지상원격측정 MAX-DOAS 시스템과 위성 OMI센서로 서울에서 산출된 이산화질소 총적분농도의 비교연구

이 한 림[†]

연세대학교 대기과학과

Comparison of Nitrogen Dioxide Retrieved by MAX-DOAS and OMI measurements in Seoul

Hanlim Lee[†]

Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University

Abstract : NO₂ vertical column densities were retrieved via ground based Multi-Axis Differential Optical Absorption Spectroscopy (MAX-DOAS) measurements for the first time for 6 months over the spring season in 2007 and 2008 in Seoul, one the megacities in the Northeast Asia. The retrieved NO₂ vertical column densities were compared with those obtained from space borne Ozone Monitoring Instrument (OMI). Over the entire measurement period, the NO₂ vertical column densities measured by MAX-DOAS ranged from 1.0×10^{15} molec·cm⁻² to 6.0×10^{16} molec·cm⁻² while those obtained by OMI ranged 1.0×10^{15} molec·cm⁻² to 7.0×10^{16} molec·cm⁻². The correlation coefficient between NO₂ vertical column densities obtained from MAX-DOAS and OMI is 0.73 for the entire measurement period whereas the correlation coefficient of 0.85 is found for the dates under the clear sky condition. The cloudy condition is thought to play a major role in increase in uncertainty of the retrieved OMI NO₂ vertical column densities since air mass factor may induce high uncertainty due to the lack of cloud and aerosol vertical distribution information.

Key Words : NO₂, MAX-DOAS, OMI, Northeast Asia, DOAS

요약 : 본 연구에서는 2007년과 2008년 봄 기간 중 동북아 지역의 주요 메가시티 중 하나인 서울에서 Multi-Axis Differential Optical Absorption Spectroscopy(MAX-DOAS) 관측을 처음으로 수행하고, 측정된 스펙트럼의 차등흡수분광 분석을 통하여 이산화질소의 수직총적분농도를 산출 하였다. MAX-DOAS로부터 산출된 값들과 Ozone Monitoring Instrument(OMI) 위성센서로부터 산출된 서울지역의 대류권 이산화질소 산출물과의 비교를 통하여 OMI로부터 산출된 이산화질소 수직총적분농도의 상대적 정확성 규명을 수행하였다. MAX-DOAS로부터 산출된 이산화질소는 1.0×10^{15} molec · cm⁻²에서

접수일(2013년 4월 12일), 수정일(1차 : 2013년 4월 15일), 게재확정일(2013년 4월 17일).

[†] 교신저자: 이한림(hanlimlee@yonsei.ac.kr)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

$6.0 \times 10^{16} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$ 정도 분포로 보였으며, OMI의 대류권 수직층적분농도는 $1.0 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$ 에서 $7.0 \times 10^{16} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$ 정도 분포로 보였다. 관측전체기간인 6개월 동안 두 관측결과와 상관관계를 보여주는 상관계수(R)는 0.73으로 비교적 양호한 상관 관계를 보였다. 구름이 없는 기간 동안에는 상관계수가 0.85로 두 관측결과와 높은 상관관계는 확인 할 수 있었다. 두 센서의 산출알고리즘 모두 구름이 있을 경우 대기질량인자의 계산에 있어서 높은 불확실성으로 인해 이산화질소농도의 산출오차가 높은 것으로 판단된다.

1. 서론

이산화질소는 대류권, 특히 지표면 오존의 증가에 크게 기여를 하는 전구체로서 지구의 대기화학 및 복사균형에 중요한 역할을 한다. 이산화질소는 인간의 건강과 식물, 특히 농작물의 성장에도 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 미국환경청 자료에 따르면 이산화질소에 장기간 노출될 경우 인간의 면역력 감소 및 호흡기 간염을 일으킬 수 있다고 보고되었다(USEnvironmental Protection Agency, 1998). 이산화질소는 자동차 배출가스 화력발전소 등 화석원료를 이용하는 다양한 배출원으로부터 발생된다. 이런 배출원들은 주로 대도시 지역 혹은 주변지역에 밀집되어 있으며, 도심지역의 이산화질소의 시공간적 특성에 크게 기여를 한다.

이러한 이산화질소를 지속적으로 모니터링 하여 시공간적 특성을 이해해 오고 있지만, 장거리 이동되는 이산화질소를 파악하고, 수용지역에 대한 기여도를 정량화 하기 위해서 많은 추가적인 노력이 기울여지고 있다. 그 중에서 특히, 최근에는 저궤도 위성에 탑재된 분광센서를 통하여 대기 및 대류권에 존재하는 다양한 주요 오염물질들, 특히 대도시지역 이산화질소의 시공간적 특성 및 거동에 대한 연구가 수행되어오고 있다. Ozone Monitoring Instrument(OMI) 센서는 미항공우주국 Earth Observing System(EOS) Aura 위성에 탑재되어 2004년 6월에 발사된 후 현재까지 지구대기의 미량기체의 공간적 분포를 모니터링 해오고 있다(Boersma *et al.*, 2006). 일반적으로 위성에 탑재된 환경센서들의 경우, 전구와 같이 매우 광대한 영역을 짧은 시간에 스캔 할 수 있는 장점이 있는 반면, 대기 중 많은 간섭인자들과 매우 낮은 주변온도, 강한 우주 방사선에 노출되는 등 매우 열악한 우주공간에서 관측시스템의 유지보수조차 어렵기 때문에, 그 정확도는 지상 혹은 항공관측에 비해 낮은 것 알려져 있다. 이러한 이

유로, 위성으로 관측된 미량기체를 검증하여, 그 상대적 정확도를 이해하고 또한 이를 바탕으로 위성산출물의 정확성을 향상시키기 위해 지상 및 항공원격탐사가 활발히 이루어지고 있다.

Multi-Axis Differential Optical Absorption Spectroscopy(MAX-DOAS)는 Hönninger *et al.*(2004)에 의해 처음 소개되었으며 태양산란광을 주요 광원으로 사용하여, 직달관측을 하는 다른 센서와 달리 지속적으로 특정지역을 모니터링 할 수 있는 장점이 있다. MAX-DOAS는, 또한 이산화질소뿐만 아니라, 오존, 이산화황, 포름알데히드, 할로젠물질, 수증기 등 대류권에 존재하는 다양한 미량기체의 수직분포 및 수직층적분농도에 대한 정보를 파악하는데 사용되고 있다. 본 연구에서는 처음으로 이산화질소가 높이 배출되는 동북아지역의 주요 메가시티 중 하나인 서울에서 MAX-DOAS의 관측을 수행하였으며, 산출된 이산화질소 수직층적분농도를 OMI 산출결과와 비교를 통하여, 서울지역 OMI로부터 산출된 대류권 이산화질소 수직층적분농도의 정확성을 이해하고자 하다.

2. MAX-DOAS 및 OMI 시스템 구성 및 관측원리

다양한 기기고도각에서의 태양산란광들을 광원으로 함께 사용하는 MAX-DOAS는 2004년 Hönninger *et al.*(2004)에 의해 처음으로 소개된 이후 다양한 대류권 미량기체의 공간분포의 특성을 파악하는데 사용되고 있다. 본 연구에 사용된 MAX-DOAS는 스캐닝광학부와 미니 분광기 및 검출기로 구성되어있다. 스캐닝 광학부와 분광시스템은 방열판이 부착된 알루미늄케이스에 함께 장착되어 있으며, 스테퍼모터가 케이스 옆면에 부착되어 여러 기고도각에서 연직 스캔을 가능하

게 한다. 스캐닝광학부에서는 40 mm의 초점거리를 가지는 자외선 코팅이된 20 mm의 석영볼록렌즈를 이용하여 태양산란광을 집광 하며, 집광된 태양산란광은 석영광섬유를 통하여 소형분광기(Ocean optics USB2000)로 전달을 하게 된다. 소형분광기는 0.7(FWHM) 파장 분해능을 가지며 289에서 431 nm 사이의 스펙트럼을 측정할 수 있으며, 검출기는 Charge Coupled Device (CCD)를 검출기 (Sony ILX511, 2048 파장화소)를 사용한다(Shin and Lee 1997). 가시영역의 태양산란광 세기를 감소시켜 신호포화를 피하면서 자외선의 신호를 증폭시키기 위해 UG5 필터를 입구 스캐닝광학부의 집광렌즈 앞에 삽입을 하였다. 관측기간 동안 검출기의 암전류를 줄이는 동시에 각 픽셀들의 파장정보를 일정하게 유지하기 위해 펄터 냉각기를 이용하여 분광기 및 검출기의 온도를 5°C 근처에서 일정하게 유지시켰다.

OMI 센서는 270 nm에서 500 nm 파장구간의 대기후방산란태양광과 직달관측을 수행할 수 있는 이미징 분광시스템을 탑재하고 있다. 탑재된 이미징 분광시스템은 2차원 CCD 검출기를 포함하고 있어 동시에 넓은 지역을 스캔 할 수 있다. 검출기의 한 방향은 파장정보를 수집하게 되며, 위성이 비행하는 방향의 수직방향으로 114°의 관측각도를 가지며, 이 관측각은 60개의 관측화소로 나누어 지구를 스캔하게 된다. 이렇게 넓은 관측각도는 2600 km에 달하며 하루 만에 전구를 스캔 할 수 있다. OMI의 검출기는 파장샘플링은 0.21 nm 이며, 파장분해능은 0.63 nm 이다. 복사휘도검보정은 OMI가 지구의 어두운 곳을 관측할 때 암전류와 백색광원을 관측하여 검출기의 상태를 모니터링 하는 것을 포함하여 다양한 탑재된 관측을 통하여 수행된다. 파장 검보정은 이론적 스펙트럼과 직달관측된 스펙트럼간의 비선형 피팅을 통하여 수행된다.

3. MAX-DOAS 관측 및 스펙트럼분석

MAX-DOAS 관측은 서울대학교에서 2007년 4월1일부터 5월 30일까지와 2008년 3월 1일에서 6월 30일까지 총 6개월에 걸쳐 수행되었다. Fig. 1은 MAX-DOAS관측이 수행된 장소의 지도를 보여준다. MAX-

Fig.1. (a) Description of MAX-DOAS measurement geometry. (b) OMI and MAX-DOAS viewing geometry.

DOAS는 350°의 방위각을 향하며, 태양산란광을 측정하였다. MAX-DOAS는 이와 달리 낮은 기기고도 각부터 높은 고도 각을 스캔 함으로써 지표면 주변의 이산화질소뿐 아니라 대류권상층에 존재하는 이산화질소의 농도에 대한 정보도 동시에 측정이 가능하다. 본 연구에서는 3°, 10°, 20°와 90° 기기고도각에서의 스캔을 통해 태양산란광 신호를 측정하였다. 4가지 기기고도각의 한루프 측정은 대기상태에 따라 3-10분정도 소요되었다.

측정된 스펙트럼은 차등흡수분광분석(Platt and Stutz, 2008)을 통해 태양산란광신호에서 대류권 이산화질소의 경사층적분농도를 산출하였다. 분석에 앞서 암전류와 영점보정을 수행하였으며, 픽셀에 파장정보를 매핑하였다. 이산화질소를 산출하기 위해 390 nm

Table 1. Measurement geometry and aerosol optical properties used as inputs for air mass factor calculations

Parameter	Value
Wavelength	404 nm
Telescope elevation angle	20°
Solar Zenith Angle (SZA)	2007[66±7(08:00), 33±9(11:00), 32±8(14:00), 64±5(17:00)] 2008[66±7(08:00), 34±9(11:00), 33±8(14:00), 64±5(17:00)]
Relative Azimuth Angle (RAA)	2007[93±8(08:00), 132±9(11:00), 226±12(14:00), 226±9(17:00)] 2008 [93±8(08:00), 134±8(11:00), 223±10(14:00), 265±9(17:00)]
Single scattering albedo	0.9 [Petters <i>et al.</i> , 2003]
Surface albedo	0.13 [Feister and Grewe, 1995]
Aerosol profile	Compact Mie-scattering Lidar (CML)

Fig. 2. Deconvolution example of the analyzed spectra measured at 13:03 on April 10 2008 in Seoul. The number in NO₂ indicates the retrieved slant column density, which is directly derived from the corresponding NO₂ optical density shown on its Y axis.

에서 415 nm 사이의 태양산란광 정보를 사용하였으며 태양산란광에 포함된 Fraunhofer 신호를 제거하기 위해서 정오에 90° 기고도각에서 관측된 스펙트럼을 배경스펙트럼으로 간주하여 배경스펙트럼을 다른 기고도각의 스펙트럼으로 로그리즘을 취하여 나누어 주어 광학두께를 구하였다. 이렇게 구해진 광학두께는 다양한 가스의 흡수단면적과 농도인자로 구성된 모델식과 선형 및 비선형 피팅의 반복을 통해 이산화질소의 농도인자를 산출하게 된다. 본 연구에서는 이산화질소와 오존을 모델식에 포함하였으며, 대기중

공기분자의 라만산란으로 인해 발생하는 태양광의 흡수영향을 고려하기 위해 배경스펙트럼으로 계산된 Ring 스펙트럼을 함께 모델식에 포함시켰다. 그리고 대류권에 존재하는 에어로솔 및 공기분자로 인한 레일라이 산란의 영향을 제거하기 위해 3차 다항식을 측정된 스펙트럼과 선형 피팅되는 모델에 포함을 시켰다. Fig. 2는 관측 기간 중 2008년 4월 10일 13시에 측정된 한 스펙트럼의 분석내용을 보여준다. 피팅에서는 293K의 이산화질소 흡수단면적과 (Vandaele *et al.*, 1997), 243K와 293K 두 개의 오존 흡수단면적들 (Voigt *et al.*, 1999)을 사용하여, 성층권과 대류권에 존재하는 오존의 영향을 고려하였다. 산출된 농도인자는 광 경로 길이가 포함된 각 기고도각에 해당하는 경사층적분 농도이다.

스펙트럼에서 산출된 경사층적분 농도를 수직층적분 농도로 전환하기 위하여 복사전달 모델인 Trace gas RAdiative Transfer Monte Carlo Y-II (TRACY-II) (Deutschmann *et al.*, 2006)를 이용하여 대기질량인자를 계산해 주었다. Table 1은 TRACY-II의 주요 입력 값들을 보여준다. 계산된 대기질량인자로 경사층적분 농도를 나누어 주어 수직층적분 농도로 환산하였다.

4. 결 과

MAX-DOAS 관측은 몇 분 단위로 수행되었으며, 이산화질소 수직층적분 농도 산출 또한 이 자료들을 분석하여 산출하였으나, OMI가 관측장소를 지나가는 시간을 고려하여 분석된 결과를 한 시간 단위로 평균

Fig. 3. Time series of tropospheric NO_2 vertical column densities obtained by MAX-DOAS and OMI in spring, 2007 and 2008 in Seoul.

내어 비교분석에 사용하였다. 이렇게 이산화질소 평균 값을 사용하게 될 경우, OMI보다 작은 MAX-DOAS의 관측된 공간에서 짧은 시간 내에 갑자기 증가되는 이산화질소의 영향을 감소시켜, OMI 이산화질소 산출물과의 편향되지 않은 비교를 수행하였다. Fig. 3은 OMI와 MAX-DOAS로 관측된 대류권 이산화질소 수직층적분농도의 시간적 변화를 보여준다. 본 연구에서 수행된 관측지점에서는 OMI의 대류권 수직층적분농도는 $1.0 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$ 에서 $7.0 \times 10^{16} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$ 정도의 분포로 보였다. 이에 비해 MAX-DOAS는 최대 $6.0 \times 10^{16} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$ 정도로 OMI의 최대값보다 낮은층적분농도를 보였다. Fig. 4(a)는 MAX-DOAS와 OMI에서 산출된 이산화질소 층적분농도의 선형회기분석 비교결과를 보여준다. 관측전체기간 동안에 있어서 두 관측 결과의 상관관계는 비교적 높았으며, 상관계수(R)은 0.73으로 확인되었다. 하지만, OMI의 수직층적분농도가 MAX-DOAS의 값보다 $1.0 \times 10^{15} \text{ molec} \cdot \text{cm}^{-2}$ 만큼 큰 절편이 있음을 확인하였다.

Fig. 4. Correlations between NO_2 vertical column densities obtained from MAX-DOAS and OMI for atmospheric conditions of (a) both clear and cloudy, (b) Clear sky, and (c) cloudy sky.

Fig. 4(b)는 구름이 없는 대기조건에서의 두 원격측정값의 비교결과를 보여준다. 구름이 없는 경우 전체 기간의 두 측정값간의 상관관계보다 높은 상관관계를 확인 할 수 있었다. 구름이 없는 기간 동안에 있어

서 두 관측결과와 상관관계는 비교적 높았으며, 상관계수(R)는 0.85로 확인되었다. 장기간 관측을 통하여 더 많은 자료를 사용해서 비교연구를 수행할 필요가 있지만, 구름이 없을 경우 OMI 산출알고리즘이 이산화질소 증적분농도를 구름을 포함하는 경우(Fig. 4(c))보다 비교적 정확하게 산출하는 것으로 사료된다. Fig. 4(c)는 관측기간 중 구름이 있는 대기조건에서의 OMI와 MAX-DOAS의 이산화질소 산출결과를 비교를 보여준다. 구름이 있는 경우 가장 낮은 상관관계를 확인할 수 있다. 구름이 있는 기간 동안에 있어서 두 관측결과와 상관계수(R)는 0.72로 확인되었다.

OMI와 MAX-DOAS 두 센서의 산출알고리즘 모두 구름이 많을 경우, 즉 Cloud Optical Depth(COD)가 높을 경우 높은 불확실성으로 인해 이산화질소농도를 산출하지 않는다. 특히, 이산화질소가 구름과 같은 공간에 있을 경우 구름입자들에 의한 다중산란으로 원래 이산화질소보다 높은 경사증적분농도가 산출될 수 있으나, 구름과 이산화질소 고도 정보가 없을 경우 복사전달모델로 대기질량인자의 계산시 이러한 다중산란을 반영하기가 어려워 과대평가된 경사증적분농도를 보정할 수 없어 결과적으로 수직이산화질소량을 과대평가할 수 있다. 구름이 작은 양이지만 있는 경우의 비교결과인 Fig. 4(b)에서의 Y축 절편 값이 구름이 없는 경우의 Fig. 4(c)의 Y축 절편 값보다 약 4.0×10^{15} molec. cm^{-2} 정도 큰 것을 확인할 수 있으며, 다양한 조사가 이루어질 필요가 있지만, 이산화질소층이 구름층과 일부라도 겹치는 결과로 인하여 구름이 존재할 경우 그렇지 않은 경우보다 비교적 크게 이산화질소를 과대 산출한 것으로 사료된다.

이 두개의 다른 플랫폼에서의 관측된 영역크기의 차이로 인하여 각 공간에 측정된 이산화질소농도의 차이가 최종적으로 산출된 이산화질소의 산출결과에 차이에 일부 반영이 되었을 것으로 생각된다. OMI의 가장 작은 관측화소는 $13 \times 24 \text{ km}^2$ 이며 MAX-DOAS는 0.5° 의 관측 각을 가지며, 대기환경에 따라 서울에서 2–10 km 직선거리를 스캔 한다. 하지만 다양한 이산화질소의 발생원이 분포하고 있는 서울에서는 이러한 관측공간의 차이가 일부 반영될 것으로 사료된다. 이산화질소의 주요발생원이 없는, 즉 이산화질소가 비교적 균질하게 존재하는 곳에서 두 산출결과값의

Fig. 5. Correlations between NO_2 vertical column densities obtained from MAX-DOAS and OMI within 0.1 and 0.3° OMI spatial coverage

비교를 통해, OMI의 정확성을 보다 더 정확하게 정량화할 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 공간적 차이로 인한 두 원격측정값의 차이를 조사하기 위하여 OMI의 관측범위가 0.3° 일 때 MAX-DOAS 이산화질소 값과 OMI의 관측범위가 0.1° 일 때 두 관측 값의 상관관계를 비교하여보았다. Fig. 5에서 보여지는 바와 같이 OMI의 관측범위가 0.3° 일 때 MAX-DOAS 이산화질소 값과 OMI의 값 사이의 상관계수는 0.73으로 OMI의 관측범위가 0.1° 일 때의 두 값 사이의 상관계수인 0.75보다 약간 낮은 것으로 확인이 되었다. 하지만, 두 상관관계식에서 기울기의 경우 OMI의 관측범위가 0.3° 일 때 1.07로 OMI의 관측범위가 0.1° 일 때의 상관관계식의 기울기보다 좋았으나, Y절편의 경우 OMI의 관측범위가 0.3° 일 때 4.76으로 OMI의 관측범위가 0.1° 일 때의 2.79보다 높은 절편 값을 보였다. 이러한 결과를 고려해볼 때, 서울과 같은 대도시 지역에서는 공간의 차이가 두 관측결과값의 불일치 정도에 일부 기여하는 것으로 판단될 수 있으나, 그 정도에 대해서는 추가관측을 통하여 조사할 필요가 있는 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구를 통하여 처음으로 서울에서 MAX-DOAS를 이용하여 이산화질소의 수직증적분농도를 산출하

였다. MAX-DOAS로부터 산출된 값들과 OMI 위성센서로부터 산출된 서울지역의 대류권 이산화질소 산출물과 비교를 통하여 OMI로부터 산출된 서울지역에 존재하는 이산화질소 수직층적분농도와 비교연구를 수행하였다. 전체 관측기간 동안 구름이 조금 있는 경우의 두 산출물간의 상관관계는 구름이 없는 경우보다 낮은 상관관계를 보였다. 두 산출물의 비교에서 계산된 상관관계 식에서 구름이 있을 경우의 Y절편 값이 높은 것으로 파악되었으며 이는 구름과 이산화질소가 같은 고도에 분포하고 있을 경우 구름입자들에 의한 다중산란으로 원래의 농도보다 높은 이산화질소의 경사층적분농도가 산출될 수 있다. 정확한 구름과 이산화질소 고도 정보가 없이 복사전달모델로 계산된 대기질량인자가 이러한 다중산란을 반영하기가 어려워 결과적으로 이산화질소량을 과대평가할 수 있는 것으로 판단된다.

두 해 봄철에 걸쳐 MAX-DOAS 관측을 수행하였지만, OMI로부터 산출된 이산화질소와의 더욱 정확한 비교분석을 위해서는 다른 계절을 포함하는 장기간 관측으로부터 구해진 결과물과의 비교가 필요할 것으로 판단된다. 또한, 대기질량인자를 보다 정확히 계산하기 위해 sunphotometer와 같은 다른 기기로부터 산출된 에어로솔의 정보들을 활용할 경우 보다 정확한 에어로솔의 광학특성정보를 사용하여 대기질량인자의 불확실성을 낮출 수 있을 것으로 간주된다. 추후 수행될 연구에서는 이산화질소뿐만 아니라, 이산화황과 오존, 포름알데히드의 비교연구를 수행하여, OMI로부터 산출된 각 미량기체들의 상대적 정확성을 이해할 필요가 있다.

사사

본 연구는 환경부 환경산업기술원 차세대에코이노베이션기술 개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- Boersma, K.F., H.J. Eskes, J.P. Veefkind, E.J. Brinksma, R.J. van der A, M. Sneep, G.H. van den Oord, P. F. Levelt, P. Stammes, J.F. Gleason, and E.J. Bucsela, 2007. Near-real time retrieval of tropospheric NO₂ from OMI, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7: 2103-2118.
- Hönniger, G., C. von Friedeburg, and U. Platt, 2004. Multi axis differential optical absorption spectroscopy (MAX-DOAS), *Atmospheric Chemistry and Physics*, 4: 231-254.
- Platt, U. and J. Stutz, 2008. *Differential Optical Absorption Spectroscopy: Principles and Applications*, Springer Verlag, Heidelberg.
- Shin, D.S. and Y.R. Lee, 1997. Geometric Modeling and Coordinate Transformation of Satellite-Based Linear Pushbroom-Type CCD Camera Images, *Journal of the Korean Society of Remote Sensing*, 13(2): 85-98.
- US Environmental Protection Agency, 1998. *National Air Quality and Emissions Trends Report 1997*. Research Triangle Park, NC.
- Vandaele, A.C., P.C. Simon, J.M. Guilmot, M. Carleer and R. Colin, 1994. SO₂ absorption cross section measurement in the UV using Fourier transform spectrometer, *Journal of Geophysical Research*, 99: 25599-25605.
- Voigt, S., J. Orphal, and J. Burrows, 1999. UV-visible absorption cross-sections of NO₂ and O₃ at atmospheric temperatures and pressures by FTS, *Proc. of the First European Symposium on Atmospheric Measurements from Space (ESAMS-99)*, European Space Agency, Document ESA WPP-161, 443-465.