

인공위성을 활용한 대기질 연구

Satellite Observation Based Air Quality Study

이권호*, 배민석¹⁾

강릉원주대학교 복사위성연구소 대기환경과학과, ¹⁾목포대학교 환경공학과

Kwon-Ho Lee*, Min-Suk Bae¹⁾

Research Institute for Radiation-Satellite, Department of Atmospheric & Environmental Sciences,
Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Republic of Korea

¹⁾Department of Environmental Engineering, Mokpo National University, Muan,
Republic of Korea

접수일 2023년 4월 18일
수정일 2023년 5월 14일
채택일 2023년 5월 16일

Received 18 April 2023
Revised 14 May 2023
Accepted 16 May 2023

*Corresponding author

Tel : +82-(0)33-640-2319

E-mail : kwonho.lee@gmail.com

Abstract It is indeed important to use satellite observations in air quality research, as they provide a global perspective on the distribution and transport of air pollutants. Among the most widely used satellites for air quality research such as the Ozone Monitoring Instrument (OMI) and the Moderate Resolution Imaging Spectro-radiometer (MODIS) can measure various air pollutants such as aerosols, O₃, NO₂, SO₂, and atmospheric gases. Satellite observations can help identify areas of severe air pollution and track changes in air quality over time and space, which can inform policy decisions and help develop effective strategies to reduce air pollution and protect public health. With the recent successive launch plans of domestic satellites such as Geostationary Korea Multi-Purpose Satellite-2A and 2B, its use in the air quality field is expected to increase. However, it is important to note that a more complete understanding of air quality issues requires qualitative and quantitative multi-dimensional interpretation of the data in conjunction with other means, including ground-based monitoring and forecast modelling.

Key words: Satellite, Remote sensing, Air pollution, Air pollutants, Aerosol

1. 서 론

지구 관측 인공위성은 에어로솔, 이산화질소(NO₂), 오존(O₃), 이산화황(SO₂), 일산화탄소(CO) 등 다양한 대기오염물질을 감지하고 측정할 수 있는 센서가 탑재되어 운영되고 있다. 인공위성을 이용한 대기질 관측 방법은 지상관측 대비 보다 넓은 지역을 대상으로 대상의 특징을 파악할 수 있으므로 대기오염의 영향을 이해하는 데 유용하다(Lee, 2013, 2012). 최근의 대기질 관련 연구에서 대기오염이 인간의 건강과 환경에 미치는 영향을 이해하는 데 있어 인공위성 관측 자료를 사용하는 방법론의 중요성을 제시하였다(Singh *et al.*, 2021; van Donkelaar *et al.*, 2016). 그리고

인공위성 관측 자료를 이용한 대기질 연구는 정책 입안자, 환경 연구자, 공중 보건 관계자에게 중요한 도구가 되고 있다. 예를 들어, 과학적 연구자들은 인공위성 관측 자료를 분석하여 대기오염도가 높은 지역을 파악하고 시공간에 따른 대기질의 변화를 추적할 수 있게 되었다. 이러한 정보는 정책 결정에 정보를 제공하고 대기오염을 저감하고 공중 보건을 보호하기 위한 효과적인 전략을 개발하는 데 도움이 되기도 한다(Di *et al.*, 2019; Kloog *et al.*, 2014). 그러나, 인공위성 관측은 대기질을 연구하는 데 유용한 도구가 될 수 있지만, 대기질 문제를 보다 완벽하게 이해하려면 지상 관측 기반 모니터링을 포함하는 다른 수단과 함께 다차원의 입체적인 자료 해석이 필요하다.

인공위성은 대기오염물질의 분포와 이동에 대한 전 지구적 관점을 제공할 수 있기 때문에 대기질을 모니터링하는 데 유용한 도구이다. 대기질 연구에 가장 널리 사용되는 인공위성 중 하나는 미국 NASA의 Aura 위성에 탑재된 Ozone Monitoring Instrument (OMI)이며 (Levelt *et al.*, 2006), NO₂, SO₂, 에어로솔을 포함한 다양한 대기오염물질을 측정할 수 있다 (Liu *et al.*, 2019). OMI의 관측 자료는 발전소, 산업시설, 산불 등의 주요 대기오염물질 배출원으로부터의 오염물질 분포와 이동을 모니터링하는 데 사용되었다 (Tao *et al.*, 2020; Fioletov *et al.*, 2016; Ma *et al.*, 2013). 대기질 연구를 위하여 널리 사용되고 있는 또 다른 중요한 인공위성은 Terra 및 Aqua 위성에 탑재된 Moderate Resolution Imaging Spectro-radiometer (MODIS)가 있다. MODIS는 에어로솔과 기상관측 요소를 측정할 수 있으며, 바이오매스 연소 및 먼지 폭풍이 대기질에 미치는 영향을 연구하는 데 사용되기도 하였다 (Remer *et al.*, 2008). 이 외에도 대기질 연구에 다양한 인공위성 플랫폼과 탑재 센서가 많이 사용되어왔으며, 다른 관측 자료 및 모델링 자료와의 통합 또는 연계 분석을 통하여 대기오염물질의 분포와 오염물질을 포함한 대기에 대한 이동 정보를 제공할 수 있는 수단으로 활용되고 있다. 이러한 방법론의 개발은 현재의 대기오염 현황과 미래의 대기질 예측에 관련된 분야에서 매우 유용하게 활용될 수 있다.

본 연구에서는 인공위성 관측으로부터 측정할 수 있는 대기오염물질의 유형, 인공위성 관측 자료의 장점과 한계, 최근 연구의 주요 결과 등 대기질 연구에서 위성 데이터의 활용에 대해 논의하였다.

2. 자료 및 방법

2023년 3월 현재까지 한국대기환경학회지에서 발간된 연구 논문 중 “인공위성을 이용한 대기질 관련 연구” 결과에 관한 기초 자료 제공과 향후 연구 분야에 관한 전망을 위하여, 관련 연구 자료에 대한 검

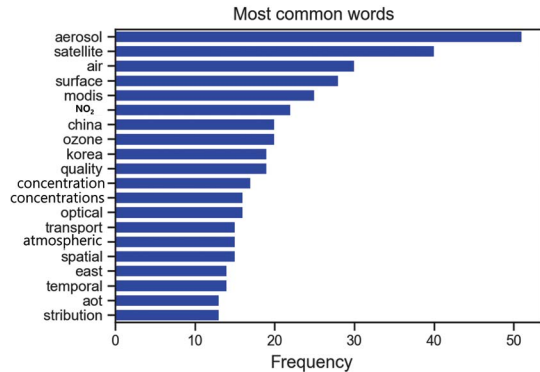


Fig. 1. Word frequency analysis using the keywords in the research papers from year 2000~2022.

색과 전자파일에 대한 수집 후 기술 통계 분석 (descriptive statistics analysis)을 수행하였다. 이를 위하여 한국대기환경학회지 데이터베이스 (<https://kosae.or.kr:50010/search/01.html>)에서 학술지 논문의 키워드 검색을 통하여 연도별 제목과 영문 초록, 본문의 내용을 추출하였고, 인공위성 원격탐사와 관련된 플랫폼과 탑재 센서별, 기술 및 활용 현황에 대한 주요 키워드에 대하여 통계적인 분석을 수행하였다 (그림 1). 이러한 방법은 학술 연구 분야에 대한 기술 분류 및 연구 동향을 분석하기 위한 방법론으로서 널리 사용되고 있다 (Lee and Kim, 2022; Lee and Yum, 2019; Lee *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2001).

문헌 정보에 포함된 연구 내용의 분석을 위한 1단계에서는 한국대기환경학회지 데이터 베이스의 키워드 검색을 수행하였다. 문헌 검색 조건에서 사용된 키워드는 “인공위성” “원격탐사”, “대기질”이며, 영문으로는 “satellite”, “remote sensing”, “air quality”에 대한 관련어 검색을 통하여 1960년대부터 2022년 12월 까지 출판된 모든 문헌 자료를 획득하였다. 문헌 정보에 포함된 연구 내용의 분석을 위한 2단계에서는 1단계에서 획득한 문헌 자료에 대하여 각각의 제목 (title) 과 초록 (abstract)의 기술 내용을 기반으로 연구 과정에서 사용된 원격탐사용 센서 및 인공위성 원격탐사 관련 기술에 관한 내용이 포함된 문헌 자료만 추출하

Table 1. List of research papers related to satellite observations and air quality published in the Journal of Korean Society of Atmospheric Environment.

Year	Authors	Title
2004	J.-Y. Lim, Y. Chun, K.-M. Cho, S.-S. Lee, H.-J. Shin	The Meteorological, Physical, and Chemical Characteristics of Aerosol during Haze Event in May 2003 (2003년 5월의 연무 관측 시 에어로졸의 기상·물리·화학 특성)
2004	K.-H. Lee, Y.J. Kim	Russian Forest Fire Smoke Aerosol Monitoring Using Satellite and AERONET Data (인공위성 자료와 AERONET 관측자료를 이용한 러시아산불 시 발생한 에어로졸의 증장거리 모니터링)
2006	Y.S. Moon	Estimation of Vertical Profiles and Total Amount of Ozone Using Two-Dimensional Photochemical Transfer Model During the Period of 1995~1996 at Pohang (2차원 광화학수송모델을 이용한 포항지역의 1995~1996년 기간 동안 오존의 연직 프로파일 및 전량 추정)
2006	K.H. Lee, D.H. Lee, Y.J. Kim	Application of MODIS Satellite Observation Data for Air Quality Forecast (MODIS 인공위성 관측 자료를 이용한 대기질 예측 응용)
2006	S.D. Choi, Y.S. Chang	Monitoring of Carbon Monoxide using MOPITT: Data Processing and Applications (인공위성 센서 MOPITT를 이용한 일산화탄소 모니터링)
2008	C.K. Lee, J.P. Burrows, Y.J. Kim, A. Richter	Satellite (SCIAMACHY) Measurements of Tropospheric SO ₂ and NO ₂ : Seasonal Trends of SO ₂ and NO ₂ Levels over Northeast Asia in 2006 (인공위성 (SCIAMACHY) 데이터를 이용한 대류권 SO ₂ , NO ₂ 측정)
2009	C. Lee, J.C. Kim, T.H. Cheon	Effects Study on the Accuracy of Photochemical Modeling to MM5 Four Dimensional Data Assimilation Using Satellite Data (위성자료를 이용한 MM5 4차원자료동화가 광화학모델의 정확도에 미치는 영향 고찰)
2011	K.H. Baek, J.H. Kim	Analysis of Characteristics of Satellite-derived Air Pollutant over Southeast Asia and Evaluation of Tropospheric Ozone using Statistical Methods (통계적 방법을 이용한 동남아시아지역 위성 대기오염물질 분석과 검증)
2011	Y.J. Kim, J.H. Lee, B.K. Kim	An Analysis of Aerosol-Cloud Relationship Using MODIS and NCEP/NCAR Reanalysis Data around Korea (한반도 주변에서 MODIS와 NCEP/NCAR 재분석 자료를 이용한 에어로졸과 구름의 연관성 분석)
2012	K.H. Lee	Aerosol Direct Radiative Forcing by Three Dimensional Observations from Passive- and Active-Satellite Sensors (수동형-능동형 위성센서 관측자료를 이용한 대기 에어로졸의 3차원 분포 및 복사강제 효과 산정)
2012	D.-R. Kim, W.J. Choi, J. Lee, S.Y. Kim, C.-K. Song	Analysis of NO ₂ over the Korean Peninsula from Ozone Monitoring Instrument Satellite Measurements (위성 (OMI)을 활용한 한반도 지역 NO ₂ 분석)
2013	K.H. Lee	Three Dimensional Monitoring of the Asian Dust by the COMS/GOCI and CALIPSO Satellites Observation Data (천리안 위성 해양탐재체와 위성탐재 라이다 관측자료를 이용한 황사 에어로졸의 3차원 모니터링)
2014	K.H. Lee	Monitoring and Forecasting the Eyjafallajökull Volcanic Ash using Combination of Satellite and Trajectory Analysis (인공위성 관측자료와 궤적분석을 이용한 Eyjafallajökull 화산재 감시와 예측)
2016	S.W. Kim, S.K. Song, S.B. Han	A Study on the Outbreak and Transport Processes of the Severe Asian Dust Event Observed in March 2010 (2010년 3월 극심한 황사사례의 발생 및 수송과정에 관한 연구)
2016	C. Cho, J.-B. Jee, M.S. Park, S.H. Park, Y.J. Choi	Comparison of Surface Temperatures between Thermal Infrared Image and Landsat 8 Satellite (열적외 영상과 Landsat 8 위성으로부터 관측된 지표면 온도 비교)

Table 1. Continued.

Year	Authors	Title
2017	S.-H. Oh, J. Kim, Z.-H. Shon, M.-S. Bae	Assessing the Altitudinal Potential Source Contribution Function of Aerosol Optical Depth in the West Coast of Korean Peninsula during the DRAGON-KORUS-AQ Campaign (DRAGON-KORUS-AQ 기간 중 서해안 지역 에어로솔 광학 두께 고도별 PSCF 분석)
2018	K.H. Lee, K.T. Lee	Detection and Classification of Major Aerosol Type Using the Himawari-8/AHI Observation Data (Himawari-8/AHI 관측자료를 이용한 주요 대기 에어로솔 탐지 및 분류 방법)
2018	G.-H. Yu, S.-S. Park, S.A. Jung, M.R. Jo, Y.J. Lim, H.J. Shin, S.B. Lee, Y.S. Ghim	Investigation on Characteristics of High PM _{2.5} Pollution Occurred during October 2015 in Gwangju (광주 지역에서 2015년 10월에 발생한 PM _{2.5} 고농도 사례 특성 분석)
2018	W. Choi, J. Park, D. Kim, J. Yang, H. Kang, H. Lee	Investigation of Long Term Changes in Trace Gases and First Retrieval of Nitrogen Dioxide Surface Mixing Ratio over Major Ports Using Satellite Data (위성자료를 이용한 주요 항구도시에서 가스상 대기오염물질의 칼럼농도 변화 특성 조사 및 이산화질소 혼합비 첫 산출 연구)
2018	K. Kim	Air Pollutants on the Korean Peninsula Caused by Fireworks in China during Chinese Lunar New Year (춘절 기간 중국 불꽃놀이로 발생된 대기 오염물질의 한반도 유입)
2020	K.H. Lee, S.S. Park	Characteristics of Haze Episode in 2019 December by Using Satellite and Ground Measurements with Trajectory Mod (인공위성, 지상관측, 궤적 모델을 이용한 2019년 12월 고농도 연무 현상의 특성 분석)
2021	N.-M. Lee, C.-H. Kim	Long-term Variations of Aerosol Optical Depth and their Associations with Climate Change over East Asia (동아시아 에어로졸 광학 깊이의 장기변동 특성과 기후변화 요인 분석)
2021	S. Pyo, K.H. Lee, K.T. Lee	Estimation of Column Aerosol Contribution in Seoul and Gangneung Using Machine Learning Clustering Technique (머신러닝 클러스터링을 이용한 서울과 강릉 지역의 컬럼 에어로솔 기여도 산정)
2021	W. Kim, H.-M. Lim, H. Shin	Extraction of the Severe Heat Island Districts in Urban Areas by the Clustering Technique of Land Surface Temperature Distribution Using Satellite Imagery (위성영상 기반 지표온도분포 클러스터링 기법을 활용한 도시 내 열섬우심지구 추출)
2022	K.H. Lee, S.K. Shin	Effect of Reduced Emissions from Thermal Power Plants in China on Local Air Quality Improvement (중국 화력발전소의 대기오염물질 배출 저감 효과가 지역 대기질 개선에 미치는 영향)

였다. 이 과정에서는 전자 문서의 경우 문헌 자료의 제목과 초록 내에서 사용된 단어를 개별 추출하였으며, 이미지 문서의 경우 개별 확인 과정을 통하여 인공위성 원격탐사 분야가 아닌 문헌 자료를 제외하였다. 또한, 수집된 모든 문헌 자료에 대한 1차 선별 검사를 수행하였으며, 이 과정에서는 키워드 재확인 및 연구 과정이나 내용 부분을 확인하여 인공위성 원격탐사와 직접적으로 관련이 없는 문헌 자료를 제외하였다. 표 1은 이상의 방법을 통하여 최종 확보된 25건의 문헌 자료이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 텍스트 마이닝 분석 결과

한국대기환경학회지에 2000년~2022년 발간된 “인공위성 대기질” 관련 연구 논문의 영문 초록에서 사용된 주제를 기반으로 텍스트 마이닝 분석을 수행하였다. 그림 1은 도출된 키워드 24,857개 중 빈도가 높은 순으로 20개를 나타내었고, 가장 많은 빈도를 나타낸 키워드는 ‘aerosol’이 51회의 빈도로 가장 많이 언급되었다. 그 다음으로 ‘satellite (40회)’, ‘air (30회)’,

‘surface (34회)’, ‘modis (25회)’, ‘no₂ (22회)’, ‘china (20회)’, ‘ozone (20회)’, ‘korea (19회)’, ‘quality (19회)’, ‘concentration (17회)’의 순으로 나타났다. 이러한 키워드 빈도 분석 결과는 한국대기환경학회지에 수록된 연구 분야 중 에어로솔에 관련된 연구 분야가 제일 많으며, 다음으로 NO₂, O₃와 같은 기체 성분에 관한 분야 연구가 많다는 것을 보여준다.

다음은 표 1의 문헌 리스트에서 사용된 전체 키워드 분석을 기반으로 텍스트 마이닝 결과에 대한 시각화 방법인 워드 클라우드(word cloud)를 사용하여 텍스트 데이터를 시각화하였다. 워드 클라우드는 텍스트 데이터의 빈도를 시각적 표현한 것으로서 문서 내에서 가장 자주 등장하는 단어나 용어를 묘사하는 데 사용된다. 워드 클라우드에서 각 단어의 크기는 입력 텍스트의 빈도에 비례하며 단어가 더 자주 나타날수록 클라우드에서 더 크게 표시된다. 본 연구에서 사용된 워드 클라우드는 오픈소스인 Python (version 3.9)을 이용한 자료처리를 통하여 작성하였으며, 본문에서 추출된 키워드 중 빈도수 상위 100개의 키워드를 시각화한 결과는 그림 2와 같다. 그림 1의 결과와 마찬가지로 ‘aerosol’이 가장 큰 시각화를 나타내고 있

고, 그 다음으로 ‘satellite’, ‘concentration’, ‘modis’, ‘air quality’와 같이 대기질 분야와 관련된 단어들의 표시 비율이 크게 나타나고 있다. 이와 같은 텍스트 마이닝 분석 결과를 통해서 인공위성을 이용한 대기질 관련 연구 분야 중 에어로솔에 대한 관심과 중요도가 다른 연구 분야에 비해 월등히 높은 것을 직관적으로 판단할 수 있다.

3.2 입자상 물질의 관측을 위한 인공위성 탑재 센서의 활용

대기질 관측을 위하여 사용되는 인공위성 관측 자료는 지리 정보, 군사 정보, 자원 탐사, 환경 관측, 지구 기후변화 예측 등 모든 분야에서 사용되고 있다. 예를 들면 지표면 온도, 1차 생산량, 토지 피복, 구름, 에어로솔, 수증기, 기온, 산불 탐지와 같은 분야에서 오랜 기간 동안 사용되었으며, 이러한 정보는 환경 보호와 정책 결정에 중요한 역할을 담당하였다 (Dowman and Reuter, 2016). 그리고 최근에는 극궤도 위성과 정지궤도 위성에 탑재된 차세대 센서가 대기질 모니터링에 큰 역할을 수행하고 있다. 이러한 차세대 센서는 보다 향상된 분광 및 공간해상도, 방사 측정, 보다 빨라진 관측 시간 및 스캔 속도를 가짐으로 인하여 대기질 관측 측면에서 큰 도움이 되고 있다.

에어로솔 입자를 관측하기 위한 인공위성이 측정하는 가시광선~단파적외선 파장 영역인(약 0.4 μm~3.0 μm)의 파장대 복사에너지는 태양이 에너지원이며, 지구대기와 지표에 의하여 반사되는 특징을 가진다. 그림 3은 파장별 대기 반사도와 에어로솔 측정을 위하여 사용되는 주요 위성 탑재 센서의 관측 파장 영역을 나타낸다. 그림 3에서 파장별 대기 반사도값은 복사전달모델을 이용하여 모의된 결과로서, 대기 중의 에어로솔이 없는 조건(즉, Aerosol Optical Thickness (AOT)=0)과 충분히 많이 있는 조건(AOT=1)에서 결정된 값이다. 대기 중의 에어로솔 입자가 증가할수록 반사도값이 증가하는 경향을 수치적으로 해석하여 인공위성의 탑재 센서가 관측하는 복사량($L_{sat}(\lambda)$)으로부터 역으로 광학두께값($\tau(\lambda)$)을 산정하는 방법이 널리 사용되고 있다.

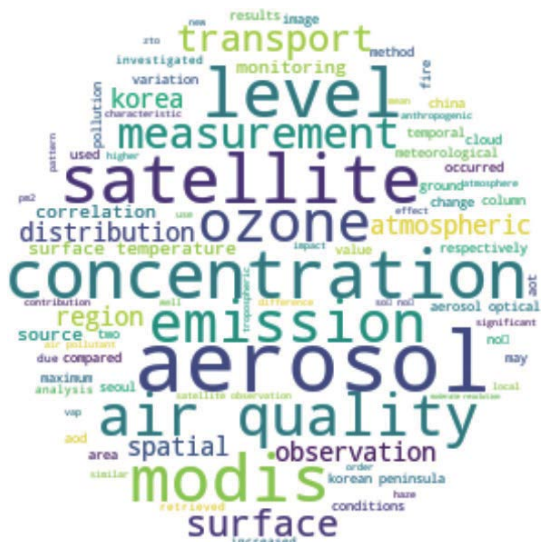


Fig. 2. Word cloud by top 100 keywords in the research papers from year 2000~2022.

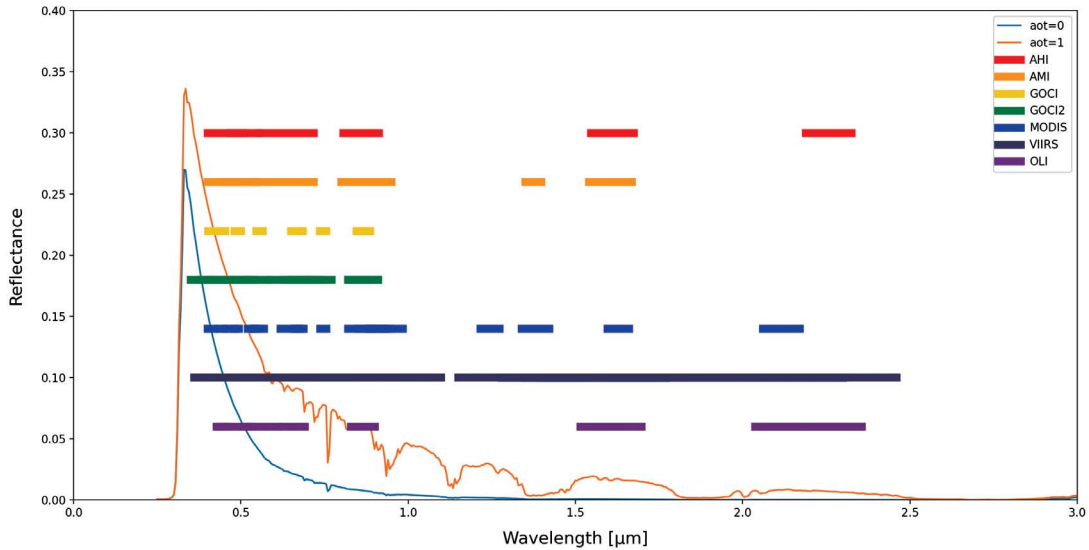


Fig. 3. Spectral atmospheric reflectance with band positions across the sensors alongside those of missions for air quality monitoring. The solid lines are solar reflectances simulated by the radiative transfer model with and without aerosols.

$$L_{sat}(\lambda) = L_0(\lambda) \exp(-\tau(\lambda) \cdot m) \quad (1)$$

위 식에서 λ 는 파장, $L_0(\lambda)$ 는 태양 복사량, m 은 상대 광경로를 의미한다. 한편, 그림 3에서는 에어로솔 측정을 위하여 사용되는 주요 위성 탑재 센서의 파장 범위를 보여준다. 가장 최근에 발사된 정지궤도 위성 시리즈 중에서 Himawari 위성의 Advanced Himawari Image (AHI) (Bessho *et al.*, 2016), 천리안 위성의 Advanced Meteorological Imager (AMI) (Jee *et al.*, 2020)는 기존의 정지궤도 위성 탑재 센서보다 3배 더 많은 스펙트럼 채널, 4배 더 나은 공간해상도, 5배 더 빠른 스캔 속도를 가지고 있으므로 보다 정밀한 에어로솔 관측정보를 제공할 수 있다. 그리고 국내 위성 탑재 센서 중에서 Geostationary Ocean Color Imager (GOCI)와 GOCI-2는 가시광선 영역에서 보다 세분화된 채널 정보를 가지고 있으므로 에어로솔의 물리적 특징을 탐지하기 위한 장점을 가지고 있다. MODIS는 1999년 12월 18일에 발사된 EOS-AM1 (Terra) 위성과 2001년 5월 4일에 발사된 EOS-PM1 (Aqua) 위성에 탑재된 지구 관측용 다중파장 영상분광계 센서로서, 2011년 10

월 28일에 발사된 Suomi NPP 위성의 탑재 센서인 Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS)와 함께 대기질 관측을 위하여 가장 널리 사용되고 있는 위성이다. 앞에서 언급한 지구 관측 위성의 공간해상도는 수백 미터 또는 수 km에 해당하는 해상도를 가지고 있으나, Landsat 위성 시리즈에 탑재된 Operational Land Imager (OLI) 센서는 약 15 m~100 m 범위의 공간해상도를 가지고 있다. 그러나 OLI는 상세한 공간해상도를 가지고 있지만 상대적으로 위성의 재방문기간(8~16일)이 길어서 동일 지점에서의 상시관측은 불가능한 것이 단점이다.

가시광선 영역 외에도 적외선 영역의 채널을 이용하여 에어로솔 관측을 수행할 수 있으며, 이때 위성 탑재 센서가 관측하는 물리량은 지표면과 대기 중의 물체에서 방사되는 적외복사 에너지이다. 그림 4는 적외선 영역($3 \mu\text{m} \sim 14 \mu\text{m}$)의 파장별 대기 반사도와 에어로솔 측정을 위하여 사용되는 주요 위성 탑재 센서의 관측 파장 영역을 나타낸다. 에어로솔 입자가 적외선 복사전달 과정에서 미치는 영향은 중적외선 영역에서의 광 산란과 열적외선 영역에서의 광 흡수도

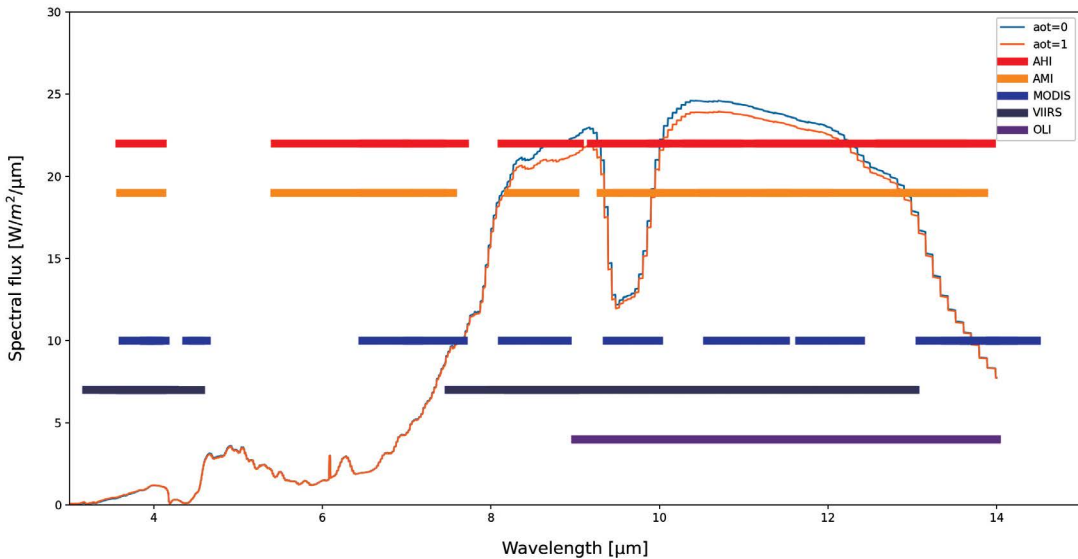


Fig. 4. Spectral infrared radiances with band positions across the sensors alongside those of missions for air quality monitoring. The solid lines are solar reflectances simulated by the radiative transfer model with and without aerosols.

에 민감하게 반응하는 것이다(Peyridieu *et al.*, 2010). 특히, 8 μm~12 μm의 열적외선 영역에서 먼지 및 화산재 입자를 탐지하기 위하여 흔히 사용되고 있다(Lee *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2006; Wen and Rose, 1994; Legrand *et al.*, 1992; Prata, 1989).

인공위성 적외선 채널에서 에어로솔 탐지를 위한 복사전달 과정은 다음의 식 (2)를 이용하여 해석가능하다.

$$L_{sat}(\lambda) = t(\lambda)B(T_s) + \epsilon(I)B(T_c) \quad (2)$$

위 식에서 L_{sat} 는 위성이 관측하는 적외 복사량, t 와 ϵ 는 파장 λ 에서 대기층의 투과율과 방사율, T_s 와 T_c 는 각각 대기층의 기저 표면 온도와 상부 온도를 의미한다. B 는 플랑크 함수로서, $B(T_s)$ 및 $B(T_c)$ 는 T_s 및 T_c 의 등가 온도에서의 흑체 복사량이다. 식 (2)에서 방사율이 일정한 값을 가지면 대기 중 에어로솔 층의 투과율과 복사율은 모두 광학두께에 의해 결정된다. 따라서 인공위성 탑재 센서가 관측하는 적외 복사량과 T_s 와 T_c 에 관한 정보를 확보하면 에어로솔 입자의 광학두께값을 역으로 계산할 수 있다.

3.3 가스상 물질의 관측을 위한 인공위성 탑재 센서의 활용

대기 중의 기체 성분들의 광 흡수 스펙트럼이 인공위성의 관측 채널 영역에 위치한 경우, 센서가 관측한 흡수 스펙트럼 분석을 통하여 특정 기체 성분의 칼럼 내 농도를 역산할 수 있다. 예를 들어, 그림 5는 주요 대기 중 기체 성분 중 O_3 , CO_2 , CO , CH_4 , SO_2 , NO_2 , NH_3 , H_2CO 의 파장별 흡수계수를 나타낸다. 원격탐사 기법을 이용하면 파장별 흡수계수가 큰 기체 성분들에 대한 탐지 및 정량적인 물리량까지 측정할 수 있게 된다. 기체 성분을 관측할 수 있는 대표적인 인공위성 중 하나인 ENVISAT의 초분광 센서인 Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography (SCIAMACHY)는 자외선에서 근적외선 영역(240 nm~2380 nm)에서 세분화된 파장 분해능(0.2 nm~1.5 nm)으로 측정할 수 있으므로 다양한 대기 조성물질을 측정할 수 있다. 그리고 이와 유사한 위성 탑재 센서로는 OMI, TROPOspheric Monitoring Instrument (TROPOMI)과 국내 위성인 Geostationary Korea Multi-Purpose Satellite-2B (GK2B)의 Geostationary

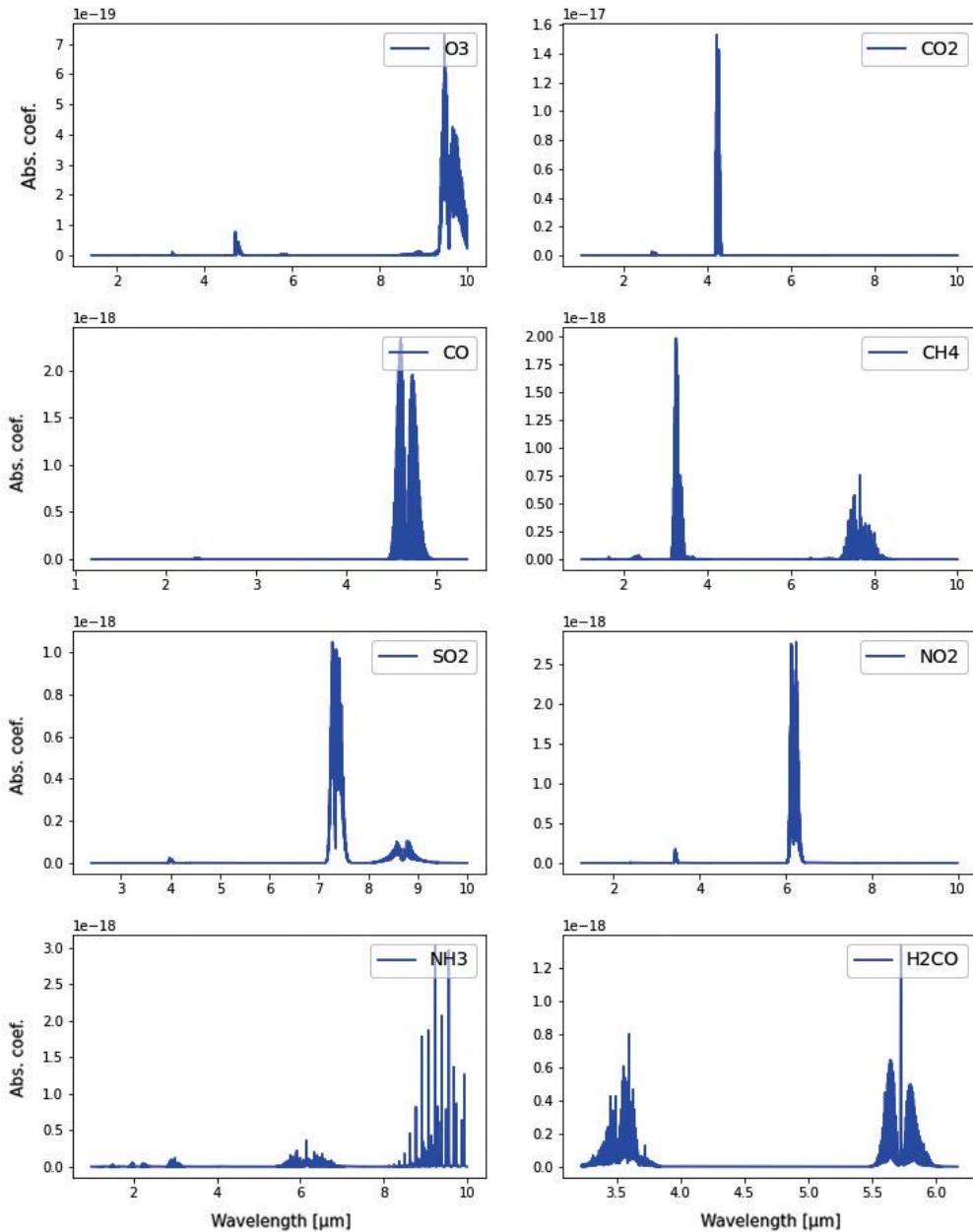


Fig. 5. Spectral gas absorption coefficients for O₃, CO₂, CO, CH₄, SO₂, NO₂, NH₃, and H₂CO. Absorption data acquired from the HITRAN database (data source available from <https://hitran.org/>) (Gordon *et al.*, 2022).

Environmental Monitoring Spectrometer (GEMS) 등을 통해 다양한 종류의 가스, 에어로솔, 방사선, 구름, 구름 고도 등을 관측할 수 있다.

3.4 인공위성 기반의 대기질 관측 결과

이전 섹션에서는 대기질 관련 연구에 사용되는 인공위성의 특성과 활용가능성에 대하여 다루었다. 여

기에서는 최근까지 사용되고 있는 인공위성 관측 자료와 대기질 관련 관측 결과를 제시하고자 한다. 그림 6은 대기질 관측에 흔히 사용되는 지구 관측 위성 목록과 발사 후 운영 종료까지의 타임라인을 조사한 결과를 나타낸다. 기존의 지구 관측 위성 중 가장 오랜 기간 사용되었던 EOS 시리즈 이후의 위성만 조사하였으며, 총 66개(2023년 이전까지 60개, 2023년 이후부터 향후 6개 신규 위성 발사 예정)의 위성을 포함한다. 여러 인공위성 중에서 자외선~가시광선 영역의 밴드를 가지고 있는 위성 탑재 센서는 일종의 수동형 원격타사 센서로서 주간 동안의 대기 요소에 의한 산란광과 흡수도를 측정하여 입자상 물질과 가스상 물질을 측정할 수 있다. 반면에 적외선 밴드를 가지는 센서는 주간과 야간 모두 관측이 가능하다. 예를 들면, 가장 널리 사용되고 있으며 다중 밴드 관측정보를 제공해주는 EOS 또는 LANDSAT 위성 시리즈는 대기 중의 입자 및 기체성분에 관한 정보 분석을 위하여 사용되고 있다. 특히, 일정 범위의 파장대를 측정하는 밴드형 센서와는 다르게 연속 파장의 복사에너지를 측정할 수 있는 초분광 센서를 탑재한 위성(예: Envisat, MetOp, Sentinel-4,5, GK-2B 등)은 보다 다양한 기체 성분을 측정할 수 있다.

대기질 관측에 사용되는 인공위성 센서 중 에어로솔 관측에 사용되는 파장 대역은 주로 가스성분에 의한 흡수가 없거나 매우 적은 파장을 선택하여 에어로솔 입자에 의한 산란이나 흡수도를 측정하지만, 기체 성분의 관측에 사용되는 파장 대역은 입자의 산란효과가 적고 기체 성분의 흡수 스펙트럼이 위치한 파장이 선택적으로 사용된다. 때로는 입자와 기체 성분에

의한 영향을 모두 받을 수 있으므로 인공위성 원격타사의 대상이 가지는 특징을 정밀하게 파악하는 것이 중요하다. 표 2는 대기오염 기준물질과 관련하여 현재까지 사용되고 있는 주요 인공위성과 탑재 센서, 그리고 대기질 관련 산출물 자료를 요약하였다.

인공위성은 발사 이후부터 연속적인 관측 결과를 생산하고 있으므로 장기간 동안 관측된 산출물 결과를 통해 각 대기오염물질의 통계적인 영향 분포를 확인하는 것이 가능하다. 그림 7은 표 2에서 2000년대 초반부터 2022년까지 관측 자료를 생산하고 있는 위성 자료를 수집하여 각 산출물의 평균값을 매핑한 결과로서 각 산출물은 표 2에 언급된 자료를 사용하였다. AOT 값의 분포 정보를 통하여 한반도 주변의 에어로솔의 상대적인 부하량의 범위는 주로 중국의 동부 해안 영역의 대도시와 산업시설 밀집지역이 상대적으로 높은 값(AOT>0.5)이 나타남을 알 수 있다. 입자의 크기와 관련이 있는 AE는 AOT 값이 큰 중국에서는 약 1.0~1.3의 범위를 나타내지만, 한반도와 일본은 1.4 이상의 큰 값을 보인다. 이러한 결과는 중국은 입자의 농도가 높고 미세와 조대입자가 혼합된 상태에서 영향을 크게 받고 있지만, 한반도와 일본은 입자의 농도가 낮음에도 보다 미세한 입자의 영향을 받았음을 증명한다. O₃는 북위 33도~41도 사이에서 평균값의 범위가 높은 지역으로 나타났으며, 오존 생성을 위한 전구물질과 대기화학반응의 복잡한 결과로 판단된다. NO₂는 화석연료의 사용에 따른 자동차 또는 산업시설의 배출이 주요 원인이므로 국내에서도 수도권과 부산 지역의 농도가 상대적으로 큰 값을 보였다. CO는 석탄 사용과 불완전 연소에 의한 배출량

Table 2. List of satellites and outputs related to air pollution criteria.

Criteria air pollutants	Satellite	Sensor	Product	Data center
PM	EOS Terra/Aqua	MODIS	AOT, ANG	https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/missions-and-measurements/science-domain/aerosol/
O ₃	EOS Aqua	AIRS	O ₃	https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/AIRS3STM_006/summary
CO	EOS Terra	MOPITT	CO	https://asdc.larc.nasa.gov/project/MOPITT
NO ₂	2006	OMI	NO ₂	https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/OMNO2d_003/summary
SO ₂	2006	OMI	SO ₂	https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/OMSO2e_003/summary

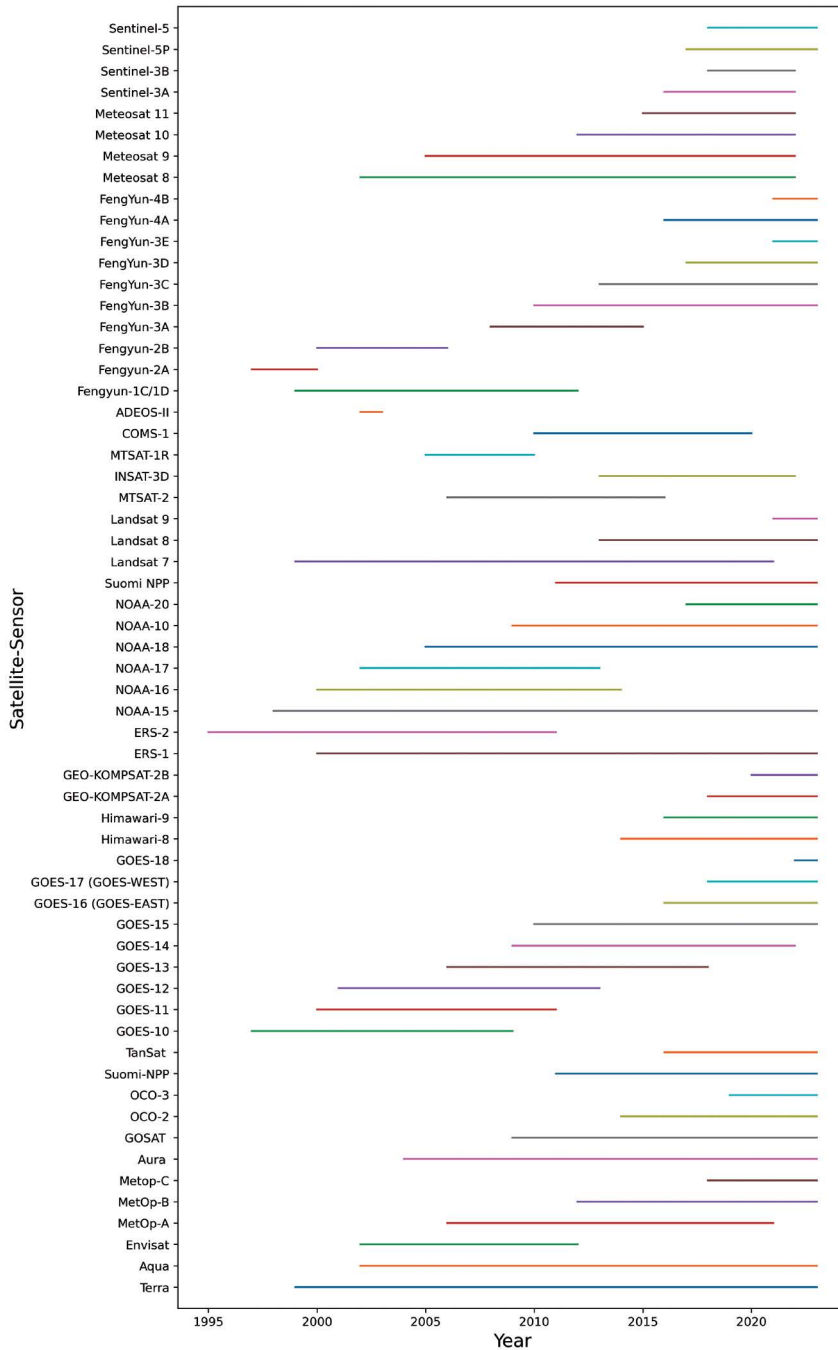


Fig. 6. Lifetimes of different earth observing satellite instruments that have potential use in application for air quality study.

이 줄었으므로 대상지역의 농도는 매우 낮았으나, 중국 내륙지역에서는 여전히 4 이상의 높은 값을 보였

다. SO₂는 개선된 연료의 사용과 배기가스 내 탈황 공정의 적용 등으로 낮은 농도를 보이지만, 중국 내륙과

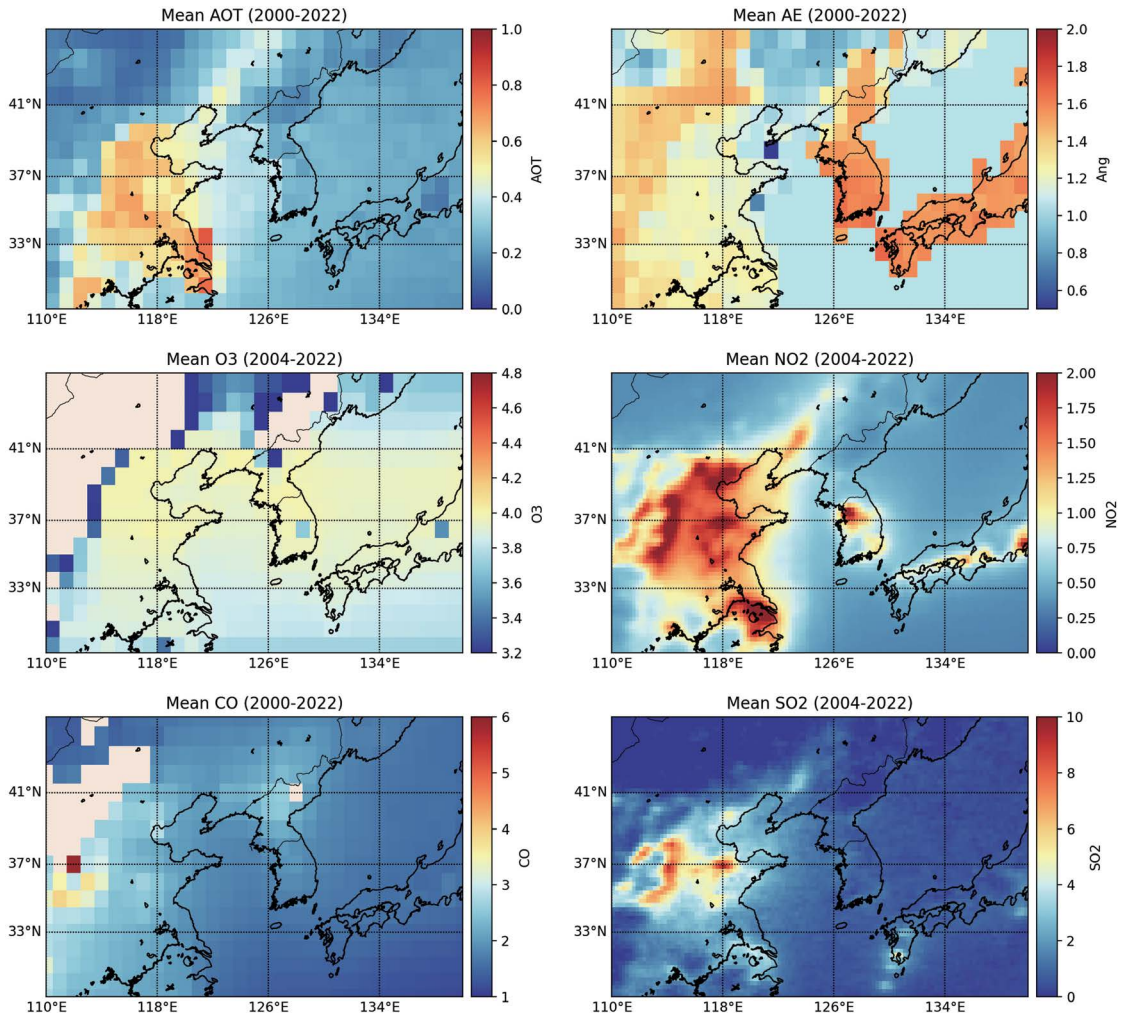


Fig. 7. The averaged AOT, AE, O₃, NO₂, CO, SO₂ from different satellite measured products over Northeast Asia. Note that AE data from MODIS aerosol products are available over land only.

일부 해상에서의 배출이 대기 중 농도의 증가를 나타내고 있는 것으로 보인다.

그림 8은 그림 7의 위성 산출물 자료 중 최초 관측이 시작된 시점으로부터 2022년 12월까지 대기오염물질의 장기 변동 및 추세를 나타낸다. 그림 7의 관측 대상지역에서 동경 124도를 기준으로 오염물질의 분포 패턴이 높은 서쪽 지역과 낮은 동쪽 지역으로 구분되므로, 시계열 분석 결과를 두 지역(서부: 오렌지색, 동부: 청색)으로 구분하여 비교하였다. 일반적으로, 각

각의 대기오염물질의 변화 패턴은 계절적 변동 주기를 명확하게 보여주고 있으며, O₃를 제외하고 서쪽 지역의 평균값이 동쪽 지역 평균값에 비해 높게 나타남을 알 수 있다.

그림 8의 시계열 데이터에 대한 기술통계와 선형회귀 분석 결과를 표 3과 같이 정리하였다. 서부와 동부 간의 지역 평균값의 비율은 $AOT_{west}/AOT_{east} = 1.683$, $AE_{west}/AE_{east} = 0.879$, $O_3_{west}/O_3_{east} = 1.010$, $CO_{west}/CO_{east} = 1.326$, $NO_2_{west}/NO_2_{east} = 1.846$,

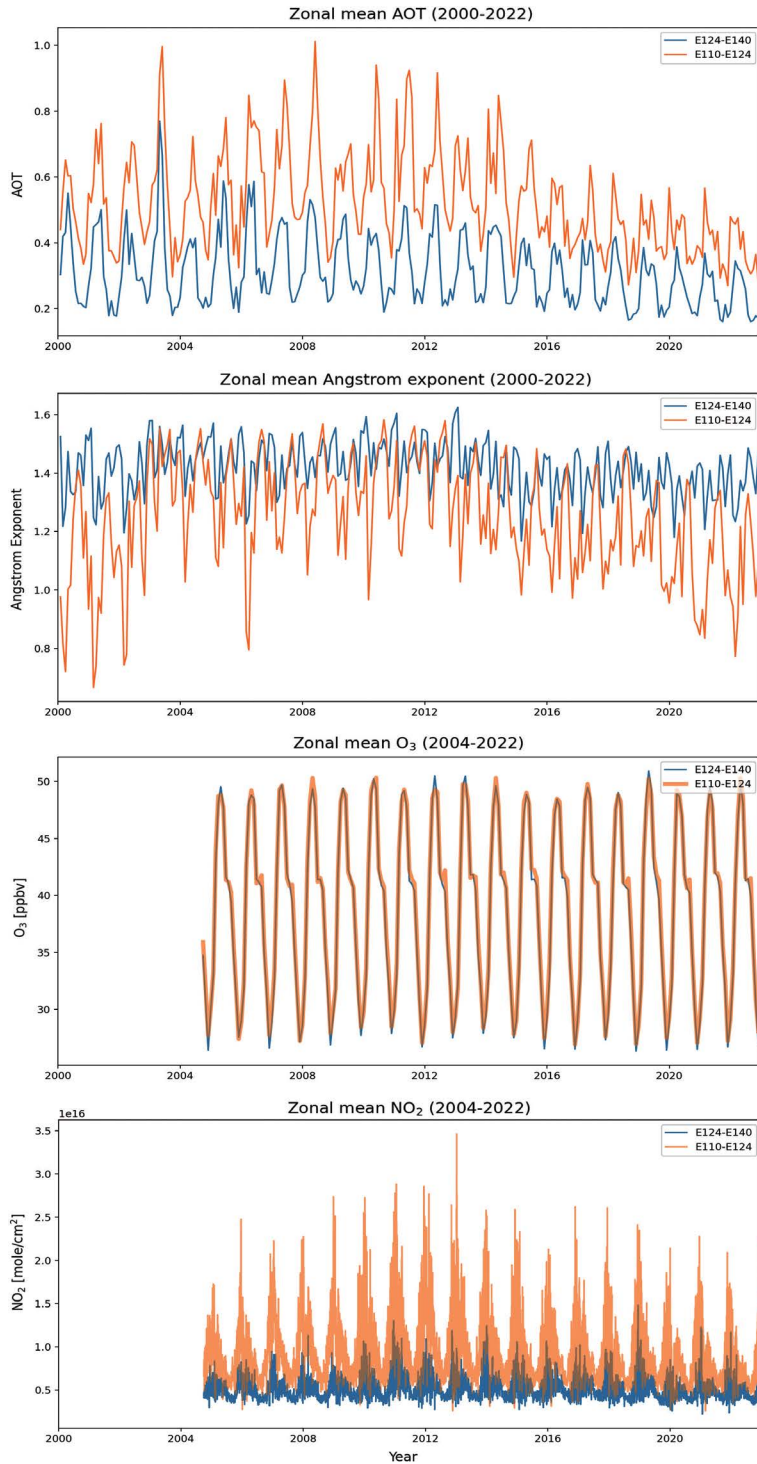


Fig. 8. Time series of AOT, AE, O₃, NO₂, CO, SO₂ from different satellite measured products. The orange and blue lines represent the average values for the west and east regions relative to 124 degrees East longitude.

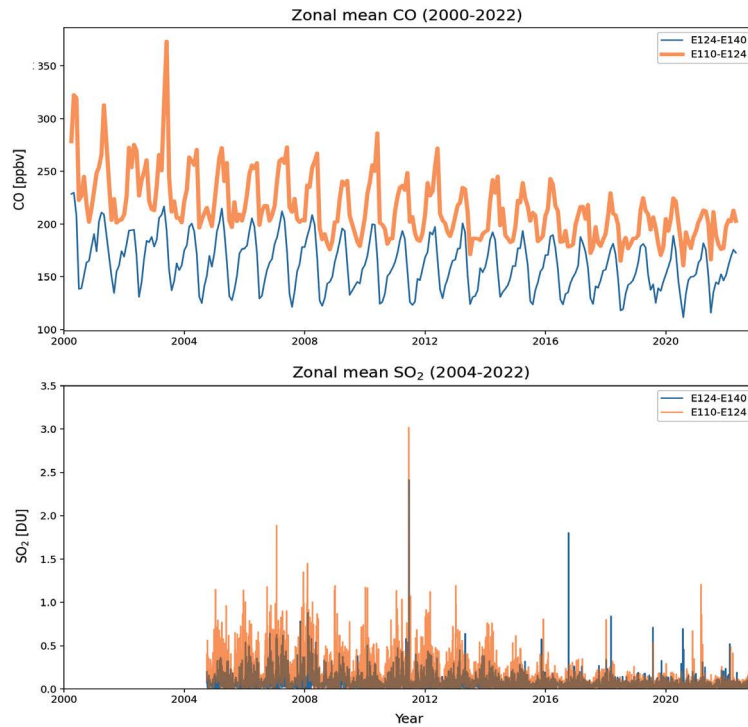


Fig. 8. Continued.

Table 3. Descriptive statistics and linear regression analysis results of long-term satellite observation data including AOT, AE, O₃, NO₂, CO, SO₂.

Products	Mean	Standard deviation	Slope	Intercept
AOT _{west}	0.525	0.149	-0.618e ⁻³	0.610
AOT _{east}	0.312	0.105	-0.382e ⁻³	0.364
AE _{west}	1.245	0.193	-0.399e ⁻³	1.300
AE _{east}	1.417	0.091	-0.272e ⁻³	1.454
O ₃ _{west} [ppvb]	39.110	7.302	0.114e ⁻³	39.098
O ₃ _{east} [ppvb]	38.714	7.487	0.128e ⁻³	38.700
CO _{west} [ppvb]	215.443	30.661	-0.217	243.81
CO _{east} [ppvb]	162.495	24.455	-0.108	176.609
NO ₂ _{west} [[mole/cm ²]	0.938e ⁻¹⁷	0.361e ⁻¹⁷	-2.806e ⁻⁵	1.0285e ⁻¹⁷
NO ₂ _{east} [mole/cm ²]	0.508e ⁻¹⁷	0.114e ⁻¹⁷	-4.214e ⁻⁶	0.522e ⁻¹⁷
SO ₂ _{west} [DU]	0.134	0.175	-4.103e ⁻⁵	0.266
SO ₂ _{east} [DU]	0.057	0.085	-8.915e ⁻⁶	0.086

SO₂west/SO₂east = 2.351로서, AE를 제외하면 서부 지역의 평균 오염물질의 농도는 동북지역에 비해 약 164.3% 높은 것으로 나타났다. 시간별 관측값에 대한

선형회귀 분석 결과는 1차 선형회귀식의 기울기값은 O₃를 제외하고 모두 음의 기울기 값을 보임으로 인하여 2000년대 이후로 지속적인 감소추세를 나타낸 것

을 확인할 수 있다. 이러한 대기오염물질의 지역적 편차와 장기적 추세변화는 독특하며 지역규모의 대기 수문 순환과 복사 수지 균형에 대한 기여도가 관련 있을 것으로 예상된다. 이러한 불균형은 지역 대기질과 기후변화 연구에 대한 불확실성을 나타낼 수 있는 요인 중 하나로 알려져 있다(IPCC, 2014; Ramanathan *et al.*, 2005).

4. 토 의

인공위성을 이용한 대기질 관측에 관한 역사는 비교적 짧은 편으로, 1970년대 후반 TOMS 센서가 탑재된 Nymbus-7 위성이 발사되면서 시작되었다. TOMS는 대기 에어로솔과 O₃의 양을 측정하였다. 이후 수십 년 동안 대기질 모니터링에 사용가능한 인공위성 탑재체가 추가로 개발되었으며, 대표적인 예로서 1999년에 발사된 MODIS와 2004년에 발사된 OMI의 관측 자료가 널리 사용되고 있다. 그리고 대기질 관측이 가능한 위성 탑재 센서의 개발과 데이터 처리 및 분석 기술의 발전으로 지난 20년 동안 위성 기반 대기질 관측 자료의 질과 양이 크게 증가했다. 이러한 위성관측 기반의 빅데이터 및 자료 분석을 통해 지역규모에서 전 지구 규모에 이르는 대기오염물질의 분포와 이동을 더 잘 이해할 수 있게 되었다.

대기질 관련 연구에 사용되는 인공위성 원격탐사 기법은 위성 플랫폼과 탑재체의 기술이 진보되면서 다양한 분야에서 활용되어 왔다. 현재까지 다양한 인공위성과 탑재용 센서가 개발되어 운용되었으며 대기질 관련 연구는 지구 관측 영역에서 상대적으로 제한적인 사용이 수행되어왔다. 인공위성 탑재 센서가 측정하는 분광 자료는 대기와 지표의 투과 및 방사 효과가 주요 영향 인자이므로 목표 대상 물질에 대한 특성값을 생산하기 위해서는 복사전달 과정에 대한 해석 과정이 필요하다. 인공위성 자료의 특성과 산출 목적에 따라 복사전달 과정에 대한 해석 기반의 방해인자 제거 방법과 목표물의 특성값 산출 방법이 주로 사용

되며, 최근에는 다른 인공위성 관측 자료와의 융합 분석을 통하여 단일 위성 관측이 가지는 불리함을 극복하기 위한 노력도 수행되고 있다.

한편, 현재의 인공위성 관측은 지상관측 기반의 대기질 감시망을 보완하는 중요한 역할을 하고 있다. 지상의 관측소가 위치한 지역내 대기질 상태에 대한 상세한 정보를 제공할 수 있지만, 인공위성은 관측망이 위치하지 않은 지역 및 비 접근지역(해양, 산지, 타 국가 등)에 대한 더 넓은 범위에 대한 관측정보를 제공할 수 있다. 그러나 인공위성 기반의 대기질 관측에는 한계가 있다. 센서의 민감도, 대기의 다양성, 지표의 역할, 대기조성물질의 연진 분포 등을 포함하는 환경 조건의 가변성으로 인해 우주에서 정확하게 측정하기 어렵다. 또한 위성 관측 자료는 구름이나 목표로 하는 대상 물질 이외의 대기 간섭의 영향을 받아 관측 품질이 저하될 수 있다. 이러한 한계점에도 불구하고 인공위성 기반의 대기질 관측은 대기오염에 대한 현황 모니터링과 광역 이동에 관한 영향을 이해하는 데 중요한 도구이므로 대기질 연구에서 중요한 역할을 계속할 것이다.

인공위성을 이용한 대기질 관련 연구 분야는 독립된 위성 탑재 센서가 가지고 있는 고유 특성으로 인하여 기술적으로 해결해야 할 부분들이 남아있지만, 새로운 방법론을 개발하여 활용할 수 있기 때문에 계속 수요가 늘어날 것으로 전망된다. 세계 각국의 새로운 인공위성 발사계획에 따라 인공위성을 이용한 대기질 관련 연구의 미래는 다차원의 영상 정보를 제공할 수 있는 기술개발과 현장에 적용되는 응용 산출물의 개발이 중요할 것이다. 특히, 배출원 감시, 오염물질의 장거리 이동과 확산, 그리고 제거 과정에 이르는 과정에 대한 가시적인 정보 제공에 있어 매우 활용도가 크며, 사용자 요구에 따른 새로운 수준의 산출 자료의 생산 및 서비스가 가능하게 될 것이다. 또한, 인공위성 활용은 탑재 센서의 하드웨어(광원, 검출기, 부품, 소재 등), 소프트웨어(자료 송수신, 전처리, 분석을 위한 코드 등) 및 응용 분야 전반에 걸쳐 개발이 진행이 필요한 분야로 관련 연구가 늘어날 것으로 예측된다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 한국대기환경학회지에서 다루었던 인공위성 관측 자료를 이용한 대기질 관련 연구 동향과, 관련 기술 및 장기간 관측 결과에 대하여 논의하였다. 이를 위하여 가장 최근인 2022년까지 한국대기환경학회지에서 발간된 관련 연구 자료에 대해 키워드 검색을 통하여 연구 논문 자료를 획득하였으며, 각 문헌 자료의 내용을 입력 자료로 하는 텍스트 마이닝 분석을 수행하여 연구 주제 및 키워드에 관한 빈도 분석 결과를 제시하였다. 문헌 자료의 통계적 분석을 통하여 인공위성 관측 자료를 이용한 대기질 관련 연구는 2004년 이후부터 시작되었으며 최근까지 연구 논문이 계속 증가하고 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 과거에는 대기질 분야에서 사용가능한 인공위성 탑재 센서가 주로 해외 인공위성(TOMS, EOS 시리즈 등)이었으나, 최근의 국내 인공위성과 환경 센서의 개발이 이루어지게 되어 관련 자료를 이용한 연구 결과가 증가하는 것으로 판단된다.

인공위성을 이용한 대기질 연구는 위성 개발 초기 단계에서는 주로 에어로솔 입자에 관한 정보 획득을 위하여 사용되었으나, 위성 탑재 센서의 관측 능력이 발달함에 따라 분광해상도, 공간해상도, 시간해상도, 관측 영역에 따라 다양한 방법론이 개발되고 있다. 특히, 대기 에어로솔의 산란 특성에 민감한 파장 대역에서 영상 처리 기법을 이용한 경험적 분석 방법과 복사 전달 방정식을 이용한 해석적 방법을 적용하여 입자상 물질에 관한 물리적 광학적 특징 정보를 산출하였다. 그러나 기체상 물질에 대한 탐지는 대상 물질의 광 흡수 스펙트럼에 따라 센서가 감지하는 신호에 대한 전처리 및 가공에 필요한 방법론을 다양화할 필요가 있다. 또한 대기오염물질의 농도 정보를 산출하기 위하여 대기 투과도와 지표 반사도, 지표 방출률 등의 영향으로 오차가 발생할 수 있으므로 주의해야 한다. 이러한 인공위성 관측 기반의 대기오염물질 탐지 방법의 능력과 한계를 이해하고 활용도를 높이기 위하여, 다양한 인공위성 탑재 센서를 이용한 알고리즘 개발

과 산출물에 대한 비교검증이 요구된다. 이러한 노력은 향후 인공위성 기반의 대기질 관련 연구 개발 및 산출물의 활용에 저변 확대로 이루어질 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2019년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다 (NRF-2019R1I1A3A01062804).

References

- Bessho, K., Date, K., Hayashi, M., Ikeda, A., Imai, T., Inoue, H., Kumagai, Y., Miyakawa, T., Murata, H., Ohno, T., Okuyama, A., Oyama, R., Sasaki, Y., Shimazu, Y., Shimoji, K., Sumida, Y., Suzuki, M., Taniguchi, H., Tsuchiyama, H., Uesawa, D., Yokota, H., Yoshida, R. (2016) An Introduction to Himawari-8/9 Japanese New-Generation Geostationary Meteorological Satellites, *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Ser. II, 94(2), 151-183. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2016-009>
- Di, Q., Dai, L., Wang, Y., Zanobetti, A., Choirat, C., Schwartz, J.D., Dominici, F. (2019) Association of Short-term Exposure to Air Pollution with Mortality in Older Adults, *Journal of the American Medical Association*, 321(10), 1057-1067. <https://doi.org/10.1001/jama.2019.2053>
- Dowman, I., Reuter, M. (2016) Air Quality Monitoring Using Earth Observation Data: The Quest for Harmonisation, 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Beijing, pp. 2055-2058.
- Fioletov, V.E., McLinden, C.A., Krotkov, N., Li, C., Joiner, J., Theys, N., Carn, S., Moran, M.D. (2016) A Global Catalogue of Large SO₂ Sources and Emissions Derived from the Ozone Monitoring Instrument, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 11497-11519. <https://doi.org/10.5194/acp-16-11497-2016>
- Gordon, I.E., Rothman, L.S., Hill, C., Kochanov, R.V., Tan, Y., Bernath, P.F., Birk, M., Boudon, V., Campargue, A., Chance, K., Drouin, B.J., Flaud, J.M., Gamache, R.R., Hodges, J.T., Jacquemart, D., Perevalov, V.I., Perrin, A., Shine, K.P., Smith, M.A.H., Tennyson, J., Toon, G.C., Tran, H., Tyuterev, V.G., Barbe, A., Császár, A.G., Devi, V.M., Furtenbacher, T., Harrison, J.J., Hartmann, J.M., Jolly, A., John-

- son, T.J., Karman, T., Kleiner, I., Kyuberis, A.A., Loos, J., Lyulin, O.M., Massie, S.T., Mikhailenko, S.N., Moazzen-Ahmadi, N., Müller, H.S.P., Naumenko, O.V., Nikitin, A.V., Polyansky, O.L., Rey, M., Rotger, M., Sharpe, S.W., Sung, K., Starikova, E., Tashkun, S.A., Vander Auwera, J., Wagner, G., Wilzewski, J., Wcisło, P., Yu, S., Zak, E.J. (2022) The HITRAN2020 Molecular Spectroscopic Database, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 277, 107949. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2021.107949>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014) Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 659-740), Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.018>
- Jee, J.B., Lee, K.T., Lee, K.H., Zo, I.S. (2020) Development of GK-2A AMI aerosol detection algorithm in the East-Asia region using Himawari-8 AHI data, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Science*, 56, 207-223. <https://doi.org/10.1007/s13143-019-00156-3>
- Kim, S.B., Ahn, M.H., Kim, K.H., Kim, M.G., Sakong, H.S. (2001) Technology Tree and Domestic Research Status of Satellite Remote-sensing of the Earth, *Korean Journal of Remote Sensing*, 17(3), 253-273, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.7780/kjrs.2001.17.3.253>
- Kloog, I., Chudnovsky, A.A., Just, A.C., Nordio, F., Koutrakis, P., Coull, B.A. (2014) A New Hybrid Spatio-temporal Model for Estimating Daily Multi-year PM_{2.5} Concentrations Across Northeastern USA Using High Resolution Aerosol Optical Depth Data, *Atmospheric Environment*, 95, 581-590. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.06.031>
- Lee, K.H. (2012) Aerosol Direct Radiative Forcing by Three Dimensional Observations from Passive- and Active-Satellite Sensors, 28(2), 159-171, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2012.28.2.159>
- Lee, K.H. (2013) Three Dimensional Monitoring of the Asian Dust by the COMS/GOCI and CALIPSO Satellites Observation Data, 29(2), 199-210, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2013.29.2.199>
- Lee, K.-H., Kim, H. (2022) A Review on Mid-wave Infrared Remote Sensing Technique, *Korean Journal of Remote Sensing*, 38(6-1), 1557-1571. <https://doi.org/10.7780/KJRS.2022.38.6.1.42>
- Lee, K.H., Lee, D.H., Kim, Y.J. (2006) Application of MODIS Satellite Observation Data for Air Quality Forecast, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 22(6), 85-862, (in Korean with English abstract).
- Lee, K.H., Wong, M.S., Chung, S.-R., Sohn, E. (2014) Improved Volcanic Ash Detection Based on a Hybrid Reverse Absorption Technique, *Atmospheric Research*, 143, 31-41. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.01.019>
- Lee, K.-H., Yum, J.-M. (2019) A Review on Atmospheric Correction Technique Using Satellite Remote Sensing, *Korean Journal of Remote Sensing*, 35(6), 1011-1030, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.7780/kjrs.2019.35.6.1.11>
- Legrand, M., Cautenet, G., Buriez, J.C. (1992) Thermal Impact of Saharan Dust over Land. Part II: Application to Satellite IR Remote Sensing, *Journal of Applied Meteorology*, 31, 181-193. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1992\)031<0181:TIOSDO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1992)031<0181:TIOSDO>2.0.CO;2)
- Levelt, P.F., van den Oord, G.H.J., Dobber, M.R., Malkki, A., Visser, H., de Vries, J., Stammes, P., Lundell, J.O.V., Saari, H. (2006) The Ozone Monitoring Instrument, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44, 1093-1101. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.872333>
- Liu, M., Lin, J., Boersma, K.F., Pinardi, G., Wang, Y., Chimot, J., Wagner, T., Xie, P., Eskes, H., Van Roozendael, M., Hendrick, F., Wang, P., Wang, T., Yan, Y., Chen, L., Ni, R. (2019) Improved Aerosol Correction for OMI Tropospheric NO₂ Retrieval over East Asia: Constraint from CALIOP Aerosol Vertical Profile, *Atmospheric Measurement Techniques*, 12, 1-21. <https://doi.org/10.5194/amt-12-1-2019>
- Ma, J.Z., Beirle, S., Jin, J.L., Shaiganfar, R., Yan, P., Wagner, T. (2013) Tropospheric NO₂ Vertical Column Densities over Beijing: Results of the First Three Years of Ground-based MAX-DOAS Measurements (2008-2011) and Satellite Validation, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 1547-1567. <https://doi.org/10.5194/acp-13-1547-2013>
- Peyridieu, S., Chédin, A., Tanré, D., Capelle, V., Pierangelo, C., Lamquin, N., Armante, R. (2010) Saharan dust infrared optical depth and altitude retrieved from AIRS: a focus over North Atlantic-comparison to MODIS and CALIPSO, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(4), 1953-1967. <https://doi.org/10.5194/acp-10-1953-2010>
- Prata, A.J. (1989) Observations of Volcanic Ash Clouds in the

- 10-12-micron Window using AVHRR/2 Data, *International Journal of Remote Sensing*, 10, 751-761. <https://doi.org/10.1080/01431168908903916>
- Ramanathan, V., Chung, C., Kim, D., Bettge, T., Buja, L., Kiehl, J.T., Washington, W.M., Fu, Q., Sikka, D.R., Wild, M. (2005) Atmospheric brown clouds: Impacts on South Asian climate and hydrological cycle, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(15), 5326-5333. <https://doi.org/10.1073/pnas.0500656102>
- Remer, L.A., Kleidman, R.G., Levy, R.C., Kaufman, Y.J., Tanré, D., Mattoo, S., Martins, J.V., Ichoku, C., Koren, I., Yu, H., Holben, B.N. (2008) Global Aerosol Climatology from the MODIS Satellite Sensors, *Journal of Geophysical Research*, 113, D14S07. <https://doi.org/10.1029/2007JD009661>
- Singh, D., Dahiya, M., Kumar, R., Nanda, C. (2021) Sensors and Systems for Air Quality Assessment Monitoring and Management: A review, *Journal of Environmental Management*, 289, 112510. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112510>
- Tao, Z., He, H., Sun, C., Tong, D., Liang, X.-Z. (2020) Impact of Fire Emissions on U.S. Air Quality from 1997 to 2016 - A Modeling Study in the Satellite Era, *Remote Sensing*, 12(6), 913. <https://doi.org/10.3390/rs12060913>
- van Donkelaar, A., Martin, R.V., Brauer, M., Boys, B.L., Useche, P. (2016) Global Estimates of Fine Particulate Matter using a Combined Geophysical-Statistical Method with Information from Satellites, Models, and Monitors, *Environmental Science & Technology*, 53(14), 7954-7969. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05833>
- Wen, S., Rose, W.I. (1994) Retrieval of Sizes and Total Masses of Particles in Volcanic Clouds Using AVHRR bands 4 and 5, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 99(D3), 5421-5431. <https://doi.org/10.1029/93JD03340>
- Zhang, P., Lu, N.-M., Hu, X.-Q., Dong, C.-H. (2006) Identification and Physical Retrieval of Dust Storm Using Three MODIS Thermal IR Channels, *Global and Planetary Change*, 52(1-4), 197-206. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.02.014>

Authors Information

- 이권호 (강릉원주대학교 복사위성연구소 대기환경과학과 교수)
(kwonho.lee@gmail.com)
- 배민석 (목포대학교 환경공학과 교수)
(minsbae@mnu.ac.kr)