

논문

BusanSat-B/PolCube 편광계 항공 관측 캠페인을 통한 에어로졸 광학두께 산출

Aerosol Optical Depth Retrievals from BusanSat-B/PolCube Polarimeter Airborne Campaign Measurements

이수빈, 정옥교*, 문봉곤¹⁾, 최영준¹⁾, 정민섭¹⁾, 박원기¹⁾, 김우진¹⁾, 류연철²⁾, 정인회²⁾

부경대학교 공간정보시스템공학전공, ¹⁾한국천문연구원 우주과학탐사본부,
²⁾부산테크노파크 해양수산산업단

Subin Lee, Ukkyo Jeong*, Bongkon Moon¹⁾, Young-Jun Choi¹⁾,
Minsup Jeong¹⁾, Won-Keek Park¹⁾, WooJin Kim¹⁾, Youn-Chul Ryu²⁾, In-Hoe Jung²⁾

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

¹⁾Space Science Exploration Division, Korea Astronomy and Space Science Institute (KASI), Daejeon, Republic of Korea

²⁾Marine and Fisheries Industry Division, Busan Techno Park (BTP), Busan, Republic of Korea

접수일 2025년 9월 5일
수정일 2025년 9월 18일
채택일 2025년 9월 23일

Received 5 September 2025
Revised 18 September 2025
Accepted 23 September 2025

*Corresponding author
Tel : +82-(0)51-629-6654
E-mail : ukkyojeong@pknu.ac.kr

Abstract In this study, we present the PolCube, a multi-angle, multi-spectral push-broom imaging polarimeter, onboard a BusanSat-B CubeSat, scheduled for launch in 2026. The instrument operates at four wavelengths—410, 555, 670, and 865 nm—across four angles. Before its launch, an airborne observation campaign was conducted using the engineering qualification model (EQM) of the PolCube (Air-PolCube). The aerosol optical depth (AOD) is retrieved from the flight measurements for the East Sea on May 8~9, 2024. For aerosol optical depth (AOD) retrieval, a linear conversion methodology was implemented to transform Air-PolCube digital number (DN) values to VIIRS top-of-atmosphere (TOA) radiances. This approximate approach utilized reference data from May 8, 2024. The derived scaling factors and offsets were applied to convert DN values to radiances, allowing AOD to be retrieved from the scaled radiance. During the airborne campaign, VIIRS 550 nm AOD products showed higher AOD on May 9 (~0.4) compared to May 8 (~0.15). The AOD retrievals, based on the look-up table (LUT) methodology applied to the scaled Air-PolCube radiance, showed high correlation ($R=0.91$) and low bias ($MBE=0.021$) in comparison with the VIIRS 550 nm AOD. Following the successful launch of the CubeSat, Level 1B products with absolute calibration coefficients and precise geometric corrections are anticipated to enhance the capability for aerosol property retrievals. The airborne campaign demonstrated the feasibility of AOD retrieval using Air-PolCube measurements and provided an initial evaluation of PolCube's performance.

Key words: Aerosol optical depth, Polarimeter, CubeSat, Airborne remote sensing

1. 서 론

대기질은 인간의 건강과 밀접한 관련이 있어, 호흡기 질환과 면역체계에 위험성을 증가시킨다. 특히 황산염과 유기탄소 등과 같은 미세입자는 체내에 더욱 깊게 침투하여 건강에 심각한 영향을 미친다(Mukherjee and Agrawal, 2017; Dominici *et al.*, 2006; Sunyer and

Basagaña, 2001). 이러한 미세입자는 1차 배출원에서 직접 배출되거나, 초미세먼지와 같은 입자는 2차 반응을 통해 생성되기도 한다. 에어로졸의 배출원이 다양해짐에 따라 이들의 특성을 정확히 파악하고 분석하는 데는 여전히 한계가 있다(Carlsaw *et al.*, 2010). 전 세계 항만 도시들은 특히 선박으로부터 배출되는 전구체(예: 황산화물, 질소산화물 등)에 의해 2차 에

어로졸이 생성되며 터미널 내에 하역 장비로 인해 다양한 대기오염물질이 배출된다. 그중 부산은 한국의 주요 항만도시 중 하나로 항만 활동 이외에도 교통, 산업 등 다양한 배출원의 영향을 받고 있어 복합적인 에어로졸 조성을 보인다(NAIR, 2022; Wan *et al.*, 2016).

현재 위성 및 현장 관측 기반의 원격 탐사 기술이 대기질을 효율적으로 모니터링하는 데 활용되고 있다. 저궤도 위성인 Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometers (MODIS)와 Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS)는 대기 상단(top of atmosphere; TOA) 복사 휘도 정보를 활용하여 Dark Target (Remer *et al.*, 2020)과 Deep Blue (Lee *et al.*, 2024) 알고리즘 기반의 에어로졸 광학두께 (Aerosol Optical Depth, AOD)와 옹스트롬 지수 (Ångström Exponent, AE) 등의 에어로졸 산출물을 높은 정확도에서 성공적으로 제공한다. 정지궤도 위성인 Geostationary Environment Monitoring Spectrometer (GEMS; Kim *et al.*, 2018)와 Geostationary Ocean Color Imager II (GOCI-II; Lee *et al.*, 2023) 또한 TOA 복사 휘도를 관측하여 에어로졸 산출물을 제공하고 있으며, 하루 8회 이상의 높은 관측 빈도로 대기질을 분석할 수 있다는 이점이 있다. 에어로졸을 정량적으로 분석하기 위하여 주로 복사 휘도 데이터를 활용해 왔으나, 에어로졸의 크기와 형태, 복소 굴절률 정보 등의 광학 특성을 이해하는 데는 추가적인 편광 정보가 필요하다(Remer *et al.*, 2019b; Knobelspiesse *et al.*, 2012; Hasekamp, 2010). 이러한 필요성에 따라 국외 및 국내에 다양한 편광계가 개발된 바 있다.

국외 위성 탑재용 편광계 개발은 1996년 Polarization and Directionality of the Earth's Reflectances 1 (POLDER1)을 시작으로, POLDER2, POLDER3까지 이어져 2013년까지 편광 데이터를 관측하여 제공하였다(Deschamps *et al.*, 1994). 미국 항공우주국(National Aeronautics and Space Administration, NASA)에서는 2011년에 Glory 미션의 일부인 Aerosol Polarimetry Sensor (APS) 편광계를 개발한 바 있다(Mishchenko *et al.*, 2007). 이후 한동안 발사 소식이 없었으나, 최근

2024년 2월에 NASA의 Plankton, Aerosol, Cloud, ocean Ecosystem (PACE) 미션의 일부로 두 편광계인 Hyper-Angular Rainbow Polarimeter 2 (HARP2)와 Spectro-polarimeter for Planetary Exploration (SPEXone)이 발사되었다(Remer *et al.*, 2019b). HARP2는 메릴랜드 볼티모어 카운티 대학(UMBC)에서 개발되었으며 총 90개의 각도($\pm 55^\circ$)를 가지고 직하방(Nadir) 기준 1,556 km의 넓은 폭(Swath)에서 관측한다(Martins *et al.*, 2018). 파장별로 관측 각이 상이하여 440, 550, 870 nm 파장대에서 각 10개, 665 nm에서는 60개이다. SPEXone은 네덜란드 우주연구기구(SRON)에서 개발하였으며 총 5개의 각도(-57° , -20° , 0° , 20° , 57°)에서 선별된 모든 파장에서 동시에 초분광 복사 휘도(380~779 nm; 1 nm step) 및 편광(385~770 nm; 5 nm step)을 관측하는 이점을 지닌다(Hasekamp *et al.*, 2019).

국내에서는 부산시의 지원 하에 한국천문연구원(Korea Astronomy and Space Science Institute; KASI) 및 국외 다양한 협력 기관들이 공동 개발한 PolCube가 BusanSat-B에 탑재되어 2026년에 발사될 계획에 있다. PolCube는 초소형 편광계 위성으로 총 4개의 각도에서 관측하며 410, 555, 670, 865 nm에서 복사 휘도 및 편광을 관측한다(Stamnes *et al.*, 2021; Moon *et al.*, 2020). 개발된 센서의 비행 모델(Flight Model, FM)은 발사 전 복사 휘도 및 편광 관측 데이터 처리를 위한 검보정이 수행될 예정이며, 이에 앞서 부산시는 한국천문연구원과 복사 휘도 관측 데이터의 정성적 성능 검증을 위한 항공 관측 캠페인을 수행하였다. 본 캠페인은 2024년 5월 8일부터 10일까지 부산 및 인천 인근에서 이뤄졌으며, Engineering Qualification Model (EQM; 이하 Air-PolCube)을 활용하였다. 하지만, EQM 센서의 경우, 편광 관측 데이터를 생산하기 위한 검보정이 수행되지 않은 상태로, 본 연구에서는 항공 관측 캠페인에서 획득한 복사량 데이터를 기반으로 항공 관측용 PolCube 성능을 평가하고 초소형 위성에 적용할 공식 알고리즘 적용 가능성을 검토하여 제시하고자 한다. 2장에서는 PolCube의 사양과 항공 관측 캠페

인의 개요, PolCube 원시 데이터 처리 및 AOD 산출 방법을 제시한다. 3장에는 원시 데이터 처리 결과와 이를 바탕으로 산출한 결과를 VIIRS 550 nm AOD와 비교한 결과를 제시한다. 4장에서는 PolCube 항공 관측 캠페인의 요약과 향후 발사될 PolCube의 활용 가능성이 논의한다.

2. 연구 데이터 및 방법

2.1 BusanSat-B/PolCube

PolCube는 다중각도, 다분광 편광계로(multi-angle, multi-spectral push-broom imaging polarimeter)로 총 네 각도(57.0°, 52.0°, 0.0°, 5.0°)에서 약 20 nm의 반치전폭(full-width at half maximum, FWHM)을 가지고 410, 555, 670, 865 nm의 복사 휘도 및 편광을 관측한다. 여기서 네 각도는 에어로졸의 다각도의 위상함수(phase function)를 관측하고, 지표(특히 해양)의 특성을 효율적으로 관측하기 위해 선정되었다. 선형 편광은 식 1과 같이 stokes vector의 I , Q , U 성분으로 표현되며 다양한 각도별 관측 데이터를 활용하여 이를 구할 수 있다. PolCube는 편광을 관측하기 위하여 파장에 따라 서로 다른 0°, 60°, 90°, 120° 편광 필터를 활용한다(Kim *et al.*, 2021). 410, 555, 865 nm에서 I_{0° 와 I_{90° 를, 670 nm에서는 I_{0° 와 I_{60° , I_{120° 를 관측한다.

$$I = \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \end{pmatrix} \quad (1)$$

편광이 발생한 정도를 나타내는 지표로 식 2와 같이 선형편광도(Degree of linear polarization, DoLP)를 계산하여 활용한다.

$$\text{DoLP} = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \quad (2)$$

PolCube는 태양동기궤도에서 고도 약 567 km에서 운영될 예정이며, 10°의 관측 시야각(Field of view, FOV)을 가진다. 관측 폭(Swath)은 약 100 km이며 직하방(Nadir) 기준에서 공간해상도는 약 $0.39 \times 0.31 \text{ km}^2$ 이다. 요구된 복사 휘도와 DoLP의 불확도는 각각 약 2.0%, 0.5%이다(Stamnes *et al.*, 2021). PolCube의 사양은 표 1에 요약되어 있다.

2.2 항공 관측 캠페인

본 항공 관측 캠페인은 PolCube FM 발사에 앞서, 설계 요구조건에 맞는 성능을 내는지 확인하기 위하여 수행되었다. FM과 유사한 Air-PolCube를 King-Air 항공기에 탑재하였으며, 그림 1(a)에 나타냈다. EQM은 FM과 달리, 한 각도의 관측 데이터만 제공하며, 본 캠페인 동안 항공기의 직하방으로 관측하도록 탑재하였다. 그림 1(b)와 같이 비행 전, 국립환경과학원에서

Table 1. Summary of the PolCube specification.

PolCube specification	
Platform	BusanSat-B
Instrument type	Multi-angle, multi-spectral push-broom imaging polarimeter
Wavelengths (FWHM)	410 (20), 555 (20), 670 (20), 865 (20) nm (All bands polarized)
Radiometric & DoLP uncertainty	2.0% for radiometric uncertainty 0.5% for DoLP uncertainty
Angles	4
Viewing angles (°)	[57.0°, 52.0°, 0.0°, 5.0°]
Orbit altitude	567 km
FOV (°)	10°
Swath	100 km
Ground spatial resolution at nadir	$0.39 \times 0.31 \text{ km}^2$
Volume	12 U

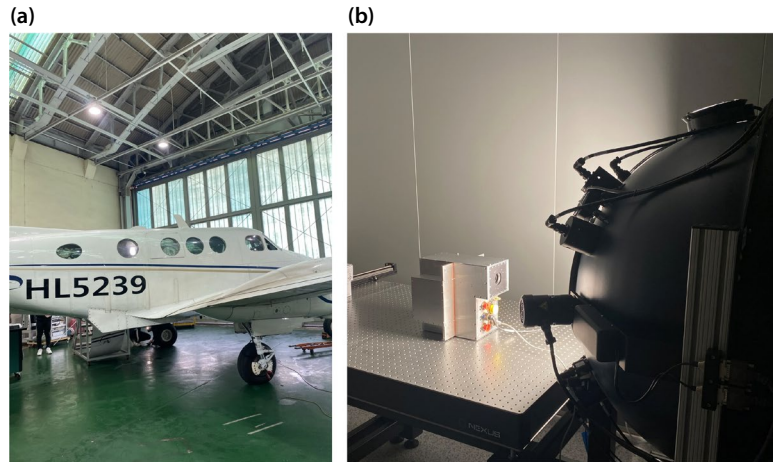


Fig. 1. (a) The King-Air equipped with the Air-PolCube, (b) Calibration of the Air-PolCube using an integrating sphere at the National Institute of Environmental Research.

Table 2. Summary of the Air-PolCube flight over Busan and Incheon, in South Korea, from May 8 to 10, 2024.

Date	Target region	Longitude (°E)	Latitude (°N)	Start time (LST)	End time (LST)	Exposure time (ms)	Flight height
May/8/2024	Yellow Sea	124.5~124.7°E	35.2~36.8°N	11:38:47	13:23:52	8.669	About 3 km
May/9/2024	Yellow Sea	124.5~124.7°E	35.2~36.8°N	12:23:56	14:03:15	4.812	
May/10/2024	East Sea	129.1~129.2°E	34.8~35.2°N	11:06:00	11:30:52	4.812	
	New port of Busan	128.7~129.1°E	35.0~35.2°N	11:39:15	11:59:45	3.849	

적분구로 센서의 복사 특성을 분석하였으며, 현재 복사 검보정 계수 확정을 위한 분석을 수행 중이다. 항공 관측은 한국천문연구원 (KASI) PolCube 개발팀에서 수행하였다. 2024년 5월 8일부터 9일까지 인천 인근의 서해(124.5~124.7°E, 35.2~36.8°N)에서 약 3 km 상공에서 비행을 수행하였다. 2024년 5월 10일에는 부산의 신항만과 동해안(128.7~129.2°E, 34.8~35.2°N)에서 각각 약 1.5 km, 3 km 상공에서 관측하였다. 5월 10일 관측 데이터는 주로 부산항만 등 육지를 관측하여 본 연구의 해양 미세먼지 산출에 적합하지 않아 본 연구에서는 제외하였다. 본 연구에서 활용한 해양 관측 데이터의 공간해상도는 3 km 상공 기준으로 약 $2 \times 2 \text{ m}^2$ 이다. 본 캠페인에서 활용한 Air-PolCube는 PolCube FM과 유사하나, 항공 관측을 위해 FM의 자동화 스케

줄을 적용하기에 어려움이 있다. 그에 따라 관측하는 날의 지표면 및 대기 조성을 고려하여 포화되지 않는 최적의 노출시간을 찾았다. 이는 데이터 저장을 시작하기 이전에 센서 하드웨어 제어 프로그램에서 노출시간을 조금씩 조절하며 관측 지점의 포화가 일어나지 않는 노출시간을 확정하는 방법으로 수행되었다. 그 결과, 대부분의 관측 데이터는 포화 없이 안정적으로 관측되었다. 그 외에도 항공기나 센서에서 자세제어 등에 관한 정보를 제공하지 않기 때문에 센서는 직하방으로 관측한다고 가정하였다. 때문에, 비행기의 선회나 자세제어 과정에서 관측각도가 직하방에서 멀어지는 경우가 생길 수 있으며, 이에 따른 오차가 발생할 수 있다. 하지만, 이러한 오차를 정량화하는 데는 정보가 부족해, 본 연구에서는 VIIRS 데이터와의 비

교를 통해 오차를 분석하였다. 하지만, 2026년에 발사 예정인 PolCube는 한국천문연구원에서 작성해둔 시나리오인 자동 스케줄이 설정되어 데이터 로고를 자동으로 저장하며 관측할 예정이며, 정밀한 자세제어 정보도 제공할 예정이다. 전반적인 항공 관측 비행 정보는 표 2에 요약하였다.

2.3 Digital number 데이터 처리 및 AOD 산출

본 항공 관측 캠페인을 통해 얻은 데이터는 digital number (DN)로 AOD를 산출하기 위해서는 복사 휘도 정보로 변환이 필요하다. 한국천문연구원(KASI)으로부터 제공받은 DN은 flat과 dark current 보정까지 수행된 상태이다. 하지만, Air-PolCube는 항공기로부터 관측된 데이터의 관측 기하 정보(solar zenith angle, SZA; viewing zenith angle, VZA; relative azimuth angle, RAA)를 제공받지 못한다. 초소형 위성의 PolCube 관측 기하 정보는 위성체인 BusanSat-B에서 제공할 예정이나, 항공 관측 데이터에서는 항공사에서 위경도 정보만 제공하고 다른 기하 정보를 얻을 수 없기 때문에 정확한 복사 휘도 정보를 얻기에 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 정성적인 성능 분석을

위해 DN 데이터를 복사 휘도로 변환하는 별도의 처리 과정을 수행하였다. AOD를 산출하는 과정은 그림 2의 흐름도와 같다.

항공 관측 데이터의 공간해상도는 약 $2 \times 2 \text{ m}^2$ 로 충분한 신호대잡음비(signal to noise ratio, SNR) 확보를 위하여 관측 영역 내 픽셀들을 각 파장에서 공간적으로 전체 픽셀 관측 값을 평균하였다(파장당 관측 영역 약 $512 \times 150 \text{ m}^2$). 그 후 Suomi NPP (Suomi National Polar-orbiting Partnership)에 탑재된 VIIRS Level1B (L1B) 복사 휘도 데이터를 활용하여 공간분포가 비교적 균일하였던 5월 8일을 기준으로 Air-PolCube DN을 타 위성의 복사 휘도와 일치하도록 변환할 수 있는 배율 계수 및 오프셋을 구하였다. Suomi-NPP VIIRS는 가시광부터 적외선 파장대($0.41 \sim 12.5 \mu\text{m}$)까지 총 22개의 밴드를 보유하며, 약 3,040 km의 관측 폭을 가진다. 본 연구에 활용한 관측 밴드의 공간해상도는 750 m이며, PolCube와 유사한 파장대(410, 555, 670, 865 nm)의 VIIRS L1B TOA 복사 휘도 데이터(412, 550, 670, 860 nm)를 활용하였다. VIIRS L1B는 항공 관측 캠페인을 수행한 시간대의 데이터를 제공할 뿐만 아니라 정밀한 복사 검보정 과정을 거쳐 높은 정확도가 입증된 데이터라는 점에서 본 연구의 참조 데이터로 활용하기에 적합하였다(Cao *et al.*, 2014). 2024년 5월 8일의 VIIRS 관측 시각(3:42 UTC) ± 3 분 이내의 Air-PolCube DN 데이터를 500 m 이내에 가장 가까운 VIIRS TOA 복사 휘도 정보와 대응하였다. 대응된 데이터를 활용하여 각 파장대마다 선형회귀식을 구하였다. 식 3에 따라 Air-PolCube 복사 휘도(L_{scaled}) 정보로 변환하였으며, 식 3의 a_λ 및 b_λ 는 파장대별 배율 계수 및 오프셋을 의미한다. 변환한 복사 휘도를 식 4에 따라 반사도(reflectance) 정보를 구하였다. 식 4의 $E_0(\lambda)$ 는 파장별 복사 조도, θ 는 SZA를 의미한다. 파장별 복사 조도는 각 일자에 해당하는 Total and Spectral Irradiance Monitor1 (TSIS-1) 일평균 데이터를 활용하였다. Air-PolCube가 관측하는 채널의 중심 파장과 기기 함수 slit function)에 해당하는 구간의 밴드 평균 복사 조도를 구하여 활용하였다(Coddington *et al.*, 2021).

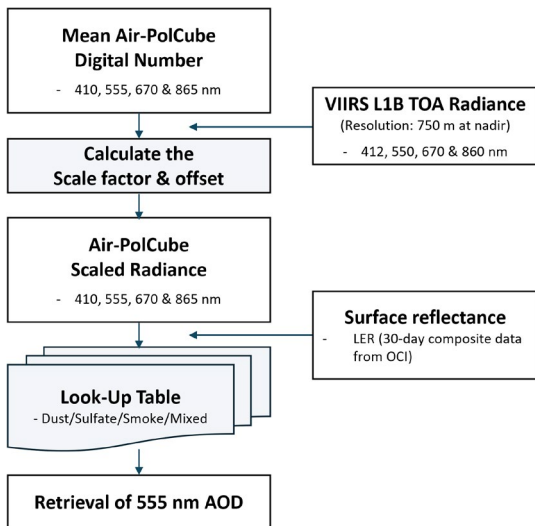


Fig. 2. Flow chart of AOD retrieval from Air-PolCube measurements.

$$L_{\text{scaled}}(\lambda) = a_{\lambda} \text{DN}(\lambda) + b_{\lambda} \quad (3)$$

$$\text{Reflectance}(\lambda) = \frac{\pi L_{\text{scaled}}(\lambda)}{E_0(\lambda) \cos \theta} \quad (4)$$

AOD 산출은 조건표(Look-Up Table, LUT)에 기반하여 수행되었다. 이는 복사전달모델로 다양한 기하 조건 및 지표면 반사도, AOD 조건에서 사전에 계산된 복사 휘도 값에 내삽하는 방식이다. 본 연구에서 활용한 복사전달모델은 VLIDORT (linearized pseudo-spherical vector Discrete Ordinate Radiative Transfer; Spurr, 2006)이며, 조건표의 구성은 표 3에 요약하였다. 이때, 에어로졸 광학 특성 조건은 Ozone Monitoring Instrument (OMI)의 현업 에어로졸 산출 알고리즘인 near-UV (OMAERUV; Torres *et al.*, 2007)에서 활용한 에어로졸 모델(예: sulfate, smoke, dust and mixed)을 기반으로 하였다. 위성에서는 대기 및 지표면에 의한 반사 신호를 동시에 관측하기 때문에, 대기 효과만을 고려하기 위하여 본 연구에서는 최소 지표면 반사도(minimum surface reflectance) 추정 방법을 활용하여 Air-PolCube 파장대의 Lambertian Equivalent Reflectance (LER; Kleipool *et al.*, 2008; Herman and Celarier, 1997)을 구하였다. 이를 위하여 활용한 데이터는, PACE 미션의 일부인 Ocean Color Instrument (OCI; Remer *et al.*, 2019a)로 OCI는 305~900 nm 까지 5 nm 간격으로 초분광 데이터를 제공하며, 이 중 Air-PolCube의 파장대와 일치하는 파장대를 활용하였다. 2024년 5월 한 달 동안의 한반도 데이터를 수집하여 Air-PolCube 파장대별 최소지표면 반사도 정보를 구성하였다.

Table 3. Look-Up Table (LUT) calculation conditions for Air-PolCube aerosol optical depth (AOD) retrieval.

Parameters	Entries
Wavelengths	410, 555, 670, 865 nm
SZA (°)	0.01~88° (5° step)
VZA (°)	0.01~88° (5° step)
RAA (°)	0.01~180° (5° step)
Albedo	0.01, 0.05, 0.1, 0.2
AOD	0.0, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 2.0

Air-PolCube AOD 산출 결과를 비교하기 위하여 Deep Blue (DB)/Satellite Ocean Aerosol Retrieval (SOAR) algorithm에 기반하여 산출된 VIIRS Level2 (L2) AOD 데이터를 활용하였다. 해당 자료는 약 6 km의 공간해상도에서 제공하며, 지상 관측 데이터(Aerosol Robotic Network, AERONET)와 교차검증을 통해 높은 신뢰성이 입증되어 본 연구의 비교 자료로 활용하였다(Lee *et al.*, 2024).

3. 결 과

3.1 복사 휘도 정보 변환 결과

2024년 5월 8일에 수행한 항공 관측은 서해안 인근에서 수행되었으며, 서해에서 550 nm AOD가 대부분 0.15 미만으로 맑은 날이었기 때문에 지표면 반사도가 관측 범위 내에서 비교적 균일했다. 본 연구에서는 이날의 데이터를 활용하여 보정할 배율 계수 및 오프셋 정보를 구하였다. 그림 3은 VIIRS TOA 복사 휘도와 Air-PolCube DN 데이터를 대응하여 각 파장대마다 나타낸 결과이다. 각 패널은 (a) 410 nm, (b) 555 nm, (c) 670 nm, (d) 865 nm에 해당하며, 총 56개의 샘플을 활용하여 선형회귀식을 구한 결과가 함께 제시되어 있다. 5월 8일 3:42 UTC에 서해 인근에서 관측된 VIIRS 복사 휘도의 경우 412 nm에서 약 $93 \sim 95 \text{ Wm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ 수준이었으며, 이에 대응되는 Air-PolCube 410 nm DN은 $15.1 \sim 15.4 \times 10^4$ 범위에서 두 데이터 모두 균일한 지표면 반사도 관측으로 인해 낮은 변동성을 보였다. 550 nm 복사 휘도의 경우에는 약 $40 \text{ Wm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ 에서 관측이 되었으며, Air-PolCube 550 nm DN은 $3.10 \sim 3.17 \times 10^4$ 의 범위에서 관측되었다. 670 nm 복사 휘도는 약 $19 \text{ Wm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ 로 나타났으며, Air-PolCube 670 nm DN은 $2.44 \sim 2.49 \times 10^4$ 의 범위에 분포하였다. 마지막으로 870 nm의 복사 휘도의 경우에는 약 $6 \text{ Wm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ 수준이었으며, 이와 상응하는 Air-PolCube 865 nm DN은 $11.55 \sim 12.0 \times 10^4$ 범위에서 나타났음을 확인하였다. 일반적으로, 타 위성 데

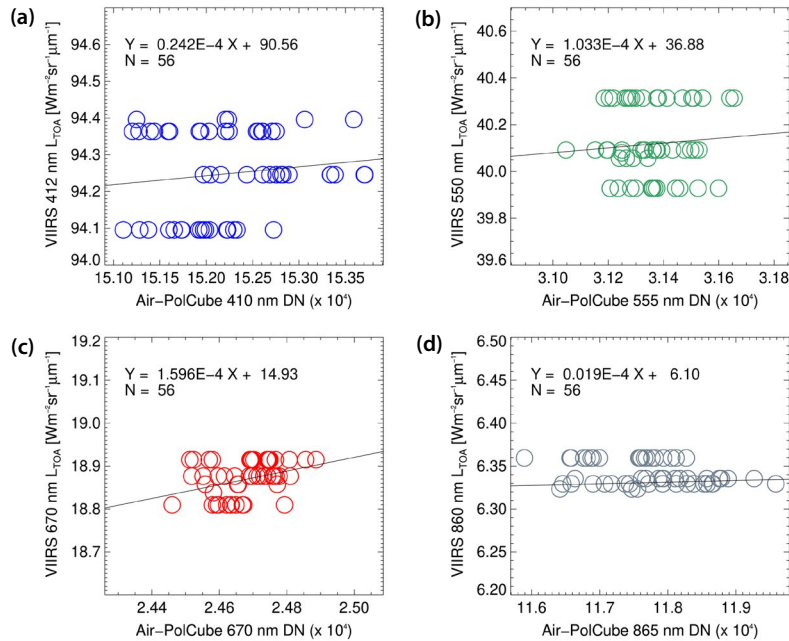


Fig. 3. Comparison of Air-PolCube digital number (DN) with VIIRS top-of-atmosphere (TOA) radiance [$\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$] on 8 May 2024 for (a) 410, (b) 555, (c) 670, and (d) 865 nm. Linear regression equations with sample size ($N = 56$) are shown in each panel.

이터와의 비교 값으로 복사 검보정 계수를 구하기 위해서는 다양한 지표면 반사도 관측 데이터를 활용하여 뚜렷한 선형회귀식을 활용한다. 그러나, 본 연구에서는 지표면 반사도의 변동성이 제한적이며 상대적으로 균질한 지점에서의 관측 값(해양)을 활용하기 때문에 적은 수의 관측 값($N = 56$)을 활용하여 선형회귀식을 구하였다. 그 결과, 본 연구에서는 일반적으로 활용되는 선형회귀식을 활용하였으나, 맑은 날의 해양 관측 값을 기준으로 기울기보다는 오프셋 값에 의존하는 변환 상수가 도출되었다. 이러한 한계로 인해 항공 관측 데이터의 복사 휘도 변환 과정에서 오차가 있을 수 있으며, 위성 현업 운영을 위한 보다 다양한 반사도 정보에 기반한 복사 보정 알고리즘을 개발 중이다.

그림 4는 그림 3에서 도출한 파장별 선형회귀식을 2024년 5월 8일 및 9일 서해에서 확보한 Air-PolCube 데이터에 적용한 결과이다. 각 패널은 (a) 410 nm, (b) 555 nm, (c) 670 nm, (d) 865 nm에 해당하는 Air-Pol

Cube의 환산된 복사 휘도(L_{scaled})를 나타낸다. 5월 8일에는 총 1,686개, 9일에는 총 1,580개의 관측 자료가 확보되었다. 2024년 5월 8일의 12:00, 13:00 (LST) 시 인근과 9일의 13:40 (LST) 인근에서 나타난 410, 555, 670 nm의 급격한 증감 현상은 EQM 버전의 장비 운영의 불안정성에 의해 나타난 현상이며, 산출에서는 제외하였다. 전반적으로 모든 파장대에서 5월 9일의 복사 휘도가 8일보다 높게 나타났으며, 이는 구름이 없었던 상황을 고려하였을 때, 실제로 5월 9일에 대기 중 부유하는 미세입자가 더 많았음을 나타낸다.

3.2 AOD 산출 결과

Air-PolCube 복사 휘도는 2.3절에서 제시한 식 (4)를 이용하여 그림 4에서 제시한 복사 휘도 정보를 반사도(reflectance)로 변환한 뒤, LUT 기반의 에어로졸 광학두께 산출을 수행하였다. 관측 일자 중 5월 8일과 9일에 유사한 경로에서 관측을 수행하였으나 5월 9일에 많은 양의 미세먼지가 유입되어 Air-PolCube AOD

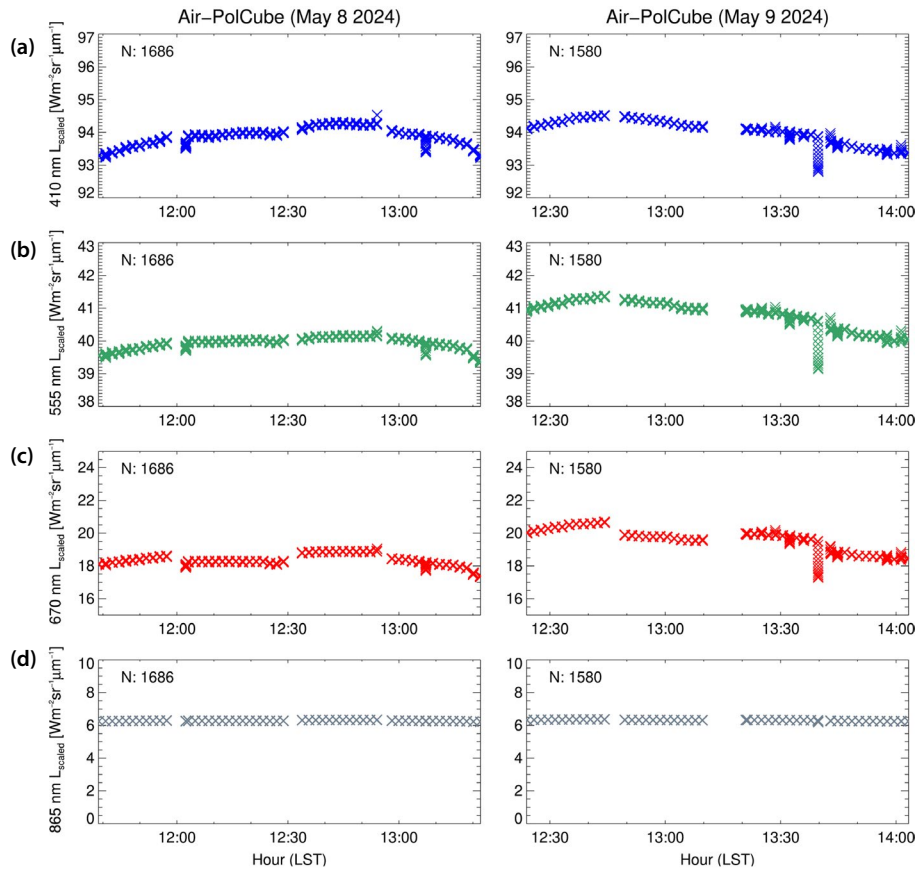


Fig. 4. Air-PolCube scaled radiance data from May 8 and 9, 2024, for (a) 410, (b) 555, (c) 670, and (d) 865 nm, scaled by a scale factor and offset, derived from Fig. 3.

산출 민감도를 분석할 수 있는 좋은 사례를 관측하였다. VIIRS 데이터와 비교하기 위하여 이 기간의 VIIRS 데이터 시간대의 ± 15 분 이내 Air-PolCube AOD 중, 6 km 이내에 들어오는 가장 가까운 VIIRS AOD 픽셀을 시공간적으로 대응시켜 603개의 샘플을 얻었다. 그림 5(a)는 Air-PolCube가 비행했던 경로 인근의 VIIRS 550 nm AOD 데이터를 중첩하여 비교한 결과이다. ± 15 분 동안의 대기 변동성을 고려하기 위하여 비교적 넓은 시공간적 범위의 서해안 VIIRS AOD와 비교하고자 하였다. 좁은 관측 영역의 항공 데이터를 쉽게 비교하기 위해 그림 5(a)의 각 사각형 중심으로 ± 7 km 내에 있는 산출 평균 데이터를 확대하여 표출하였다. 또한, 평균 전의 고해상도 항공 관측 샘플의 예시를

그림 5(b)에 나타냈다. 2024년 5월 8일과 9일에 대하여 산출한 Air-PolCube AOD가 이들 모두 VIIRS와 유사한 값이 보임에 따라 3.1절의 보정 결과가 5월 9일에도 현실적으로 잘 반영되었음을 알 수 있다. Air-PolCube 555 nm AOD는 8일에 비행경로에 따라 평균 0.189 ± 0.039 의 값을 보였으며 VIIRS 550 nm AOD는 평균 0.146 ± 0.018 의 값을 보여 Air-PolCube가 약 0.043 정도 높게 산출되었다. 9일의 Air-PolCube 555 nm AOD는 평균 0.345 ± 0.002 , VIIRS 550 nm AOD는 평균 0.411 ± 0.07 의 값을 보여 Air-PolCube가 약 0.066 정도 낮게 산출되었다. 전반적으로는 Air-PolCube에서 산출된 AOD가 VIIRS의 값과 높은 일관성을 보여주었다.

그림 6은 앞서 대응시킨 모든 데이터의 산점도 결

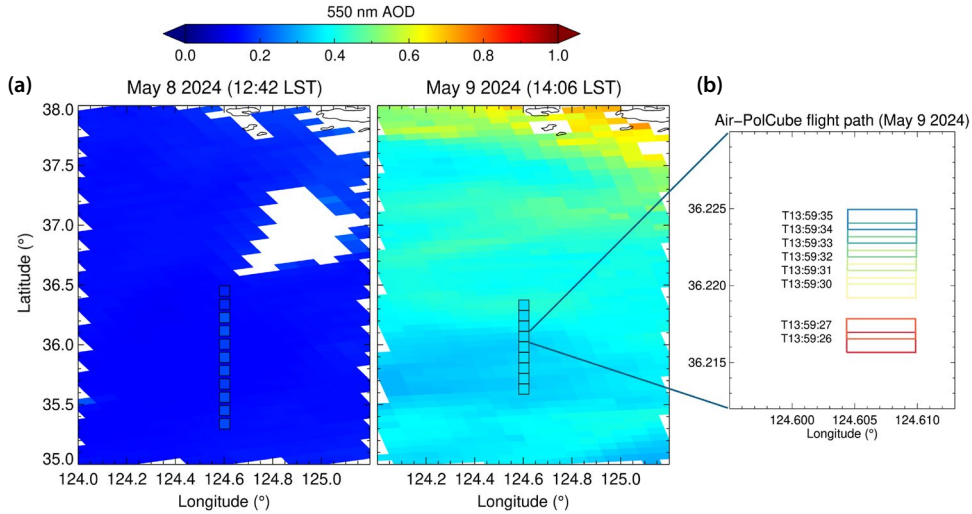


Fig. 5. (a) Retrieval of 555 nm AOD from Air-PolCube measurements on 8~9 May 2024. The background color of each day is VIIRS 555 nm DB/SOAR AOD. The colors in the square indicate mean values of the PolCube retrievals within ± 7 km from the center. (b) An example of all samples for an averaged value in panel (a) of the Air-PolCube on May 9, 2024.

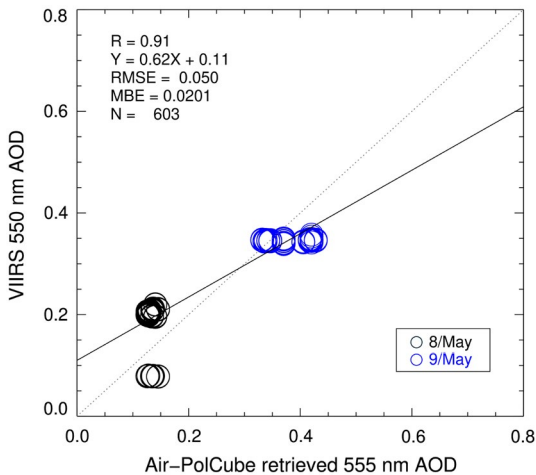


Fig. 6. Comparison of 555 nm AOD from Air-PolCube and 555 nm AOD from VIIRS on 8 and 9 May 2024. Black and blue open circles depict AOD values on 8 and 9 May 2024, respectively. R, correlation coefficient; RMSE, root-mean-squared error; MBE, mean-bias-error; N, the number of paired samples.

과로 높은 상관성($R=0.91$)과 낮은 편향(Mean-bias-error, $MBE=0.02$)을 보여 센서가 좋은 관측 민감도를 가지는 것으로 보였다. 향후, 위성이 성공적으로 발사되어 보다 정확한 자세제어 정보와 복사 검보정 값

들이 적용되면 이러한 AOD 산출 값들의 정확도를 더욱 높일 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결론 및 요약

본 연구에서는 2026년에 발사될 예정인 초소형 편광계 PolCube의 EQM 버전의 항공 관측 캠페인의 전반적인 내용 및 결과를 제시하였다. 2024년 5월 8~9 일에는 서해를 관측하였으며, 10일에는 부산 신항 및 동해안 인근에서의 비행하여 DN 정보를 확보하였다. AOD 산출을 위해 5월 8일 VIIRS TOA 복사 휘도 자료를 활용하여 Air-PolCube DN을 복사 휘도로 변환하기 위한 배율 계수 및 오프셋을 구하였다. 이를 2024년 5월 8일과 9일 비행 데이터에 적용한 결과를 3.1절에 제시하였으며 이를 기반으로 산출한 Air-PolCube 555 nm AOD를 VIIRS 555 nm 데이터와 함께 3.2절에 기술하였다. VIIRS 555 nm AOD를 기준으로 2024년 5월 9일이 8일보다 높은 값을 보였으며, Air-PolCube 555 nm AOD를 이와 비교하였을 때, 높은 상관성($R=0.91$)과 낮은 오류($RMSE=0.05$), 편향

($MBE = 0.02$)을 보였다. 그러나, 항공기에서 제공하는 정보에 제약이 있었으며 기기의 정확한 검보정 계수가 아닌 제한적인 데이터로 선형회귀식을 적용하였기 때문에, 복사 휘도로 변환하는 과정에서 오차가 발생할 수 있다. 이는 검보정 작업이 진행 중임에 따른 한계로 향후 본 위성이 발사된 이후, 절대 교정 계수 및 기하 보정이 반영된 L1B 자료를 활용하는 경우에는 optimal estimation (OE) 기반의 알고리즘 (Lee and Jeong, 2025; Jeong *et al.*, 2020, 2016)을 적용하여 에어로졸 특성을 정량적으로 제시할 수 있을 것으로 예상된다. 특히 편광은 에어로졸의 광학 특성에 민감도를 보이므로 에어로졸 광학두께 정보에 더해 추가적인 광학 특성 (예: 복소 굴절률, 단일산란 알베도, 입경크기분포)도 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2023년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 G-램프(LAMP) 사업 지원을 받아 수행되었습니다(No. RS-2023-00301702). 또한, 본 연구는 2024년 부산광역시와 지원하고 (재)부산테크노파크가 수행한 “해양데이터 기반 신산업 육성사업”의 일환으로 수행되었습니다. 더불어, 이 논문은 국립부경대학교 자율창의학술연구비(2024년)에 의하여 연구되었으며, 적분구 검교정 기회를 제공해주신 국립환경과학원에 감사드립니다.

References

- Cao, C., De Luccia, F.J., Xiong, X., Wolfe, R., Weng, F. (2014) Early on-orbit performance of the Visible Infrared Imaging Radiometer Suite onboard the Suomi National Polar-Orbiting Partnership (S-NPP) satellite, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(2), 1142-1156. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2247768>
- Carslaw, K.S., Boucher, O., Spracklen, D.V., Mann, G.W., Rae, J.G.L., Woodward, S., Kulmala, M. (2010) A review of natural aerosol interactions and feedbacks within the Earth system, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(4), 1701-1737. <https://doi.org/10.5194/acp-10-1701-2010>
- Coddington, O., Richard, E.C., Harber, D., Pilewskie, P., Woods, T.N., Chance, K., Liu, X., Sun, K. (2021) The TSIS-1 hybrid solar reference spectrum, *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL091709. <https://doi.org/10.1029/2020GL091709>
- Deschamps, P.Y., Bréon, F.M., Herman, M., Leroy, M., Podaire, A., Buriez, J.C., Deuzé, J.L., Bricaud, A., Séze, G. (1994) The POLDER Mission: Instrument characteristics and scientific objectives, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32(3), 598-615. <https://doi.org/10.1109/36.297978>
- Dominici, F., Peng, R.D., Bell, M.L., Zeger, S.L., Samet, J.M. (2006) Fine particulate air pollution and hospital admission for cardiovascular and respiratory diseases, *Journal of the American Medical Association*, 295(10), 1127-1134. <https://doi.org/10.1001/jama.295.10.1127>
- Hasekamp, O.P. (2010) Capability of multi-viewing-angle photopolarimetric measurements for the simultaneous retrieval of aerosol and cloud properties, *Atmospheric Measurement Techniques*, 3(4), 839-851. <https://doi.org/10.5194/amt-3-839-2010>
- Hasekamp, O.P., Fu, G., Rusli, S.P., Wu, L., Di Noia, A., Brugh, J.A.D., Landgraf, J., Smit, J.M., Rietjens, J., van Amerongen, A. (2019) Aerosol measurements by SPeXone on the NASA PACE mission: Expected retrieval capabilities, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 227, 170-184. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2019.02.006>
- Herman, J.R., Celarier, E.A. (1997) Earth surface reflectivity climatology at 340-380 nm from TOMS data, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D23), 28003-28011. <https://doi.org/10.1029/97JD02074>
- Jeong, U., Kim, J., Ahn, C., Torres, O., Liu, X., Bhartia, P.K., Spurr, R.J.D., Haffner, D., Chance, K., Holben, B.N. (2016) An optimal-estimation-based aerosol retrieval algorithm using OMI near-UV observations, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(1), 177-193. <https://doi.org/10.5194/acp-16-177-2016>
- Jeong, U., Tsay, S.C., Giles, D.M., Holben, B.N., Swap, R.J., Abuhasan, 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(7), e2019JD031835. <https://doi.org/10.1029/2019JD031835>
- Kim, M., Kim, J., Torres, O., Ahn, C., Kim, W., Jeong, U., Go, S., Liu, X., Moon, K.J., Kim, D.-R. (2018) Optimal estimation-

- based algorithm to retrieve aerosol optical properties for GEMS measurements over Asia, *Remote Sensing*, 10(1), 162. <https://doi.org/10.3390/rs10010162>
- Kim, W.J., Moon, B., Choi, Y., Jeong, M., Lee, D.H., Park, Y., Park, W.K., Shin, J., Sung, C.K., Kim, S.B., Kang, K., Cho, S., Seo, H., Baiz, R., PolCube NASA LaRC team (2021) Optomechanical design analysis of the Polcube payload for 12U CubeSat. In: Proceedings of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences (KSAS) 2021 Spring Conference, pp. 857-858.
- Kleipool, Q.L., Dobber, M.R., de Haan, J.F., Levelt, P.F. (2008) Earth surface reflectance climatology from 3 years of OMI data, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D18), D18308. <https://doi.org/10.1029/2008JD010290>
- Knobelspiesse, K., Cairns, B., Mishchenko, M., Chowdhary, J., Tsigaridis, K., van Diedenhoven, B., Martin, W., Ottaviani, M., Alexandrov, M. (2012) Analysis of fine-mode aerosol retrieval capabilities by different passive remote sensing instrument designs, *Optics Express*, 20(19), 21457-21484. <https://doi.org/10.1364/OE.20.021457>
- Lee, J., Hsu, N.C., Kim, W.V., Sayer, A.M., Tsay, S.C. (2024) VIIRS Version 2 Deep Blue aerosol products, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 129(6), e2023JD040082. <https://doi.org/10.1029/2023JD040082>
- Lee, S., Choi, M., Kim, J., Park, Y.-J., Choi, J.-K., Lim, H., Lee, J., Kim, M., Cho, Y. (2023) Retrieval of aerosol optical properties from GOCI-II observations: Continuation of long-term geostationary aerosol monitoring over East Asia, *Science of The Total Environment*, 903, 166504. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166504>
- Lee, S., Jeong, U. (2025) An optimal-estimation-based algorithm for simultaneously retrieving aerosols and ocean parameters using multi-angular polarimetric measurements. In: Proceedings of the EGU General Assembly 2025, Vienna, Austria, 27 April-2 May 2025.
- Martins, J.V., Fernandez-Borda, R., McBride, B., Remer, L., Barbosa, H.M.J. (2018) The HARP hyperangular imaging polarimeter and the need for small satellite payloads with high science payoff for Earth science remote sensing. In: Proceedings of the IGARSS 2018 - IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Valencia, Spain, 22-27 July 2018, pp. 6304-6307. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8518823>
- Mishchenko, M.I., Cairns, B., Kopp, G., Schueler, C.F., Fafaul, B.A., Hansen, J.E., Hooker, R.J., Itchkawich, T., Maring, H.B., Travis, L.D. (2007) Accurate monitoring of terrestrial aerosols and total solar irradiance: Introducing the Glory mission, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(5), 677-691. <https://doi.org/10.1175/BAMS-88-5-677>
- Moon, B., Choi, Y.J., Jeong, M., Lee, D.H., Park, Y., Park, W.K., Nah, J., Kim, W., Shin, J.H., Kim, S.S., Kang, K., Cho, S., Seo, H.J., Baiz, R. (2020) Design of polarimeter payload for 12U CubeSat, *Proceedings of SPIE - CubeSats and Small-Sats for Remote Sensing IV*, 11505, 115050R. <https://doi.org/10.1117/12.2568509>
- Mukherjee, A., Agrawal, M. (2017) A global perspective of fine particulate matter pollution and its health effects. In: de Voogt, P. (Ed.), *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, Volume 244. Springer, Cham, Switzerland, pp. 5-51. https://doi.org/10.1007/398_2017_3
- National Air Emission Inventory and Research Center (NAIR) (2022) Air pollutant emission statistics in 2025. <https://www.air.go.kr/main.do>
- Remer, L.A., Davis, A.B., Mattoo, S., Levy, R.C., Kalashnikova, O.V., Coddington, O., Chowdhary, J., Knobelspiesse, K., Xu, X., Ahmad, Z., Boss, E., Cairns, B., Dierssen, H.M., Diner, D.J., Franz, B., Frouin, R., Gao, B.C., Ibrahim, A., Martins, J.V., Omar, A.H., Torres, O., Xu, F., Zhai, P.W. (2019a) Retrieving aerosol characteristics from the PACE mission, Part 1: Ocean Color Instrument, *Frontiers in Earth Science*, 7, 152. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00152>
- Remer, L.A., Knobelspiesse, K., Zhai, P.W., Xu, F., Kalashnikova, O.V., Chowdhary, J., Hasekamp, O., Dubovik, O., Wu, L., Ahmad, Z., Boss, E., Cairns, B., Coddington, O., Davis, A.B., Dierssen, H.M., Diner, D.J., Franz, B., Frouin, R., Gao, B.C., Ibrahim, A., Levy, R.C., Martins, J.V., Omar, A.H., Torres, O. (2019b) Retrieving aerosol characteristics from the PACE mission, Part 2: Multi-angle and polarimetry, *Frontiers in Environmental Science*, 7, 94. <https://doi.org/10.3389/fevs.2019.00094>
- Remer, L.A., Levy, R.C., Mattoo, S., Tanré, D., Gupta, P., Shi, Y., Sawyer, V., Munchak, L.A., Zhou, Y., Kim, M., Ichoku, C., Patadia, F., Li, R.R., Gassó, S., Kleidman, R.G., Holben, B.N. (2020) The Dark Target algorithm for observing the global aerosol system: Past, present, and future, *Remote Sensing*, 12(18), 2900. <https://doi.org/10.3390/rs12182900>
- Spurr, R.J.D. (2006) VLIDORT: A linearized pseudo-spherical vector discrete ordinate radiative transfer code for forward model and retrieval studies in multilayer multiple scattering media, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 102(2), 316-342. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2006.05.005>
- Stamnes, S., Baize, R., Bontempi, P., Cairns, B., Chemyakin, E., Choi,

- Y.J., Chowdhary, J., Hu, Y., Jeong, M., Kang, K.I., Kim, S.S., Liu, X., Loughman, R., MacDonnell, D., McCormick, M.P., Moon, B., Omar, A., Roithmayr, C.M., Sim, C.K., Sun, W., van Dienenhoven, B., Videen, G., Wasilewski, A. (2021) Simultaneous aerosol and ocean properties from the PolCube CubeSat polarimeter, *Frontiers in Remote Sensing*, 2, 729672. <https://doi.org/10.3389/frsen.2021.729672>
- Sunyer, J., Basagaña, X. (2001) Particles, and not gases, are associated with the risk of death in patients with chronic obstructive pulmonary disease, *International Journal of Epidemiology*, 30(5), 1138-1140. <https://doi.org/10.1093/ije/30.5.1138>
- Torres, O., Tanskanen, A., Veihelmann, B., Ahn, C., Braak, R., Bharatia, P.K., Veefkind, P., Levelt, P. (2007) Aerosols and surface UV products from Ozone Monitoring Instrument observations: An overview, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D24), D24S47. <https://doi.org/10.1029/2007JD008809>
- Wan, Z., Zhu, M., Chen, S., Zhang, H., Wang, H. (2016) Pollution: Three steps to a green shipping industry, *Nature*, 530, 275-277. <https://doi.org/10.1038/530275a>

Authors Information

- 이수빈 (부경대학교 공간정보시스템공학전공 석사과정 학생)
(subin_lee@pukyong.ac.kr)
- 정옥교 (부경대학교 공간정보시스템공학전공 조교수)
(ukkyo.jeong@pknu.ac.kr)
- 문봉곤 (한국천문연구원 우주과학탐사본부 본부장)
(bkmoon@kasi.re.kr)
- 최영준 (한국천문연구원 우주과학탐사본부 부원장)
(yjchoi@kasi.re.kr)
- 정민섭 (한국천문연구원 우주과학탐사본부 책임연구원)
(msjeong@kasi.re.kr)
- 박원기 (한국천문연구원 우주과학탐사본부 선임연구원)
(wkpark@kasi.re.kr)
- 김우진 (한국천문연구원 우주과학탐사본부 연구원)
(ehdsprkrp@kasi.re.kr)
- 류연철 (부산테크노파크 해양수산산업단 주임연구원)
(ycryu86@btp.or.kr)
- 정인회 (부산테크노파크 해양수산산업단 연구원)
(inhoe@btp.or.kr)