



논문

위성자료를 이용한 주요 항구도시에서 가스상 대기오염물질의 칼럼농도 변화 특성 조사 및 이산화질소 혼합비 첫 산출 연구

Investigation of Long Term Changes in Trace Gases and First Retrieval of Nitrogen Dioxide Surface Mixing Ratio over Major Ports Using Satellite Data

최원이, 박준성, 김대원, 양지원, 강형우, 이한림*
 부경대학교 공간정보시스템공학과

Wonei Choi, Junsung Park, Daewon Kim, Jiwon Yang, Hyeongwoo Kang, Hanlim Lee*

Division of Earth Environmental System Science Major of Spatial Information Engineering, Pukyong National University

접수일 2018년 11월 16일
 수정일 2018년 11월 26일
 채택일 2018년 11월 27일

Received 16 November 2018
 Revised 26 November 2018
 Accepted 27 November 2018

*Corresponding author
 Tel : +82-(0)51-629-6688
 E-mail : hllee@pknu.ac.kr

Abstract In this present study, we investigated long term changes in trace gases (SO_2 , NO_2 , and O_3) from shipping emissions over major ports in each continent using Ozone Monitoring Instrument (OMI) and Microwave Limb Sounder (MLS) measurements from 2006 to 2015. Additionally, surface nitrogen dioxide volume mixing ratio (NO_2 VMR), which can be used to air quality regulation, is retrieved using tropospheric nitrogen dioxide column density and atmospheric measurement data from Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) sensor. The long term variation of retrieved NO_2 VMRs are investigated. During ten-years, column densities of sulfur dioxide in planetary boundary layer (PBL SO_2) and tropospheric nitrogen dioxide (Trop. NO_2) decreased by $-0.3 \text{ DU decade}^{-1}$ and $-1.8 \times 10^{15} \text{ molecules cm}^{-2} \text{ decade}^{-1}$, respectively. However, tropospheric ozone (Trop. O_3) tends to increase ($2.9 \text{ DU decade}^{-1}$). The decreasing trends of PBL SO_2 and Trop. NO_2 are thought be due to regulation of NO_x and SO_x from shipping emission of International Maritime Organization. The NO_2 VMRs averaged over Busan, Jebel Ali, Rotterdam, LA, and Melbourne are tends to decrease with $0.64 \text{ ppbv decade}^{-1}$. Especially, the NO_2 VMR in Los Angles, which showed high decreasing trend of Trop. NO_2 , are decreased $1.5 \text{ ppbv per decade}$. The amount of nitrogen dioxide, one of the ozone precursors, decreased due to the emission reduction policy, while the actual Trop. O_3 tends to increase. Additional research is needed, however, the increase in Trop. O_3 column density is thought to be due to changes in volatile organic compound emissions, one of the precursors of ozone.

Key words: Port pollution, Sulfur dioxide, Nitrogen dioxide, Ozone, NO_2 mixing ratio

1. 서론

최근 선박을 이용한 해상 운송량 증가에 따라 전 세계 주요 항구들을 거치는 화물량이 증가하는 추세이다(World Shipping Council, 2015). 이에 따라 선박 연료(Heavy Fuel Oil, High Sulfur Fuel Oil, Marine Diesel Oil, Marine Gas Oil 등)의 연소 단계에서 배출

될 수 있는 황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x)과 같은 가스상 오염물질(Cullinane and Cullinane, 2013)의 배출량 또한 증가할 것으로 예상된다. 선박 배출 대기오염물질과, 이외의 관련된 항만활동(트레일러, 하역장비)에서 배출되는 디젤 배기가스로부터 NO_x , SO_x , 디젤분진(Particulate Matter) 등이 발생 될 수 있다(Han, 2011). 이와 같은 대기오염물질들이 항만

근로자 및 항만 인접 주거지 시민들의 공중보건 및 생활환경에 상당한 악영향을 미칠 수 있다(Song and Han, 2007).

항만 인근의 오염물질 모니터링 연구는 대부분 선박에 지점관측장비를 싣고 오염물질을 측정하는 방식으로 이루어졌다. 지상장비로부터 선박에서 배출될 수 있는 가스상 오염물질(SO₂, NO₂, O₃, CO₂)들의 농도를 측정하여 배출량을 추정하는 연구가 진행되다 있다(Kattener *et al.*, 2015, 2013). 지점관측장비를 이용한 가스상 오염물질 모니터링의 경우 장비를 직접 선박에 실어야 하며 관측장비를 탑재한 선박에서만 가능하다는 단점이 있다. 반면 광범위한 영역의 모니터링이 가능한 저궤도 환경위성센서를 이용한다면 항구지역이나 항로의 가스상 오염물질 모니터링이 가능할 것으로 보인다. 이에 따라 저궤도 환경위성센서를 이용한 가스상 오염물질의 모니터링 및 배출량 추정 시도 연구가 이루어진 바 있으나(Richter *et al.*, 2004), 선행연구에서 사용한 위성 센서인 SCIAMACHY (SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CHartographY)의 공간해상도가 30 km × 60 km로 낮기 때문에 대략적인 오염물질 모니터링 및 배출량 파악만이 가능하였다.

이에 따라 위성 기반으로 개선된 공간해상도를 가지고 항만 인근과 선박의 대기 오염을 효율적으로 모니터링할 필요가 있으나 관련된 연구는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 13 km × 24 km의 공간해상도를 가지는 Aura 위성의 OMI (Ozone Monitoring Instrument) 위성자료를 주로 이용하고, 동일 위성에 탑재된 MLS (Microwave Limb Sounder) 위성자료를 부가적으로 사용하여 2006년부터 2015년 사이 주요 항구도시에서 장기간으로 선박의 연료 연소에 의해 생성될 수 있는 가스상 오염물질(NO₂, SO₂, O₃)들의 농도 변화를 확인하였다. 두 번째로, 칼럼농도로 제공되는 이산화질소의 대류권 칼럼농도를 대기질 규제에 이용할 수 있는 행정경계층 내의 혼합비로 변환하고 각 대상지역에서의 이산화질소 혼합비의 장기간 변화 추세를 확인하였다.

2. 연구지역과 자료

연구대상지역은 세계선사협의회 (World Shipping Council)에서 TEU (Twenty-foot Equivalent Unit)에 따라 선정한 ‘2015 World Port Rankings’에 따라 대륙

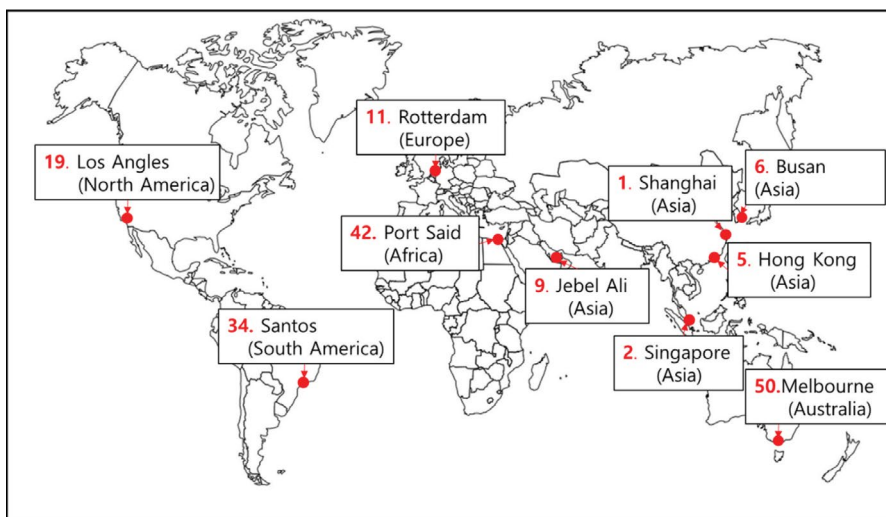


Fig. 1. The map of regions of interest.

Table 1. The specific locations and TEUs of the regions of interest.

Port ranking	Port name (Country, Continent)	Latitude	Longitude	*TEU
1	Shanghai (China, Asia)	30.627	122.065	36,516
2	Singapore (Singapore, Asia)	1.264	103.840	30,922
5	Hong Kong (Hong Kong, Asia)	22.333	114.117	20,073
6	Busan (South Korea, Asia)	35.104	129.079	19,469
9	Jebel Ali (United Arab Emirates, Asia)	25.011	55.061	15,585
11	Rotterdam (Netherlands, Europe)	51.885	4.287	12,235
19	Los Angles (United States, North America)	33.738	-118.260	8,160
34	Santos (Brazil, South America)	-23.932	-46.326	3,780
42	Port Said (Egypt, Africa)	31.265	32.316	3,036
50	Melbourne (Melbourne, Australia)	-37.839	144.944	2,638

*TEU: Twenty-Foot Equivalent unit

Table 2. The data used in this present study.

	Satellite-based data		Spatial resolution
OMI (Ozone Monitoring Instrument)	Sulfur dioxide	Level 3	0.25° × 0.25°
	Tropospheric Nitrogen dioxide	Level 3	0.25° × 0.25°
OMI/MLS (Microwave Limb Sounder)	Tropospheric Ozone	Level 3	1° × 1°
	Boundary layer height	Level 3	1° × 1°
AIRS (Atmospheric Infrared Sounder)	Air temperature	Level 3	1° × 1°
	Air pressure	Level 3	1° × 1°

별 주요 항구도시로 선정하였다(그림 1, 표 1). TEU는 20피트 길이의 컨테이너 크기를 부르는 단위로, 항구를 통해 수송되는 TEU의 총량이 많을수록 항구를 통해 수송되는 물자의 양이 많은 것을 의미한다. 10위 이내의 주요 항구는 모두 아시아에 위치하기 때문에 아시아에 해당하는 대상지역으로 10위 이내에 속하는 나라별 주요 항구도시들을 선정하였다. 선정된 항구도시들은 중국의 Shanghai, 싱가포르의 Singapore, 홍콩의 Hong Kong, 한국의 Busan, 아랍에미리트의 Jebel Ali이다. 항구 순위를 기준으로 아시아 외 각 대륙별 주요 항구를 하나씩 선정하였다. 유럽에서는 네덜란드의 Rotterdam, 북미에서는 미국의 LA (Los Angles), 남미에서는 브라질의 Santos, 오세아니아에는 호주의 Melbourne이 선정되었다.

본 연구에서 사용된 자료로는 Aura 위성의 OMI 센서로 관측한 PBL (Planetary Boundary Layer)층 내의 이산화황 칼럼농도, 대류권 이산화질소 칼럼농도, Aura 위성의 OMI와 MLS 센서 관측으로부터 제공하는 대류권 오존 농도가 있다. 대류권 이산화질소의 칼럼농도를 혼합비로 변환하기 위하여 Aqua 위성에 탑재된

AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) 센서의 행성경계층 고도, 대기 온도와 대기 압력 자료를 사용하였다. 본 연구에서 사용된 위성자료의 level과 공간해상도는 표 2에 요약되어 있다. Aura 위성의 발사 일은 2004년 7월 15일이었으며, Aqua 위성의 발사 일은 2002년 5월 4일로 두 위성에서부터 제공하는 자료를 안정적으로 취득할 수 있는 2006년부터 2015년 사이의 선박 연료 연소에 의해 발생할 수 있는 이산화황, 이산화질소, 오존 칼럼 농도의 변화 추세를 확인하였다.

2.1 OMI (Ozone Monitoring Instrument) data

본 연구에서는 OMI 초분광 환경위성센서로 측정된 행성경계층 (Planetary Boundary Layer; PBL) 내 이산화황 칼럼 농도, 대류권 이산화질소 칼럼 농도 자료를 사용하였다. NASA (National Aeronautics and Space Administration) Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (<https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets?page=1&source=AURA%20OMI>)에서 제공하는 SO₂ Level 3 (OMSO2e), NO₂ Level 3 (OMNO2d) 자료를 사용하였다. OMI는 자외선과 가

시광선 영역(270~500 nm)을 push-broom 방식으로 측정하는 위성센서이다(Lelevt *et al.*, 2006). 분광해상도는 약 0.42~0.63 nm 사이이며, 공간해상도는 13 km×24 km이다. Aura 위성은 태양 동기궤도로 약 705 km 상공에서 지역시간으로 13:45에 지구를 관측한다.

2. 2 OMI/MLS (Microwave Limb Sounder) data

본 연구에서는 NASA Goddard Space Flight Center (https://acd-ext.gsfc.nasa.gov/Data_services/cloud_slice/new_data.html)에서 제공하는 OMI/MLS의 대류권 오존 칼럼 농도 자료를 사용하였다. MLS는 OMI와 함께 Aura 위성 탑재되어 있는 총 4개의 센서 중 하나이다. MLS는 Aura 위성 궤도 전방으로 오존을 포함하는 대기의 주요 기체들의 연직 프로파일 측정을 목적으로 하는 thermal-emission microwave limb sounder이다. MLS는 이와 함께 성층권 오존 칼럼 농도 관측자료를 제공한다. OMI의 오존 칼럼 농도에서 MLS의 성층권 오존 칼럼 농도 값을 제외함으로써 대류권 오존 칼럼 농도 값의 산출이 가능하다(Ziemke *et al.*, 2006).

2. 3 AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) data

본 연구에서는 AIRS로부터 측정된 행성경계층 높이, 대기 온도와 압력 자료를 사용하였다. NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (<https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets?page=1&source=AQUA%20AIRS>)에서 제공하는 AIRS/Aqua L3 Daily Support Product (AIRX3SPD.00)로부터 획득하였다. AIRS는 Aqua 위성에 탑재된 Sounding suite이다(Chahine *et al.*, 2006; Aumann *et al.*, 2003). Aqua 위성은 태양 동기궤도로 지역시간으로 13:30에 지구를 관측한다.

3. 연구 방법

대류권의 이산화질소의 대부분은 행성경계층 (Planetary Boundary Layer; PBL) 내에 분포하기 때문

에(Lee *et al.*, 2011), OMI로부터 측정된 대류권 이산화질소 칼럼농도와 AIRS로부터 측정된 행성경계층 고도 (Boundary Layer Height; BLH), 대기 온도, 압력 정보로 행성경계층 내의 이산화질소 혼합비를 추정할 수 있다(Kim *et al.*, 2017). 식 (1)은 Kim *et al.* (2017)에서 이상기체상태방정식을 이용하여 유도한 행성경계층 내의 이산화질소의 혼합비를 추정하는 식이다.

$$BLH \text{ NO}_2 \text{ VMR}_{\text{OMI}} =$$

$$\frac{\text{TropNO}_2\text{VCD} \times \text{Gas constant} \times \text{Temp}_{\text{AIRS}} \times 10^{13}}{\text{Avogadro constant} \times \text{BLH}_{\text{AIRS}} \times \text{Pressure}_{\text{AIRS}}} \quad (1)$$

BLH NO₂ VMR_{OMI}는 행성경계층 내의 이산화질소의 혼합비를 나타낸다. TropNO₂VCD는 OMI로부터 얻을 수 있는 대류권 이산화질소 칼럼농도이며, Gas constant는 8.314472 m³ pa K⁻¹ mol⁻¹이고, Avogadro constant는 6.022×10²³ mol⁻¹이다. BLH_{AIRS}는 AIRS로부터 측정된 행성경계층의 고도이며, Temp_{AIRS}와 Pressure_{AIRS}는 AIRS로부터 측정된 대기 온도와 압력의 행성경계층 내의 평균값이다.

4. 결 과

선박에서 1차로 배출되는 주요 가스상 대기오염물질에는 황산화물(SO_x)과 질소산화물(NO_x)이 있다. 특히 질소산화물은 광화학반응을 통해 2차 대기오염물질인 오존(O₃)을 생성할 수 있다. 그림 2는 항구에서 측정된 행성경계층 내의 이산화황, 대류권 이산화질소, 대류권 오존의 2006년부터 2015년 사이의 10년 평균치와 표준편차를 나타낸 box-whisker plot이다. Santos의 경우 이산화황 관측자료의 결측치가 많아 제외하였다. 행성경계층 내에 존재하는 이산화황의 10년 평균치는 경우 Shanghai에서 약 1.0 DU로 가장 크게 나타난 반면, 다른 항구 지역의 경우 0.5~0.8 DU의 범위로 유사하게 나타났다. 항구 순위가 34위 이하이며 TEU가 각각 3,780, 3,036, 2,638인 Santos,

Port Said, Melbourne에서는 대류권 이산화질소의 칼럼농도의 범위가 3.0×10^{15} molecules cm^{-2} 에서 5.1×10^{15} molecules cm^{-2} 로 다른 항구지역에 비해 낮게 나타났다. 10년 평균 대류권 이산화질소 칼럼농도는 세계 항구 순위가 5위인 Hong Kong에서 1.4×10^{16} molecules cm^{-2} 으로 가장 높게 나타났다. 이는 Hong Kong의 항구가 도심지 인근에 위치해 있어 도심에서

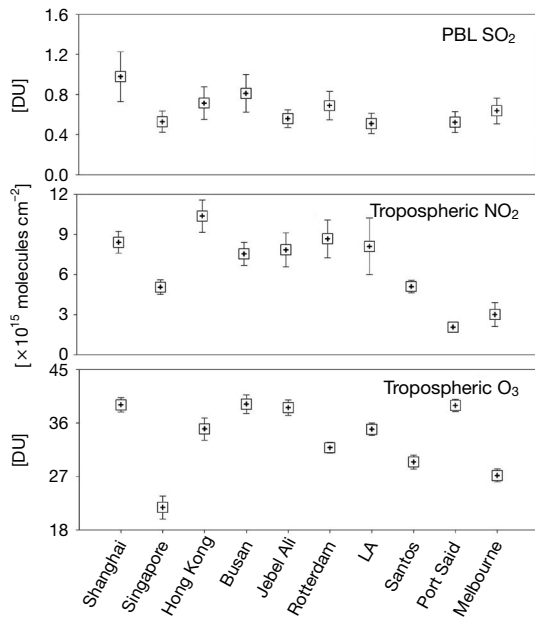


Fig. 2. Decadal average of PBL SO_2 , Tropospheric NO_2 , and Tropospheric O_3 over major port cities for 2006~2015.

배출되는 NO_x 에 대한 영향을 받았기 때문으로 생각된다. 10년 평균 대류권 오존 칼럼 농도는 10위 이내의 아시아 지역의 주요 항구들인 Shanghai, Hong Kong, Busan, Jebel Ali에서 평균 38 DU로 타 대륙의 주요 항구에서의 대류권 오존의 10년 평균값인 32 DU보다 높게 나타났다. 한편 세계 항구 순위 2위인 Singapore의 10년 평균 대류권 오존 칼럼 농도는 21.8 DU로, 적도 인근에 위치해 있어 낮은 위도로 인하여 대류권 오존 칼럼 농도가 다른 항구 지역에 비하여 낮게 나타난 것으로 보인다.

2006년부터 2015년 사이의 대륙별 주요 항구도시에서의 이산화황, 대류권 이산화질소, 대류권 오존의 10년간 변화 추이를 알아보았다(표 3, 그림 3). 이산화황의 10년간 평균 변화량은 $-0.3 \text{ DU decade}^{-1}$ 로 감소하는 추세가 나타났다. OMI 위성센서의 공간해상도 ($13 \text{ km} \times 24 \text{ km}$)를 고려했을 때, 항구도시 내에서 항구 외의 이산화황 발생원의 감소에 대한 영향이 있을 수 있으나, 국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)의 SO_x 에 대한 배출규제 기준 강화가 지속적으로 이루어지고 있어 이에 대한 영향 또한 있을 것으로 생각된다. 대류권 이산화질소와 대류권 오존 농도는 각각 평균 -1.8×10^{15} molecules $\text{cm}^{-2} \text{ decade}^{-1}$, 2.9 DU로 뚜렷한 감소와 증가 경향이 나타났다. 대류권 이산화질소의 경우 미국의 Los Angeles와 유럽의 Rotterdam에서 각각 -6.0×10^{15}

Table 3. Decadal trends of PBL SO_2 , Tropospheric NO_2 , and Tropospheric O_3 over major port cities for 2006~2015.

City	PBL SO_2 [DU decade $^{-1}$]	Tropospheric NO_2 [10^{15} molecules cm^{-2} decade $^{-1}$]	Tropospheric O_3 [DU decade $^{-1}$]
Shanghai	-0.82	-0.62	3.47
Singapore	-0.29	0.33	4.91
Hong Kong	-0.38	-3.09	4.68
Busan	-0.3	-1.83	4.47
Jebel Ali	-0.21	-0.96	4.25
Rotterdam	-0.25	-3.51	1.55
LA	-0.25	-6.03	0.97
Santos	N/A*	-0.6	0.52
Port Said	-0.2	0.68	2.23
Melbourne	-0.33	-2.2	2.34
Average change	-0.34	-1.78	2.94

*Not Available

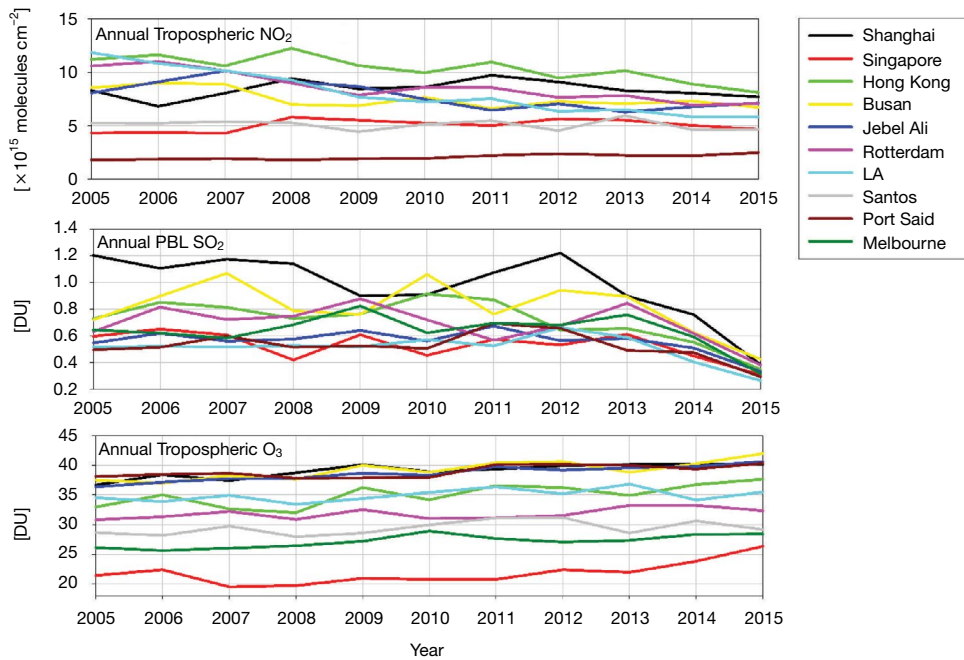


Fig. 3. Annual trends of the Tropospheric NO₂, PBL SO₂, and Tropospheric O₃ over major port cities from 2006 to 2015.

molecules cm⁻² decade⁻¹, -3.5×10^{15} molecules cm⁻² decade⁻¹으로 큰 감소경향이 나타났으며, NO_x 배출이 상당히 감소한 것으로 보인다. 이는 IMO에서 현재 발트해, 미국 동부 지역을 배출규제해역(Emission Control Area)으로 설정하여 NO_x의 배출 규제 강화에 대한 영향이 있을 것으로 생각된다. 10위 이내의 세계 주요 항구가 분포해 있는 아시아 지역 항구도시의 대류권 이산화질소의 10년 변화 평균은 -1.2×10^{15} molecules cm⁻² decade⁻¹으로, 10위권 밖으로 각 대륙별 주요 항구가 위치한 Rotterdam, LA, Santos, Port Said, Melbourne에서의 대류권 이산화질소 평균 농도 변화 값인 -2.3×10^{15} molecules cm⁻² decade⁻¹보다 2배 적게 감소한 것을 확인할 수 있다. 세계 1위 항구가 위치한 Shanghai의 경우 TEU가 10년 전보다 2배 증가한 것에도 불구하고 6.2×10^{14} molecules cm⁻² decade⁻¹ 만큼 감소하였는데, 이는 중국 내에서 2011년부터 차량과 발전소를 대상으로 시행되고 있는 이산화질소 배출량 감축정책에 의한 것으로 생각된다

(Ma et al., 2016).

선박에서 배출되는 1차 오염물질들에 의해 2차 생성될 수 있는 대류권 오존의 칼럼 농도는 모든 지역에서 증가하는 경향이 나타났다(표 3, 그림 3). 특히 Singapore에서의 대류권 오존칼럼 농도의 변화는 4.9 DU decade⁻¹으로 가장 크게 나타났다. 아시아 주요 항구도시에서의 대류권 오존칼럼 농도의 변화는 4.4 DU decade⁻¹, 10위권 밖의 대륙별 주요 항구가 위치한 곳에서의 대류권 오존칼럼 농도 변화는 1.1 DU decade⁻¹로 나타났다. 오존의 전구물질 중 하나인 질소산화물의 양은 배출량 감축정책으로 인하여 감소하는 경향이 나타난 반면, 실제 대류권 오존 농도는 증가하는 경향이 나타났다. 이와 유사한 경향은 선행 연구에서도 나타났다. 추가적인 연구가 필요할 것으로 보이나, 대류권 오존 농도의 증가는 오존의 전구물질 중 하나인 휘발성유기화합물 배출량 변화에 의한 것으로 생각된다(Ma et al., 2016).

본 연구에서는 3. 연구 방법에서 제시하는 방법을

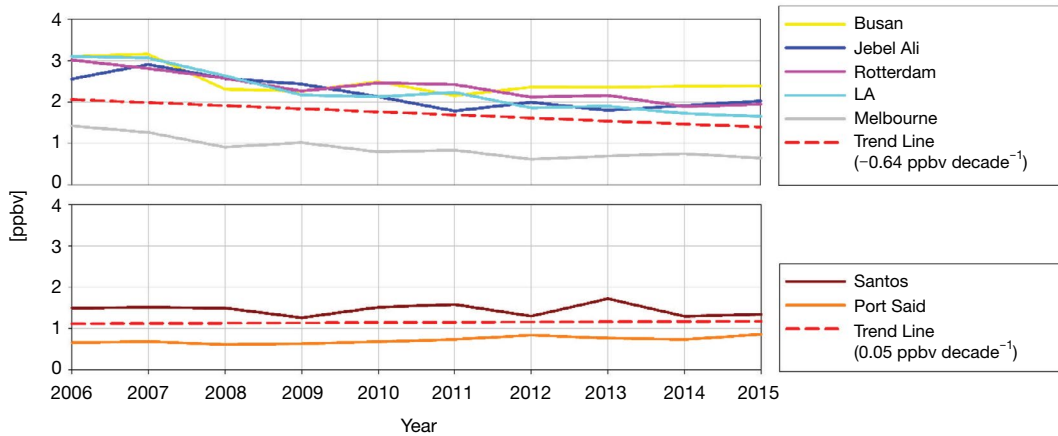


Fig. 4. Annual trends of the retrieved surface level NO_2 mixing ratio over Busan, Jebel Ali, Rotterdam, LA, Melbourne, Santos, and Port Said from 2006 to 2015.

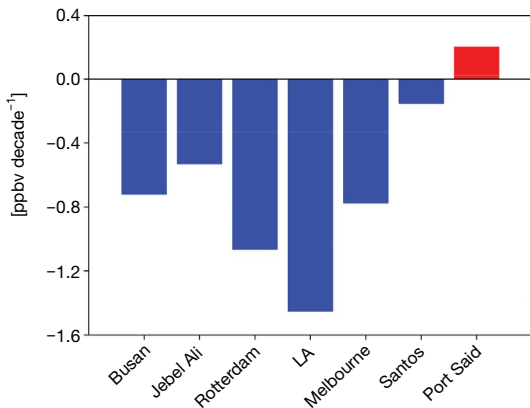


Fig. 5. Decadal trends of retrieved surface level NO_2 mixing ratio over Busan, Jebel Ali, Rotterdam, LA, Melbourne, Santos, and Port Said from 2006 to 2015.

통해 2006년부터 2015년 사이의 지속적인 감소 추세가 나타나는 대류권 이산화질소 칼럼농도를 행성경계층 내의 혼합비로 변환하였다. 하지만 Shanghai, Singapore, Hong Kong에서는 본 연구에서 혼합비 추정을 위해 필요한 AIRS 관측자료의 결측치가 대부분이었기 때문에 혼합비로의 변환이 불가능하였다. 그림 4는 2006년부터 2015년 사이의 이산화질소 혼합비의 변화 추세를 보여준다. Busan, Jebel Ali, Rotterdam, LA, Melbourne에서는 이산화질소의 혼합비가

감소하는 추세 ($0.64 \text{ ppbv decade}^{-1}$)가 나타난 반면, Santos, Port Said에서는 행성경계층 내의 이산화질소 혼합비의 변화 추세가 특별히 나타나지 않았다. 대체로 항구 순위가 낮은 Melbourne, Santos, Port Said에서 다른 지역보다 약 2배에서 3배 정도 낮은 이산화질소 혼합비 수치가 나타났다.

그림 5는 각 항구 도시별 10년 평균 이산화질소 혼합비 변화 값을 보여준다. 표 3에서 이산화질소의 칼럼농도가 가장 많이 감소한 LA에서 이산화질소의 혼합비는 10년 동안 약 1.5 ppbv 감소한 것으로 나타났다. 유럽의 Rotterdam, 오세아니아의 Melbourne, 아시아의 Busan과 Jebel Ali에서의 10년 동안의 이산화질소 혼합비 감소량은 각각 1.1, 0.8, 0.7, 0.5 ppbv로 나타났다. 별다른 변화 추세를 보이지 않았던 Santos와 Port Said에서는 $-0.1, 0.2 \text{ ppbv}$ 만큼 변화하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 주요 항구지역에서의 위성 기반 초분광 환경위성센서인 OMI로부터 제공하는 가스상 오염물질($\text{SO}_2, \text{NO}_2, \text{O}_3$)의 칼럼농도 자료를 이용하여 장기간 동안의 오염물질의 농도 변화를 살펴보았다. 또

한 감소추세가 나타나는 대류권 이산화질소의 칼럼농도를 대기질 규제에 이용할 수 있는 혼합비로 변환하여 이산화질소 혼합비의 변화 추세를 확인해 보았다.

주요 항구지역에서 위성 기반으로 측정된 행성경계층 내 이산화황과 대류권 이산화질소의 칼럼농도는 각 항만에서의 물동량이 장기간 동안 증가하는 것에 반하여 감소하는 경향을 보였다. 이는 IMO의 SO_x와 NO_x의 배출량 규제와 도심 내의 NO_x 배출량 규제에 의한 것으로 생각된다. 대류권 오존의 전구물질인 이산화질소의 칼럼농도가 감소함에도 불구하고, 대류권 오존칼럼 농도의 증가추세가 뚜렷하게 나타났다. 향후 오존 칼럼 농도의 증가와 휘발성유기화합물 농도 사이의 상관관계 분석이 필요할 것으로 보이지만, 항구도시지역에서 휘발성유기화합물의 배출량 변화에 의한 것으로 생각된다(Ma *et al.*, 2016). 이산화질소 혼합비의 변화 추세는 이산화질소 칼럼농도와 유사하게 Santos와 Port Said 항구를 제외하고는 모든 지역에서 감소하는 경향이 나타났다.

지난 2017년도 10월에 현존하는 위성센서보다 더 나은 공간해상도(7 km × 7 km)를 가지는 Sentinel-5 Precursor 위성의 TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument)센서가 발사되었다. 현재 궤도상시험(In-Orbit Test) 중에 있어, 가까운 시일 내로 관측자료가 제공될 예정이다. TROPOMI는 자외선, 가시광선, 근적외선 밴드를 탑재하여 선박에 의한 대기오염과 관련된 일산화탄소, 포름알데하이드, 메탄, 이산화질소, 이산화황, 오존을 포함하는 다양한 대기 오염물질을 측정할 수 있다. 향후 TRPOMI 관측자료를 이용하여 항만 인근 오염뿐만 아니라 항로에서의 오염물질 배출량 추정 정확도 또한 향상될 것으로 생각된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 “기상·지진See-At기술개발연구”(KMI2018-02610)의 지원으로 수행되었습니다.

References

Aumann, H.H., Chahine, M.T., Gautier, C., Goldberg, M.D., Kalnay, E., McMillin, L.M., Revercomb, H., Rosenkranz, P.W., Smith, W.L., Staelin, D.H., Strow L.L. (2003) AIRS/AMSU/HSB on the Aqua mission: Design, science objectives, data products, and processing systems, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(2), 253-264.

Chahine, M.T., Pagano, T.S., Aumann, H.H., Atlas, R., Barnett, C., Blaisdell, J., Chen, L., Divakarla, M., Fetzer, E.J., Goldberg, M., Gautier, C. (2006) AIRS: Improving weather forecasting and providing new data on greenhouse gases, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87(7), 911-926.

Cullinane, K., Cullinane, S. (2013) Atmospheric emissions from shipping: The need for regulation and approaches to compliance, *Transport Reviews*, 33(4), 377-401.

Han, C. (2011). Green Port Strategies for Reducing Air Pollution in Port of Incheon, *Journal of Korea Port Economic Association*, 27(1), 281-304. (in Korean with English abstract)

Kattner, L., Mathieu-Üffing, B., Aulinger, A., Burrows, J., Matthias, V., Neumann, D., Wittrock, F. (2013) Monitoring Shipping Emissions with In-situ Measurements of Trace Gases, *Atmospheric Environment*, 43, 2632-2641.

Kattner, L., Mathieu-Üffing, B., Burrows, J.P., Richter, A., Schmolke, S., Seyler, A., Wittrock, F. (2015) Monitoring compliance with sulfur content regulations of shipping fuel by in situ measurements of ship emissions, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(17), 10087-10092.

Kim, D., Lee, H., Hong, H., Choi, W., Lee, Y.G., Park, J. (2017) Estimation of surface NO₂ volume mixing ratio in four metropolitan cities in Korea using multiple regression models with OMI and AIRS Data, *Remote Sensing*, 9(6), 627.

Lee, C.J., Brook, J.R., Evans, G.J., Martin, R.V., Mihele, C. (2011) Novel application of satellite and in-situ measurements to map surface-level NO₂ in the Great Lakes region, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 11761-11775.

Levelt, P.F., Hilsenrath, E., Leppelmeier, G.W., van den Oord, G.H., Bhartia, P.K., Tamminen, J., de Haan, J.F., Veefkind, J.P. (2006) Science objectives of the ozone monitoring instrument, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(5), 1199-1208.

- Ma, Z., Xu, J., Quan, W., Zhang, Z., Lin, W., Xu, X. (2016) Significant increase of surface ozone at a rural site, north of eastern China, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(6), 3969-3977.
- Richter, A., Eyring, V., Burrows, J.P., Bovensmann, H., Lauer, A., Sierk, B., Crutzen, P.J. (2004) Satellite measurements of NO₂ from international shipping emissions. *Geophysical Research Letters*, 31(23).
- Song, G., Han, C. (2007) A Study on the Strategies for the Reduction of Port Pollution, *Journal of Korea Port Economic Association*, 23(1), 95-113. (in Korean with English abstract)
- World Shipping Council. (2015) *World Port Rankings - 2015*. World Shipping Council, Washington, DC. Available at www.worldshipping.org
- Ziemke, J.R., Chandra, S., Duncan, B.N., Froidevaux, L., Bhartia, P.K., Levelt, P.F., Waters, J.W. (2006) Tropospheric ozone determined from Aura OMI and MLS: Evaluation of measurements and comparison with the

Global Modeling Initiative's Chemical Transport Model, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D19).

Authors Information

- 최원이(부경대학교 지구환경시스템과학부 공간정보시스템공학전공 박사과정 학생)
- 박준성(부경대학교 지구환경시스템과학부 공간정보시스템공학전공 박사과정 학생)
- 김대원(부경대학교 지구환경시스템과학부 공간정보시스템공학전공 박사과정 학생)
- 양지원(부경대학교 지구환경시스템과학부 공간정보시스템공학전공 석사과정 학생)
- 강형우(부경대학교 지구환경시스템과학부 공간정보시스템공학전공 석사과정 학생)
- 이한림(부경대학교 공간정보시스템공학과 교수)