

총 설

대기질 관측을 위한 지상원격관측 측기 및 활용

Introduction of Ground-based Remote Sensing and Applications for Air Quality Monitoring

박상서*, 정육교¹⁾, 권형안²⁾

울산과학기술원 지구환경도시건설공학과,

¹⁾부경대학교 지구환경시스템과학부 위성정보융합공학전공,

²⁾수원대학교 환경에너지공학과

Sang Seo Park*, Ukkyo Jeong¹⁾, Hyeong-Ahn Kwon²⁾

Department of Civil, Urban, Earth and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology, Ulsan, Republic of Korea

¹⁾Division of Earth Environmental System Sciences, Major of Spatial Information Engineering, Pukyong National University, Busan, Republic of Korea

²⁾Department of Environmental and Energy Engineering, University of Suwon, Hwaseong, Republic of Korea

접수일 2025년 3월 14일

수정일 2025년 4월 8일

채택일 2025년 4월 9일

Received 14 March 2025

Revised 8 April 2025

Accepted 9 April 2025

*Corresponding author

Tel : +82-(0)52-217-2895

E-mail : sangseopark@unist.ac.kr

Abstract Ground-based remote sensing is widely used in various research fields related to the atmospheric environment study. With the increased operations of satellites and airborne observation in recent years, ground-based observation instruments have become more frequent, and their operation and applications have become more diverse. This paper provides an introduction to ground-based remote sensing instruments used in atmospheric environment research, especially to Dobson and Brewer spectrophotometers, MAX-DOAS instrument, AERONET Sunphotometer, Pandora spectrometer, and Lidar instrument. Also, this paper summarizes the key research areas adopted by the ground-based remote sensing dataset. Since the classical ground-based instruments such as the Brewer and Dobson spectrophotometers, a variety of instruments for observing aerosols and trace gases are now being operated both domestically and internationally. Through these instruments, it has been confirmed that ground-based remote sensing has been actively utilized for satellite/airborne data validation, atmospheric quality characteristics analysis, and long-term changes in air quality.

Key words: Remote sensing, Aerosol, Air quality, Spectrophotometer

1. 서 론

원격탐사의 기본 정의는 멀리 떨어져 있는 대상을 관측하기 위하여 직접적인 접촉이나 채취를 하지 않고 대상물질로부터 나오는 전자기파(electromagnetic radiation) 성질의 신호를 통해 물리적 성질을 측정하는 기술을 말한다(예: Burrow *et al.*, 2011; Platt and Stutz, 2008). 전자기파 성질을 이용하는 원격탐사는 인간이 감지할 수 있는 파장 범위 외에도 모든 빛의 파장을 활용할 수 있다. 다양한 파장을 통한 관측은

대상물질에 대한 특성을 여러 관점에서 정보를 얻을 수 있기 때문에 대상물질에 대해서 입체적인 특성을 파악할 수 있다. 이러한 이유로 원격탐사는 다양한 분야에서 직접 사물에 접근하기 어렵거나 시공간적으로 광범위한 대상을 동시에 파악하기 위한 경우에 폭넓게 활용된다. 그리고 대상이 되는 물질이 전자기적인 신호와의 상호작용을 하는 물질의 경우에는 관측에 제한이 있는 것이 아니기 때문에 원격탐사를 위한 기본적인 측기 구성만 이루어지게 된다면 다양한 분야에서 활용이 가능하다.

원격탐사를 보다 정밀하게 설계하고 제작하게 되면서 대기환경분야에서도 매우 다양하게 활용되기 시작하였다(예: Emery and Camps, 2017; Martin, 2008; Curran and Williamson, 1985). 특히 자외선/가시광선/적외선 등을 이용하여 대기 중에 존재하는 기체상 물질과 입자상물질에 대한 성질을 파악하고, 물리적/화학적 특성을 파악하는 연구에 매우 폭넓게 활용되기 시작하면서 대기환경과 기후변화 연구에 매우 중요한 관측요소가 되고 있다. 대기환경과 기후변화 특성은 지역/전구 규모의 특성을 파악하는 것이 매우 중요하기 때문에 다양한 위성을 이용한 원격탐사를 통해 매우 높은 시공간 해상도의 관측 자료를 공백없이 연속적으로 측정하여 활용하기도 한다(예: Kim *et al.*, 2018; Shin and Lee, 2016; Han *et al.*, 2003). 그리고 최근에는 위성을 활용한 원격탐사를 중심으로 하여 빅데이터 및 머신러닝 기법을 활용한 연구의 기초자료로도 많이 이용되고 있다(예: Kim *et al.*, 2024; Park *et al.*, 2024a; Jeong *et al.*, 2022; Son and Kim, 2020).

원격탐사 관측은 측기를 탑재하는 플랫폼에 따라서 구분을 할 수 있으며 주로 위성, 항공, 그리고 지상 플랫폼을 이용하여 관측을 수행하게 된다. 하지만, 원격탐사는 in-situ와 같은 직접 포집이 아닌 매질과 전자기적 신호 사이의 상호작용하는 정보를 이용한 간접적인 추정이기 때문에 매질 상태에 대한 초기 가정 등이 필요하고, 언제나 유의미한 불확실성을 내포하게 된다(예: Sayer *et al.*, 2020; von Clarmann *et al.*, 2020; Povey and Grainger, 2015). 이러한 불확실성은 측기를 탑재하는 플랫폼에 대한 복잡도가 크고 대상 물질로부터의 거리가 멀수록 커지기 때문에 이에 대한 검증과 꾸준한 관리는 필수적이다(예: Choi *et al.*, 2022; Park *et al.*, 2020; Kroon *et al.*, 2011; McPeters *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2005).

지상원격탐사는 고정된 관측소에 측기를 설치하여 운용하거나 지상에서 이동하는 플랫폼에 측기를 설치하여 측정하는 방식을 포괄하게 된다. 지상원격탐사는 다른 플랫폼의 원격탐사가 가지는 광범위한 관측 공간 범위를 통한 전지구적인 특성을 파악하는 장

점은 가지고 있지 않다. 그러나 측기를 항상 관리하여 자료의 품질을 지속적으로 유지할 수 있기 때문에 균질한 품질의 자료 확보가 가능하여 지역 규모의 특성을 장기간 지속적으로 파악하거나 다른 플랫폼의 검증을 위해서는 큰 장점을 가진다. 따라서 다양한 플랫폼에서 관측이 가능한 원격탐사에서 공간 규모에 대해서 약한 지상원격탐사이지만, 현재까지도 다양한 측기가 개발되고 관측소가 설치 운용되면서 여전히 매우 많은 지점에서 관측을 수행하고 있다.

본 논문에서는 지상원격탐사자료를 이용하고자 하는 연구자들에게 현재 운용되고 있는 측기의 전반적인 특성과 자료 활용의 이해를 돕고자 대기환경분야에서 활용되는 지상원격관측장비의 전체적인 내용을 소개하고자 한다. 특히 대기환경 및 대기질 연구에서 활용하는 in-situ 측기와와의 융합 활용을 계획하고자 하는 연구자나 머신러닝이나 관측 자료 처리를 위하여 원격탐사측기의 산출 자료의 특성과 한계를 파악하기 위한 연구자를 위해 측기의 관측 원리와 방법론도 함께 소개하고자 한다. 이와 함께 국내외의 지상원격관측자료를 활용한 대표적인 연구분야를 소개하고자 한다. 다만 대기환경분야에서 매우 다양한 목적으로 각기 다른 측기가 운용되기 때문에 이에 대해서 모두 소개하기보다는 국내에서 상시 운용이 많이 이루어지는 장비 중 태양광과 단파복사를 활용한 측기를 위주로 하여 그 범위를 한정하고, 대기질에 영향을 주는 물질의 관측을 대상으로 하는 지상관측장비에 한정하여 서술하고자 한다.

2. 지상원격관측 측기

2.1 돛슨 및 브루어 분광광도계

대기 관측을 위한 지상원격관측은 대체로 지상에서의 직접 포집 방식이 어려운 영역의 대기 특성을 이해하기 위한 목적으로 설치된 경우가 많다. 특히 지구복사수지에 영향을 주는 물질들에 대해서는 빛과 상호작용하는 특성이 직접적으로 연관이 있기 때

문에 원격탐사 측기로 관측이 가능하다. 이러한 연구 중 오래된 주제 중 하나는 오존층에 대한 감시를 꼽을 수 있다. 최근에는 오존층의 회복 경향에 대한 분석 연구 결과(Weatherhead and Andersen, 2006)나 오존층의 완전 회복에 대한 예측 연구(Newman *et al.*, 2009; Schroppe, 2000) 등이 나오기 시작하고 있지만, 여전히 지속적인 오존층의 감시 연구는 중요한 주제이며, 오존층은 성층권에 존재하기 때문에 원격 관측만이 지속적 감시를 위한 해법이었다. 또한 오존은 성층권과 대류권에 동시에 존재하는 물질이면서 자외선과 적외선에서 매우 강한 흡수선을 가진 물질이므로(Serdyuchenko *et al.*, 2014; Gratien *et al.*, 2010; Brion *et al.*, 1998; Burkholder and Talukdar, 1994), 원격관측에 매우 적합한 물질이다. 성층권의 오존층과 대류권의 오존 사이에는 직접적인 연관이 높지는 않지만, 성층권과 대류권 간의 물질교환(Stratospheric Tropospheric Exchange, STE) 과정에서 성층권의 고농도 오존이 대류권의 배경오존농도에 영향을 주는 연구들도 나오고 있어(예: Han *et al.*, 2019; Nagashima *et al.*, 2010; Carmichael *et al.*, 1998), 오존층 감시 연구에 대해 사용하던 측기의 관측 결과가 최근에는 지상 대기질 연구의 보조자료로도 활용되고 있다.

돋슨 UV 분광광도계(Dobson UV Spectrophotometer)는 1928년 C. M. B. Dobson 교수의 제작을 통해 처음 만들어진 이후로 전 세계에 120여 개의 관측소에서 운용이 계속되고 있다(Kim *et al.*, 2007a). 또한 국내에서는 1985년부터 서울 연세대학교 관측소에서 운용하여 오존전량의 장단기 변동성의 감시와 기후자료 생산을 담당하고 있다(예: Park *et al.*, 2019). 국내 돋슨 분광광도계는 최근 노후화가 진행됨에 따라 지속적으로 국외 반출을 통한 검교정을 실시하고 있으며, 최근에도 2024년에 미국 해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)에서의 검교정이 이루어진 바 있다(Park *et al.*, 2024b). 지상원격관측 중에서는 오래된 측에 속하는 측기로 오존층 농도가 대기 전층의 오존전량과 유사한 변동성을 가진다는 가정을 이용하여(예: Park *et*

al., 2019, 2011; Cho *et al.*, 2003, 1996, 1989) 오존층의 장단기 감시를 위한 목적으로 개발되었다. 또한, Umkehr 방법론을 통해 오존전량과 함께 오존 연직 분포의 모양을 추정하는 산출법을 개발하여(예: Petropavlovskikh *et al.*, 2022; Bojkov *et al.*, 2002; DeLuisi, 1979), 성층권 오존뿐 아니라 대류권 오존에 대한 층적분농도 추정을 하여 대류권의 정보도 일부 산출을 하게 되었다.

브루어 분광광도계(Brewer Spectrophotometer) 또한 돋슨 분광광도계의 개선된 형태로 개발된 측기로 기존에 돋슨 분광광도계가 가진 단점 중 하나인 이산화황의 간섭 효과 영향을 최소화하는 형태로 디자인된 측기이다(예: Kerr, 2010; Brewer, 1973). 해당 측기는 돋슨 분광광도계에서 관측하는 오존전량과 오존 연직 분포 정보뿐 아니라 자외선에 대한 정보를 동시에 산출하는 측기이다. 이 두 측기는 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO)의 오존 관측 표준 측기로 지정되어 전구 관측망으로 관리되고 있다.

돋슨과 브루어 분광광도계는 모두 오존층과 자외선의 장기 변동성을 감시하기 위한 목적으로 제작되었다. 이를 위하여 돋슨과 브루어 분광광도계는 자외선 복사량의 절대량을 산출하는 것이 아니라 오존의 흡수가 강한 파장과 약한 파장의 파장쌍을 조합하여 그 파장쌍에서의 복사비를 이용하여 산출한다. 추가적으로 파장쌍의 조합 과정에서 에어로졸과 공기에 의한 산란 효과의 파장 의존성에 의한 불확도를 보정하기 위하여 파장쌍 내에서의 파장 차이가 유사하도록 2개의 파장쌍 조합을 이용하여 오존전량을 산출하게 된다. 여기에 브루어 분광광도계는 추가적으로 이산화황의 흡수 효과를 보완하기 위하여 2개의 파장쌍(4파장)에 추가로 1개의 파장을 더 이용하여 5파장을 이용해 오존전량을 산출한다.

두 측기는 오존전량의 장기 관측으로 기후 변화 특성 연구에 주요 목적을 가지고 있으나, 앞서 언급한 바와 같이 대기환경에 있어서 오존을 포함한 기체상 물질이 가지는 중요도는 대류권과 지표에서의 대기

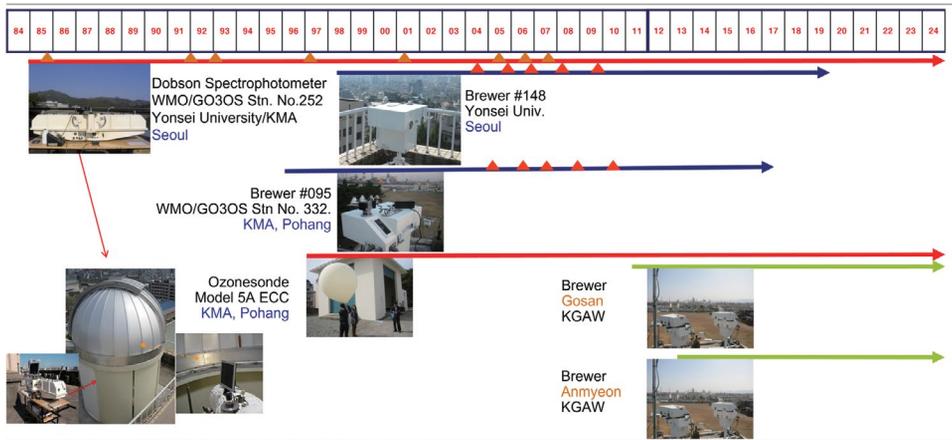


Fig. 1. Long-term ozone observation network in South Korea.

질에 직접 영향을 주는 연구뿐 아니라 대기 전층에 대한 변동성도 중요하기 때문에 대기환경분야에서의 지상원격관측에서 초기 형태의 측기로 높은 중요도를 가진다. 오존전량과 오존 연직 분포, 그리고 자외선 복사의 관측이 측기의 주요 목적이지만, 측기의 개조와 활용 확대를 통해 이산화질소의 총적분농도 산출이나 이산화황의 추정 (예: Diémoz *et al.*, 2014; Chakrabarty and Peshin, 2011; Cede *et al.*, 2006; Cappellani and Bielli, 1995), 에어로졸 광학특성 정보 산출 (Sellitto *et al.*, 2006; Gröbner and Meleti, 2004; Marengo *et al.*, 2002; Carvalho and Henriques, 2000)도 가능하다.

현재 돕슨 및 브루어 분광광도계는 국내에는 서울, 안면, 포항, 고산의 4개 관측소의 자료가 있으며, 그림 1에서 보는 바와 같이 초기에 장기 관측과 기후 변동성을 위한 연구를 목적으로 시작하였기 때문에 관측 기간이 대기환경을 관측하는 다른 지상원격측기에 비해 전반적으로 길다. 또한 기후변화에 의한 변동성을 추정하는 목적을 가지고 있기 때문에 비교적 관측 정확도와 정밀도가 타 측기에 비해 매우 높다(오존전량 기준 3% 이내의 오차) (Komhyr *et al.*, 1989). 따라서 돕슨 및 브루어 분광광도계는 대기질에 대한 실시간 추정 및 단기 변동성을 위한 활용연구보다는 주로 위성 자료와의 검증에 위한 기준 자료(예: Baek *et*

al., 2023, 2017; Garane *et al.*, 2019; Bak *et al.*, 2015; Park *et al.*, 2012; McPeters *et al.*, 2008; Balis *et al.*, 2007)로 활용되거나 타 지상관측 측기의 장기적인 자료 품질의 변동성을 평가하기 위한 연구에 많이 활용되었다. 특히 최근 정지궤도환경위성[미국: Tropospheric Emissions: Monitoring of Pollution (TEMPO), 아시아: Geostationary Environment Monitoring Spectrometer (GEMS), 유럽: Sentinel-4] 미션에서 오존전량과 연직 분포에서 위성 자료 검증을 위한 기준참조자료로 채택되어 높은 정확도에 의한 활용가치가 높은 측기이다.

돕슨 및 브루어 분광광도계는 원 목적이 기후 변동성과 정확도 높은 오존층 감시가 목적인 측기이기 때문에 매우 높은 정확도 요구 조건을 만족해야 하며, 장기적인 품질 관리가 필수이기 때문에 측기 제작 비용과 관리유지비가 비교적 높은 측기로 알려져 있다. 이러한 이유로 최근에는 돕슨 분광광도계의 경우에 신규 측기 개발이 종료되어 현재 존재하는 측기의 유지 보수만으로 관측소가 운용되고 있다. 장기적인 관점에서 돕슨 및 브루어 분광광도계는 타 지상관측소의 원격측기와 위성-항공 원격탐사의 기준 자료 및 품질 관리를 위한 역할이 점점 높아질 것으로 보이며, 특히 위성의 운용 측기 변화 과정에서 연속적인 관측 기록을 확보하기 위한 연구(예: Davis *et al.*, 2016;

McPeters *et al.*, 2015; Kieseewetter *et al.*, 2010; Harris *et al.*, 2003)에 활용될 것으로 보인다.

2.2 AERONET/SKYNET Sunphotometer

에어로넷(AERONET; Aerosol Robotic Network) 네트워크는 전 세계적으로 구축된 에어로졸 광학특성 관측을 위한 전구 네트워크로 에어로졸 관측 자료를 다파장관측을 통해 측정하고 있다(Holben *et al.*, 1998). 이 관측 네트워크는 미국 항공우주국(National Aeronautics and Space Administration, NASA)이 주관하여 전 세계적으로 운용되고 있으며, 현재 300여 개의 관측소가 운용 중에 있다. 동아시아의 경우에는 상시 관측하는 관측소 외에도 다양한 특별관측 캠페인[예: ASIA-AQ (Airborne and Satellite Investigation of Asian Air Quality) (2024년, Chang *et al.*, 2024), Distributed Regional Aerosol Gridded Observation Network (DRAGON)-ASIA campaign (2012년, Holben *et al.*, 2018, 2011)] 등을 통해서 임시로 구축된 관측소가 있으며, 캠페인에서 구축된 관측소에 대해서도 해당 기간의 관측 자료가 모두 수집되어 자료가 데이터베이스로 공식 홈페이지(<https://aeronet.gsfc.nasa.gov>)에 구축되어 있다. 관측 자료는 기후 연구를 통한 에어로졸의 장거리 수송(예: Zhao *et al.*, 2022; Velasco-Merino *et al.*, 2018; Ramanathan *et al.*, 2007)과 복사강제효과의 변동성(예: García *et al.*, 2012; Balkanski *et al.*, 2007; Yoon *et al.*, 2005)을 연구하거나, 최근에는 지표의 PM_{2.5} 및 PM₁₀과의 상관성 분석(예: Seo *et al.*, 2015)과 더불어 대기질 모니터링과 에어로졸의 화학 특성 변화에 의한 배출과 보건환경 효과 분석 등 다양한 분야에서 활용되고 있다.

관측 장비는 CIMEL사의 Sunphotometer를 표준 장비로 사용하게 된다. Sunphotometer는 340~1020 nm까지의 파장 영역에 대해서 다파장(주로 8개 채널)으로 관측을 하게 되며, 관측은 태양광을 직접 관측하는 직달일사 관측과 산란광을 방위각별로 측정하는 Almuquantar 관측을 수행하여 에어로졸의 광학 특성을 구하게 된다(예: Sinyuk *et al.*, 2020; Qie *et al.*,

2017). 에어로졸을 산출하는 과정에서 AERONET의 Sunphotometer 관측 자료는 에어로졸 광학두께(Aerosol Optical Depth, AOD)와 파장별 광학두께 변환인 옹스트롬지수(Ångström Exponent, AE), 그리고 대기 전체의 기주에서의 평균적 단일산란알베도(Single Scattering Albedo, SSA)와 크기별 부피 농도 정보를 기본으로 산출하고 있다(그림 2 참조). 직달 관측법은 랭리 방법(Langley Method)을 통해 채널별 대기상한의 복사량을 추정한 뒤에 추정값을 바탕으로 하여 식(1-2)와 같은 방법을 통해 대기의 광학두께 총량을 구하게 된다. 그리고 구해진 광학두께 총량에 대해서 각 요소별로 구분하여 최종적으로 AOD를 산출하게 된다.

$$I_{\lambda} = I_{\lambda_0} \exp(-\tau_{\lambda} \sec\theta) \quad (1)$$

$$\tau_{ext}^{total} = \tau_{scat}^{mol} + \tau_{abs}^{gas} + \tau_{scat}^{aero} + \tau_{abs}^{aero} \quad (2)$$

그러나 직달 관측을 통해서만 복사량 변화에 의한 에어로졸의 물리적/광학적 특성을 산출할 수 없기 때문에 산란광을 다중각도로 관측하여 특성 정보 산출을 하게 된다. 산란광 관측에서는 8개 다파장 채널을 다 사용하지 않고, 관측의 안정성을 위하여 440, 670, 870, 1020 nm의 4개 파장에 대해서만 관측을 수행하며, 일정 시간 이내에 산출에 필수적인 관측각에 대해서 관측하여 해당 관측각도에서의 복사량을 조합하여 에어로졸의 입자 크기 정보와 광흡수성 정보를 산출하게 된다.

Sunphotometer의 특성과 유사한 측기로 PREDES사에서 개발한 Skyradiometer를 이용하여 구축된 SKYNET이 존재한다(예: Kudo *et al.*, 2021; Nakajima *et al.*, 2020; Ningombam *et al.*, 2014; Khatri and Takamura, 2009). SKYNET은 한국과 일본을 중심으로 구축된 관측 네트워크로 AERONET과 유사하게 직달과 산란광을 이용하여 에어로졸의 광학 특성을 관측하고자 하는 관측망이다. SKYNET은 기존 AERONET의 관측 기법을 일부 보완하고 구름과 에어로졸의 오염지를 개선하여 동아시아 지역에 특화된 관측 자료를 제공하게 된다(예: Khatri and Takamura, 2009).

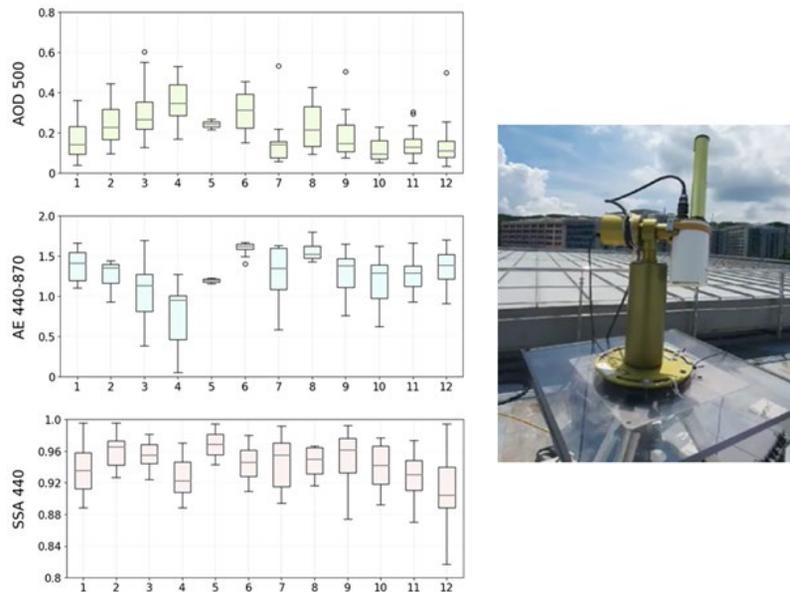


Fig. 2. Monthly observation data from AERONET at Ulsan, and example of sunphotometer installation at the observatory.

SKYNET은 2004년부터 관측을 시작하여 그 자료가 축적되었으며, 동아시아 지역의 에어로졸/황사 특성의 연구와 위성관측 프로젝트와 연계되어 다양한 검증 자료 생산 및 기후 정보 생산에 초기에 기여하였다.

이외에도 중국에서는 중국 내 Sunphotometer 관측 사이트 네트워크인 China Aerosol Remote Sensing Network (CARSNET; Che *et al.*, 2009), Sun-Sky radiometer observation network (SONET; Li *et al.*, 2018)의 관측 네트워크를 만들어 관측을 진행하고 있다. SONET은 중국 내의 16개소의 장기 관측한 관측소를 보유하고 있으며, CARSNET 또한 2002년부터 중국 기상청을 중심으로 한 중국 내의 여러 기관들을 통해서 약 60개의 관측소를 설치하여 운영하고 있다(Che *et al.*, 2015).

2.3 MAX-DOAS

Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS) 원격탐사 방식은 자외선/가시광선을 이용하여 미량 기체 및 에어로졸을 산출하는 기법을 말한다. DOAS 기법은 인공위성뿐만 아니라 지상 및 선박, 항공기

등 다양한 플랫폼으로 확장되어 이용되고 있으며 (Kreher *et al.*, 2020; Baidar *et al.*, 2013; Großmann *et al.*, 2013; Platt and Stutz, 2008), 다양한 DOAS 방식 (Long-Path DOAS, Direct Sunlight DOAS, Zenith Scattered Light DOAS 등) 중 Multi-Axis Differential Optical Absorption Spectroscopy (MAX-DOAS) 방식이 미량 기체 및 에어로졸 관측에 많이 활용되고 있다(Hönninger *et al.*, 2004). MAX-DOAS 관측은 그림 3에서 보는 바와 같이 다양한 고도각 (elevation angle)에 대하여 산란된 태양빛을 측정하는 방식이다. 낮은 고도각에서의 관측은 대류권 하층의 정보를 포함하고 높은 고도각은 대류권 상층에서 높은 민감도를 보이기 때문에 MAX-DOAS 방식을 이용하면 연직 층적분농도 (vertical column density, VCD)와 미량 기체의 연직 프로파일을 모두 산출할 수 있다 (Platt and Stutz, 2008; Hönninger *et al.*, 2004). 따라서 지상 MAX-DOAS 장비는 대기질 연구 (Ryan *et al.*, 2023; Dimitropoulou *et al.*, 2022)와 인공위성 자료의 검증용 (Ha *et al.*, 2024; Lee *et al.*, 2024; De Smedt *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2017)으로 많이 활용되고 있다.

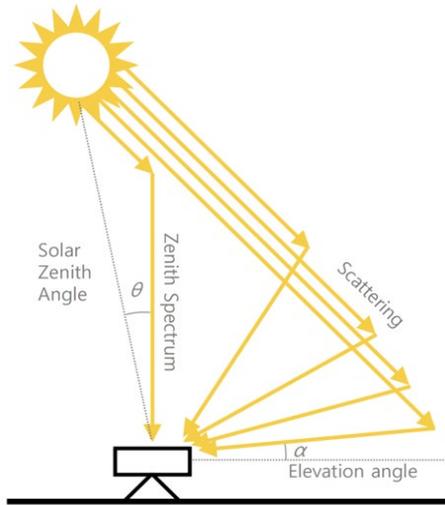


Fig. 3. Principle of the MAX-DOAS observation.

MAX-DOAS 방식의 측기는 산란된 태양빛을 수집하고 고도각을 조절할 수 있는 망원부(telescope), 망원부와 분광계를 연결하는 광케이블과 분광계로 구성되어 있는 광학부(optics), 그리고 데이터 수집을 위한 detector와 장비를 컨트롤하는 전자 파트(electronics)에 해당하는 검출부로 구성되어 있다. MAX-DOAS 방식은 자연 광원(태양빛)을 이용하기 때문에 추가적인 광원이 필요가 없어 작은 광학부를 사용할 수 있다는 장점을 가진다(Platt and Stutz, 2008). 따라서 상대적으로 저렴하게 장치를 구성할 수 있어 실험실 단위에서 개발된 MAX-DOAS 방식의 기기들이 전 세계적으로 많이 운영되고 있다.

서로 다르게 개발된 MAX-DOAS 방식의 기기를 검증하기 위해서 Cabauw Intercomparison Campaign of Nitrogen Dioxide measuring Instruments (CINDI) 캠페인이 네덜란드 왕립 기상연구소(KNMI)의 Cabauw 사이트에서 7~8년을 주기로 열리고 있다(Kreher *et al.*, 2020; PETERS *et al.*, 2012). CINDI 캠페인 기간 동안 서로 다른 지상 MAX-DOAS 장치에서 산출된 에어로졸 및 미량 기체 산출 농도가 비교되고 독립된 다른 기기를 이용하여 산출된 자료를 검증한다. 또한 각 기관에서 사용하고 있는 연직 프로파일

산출 알고리즘 결과를 관측 타워와 항공기 관측 등을 활용하여 비교 검증한다. 첫 CINDI 캠페인은 2009년 6~7월에 열렸으며, 인공위성관측 자료의 검증을 위하여 지상 MAX-DOAS 관측 결과를 평가하는 것을 주요 목적으로 하였다. 1차 캠페인에서는 인공위성 관측의 주요 결과인 이산화질소와 에어로졸을 주요 타겟으로 하여 MAX-DOAS 기기 사이의 결과를 비교하였으며 추가로 포름알데히드에 대한 비교 검증 연구를 수행하였다(Frieß *et al.*, 2016; Pinardi *et al.*, 2013; PETERS *et al.*, 2012).

2016년 9월에 열린 CINDI 2차 캠페인(CINDI-2)에서는 1차에 수행했던 비교와 함께 오존, 아질산(nitrous acid, HONO) 관측에 대한 추가 비교가 이루어졌다(Kreher *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020). CINDI-2 기간 중 연직 프로파일의 비교 연구도 CINDI 1차 기간에 수행되었던 에어로졸 소산 연직 분포(aerosol extinction profile)의 검증(Frieß *et al.*, 2016)에서 더 나아가 이산화질소, 포름알데하이드(formaldehyde, HCHO), 오존과 같은 미량 기체 연직 프로파일 검증으로 확대되었다(Wang *et al.*, 2018; Tirpitz *et al.*, 2021). 또한 MAX-DOAS 관측시 고도각의 정확도에 따라 발생할 수 있는 차등 경사층적분농도(differential slant column density; dSCD)의 불확도를 평가하기 위하여 고도각의 정확도를 평가하는 다양한 검증 방법을 제시하는 연구도 수행되었다(Donner *et al.*, 2020). 360도를 관측할 수 있는 imaging-DOAS 방식의 새로운 관측 또한 CINDI-2 기간에 수행되었다(Peters *et al.*, 2019).

1차, 2차의 연구 결과를 바탕으로 2024년 5~6월에 CINDI 3차 캠페인(CINDI-3)이 열렸다(<https://frm4doas.aeronomie.be/index.php/cindi-3>). CINDI-3에서는 주요 미량 기체인 이산화질소, 산소이합체(oxygen dimer, O₄), HCHO, 오존 관측과 함께 대기 중 HONO, 일산화브로민(bromine oxide, BrO), 글리옥살(glyoxal, CHOCHO) 관측으로 확대되었다. 이산화질소와 오존의 경우 각 기체 산출에 사용되는 DOAS 분석의 파장 범위를 다르게 하여 사용한 파장 범위가

변화함에 따라 관측 정확도에 미치는 영향에 대한 연구도 수행되었다. 이와 함께 MAX-DOAS 장비를 검증하기 위하여 항공기에 분광계와 in-situ 장비를 탑재하여 Cabauw 사이트 주변을 관측하였으며 지상 LIDAR 관측과 타워에서 in-situ 관측, active DOAS 관측 등이 수행되었다. 또한 이산화질소 존데(sonde) 장비 개발을 위하여 존데 관측도 수행하였으며 오염물질의 분포와 사이트 주변에서 오염물질이 수송되는 케이스를 탐지하기 위해 Car-DOAS 관측을 수행하였다. 이처럼 CINDI 캠페인은 MAX-DOAS 관측 자료의 검증을 넘어서 새로운 관측 방식 및 장비 개발의 장으로 확대되어 가고 있으며 MAX-DOAS 관측 자료의 신뢰성을 높이고 있다. 일부 자료는 MAX-DOAS가 가지는 다양한 기체의 관측 활용으로 인해 검증 자료로 높은 가치를 가지고 있어 ESA Validation Data Center (EVDC) 등을 통해서 각 기관의 MAX-DOAS 네트워크별로의 자료를 선택하여 획득할 수 있다.

국내에서도 MAX-DOAS 방식을 활용한 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 에어로졸과 이산화질소 산출과 관련하여 수행된 연구가 있으며 HCHO와 오존 산출에 대한 연구도 수행되었다(Park *et al.*, 2018; Chong *et al.*, 2016; Lee *et al.*, 2015, 2011). 다만 MAX-DOAS 장기 관측은 Choi *et al.* (2021)을 제외하고는 없으며 이 또한 자료가 공개되어 있지 않아 MAX-DOAS를 활용한 연구가 일부 제한되어 있다. 그러나 국내 MAX-DOAS의 관측망이 확대됨에 따라 알고리즘의 개선을 통해 산출 가능한 미량 기체의 종류도 다양해졌으며 산출 결과의 정확성이 꾸준히 향상되고 있다. 이에 발맞추어 설치된 관측소의 수도 증가하고 있다.

하지만 CINDI 캠페인과 같이 국내에 존재하는 장비들 간의 검정(calibration) 연구나 각 연구팀이 개발한 산출 알고리즘 간의 비교 연구가 전무하다. 그리고 국내 MAX-DOAS 연구는 비교적 단기간 수행되고 장비의 운영이 지속적으로 이루어지지 않아 장기간 누적된 자료가 드물다. 이는 각 장비 사이의 자료를 통합하여 오염물질의 장기간 변화를 분석하는 것

을 어렵게 한다. 미량 기체의 연직 분포를 지상에서 관측할 수 있는 유일한 장비인 MAX-DOAS 자료가 의미 있게 활용되기 위해서는 CINDI 캠페인과 같이 현재 운영되고 있는 장비 사이의 검증 캠페인이 필요하며 장비의 정기적인 관리를 통해 MAX-DOAS 장비가 지속적으로 운영될 수 있도록 노력해야 한다. 또한 미량 기체 및 에어로졸 산출과 인공위성 검증 연구 이외에 MAX-DOAS 자료를 활용한 오염물질의 수평적 이동, 고농도 오존 케이스 조사, 대기경계층의 발달과 오염물질의 수송 등 다양한 연구로 확장될 필요가 있다.

기존 MAX-DOAS 관측은 고정된 사이트에서 관측하기 때문에 공간적인 분포를 알기 어렵다. 따라서 차에 MAX-DOAS를 탑재하여 미량 기체 및 에어로졸의 공간분포를 관측하는 Car-DOAS 또는 mobile DOAS 방식이 추가로 활용되고 있다(Wagner *et al.*, 2010). Car-DOAS는 인공위성관측의 검증에 활용되며 도심 외각을 측정하면서 오염물질 플럭스(flux)를 계산하여 도심내 배출량을 추정하는 연구에 사용되고 있다(Lange *et al.*, 2023; Cheng *et al.*, 2020; Shaiganfar *et al.*, 2017; Shaiganfar *et al.*, 2011; Ibrahim *et al.*, 2010). 국내에서도 Car-DOAS 방식이 현재 설치되어 있는 MAX-DOAS 관측 자료와 함께 적극적으로 활용된다면 도시의 주요 배출량을 추정하고 오염물질의 공간 분포를 면밀히 이해할 수 있을 것으로 기대된다.

2.4 판도라 분광광도계

판도라(Pandora)는 태양 직달광을 포함한 다양한 기하 관측이 가능한 지상원격측정 장비로, 자외선과 가시광선 영역을 포함하는 280~525 nm 파장구간에서 0.6 nm의 분광해상도(full-width at half maximum; FWHM)를 가진다. 판도라는 크게 태양 추적 장치, 센서 헤드, 분광기로 구성되며, 센서 헤드에는 중성 밀도(Neutral Density; ND) 필터와 밴드 패스(Band pass) 필터로 구성된 두 개의 필터 휠이 장착되어 있다. 직달광 관측의 경우, 관측 시간은 암전류 관측을

포함하여 약 80초 정도 소요되며, 맑은 날의 경우 약 4,000개의 스펙트럼을 평균화하여 높은 신호 대 잡음비(Signal to Noise Ratio; SNR)의 데이터를 얻을 수 있다(Herman *et al.*, 2019).

판도라는 직달광(Direct Sun) 관측과 MAX-DOAS 관측에 따라서 각각 대기 중 미량 기체의 전층 농도와 연직 분포 정보를 제공할 수 있도록 설계되어 있다. 직달광 관측의 경우에는 초기 판도라부터 운영이 되기 시작한 관측 방식으로 Beer-Lambert 법칙에 기반한 광학 경로를 가정하여 측기에 수신된 태양 직달광을 이용하여 분광 피팅을 통해 미량 기체 농도를 산출하도록 구성이 되어 있다. 태양 직달광을 이용하여 기체의 흡수 강도를 전층 층적분농도로 변환하는 과정에서 측기와 주변 대기에 대한 불확도를 보완하는 보정값을 산출하게 되며, 이를 통해 Herman *et al.* (2009)은 판도라로부터 측정된 이산화질소 VCD의 정확도를 약 0.1 Dobson Unit (DU) (2.7×10^{15} molecule cm^{-2}), 정밀도를 0.01 DU (2.7×10^{14} molecule cm^{-2})로 평가하였다. 그리고 HCHO에 대해서는 직달 관측에 대해서 산출이 되며 통계적으로 26%의 편차 수준의 오차를 가지는 것으로 확인되었다(Spinei *et al.*, 2021, 2018).

국내에는 총 13대의 판도라가 설치되어 있다. 이중 6대는 표준 판도라 장비(Pandora-1s; PAN1s)로 구성되어 있으며, 나머지 7대는 Pandora-2s (PAN2s) 장비로 설치가 이루어졌다. PAN1s 장비는 UV Pandora 장비로 초기 판도라의 파장 범위와 분광해상도를 관측 가능한 범위로 하여 설계된 장비이며, PAN2s 장비의 경우에는 PAN1s 장비와 다르게 두 개의 분광기가 하나의 측기에 설치가 되도록 하여 기존에 280~525 nm의 PAN1s 관측 파장 범위보다 넓은 270~900 nm의 관측 파장 범위를 분광해상도의 변경없이 가질 수 있도록 개선한 장비이다. 따라서 기존에 자외선과 가시광 영역에서만 관측이 가능하며 미량 기체 산출 종류가 제한되었던 것을 넓은 파장 범위를 동시에 관측할 수 있게 되면서 보다 다양한 미량 기체를 정확하게 산출할 수 있게 되었다. 또한 관측 방식도 태양 직

달광과 MAX-DOAS 방법 외에도 직달 월광 관측을 포함하게 되어 일부 기간에 대해서는 밤시간에도 관측할 수 있도록 보완되었다. 표 1은 국내에 설치된 판도라 장비들의 위도, 경도 정보와 장비 버전에 대해서 보여준다.

국내를 포함한 전 세계적으로 설치된 판도라 관측 데이터는 Pandonia Global Network (PGN; <https://www.pandonia-global-network.org/>)에서 얻을 수 있으며, 전 세계에 설치된 약 160여 개의 판도라 분광광도계의 표준 알고리즘 자료 처리 결과가 모두 등록되어 있다. PGN은 오존층 감시를 위한 전구 네트워크 외에는 없었던 기체상물질 관측 네트워크 구성의 필요성이 높아지면서 구성된 기체상물질의 전구 관측 네트워크이다. 2010년 판도라 측기의 초기 개발과 함께 미국과 유럽이 공동으로 프로젝트를 수행하면서 표준화된 측기를 통한 기체상물질 관측 네트워크를 전 세계적으로 구축하였다. 그리고 2018년부터는 PGN이라는 네트워크 이름으로 전구 관측망 구성에 대한 활동이 시작되었다.

표준 처리된 관측 자료들은 각 관측소의 공식적인 관측 자료로 평가되며, 다양한 위성 데이터 비교 검증 연구에 활용되고 있다(Kim *et al.*, 2023; Verhoelst *et al.*, 2021; Lamsal *et al.*, 2014; Herman *et al.*, 2009). 그러나 대체로 표준 처리가 된 알고리즘은 각 관측소의 특성 반영이 늦을 뿐 아니라 기체에 대한 전층 농도 위주의 산출만이 이루어지기 때문에 보다 다양한 산출물의 확보를 위하여 연구용으로 다양한 산출 알고리즘들이 추가로 개발되고 있다(예: Park *et al.*, 2023a; Spinei *et al.*, 2021). 이렇게 개발된 판도라의 최근 개발 알고리즘들은 기존에 설치된 MAX-DOAS 장비 등과의 비교 검증 캠페인에 참여하여 그 정확도를 검증하여 신뢰도를 확보한 뒤에 위성 데이터와 비교 및 검증 연구, 관측소 주변의 배출원 특성과 연계한 연구 등 개발된 측기가 최대한 활용될 수 있는 방안을 마련하고 있다(예: Rawat *et al.*, 2024).

국내에서도 판도라 측기의 자료는 2020년에 발사가 된 GEMS 산출 결과의 검증 활용을 위하여 설치가

Table 1. List of Pandora observation sites in South Korea.

Location name	Version	Latitude (°N)	Longitude (°E)
Busan	PAN1s	35.2353	129.0825
Seoul	PAN1s	37.5644	126.934
Seoul-SNU	PAN1s	37.458	126.951
Ulsan	PAN1s	35.5745	129.1896
Seosan	PAN1s	36.7769	126.4938
Incheon-ESC	PAN1s	37.5689	126.6375
Mokpo	PAN2s	34.9134	126.4372
Daegu	PAN2s	35.8869	128.6061
Suwon-USW	PAN2s	37.211	126.98
Yongin	PAN2s	37.338	127.265
Seoul-KU	PAN2s	37.5855	127.0257
Jeonju	PAN2s	35.8466	127.1307
Gongju-KNU	PAN2s	36.471	127.145

이루어졌으며, GEMS 위성의 발사 이후 이루어진 여러 차례 캠페인을 통해 판도라가 검증 장비로 자주 활용되었다. 그와 더불어 최근에는 국제 대기질 관측 캠페인인 Airborne and Satellite Investigation of Asian Air Quality (ASIA-AQ) 캠페인에서도 판도라와 AERONET 같은 지상 기반 관측 장비가 표준 장비로 활용되면서 지상원격관측을 통한 이산화질소 전층 농도와 AOD를 농도가 높은 지역을 중심으로 관측소를 구축하여 산출한 뒤에 위성 데이터와의 비교 검증을 수행하거나, 캠페인 과정에서 수행한 항공 원격 관측[High Spectral Resolution Lidar (HSRL)이나 GeoCape Airborne Simulator (GCAS)]에서 산출되는 관측 자료와 비교하여 지역별 시공간분포 특성에 대한 3차원 연구에 사용되기도 하였다.

2.5 지상 LIDAR

라이다(Light Detection and Ranging; LIDAR)는 직접 빛을 쏘아 관측하는 active sensor이다. 이 중 대기 관측을 목적으로 하는 라이다는 레이저 펄스를 이용하여 에어로졸 입자, 얼음 결정과 같은 산란물질 외에도 수증기 또는 미량 기체도 측정이 가능하다. 라이다의 레이저 펄스는 대기 중을 이동하면서 빛의 감쇄가 일어나고 이 중 일부는 반사되어 라이다의 수신부로 들어오게 된다. 이 과정에서 신호의 시간 지연

을 통해 대기 산란 물질과 라이다 간의 거리를 추정하고, 신호 강도를 이용하여 산란체의 농도 정보를 얻을 수 있다. 이러한 방법론을 이용하여 초기에는 구름 특성과 구름의 경계고도 등을 관측하는 연구에 활용을 시작하였으며, 이것이 확대되어 에어로졸과 기체 성분의 연직 분포에 활용이 확대되었다.

라이다는 연직 분포를 매우 고해상도로 측정할 수 있어서 에어로졸의 산란/흡수 효과에 대해서 연직적인 특성을 파악할 수 있다. 타 원격 관측이 연직 분포 산출에 불확실성이 높은 것과 비교해서 라이다는 직접적인 연직분포 산출이 가능하기 때문에 대기 전층의 에어로졸과 지표 농도의 특성을 파악하기 위한 용도로 중요도가 높다. 또한 배출원의 종류가 매우 다양한 에어로졸 특성상 시공간적인 에어로졸의 수평 이동과 연직 확산 특성을 파악하는 과정에서 라이다의 높은 시간해상도와 연직해상도는 매우 큰 장점이 된다.

초기 도입된 라이다는 대체로 에어로졸의 미 산란과 공기 분자의 레일리 산란을 합친 후방 산란광을 이용하여 에어로졸의 후방 산란 특성을 산출하는 형태로 많이 이용되었다. 또한 편광 성분에 대해서 관측을 하여 에어로졸의 편광도를 측정하게 된다. 이를 통해 라이다는 에어로졸(특히 황사)의 연직 분포를 측정하는 데 폭넓게 활용되었으며 실제 황사가 수송되는 과정에서의 연직 층의 특성 변화를 파악하는 연구들에 많이 이용되었다(예: Shin *et al.*, 2014, 2012; Noh *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2010; Won *et al.*, 2004). 이들 라이다는 주로 532/1064 nm의 파장의 광원을 통해 이들 특성을 파악하였다.

다파장 라만 라이다 시스템 같은 경우에는 355 nm와 532 nm의 영역의 레이저 빛이 대기 중에서 반응하는 과정에서 일어나는 공기 분자에 의한 라만 산란으로 발생하게 되는 라만 산란광을 탄성 산란에 의해서 발생하는 산란광과 같이 분석하여 추가적인 소산 정보를 얻을 수 있다. 라만 라이다의 대기 원격 관측 과정에서는 질소 분자의 라만 산란을 이용하게 되며, 라만 라이다는 기존 미 산란을 통해서 얻어지는 산란

광과 라만 산란광을 동시에 관측하여 2파장의 에어로졸 후방산란계수와 소산계수를 산출하게 된다. 이러한 인프라를 바탕으로 하여 국내에는 약 10개의 관측소가 운영 중에 있으며, 각 관측소의 자료를 통합하고 일관성 있는 관리를 위해 국내에서도 한반도 지상 라이더 관측망(Korea Aerosol Lidar Observation Network, KALION)을 운영하여 관측 자료의 분석 알고리즘을 표준화하고 그 자료를 통합관리하고 있다(Yeo *et al.*, 2016). 현재 KALION은 표 2에서 보는 바와 같이 5개 관측소가 운영 중에 있다.

그리고 라이더의 레이저 펄스가 산란체에 반사하여 도달하는 특성을 이용하는 것에 추가하여 기체의 흡수 특성을 가지는 파장 영역을 통해 기체 농도를 추정하는 방법으로도 응용 활용되기도 한다. 특히 차등 분광 흡수 라이더(Differential Absorption Lidar; DIAL)는 라이더 특성에 오존 흡수 파장 특성을 추가하여 오존 농도의 연직 분포를 측정하게 된다. 앞선 오존 관측 측기와 유사하게 레이저 펄스의 파장을 오존 흡수가 강한 파장과 약한 파장으로 선택하여 라이더 시스템 수신부에서 두 파장의 레이저 펄스의 수신 비율을 측정하여 대기 중 오존 농도를 추정하는 방법을 이용한다. 추가적으로 DIAL은 성층권(고농도 오존 영역)과 대류권(저농도 오존 영역)에 따라 파장 조합을 바꿔 오존 흡수 관측을 위한 최적의 파장 영역을 선택적으로 설정할 수 있어 높은 정확도의 오존 연직 분포를 산출하게 된다.

다만 라이더는 설치 과정에서 타 지상원격장비에 비해서 관리 비용이 높은 특성과 연직해상도 대비 수평적인 커버리지가 좋지 않기 때문에 다양한 라이더 관측 네트워크가 구성이 되고 있다. 전 세계적인 네트워크 구성으로는 세계기상기구의 지구대기감시(Global Atmosphere Watch; GAW) 하에 구성된 GALION(GAW Aerosol Lidar Observation Network)이 있으며, GALION은 각 지역별로의 주요 네트워크들이 전구 네트워크망 구성에 기여하고 있다. 대표적인 지역별 네트워크는 유럽의 EARLINET(European Aerosol Research Lidar Network, 2000년), 남중미의

Table 2. List of Lidar observation sites in South Korea.

Site Name	Location	Agency
Seoul_SNU	Gwanak, Seoul	Seoul National Univ.
Seoul_SRI	Gwangjin, Seoul	Research Institute of Public Health and Environment
Anmyeon_KMA	Taan	National Institute of Meteorological Sciences
Ulsan_UNIST	Ulju, Ulsan	UNIST
Gosan_SNU	Hangyeong, Jeju	Seoul National Univ.

LALINET(Latin America Lidar Network, 2008년), 그리고 아시아의 AD-NET(Asian Dust and Aerosol Lidar observation Network, 2001년)가 있다.

그 외에도 NDACC(Network for the Detection of Atmospheric Composition Change)의 지상원격관측 네트워크에서 라이더 네트워크가 포함이 되어 있다. NDACC에 포함된 라이더 관측의 목적은 지표 근처의 에어로졸이 아닌 주로 성층권 에어로졸 관측용을 목적으로 한 라이더 장비가 네트워크로 구축되어 있으며, 약 25개소가 전구에 분포하고 있다. 지상 라이더를 이용하여 우리 나라에는 2001년부터 구성된 AD-NET의 일원으로 라이더 관측이 시작하게 되었다(Shimizu *et al.*, 2016). AD-NET을 통해 운영되는 국내 라이더는 서울, 제주, 울산이 있으며, AD-NET은 일본을 중심으로 한 아시아 4개국, 19개의 관측소가 운영 중에 있다. AD-NET을 통해서 운영되는 라이더 외에도 NASA에서 구성한 네트워크인 MPLNET(Micro-Pulse Lidar Network)를 통해 2010년까지 운영한 안면도 관측소가 있다. 각 관측 자료는 해당 관측 네트워크의 공식 사이트를 통해서 획득할 수 있다.

3. 지상원격관측을 통한 연구 활용

3.1 위성관측 비교 검증

위성을 통한 미량 기체와 에어로졸의 산출은 태양복사가 지표와 대기로부터 반사/산란되는 과정을 통

해서 위성 센서에 도달하는 산란광을 이용하여 산출하게 된다. 그리고 이러한 과정에서 미량 기체는 매우 다른 시공간분포로 인해 산란광으로부터 얻어지는 SCD에서 VCD로 변환하는 과정에 대한 불확실성을 유발하게 된다(예: Hewson *et al.*, 2015). 그 외에도 위성 관측에서 공간 해상도가 가지는 한계로 인해서 나타나는 미량 기체 흡수신호의 강도 왜곡 현상과 그에 따른 흡수량 강도 산출에 대한 영향(Lee *et al.*, 2024), 산출 알고리즘에서 가정한 연직 분포와 실제 연직 분포 사이의 차이에 의해서 발생하게 되는 불확실성(예: Baek *et al.*, 2024; Kwon *et al.*, 2017) 등이 위성으로부터 산출한 미량 기체 농도에서 오차를 일으키게 되어 위성 산출 알고리즘은 항시 비교 검증 과정이 필요하다.

이러한 이유로 위성 발사 과정에서는 다양한 비교 검증에 대한 계획을 수립하게 된다. 특히 미량 기체와 에어로졸 등의 관측에 대해서는 비교적 그 오차가 유의미하게 나타나기 때문에 위성 개발 과정의 한 축으로 검보정 계획을 수립하기도 한다(예: ESA, 2017). 이 과정에서 위성관측에 비해 비교적 측기의 안정성이 높고 상시로 관리가 가능한 지상원격관측 장비는 위성 검보정을 위한 기준 측기(Fiducial Reference Measurement; FRM)로 지정되며, 위성에서 산출하는 물리량과 동일한 정의로 내릴 수 있는 물리량을 산출하는 지상관측 장비를 FRM으로 우선 고려하게 된다.

유럽의 극궤도 환경위성인 TROPOMI의 경우에는 위성 개발 과정에서 FRM에 대해서 구체적으로 명기하였으며, 그 과정에서 FRM으로는 지상관측자료로 위성과 독립적이어야 하며, 공개된 관리 절차가 문서화되어 있으며, 정기적인 장비 관리가 추적 가능한 형태로 전체적인 불확도가 명확하게 정의되어 있는 장비로 규정하고 있다(ESA, 2017). 이러한 과정에서 TROPOMI는 오존에 대해서 MAX-DOAS와 돕슨, 브루워 분광광도계가 FRM으로 채택되었으며, 판도라 분광광도계는 미량 기체 전반적인 산출물, 라이다는 에어로졸 연직 분포 정보에 대한 FRM으로 채택되어 검보정을 위한 관측망이 구성되었다. 이러한 과정에

서 판도라 분광광도계는 최근 발사가 이루어진 극궤도 환경위성에 대한 검증을 위한 다양한 연구에 활용되기도 하였다(예: Di Bernardino *et al.*, 2023; Verhoelst *et al.*, 2021; Judd *et al.*, 2020; Herman *et al.*, 2019; Spinei *et al.*, 2018; Tzortziou *et al.*, 2012).

이와 유사하게 국내에서도 GEMS를 위한 검보정 계획을 수립하여 FRM에 적합한 관측 장비를 선정하고 관측망을 구축하였다. 그리고 이러한 과정을 통해 다양한 검보정 연구가 이루어졌다. FRM의 선정에 앞서 측기별로의 편향 효과를 확인하기 위하여 Baek *et al.* (2017)에서는 오존전량에 대해서 브루워 분광광도계와 판도라 분광광도계를 Ozone Monitoring Instrument (OMI)의 오존전량 산출 결과와 종합적으로 비교하는 연구를 수행하였다. 그리고 Kim *et al.* (2017)에서는 국내에서 관측 중인 오존전량 측기를 모두 이용(돕슨, 브루워, 판도라)하여 극궤도위성인 OMI의 2개의 서로 다른 산출 알고리즘(TOMS 방법 및 DOAS 방법)과 비교를 수행하여 오존전량의 측기별 편향과 불확도를 종합적으로 평가하고, 상관관계수에 대해서 관측기하(태양전경각)에 의한 영향력과 계절 효과를 모두 파악한 바 있다. Li *et al.* (2023)에서는 GEMS의 이산화질소 산출 결과에 대해서 중국 지역에 구축된 MAX-DOAS와 판도라의 관측망을 이용하여 장기 검증과 함께 지역 수송 효과에 대한 연구를 수행한 바 있으며, Lange *et al.* (2024)에서는 GEMS의 이산화질소 중에서 추가적으로 대류권 전층농도에 대해서 지상 DOAS 관측 결과를 이용하여 일변화 추세와 검증 결과를 동시에 제시하였다. 또한 성층권 및 전층 오존전량에 대해서는 극궤도위성과의 비교 검증을 진행함과 동시에 판도라에서 산출되는 직달 광 관측에 의한 오존전량과 비교하여 GEMS Map of Air Pollution (GMAP) 캠페인 기간 동안의 특별 검증 작업도 수행한 바 있다(Baek *et al.*, 2024; Ha *et al.*, 2024; Lee *et al.*, 2024).

추가적으로 특별 관측 캠페인을 통해 매우 고밀도의 관측망을 특별히 구축하여 보다 정밀한 검보정을 실시하기도 하였다. 2020년에 GEMS가 발사된 이후

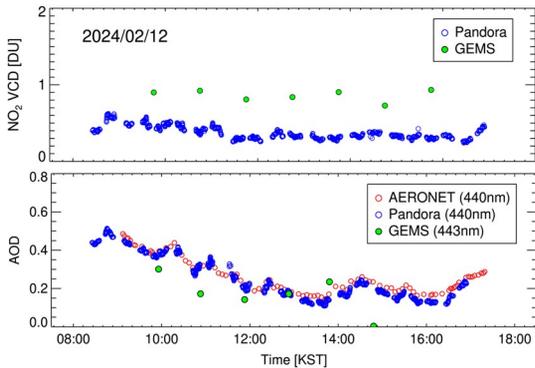


Fig. 4. Diurnal variation of NO_2 VCD and AOD from Pandora direct sun observation in Suwon Station (37.2618°N, 126.9908°E) on February 12, 2024.

로 2020년에 1차 GMAP, 2021년에 2차 GMAP 캠페인을 수행하였으며, 2024년에는 Satellite Integrated Joint Monitoring of Air Quality (SIJAQ) 캠페인을 통해 동아시아와 한반도의 대기질 관측 캠페인을 수행하면서 GEMS의 비교 검증 또한 주요 목적으로 설정하여 캠페인을 수행하였다. 그림 4는 캠페인 기간 중 맡았던 2024년 2월 12일 수원역 인근 (37.2618°N, 126.9908°E)에 설치된 판도라 직달광 데이터를 기반으로 계산된 440 nm의 AOD와 이산화질소 VCD의 일 변화를 보여준다. 본 연구에서 사용된 두 관측 결과는 모두 Jeong *et al.* (2022, 2020)의 SMART-s (Spectral Measurements for Atmospheric Radiative Transfer-spectroradiometer) 알고리즘을 활용하여 산출되었으며, GEMS 알고리즘 version 2.0으로부터 산출된 이산화질소와 에어로졸 광학 두께 산출물과 비교하는 데 활용되었다. 에어로졸 광학 두께의 경우, 인근에 설치된 AERONET으로부터 관측된 값과도 비교 및 검증을 수행하였다. 전반적으로 GEMS 알고리즘은 두 산출물 모두 판도라와 비교하였을 때 높은 상관성을 가지며 일 변화의 흐름 또한 잘 일치하는 것으로 나타났다. 다만 이산화질소의 경우 판도라 대비 다소 과대 모의하는 경향이 있는 반면, AOD에서는 전반적으로 유사한 수준을 보이지만 일부 과소 모의되는 경향을 확인할 수 있었다.

이러한 예시를 위성 검증에 적용함으로써 위성 데이터 전반적인 정확도를 평가할 수 있을 뿐 아니라, 향후 알고리즘 개선에도 효과적으로 기여할 수 있음을 시사한다. 현재 MAX-DOAS 방식으로 산출한 미량 기체 및 에어로졸 연직 프로파일과 연직층적분농도는 AirKorea 관측 자료, NASA DC-8 항공기에 탑재된 이산화질소, HCHO in-situ 자료, NASA G-III 항공기에 탑재된 GCAS와 HSRL 자료 등을 복합적으로 사용하여 검증을 진행하고 있다. 또한 ASIA-AQ 기간 MAX-DOAS 자료는 GEMS 자료를 검증하는 데 활용되고 있다.

3.2 대기질의 시공간 분포 연구

Park *et al.* (2020)에서는 시공간적으로 연속적인 위성 산출 결과를 장기간 이용하여 주요 미량 기체와 에어로졸 산출물에 대한 시공간 특성을 분석한 바 있다. 이를 통해서 볼 경우에 각 산출물별로 변동 특성이 일치하는 범위가 서로 다르며, 시간 규모에 있어서도 30분 이상의 차이가 날 경우에는 그 분포에서 다른 특성이 나타난 바가 있다. 이러한 이유는 대기질에 영향을 미치는 오염물질은 그 배출 특성이 시간적으로 달라지며, 수송 과정에서 확산과 함께 광화학반응 등에 의한 농도 변화가 매우 심하게 나타나면서 시공간적인 변동 규모가 상대적으로 크기 때문이다. 따라서 대기질에 영향을 미치는 오염물질의 시공간적 특성을 정확하게 확인하는 것은 앞서 3.1절에서 언급한 서로 다른 산출 자료 사이의 검증을 수행하는 과정에서 검증 자료의 선정의 시공간적 범위를 확정하는 데에 매우 중요한 정보뿐 아니라, 지역별 대기질의 이해도를 높이는 과정에서 관측소의 장소와 배출원의 상대적 위치, 지역 규모의 확산 과정을 종합적으로 파악하여 분석해야 하기 때문에 매우 중요하다.

이러한 대기질에 대한 시공간 변동성의 특성을 확인하여 국내 및 아시아에 설치된 MAX-DOAS와 판도라 자료는 인공위성 자료 검증을 위해 활용될 뿐만 아니라 다양한 대기질 연구에 활용되기도 한다. 예시

로 Vlemmix *et al.* (2011)에서는 MAX-DOAS 관측을 통해 산출한 이산화질소 연직 분포를 이용하여 대기 경계층과 자유대기를 구분하는 능력을 평가해 보았으며 Dimitropoulou *et al.* (2022)는 MAX-DOAS 장비로 낮은 고도각(2°)으로 방위각 스캔을 통해 이산화질소와 에어로졸의 수평분포를 관측하였다. Ji *et al.* (2023)는 대류권 내의 오존 프로파일을 산출하였다. 그 외에도 판도라 분광광도계의 표준 알고리즘은 오존과 이산화질소 등에 대한 VCD를 산출하는 것만을 기준으로 하여 위성 검증 또는 전층 농도에 대한 정보만을 초기에는 제공했으나 최근에는 HCHO에 대한 VCD 산출 알고리즘의 개발(예: Spinei *et al.*, 2021, 2018), 이산화질소의 지표농도 산출(예: Zhao *et al.*, 2019) 알고리즘이 개발되면서 지상관측소 주변의 대기질을 연구함에 있어서 지표의 in-situ 관측망과 연계하여 지역별 도시 대기질에 대한 광학 기반 분석을 수행할 수 있게 되었다. 또한 휘발성 유기 화합물(Volatile Organic Compounds, VOC)에 대한 정보와 지표 정보를 산출할 수 있게 되면서 지표에서의 오존 생성에 대한 광화학반응의 특성을 분석하는 연구도 가능하게 되었다(Travis *et al.*, 2022; Schroeder *et al.*, 2016).

이러한 대기질 시공간 분포 연구는 고정된 관측소에서 얻어지는 연구뿐 아니라 특별 관측을 통한 고밀도의 관측 운영을 통해서도 확인할 수 있다. 예를 들어 MAX-DOAS 관측은 ASIA-AQ 캠페인 기간에도 이루어졌다. ASIA-AQ는 2024년 2~3월 동안 우리나라를 포함한 아시아 4개국(대한민국, 대만, 태국, 필리핀)의 대기질을 조사하는 국제 공동 관측 캠페인으로 구성되어 해당 기간 동안에 MAX-DOAS 장비 4대, 판도라 장비 6대, 국내 연구진이 개발한 AQProfiler 2대가 국내에서 운영되었다. 이 과정에서 모든 장비가 ASIA-AQ 관측 캠페인의 주요 관측 지점인 수도권에 집중하여 수도권 내에서의 배출과 수송 특성에 의한 미량 기체의 농도 변화를 공간적으로 상세히 확인하고, 해당 자료를 GCAS와 연계하여 분석을 수행하였다. 또한 수도권 내에서도 교통 및 산업활동의

특성이 모두 다르기 때문에 동일한 도시권 안에서의 공간 분포의 불균질성에 대한 연구도 수행하였다.

3.3 장기 특성 변화 연구

대기환경에 대한 특성은 단기적이고 지역 규모의 시공간 변화에 대한 연구뿐 아니라 장기적인 농도와 특성 변화에 대한 연구도 매우 중요하다. 특히 미량 기체와 에어로졸에 대한 원격관측에 대한 자료가 1980년대 이후로 많이 늘어남에 따라 40년 가까이 구축된 장기 자료는 기후 분석 연구와 유사하게 대기질과 오염물질에 대한 장기 특성 변화 연구를 관측으로 수행할 수 있는 기반이 되었다.

장기 특성 변화에 대해서 가장 긴 기간 동안 이루어진 활용 연구로는 오존층에 대한 장기 감시 및 회복 경향에 대한 연구이다. 몬트리올 의정서에 의한 Ozone depleting substances (ODSs)의 규제와 농도 감소를 통해서(Anderson *et al.*, 2000) 최근 오존층에 대한 장기 변화 경향이 변화하고 있다는 여러 논문은 돕슨 및 브루워 분광광도계를 중심으로 한 오존전량 전구 관측망과 위성 자료를 통해 수행된 바 있다(e.g., Weber *et al.*, 2022; Steinbrecht *et al.*, 2018; Chipperfield *et al.*, 2017; Newman *et al.*, 2009; Balis *et al.*, 2007; Weatherhead and Andersen, 2006; Newchurch *et al.*, 2003; Fioletov *et al.*, 2002). 이러한 전구 규모의 오존 회복 경향 외에도 각 지역별로도 이러한 연구는 지상 및 위성관측을 조합하여 다양하게 수행되었다(Kim *et al.*, 2017; Park *et al.*, 2012; Demirhan *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2005). 그리고 돕슨과 브루워 분광광도계의 원리가 측기 기술의 발전에 따라서 개선되면서 Egli *et al.* (2022)과 같이 휴대성 높은 장비를 통해 연속된 지점에서 오존전량 관측을 통해 장기 경향을 분석하기도 하였다. 그리고 오존전량이 성층권의 오존층을 모두 설명하지 않기 때문에 DIAL의 라이더 관측 자료를 이용하여 오존의 고해상도 연직 분포를 관측하여 성층권 오존의 양적 정보와 연직 분포 특성 변화의 정보를 얻어 그 경향을 분석하기도 하였다(Godin-Beekmann *et al.*, 2022, 2003). 오존전량에 대

한 영향뿐 아니라 Koo *et al.* (2020)과 같이 최근 인위적인 활동에 의한 대기오염물질의 추세가 과거 자료와 비교했을 때 어떠한 변동성을 보였는지를 통해 최근 대기질에 대한 평가를 위한 기초 정보로 활용하기도 한다. 특히 오존의 변동성 자료를 통해 대기역학적 활동 변화에 의한 STE 활동에 대한 특성을 파악하는 연구와 최근 ACCLIP 캠페인에서의 오염물질의 대규모 순환 과정에 대한 연구에서도 보조 자료로 꾸준히 활용되고 있다(Kim *et al.*, 2025).

오존 외에도 에어로졸의 경우에도 장기 관측이 많이 이루어진 물질 중 하나이다. 특히 AOD의 경우에는 에어로졸의 총량 정보를 나타내는 인자이기 때문에 황사와 미세먼지에 대한 전층 정보를 광학적/기후적으로 파악하기 위하여 장기 분석한 연구가 폭넓게 존재한다(예: Dong *et al.*, 2023; Ningombam *et al.*, 2019; Liley *et al.*, 2009). 또한 에어로졸은 측정 가능한 농도에 비해 배경 농도는 매우 낮기 때문에 배경 농도의 변화에 대한 추적 또한 매우 중요하여 배경 관측소를 위주로 하여 장기간 에어로졸의 배경 농도와 특성 변화에 대해서도 추적하는 연구 또한 이루어졌다(Singh *et al.*, 2020). 그리고 에어로졸의 연직 분포의 변화를 파악하여 황사의 장기 수송 효과(Jing *et al.*, 2024)나 특정 관측소에서의 장기 광학 특성 변화에 대한 분석(예: Wang *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2007b)도 이루어졌다. 그리고 이러한 연구를 바탕으로 하여 라이다 관측을 기반으로 하여 장기 PM₁₀의 수송 효과와 지표 농도 영향에 대한 연구도 이루어져 지표 관측을 통해 확인하기 어려운 지역 특성과 장거리 수송 특성의 변동성에 대해서도 장기적으로 파악하는 연구도 수행되었다(Park *et al.*, 2021).

그 외에도 수증기에 대한 연직 정보에 대해서 장기간 감시를 통해 그 경향을 탐지하는 연구(Wang *et al.*, 2015)나, 미량 기체 중에서는 인위적인 특성이 상대적으로 강하게 작용하는 이산화질소에 대해서는 비교적 높은 흡수 강도를 이용하여 정확한 자료가 산출되고, 다양한 측기를 통해서 그 자료를 얻을 수 있기 때문에 각 지역별로의 장기 변화 경향을 분석하는

연구가 DOAS 방법론을 통한 산출 자료를 중심으로 진행된 바 있다(예: Gruzdev and Elokhov, 2022, 2021; Schäfer *et al.*, 2010, 2007; Lee *et al.*, 2009). 또한 라이다 원격 관측을 중심으로 얻어지는 흡수와 산란 연직 정보는 도시 지역의 지표 대기질 변화에 유의미한 영향을 미칠 수 있는 혼합고(Mixing Layer Height)의 장기 변화를 확인할 수 있어 대기질 분석 과정에 보조적으로 이용될 수 있다(Park *et al.*, 2023b, 2022; Schween *et al.*, 2014; Schäfer *et al.*, 2013).

4. 요약 및 결론

본 논문에서는 대기환경분야에 주로 활용되는 지상원격탐사 측기를 소개하고, 측기를 이용한 다양한 활용 분야에 대해서 정리하였다. 초기 지상원격탐사는 직접 포집 관측이 어려운 대상을 관측하는 목적으로 이용되었으며, 이를 통해 장기 변화 특성 등을 파악하는 연구에 집중되었으나, 최근 들어 대기환경감시를 목적으로 한 위성과 항공 관측의 활성화, 그리고 이에 대한 검증의 필요성이 높아지면서 대기질에 영향을 주는 물질들에 대한 감시와 타 플랫폼과의 검증을 목적으로 하여 다양한 측기들이 국내에 도입되어 활용 연구가 이루어지기 시작하였다. 특히 최근 도입된 판도라와 MAX-DOAS 측기의 경우에는 최근 발사된 GEMS 위성의 검증과 관련 캠페인 연구에 활발히 쓰이게 되면서 동아시아의 대기질 특성을 파악하는 연구에 광범위하게 쓰이는 것을 확인할 수 있었다.

지상원격탐사 연구의 발전이 지속적으로 이루어지기 위해서는 다양한 관측 플랫폼과 더불어 대기질과 그 외의 활용 연구가 지속적으로 이루어질 필요가 있다. 또한 이 과정에서 긴밀하고 체계적인 국내/국제 연구진들의 협력 관계 속에서 필수 관측소의 설치와 안정적인 운영이 이루어져 정확도 높은 관측 자료를 지속적으로 확보하는 것이 필요하다. 이를 통해 대기질의 지역 배출 및 수송 특성과 위성 검증에 대해서

보다 다양한 오염물질들에 대해서 연구가 이루어져야 할 것으로 보인다. 또한 실제 오염물질의 빛과의 상호작용하는 정보를 바탕으로 광화학반응의 활성화도를 추정할 수 있는 연구로 확대가 필요하다. 그리고 원격탐사분야에서 필수적인 장비 개발 기술의 다각화와 측기 현업화 및 표준화 과정이 국내 지상원격탐사 분야를 보다 더 활성화할 수 있고 현재 운영 중에 있는 GEMS와의 복합적인 효과를 통해 아시아 지역에서의 대기질 관측 연구를 주도적으로 이끌 수 있는 방안이 될 것으로 기대된다.

References

- Anderson, J., Russell, J.M. III, Solomon, S., Deaver, L.E. (2000) Halogen Occultation Experiment confirmation of stratospheric chlorine decreases in accordance with the Montreal Protocol, *Journal of Geophysical Research*, 105(D4), 4483-4490.
- Baek, K., Bak, J., Kim, J.H., Park, S.S., Haffner, D.P., Lee, W. (2024) Validation of geostationary environment monitoring spectrometer (GEMS), TROPOspheric Monitoring Instrument (TROPOMI), and Ozone Mapping and Profiler Suite Nadir Mapper (OMPS) using Pandora measurements during GEMS Map of Air Pollution (GMAP) field campaign, *Atmospheric Environment*, 324, 120408. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2024.120408>
- Baek, K., Kim, J.H., Bak, J., Haffner, D.P., Kang, M., Hong, H. (2023) Evaluation of total ozone measurements from Geostationary Environmental Monitoring Spectrometer (GEMS), *Atmospheric Measurement Techniques*, 16, 5461-5478. <https://doi.org/10.5194/amt-16-5461-2023>
- Baek, K., Kim, J.H., Herman, J.R., Haffner, D.P., Kim, J. (2017) Validation of Brewer and Pandora measurements using OMI total ozone, *Atmospheric Environment*, 160, 165-175. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.03.034>
- Baidar, S., Oetjen, H., Coburn, S., Dix, B., Ortega, I., Sinreich, R., Volkamer, R. (2013) The CU Airborne MAX-DOAS instrument: vertical profiling of aerosol extinction and trace gases, *Atmospheric Measurement Techniques*, 6, 719-739. <https://doi.org/10.5194/amt-6-719-2013>
- Bak, J., Liu, X., Kim, J.H., Chance, K., Haffner, D.P. (2015) Validation of OMI total ozone retrievals from the SAO ozone profile algorithm and three operational algorithms with Brewer measurements, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15, 667-683. <https://doi.org/10.5194/acp-15-667-2015>
- Balis, D., Kroon, M., Koukouli, M.E., Brinksma, E.J., Labow, G., Veefkind, J.P., McPeters, R.D. (2007) Validation of Ozone Monitoring Instrument total ozone column measurements using Brewer and Dobson spectrophotometer ground-based observations, *Journal of Geophysical Research*, 112, D24S46. <https://doi.org/10.1029/2007JD008796>
- Balkanski, Y., Schulz, M., Claquin, T., Guibert, S. (2007) Reevaluation of mineral aerosol radiative forcings suggests a better agreement with satellite and AERONET data, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7, 81-95. <https://doi.org/10.5194/acp-7-81-2007>
- Bojkov, R.D., Kosmidis, E., DeLuisi, J.J., Petropavlovskikh, I., Fioletov, V.E., Godin, S., Zerefos, C. (2002) Vertical ozone distribution characteristics deduced from ~44,000 re-evaluated Umkehr profiles (1957-2000). *Meteorological Atmospheric Physics*, 79, 127-158. <https://doi.org/10.1007/s007030200000>
- Brewer, A.W. (1973) A replacement for the Dobson spectrophotometer?, *Pure and Applied Geophysics*, 106(1), 919-927.
- Brion, J., Chakir, A., Charbonnier, J., Daumont, D., Parisse, C., Malicet, J. (1998) Absorption spectra measurements for the ozone molecule in the 350-830 nm region, *Journal of Atmospheric Chemistry*, 30(2), 291-299. <https://doi.org/10.1023/A:1006036924364>
- Burkholder, J.B., Talukdar, R.K. (1994) Temperature dependence of the ozone absorption spectrum over the wavelength range 410 to 760 nm, *Geophysical Research Letters*, 21(7), 581-584. <https://doi.org/10.1029/93GL02311>
- Burrows, J.P., Platt, U., Borrell, P. (2011) The remote sensing of tropospheric composition from space, Springer Science and Business Media, Germany.
- Cappellani, F., Bielli, A. (1995) Correlation between SO₂ and NO₂ measured in an atmospheric column by a Brewer spectrophotometer and at ground-level by photochemical techniques, *Environmental Monitoring and Assessment*, 35, 77-84. <https://doi.org/10.1007/BF00633707>
- Carmichael, G.R., Uno, I., Phadnis, M.J., Zhang, Y., Sunwoo, Y. (1998) Tropospheric ozone production and trans-

- port in the springtime in East Asia, *Journal of Geophysical Research*, 103(D9), 10649-10671. <https://doi.org/10.1029/97JD03740>
- Carvalho, F., Henriques, D. (2000) Use of Brewer ozone spectrophotometer for aerosol optical depth measurements on ultraviolet region, *Advances in Space Research*, 25(5), 997-1006. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(99\)00463-9](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(99)00463-9)
- Cede, A., Herman, J., Richter, A., Krotkov, N., Burrows, J. (2006) Measurements of nitrogen dioxide total column amounts using a Brewer double spectrophotometer in direct Sun mode, *Journal of Geophysical Research*, 111, D05304. <https://doi.org/10.1029/2005JD006585>
- Chakrabarty, D.K., Peshin, S.K. (2011) Seasonal and diurnal behavior of NO₂ column density in Antarctica as observed by Mark IV, Brewer Ozone Spectrophotometer Number 153, *Advances in Space Research*, 47(1), 86-93. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.08.034>
- Chang, L.-S., Ahn, S., Shin, S.-A., Hong, H., Kim, D. (2024) SIAQ/ASIA-AQ Campaign Progress and Future Plan, *Proceedings of the Korea Air Pollution Research Association Conference*, 135-135.
- Che, H., Zhang, X., Chen, H., Damiri, B., Goloub, P., Li, Z., Zhang, X., Wei, Y., Zhou, H., Dong, F., Li, D., Zhou, T. (2009) Instrument calibration and aerosol optical depth validation of the China Aerosol Remote Sensing Network, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114, D03206. <https://doi.org/10.1029/2008JD011030>
- Che, H., Zhang, X.-Y., Xia, X., Goloub, P., Holben, B., Zhao, H., Wang, Y., Zhang, X.-C., Wang, H., Blarel, L., Damiri, B., Zhang, R., Deng, X., Ma, Y., Wang, T., Geng, F., Qi, B., Zhu, J., Yu, J., Chen, Q., Shi, G. (2015) Ground-based aerosol climatology of China: aerosol optical depths from the China Aerosol Remote Sensing Network (CARSNET) 2002-2013, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15, 7619-7652. <https://doi.org/10.5194/acp-15-7619-2015>
- Cheng, X., Ma, J., Jin, J., Guo, J., Liu, Y., Peng, J., Ma, X., Qian, M., Xia, Q., Yan, P. (2020) Retrieving tropospheric NO₂ vertical column densities around the city of Beijing and estimating NO_x emissions based on car MAX-DOAS measurements, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20, 10757-10774. <https://doi.org/10.5194/acp-20-10757-2020>
- Chipperfield, M.P., Bekki, S., Dhomse, S., Harris, N.R.P., Hassler, B., Hossaini, R., Steinbrecht, W., Thiéblemont, R., Weber, M. (2017) Detecting recovery of the stratospheric ozone layer, *Nature*, 549, 211-218. <https://doi.org/10.1038/nature23681>
- Cho, H.-K., Kim, J., Chung, S.R. (1996) Stratospheric ozone observations in Korea, *International Union of Geodesy and Geophysics Korean Journal of Geophysical Research*, 24(1), 19-27.
- Cho, H.-K., Lee, S.M., Choi, C.Y. (1989) The seasonal variations of total amounts of ozone at Seoul, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 25, 21-29.
- Cho, H.-K., Kim, J., Oh, S.N., Kim, S.-K., Baek, S.-K., Lee, Y.G. (2003) A climatology of stratospheric ozone over Korea, *Korean Journal of the Atmospheric Sciences*, 6(2), 97-112.
- Choi, H.J., Roh, Y.M., Lim, Y.W., Lee, Y.J., Kim, K.Y. (2022) Land-Use Regression Modeling to Estimate NO₂ and VOC Concentrations in Pohang City, South Korea, *Atmosphere*, 13(4), 577. <https://doi.org/10.3390/atmos13040577>
- Choi, Y., Kanaya, Y., Takashima, H., Irie, H., Park, K., Chong, J. (2021) Long-term variation in the tropospheric nitrogen dioxide vertical column density over Korea and Japan from the MAX-DOAS network, 2007-2017, *Remote Sensing*, 13, 1937. <https://doi.org/10.3390/rs13101937>
- Chong, J., Kim, Y.J., Gu, M., Wagner, T., Song, C.H. (2016) Mobile MAX-DOAS observation of NO₂ and comparison with OMI satellite data in the western coastal areas of the Korean peninsula, *Chemosphere*, 143, 10-16. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.06.071>
- Curran, P.J., Williamson, H.D. (1985) The accuracy of ground data used in remote-sensing investigations, *International Journal of Remote Sensing*, 6(10), 1637-1651. <https://doi.org/10.1080/01431168508948311>
- Davis, S.M., Rosenlof, K.H., Hassler, B., Hurst, D.F., Read, W.G., Vömel, H., Selkirk, H., Fujiwara, M., Damadeo, R. (2016) The Stratospheric Water and Ozone Satellite Homogenized (SWOOSH) database: A long-term database for climate studies, *Earth System Science Data*, 8, 461-490. <https://doi.org/10.5194/essd-8-461-2016>
- De Smedt, I., Pinardi, G., Vigouroux, C., Compennolle, S., Bais, A., Benavent, N., Boersma, F., Chan, K.-L., Donner, S., Eichmann, K.-U., Hedelt, P., Hendrick, F., Irie, H., Kumar, V., Lambert, J.-C., Langerock, B., Lerot, C., Liu, C., Loyola, D., PETERS, A., Richter, A., Rivera Cárdenas, C., Romahn, F., Ryan, R.G., Sinha, V., Theys, N., Vlietinck, J., Wagner, T., Wang, T., Yu, H., Van Roozendael, M. (2021) Comparative assessment of TROPOMI and OMI formaldehyde observations and validation against MAX-DOAS network column measurements, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21, 12561-

12593. <https://doi.org/10.5194/acp-21-12561-2021>
- DeLuisi, J.J. (1979) Shortened version of the Umkehr method for observing the vertical distribution of ozone, *Applied Optics*, 18, 3190-3197. <https://doi.org/10.1364/AO.18.003190>
- Demirhan, D., Kahya, C., Topcu, S., Incecik, S. (2005) Total ozone variation in south eastern Europe, *International Journal of Remote Sensing*, 26(16), 3479-3486. <https://doi.org/10.1080/01431160500076558>
- Di Bernardino, A., Mevi, G., Iannarelli, A.M., Falasca, S., Cede, A., Tiefengraber, M., Casadio, S. (2023) Temporal variation of NO₂ and O₃ in Rome (Italy) from Pandora and in situ measurements, *Atmosphere*, 14, 594. <https://doi.org/10.3390/atmos14030594>
- Diémoz, H., Siani, A.M., Redondas, A., Savastiouk, V., McElroy, C.T., Navarro-Comas, M., Hase, F. (2014) Improved retrieval of nitrogen dioxide (NO₂) column densities by means of MKIV Brewer spectrophotometers, *Atmospheric Measurement Techniques*, 7, 4009-4022. <https://doi.org/10.5194/amt-7-4009-2014>
- Dimitropoulou, E., Hendrick, F., Friedrich, M.M., Tack, F., Pinardi, G., Merlaud, A., Fayt, C., Hermans, C., Fierens, F., Van Roozendael, M. (2022) Horizontal distribution of tropospheric NO₂ and aerosols derived by dual-scan multi-wavelength multi-axis differential optical absorption spectroscopy (MAX-DOAS) measurements in Uccle, Belgium, *Atmospheric Measurement Techniques*, 15, 4503-4529. <https://doi.org/10.5194/amt-15-4503-2022>
- Dong, X., Chen, B., Yamazaki, A., Shi, G., Tang, N. (2023) Variations in aerosol optical characteristics from SKYNET measurements in Beijing, *Atmospheric Environment*, 302, 119747. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119747>
- Donner, S., Kuhn, J., Van Roozendael, M., Bais, A., Beirle, S., Bösch, T., Bogner, K., Bruchkouski, I., Chan, K.L., Dörner, S., Drosoglou, T., Fayt, C., Frieß, U., Hendrick, F., Hermans, C., Jin, J., Li, A., Ma, J., Peters, E., Pinardi, G., Richter, A., Schreier, S.F., Seyler, A., Strong, K., Tirpitz, J.-L., Wang, Y., Xie, P., Xu, J., Zhao, X., Wagner, T. (2020) Evaluating different methods for elevation calibration of MAX-DOAS (Multi AXis Differential Optical Absorption Spectroscopy) instruments during the CINDI-2 campaign, *Atmospheric Measurement Techniques*, 13, 685-712. <https://doi.org/10.5194/amt-13-685-2020>
- Egli, L., Gröbner, J., Hülsen, G., Schill, H., Stübi, R. (2022) Traceable total ozone column retrievals from direct solar spectral irradiance measurements in the ultraviolet, *Atmospheric Measurement Techniques*, 15, 1917-1930. <https://doi.org/10.5194/amt-15-1917-2022>
- Emery, W., Camps, A. (2017) Cryosphere applications, in *Introduction to satellite remote sensing*, Elsevier, Netherlands, 767-796.
- European Space Agency (ESA) (2017) Sentinel-5 Precursor Calibration and Validation Plan for the Operational Phase, 26pp.
- Fioletov, V.E., Bodeker, G.E., Miller, A.J., McPeters, R.D., Stolarski, R. (2002) Global and zonal total ozone variations estimated from ground-based and satellite measurements: 1964-2000, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(D22), 4647. <https://doi.org/10.1029/2001JD001350>
- Frieß, U., Klein Baltink, H., Beirle, S., Clémer, K., Hendrick, F., Henzing, B., Irie, H., de Leeuw, G., Li, A., Moerman, M.M., van Roozendael, M., Shaiganfar, R., Wagner, T., Wang, Y., Xie, P., Yilmaz, S., Zieger, P. (2016) Intercomparison of aerosol extinction profiles retrieved from MAX-DOAS measurements, *Atmospheric Measurement Techniques*, 9, 3205-3222. <https://doi.org/10.5194/amt-9-3205-2016>
- Garane, K., Koukouli, M.-E., Verhoelst, T., Lerot, C., Heue, K.-P., Fioletov, V., Balis, D., Bais, A., Bazureau, A., Dehn, A., Goutail, F., Granville, J., Griffin, D., Hubert, D., Keppens, A., Lambert, J.-C., Loyola, D., McLinden, C., Pazmino, A., Pommereau, J.-P., Redondas, A., Romahn, F., Valks, P., Van Roozendael, M., Xu, J., Zehner, C., Zerefos, C., Zimmer, W. (2019) TROPOMI/S5P total ozone column data: global ground-based validation and consistency with other satellite missions, *Atmospheric Measurement Techniques*, 12, 5263-5287. <https://doi.org/10.5194/amt-12-5263-2019>
- García, O.E., Díaz, J.P., Expósito, F.J., Díaz, A.M., Dubovik, O., Derimian, Y., Dubuisson, P., Roger, J.-C. (2012) Short-wave radiative forcing and efficiency of key aerosol types using AERONET data, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12, 5129-5145. <https://doi.org/10.5194/acp-12-5129-2012>
- Godin-Beekmann, S.M., Song, T., Heese, B. (2003) Long-term DIAL monitoring of the stratospheric ozone vertical distribution, *Proc. SPIE 4893, Lidar Remote Sensing for Industry and Environment Monitoring III*, March 21. <https://doi.org/10.1117/12.466698>
- Godin-Beekmann, S., Azouz, N., Sofieva, V.F., Hubert, D., Petropavlovskikh, I., Effertz, P., Ancellet, G., Degenstein, D.A., Zawada, D., Froidevaux, L., Frith, S., Wild, J., Davis, S., Steinbrecht, W., Leblanc, T., Querel, R., Tourpali, K., Damadeo, R., Maillard Barras, E., Stübi, R., Vigouroux, C., Arosio, C., Nedoluha, G., Boyd, I., Van

- Malderen, R., Mahieu, E., Smale, D., Sussmann, R. (2022) Updated trends of the stratospheric ozone vertical distribution in the 60°S-60°N latitude range based on the LOTUS regression model, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22, 11657-11673. <https://doi.org/10.5194/acp-22-11657-2022>
- Gratien, A., Picquet-Varrault, B., Orphal, J., Doussin, J.-F., Flaud, J.-M. (2010) New laboratory intercomparison of the ozone absorption coefficients in the mid-infrared (10 μm) and ultraviolet (300-350 nm) spectral regions, *The Journal of Physical Chemistry A*, 114(37), 10045-10048. <https://doi.org/10.1021/jp103992f>
- Gröbner, J., Meleti, C. (2004) Aerosol optical depth in the UVB and visible wavelength range from Brewer spectrophotometer direct irradiance measurements: 1991-2002, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109, D09202. <https://doi.org/10.1029/2003JD004409>
- Großmann, K., Friß, U., Peters, E., Wittrock, F., Lampel, J., Yilmaz, S., Tschritter, J., Sommariva, R., von Glasow, R., Quack, B., Krüger, K., Pfeilsticker, K., Platt, U. (2013) Iodine monoxide in the Western Pacific marine boundary layer, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 3363-3378. <https://doi.org/10.5194/acp-13-3363-2013>
- Gruzdev, A.N., Elokhov, A. (2021) Long-term trends and interannual variations of the NO₂ contents in the troposphere and stratosphere of the western Moscow region according to results of remote spectrometric measurements of the vertical NO₂ profile. *Proc. SPIE 11916, 27th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics*, 1191627. <https://doi.org/10.1117/12.2601812>
- Gruzdev, A.N., Elokhov, A.S. (2022) Three decades of remote sensing of NO₂ vertical distribution and column content at the AM Obukhov Institute of Atmospheric Physics, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1040(1), 012027. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1040/1/012027>
- Ha, E.S., Park, R.J., Kwon, H.-A., Lee, G.T., Lee, S.D., Shin, S., Lee, D.-W., Hong, H., Lerot, C., De Smedt, I., Danckaert, T., Hendrick, F., Irie, H. (2024) First evaluation of the GEMS glyoxal products against TROPOMI and ground-based measurements, *Atmospheric Measurement Techniques*, 17, 6369-6384. <https://doi.org/10.5194/amt-17-6369-2024>
- Han, H., Liu, J., Yuan, H., Wang, T., Zhuang, B., Zhang, X. (2019) Foreign influences on tropospheric ozone over East Asia through global atmospheric transport, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19, 12495-12514. <https://doi.org/10.5194/acp-19-12495-2019>
- Han, Z., Montague, D.C., Snider, J.R. (2003) Airborne measurements of aerosol extinction in the lower and middle troposphere over Wyoming, USA, *Atmospheric Environment*, 37(6), 789-802. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00952-4](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00952-4)
- Harris, J.M., Oltmans, S.J., Bodeker, G.E., Stolarski, R., Evans, R.D., Quincy, D.M. (2003) Long-term variations in total ozone derived from Dobson and satellite data, *Atmospheric Environment*, 37(23), 3167-3175. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(03\)00347-9](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(03)00347-9)
- Herman, J., Abuhassan, N., Kim, J., Kim, J., Dubey, M., Raponi, M., Tzortziou, M. (2019) Underestimation of column NO₂ amounts from the OMI satellite compared to diurnally varying ground-based retrievals from multiple PANDORA spectrometer instruments, *Atmospheric Measurement Techniques*, 12, 5593-5612. <https://doi.org/10.5194/amt-12-5593-2019>
- Herman, J., Cede, A., Spinei, E., Mount, G., Tzortziou, M., Abuhassan, N. (2009) NO₂ column amounts from ground-based Pandora and MFDOAS spectrometers using the direct-sun DOAS technique: intercomparisons and application to OMI validation, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D13). <https://doi.org/10.1029/2009JD011848>
- Hewson, W., Barkley, M.P., Gonzalez Abad, G., Bösch, H., Kurosu, T., Spurr, R., Tilstra, L.G. (2015) Development and characterisation of a state-of-the-art GOME-2 formaldehyde air-mass factor algorithm, *Atmospheric Measurement Techniques*, 8, 4055-4074. <https://doi.org/10.5194/amt-8-4055-2015>
- Holben, B.N., Eck, T., Schafer, J., Giles, D., Sorokin, M. (2011) Distributed Regional Aerosol Gridded Observation Networks (DRAGON) White Paper.
- Holben, B.N., Eck, T.F., Slutsker, I., Tanré, D., Buis, J.P., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J.A., Kaufman, Y.J., Nakajima, T., Lavenue, F., Jankowiak, I., Smirnov, A. (1998) AERONET—A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization, *Remote Sensing of Environment*, 66, 1, 1-16.
- Holben, B.N., Kim, J., Sano, I., Mukai, S., Eck, T.F., Giles, D.M., Schafer, J.S., Sinyuk, A., Slutsker, I., Smirnov, A., Sorokin, M., Anderson, B.E., Che, H., Choi, M., Crawford, J.H., Ferrare, R.A., Garay, M.J., Jeong, U., Kim, M., Kim, W., Knox, N., Li, Z., Lim, H.S., Liu, Y., Maring, H., Nakata, M., Pickering, K.E., Piketh, S., Redemann, J., Reid, J.S., Salinas, S., Seo, S., Tan, F., Tripathi, S.N., Toon, O.B., Xiao, Q. (2018) An overview of mesoscale aerosol processes, comparisons, and validation studies from DRAGON networks, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18,

- 655-671. <https://doi.org/10.5194/acp-18-655-2018>
- Hönninger, G., von Friedeburg, C., Platt, U. (2004) Multi axis differential optical absorption spectroscopy (MAX-DOAS), *Atmospheric Chemistry and Physics*, 4, 231-254. <https://doi.org/10.5194/acp-4-231-2004>
- Ibrahim, O., Shaiganfar, R., Sinreich, R., Stein, T., Platt, U., Wagner, T. (2010) Car MAX-DOAS measurements around entire cities: quantification of NO_x emissions from the cities of Mannheim and Ludwigshafen (Germany), *Atmospheric Measurement Techniques*, 3, 709-721. <https://doi.org/10.5194/amt-3-709-2010>
- Jeong, U., Tsay, S.-C., Giles, D.M., Holben, B.N., Swap, R.J., Abuhassan, N., Herman, J.R. (2020) The SMART-s trace gas and aerosol inversions: I. Algorithm theoretical basis for column property retrievals, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125. <https://doi.org/10.1029/2019JD032088>
- Jeong, U., Tsay, S.-C., Hsu, N.C., Giles, D.M., Cooper, J.W., Lee, J., Swap, R.J., Holben, B.N., Butler, J.J., Wang, S.-H., Chantara, S., Hong, H., Kim, D., Kim, J. (2022) Simultaneous retrievals of biomass burning aerosols and trace gases from the ultraviolet to near-infrared over northern Thailand during the 2019 pre-monsoon season, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22, 11957-11986. <https://doi.org/10.5194/acp-22-11957-2022>
- Ji, X., Liu, C., Wang, Y., Hu, Q., Lin, H., Zhao, F., Xing, C., Tang, G., Zhang, J., Wagner, T. (2023) Ozone profiles without blind area retrieved from MAX-DOAS measurements and comprehensive validation with multi-platform observations, *Remote Sensing of Environment*, 284, 113339.
- Jing, D., He, Y., Yin, Z., Liu, F., Yi, F. (2024) Long-term characteristics of dust aerosols over central China from 2010 to 2020 observed with polarization lidar, *Atmospheric Research*, 297, 107129. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.107129>
- Judd, L.M., Al-Saadi, J.A., Szykman, J.J., Valin, L.C., Janz, S.J., Kowalewski, M.G., Eskes, H.J., Veefkind, J.P., Cede, A., Mueller, M., Gebetsberger, M., Swap, R., Pierce, R.B., Nowlan, C.R., Abad, G.G., Nehrir, A., Williams, D. (2020) Evaluating Sentinel-5P TROPOMI tropospheric NO₂ column densities with airborne and Pandora spectrometers near New York City and Long Island Sound, *Atmospheric Measurement Techniques*, 13, 6113-6140. <https://doi.org/10.5194/amt-13-6113-2020>
- Kerr, J.B. (2010) *The Brewer Spectrophotometer. UV Radiation in Global Climate Change: Measurements: Modeling and Effects on Ecosystems*, Springer, Germany, 160-191.
- Khatri, P., Takamura, T. (2009) An algorithm to screen cloud-affected data for sky radiometer data analysis, *Journal of the Meteorological Society of Japan. Series II*, 87(1), 189-204. <https://doi.org/10.2151/jmsj.87.189>
- Kiesewetter, G., Sinnhuber, B.-M., Vountas, M., Weber, M., Burrows, J.P. (2010) A long-term stratospheric ozone data set from assimilation of satellite observations: High-latitude ozone anomalies, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115, D10307. <https://doi.org/10.1029/2009JD013362>
- Kim, B.Y., Lee, K.T., Jee, J.B., Zo, I.S. (2018) Retrieval of outgoing longwave radiation at top-of-atmosphere using Himawari-8 AH1 data, *Remote Sensing of Environment*, 204, 498-508. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.10.006>
- Kim, C., Kim, J., Park, J.-H., Koo, J.-H., Kwak, K.-H., Boynard, A., Pan, L.L., Clerbaux, C., Hurtmans, D., Coheur, P.-F., Park, S.S. (2025) Springtime UTLS ozone variability in East Asia: Insights from 16 years of IASI observations (2008-2023). Authorea Preprints.
- Kim, J., Cho, H.K., Lee, Y.G., Oh, S.N., Baek, S.K. (2005) Updated trends of stratospheric ozone over Seoul. *Atmosphere*, 15(2), 101-118.
- Kim, J., Kim, J., Cho, H.-K., Herman, J., Park, S.S., Lim, H.K., Kim, J.-H., Miyagawa, K., Lee, Y.G. (2017) Intercomparison of total column ozone data from the Pandora spectrophotometer with Dobson, Brewer, and OMI measurements over Seoul, Korea, *Atmospheric Measurement Techniques*, 10, 3661-3676. <https://doi.org/10.5194/amt-10-3661-2017>
- Kim, J., Park, S.S., Moon, K.J., Koo, J.H., Lee, Y.G., Miyagawa, K., Cho, H.K. (2007a) Automation of Dobson spectrophotometer (No. 124) for ozone measurements, *Korean Meteorological Society: Atmosphere*, 17(4), 339-348.
- Kim, S.W., Yoon, S.C., Kim, J., Kang, J.Y., Sugimoto, N. (2010) Asian dust event observed in Seoul, Korea, during 29-31 May 2008: Analysis of transport and vertical distribution of dust particles from lidar and surface measurements, *Science of the Total Environment*, 408(7), 1707-1718. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.12.018>
- Kim, S., Kim, D., Hong, H., Chang, L.-S., Lee, H., Kim, D.-R., Kim, D., Yu, J.-A., Lee, D., Jeong, U., Song, C.-K., Kim, S.-W., Park, S.S., Kim, J., Hanisco, T.F., Park, J., Choi, W., Lee, K. (2023) First-time comparison between NO₂ vertical columns from Geostationary Environmental Monitoring Spectrometer (GEMS) and Pandora measurements, *Atmospheric Measurement Techniques*, 16, 3959-3972.

- <https://doi.org/10.5194/amt-16-3959-2023>
- Kim, S., Yu, H., Yoon, J., Park, E. (2024) Micro-Local Fine Dust Prediction Utilizing Machine Learning and Deep Learning Models, *Computer Systems Science and Engineering*, 48(2), 413-429. <https://doi.org/10.32604/csse.2023.041575>
- Kim, S.-W., Yoon, S.-C., Kim, J., Kim, S.-Y. (2007b) Seasonal and monthly variations of columnar aerosol optical properties over East Asia determined from multi-year MODIS, LIDAR, and AERONET Sun/sky radiometer measurements, *Atmospheric Environment*, 41(8), 1634-1651. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.10.044>
- Komhyr, W.D., Grass, R.D., Leonard, R.K. (1989) Dobson spectrophotometer 83: A standard for total ozone measurements, 1962-1987, *Journal of Geophysical Research*, 94(D7), 9847-9861. <https://doi.org/10.1029/JD094iD07p09847>
- Koo, J.H., Kim, J., Lee, Y.G., Park, S.S., Lee, S., Chong, H., Cho, Y., Kim, J., Choi, K., Lee, T. (2020) The implication of the air quality pattern in South Korea after the COVID-19 outbreak, *Scientific Reports*, 10, 22462. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80429-4>
- Kreher, K., Van Roozendaal, M., Hendrick, F., Apituley, A., Dimitropoulou, E., Frieß, U., Richter, A., Wagner, T., Lampel, J., Abuhassan, N., Ang, L., Anguas, M., Bais, A., Benavent, N., Bösch, T., Bogner, K., Borovski, A., Bruchkouski, I., Cede, A., Chan, K.L., Donner, S., Drosoglou, T., Fayt, C., Finkenzeller, H., Garcia-Nieto, D., Gielen, C., Gómez-Martín, L., Hao, N., Henzing, B., Herman, J.R., Hermans, C., Hoque, S., Irie, H., Jin, J., Johnston, P., Khayyam Butt, J., Khokhar, F., Koenig, T.K., Kuhn, J., Kumar, V., Liu, C., Ma, J., Merlaud, A., Mishra, A.K., Müller, M., Navarro-Comas, M., Ostendorf, M., Pazmino, A., Peters, E., Pinardi, G., Pinharanda, M., Pitters, A., Platt, U., Postlyakov, O., Prados-Roman, C., Puentedura, O., Querel, R., Saiz-Lopez, A., Schönhardt, A., Schreier, S.F., Seyler, A., Sinha, V., Spinei, E., Strong, K., Tack, F., Tian, X., Tiefengraber, M., Tirpitz, J.-L., van Gent, J., Volkamer, R., Vrekoussis, M., Wang, S., Wang, X., Wenig, M., Wittrock, F., Xie, P.H., Xu, J., Yela, M., Zhang, C., Zhao, X. (2020) Intercomparison of NO₂, O₄, O₃ and HCHO slant column measurements by MAX-DOAS and zenith-sky UV-visible spectrometers during CINDI-2, *Atmospheric Measurement Techniques*, 13, 2169-2208. <https://doi.org/10.5194/amt-13-2169-2020>
- Kroon, M., De Haan, J.F., Veeffkind, J.P., Froidevaux, L., Wang, R., Kivi, R., Hakkarainen, J.J. (2011) Validation of operational ozone profiles from the Ozone Monitoring Instrument, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D18). <https://doi.org/10.1029/2010JD015100>
- Kudo, R., Diémoz, H., Estellés, V., Campanelli, M., Momoi, M., Marengo, F., Ryder, C.L., Ijima, O., Uchiyama, A., Nakashima, K., Yamazaki, A., Nagasawa, R., Ohkawara, N., Ishida, H. (2021) Optimal use of the Prede POM sky radiometer for aerosol, water vapor, and ozone retrievals, *Atmospheric Measurement Techniques*, 14, 3395-3426. <https://doi.org/10.5194/amt-14-3395-2021>
- Kwon, H.-A., Park, R.J., Jeong, J.I., Lee, S., González Abad, G., Kurosu, T.P., Palmer, P.I., Chance, K. (2017) Sensitivity of formaldehyde (HCHO) column measurements from a geostationary satellite to temporal variation of the air mass factor in East Asia, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 4673-4686. <https://doi.org/10.5194/acp-17-4673-2017>
- Lamsal, L.N., Krotkov, N.A., Celarier, E.A., Swartz, W.H., Pickering, K.E., Bucsela, E.J., Gleason, J.F., Martin, R.V., Philip, S., Irie, H., Cede, A., Herman, J., Weinheimer, A., Szykman, J.J., Knepp, T.N. (2014) Evaluation of OMI operational standard NO₂ column retrievals using in situ and surface-based NO₂ observations, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 11587-11609. <https://doi.org/10.5194/acp-14-11587-2014>
- Lange, K., Richter, A., Bösch, T., Zilker, B., Latsch, M., Behrens, L.K., Okafor, C.M., Bösch, H., Burrows, J.P., Merlaud, A., Pinardi, G., Fayt, C., Friedrich, M.M., Dimitropoulou, E., Van Roozendaal, M., Ziegler, S., Ripperger-Lukosiuni-aite, S., Kuhn, L., Lauster, B., Wagner, T., Hong, H., Kim, D., Chang, L.-S., Bae, K., Song, C.-K., Park, J.-U., Lee, H. (2024) Validation of GEMS tropospheric NO₂ columns and their diurnal variation with ground-based DOAS measurements, *Atmospheric Measurement Techniques*, 17, 6315-6344. <https://doi.org/10.5194/amt-17-6315-2024>
- Lange, K., Richter, A., Schönhardt, A., Meier, A.C., Bösch, T., Seyler, A., Krause, K., Behrens, L.K., Wittrock, F., Merlaud, A., Tack, F., Fayt, C., Friedrich, M.M., Dimitropoulou, E., Van Roozendaal, M., Kumar, V., Donner, S., Dörner, S., Lauster, B., Razi, M., Borger, C., Uhlmannsiek, K., Wagner, T., Ruhtz, T., Eskes, H., Bohn, B., Santana Diaz, D., Abuhassan, N., Schüttemeyer, D., Burrows, J.P. (2023) Validation of Sentinel-5P TROPOMI tropospheric NO₂ products by comparison with NO₂ measurements from airborne imaging DOAS, ground-based stationary DOAS, and mobile car DOAS measurements dur-

- ing the S5P-VAL-DE-Ruhr campaign, *Atmospheric Measurement Techniques*, 16, 1357-1389. <https://doi.org/10.5194/amt-16-1357-2023>
- Lee, G.T., Park, R.J., Kwon, H.-A., Ha, E.S., Lee, S.D., Shin, S., Ahn, M.-H., Kang, M., Choi, Y.-S., Kim, G., Lee, D.-W., Kim, D.-R., Hong, H., Langerock, B., Vigouroux, C., Lerot, C., Hendrick, F., Pinardi, G., De Smedt, I., Van Roozendaal, M., Wang, P., Chong, H., Cho, Y., Kim, J. (2024) First evaluation of the GEMS formaldehyde product against TROPOMI and ground-based column measurements during the in-orbit test period, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24, 4733-4749. <https://doi.org/10.5194/acp-24-4733-2024>
- Lee, H., Irie, H., Gu, M., Kim, J., Hwang, J. (2011) Remote sensing of tropospheric aerosol using UV MAX-DOAS during hazy conditions in winter: Utilization of O₄ absorption bands at wavelength intervals of 338-368 and 367-393 nm, *Atmospheric Environment*, 45(32), 5760-5769. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.07.019>
- Lee, H., Kim, Y.J., Jung, J., Lee, C., Heue, K.P., Platt, U., Hu, M., Zhu, T. (2009) Spatial and temporal variations in NO₂ distributions over Beijing, China measured by imaging differential optical absorption spectroscopy, *Journal of Environmental Management*, 90(5), 1814-1823. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.11.025>
- Lee, H., Ryu, J., Irie, H., Jang, S.-H., Park, J., Choi, W., Hong, H. (2015) Investigations of the diurnal variation of vertical HCHO profiles based on MAX-DOAS measurements in Beijing: Comparisons with OMI vertical column data, *Atmosphere*, 6(11), 1816-1832. <https://doi.org/10.3390/atmos6111816>
- Li, Y., Xing, C., Peng, H., Song, Y., Zhang, C., Xue, J., Niu, X., Liu, C. (2023) Long-term observations of NO₂ using GEMS in China: Validations and regional transport, *Science of The Total Environment*, 904, 166762. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166762>
- Li, Z.Q., Xu, H., Li, K.T., Li, D.H., Xie, Y.S., Li, L., Zhang, Y., Gu, X.F., Zhao, W., Tian, Q.J., Deng, R.R., Su, X.L., Huang, B., Qiao, Y.L., Cui, W.Y., Hu, Y., Gong, C.L., Wang, Y.Q., Wang, X.F., Wang, J.P., Du, W.B., Pan, Z.Q., Li, Z.Z., Bu, D. (2018) Comprehensive study of optical, physical, chemical, and radiative properties of total columnar atmospheric aerosols over China: An overview of Sun-Sky Radiometer Observation Network (SONET) measurements, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99, 739-755. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0133.1>
- Liley, J.B., Forgan, B.W. (2009) Aerosol optical depth over Lauder, New Zealand, *Geophysical Research Letters*, 36, L07811. <https://doi.org/10.1029/2008GL037141>
- Liu, X., Chance, K., Sioris, C.E., Spurr, R.J.D., Kurosu, T.P., Martin, R.V., Newchurch, M.J. (2005) Ozone profile and tropospheric ozone retrievals from the Global Ozone Monitoring Experiment: Algorithm description and validation, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D20). <https://doi.org/10.1029/2005JD006240>
- Marenco, F., di Sarra, A., De Luisi, J. (2002) Methodology for determining aerosol optical depth from Brewer 300-320-nm ozone measurements, *Applied Optics*, 41(9), 1805-1814. <https://doi.org/10.1364/AO.41.001805>
- Martin, R.V. (2008) Satellite remote sensing of surface air quality, *Atmospheric Environment*, 42(34), 7823-7843. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.018>
- McPeters, R.D., Frith, S., Labow, G.J. (2015) OMI total column ozone: Extending the long-term data record, *Atmospheric Measurement Techniques*, 8, 4845-4850. <https://doi.org/10.5194/amt-8-4845-2015>
- McPeters, R., Kroon, M., Labow, G., Brinksma, E., Balis, D., Petropavlovskikh, I., Veefkind, J.P., Bhartia, P.K., Levelt, P.F. (2008) Validation of the Aura Ozone Monitoring Instrument total column ozone product, *Journal of Geophysical Research*, 113, D15S14. <https://doi.org/10.1029/2007JD008802>
- Nagashima, T., Ohara, T., Sudo, K., Akimoto, H. (2010) The relative importance of various source regions on East Asian surface ozone, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 11305-11322. <https://doi.org/10.5194/acp-10-11305-2010>
- Nakajima, T., Campanelli, M., Che, H., Estellés, V., Irie, H., Kim, S.-W., Kim, J., Liu, D., Nishizawa, T., Pandithurai, G., Soni, V.K., Thana, B., Tugjurn, N.-U., Aoki, K., Go, S., Hashimoto, M., Higurashi, A., Kazadzis, S., Khatri, P., Kouremeti, N., Kudo, R., Marenco, F., Momoi, M., Ningombam, S.S., Ryder, C.L., Uchiyama, A., Yamazaki, A. (2020) An overview of and issues with sky radiometer technology and SKYNET, *Atmospheric Measurement Techniques*, 13, 4195-4218. <https://doi.org/10.5194/amt-13-4195-2020>
- Newchurch, M.J., Yang, E.-S., Cunnold, D.M., Reinsel, G.C., Zawodny, J.M., Russell, J.M. III (2003) Evidence for slowdown in stratospheric ozone loss: First stage of ozone recovery, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D16), 4507. <https://doi.org/10.1029/2003JD003471>
- Newman, P.A., Oman, L.D., Douglass, A.R., Fleming, E.L., Frith, S.M., Hurwitz, M.M., Kawa, S.R., Jackman, C.H., Krotkov, N.A., Nash, E.R., Nielsen, J.E., Pawson, S., Stolarski,

- R.S., Velders, G.J.M. (2009) What would have happened to the ozone layer if chlorofluorocarbons (CFCs) had not been regulated?, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 2113-2128. <https://doi.org/10.5194/acp-9-2113-2009>
- Ningombam, S.S., Bagare, S.P., Singh, R.B., Campanelli, M., Khatri, P., Dorjey, N. (2014) Calibration of a Sky radiometer (Prede) using observations obtained from Hanle and Merak high-altitude stations in Ladakh, *Atmospheric Research*, 143, 118-128. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.02.009>
- Ningombam, S.S., Larson, E.J.L., Dumka, U.C., Estellés, V., Campanelli, M., Steve, C. (2019) Long-term (1995-2018) aerosol optical depth derived using ground-based AERONET and SKYNET measurements from aerosol aged-background sites, *Atmospheric Pollution Research*, 10(2), 608-620. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.10.008>
- Noh, Y.M., Müller, D., Lee, H., Lee, K., Kim, K., Shin, S., Kim, Y.J. (2012) Estimation of radiative forcing by the dust and non-dust content in mixed East Asian pollution plumes on the basis of depolarization ratios measured with lidar, *Atmospheric Environment*, 61, 221-231. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.07.034>
- Park, D.H., Kim, S.W., Kim, M.H., Yeo, H., Park, S.S., Nishizawa, T., Shimizu, A., Kim, C.H. (2021) Impacts of local versus long-range transported aerosols on PM₁₀ concentrations in Seoul, Korea: An estimate based on 11-year PM₁₀ and lidar observations, *Science of The Total Environment*, 750, 141739. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141739>
- Park, G., Park, J., Lee, H. (2023a) Investigation of Absorption Cross-Section Effects on the Formaldehyde Column Density Retrieval from Direct Sun Measurement, *Korean Journal of Remote Sensing*, 39(5), 551-561. <https://doi.org/10.7780/kjrs.2023.39.5.1.7>
- Park, J., Hong, H., Choi, W., Kim, D., Yang, J., Kang, H., Lee, H. (2018) Optimal Estimation (OE) technique to retrieve the ozone column and tropospheric ozone profile based on ground-based MAX-DOAS measurement, *Korean Journal of Remote Sensing*, 34(2_1), 191-201. <https://doi.org/10.7780/kjrs.2018.34.2.1.3>
- Park, M., Koo, J.H., Kim, J., Park, S.S., Lee, T., Kim, S., McConville, G., Miyagawa, K. (2024b) The Shipping Preparation of Dobson Spectrophotometer in Detail for Participation to the International Collaboration, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 40(5), 585-597. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2024.40.5.585>
- Park, S.S., Cho, H.K., Koo, J.-H., Lim, H., Lee, H., Kim, J., Lee, Y.G. (2019) Monitoring and long-term trend of total column ozone from Dobson spectrophotometer in Seoul (1985-2017), *Korean Meteorological Society: Atmosphere*, 29(1), 13-20. <https://doi.org/10.14191/Atmos.2019.29.1.013>
- Park, S.S., Kim, J., Cho, H.K., Lee, H., Lee, Y., Miyagawa, K. (2012) Sudden increase in the total ozone density due to secondary ozone peaks and its effect on total ozone trends over Korea, *Atmospheric Environment*, 47, 226-235.
- Park, S.S., Kim, J., Cho, N., Lee, Y.G., Cho, H.K. (2011) The variations of stratospheric ozone over the Korean Peninsula 1985-2009, *Korean Meteorological Society: Atmosphere*, 21(4), 349-359.
- Park, S.S., Kim, S.W., Song, C.K., Park, J.U., Bae, K.H. (2020) Spatio-temporal variability of aerosol optical depth, total ozone and NO₂ over East Asia: Strategy for the validation to the GEMS Scientific Products, *Remote Sensing*, 12(14), 2256. <https://doi.org/10.3390/rs12142256>
- Park, S., Kim, M.H., Park, J.U., Yeo, H., Holz, R.E., Kuehn, R.E., Eloranta, E.W., Omar, A.H., Park, J.S., Ahn, J., Kim, S.W. (2023b) Optical properties of boundary layer aerosols from High Spectral Resolution Lidar measurements in a polluted urban environment (Seoul, Korea), *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128, e2023JD038523. <https://doi.org/10.1029/2023JD038523>
- Park, S., Kim, M.H., Yeo, H., Shim, K., Lee, H.J., Kim, C.H., Song, C.K., Park, M.S., Shimizu, A., Nishizawa, T., Kim, S.W. (2022) Determination of mixing layer height from co-located lidar, ceilometer and wind Doppler lidar measurements: Intercomparison and implications for PM_{2.5} simulations, *Atmospheric Pollution Research*, 13(2), 101310. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.101310>
- Park, S.-Y., Lee, H.-W., Kwon, J., Yoon, S.-W., Lee, C.-M. (2024a) Proposal of a methodology for prediction of heavy metals concentration based on PM_{2.5} concentration and meteorological variables using machine learning, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 18, 7. <https://doi.org/10.1007/s44273-024-00029-w>
- Peters, E., Ostendorf, M., Bösch, T., Seyler, A., Schönhardt, A., Schreier, S.F., Henzing, J.S., Wittrock, F., Richter, A., Vrekoussis, M., Burrows, J.P. (2019) Full-azimuthal imaging-DOAS observations of NO₂ and O₄ during CINDI-2, *Atmospheric Measurement Techniques*, 12, 4171-4190. <https://doi.org/10.5194/amt-12-4171-2019>

- Petropavlovskikh, I., Miyagawa, K., McClure-Beegle, A., Johnson, B., Wild, J., Strahan, S., Wargan, K., Querel, R., Flynn, L., Beach, E., Ancellet, G., Godin-Beekmann, S. (2022) Optimized Umkehr profile algorithm for ozone trend analyses, *Atmospheric Measurement Techniques*, 15, 1849-1870. <https://doi.org/10.5194/amt-15-1849-2022>
- Pinardi, G., Van Roozendael, M., Abuhassan, N., Adams, C., Cede, A., Clémer, K., Fayt, C., Frieß, U., Gil, M., Herman, J., Hermans, C., Hendrick, F., Irie, H., Merlaud, A., Navarro Comas, M., Peters, E., Piders, A.J.M., Puentedura, O., Richter, A., Schönhardt, A., Shaiganfar, R., Spinei, E., Strong, K., Takashima, H., Vrekoussis, M., Wagner, T., Wittrock, F., Yilmaz, S. (2013) MAX-DOAS formaldehyde slant column measurements during CINDI: intercomparison and analysis improvement, *Atmospheric Measurement Techniques*, 6, 167-185. <https://doi.org/10.5194/amt-6-167-2013>
- Piders, A.J.M., Boersma, K.F., Kroon, M., Hains, J.C., Van Roozendael, M., Wittrock, F., Abuhassan, N., Adams, C., Akrami, M., Allaart, M.A.F., Apituley, A., Beirle, S., Bergwerff, J.B., Berkhout, A.J.C., Brunner, D., Cede, A., Chong, J., Clémer, K., Fayt, C., Frieß, U., Gast, L.F.L., Gil-Ojeda, M., Goutail, F., Graves, R., Griesfeller, A., Großmann, K., Hemerijckx, G., Hendrick, F., Henzing, B., Herman, J., Hermans, C., Hoexum, M., van der Hoff, G.R., Irie, H., Johnston, P.V., Kanaya, Y., Kim, Y.J., Klein Baltink, H., Kreher, K., de Leeuw, G., Leigh, R., Merlaud, A., Moerman, M.M., Monks, P.S., Mount, G.H., Navarro-Comas, M., Oetjen, H., Pazmino, A., Peters, E., Piders, A.J.M., Puentedura, O., Richter, A., Ruhtz, T., Seyler, A., Spinei, E., Strong, K., Vreugdenhil, M., Yilmaz, S., Yoon, S.C., Zhang, H. (2012) Retrieving tropospheric NO₂ and O₄ columns with MAX-DOAS, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(8), 3689-3713. <https://doi.org/10.5194/acp-12-3689-2012>
- Platt, U., Stutz, J. (2008) *Differential absorption spectroscopy: Principles and Applications*, Springer, Germany, 135-174.
- Povey, A.C., Grainger, R.G. (2015) Known and unknown unknowns: uncertainty estimation in satellite remote sensing, *Atmospheric Measurement Techniques*, 8, 4699-4718. <https://doi.org/10.5194/amt-8-4699-2015>
- Qie, L., Li, Z., Goloub, P., Li, L., Li, D., Li, K., Zhang, Y., Xu, H. (2017) Retrieval of the aerosol asymmetry factor from Sun-sky radiometer measurements: application to almucantar geometry and accuracy assessment, *Applied Optics*, 56, 9932-9940. <https://doi.org/10.1364/AO.56.009932>
- Ramanathan, V., Li, F., Ramana, M.V., Praveen, P.S., Kim, D., Corrigan, C.E., Nguyen, H., Stone, E.A., Schauer, J.J., Carmichael, G.R., Adhikary, B., Yoon, S.C. (2007) Atmospheric brown clouds: Hemispherical and regional variations in long-range transport, absorption, and radiative forcing, *Journal of Geophysical Research*, 112, D22S21. <https://doi.org/10.1029/2006JD008124>
- Rawat, P., Crawford, J.H., Travis, K.R., Judd, L.M., Demetillo, M. A.G., Valin, L.C., Szykman, J.J., Whitehill, A., Baumann, E., Hanisco, T.F. (2024) Maximizing the Use of Pandora Data for Scientific Applications, *Atmospheric Measurement Techniques Discuss*, in review. <https://doi.org/10.5194/amt-2024-114>
- Ryan, R.G., Marais, E.A., Gershenson-Smith, E., Ramsay, R., Muller, J.-P., Tirpitz, J.-L., Frieß, U. (2023) Measurement report: MAX-DOAS measurements characterise Central London ozone pollution episodes during 2022 heatwaves, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23, 7121-7139. <https://doi.org/10.5194/acp-23-7121-2023>
- Sayer, A.M., Govaerts, Y., Kolmonen, P., Lipponen, A., Luffarelli, M., Mielonen, T., Patadia, F., Popp, T., Povey, A.C., Stebel, K., Witek, M.L. (2020) A review and framework for the evaluation of pixel-level uncertainty estimates in satellite aerosol remote sensing, *Atmospheric Measurement Techniques*, 13, 373-404. <https://doi.org/10.5194/amt-13-373-2020>
- Schäfer, K., Ling, H., Münkel, C., Emeis, S. (2013) Long-term study of air urban quality together with mixing layer height, *Proc. SPIE 8890, Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XVIII; and Optics in Atmospheric Propagation and Adaptive Systems XVI*, 889009. <https://doi.org/10.1117/12.2027045>
- Schäfer, K., Schürmann, G., Jahn, C., Matusé, C., Hoffmann, H., Takacs, E., Alföldy, B., Groma, V., Kugler, S. (2007) Budapest airport air quality long-term studies by remote sensing with DOAS and FTIR with focus upon runway emissions. *Proc. SPIE 6745, Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XII*, 67451P. <https://doi.org/10.1117/12.738799>
- Schäfer, K., Wang, Y., Xin, J., Ling, H., Suppan, P. (2010) Long-term air quality study by DOAS within Beijing. *Proc. SPIE 7827, Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XV*, 78270I. <https://doi.org/10.1117/12.86511>
- Schroeder, J.R., Crawford, J.H., Fried, A., Walega, J., Weinheimer, A., Wisthaler, A., Müller, M., Mikoviny, T., Chen, G., Shook, M., Blake, D.R., Diskin, G., Estes, M., Thompson, A.M., Lefer, B.L., Long, R., Mattson, E. (2016) Formaldehyde column density measurements as a suitable pathway to estimate near-surface ozone tendencies

- from space, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121, 13,088-13,112. <https://doi.org/10.1002/2016JD025419>
- Schrope, M. (2000) Successes in fight to save ozone layer could close holes by 2050, *Nature*, 408(6813), 627.
- Schween, J.H., Hirsikko, A., Löhnert, U., Crewell, S. (2014) Mixing-layer height retrieval with ceilometer and Doppler lidar: from case studies to long-term assessment, *Atmospheric Measurement Techniques*, 7, 3685-3704. <https://doi.org/10.5194/amt-7-3685-2014>
- Sellitto, P., di Sarra, A., Siani, A.M. (2006) An improved algorithm for the determination of aerosol optical depth in the ultraviolet spectral range from Brewer spectrophotometer observations, *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 8, 849. <https://doi.org/10.1088/1464-4258/8/10/005>
- Seo, S., Kim, J., Lee, H., Jeong, U., Kim, W., Holben, B.N., Kim, S.-W., Song, C.H., Lim, J.H. (2015) Estimation of PM₁₀ concentrations over Seoul using multiple empirical models with AERONET and MODIS data collected during the DRAGON-Asia campaign, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15, 319-334. <https://doi.org/10.5194/acp-15-319-2015>
- Serdyuchenko, A., Gorshelev, V., Weber, M., Chehade, W., Burrows, J.P. (2014) High spectral resolution ozone absorption cross-sections – Part 2: Temperature dependence, *Atmospheric Measurement Techniques*, 7, 625-636. <https://doi.org/10.5194/amt-7-625-2014>
- Shaiganfar, R., Beirle, S., Denier van der Gon, H., Jonkers, S., Kuenen, J., Petetin, H., Zhang, Q., Beekmann, M., Wagner, T. (2017) Estimation of the Paris NO_x emissions from mobile MAX-DOAS observations and CHIMERE model simulations during the MEGAPOLI campaign using the closed integral method, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 7853-7890. <https://doi.org/10.5194/acp-17-7853-2017>
- Shaiganfar, R., Beirle, S., Sharma, M., Chauhan, A., Singh, R.P., Wagner, T. (2011) Estimation of NO_x emissions from Delhi using Car MAX-DOAS observations and comparison with OMI satellite data, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 10871-10887. <https://doi.org/10.5194/acp-11-10871-2011>
- Shimizu, A., Nishizawa, T., Jin, Y., Kim, S.-W., Wang, Z., Batdorj, D., Sugimoto, N. (2016) Evolution of a lidar network for tropospheric aerosol detection in East Asia, *Optical Engineering*, 56(3), 031219. <https://doi.org/10.1117/1.OE.56.3.031219>
- Shin, S.K., Lee, K.H. (2016) Trend Analysis of Wildland Fires and Their Impacts on Atmospheric Environment over East Asia, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 10, 22-31. <https://doi.org/10.5572/ajae.2016.10.1.022>
- Shin, S., Noh, Y.M., Lee, K., Lee, H., Müller, D., Kim, Y.J., Kim, K., Shin, D. (2014) Retrieval of the single scattering albedo of Asian dust mixed with pollutants using lidar observations, *Advances in Atmospheric Sciences*, 31, 1417-1426. <https://doi.org/10.1007/s00376-014-3244-y>
- Shin, S., Shin, D., Lee, K., Noh, Y. (2012) Classification of dust/non-dust particles from the Asian dust plumes and retrieval of microphysical properties using Raman Lidar System, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 28(6), 688-696. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2012.28.6.688>
- Singh, A., Chou, C.-K., Chang, S.-Y., Chang, S.-C., Lin, N.-H., Chuang, M.-T., Pani, S.K., Chi, K.H., Huang, C.-H., Lee, C.-T. (2020) Long-term (2003-2018) trends in aerosol chemical components at a high-altitude background station in the western North Pacific: Impact of long-range transport from continental Asia, *Environmental Pollution*, 265(Part B), 114813. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114813>
- Sinyuk, A., Holben, B.N., Eck, T.F., Giles, D.M., Slutsker, I., Korkin, S., Schafer, J.S., Smirnov, A., Sorokin, M., Lyapustin, A. (2020) The AERONET Version 3 aerosol retrieval algorithm, associated uncertainties and comparisons to Version 2, *Atmospheric Measurement Techniques*, 13, 3375-3411. <https://doi.org/10.5194/amt-13-3375-2020>
- Son, S., Kim, J. (2020) Evaluation and predicting PM₁₀ concentration using multiple linear regression and machine learning, *Korean Journal of Remote Sensing*, 36(6_3), 1711-1720. <https://doi.org/10.7780/kjrs.2020.36.6.3.7>
- Spinei, E., Whitehill, A., Fried, A., Tiefengraber, M., Knepp, T.N., Herndon, S., Herman, J.R., Müller, M., Abuhassan, N., Cede, A., Richter, D., Walega, J., Crawford, J., Szykman, J., Valin, L., Williams, D.J., Long, R., Swap, R.J., Lee, Y., Nowak, N., Poche, B. (2018) The first evaluation of formaldehyde column observations by improved Pandora spectrometers during the KORUS-AQ field study, *Atmospheric Measurement Techniques*, 11, 4943-4961. <https://doi.org/10.5194/amt-11-4943-2018>
- Spinei, E., Tiefengraber, M., Müller, M., Gebetsberger, M., Cede, A., Valin, L., Szykman, J., Whitehill, A., Kotsakis, A., Santos, F., Abuhassan, N., Zhao, X., Fioletov, V., Lee, S.C., Swap, R. (2021) Effect of polyoxymethylene (POM-H Delrin)

- off-gassing within the Pandora head sensor on direct-sun and multi-axis formaldehyde column measurements in 2016-2019, *Atmospheric Measurement Techniques*, 14, 647-663. <https://doi.org/10.5194/amt-14-647-2021>
- Steinbrecht, W., Hegglin, M.I., Harris, N., Weber, M. (2018) Is global ozone recovering?, *Comptes Rendus Geoscience*, 350(7), 368-375. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2018.07.012>
- Tirpitz, J.-L., Frieß, U., Hendrick, F., Alberti, C., Allaart, M., Apituley, A., Bais, A., Beirle, S., Berkhout, S., Bogner, K., Bösch, T., Bruchkouski, I., Cede, A., Chan, K.L., den Hoed, M., Donner, S., Drosoglou, T., Fayt, C., Friedrich, M.M., Frumau, A., Gast, L., Gielen, C., Gomez-Martin, L., Hao, N., Hensen, A., Henzing, B., Hermans, C., Jin, J., Kreher, K., Kuhn, J., Lampel, J., Li, A., Liu, C., Liu, H., Ma, J., Merlaud, A., Peters, E., Pinardi, G., PETERS, A., Platt, U., Puentedura, O., Richter, A., Schmitt, S., Spinei, E., Stein Zweers, D., Strong, K., Swart, D., Tack, F., Tiefengraber, M., van der Hoff, R., van Roozendaal, M., Vlemmix, T., Vonk, J., Wagner, T., Wang, Y., Wang, Z., Wenig, M., Wiegner, M., Wittrock, F., Xie, P., Xing, C., Xu, J., Yela, M., Zhang, C., Zhao, X. (2021) Intercomparison of MAX-DOAS vertical profile retrieval algorithms: studies on field data from the CINDI-2 campaign, *Atmospheric Measurement Techniques*, 14, 1-35. <https://doi.org/10.5194/amt-14-1-2021>
- Travis, K.R., Judd, L.M., Crawford, J.H., Chen, G., Szykman, J., Whitehill, A., Valin, L.C., Spinei, E., Janz, S., Nowlan, C.R., Kwon, H.-A., Fried, A., Walega, J. (2022) Can column formaldehyde observations inform air quality monitoring strategies for ozone and related photochemical oxidants?, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127, e2022JD036638. <https://doi.org/10.1029/2022JD036638>
- Tzortziou, M., Herman, J.R., Cede, A., Abuhassan, N. (2012) High precision, absolute total column ozone measurements from the Pandora spectrometer system: Comparisons with data from a Brewer double monochromator and Aura OMI, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117, D16303. <https://doi.org/10.1029/2012JD017814>
- Velasco-Merino, C., Mateos, D., Toledano, C., Prospero, J.M., Molinie, J., Euphrasie-Clotilde, L., González, R., Cachorro, V.E., Calle, A., de Frutos, A.M. (2018) Impact of long-range transport over the Atlantic Ocean on Saharan dust optical and microphysical properties based on AERONET data, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18, 9411-9424. <https://doi.org/10.5194/acp-18-9411-2018>
- Verhoelst, T., Compernelle, S., Pinardi, G., Lambert, J.-C., Eskes, H.J., Eichmann, K.-U., Fjæraa, A.M., Granville, J., Niemeyer, S., Cede, A., Tiefengraber, M., Hendrick, F., Pazmiño, A., Bais, A., Bazureau, A., Boersma, K.F., Bogner, K., Dehn, A., Donner, S., Elokhov, A., Gebetsberger, M., Goutail, F., Grutter de la Mora, M., Gruzdev, A., Gratsea, M., Hansen, G.H., Irie, H., Jepsen, N., Kanaya, Y., Karagiozidis, D., Kivi, R., Kreher, K., Levelt, P.F., Liu, C., Müller, M., Navarro Comas, M., PETERS, A.J.M., Pommereau, J.-P., Portafaix, T., Prados-Roman, C., Puentedura, O., Querel, R., Remmers, J., Richter, A., Rimmer, J., Rivera Cárdenas, C., Saavedra de Miguel, L., Sinyakov, V. P., Stremme, W., Strong, K., Van Roozendaal, M., Veefkind, J.P., Wagner, T., Wittrock, F., Yela González, M., Zehner, C. (2021) Ground-based validation of the Copernicus Sentinel-5P TROPOMI NO₂ measurements with the NDACC ZSL-DOAS, MAX-DOAS and Pandonia global networks, *Atmospheric Measurement Techniques*, 14, 481-510. <https://doi.org/10.5194/amt-14-481-2021>
- Vlemmix, T., PETERS, A.J.M., Berkhout, A.J.C., Gast, L.F.L., Wang, P., Levelt, P.F. (2011) Ability of the MAX-DOAS method to derive profile information for NO₂: can the boundary layer and free troposphere be separated?, *Atmospheric Measurement Techniques*, 4, 2659-2684. <https://doi.org/10.5194/amt-4-2659-2011>
- von Clarmann, T., Degenstein, D.A., Livesey, N.J., Bender, S., Braverman, A., Butz, A., Compernelle, S., Damadeo, R., Dueck, S., Eriksson, P., Funke, B., Johnson, M.C., Kasai, Y., Keppens, A., Kleinert, A., Kramarova, N.A., Laeng, A., Langerock, B., Payne, V.H., Rozanov, A., Sato, T.O., Schneider, M., Sheese, P., Sofieva, V., Stiller, G.P., von Savigny, C., Zawada, D. (2020) Overview: Estimating and reporting uncertainties in remotely sensed atmospheric composition and temperature, *Atmospheric Measurement Techniques*, 13, 4393-4436. <https://doi.org/10.5194/amt-13-4393-2020>
- Wagner, T., Ibrahim, O., Shaiganfar, R., Platt, U. (2010) Mobile MAX-DOAS observations of tropospheric trace gases, *Atmospheric Measurement Techniques*, 3, 129-140. <https://doi.org/10.5194/amt-3-129-2010>
- Wang, L., Gong, W., Xia, X., Zhu, J., Li, J., Zhu, Z. (2015) Long-term observations of aerosol optical properties at Wuhan, an urban site in Central China, *Atmospheric Environment*, 101, 94-102. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.11.021>
- Wang, Y., Apituley, A., Bais, A., Beirle, S., Benavent, N., Borovski, A., Bruchkouski, I., Chan, K.L., Donner, S., Drosoglou,

- T., Finkenzeller, H., Friedrich, M.M., Frieß, U., Garcia-Nieto, D., Gómez-Martín, L., Hendrick, F., Hilboll, A., Jin, J., Johnston, P., Koenig, T.K., Kreher, K., Kumar, V., Kyuberis, A., Lampel, J., Liu, C., Liu, H., Ma, J., Polyansky, O.L., Postlyakov, O., Querel, R., Saiz-Lopez, A., Schmitt, S., Tian, X., Tirpitz, J.-L., Van Roozendaal, M., Volkamer, R., Wang, Z., Xie, P., Xing, C., Xu, J., Yela, M., Zhang, C., Wagner, T. (2020) Inter-comparison of MAX-DOAS measurements of tropospheric HONO slant column densities and vertical profiles during the CINDI-2 campaign, *Atmospheric Measurement Techniques*, 13, 5087-5116. <https://doi.org/10.5194/amt-13-5087-2020>
- Wang, Y., Beirle, S., Lampel, J., Koukoulis, M., De Smedt, I., Theys, N., Li, A., Wu, D., Xie, P., Liu, C., Van Roozendaal, M., Stavrou, T., Müller, J.-F., Wagner, T. (2017) Validation of OMI, GOME-2A and GOME-2B tropospheric NO₂, SO₂ and HCHO products using MAX-DOAS observations from 2011 to 2014 in Wuxi, China: investigation of the effects of priori profiles and aerosols on the satellite products, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 5007-5033. <https://doi.org/10.5194/acp-17-5007-2017>
- Wang, Y., Pukite, J., Wagner, T., Donner, S., Beirle, S., Hilboll, A., Vrekoussis, M., Richter, A., Apituley, A., Piters, A., Allaart, M., Eskes, H., Frumau, A., Van Roozendaal, M., Lampel, J., Platt, U., Schmitt, S., Swart, D., Vonk, J. (2018) Vertical profiles of tropospheric ozone from MAX-DOAS measurements during the CINDI-2 campaign: Part 1—Development of a new retrieval algorithm, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123, 10,637-10,670. <https://doi.org/10.1029/2018JD028647>
- Weatherhead, E.C., Andersen, S.B. (2006) The search for signs of recovery of the ozone layer, *Nature*, 441(7089), 39-45. <https://doi.org/10.1038/nature04746>
- Weber, M., Arosio, C., Coldewey-Egbers, M., Fioletov, V.E., Frith, S.M., Wild, J.D., Tourpali, K., Burrows, J.P., Loyola, D. (2022) Global total ozone recovery trends attributed to ozone-depleting substance (ODS) changes derived from five merged ozone datasets, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22, 6843-6859. <https://doi.org/10.5194/acp-22-6843-2022>
- Won, J.G., Yoon, S.C., Kim, S.W., Jefferson, A., Dutton, E.G., Holben, B.N. (2004) Estimation of direct radiative forcing of Asian dust aerosols with sun/sky radiometer and lidar measurements at Gosan, Korea, *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 82(1), 115-130. <https://doi.org/10.2151/jmsj.82.115>
- Yeo, H., Kim, S.W., Lee, C., Kim, D., Kim, B.G., Kim, S., Nam, H.-G., Noh, Y.M., Park, S., Park, C.B., Seo, K., Choi, J.-Y., Lee, M.-I., Lee, E.H. (2016) The KALION automated aerosol type classification and mass concentration calculation algorithm, *Korean Journal of Remote Sensing*, 32(2), 119-131.
- Yoon, S.-C., Won, J.-G., Omar, A.H., Kim, S.-W., Sohn, B.-J. (2005) Estimation of the radiative forcing by key aerosol types in worldwide locations using a column model and AERONET data, *Atmospheric Environment*, 39(35), 6620-6630. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.07.058>
- Zhao, X., Griffin, D., Fioletov, V., McLinden, C., Davies, J., Ogyu, A., Lee, S.C., Lupu, A., Moran, M.D., Cede, A., Tiefengraber, M., Müller, M. (2019) Retrieval of total column and surface NO₂ from Pandora zenith-sky measurements, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19, 10619-10642. <https://doi.org/10.5194/acp-19-10619-2019>
- Zhao, X., Huang, K., Fu, J.S., Abdullaev, S.F. (2022) Long-range transport of Asian dust to the Arctic: identification of transport pathways, evolution of aerosol optical properties, and impact assessment on surface albedo changes, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22, 10389-10407. <https://doi.org/10.5194/acp-22-10389-2022>

Authors Information

박상서(울산과학기술원 지구환경도시건설공학과 부교수)
(sangseopark@unist.ac.kr)

정옥교(부경대학교 지구환경시스템과학부 위성정보융합공학
전공 조교수) (ukkyo.jeong@pknu.ac.kr)

권형안(수원대학교 환경에너지공학과 조교수)
(hakwon@suwon.ac.kr)