum; ^eundersampling correction; ^fNO₂ at 243K (Bogumil et al., 2003); ^gO₄ at 296K (Greenblatt et al., 1990); ^hH₂O at 296K (Rothman et al., 2005).

Table 2. Errors estimated in SCIAMACHY NO₂ and SO₂ retrievals for monthly averages over East Asia.

	Fitting error (molecules/cm ²)	Error from residual clouds (molecules/cm ²)	From the subtraction of the stratospheric contribution (molecules/cm ²)	Error from airmass factor	Overall relative errors
NO ₂	< 0.3 × 10 ¹⁵	< 1.0 × 10 ¹⁵	< 0.6 × 10 ¹⁵	< 1.5 × 10 ¹⁵	50%
SO ₂	< 1.0 × 10 ¹⁶	< 0.8 × 10 ¹⁶	< 0.1 × 10 ¹⁶	< 2.0 × 10 ¹⁶	150%

재하는 SO₂와 NO₂ 양을 제거하기 위하여 RSM 방법이 사용되었다. 앞에서 언급한 바와 같이 성층권에는 SO₂가 거의 존재하지 않기 때문에 SO₂ 분석에서 이에 대한 오차는 상대적으로 작았으며, NO₂의 경우에도 경도별로 성층권에 존재하는 NO₂의 양의 변화가 적기 때문에 작은 오차를 보였다. 대기 중의 구름은 자외선-가시광선 영역 인공위성 측정에서 태양산란 광의 반사면으로 작용하여 분석 데이터에 오차를 유발한다. 이를 고려하기 위하여 앞에서 언급한 바와 같이 구름분포율 0.6 이하인 측정 데이터만을 분석에 사용하였고 잔여구름에 의한 오차는 표 2와 같다.

AMF에 의한 오차는 대부분 AMF 계산에 포함되는 변수인 지표반사도 (Surface reflectivity), 에어로솔의 양, 측정가스의 수직분포도 모양 (Vertical profile shape) 등에 의한 계통오차 (Systematic error)이다. 지표반사도의 증가는 측정된 값의 증가를 보이게 할 수 있는데, 특히 눈으로 덮힌 지역은 높은 지표반사도로 인하여 높은 에러를 보일 수 있다. 따라서 본 연구에서는 SACURA 알고리즘 (Kokhanovsky *et al.*, 2006)을 통하여 눈으로 덮힌 지역을 구별하고 분석에서 제외하였으며, 그 결과 지표반사도에 의한 오차는 5% 미만이었다. 에어로솔의 종류와 수직분포에 따라서 에어로솔의 증가는 측정되는 SO₂, NO₂ 칼럼 값을 증가시키거나 감소시킨다. 대부분의 경우에서 측정물질의 일부분이 에어로솔 층 밑에 존재하기 때문에 에어로솔의 증가는 측정 물질의 양을 실제보다 적게 계산하게 된다. 측정지역에서 SO₂, NO₂의 배출은 그 지역에서의 SO₂, NO₂ 수직 분포도를 변화시켜 AMF의 오차를 발생하게 할 수 있다. AMF 값은 대기경계층 내에서의 SO₂, NO₂ 절대량의 변화에 영향을 받지 않고 상대적인 수직분포에 의해 영향을 받는다. 만약 측정물질의 절대량만이 변한다면 AMF는 일정하다. 그렇지만 배경 (Background) 조건을 가지고 있는 지역에서 다량의 측정물질 배출에 의한 수직분

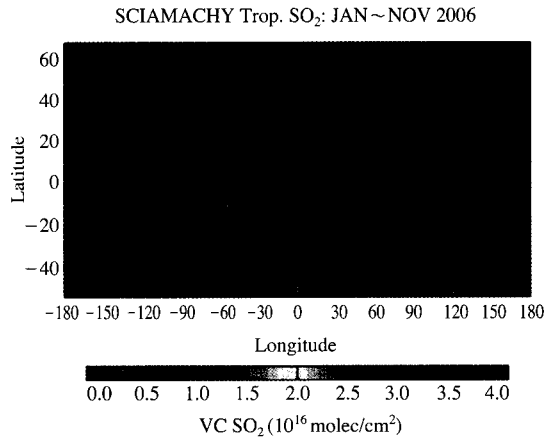


Fig. 1. Global distribution of mean tropospheric SO₂ vertical columns in Dobson unit (DU) retrieved from SCIAMACHY measurements from January to November 2006. Red and brown framed areas indicate the regions of volcanic and anthropogenic SO₂ emissions, respectively. In the area of the Southern Atlantic Anomaly (SAA), large scatter results from exposure of the instrument to radiation and particles. An 1 × 10¹⁶ molecules/cm² vertical column of SO₂ corresponds to ~3.7 ppbv in well-mixed 1 km boundary layer.

포의 변화는 동일한 AMF를 사용할 경우 측정값이 실제보다 낮게 계산되게 할 수 있다. 반대로 지표면에 다량의 배출원이 있는 분포를 사용한 AMF를 사용하였을 경우에는 실제보다 높게 계산될 수 있다 (Richter *et al.*, 2005). AMF 계산을 위한 NO₂ 수직 분포도는 앞에서 언급한 바와 같이 대기화학이동모델을 이용하여 지역에 따라 월별 평균치로 계산한 것을 이용하였다. SO₂의 경우에는 대기경계층용 수직 분포도를 전체 데이터에 적용하였다. 이러한 대류경계층용 수직분포도를 화산폭발에 의해 생성된 SO₂ 분석에 적용하면 분석된 값이 2배까지 작아질 수 있다. 본 연구에서 피팅, 성층권 부분의 제거, 잔여구름,

AMF에 의한 오차들이 독립적으로 작용한다고 가정했을 때 동아시아 지역의 SO₂와 NO₂ 분석에서 총 상대오차는 150%, 50% 이하로 산정되었으며(표 2 참조), 실제 2006년도의 월별 SO₂, NO₂ 양의 변화에 대한 총 상대오차는 16% 이내로 산정되어 오차가 적은 것으로 분석되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 SO₂ 분포 및 변화

그림 1은 2006년 1월부터 11월의 SCIAMACHY 데이터로부터 계산된 SO₂의 평균 VC이다. 그림 1의 남아메리카 상공에 표시된 SAA (Southern Atlantic Anomaly) 지역은 지구의 자기장에 의해서 높은 에너지의 하전입자가 도넛모양으로 존재하는 곳으로, 보통 남반구 위도 5~40°, 경도 0~80° 사이에 존재한

다. SAA의 자기장의 반지름은 500 km에 이르고 한 쪽 끝은 지표면에 가까우며 그 크기는 계절에 따라 변한다. GOME를 탑재한 ERS-2 위성과 SCIAMACHY를 탑재한 ENVISAT과 같은 저궤도 위성이 SAA 지역을 통과할 때, 하전입자들에 의하여 검출기는 정상시보다 더 높은 에너지에 노출된다. 이로 인하여 검출기의 신호대잡음비가 감소하게 되며 특히 자외선 영역에서의 감소가 두드러진다. 이러한 신호대잡음비의 감소는 SO₂의 분석에 영향을 끼치게 되어 분석된 SO₂ 값의 변화가 그림 1에서처럼 나타나며, 자외선 영역의 미량물질 분석일수록 크게 나타난다. O₃와 같이 다량으로 존재하는 물질이거나 NO₂와 같이 가시광선 영역에서 분석되는 경우에는 SAA에 의한 영향이 상대적으로 적다.

대기 중의 SO₂는 주로 화산과 인위적인 산업활동으로 배출된다. 그림 1에서 보는 바와 같이 2006년에 인위적으로 다량의 SO₂가 배출되는 지역은 남아

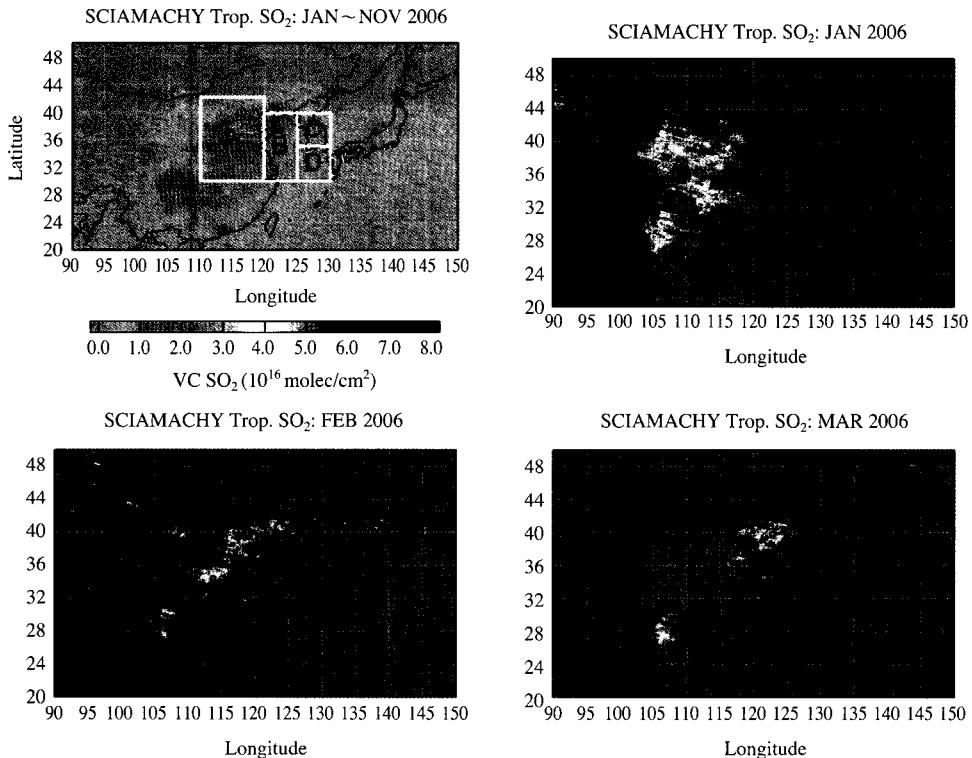


Fig. 2. Yearly and monthly mean vertical columns of tropospheric SO₂ retrieved from SCIAMACHY data over East Asia from January to November 2006. The areas of A (East China), B (Yellow Sea), C (Korean Peninsula), and D (South Sea) of interest are framed in the first panel of Fig. 2.

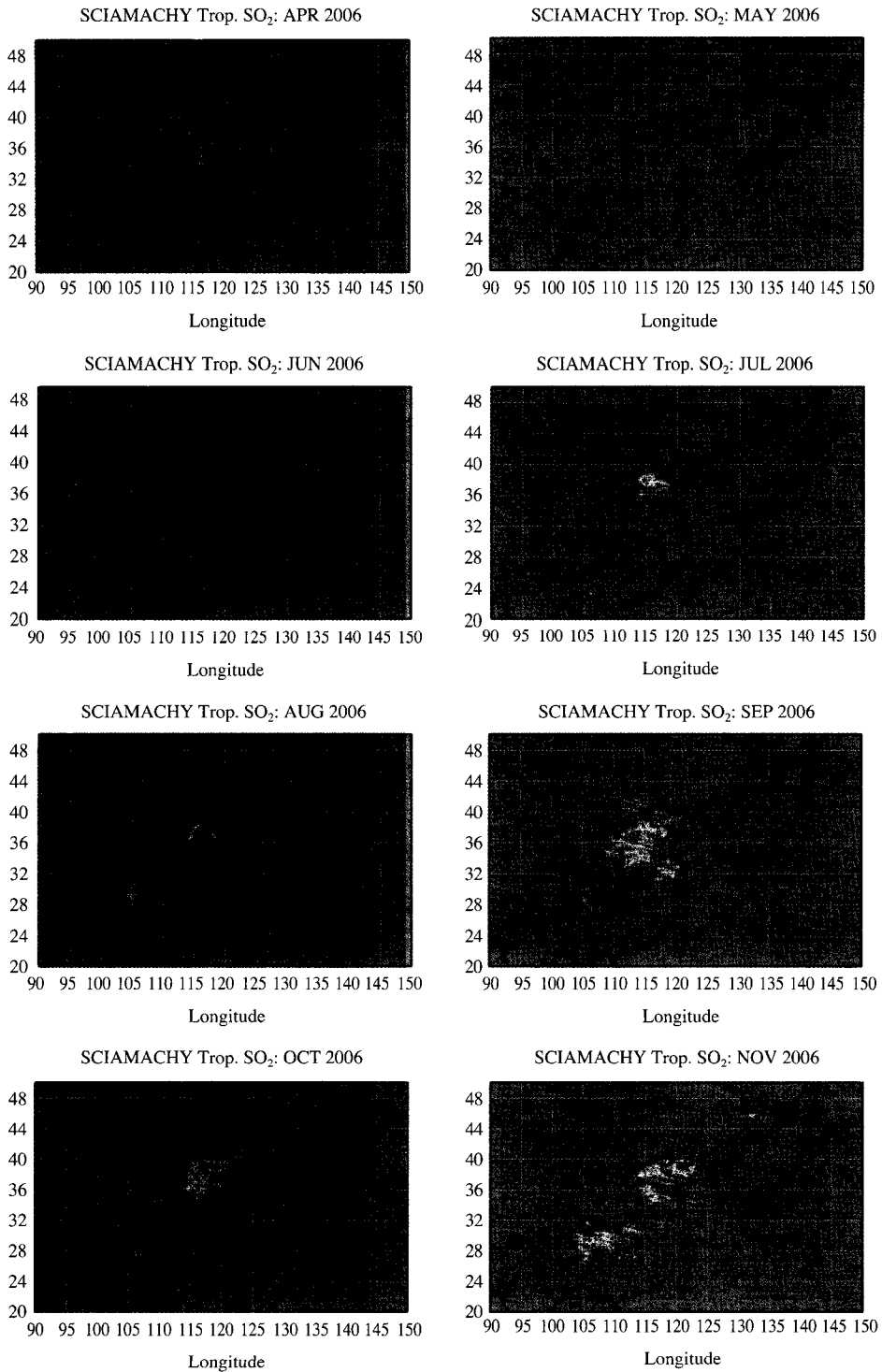


Fig. 2. Continued.

프리카, 중동아시아, 중국 동부지역으로 크게 구분할 수 있으며, 특히 중국 동부지역은 강력한 배출지역으로 특징지어진다.

그림 2는 중국 동부지역과 한반도 인근 지역의 1월부터 11월까지의 SO₂ 평균분포 및 월별 평균분포를 보여준다. 그림 2로부터 동북아시아의 SO₂ 주요 발생지역은 대부분 중국지역으로 인구 밀집지역인 베이징(Beijing), 천진(Tianjin), 홍콩(Hongkong), 충칭(Chongqing) 등이다. 그림에서 보는 바와 같이 주로 겨울철(1월, 2월, 11월)에 넓은 지역에 걸쳐 높은

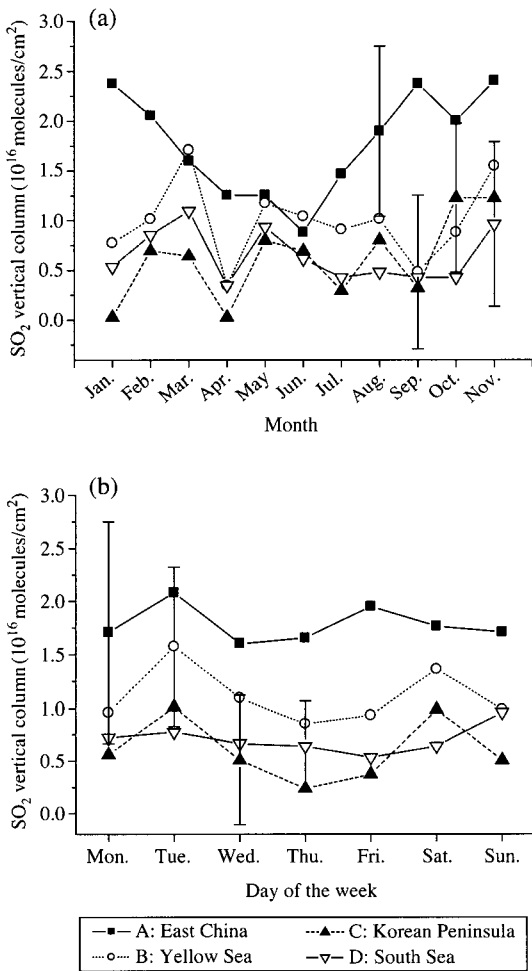


Fig. 3. Trends of (a) monthly and (b) weekday mean SO₂ levels over the areas A (East China), B (Yellow Sea), C (Korean Peninsula), and D (South Sea) indicated in the first panel of Fig. 2. The error bars indicate ±1σ (standard deviation).

값을 보이고 있다.

중국 동부지역 및 한반도의 SO₂의 분포를 자세히 파악하기 위하여 이 지역을 그림 2의 첫 번째 그림에서와 같이 A(중국동부, N30~42° E110~120°), B(서해, N30~40° E120~125°), C(한반도, N35~40° E125~130°), D(남해, N30~40° E125~130°) 지역으로 구분지어 이들 지역의 월별, 주간별 SO₂ 수준변화를 계산하였다(그림 3참조).

그림 2를 통하여 중국 동부지역의 SO₂는 동북아시아 지역에서 눈에 띄게 높은 경향을 보였고, 서해상이 한반도와 남해안보다 높은 경향을 보였다. 중국 동부지역은 11월에 최고값, 6월에 최저값을 보였다. 날씨가 추운 겨울철에는 넓은 지역에 걸쳐 높은 분포를 보이고 여름철에 상대적으로 낮은 분포를 보이고 있으며, 이는 겨울철 난방연료의 연소에 의한 SO₂ 배출량 증가로 인한 것으로 보인다. 1월에는 중국 동부의 넓은 지역에 걸쳐 높은 수준의 SO₂가 관측되었으나 해안지역에서는 상대적으로 그 양이 적음을 알 수 있다. 2월과 3월에는 1월과 같이 넓은 지역에 걸쳐 높은 농도의 분포는 관측되지 않았으나 한반도 인접한 중국동부의 해안지역에서 높은 분포가 관측되었다. 4월, 5월, 6월이 지나면서 감소하는 추세를 보였고 7월부터 증가하였다. 특히 9월, 10월, 11월에

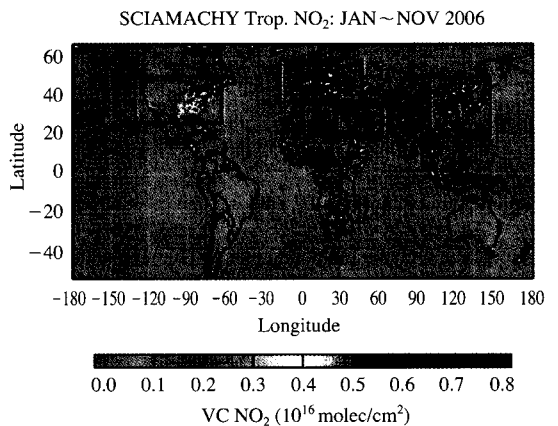


Fig. 4. Global distribution of mean tropospheric NO₂ vertical column in 10¹⁶ molecules/cm² retrieved from SCIAMACHY measurements from January to November 2006. High emission areas of anthropogenic NO₂ are framed on the map. Assuming that most of tropospheric NO₂ is within 200 m of the boundary layer, an 1 × 10¹⁶ molecules/cm² of NO₂ corresponds to ~19 ppbv.

는 1월에 관측된 것과 달리 중국 동부해안(베이징, 천진)지역에서 주로 높은 분포를 보였다.

서해(그림 2의 B) 지역의 SO₂ 수준의 경향은 3월에 최고값을 보이고 4월에 최저값을 나타내었다. 서해상에는 특기할 만한 SO₂의 발생원이 없고, 해양의 DMS에 의한 SO₂ 발생량은 동북아시아의 인위적으로 배출되는 양에 비하여 상대적으로 적으려 이러한 양은 RMS 방법에 의해 제거된다(Khokhar *et al.*, 2005; Finlayson-Pitts and Pitts, 2000). 따라서 대부분의 서해상 SO₂는 동북아시아 지역에 주된 북서풍에 의해 중국 동부지역에서 배출된 SO₂가 이동되는 것으로 보인다(Koike *et al.*, 2003). 3월과 6월의 경우에는 서해상(B)이 중국동부(A)지역보다 높은 값을 보였다. 이 기간 동안에는 중국 동부지역의 해안지역에서만 높은 SO₂ 분포를 보이기 때문에 상대적으로 낮은 평균값을 보일 수 있고, 서해상은 가까운 중국 동부 해안지역에서 대부분의 영향을 받으므로 중국 동

부지역의 평균값보다 높은 분포를 나타낼 수 있다.

한반도(C)와 남해(D)지역 또한 서해지역과 유사한 경향을 보이는데, 이는 서해지역과 같이 중국동부해안의 고농도 지역으로부터 영향을 받기 때문인 것으로 여겨진다. 한반도의 경우 다른 기간과 달리 10월에 서해안보다 높은 수준을 보였고 이 기간 동안에는 북한 지역도 상대적으로 높은 분포를 보였다. 특히 북한 지역에서 1월, 2월, 3월, 10월, 11월에 상대적으로 높게 나타났는데 이는 중국의 동부해안지역(특히, 안산/다란 지역) 인접 지역으로부터의 많은 영향과 북한 내의 화석연료의 연소에 의한 것으로 보인다.

그림 3(b)에 요일별 분포가 나타나 있다. 중국동부, 서해, 한반도, 남해 지역의 2006년 평균 VC는 각각 $1.78 (\pm 1.0) \times 10^{16}$, $1.11 (\pm 0.67) \times 10^{16}$, $0.60 (\pm 0.63) \times 10^{16}$, $0.71 (\pm 0.65) \times 10^{16}$ molecules/cm²이었다. 중국동부 지역에서는 화요일과 금요일에 평균치의

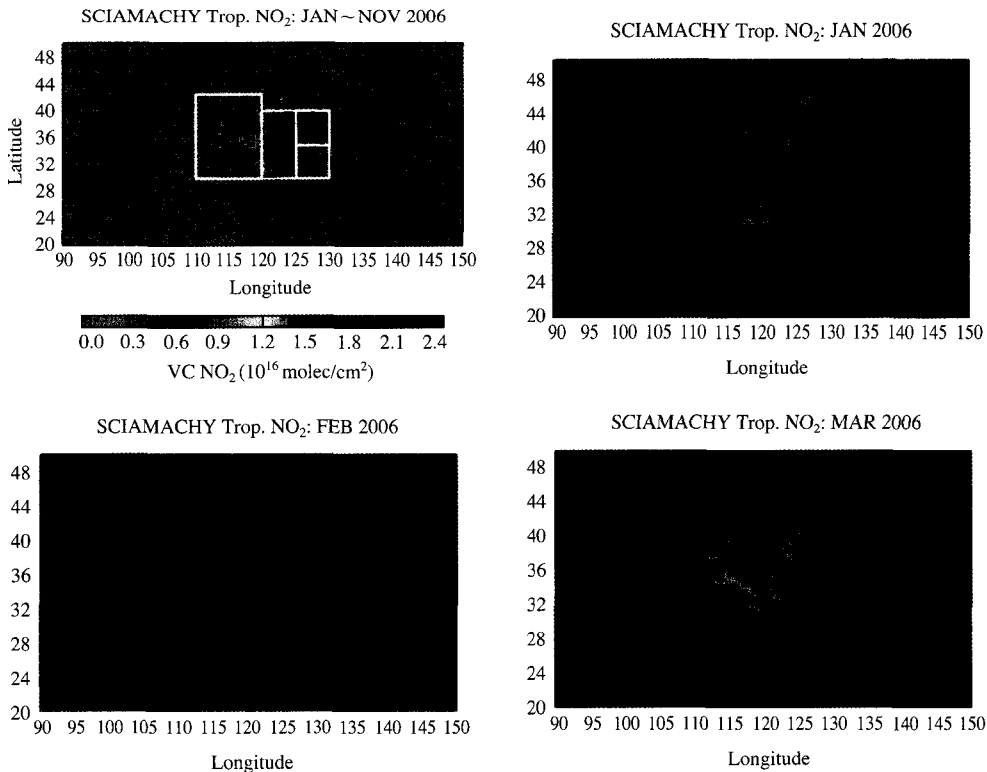


Fig. 5. Yearly and monthly mean vertical columns of tropospheric NO₂ retrieved from SCIAMACHY data over East Asia from January to November 2006. The areas of A (East China), B (Yellow Sea), C (Korean Peninsula), and D (South Sea) of interest are framed in the first panel of Fig. 5.

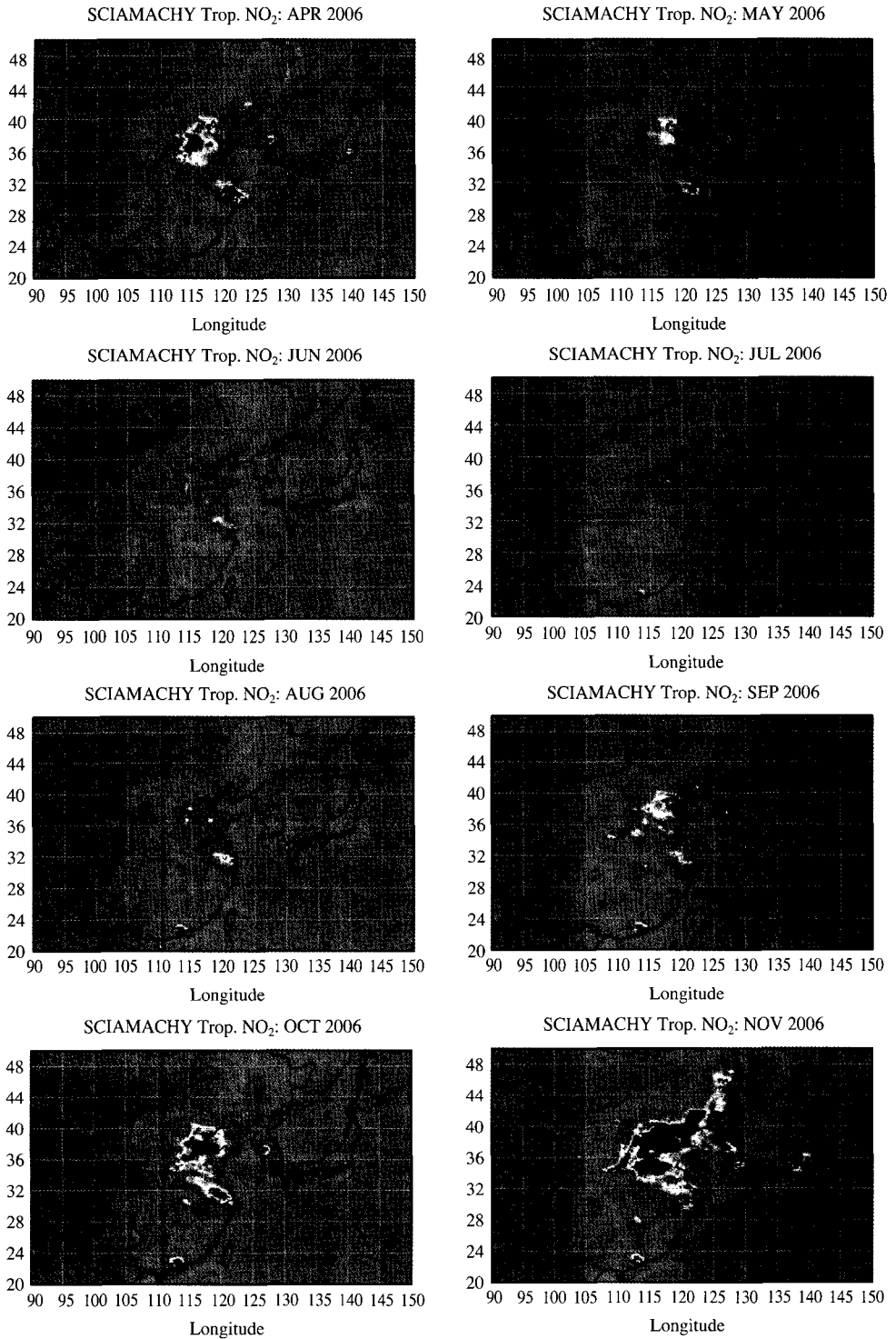


Fig. 5. Continued.

16%, 9% 정도 상대적으로 높은 경향을 보였으나 요일별 분포가 두드러지지 않았다. 요일별 영향이 거의 없다는 것은 연중으로 화력발전소나 중공업 산업단지 등 주말에도 중지되지 않는 곳으로부터 SO₂가 지배적으로 배출된다는 것과 겨울철에도 난방 등으로 평일 및 주말에도 지속적으로 배출되고 있는 것을 의미한다. 서해와 한반도는 화요일과 토요일에 상대적으로 높은 경향을 보였다. 서해상에서의 SO₂ 분포는 앞에서 언급한 바와 같이 중국 동부 해안지역의 SO₂ 배출에 큰 영향을 받으므로 요일별 분포도 영향을 받고, 한반도 또한 중국에서 배출된 SO₂의 영향을 지배적으로 받은 것으로 보인다(Lee et al., 2008; 한진석 등, 2006, 2004).

3.2 NO₂ 분포 및 변화

그림 4는 2006년 1월부터 11월까지의 대류권 NO₂의 전 지구적 분포를 보여준다. 상대적으로 높은 NO₂ 칼럼이 미국 서부와 동부, 멕시코시티, 유럽, 남아프리카, 중동아시아, 홍콩 및 동부아시아의 중국 동부지역, 한국, 일본 등의 대도시에서 관측되었다.

동아시아 지역의 월별 대류권 NO₂ 분포는 그림 5와 같다. 그림 5의 첫 번째 그림은 동아시아 지역의 2006년 1월부터 11월까지의 평균 대류권 NO₂ 수직 칼럼을 나타낸 것이다. 중국의 홍콩, 베이징과 동부해안의 천진, 상하이, 그리고 한국의 서울과 부산, 일본의 도쿄 등의 대도시에서 높은 분포를 보였다.

동북아시아의 중국 동부지역 및 한반도의 NO₂의 분포를 자세히 파악하기 위하여 SO₂와의 경우와 동일하게 A(중국동부), B(서해), C(한반도), D(남해) 지역으로 구분 지었고, 이들 지역의 월별, 요일별 수준 변화를 그림 6에 나타내었다. 중국동부, 서해, 한반도, 남해 지역의 2006년 평균 VC는 각각 $1.2 (\pm 0.56) \times 10^{16}$, $0.38 (\pm 0.19) \times 10^{16}$, $0.48 (\pm 0.28) \times 10^{16}$, $0.26 (\pm 0.16) \times 10^{16}$ molecules/cm²이었다. 그림 5와 그림 6을 통하여 NO₂ 수준에 있어서 중국 동부지역이 가장 높은 경향을 보였고 한반도, 서해, 남해 순이었다. 중국 동부지역이 SO₂의 경우와 유사하게 동북아시아의 다른 지역에 비해 상당히 높은 경향을 보였다. 중국 동부지역의 NO₂는 SO₂의 경우와 유사하게 겨울철에 높은 경향을 보였고, 5월부터 9월까지 상대적으로 낮은 분포를 보였다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 겨울철 난방연료의 사용에 기인한다. 이 지역의

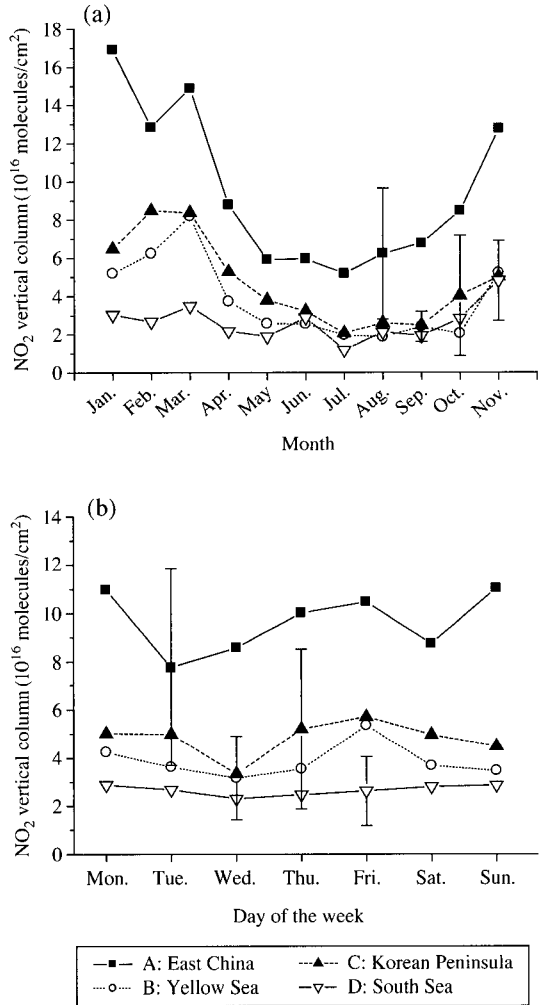


Fig. 6. Trends of (a) monthly and (b) weekday mean NO₂ levels over the areas A (East China), B (Yellow Sea), C (Korean Peninsula), and D (South Sea) indicated in the first panel of Fig. 5. The error bars indicate ±1σ (standard deviation).

요일별 분포 또한 주말에 NO₂ 수준이 낮아지는 주말 효과 없이 화요일과 토요일에 평균치의 19%와 10% 정도 상대적으로 낮고 일요일에 14% 정도로 가장 높은 경향을 보였다.

NO₂ 배출지역으로 서울과 부산으로 대표되는 한반도 또한 겨울철에 높고 여름철에 낮은 값을 보였다. 최저값을 보인 수요일에는 평균값의 31% 정도 낮았고, 최고값을 보인 금요일에는 평균값의 19% 정

도 높은 값을 보였다. 토요일과 일요일에는 감소하는 경향을 보였다. 서해상도 한반도와 유사한 월별 경향을 보였고, 금요일에 최고값을 가졌다. 남해의 경우에는 월별 및 요일별로 두드러진 경향을 보이지 않았다.

4. 결 론

인공위성데이터를 이용한 대기환경 모니터링은 전 지구적 규모에서 대기오염물질(예, SO₂, NO₂ 등)의 발생원 및 발생량을 추정하고 지역 간 및 대륙 간의 이동을 산정하는 데 중요한 데이터를 제공한다. 본 연구는 유럽연합의 환경 위성인 ENVISAT에 탑재된 SCIAMACHY로 측정된 자료를 이용하여 2006년의 SO₂와 NO₂의 전 지구적 대류권 분포를 도출하였다. 특히 본 연구에서는 한반도 인근의 동북아시아 지역의 2006년 월별, 요일별 대류권 SO₂, NO₂ 분포를 제시하였다. 그 결과 베이징, 천진, 상하이 등 중국 동부 지역의 대도시에서의 SO₂, NO₂ 농도 수준이 타 지역과 눈에 띄게 구별될 정도로 높게 나타났다. 또한 중국 동부지역 대도시의 오염물질 농도가 높은 경향은 겨울철이 여름철에 비해 높게 나타났는데, 이는 겨울철 난방연료 연소로 인한 것으로 판단된다. 한반도 지역에서 SO₂는 전반적으로 낮은 농도 수준을 보인 반면, NO₂는 서울과 부산지역 등의 대도시에서는 상대적으로 높은 경향을 보였다. 한반도 지역의 오염물질 농도를 계절적으로 살펴보면, 중국 동부지역과 같이 겨울철에 높고 여름철에 낮은 경향을 보여, 겨울철 난방에 의한 영향이 부가된 것으로 판단된다. 한편 서해의 SO₂ 수준은 남해의 농도 수준에 비해 상대적으로 높은 경향을 보였는데, 이는 중국동부지역 SO₂의 유입으로 인하여 한반도 내륙 및 남해의 농도 수준보다 높은 경향을 나타내는 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2006-214-D00085)과 정지께도 해양위성 활용연구지원(PM51400)을 받아 수행된 연구이다.

참 고 문 헌

- 김용표(1999) 동북아시아지역 대기오염 현황: 중국을 중심으로, 한국대기환경학회지, 15(2), 211-217.
- 이철규, 김영준(2006) Multi Axis DOAS를 이용한 대기 중 미량물질 원격 측정, 대한원격탐사학회지, 22(2), 141-151.
- 이철규, 최여진, 이정순, 정진상, 김영준, 김기현(2005) 차동 흡수 분광법을 이용한 서울 대기 중 BTX 측정, 한국대기환경학회지, 21(1), 1-14.
- 한진석, 김영미, 안준영, 공부주, 최진수, 이상욱, 이석조(2006) 장거리이동 대기오염물질 이동량의 공간적 분포와 변화 추이(1997~2004년), 한국대기환경학회지, 22(1), 99-106.
- 한진석, 김영미, 안준영, 홍우덕, 공부주, 이석조, 선우영(2004) 한반도 서해상으로 장거리 이동하는 SO₂의 농도 및 연직분포 특징, 한국대기환경학회지, 20(5), 671-683.
- Afe, O.T., A. Richter, B. Sierk, F. Wittrock, and J.P. Burrows(2004) BrO emission from volcanoes: a survey using GOME and SCIAMACHY measurements. Geophysical Research Letters, 31, doi: 10.1029/2004GL020994.
- Beirle, S., U. Platt, M. Wenig, and T. Wagner(2003) Weekly cycle of NO₂ by GOME measurements: a signature of anthropogenic sources. Atmospheric Chemistry and Physics, 3, 2225-2232.
- Bogumil, K., J. Orphal, T. Homann, S. Voigt, P. Spietz, O.C. Fleischmann, A. Vogel, M. Hartmann, H. Bovensmann, J. Frerick, and J.P. Burrows(2003) Measurements of molecular absorption spectra with the SCIAMACHY Pre-Flight Model: Instrument characterization and reference data for atmospheric remote sensing in the 230~2380 nm region. Journal of Photochemistry and Photobiology A, 157, 167-184.
- Bovensmann, H., J.P. Burrows, M. Buchwitz, J. Frerick, S. Noel, V.V. Rozanov, K.V. Chance, and A.H.P. Goede(1999) SCIAMACHY-Mission objectives and measurement modes, Journal of Atmospheric Sciences 56, 127-150.
- Buchwitz, M., R. de Beek, J.P. Burrows, H. Bovensmann, T. Warneke, J. Notholt, J.F. Meirink, A.P.H. Goede, P. Bergamaschi, S. Körner, M. Heimann, and A. Schulz(2005) Atmospheric methane and carbon dioxide from SCIAMACHY satellite data: initial comparison with chemistry and transport models,

- Atmospheric Chemistry and Physics, 5, 941-962.
- Burrows, J.P., M. Weber, M. Buchwitz, V.V. Rozanov, A. Ladstädter-Weissenmayer, A. Richter, R. de Beek, R. Hoogen, K. Bramstedt, K.-U. Eichmann, M. Eisinger, and D. Perner (1999) The Global Ozone Monitoring Experiment (GOME): mission concept and first scientific results, *Journal of Atmospheric Sciences*, 56, 151-175.
- Chance, K. (1998) Analysis of BrO measurements from the Global Ozone Monitoring Experiment, *Geophysical Research Letters*, 25, 3335-3338.
- Eisinger, M. and J.P. Burrows (1998) Tropospheric sulfur dioxide observed by the ERS-2 GOME instrument, *Geophysical Research Letters*, 25, 4177-4180.
- Finlayson-Pitts, B. and J. Pitts (2000) *Chemistry of the upper and lower atmosphere*, Academic Press, USA.
- Greenblatt, G.D., J.J. Orlando, J.B. Burkholder, and A.R. Ravishankara (1990) Absorption measurements of oxygen between 330 and 1140 nm, *Journal of Geophysical Research*, 95, 18577-18582.
- Guttikunda, S.K., Y. Tang, G.R. Carmichael, G. Kurata, L. Pan, D.G. Streets, J.-H. Woo, N. Thongboonchoo, and A. Fried (2005) Impacts of Asian megacity emissions on regional air quality during spring 2001, *Journal of Geophysical Research*, 110, doi: 10.1029/2004JD004921.
- Horowitz, L.W., S. Walters, L.K. Emmons, P.J. Rasch, C. Granier, X. Tie, J. Lamarque, M.G. Schultz, G.S. Tyndall, J.J. Orlando, and G.P. Brasseur (2003) A global simulation of tropospheric ozone and related tracers: description and evaluation of MOZART, version 2, *Journal of Geophysical Research*, 108 (D24), 4474, doi:10.1029/2002JD002853.
- Khokhar, M.F., C. Frankenberg, M. Van Roozendaal, S. Beirle, S. Köhl, A. Richter, U. Platt, and T. Wagner (2005) Satellite observation of atmospheric SO₂ from volcanic eruptions during the time-period of 1996~2002, *Advances in Space Research*, 36, 879-887.
- Koike, M., Y. Kondo, K. Kita, N. Takegawa, Y. Masui, Y. Miyazaki, M.W. Ko, A.J. Weinheimer, F. Flocke, R.J. Weber, D.C. Thornton, G.W. Sachse, S.A. Vay, D.R. Blake, D.G. Streets, F.L. Eisele, S.T. Sandholm, H.B. Singh, and R.W. Talbot (2003) Export of anthropogenic reactive nitrogen and sulfur compounds from the East Asia region in spring, *Journal of Geophysical Research*, 108, doi: 10.1029/2002JD003284.
- Kokhanovsky, A.A., W. von Hoyningen-Huene, V.V. Rozanov, S. Noël, K. Gerilowski, H. Bovensmann, M. Bramstedt, M. Buchwitz, and J.P. Burrows (2006) The semianalytical cloud retrieval algorithm for SCIAMACHY II. The application to MERIS and SCIAMACHY data, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 4129-4136.
- Lee, C., A. Richter, H. Lee, Y.J. Kim, J.P. Burrows, Y.G. Lee, and B.C. Choi (2008) Impact of transport of sulfur dioxide from the Asian continent on the air quality over Korea during May 2005, *Atmospheric Environment*, doi: 10.1016/j.atmosenv.2007.11.006.
- Lee, C., Y.J. Kim, H. Tanimoto, N. Bobrowski, U. Platt, T. Mori, K. Yamamoto, and C.S. Hong (2005) High ClO and ozone depletion observed in the plume of Sakurajima volcano, *Geophysical Research Letters*, 32, doi: 10.1029/2005GL023785.
- Leue, C., M. Wenig, T. Wagner, O. Klimm, U. Platt, and B. Jaehne (2001) Quantitative analysis of NO₂ emissions from GOME satellite image sequences, *Journal of Geophysical Research*, 106, 5493-5505.
- Martín, R.V., K. Chance, D.J. Jacob, T.P. Kurosu, R.J.D. Spurr, E. Bucsela, J.F. Gleason, P.I. Palmer, I. Bey, A.M. Fiore, Q. Li, R.M. Yantosca, and R.B.A. Koelemeijer (2002) An improved retrieval of tropospheric nitrogen dioxide from GOME, *Journal of Geophysical Research*, 107, doi:10.1029/2001JD001027.
- Platt, U. (1994) Differential optical absorption spectroscopy. In: *Air Monitoring by Spectroscopic Techniques*, ed. M.W. Sigrist, Wiley & Sons, Newyork, 27-84.
- Richter, A. and J.P. Burrows (2002) Tropospheric NO₂ from GOME measurements, *Advanced Space Research*, 29, 1673-1683.
- Richter, A., J.P. Burrows, H. Nüß, C. Granier, and U. Niemeier (2005) Increase in tropospheric nitrogen dioxide over China observed from space, *Nature*, 437, 129-132.
- Rothman, L.S., D. Jacquemart, A. Barbe, D.C. Benner, M. Birk, L.R. Brown, M.R. Carleer, C. Chackerian Jr., K. Chance, L.H. Coudert, V. Dana, V.M. Devi, J.-M. Flaud, R.R. Gamache, A. Goldman, L.-M. Hartmann, K.W. Jucks, A.G. Maki, J.-Y. Mandin, S.T. Massie, J. Orphal, A. Perrin, C.P. Rinsland, M.A.H. Smith, J. Tennyson, R.N. Tolchenov, R.A. Toth, J.V. Auwera, P. Varanasi, and G. Wagner (2005) The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database,

- Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 96, 139-204.
- Rozanov, V.V., D. Diebel, R.J.D. Spurr, and J.P. Burrows (1997) GOMETRAN: A radiative transfer model for the satellite project GOME-The plane parallel version, Journal of Geophysical Research, 102, 16683-16695.
- Sierk, B., A. Richter, A. Rozanov, Ch. von Savigny, M. Schmoltner, M. Buchwitz, H. Bovensmann, and J. P. Burrows (2006) Retrieval and monitoring of atmospheric trace gas concentrations in nadir and limb geometry using the space-borne SCIAMACHY instrument, Environmental Monitoring and Assessment, doi: 10.1007/s10661-005-9049-9.
- Tan, Q., Y. Huang, and W.L. Chameides (2002) Budget and export of anthropogenic SO_x from East Asia during continental outflow condition, Journal of Geophysical Research, 107, doi: 10.1029/2001JD000769.
- Vandaele, A., P. Simon, J. Guilmot, M. Carleer, and R. Colin (1994) SO_2 absorption cross section measurement in UV using fourier transform spectrometer, Journal of Geophysical Research, 99, 25599-25605.
- Velders, G.J.M., C. Granier, R.W. Portmann, K. Pfeilsticker, M. Wenig, T. Wagner, U. Platt, A. Richter, and J. Burrows (2001) Global tropospheric NO_2 column distributions: Comparing 3-D model calculations with GOME measurements, Journal of Geophysical Research, 106, 12643-12660.
- Wagner, T. and U. Platt (1998) Satellite mapping of enhanced BrO concentrations in the troposphere, Nature, 395, 486-490.
- Wittrock, F., A. Richter, H. Oetjen, J.P. Burrows, M. Kanakidou, S. Myriokefalitakis, R. Volkamer, S. Beirle, U. Platt, and T. Wagner (2006) Simultaneous global observations of glyoxal and formaldehyde from space, Geophysical Research Letters, 33, doi: 10.1029/2006GL026310.