

위성 (OMI)을 활용한 한반도 지역 NO₂ 분석

Analysis of NO₂ over the Korean Peninsula from Ozone Monitoring Instrument Satellite Measurements

김덕래 · 최원준 · 이준석 · 김승연 · 홍준석 · 송창근*

이재범 · 홍유덕 · 이석조¹⁾

국립환경과학원 기후변화연구과, ¹⁾국립환경과학원 기후대기연구부
(2011년 10월 21일 접수, 2012년 3월 26일 수정, 2012년 5월 9일 채택)

Deok-Rae Kim, Won-Jun Choi, Joon-Suk Lee, Seung-Yeon Kim, Jun-Suk Hong,
Chang-Keun Song*, Jae-Bum Lee, You-Deog Hong and Suk-Jo Lee¹⁾
Climate Change Research Division, National Institute of Environmental Research

¹⁾*Climate and Air Quality Research Department, National Institute of Environmental Research*

(Received 21 October 2011, revised 26 March 2012, accepted 9 May 2012)

Abstract

Monitoring of climate change and atmospheric environment by satellite measurements has been increased in recent years. In this study, nitrogen dioxide (NO₂) measurements from Ozone Monitoring Instrument (OMI) were compared with surface measurements over the Korean peninsula. NO₂ from OMI measurements showed high values and also showed seasonal variations such as high concentration in winter and low in summer over metropolitan areas while NO₂ concentration at national background station was low and did not clearly show seasonal variations. Surface measurements showed similar temporal and spatial variations to those of satellite measurement. The comparison between satellite measurements and surface measurements showed that the correlation between them was higher in urban area ($r=0.64$ at Seoul and $r=0.63$ at Daegu) than in national background stations ($r=0.37$ at Jeju) because the concentration in urban area was relatively high so that the variation of NO₂ concentration could be detected better than at national background stations by satellite. Satellite can effectively measure the emission and transport of pollutants with no limitations in spatial coverage.

Key words : OMI, Satellite, Surface measurements, NO₂

1. 서 론

동북아시아 지역은 인구성장과 급격한 산업화로

화석 연료 사용과 자동차 배기가스 등 대기오염물질이 증가하고 있다 (Baek and Kim, 2010; Lee *et al.*, 2008; Streets and Waldhoff, 2000). 이러한 대기오염 물질은 한 영역에서 발생하여 특정 지역에 머무르는 것이 아니라 기상조건에 따라 주변 지역 또는 국가로 이동하기 때문에 대기환경 및 기후변화에 큰 영

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)32-560-7303, E-mail : cksong@korea.kr

향을 미친다(Baek and Kim, 2010; Lee *et al.*, 2008). 따라서 각 국가는 지상 및 항공 관측 등을 통해 자국 및 주변국에서 발생하는 대기오염물질을 파악하는 데 많은 노력을 기울이고 있다. 그러나 지상 및 항공 관측은 신뢰성과 일관성 있는 자료를 확보할 수 있으나 공간적 영역에 한계가 있어 넓은 영역을 관측하는 데 어려움이 따른다. 따라서 지상 및 항공 관측이 가지는 관측 영역의 한계를 극복할 수 있는 위성을 활용할 경우 전구규모 관측과 지역규모 오염물질의 이동 연구에 유리하다.

특히 원격탐사 기술의 급격한 발달로 대기오염물질의 측정이 가능해짐에 따라 위성을 이용한 미량기체 감시는 선진국인 미국과 유럽을 중심으로 활발히 진행되어 오고 있다. 이러한 미량기체 탐사를 위한 위성으로는 Nimbus 7(TOMS), ERS-2(GOME), Terra(MOPITT, MODIS, MISR), ENVISAT(SCIAMACHY), Aqua(MODIS, AIRS), Aura(OMI, TES), CALIPSO(CALIOP), MetOP(GOME-2, IASI) 등이 있으며(Martin, 2008), 이들 위성은 NO₂, HCHO, SO₂, O₃, BrO 등 좀 더 다양한 종류의 미량기체에 대한 정보를 획득할 수 있고, 높은 공간해상도를 제공하고 있다. 그리고 위성을 통한 대기의 미량기체 정보는 우리나라뿐 아니라, 동아시아 지역은 물론, 전구를 커버할 수 있으며 지속적이고 안정적인 관측을 통해 주변국가, 그리고 다른 대륙까지 광범위하게 이동하는 대기오염물질을 분석하는 데 매우 효과적이다(NIER, 2010).

대기의 미량기체 중 이산화질소(NO₂)는 대기 화학적으로 큰 영향을 미치는 가스이며(Sheel *et al.*, 2010; Boersma *et al.*, 2009; Zyrichidou *et al.*, 2009; Ionov *et al.*, 2008), 대표적인 대기 오염원 중 하나이다. 그리고 이산화질소에 노출되어 흡입할 경우 폐질환을 일으킬 수 있으며(Cheon *et al.*, 2010), 이산화질소의 발생원으로는 자동차 배기가스나 산업장의 연소과정에서 발생하는 것이 대표적이며, 토양 및 수중 미생물의 작용, 번개 등이 있다. 특히 도시에서의 질소산화물은 대부분이 물질의 연소과정에서 발생되는데, 이 중 90% 이상이 NO의 형태로 대기 중에 배출되며 이렇게 배출된 NO가 대기 중에서 산화되어 NO₂로 생성된다.

위성자료를 이용한 NO₂ 연구는 다수의 연구자들에 의해 수행되었다. 위성자료와 모델 자료간의 상호 비교 분석(Han *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2011; Sheel *et al.*, 2010; Chai *et al.*, 2009; Kurokawa *et al.*, 2009;

Zyrichidou *et al.*, 2009; Shi *et al.*, 2008; He *et al.*, 2007; Ma *et al.*, 2006), 위성자료와 지상관측 자료 또는 항공기 관측 자료와의 상호 비교 분석(Gruzdev and Elokhov, 2010; Lamsal *et al.*, 2010, 2008; Ionov *et al.*, 2008, 2006), 위성 간의 상호 비교 분석(Boersma *et al.*, 2009, 2008; Bracher *et al.*, 2005) 등이 있다. 그러나 이들 연구들은 주로 위성과 모델자료에 의존해 진행되어 왔으며, 지상관측 자료와의 비교 검증에 대한 분석은 미비한 실정이다. 또한 연구 대상 지역이 국외 지역에 국한 되어 국내의 경우는 아직까지 연구된 바가 없다.

이에 본 연구에서는 Ozone Monitoring Instrument(이하 OMI) 위성으로부터 산출된 NO₂의 시·공간 분포 특성을 분석하고 한반도 지역의 지상관측 NO₂ 자료와의 관계성을 분석하고자 한다.

2. 자료 및 연구방법

OMI는 2004년 7월 발사된 EOS-Aura 위성에 탑재된 센서로 약 0.5 nm의 스펙트럼 분해능을 가지며 270~500 nm의 자외선 및 가시광선 영역을 직하점(nadir) 방식으로 관측한다(Levelt *et al.*, 2006). 그리고 자외선 채널은 두 개의 하위채널(UV-1, UV-2)로 구성되어 있고, 그 파장영역은 각각 270~310 nm와 310~365 nm이며, 평균 스펙트럼 분해능은 각각 0.42 nm와 0.45 nm로 매우 좋다. 가시광 채널 영역은 365~500 nm이며, 평균 스펙트럼 분해능은 0.63 nm이다. 또한 OMI 센서는 114°의 넓은 시야(field of view)를 가지고 있고, 관측폭(swath)이 2,600 km로 넓어 하루 만에 전구를 관측할 수 있으며 적도 지역을 13:45분경에 통과한다. OMI의 공간해상도는 13 × 24 km²이며, 관측대상은 미량기체인 NO₂, SO₂, O₃, OCIO, BrO 등이 있다.

OMI 위성으로부터 미량기체 분석은 세 가지 단계를 거쳐 계산된다. 간단히 설명하면, 차등흡수분광법(Differential optical absorption spectroscopy, DOAS)을 이용하여 경사컬럼농도(Slant column density, SCD)를 산출하고, SCD는 대기복사전달 모델을 이용하여 계산된 Air mass factor(AMF)를 이용하여 수직컬럼농도(Vertical column density, VCD)로 전환하여 구할 수 있다(Han *et al.*, 2011; Hains *et al.*, 2010;

Boersma *et al.*, 2007). 그리고 NO₂ 알고리즘은 성층권과 NO₂가 없는 대류권처럼 비오염지역과 NO₂ 경계층을 내포하는 오염지역으로 구분함으로써 좀 더 적절한 AMF가 적용되어 보다 정확한 NO₂ 컬럼과 대류권 NO₂ 농도를 계산하게 된다. AMF는 오염컬럼과 비오염컬럼의 특별한 NO₂ 프로파일을 이용하여 계산되어지며, 이러한 컬럼의 양과 가정된 프로파일 형태를 가지고 대류권 NO₂ 양을 계산할 수 있다(NIER, 2010). 그러나 알고리즘에 대한 정보는 기존 연구논문들에서 많이 언급되어 있으며, 자세한 설명은 Boersma *et al.* (2007)과 DOMINO Product Specification Document (http://www.temis.nl/docs/OMI_NO2_HE5_1.0.2.pdf)에 기술되어 있다.

본 연구에서 사용한 자료는 NASA (<http://mirador.gsfc.nasa.gov/>)에서 제공 하는 NO₂ 일별 Level-2 자료이며, 2005년 1월 1일부터 12월 31일까지 1년간 일별 Tropospheric NO₂ 자료를 이용하였다. 그리고 NO₂ 분석은 구름에 의한 영향을 제거하기 위하여 구름운량(effective cloud fraction)이 0.2 이하인(Sheel *et al.*, 2010; Boersma *et al.*, 2009; Van der A *et al.*, 2008; Richter *et al.*, 2005) 자료만을 사용하여 위·경도 0.5° × 0.5° 격자의 일별 자료를 생성하였다.

지상관측자료는 환경부 및 지방자치단체에서 설치·운영하고 있는 총 10개 종류의 측정망 중 도시대기(서울, 대구), 교외대기(정선, 영천), 국가배경농도(태안, 제주) 자료를 이용하였다. 측정항목은 NO₂, SO₂, O₃, CO, PM₁₀ 등이며, 국립환경과학원에서 2001년 1월부터 적용한 통계자료를 이용하였다(Ministry of environment(ME), 2009). 그리고 측정항목중 NO₂ 관측은 대기오염공정시험법에 따라 화학발광법의 자동연속측정법을 이용하고 있으며, 시료 대기중에 포함되어 있는 일산화질소(NO) 또는 질소산화물(NO+NO₂)을 연속 측정하는 방법이다. 측정된 결과는 국립환경과학원에서 최종적으로 통계처리하여 5분 또는 매시 자료를 제공하고 있다. 본 연구에서 사용된 자료는 2005년 1월 1일부터 2005년 12월 31일까지 1년간 1시간 평균 NO₂ 농도 자료이며, 표 1에 측정소와 그 위치를 나타내었다.

지상관측자료는 연속 관측이며 한 지점에 대한 관측인 반면 위성은 한 순간(snapshot)의 화소 관측이라는 점에서 직접 비교에 어려움이 있다. 따라서 위성이 한반도 지역을 통과하는 13:45(±30분)에서 가

장 가까운 시간대인 14:00(13:00~13:59)와 15:00(14:00~14:59) 자료의 평균된(Lee *et al.*, 2011; Lamsal *et al.*, 2010) 지상관측자료를 사용 하였다. 그리고 위성은 한반도 상공을 1회 정도 스캔을 하기 때문에 위성자료를 생성하는 데 있어 결측 자료가 생길 수 있다. 따라서 위성자료의 결측이 있을 경우 지상관측자료 또한 결측으로 처리하여 사용하였다. 그리고 대부분의 지상관측망은 대도시를 중심으로 많이 분포되어 있어 서울 27개, 대구 11개 측정소는 해당 측정소의 값을 모두 평균하여 그 지점의 대표값으로 산출하였다. 또한 위성 자료와 비교하기 위하여 서울(37.54°N, 126.99°E)과 대구(35.87°N, 128.60°E)는 그 지역 중심의 위·경도로부터 ±20 km 범위의 위성 자료의 평균 자료를 이용하였으며, 정선, 영천, 태안, 제주는 지상관측소의 위·경도를 이용하여 측정소로부터 ±20 km 범위의 위성 자료의 평균 자료를 구하여 지상관측자료와의 관계성을 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 OMI NO₂ 농도 변화 경향

그림 1은 OMI로부터 관측된 2005년 월평균 NO₂의 시·공간분포를 나타낸다. 주요 발생지역으로 중국 동부지역, 한국과 일본 등 대도시 부근 지역에서 NO₂가 높은 경향을 보였다. 이는 대도시 지역이 교외지역보다 자동차, 공장 등에서 배출되는 배출량에 기인한 것으로 판단된다. 그리고 Ghude *et al.* (2009)와 Baek and Kim (2010)의 연구결과에 따르면 인구 밀도와 NO₂는 매우 높은 상관관계를 보여주며, 인간 활동에 의한 부산물의 결과라는 것을 제시하였다. 그리고 한반도 서해 지역의 경우, 겨울철에 남해에 비해 상대적으로 높은 경향을 보였는데, 이는 중국동부 지역에서 배출된 NO₂의 유입으로 인하여 한반도 내륙 및 남해의 농도보다 높은 경향을 나타내는 것으로 판단된다(Lee *et al.*, 2008). 또한 주요 발생지역의 월평균 NO₂는 대도시와 교외지역에 관계없이 대부분의 지역에서 겨울철에 높은 경향을 보이며, 여름철에 상대적으로 낮은 분포를 보였다. 이는 겨울철에 난방연료의 연소 증가(Lee *et al.*, 2008; Van der A *et al.*, 2008; Richer *et al.*, 2005)로 인한 NO_x 배출량(겨울철이 여름철보다 7% 높음)이 높기(Wang *et al.*,

Table 1. Specifications of surface measurements sites.

Location	No.	Sites	Latitude (N)	Longitude (E)
Seoul (27)	1	Seosomun-dong	37° 33'52.093"	126° 58'43.847"
	2	Hyeje-dong	37° 34'18.865"	127° 00'28.745"
	3	Hannam-dong	37° 32'26.624"	127° 00'27.108"
	4	Guui-dong	37° 32'40.108"	127° 05'57.114"
	5	Seongsu-dong	37° 32'53.178"	127° 03'29.640"
	6	Myeonmok-dong	37° 34'49.585"	127° 04'58.585"
	7	Yongdu-dong	37° 34'33.774"	127° 01'55.970"
	8	Gireum-dong	37° 36'23.744"	127° 01'48.673"
	9	Banghak-dong	37° 39'46.614"	127° 02'03.832"
	10	Bulgwang-dong	37° 36'31.005"	126° 56'05.211"
	11	Namgajwa-dong	37° 34'25.555"	126° 54'48.423"
	12	Daeheung-dong	37° 32'49.290"	126° 57'00.095"
	13	Hwagok-dong	37° 32'40.485"	126° 50'18.026"
	14	Guro-dong	37° 28'48.461"	126° 53'51.022"
	15	Gung-dong	37° 29'54.694"	126° 50'00.067"
	16	Dangsan-dong	37° 31'30.020"	126° 54'01.385"
	17	Sadang-dong	37° 28'51.213"	126° 58'28.231"
	18	Sillim-dong	37° 29'14.176"	126° 55'48.231"
	19	Dogok-dong	37° 29'00.925"	127° 02'57.716"
	20	Banpo-dong	37° 29'47.346"	126° 59'50.047"
	21	Jamsil-dong	37° 30'21.949"	127° 05'12.958"
	22	Bangi-dong	37° 31'17.616"	127° 07'38.830"
	23	Cheonho-dong	37° 32'42.883"	127° 08'22.972"
	24	Siheung-dong	37° 27'08.263"	126° 54'39.992"
	25	Beon-dong	37° 38'16.309"	127° 01'43.819"
	26	Sinjeong-dong	37° 31'22.092"	126° 51'42.915"
	27	Sanggye-dong	37° 39'42.217"	127° 04'06.668"
Daegu (11)	1	Suchang-dong	35° 52'15.000"	128° 35'10.000"
	2	Ihyeon-dong	35° 51'59.000"	128° 32'49.000"
	3	Daemyeong-dong	35° 50'33.000"	128° 34'24.000"
	4	Nowon-dong	35° 53'28.000"	128° 33'54.000"
	5	Sinam-dong	35° 53'15.650"	128° 38'00.155"
	6	Manchon-dong	35° 51'43.000"	128° 38'32.000"
	7	Jisan-dong	35° 49'49.320"	128° 37'53.950"
	8	Galsan-dong	35° 50'04.000"	128° 30'24.000"
	9	Yulha-dong	35° 52'06.000"	128° 41'50.000"
	10	Taejeon-dong	35° 55'13.000"	128° 33'08.000"
	11	Hyeonpung-myeon	35° 41'51.000"	128° 26'45.000"
Jeongseon	1	Bukpyeong-myeon	37° 25'26.871"	128° 38'49.112"
Yeongcheon	1	Hwabuk-myeon	36° 06'38.103"	128° 55'44.484"
Tae'an	1	Pado-ri	36° 44'03.661"	126° 08'05.381"
Jeju	1	Gosan-ri	33° 15'48.582"	126° 12'48.800"

2011; Uno *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2007) 때문인 것으로 판단된다.

한편 한반도 지역에서도 대도시 지역에서 NO₂가 높게 나타났으며, 교외지역으로 갈수록 낮게 나타나는 경향을 보였다. 그리고 서울과 인접지역의 경우 다른 지역에 비해 높은 경향을 보였으며, 겨울철에 높고, 여름철에 낮은 값을 보였다. 이는 계절에 따른

NO₂의 발생과 소멸 차이에 의해 나타나는 것으로 대도시 지역의 경우 NO₂ 소멸 속도 변화에 따른 잔류 시간 변화의 영향이 큰 것으로 판단된다.

3. 2 지상관측 NO₂ 농도 변화 경향

그림 2는 한반도 지역에서의 도시대기(서울, 대구), 교외대기(정선, 영천), 국가배경대기(태안, 제주)

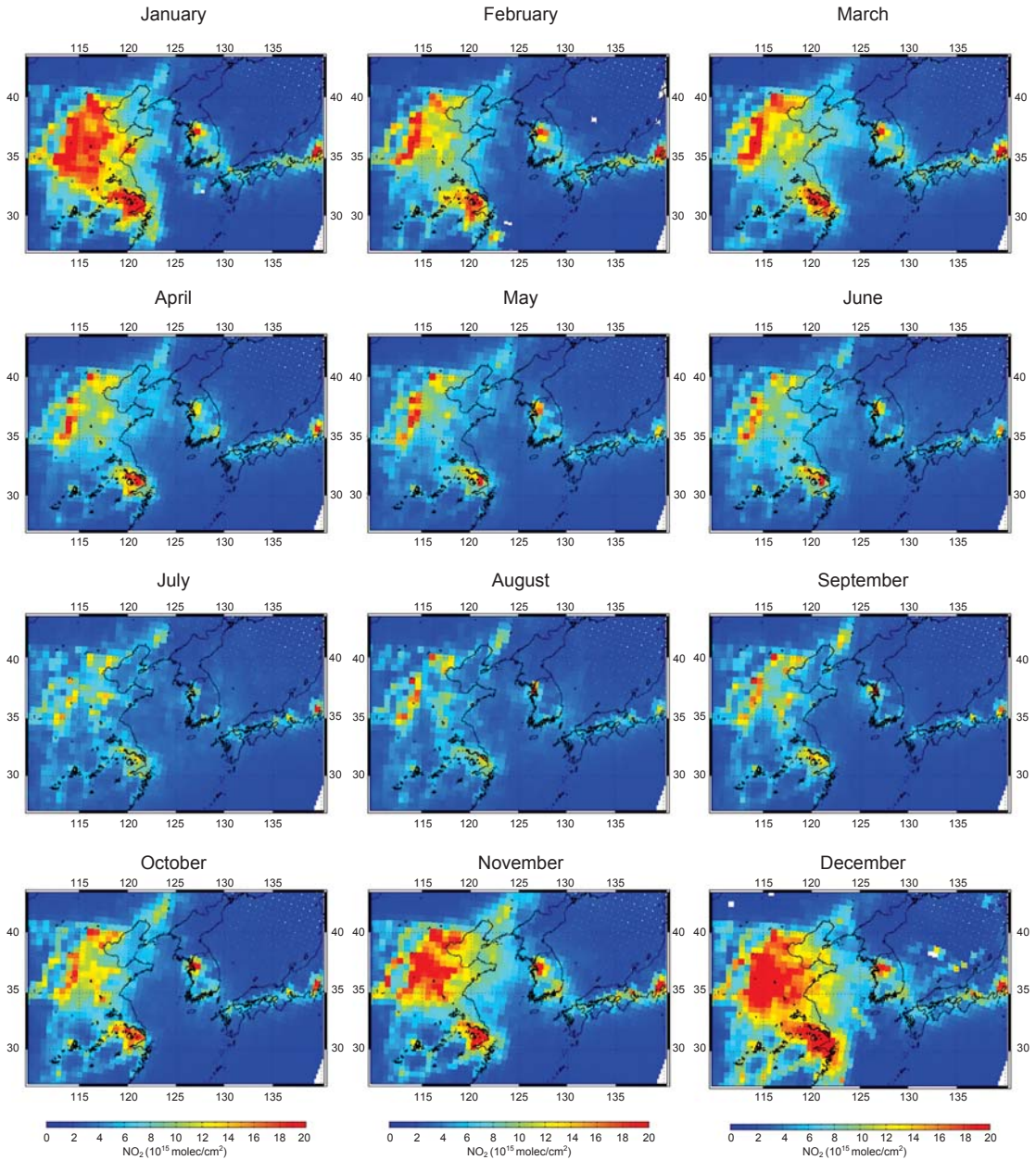


Fig. 1. The spatial distribution of monthly mean vertical columns of tropospheric NO₂ from OMI over northeast Asia from January to December in 2005.

지역의 월평균 NO₂와 시간별 NO₂ 농도 변화 경향이 다. 여기서 지상관측 자료는 위성에서 결측이 없는 날의 지상관측 자료를 평균하여 사용하였다.

그림 2(a)에서 월평균 NO₂ 농도는 서울 19.7~36.8

ppb, 대구 11.2~19.5 ppb, 정선 2.8~6.5 ppb, 영천 3.5~8.6 ppb, 태안 4.8~11.6 ppb, 제주 2.0~4.3 ppb로 서울 지역에서 가장 높은 값을 보였으며, 제주 지역에서 가장 낮은 값을 보였다. 이는 도시대기 지역이 교

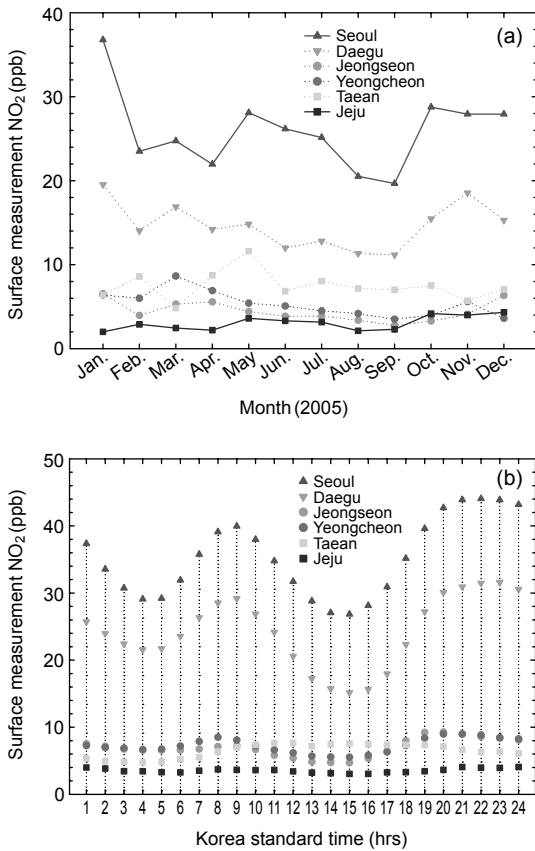


Fig. 2. Time series of (a) seasonal variation and (b) diurnal variation of surface measurements for NO₂ in 2005.

외대기나 국가배경대기 지역보다 높은 값을 보였는데 주로 NO₂의 배출원이 대도시 주변지역에 집중됨에 따른 것으로 판단된다. 월평균 최대, 최소값은 서울 1월 (36.8 ppb), 9월 (19.7 ppb), 대구 1월 (19.5 ppb), 9월 (11.2 ppb), 정선 1월 (6.5 ppb), 9월 (2.8 ppb), 영천 3월 (8.6 ppb), 9월 (3.5 ppb), 태안 5월 (11.6 ppb), 3월 (4.8 ppb), 제주 12월 (4.3 ppb), 1월 (2.0 ppb)로 나타났다. 그리고 대부분의 지역에서 9월에 가장 낮은 농도 값을 보였으며 대부분 여름철에 감소하다 겨울철에 증가하는 경향을 보였다. 이러한 경향은 앞에서 언급한 바와 같이 겨울철 난방연료의 사용에 의한 것으로 사료된다. 그러나 교외대기나 국가배경대기 지역의 경우 도시대기 지역보다 낮은 농도 값을 보이고 월별 변화 경향이 상대적으로 잘 나타나지 않는다.

이는 도시지역에서 멀리 떨어져 있고 특히 제주 지역은 비교적 청정한 지역에 위치하고 있어 도시지역 보다는 NO₂ 농도가 낮아 월별 변화가 크지 않음을 보였다. 또한 태안 지역의 경우 비교적 청정한 지역에 위치하고 있으나 상대적으로 5월에 높게 나타났는데 이는 중국동부 해안의 고농도 지역으로부터 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다 (Lee *et al.*, 2008).

그림 2(b)에서 시간별 NO₂ 농도는 서울 26.8~44.1 ppb, 대구 15.1~31.6 ppb, 정선 4.7~9.3 ppb, 영천 5.5~9.0 ppb, 태안 4.8~7.6 ppb, 제주 3.1~4.1 ppb로 월 평균 농도와 마찬가지로 서울 지역이 가장 높은 값을 보였고, 제주 지역에서 가장 낮은 값을 보였다. 그러나 시간별 NO₂ 농도는 서울과 대구(도시대기)의 경우 오전 4시와 오후 15시에 낮은 농도 값을 보이고 오전 9시와 오후 22시에 높은 농도 값이 나타나는 이중 peak를 보였다. 이러한 이중 peak의 주된 원인으로서는 오전과 오후의 인위적 자동차 배출원에 기인한 것으로 잘 알려져 있으며 출퇴근 시간에 높게 일변화가 나타나고 있음을 알 수 있다 (Shon, 2006). 그리고 정선과 영천(교외대기) 지역은 도시대기 지역에 비해 상대적으로 낮은 농도를 보였으나 도시대기 지역과 마찬가지로 이중 peak가 나타나는 일변화를 보였다. 그러나 태안과 제주(국가배경대기)의 경우 월별 변화 경향과 마찬가지로 시간별 변화 경향이 크지 않음을 보였다. 이는 도시대기 지역이 자동차 등록대수 및 통행량이 상대적으로 많아 나타나는 현상으로 판단되며 (ME, 2009), 인간의 활동과 밀접한 관계가 있음을 나타낸다. 그리고 시간별 최대, 최소값은 서울 22시 (44.1 ppb), 15시 (26.8 ppb), 대구 23시 (31.6 ppb), 15시 (15.1 ppb), 정선 20시 (9.3 ppb), 15시 (4.7 ppb), 영천 21시 (9.0 ppb), 15시 (5.5 ppb), 태안 11시 (7.6 ppb), 04시 (4.8 ppb), 제주 21시 (4.1 ppb), 15시 (3.1 ppb)로 나타났으며, 대부분의 지역에서 하루 중 일사량이 높은 시간대인 15시에 가장 낮은 농도 값을 보였으며 20시~23시에 높은 농도 값을 보였다. 이는 기온 및 일사량에 의해 대기 중의 NO₂가 광화학반응에 의해 소멸되었기 때문으로 판단되며, 퇴근에 따른 자동차 운행량의 증가 및 야간 시간대의 난방에 의한 영향을 받는 것으로 판단된다 (Lee *et al.*, 2007).

따라서 도시대기 지역의 경우 월별, 시간별 변화 경향이 뚜렷하며, NO₂ 농도가 높게 나타난다. 반면

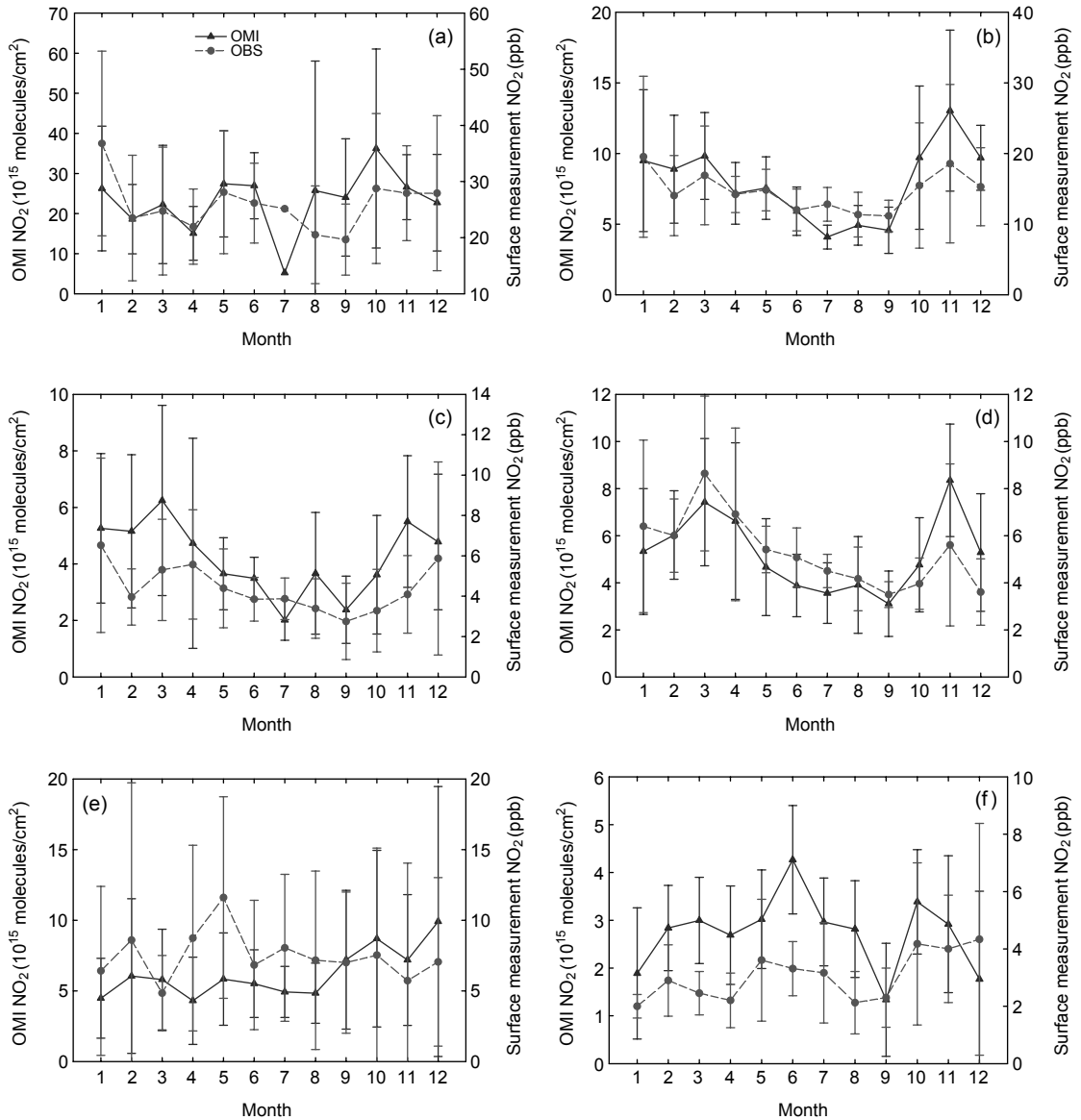


Fig. 3. Monthly mean NO₂ variations of OMI and surface measurements at (a) Seoul, (b) Daegu, (c) Jeongseon, (d) Yeongcheon, (e) Taean and (f) Jeju in 2005. The error bars indicate ±1σ (standard deviation).

교외대기와 국가배경대기 지역의 경우 월별, 시간별 변화 경향이 크지 않으며 농도 또한 낮게 나타나 한반도내에서 지역적으로 비교적 큰 차이를 보이고 있다.

3.3 OMI와 지상관측 NO₂ 비교 분석

위성으로부터 산출된 NO₂는 대류권 기둥 수밀도 (molecules cm⁻²)이며, 지상관측 NO₂는 지표면 근처의 농도값 (ppb)으로 두 관측값 사이의 단위도 다르고 관측영역도 다르다. 그러므로 위성과 지상관측

NO₂ 절대값의 직접비교는 어려우나 NO₂의 인위적 배출이 대부분 지표에서 발생함에 따라 두 값의 비교를 통해 변화경향을 보고자 한다.

그림 3은 OMI와 지상관측 NO₂의 월평균 시계열 분포이다. OMI의 월평균 NO₂는 서울 5.2~36.2 (±24.8) × 10¹⁶, 대구 4.1 (±0.8)~13.0 (±5.7) × 10¹⁶, 정선 2.0 (±0.7)~6.2 (±3.4) × 10¹⁶, 영천 3.1 (±1.4)~8.4 (±2.4) × 10¹⁶, 태안 4.3 (±3.1)~9.9 (±9.6) × 10¹⁶, 제주 1.3 (±1.2)~4.3 (±1.1) × 10¹⁶ molecules cm⁻²로 서울, 대구, 태안, 영천, 정선, 제주 순으로 나타났다. 지상관측 월평균 NO₂는 서울 19.7 (±6.3)~36.8 (±16.5), 대구 11.2 (±2.2)~19.5 (±11.4), 정선 2.8 (±1.9)~6.5 (±4.3), 영천 3.5 (±0.5)~8.6 (±3.3), 태안 4.8 (±2.7)~11.6 (±7.1), 제주 2.0 (±0.4)~4.3 (±4.0) ppb로 서울, 대구, 태안, 영천, 정선, 제주 순으로 OMI와 같은 지역 순으로 나타났으며, 서울 지역에서 가장 높은 값을 보였고, 제주 지역에서 가장 낮은 값을 보였다. 이는 3.1과 3.2에서 언급하였듯이 NO₂의 배출원이 대도시 주변지역에 집중됨에 따른 것으로 판단되며, OMI와 지상관측 모두 도시대기(서울, 대구)와 교외대기(정선, 영천)지역에서 유사한 패턴을 보이고, 대부분 여름철에 감소하다 겨울철에 증가하는 경향으로 계절적 변화 특성이 잘 나타나고 있다. 그러나 국가배경대기(태안, 제주)지역의 경우 OMI와 지상관측 모두 NO₂가 낮은 농도를 보이고, 서로 유사한 패턴, 즉 계절 변동이 뚜렷하게 나타나지 않는 특징을 보인다.

OMI의 월평균 최대, 최소값은 서울 10월 (36.2 × 10¹⁶), 7월 (5.2 × 10¹⁶), 대구 11월 (13.0 × 10¹⁶), 7월 (4.1 × 10¹⁶), 정선 3월 (6.2 × 10¹⁶), 7월 (2.8 × 10¹⁶), 영천 11월 (8.4 × 10¹⁶), 9월 (3.1 × 10¹⁶), 태안 12월 (9.9 × 10¹⁶), 4월 (4.3 × 10¹⁶), 제주 6월 (4.3 × 10¹⁶), 9월 (1.3 × 10¹⁶ molecules cm⁻²)로 나타났다. 이는 3.2에서 지상관측으로부터 언급된 여름철에 낮은 농도를 보이다 겨울철에 증가하는 경향과 유사한 패턴을 보였다. 그러나 서울 지역의 경우 OMI는 7월에 상대적으로 낮게 나타났다. 이는 위성으로부터 관측된 NO₂ 자료가 다른 날에 비하여 적고, 그 날의 NO₂가 상대적으로 낮게 나타나 최소값을 보였다. 따라서 서울 지역의 경우 7월 평균의 대표성이 낮아 객관성의 문제가 있음을 나타낸다. 또한 태안 지역의 경우 지상관측과 마찬가지로 5월에 농도가 증가하였는데 이는 앞에서

Table 2. Mean concentrations and standard deviations of the surface measurements for (a) excluded and (b) included days from missing data of satellite measurements over the Korean peninsula for July in 2005. (unit: ppb)

Location	Excluded days from missing data (a)		Included days from missing data (b)	
	Mean	Standard deviation	Mean	Standard deviation
Seoul	25.2	—	24.1	6.6
Daegu	4.1	0.8	14.5	3.3
Jeongseon	2.0	0.7	3.2	1.6
Yeongcheon	3.6	1.3	5.1	1.9
Taean	4.9	1.8	6.1	3.9
Jeju	3.0	0.9	2.4	1.4

언급한 바와 같이 중국동부 해안의 고농도 지역으로부터 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다.

한편 NO₂는 대기 중 지속시간이 하루 정도로 (Sheel *et al.*, 2010) 매우 짧은 기체이기 때문에 수송되는 양보다 발생원에 크게 의존한다. 따라서 OMI의 한반도 관측이 1일 1~2회 정도의 제한된 관측 주기로는 일변동이 있는 기체의 관측에 있어 많은 제한성이 있다. 그리고 위성 관측에 있어 가장 큰 오차 발생 원인인 구름의 영향을 제거하면 그 자료수는 좀더 줄어들어 일별 변화를 분석하는 데 있어 큰 어려움이 있다. 또한 OMI와 지상관측의 일 농도 변화 분석은 계절에 따라 표본 개수의 부족으로 경향 분석이 어려우며, 이에 지상관측자료를 통하여 위성으로부터 결측을 제외한 날(a)과 결측을 모두 포함한 날(b)을 비교한 결과, 0.7~1.8 ppb, 1.4~6.6 ppb로 결측을 포함한 날의 오차가 좀더 크게 나타났다(표 2). 따라서 본 연구에서는 OMI와 지상관측 NO₂의 일별 분포는 제시하지 않았으며, 일 변동성을 파악하고 연속적인 대기오염물질을 감시하기 위해서는 정지궤도 위성의 자료를 확보하는 것이 중요하다고 사료된다.

그림 4는 OMI와 지상관측 NO₂의 상관계수를 나타내었다. 여기서 상관계수는 위성에서 결측이 없는 날의 지상관측 자료의 일평균 자료와 비교하였다.

서울, 대구, 정선, 영천, 태안, 제주 지역의 상관계수 r값은 0.64, 0.63, 0.49, 0.51, 0.57, 0.37로 서울 지역이 0.64로 가장 높은 값을 보였으며, 제주 지역이 0.37로 가장 낮은 값을 보여 도시지역으로 갈수록 높은

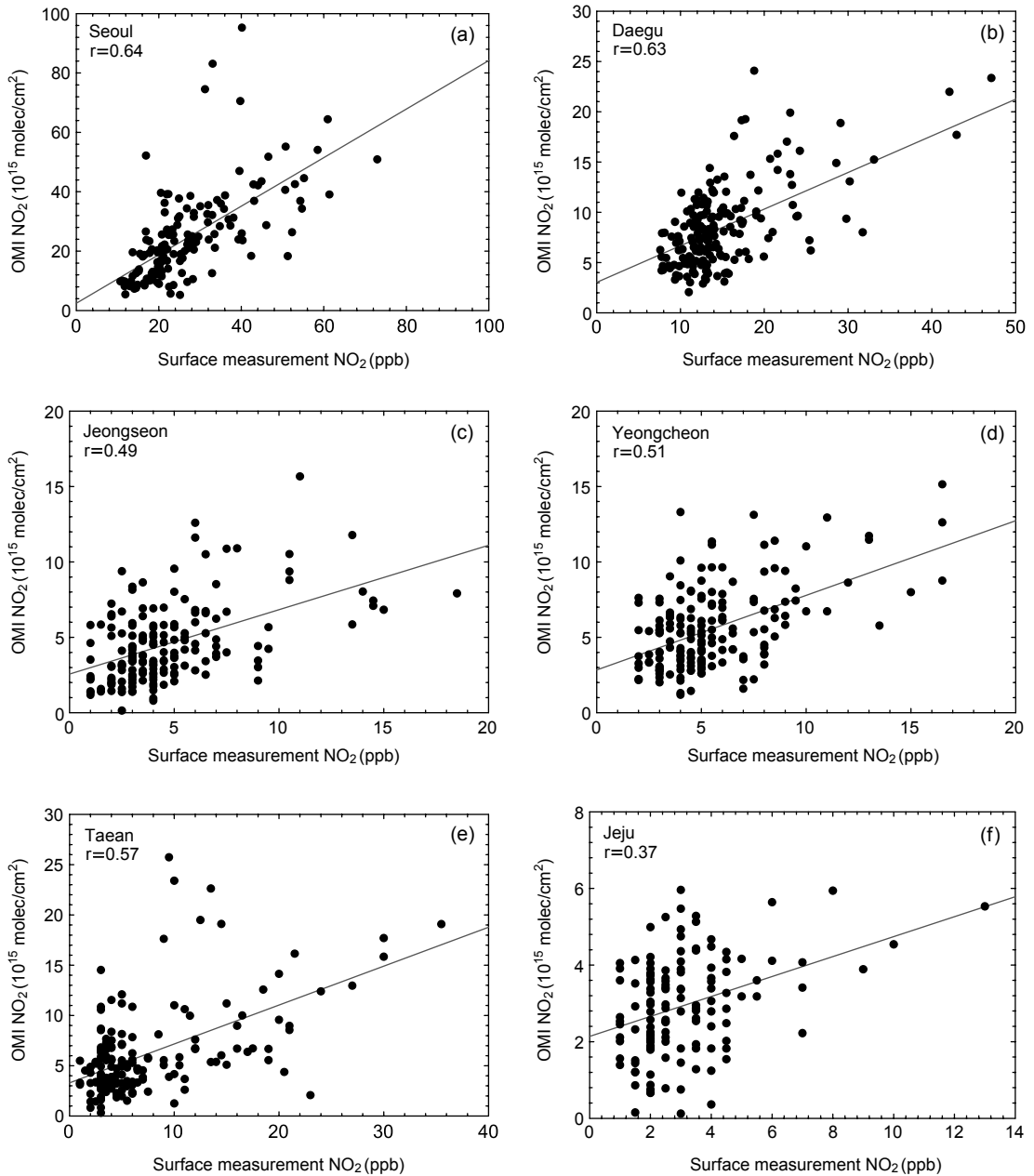


Fig. 4. Scatterplots of the daily mean NO₂ concentrations between OMI and surface measurements for (a) Seoul, (b) Daegu, (c) Jeongseon, (d) Yeongcheon, (e) Taean and (f) Jeju in 2005.

상관관계가 나타났다. 이는 지역별 지상 배출량의 기여도 차이에 따른 것으로 판단된다. 즉 도시대기 지역의 경우 대류권 컬럼 수밀도에 지상 배출량의 기

여도가 상대적으로 크기 때문에 위성 관측의 불확실성이 줄어들어 상관관계가 상대적으로 높게 나타난 것으로 판단된다. 반면 교외대기나 국가배경대기 지

역은 지상 배출량 자체가 낮아 위성 관측 컬럼 수밀도의 지상 농도 대표성이 상대적으로 낮은 것으로 사료된다. 그리고 위성으로부터 산출된 NO₂ 알고리즘에서 불확실성 (Wang *et al.*, 2011; Boersma *et al.*, 2007)으로 인해 시·공간 분포에 따른 위성과 지상 관측 자료를 직접 비교하는 데 있어 오차가 생길 수 있다. 따라서 위성과 지상관측 자료의 비교에 있어 위와 같은 문제와 알고리즘의 개선 등을 통하여 조금 더 오류를 줄일 수 있다면, 좀 더 정확성과 신뢰성 높은 상관관계를 구할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

해양이나 산악지역 등 지상 관측이 이루어지기 힘든 공간에 대한 한계를 극복하기 위한 일환으로 위성을 활용한 대기오염물질 감시에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 본 연구는 2005년 한반도 지역의 도시대기(서울, 대구), 교외대기(정선, 영천), 국가배경대기(태안, 제주)지역의 지상 관측 NO₂ 농도와 OMI 위성에서 관측된 NO₂ 자료의 관계성을 조사하여, 위성을 통한 대기오염물질 감시를 위한 기반 정보를 제공하고자 한다.

OMI로부터 관측된 NO₂는 중국 동부지역, 일본 그리고 한반도의 대도시 지역에서 높게 나타났으며, 겨울철에 높고 여름철에 낮은 계절적 변화를 보였다. 또한 한반도 지역의 지상 관측된 NO₂도 도시대기 지역이 타 지역에 비해 높은 값을 보였으며, 겨울철에 높고 여름철에 낮은 계절적 변화를 보였다. 이는 대도시 지역이 자동차, 공장 등에서 배출되는 배출량이 타 지역보다 높고, 겨울철에 난방으로 인한 NO₂ 배출량의 증가로 인해 여름철보다 겨울철에 높게 나타나는 것으로 판단된다. 그리고 한반도 지역에서 관측된 OMI와 지상관측 NO₂는 도시대기와 교외대기 지역에서 여름철에 감소하다 겨울철에 증가하는 월 변화 패턴이 유사하게 잘 나타났다. 그러나 국가배경대기 지역은 월 변화 패턴은 유사하였으나, 도시대기 지역보다 전반적으로 월평균 NO₂ 농도가 낮은 값을 보였고, 도시대기와 교외대기 지역과 달리 계절적 변화가 뚜렷하게 나타나지 않는 특징을 보였다. 그리고 두 관측 간의 상관관계는 도시지역이 타 지역에 비해 상대적으로 높은 값을 보였으며, 이는 도시대기

지역의 경우 위성에 관측된 대류권 컬럼 수밀도에 미치는 지상 배출량의 영향이 크게 나타남에 기인하는 것으로 판단된다.

위성으로부터 산출된 NO₂는 지상관측자료와 유의한 상관성을 나타내어 위성을 통한 대기오염물질 감시는 지상관측이 가지는 공간적 한계성을 극복할 수 있는 대안으로 고려될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 위성은 광범위한 영역의 관측이 가능하여 대기오염물질의 배출과 장거리 수송 등을 파악하는 데 있어 중요한 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 현재 위성을 통한 대기환경 감시는 모두 극궤도 위성에 의해 이루어지고 있어 대기오염물질의 일 변동성을 파악하고, 연속적인 대기오염물질 수송을 감시하기 위해서는 정지궤도 위성이 필요한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- Baek, K.-H. and J.H. Kim (2010) Analysis of characteristics of air pollution over Asia with satellite-derived NO₂ and HCHO using statistical methods, *Atmos. Kor. Mete. Soc.*, 20(4), 495-503. (in Korean with English abstract)
- Boersma, K.F., D.J. Jacob, H.J. Eskes, R.W. Pinder, J. Wang, and R.J. van der A (2008) Intercomparison of SCIAMACHY and OMI tropospheric NO₂ columns: Observing the diurnal evolution of chemistry and emissions from space, *J. Geophys. Res.*, 113, D16S26, doi:10.1029/2007JD008816.
- Boersma, K.F., D.J. Jacob, M. Trainic, Y. Rudich, I. DeSmedt, R. Dirksen, and H.J. Eskes (2009) Validation of urban NO₂ concentrations and their diurnal and seasonal variations observed from the SCIAMACHY and OMI sensors using in situ surface measurements in Israeli cities, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 3867-3879.
- Boersma, K.F., H.J. Eskes, J.P. Veefkind, E.J. Brinksma, A.R.J. van der, A.M. Sneep, G.H.J. 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, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 2103-2118.
- Bracher, A., H. Bovensmann, K. Bramstedt, J.P. Burrows, T. von Clarmann, K.-U. Eichmann, H. Fischer, B. Funke, S. Gil-Lopez, N. Glatthor, U. Grabowski, M. Hopfner, M. Kaufmann, S. Kellmann, M. Kiefer, M.E. Koukouli, A. Linden, M. Lopez-Puertas, G.

- Mengistu Tsidu, M. Milz, S. Noel, G. Rohen, A. Rozanov, V.V. Rozanov, C. von Savigny, M. Sinnhuber, J. Skupin, T. Steck, G.P. Stiller, D.-Y. Wang, M. Weber, and M.W. Wuttke (2005) Cross comparisons of O₃ and NO₂ measured by the atmospheric ENVISAT instruments GOMOS, MIPAS, and SCIAMACHY, *Advances in Space Res.*, 36, 855-867.
- Chai, T., G.R. Carmichael, Y. Tang, A. Sandu, A. Heckel, A. Richter, and J.P. Burrows (2009) Regional NO_x emission inversion through a four-dimensional variational approach using SCIAMACHY tropospheric NO₂ column observations, *Atmos. Environ.*, 43, 5046-5055.
- Cheon, S.-U., Y.J. Kim, S.Y. Kyung, S.P. Lee, J.W. Park, and S.H. Jeong (2010) A case of bronchiolitis obliterans after exposure to nitrogen dioxide, *Korean J. Occup. Env. Med.*, 22(1), 64-68. (in Korean with English abstract)
- Ghude, S.D., R.J. Van der A, G. Beig, S. Fadnavis, and S.D. Polade (2009) Satellite derived trends in NO₂ over the major global hotspot regions during the past decade and their inter-comparison, *Environ. Pollution*, 157, 1873-1878.
- Gruzdev, A.N. and A.S. Elokhov (2010) Validation of ozone monitoring instrument NO₂ measurements using ground based NO₂ measurements at Zvenigorod, Russia, *International Journal of Remote Sensing*, 31(2), 497-511.
- Hains, J.C., K.F. Boersma, M. Kroon, R.J. Dirksen, R.C. Cohen, A.E. Perring, E. Bucsela, H. Volten, D.P.J. Swart, A. Richter, F. Wittrock, A. Schoenhardt, T. Wagner, O.W. Ibrahim, M.V. Roozendael, G. Pinardi, J.F. Gleason, J.P. Veefkind, and P. Levelt (2010) Testing and improving OMI DOMINO tropospheric NO₂ using observations from the DANDELIONS and INTEX-B validation campaigns, *J. Geophys. Res.*, 115, D05301, doi:10.1029/2009JD012399.
- Han, K.-M., C.K. Lee, J. Lee, J. Kim, and C.H. Song (2011) A comparison study between model-predicted and OMI-retrieved tropospheric NO₂ columns over the Korean peninsula, *Atmos. Environ.*, 45, 2962-2971.
- He, Y., I. Uno, T. Ohara, N. Sugimoto, A. Shimizu, A. Richter, and J.P. Burrows (2007) Variations of the increasing trend of tropospheric NO₂ over central east China during the past decade, *Atmos. Environ.*, 41, 4865-4876.
- Ionov, D.V., V.P. Sinyakov, and V.K. Semenov (2006) Validation of GOME (ERS-2) NO₂ vertical column data with ground-based measurements at Issyk-Kul (Kyrgyzstan), *Advances in Space Res.*, 37, 2254-2260.
- Ionov, D.V., Y.M. Timofeyev, V.P. Sinyakov, V.K. Semenov, F. Goutail, J.-P. Pommereau, E.J. Bucsela, E.A. Celarier, and M. Kroon (2008) Ground-based validation of EOS-Aura OMI NO₂ vertical column data in the midlatitude mountain ranges of Tien Shan (Kyrgyzstan) and Alps (France), *J. Geophys. Res.*, 113, D15S08, doi:10.1029/2007JD008659.
- Kurokawa, J.I., K. Yumimoto, I. Uno, and T. Ohara (2009) Adjoint inverse modeling of NO_x emissions over eastern China using satellite observations of NO₂ vertical column densities, *Atmos. Environ.*, 43, 1878-1887.
- Lamsal, L.N., R.V. Martin, A. van Donkelaar, E.A. Celarier, E.J. Bucsela, K.F. Boersma, R. Dirksen, C. Luo, and Y. Wang (2010) Indirect validation of tropospheric nitrogen dioxide retrieved from the OMI satellite instrument: Insight into the seasonal variation of nitrogen oxides at northern midlatitudes, *J. Geophys. Res.*, 115, D05302, doi:10.1029/2009JD013351.
- Lamsal, L.N., R.V. Martin, A. van Donkelaar, M. Steinbacher, E.A. Celarier, E.J. Bucsela, E.J. Dunlea, and J.P. Pinto (2008) Ground-level nitrogen dioxide concentrations inferred from the satellite-borne Ozone Monitoring Instrument, *J. Geophys. Res.*, 113, D16308, doi:10.1029/2007JD009235.
- Lee, C.-K., A. Richter, J.P. Burrows, and Y.-J. Kim (2008) Satellite (SCIAMACHY) measurements of tropospheric SO₂ and NO₂: Seasonal trends of SO₂ and NO₂ levels over northeast Asia in 2006, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 24(2), 176-188. (in Korean with English abstract)
- Lee, C.-K., R.V. Martin, A. van Donkelaar, H.-L. Lee, R.R. Dickerson, J.C. Hains, N. Krotkov, A. Richter, K. Vinnikov, and J.J. Schwab (2011) SO₂ emissions and lifetimes: Estimates from inverse modeling using in situ and global, space-based (SCIAMACHY and OMI) observations, *J. Geophys. Res.*, 116, D06304, doi:10.1029/2010JD014758.
- Lee, H.-C., W.-K. Jo, and J.-T. Kim (2007) Temporal and spatial pollution characteristics of ambient criteria pollutants in metropolitan and industrial cities of Daegu-Gyeonbuk area, *J. Environ. Toxicol.*, 22(4), 329-337. (in Korean with English abstract)
- Levelt, P.F., E. Hilsenrath, G.W. Leppelmeier, G.H.J. Van den Oord, P.K. Bhartia, J. Tamminen, J.F. De Hann, and J.P. Veefkind (2006) The ozone monitoring

- instrument, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(5), 1199-1208.
- Ma, J., A. Richter, J.P. Burrows, H. Nüß, and J.A. van Aarde-
ne (2006) Comparison of model-simulated tropo-
spheric NO₂ over China with GOME-satellite data,
Atmos. Environ., 40, 593-604.
- Martin, R.V. (2008) Satellite remote sensing of surface air qual-
ity, *Atmospheric Environment*, 42, 7823-7843.
- Ministry of Environment (2009) Annual report of air quality
in Korea, 441pp.
- National Institute of Environmental Research (2010) Research
for developing and application of GEMS (Geosta-
tionary Environmental Monitoring Spectrometer)
(II), 466pp.
- Richter, A., J.P. Burrows, H.N. β, C. Granier, and U. Niemeier
(2005) Increase in tropospheric nitrogen dioxide
over China observed from space, *Nature*, 437, 129-
132.
- Sheel, V., S. Lal, A. Richter, and P. Burrows (2010) Compari-
son of satellite observed tropospheric NO₂ over India
with model simulations, *Atmos. Environ.*, 44, 3314-
3321.
- Shi, C., H.J.S. Fernando, Z. Wang, X. An, and Q. Wu (2008)
Tropospheric NO₂ columns over east central China:
Comparisons between SCIAMACHY measurements
and nested CMAQ simulations, *Atmos. Environ.*, 42,
7165-7173.
- Shon, Z.-H. (2006) Photochemical analysis of ozone episodes
in the metropolitan area of seoul during the summer
2004, *Journal of Korean Society for Atmospheric
Environment*, 22(3), 361-371. (in Korean with Eng-
lish abstract)
- Streets, D.G. and S.T. Waldhoff (2000) Present and future emi-
ssions of air pollutants in China: SO₂, NO_x, and CO,
Atmos. Environ., 34, 363-374.
- Uno, I.H., T. Ohara, K. Yamaji, J.I. Kurokawa, M. Katayama,
Z. Wang, K. Noguchi, S. Hayashida, A. Richter, and
J.P. Burrows (2007) Systematic analysis of interan-
nual and seasonal variations of model-simulated
tropospheric NO₂ in Asia and comparison with
GOME-satellite data, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 1671-
1681.
- Van der A, R.J., H. Eskes, K.F. Boersma, T.P.C. van Noije, M.
Van Roozendaal, I. De Smedt, D.H.M.U. Peters, and
E.W. Meijer (2008) Trends, seasonal variability and
dominant NO_x source derived from a ten year record
of NO₂ measured from space, *J. Geophys. Res.*, 113,
D04302.
- Wang, S., J. Xing, S. Chatani, J. Hao, Z. Klimont, J. Cofala,
and M. Amann (2011) Verification of anthropogenic
emissions of China by satellite and ground observa-
tions, *Atmos. Environ.*, 45, 6347-6358.
- Zhang, Q., D.G. Streets, K. He, Y. Wang, A. Richter, J.P. Bur-
rows, I. Uno, C.J. Jang, D. Chen, Z. Yao, and Y. Lei
(2007) NO_x emission trends for China, 1995-2004:
the view from the ground and the view from space,
J. Geophys. Res., 112, D22306, doi:10.1029/2007
JD008684.
- Zyrichidou, I., M.E. Koukouli, D.S. Balis, E. Katragkou, D.
Melas, A. Poupkou, I. Kioutsioukis, R. van der A,
F.K. Boersma, M. van Roozendaal, and A. Richter
(2009) Satellite observations and model simulations
of tropospheric NO₂ columns over south-eastern
Europe, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 6119-6134.