

Research Article

# Radiometric Tarp를 이용한 현장관측 기반의 차세대중형위성 1호 절대복사보정 사례 연구

전우진 <sup>1)</sup> · 염종민<sup>2)</sup> · 정재현<sup>3)</sup> · 진경욱<sup>4)</sup> · 한경수 <sup>5)\*</sup>

## A Case Study on Field Campaign-Based Absolute Radiometric Calibration of the CAS500-1 Using Radiometric Tarp

Woojin Jeon <sup>1)</sup> · Jong-Min Yeom<sup>2)</sup> · Jae-Heon Jung<sup>3)</sup> ·  
Kyung-Wook Jin<sup>4)</sup> · Kyung-Soo Han <sup>5)\*</sup>

**Abstract:** Absolute radiometric calibration is a crucial process in converting the electromagnetic signals obtained from satellite sensors into physical quantities. It is performed to enhance the accuracy of satellite data, facilitate comparison and integration with other satellite datasets, and address changes in sensor characteristics over time or due to environmental conditions. In this study, field campaigns were conducted to perform vicarious calibration for the multispectral channels of the CAS500-1. Two valid field observations were obtained under clear-sky conditions, and the top-of-atmosphere (TOA) radiance was simulated using the MODerate resolution atmospheric TRANsmision 6 (MODTRAN 6) radiative transfer model. While a linear relationship was observed between the simulated TOA radiance of tarps and CAS500-1 digital numbers (DN), challenges such as a wide field of view and saturation in CAS500-1 imagery suggest the need for future refinement of the calibration coefficients. Nevertheless, this study represents the first attempt at absolute radiometric calibration for CAS500-1. Despite the challenges, it provides valuable insights for future research aiming to determine reliable coefficients for enhanced accuracy in CAS500-1's absolute radiometric calibration.

**Keywords:** CAS500-1, Radiometric calibration, Vicarious calibration, MODTRAN 6 radiative transfer model, Radiometric tarp

Received November 23, 2023; Revised December 4, 2023; Accepted December 7, 2023; Published online December 31, 2023

<sup>1)</sup> 한국항공우주연구원 지상국기술연구부 연구원(Researcher, Department of Satellite Ground Station R&D Division, Korea Aerospace Research Institute, Daejeon, Republic of Korea)

<sup>2)</sup> 전북대학교 지구환경과학과 부교수(Associate Professor, Department of Earth and Environmental Sciences, Jeonbuk National University, Jeonju, Republic of Korea)

<sup>3)</sup> 한국항공우주연구원 지상국기술연구부 선임연구원(Senior Researcher, Department of Satellite Ground Station R&D Division, Korea Aerospace Research Institute, Daejeon, Republic of Korea)

<sup>4)</sup> 한국항공우주연구원 지상국기술연구부 책임연구원(Principal Researcher, Department of Satellite Ground Station R&D Division, Korea Aerospace Research Institute, Daejeon, Republic of Korea)

<sup>5)</sup> 부경대학교 지구환경시스템과학부 공간정보시스템공학전공 교수(Professor, Major of Spatial Information Engineering, Division of Earth Environmental Science, Pukyong National University, Busan, Republic of Korea)

\* Corresponding author: Kyung-Soo Han (kyung-soo.han@pknu.ac.kr)

Copyright © 2023 by The Korean Society of Remote Sensing. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**요약:** 절대복사검보정은 위성 센서에서 얻은 전자기 신호의 물리량 변환을 위해 절대복사보정 계수를 결정하는 작업으로 위성 데이터의 정확도 개선 및 다른 위성 데이터와의 비교 및 통합을 위해 수행되어야 한다. 또한, 위성 센서는 시간에 따른 센서 노후화나 환경 조건의 영향을 받아 초기 설정된 보정 계수가 변화할 수 있으므로 주기적으로 이러한 변화를 모니터링 하는 것이 필수적이다. 이 연구에서는 차세대중형위성 1호(CAS500-1)의 다중 분광 채널에 대한 vicarious calibration을 수행하기 위해 필드 캠페인을 수행하였다. 구름이 없는 맑은 날의 조건 하에 총 두 차례의 유효한 현장 관측 자료를 얻었으며, MODTRAN 6 복사전달모델을 활용하여 대기 상단(top-of-atmosphere, TOA) radiance를 모의하였다. 모의된 TOA radiance와 CAS500-1의 digital number (DN)는 선형성은 보였지만, CAS500-1 영상의 넓은 시야각과 saturation 발생으로 향후 변환 계수의 보완이 필요한 것으로 보인다. 하지만, 본 연구는 CAS500-1의 절대복사보정에 대한 첫 시도를 하였으며, 향후 높은 신뢰성을 가진 계수 결정을 목표로 하는 연구들에 유용한 정보를 제공할 것으로 기대된다.

**주요어:** 차세대중형위성 1호, 복사보정, 대리보정, MODTRAN 6 복사전달모델, Radiometric tarp

## 1. 서론

차세대중형위성 1호(CAS500-1)는 한반도 및 전 세계 지리를 촬영하는 목적으로 개발되어 2021년 3월에 발사되었다. CAS500-1은 Advanced Earth Imaging Sensor System-C (AEISS-C)라는 고해상도 다중 분광 광학 센서를 탑재하고 있으며, Panchromatic (PAN), Red, Green, Blue, Near Infrared (NIR) 5개의 밴드를 포함하고 PAN은 0.5 m, 다중 분광 채널(Multi-spectral, MS)은 2.0 m의 지상기준해상도(ground sampling distance, GSD)를 갖는다. 광학 위성의 radiometric calibration은 지구 관측을 위한 물리적 데이터의 활용성 확보 및 다른 지구 관측 위성과의 데이터 연속성을 확보하기 위해 필수적인 과정이다(Rees, 2013; Thuillier et al., 2003). 또한, 발사 후 겪는 우주 극 환경의 영향과 시간에 따른 센서 노후화로 인해 발사 전 설정된 복사보정 계수가 변화하게 됨으로(Liu et al., 2009; Rao et al., 1999; Markham and Helder, 2012), 발사 후 지속적으로 절대복사보정 계수의 변화를 모니터링 하는 것이 중요하다. 일반적으로 발사 후 복사보정에 활용되는 방법으로는 Onboard, cross, vicarious 그리고 lunar calibration 등이 존재한다(Bowen, 2002; Kerola et al., 2009; Seo, 2014).

본 연구에서는 반사도(Reflectance) 기반의 대리보정(vicarious calibration) 접근법을 사용하여 CAS500-1에 대한 절대복사검보정을 수행하기 위한 필드 캠페인 수행에 중점을 두고 있다. 이를 위해 필드 캠페인을 수행하고 MODerate resolution atmospheric TRANsmission 6 (MODTRAN 6) (Berk et al., 2014) 복사전달모델(radiative

transfer model, RTM)을 사용하여 대기 상단(top-of-atmosphere, TOA) radiance를 모의하였다. 모의된 TOA radiance와 CAS500-1의 digital number (DN)와 비교하였다.

## 2. 연구자료 및 방법

CAS500-1은 정상 궤도에서 2m의 GSD MS 영상과 0.5 m GSD PAN 영상을 제공하며, 위성 미션의 설계 수명은 4년이다. CAS500-1에 대한 상세한 사양은 Table 1에 나와 있다. Fig. 1은 CAS500-1의 spectral response function (SRF)을 보여준다.

CAS500-1은 높은 공간해상도와 좁은 관측폭으로 인해 동일 지역을 재방문 하는 주기가 매우 길어 bright desert, deep ocean, bright cloud에서 안정적인 reflectance를 얻는 것이 어렵다(Ycom et al., 2017). 이에 위성 관측

**Table 1.** Detailed specifications of CAS500-1

Mission characteristic	CAS500-1
Design lifetime	4 years
Orbit altitude	497.8 km
Swath width	≥ 12 km (at nadir)
Radiometric resolution	12 bit
Ground sample distance	Pan: 0.5 m (altitude 497.8 km) MS: 2 m (altitude 497.8 km)
Spectral bands (Central wavelength (nm))	Pan: 677 nm / Blue: 486.5 nm / Green: 561.5 nm / Red: 659 nm / NIR: 830.5 nm

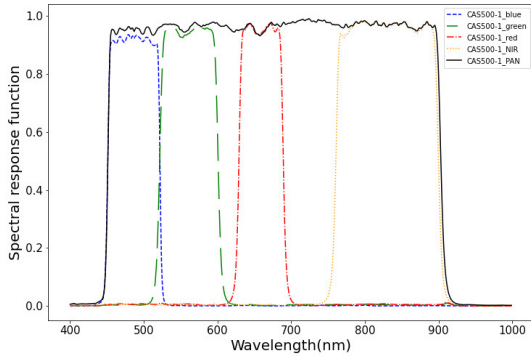


Fig. 1. CAS500-1 spectral response function.

시 다양한 반사도 값을 확보하기 위해, 본 연구에서는 reflectance를 3%에서 50%까지 다양한 값을 가지는 15 × 15 m 크기의 네 가지 지상 타프(tarp)를 이용하였다. 필드 캠페인은 대한민국 대전(Fig. 2a)에 위치한 한국항공우주연구원에서 수행되었다. Fig. 2(b)는 한국항공우주연구원에 설치된 타프를 나타낸다. CAS500-1의 공간 해상도를 고려하여 최소 6 m 이상의 간격을 두고 타프를 설치하였으며, 주변 배경 픽셀에 의해 방해받을 수 있

는 가장자리 픽셀을 제외한 중심 픽셀을 유효 픽셀로 선택하여 인접 효과를 최소화하였다. CAS500-1의 경우 타프의 수평방향 최대 관측 픽셀 수는 7개이며, 인접 효과를 제외한 유효 셀의 개수는 5 × 5 픽셀을 가진다.

신뢰할 수 있는 표면 반사도 값을 얻기 위해 구름이 없는 맑은 하늘과 nadir 조건에서 관측을 수행하는 것이 가장 좋으나 현실에서는 맑은 날씨 및 nadir 조건의 위성 영상 취득에 한계가 있다. 따라서 맑은 날씨와 대기 조건을 최우선으로 하여 여러 번의 필드캠페인을 수행하였다. 하지만 흐린 날씨와 대기 조건으로 인해 유효한 영상을 얻는데 제한적이었다. Table 2는 필드 캠페인 중 획득한 유효한 CAS500-1 이미지에 대한 기하 정보를 보여준다. 본 연구에서는 일곱 번의 필드캠페인 현장 관측을 수행하여 두 개의 유효한 현장관측자료를 획득하였다. 획득한 두 자료의 관측날짜는 2023년 5월 9일 및 2023년 5월 25일로 두 자료 모두 위성 천정각(Viewing Zenith Angle, VZA)이 약 20°로 다소 넓은 관측각이다.

Vicarious calibration을 위해 본 연구는 복사전달모델로 MODTRAN 6를 이용하였다. Fig. 3은 MODTRAN 6

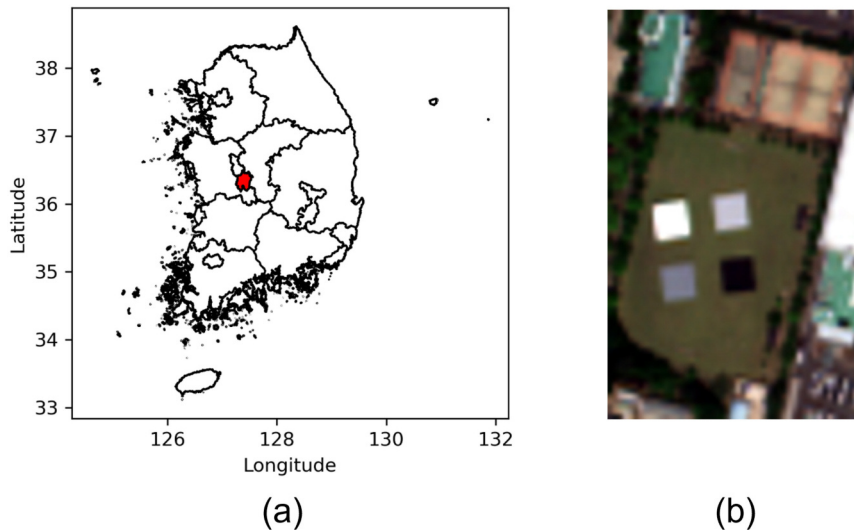
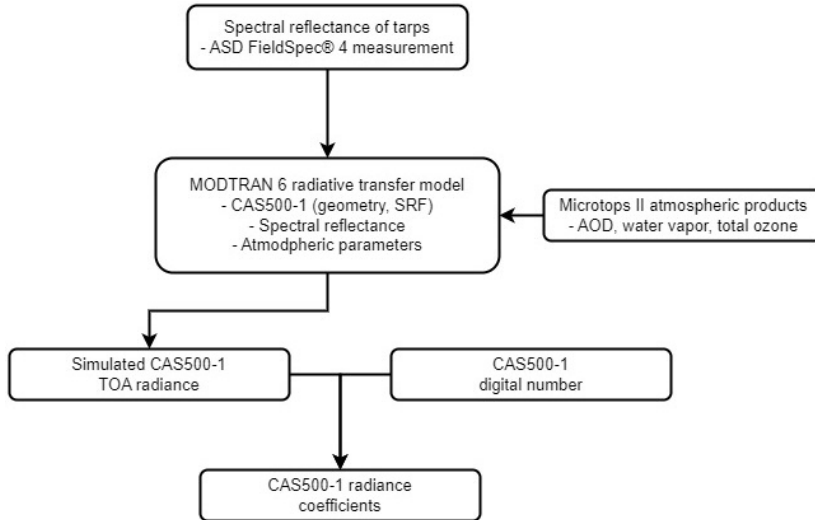


Fig. 2. This is a study area. (a) Daejeon, Republic of Korea. (b) Cropped CAS500-1 MS image of the tarps area in the field campaign site.

Table 2. Selected geometric conditions of CAS500-1 imagery for radiometric calibration

Date	Satellite	Site	Observed Time (UTC)	Solar Zenith	Solar Azimuth	Viewing Zenith	Viewing Azimuth
2023-05-09	CAS500-1	KARI	02:08:41	25.379	125.815	22.403	262.201
2023-05-25	CAS500-1	KARI	01:50:49	23.557	120.431	19.823	79.570



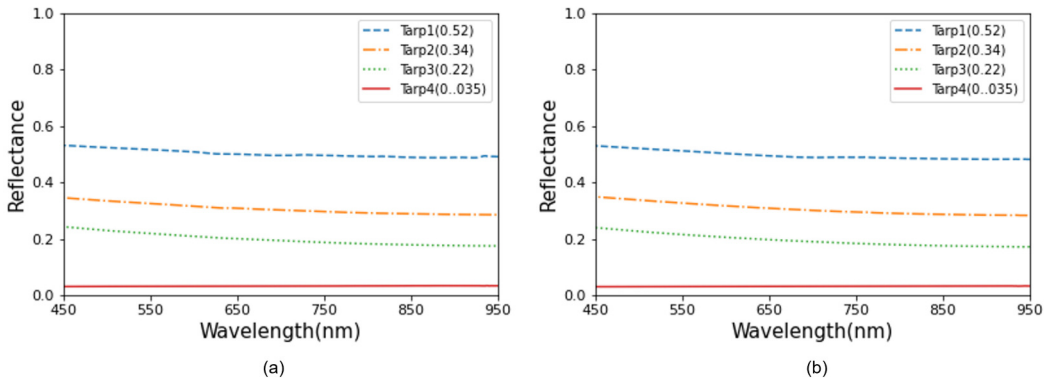
**Fig. 3.** Flowchart of vicarious radiometric calibration of CAS500-1 using the MODTRAN 6 radiative transfer model and related input parameters.

를 활용한 CAS500-1의 vicarious radiometric calibration 흐름도를 나타낸다. 입력 자료로는 ASD FieldSpec® 4 hyperspectral radiometer를 사용하여 타프의 reflectance와 Microtops II® 태양광도계(Sunphotometer)와 오존광도계(Ozonometer)를 통해 측정된 대기 관측 자료가 사용되었다. 이를 통해 CAS500-1 MS가 수신하는 TOA radiance를 추정하고 CAS500-1의 DN과 비교하여 DN과 radiance의 coefficient를 결정하였다.

### 3. 연구결과 및 토의

#### 3.1. ASD FieldSpec® 4를 활용한 타프 4종의 Hyperspectral Reflectances

CAS500-1의 스펙트럼 범위(450–900 nm)를 포함하는 타프 4종의 reflectance 값은 ASD FieldSpec® 4 hyperspectral radiometer를 통해 측정되었다. 이 장비는 350 nm부터 2,500 nm까지의 넓은 스펙트럼 범위를 높은 신뢰도로 측정할 수 있어 위성 영상 센서의 vicarious calibration에 많이 사용되고 있으며(Teillet et al., 2001; de Vries et al., 2007; Biggar et al., 2003), ASD FieldSpec® 4의 분광해상도는 350 nm에서 1,000 nm까지는 3 nm, 1,000 nm부터



**Fig. 4.** Hyperspectral reflectance curves corresponding to the CAS500-1 spectral range (450–900 nm) measured by the ASD FieldSpec® 4 radiometer. (a) 9 May 2023. (b) 25 May 2023.

2,500 nm까지는 10 nm이다.

Reflectance 측정 전에는 radiometer의 정확성을 보장하기 위해 downwelling irradiance 최적화와 dark current 보정 과정이 수행되며 이 과정은 또한 ASD FieldSpec® 4에서 측정된 DN을 reflectance ( $W\ cm^{-2}\ nm^{-1}\ sr^{-1}$ )로 변환하는 과정이다(Yeom et al., 2018). 타프를 측정할 때, 기기 보정을 위해 Lambertian 반사도로 약 99%에 가까운 white panel ( $30.5 \times 30.5\ cm$ )을 타프 4종의 가운데에 두고 타프의 종류가 바뀔 때마다 white panel을 활용하여 정기적으로 보정하여 사용하였다. ASD FieldSpec® 4의 기하 조건 및 CAS500-1 기하 조건의 차이로 인한 Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF)을 정규화하고 감소시키기 위해 ASD 관측각을 nadir 방향으로 주의하여 측정하였다(Clark et al., 2011). 각 타프마다 9 지점을 측정하였으며, 한 지점 당 5개의 데이터가 저장되어 타프당 45개의 데이터 수집이 이뤄진다. 또한, 대기 및 기하적 불일치를 줄이기 위해 CAS500-1의 통과 시간을 최대한 고려하여 통과 시각 전과 후 30분 이내에 측정하였다. 측정된 타프 4종의 스펙트럼 반사율 곡선에서 관찰된 안정적인 패턴(Fig. 4)은 MODTRAN 6 모의를 위한 기준 표면 반사율로 적합함을 나타낸다.

### 3.2. Microtops II® Sunphotometer 및 Ozonometer로 측정한 대기 조건

대기 조건은 Microtops II® Sunphotometer 및 Ozonometer를 사용하여 맑은 날씨 조건 하에서 측정되었다. 이 장비들은 위성 영상 센서의 vicarious calibration에 많이 사용되었다(Thome et al., 2008; Liu et al., 2009; Teillet et al., 2001; Sridhar et al., 2013). Aerosol optical depth (AOD), water vapor, total ozone을 포함한 측정 요소들은 MODTRAN 6 모델을 실행하는데 입력 파라미터(Parameter)로 사용된다.

Sunphotometer는 AOD와 water vapor를 측정하기 위한 가시 및 근적외선(NIR) 채널(440, 675, 870, 936 및 1,020 nm)을 가지고 있다. Ozonometer는 total ozone을 측정하기 위한 자외선 B (Ultraviolet B) 채널(305, 312, 320 nm)을 가지고 있다. CAS500-1의 TOA radiance를 결정하는데 사용되는 MODTRAN 6 모델은 550 nm에서의 AOD 값을 요구한다(Pust and Shaw, 2011). 그러나 Sunphotometer는 550 nm를 지원하지 않아 해당 연구에서는 Ångström

지수(Ångström, 1964)를 사용하여 550 nm의 AOD 값을 추정하였다. Ångström 지수는 AOD의 파장에 따른 의존성을 나타내는 지표로 에어로졸 입자 크기와 관련이 있으며 파장과 AOD의 관계성이 역관계임을 나타내는 경험적인 함수이다(Obata et al., 2017). 두 파장에 대한 AOD 값을 얻으면 Ångström 방정식(식 1)을 통해 원하는 파장대의 AOD를 추정할 수 있다.

$$\tau_i = \tau_{\lambda_0} \cdot (\lambda/\lambda_0)^{-\alpha} \quad (1)$$

여기서  $\tau_i$ 는 파장  $\lambda$ 에서의 AOD 값을 나타내고  $\tau_{\lambda_0}$ 는 기준 파장  $\lambda_0$ 에서의 AOD 값을 나타낸다.  $\alpha$ 는 Ångström 파라미터이며 식(2)와 같다.

$$\alpha = -(\ln \frac{\tau_1}{\tau_2}) / (\ln \frac{\lambda_1}{\lambda_2}) \quad (2)$$

여기서  $\tau_1$ 과  $\tau_2$ 는 서로 다른 파장  $\lambda_1$ 과  $\lambda_2$ 에서의 AOD 값을 나타낸다. 본 연구에서는 440 nm와 675 nm에서의 AOD 값을 활용하여 Ångström 파라미터를 결정하였으며, 각 파장 별 AOD 값은 위성이 지나가는 시각 전, 후 5분 동안 측정된 10개의 자료(1 set)의 최대, 최소 값을 제외한 평균값을 활용하였다.

Table 3은 MODTRAN 6의 대기 입력 파라미터로 활용된 water vapor ( $g\ cm^{-2}$ ), total ozone (atm-cm), AOD<sub>550 nm</sub>의 값을 나타낸다.

**Table 3.** Measured water vapor, total ozone, and aerosol optical depth (AOD) using the Microtops II® Sunphotometer and Ozonometer (Solar Light Inc., Glenside, PA, USA)

Date	Water vapor ( $g\ cm^{-2}$ )	Total ozone (atm-cm)	AOD <sub>550 nm</sub>
2023-05-09	0.987	0.2892	0.5619
2023-05-25	1.440	0.5179	0.3631

### 3.3. CAS500-1의 DN to Radiance

마지막으로 본 연구에서는 2023년 5월 9일과 2023년 5월 25일에 대한 MS 밴드와 PAN에서 CAS500-1의 DN과 MODTRAN 6에서 모의된 TOA radiance 간의 관계를 확인하였다(Figs. 5, 6). 두 차례의 현장관측 모두 모의된 TOA radiance와 CAS500-1의 DN 값이 각 스펙트럼 밴드에서 선형성을 보였다. 그러나 CAS500-1의 영상에서 발생하는 saturation 및 넓은 시야각으로 인한 BRDF

영향으로 신뢰도가 높은 DN과 radiance 간의 변환 계수를 도출하는 것은 한계가 있었다. 특히, 넓은 시야각은 환경의 다양한 조건에 따라 반사되는 빛의 양에 영향을 주어 정확한 계수 도출을 어렵게 만든다.

본 연구의 결과는 saturation 및 BRDF의 영향으로 절대복사보정 계수 산출을 위한 적절한 샘플을 얻는데 한

계가 존재하였지만, CAS500-1 위성의 성능을 이해하고 향후 절대복사보정에 대한 기초 정보를 제공하였다. 앞으로의 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위한 절대복사보정 접근 방식을 개발 및 보완하는 것이 중요한 것으로 판단된다.

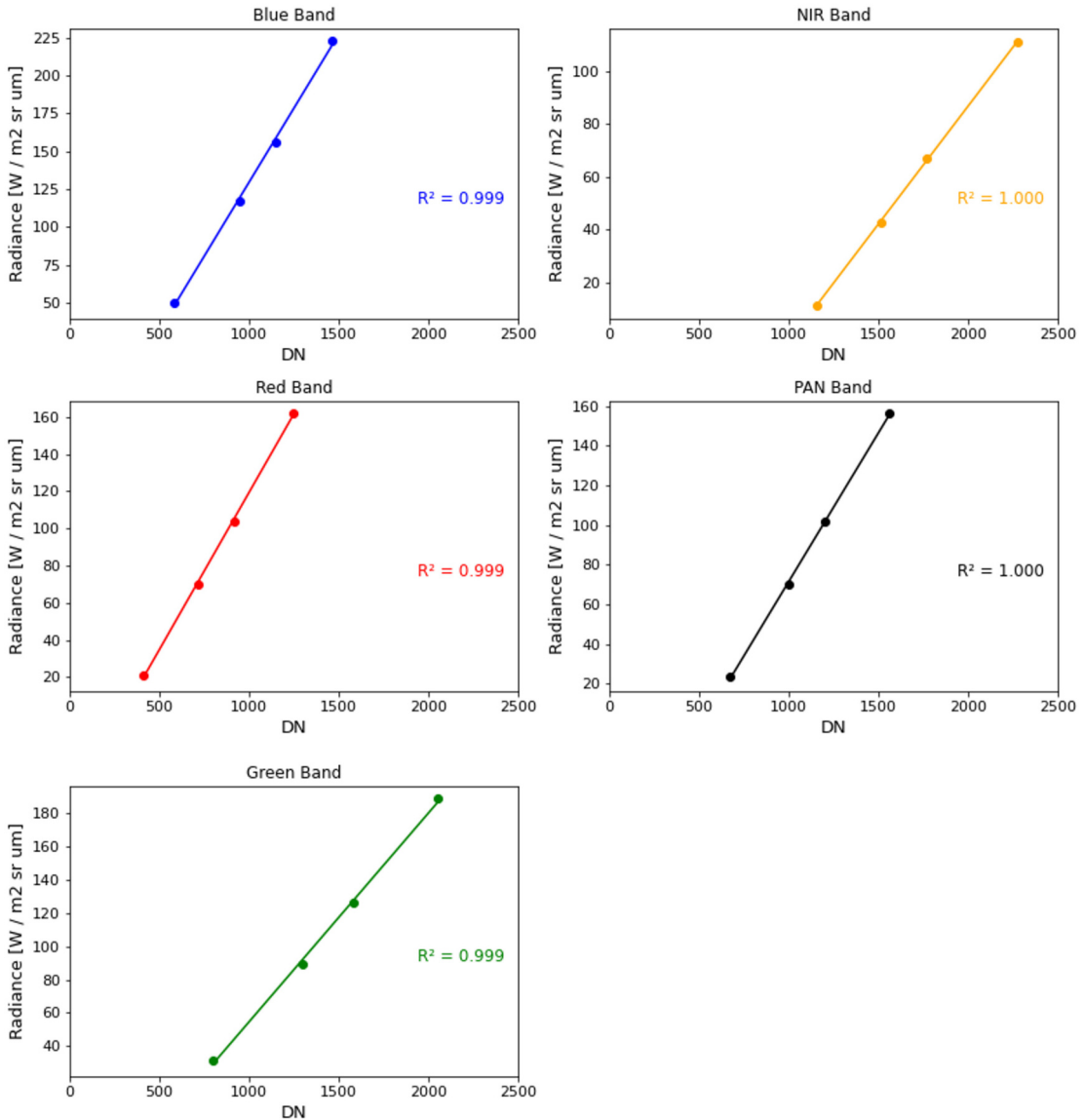


Fig. 5. Scatterplots between CAS500-1 DN and simulated TOA radiance for all multispectral bands acquired on 9 May 2023.

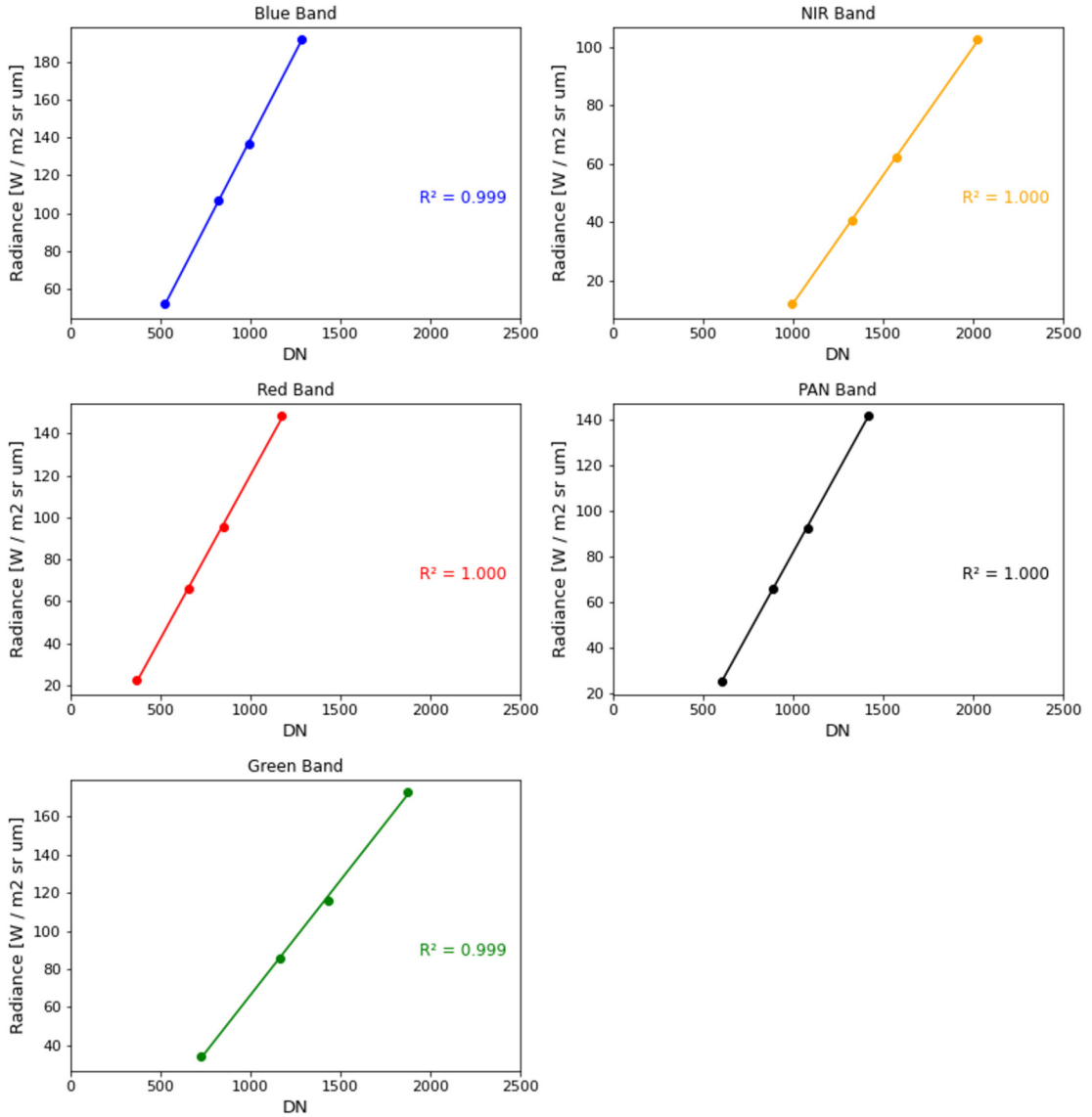


Fig. 6. Scatterplots between CAS500-1 DN and simulated TOA radiance for all multispectral bands acquired on 25 May 2023.

#### 4. 결론

본 연구에서는 radiometric tarp를 활용하여 현장관측을 통해 CAS500-1 위성에 대한 절대복사보정을 시도하였다. DN to radiance의 선형성을 확인하였으나, saturation 및 BRDF 효과 등으로 인해 고도의 정확성과 안정성을 요하는 위성 보정에 적절한 샘플을 확보하지 못해 적절한 보정계수를 도출하지 못하였다. 향후 연구에서는 더 많은 유효관측 데이터를 확보하고 측정 조건을 고려하

여 더 정확하고 안정적인 계수 결정을 목표로 연구를 진행해야 할 것으로 판단된다. 특히, 좁은 시야각에서의 현장 관측을 통해 BRDF 효과를 보다 정확히 모델링하고, 계수 결정의 신뢰성을 향상시키는 데 중점을 둘 필요가 있다. 또한, 다른 위성과의 교차 검보정을 통해 계수의 신뢰성을 높여야 할 필요성도 보인다. 그러나 이 연구는 CAS500-1의 절대복사보정에 대한 첫 시도이며, radiometric tarp를 활용한 현장관측 기반의 CAS500-1 절대복사보정 계수 산출에 대한 초기 결과라는 점에서의

의가 있다. 또한, 향후 CAS500-1의 높은 신뢰성을 가진 보정 계수 결정을 목표로 하는 연구들에 유용한 정보를 제공할 것으로 기대된다.

## 사사

이 논문은 한국항공우주연구원 국가위성운영 및 검보정 인프라 고도화 사업(과제번호: SR23451)의 지원을 받아 수행되었습니다.

## Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

## References

Ångström, A., 1964. The parameters of atmospheric turbidity. *Tellus*, 16(1), 64–75. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v16i1.8885>

Berk, A., Conforti, P., Kennett, R., Perkins, T., Hawes, F., and van den Bosch, J., 2014. MODTRAN<sup>®</sup> 6: A major upgrade of the MODTRAN<sup>®</sup> radiative transfer code. In *Proceedings of the 2014 6th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHI SPERS)*, Lausanne, Switzerland, June 24–27, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/whispers.2014.8077573>

Biggar, S. F., Thome, K. J., and Wisniewski, W., 2003. Vicarious radiometric calibration of EO-1 sensors by reference to high-reflectance ground targets. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(6), 1174–1179. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2003.813211>

Bowen, H. S., 2002. Absolute radiometric calibration of the IKONOS sensor using radiometrically characterized stellar sources. *International Archives*

*of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 34(1), 7–13. <https://www.isprs.org/proceedings/XXXIV/part1/paper/00000.pdf>

Clark, B., Suomalainen, J., and Pellikka, P., 2011. The selection of appropriate spectrally bright pseudo-invariant ground targets for use in empirical line calibration of SPOT satellite imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(4), 429–445. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.02.003>

de Vries, C., Danaher, T., Denham, R., Scarth, P., and Phinn, S., 2007. An operational radiometric calibration procedure for the LANDSAT sensors based on pseudo-invariant target sites. *Remote Sensing of Environment*, 107(3), 414–429. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.09.019>

Kerola, D. X., Bruegge, C. J., Gross, H. N., and Helmlinger, M. C., 2009. On-orbit calibration of the EO-1 Hyperion and Advanced Land Imager (ALI) sensors using the LED Spectrometer (LSpec) automated facility. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(4), 1244–1255. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2008.2008904>

Liu, C. C., Kamei, A., Hsu, K. H., Tsuchida, S., Huang, H. M., Kato, S. et al., 2009. Vicarious calibration of the Formosat-2 remote sensing instrument. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(4), 2162–2169. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2009.2033179>

Markham, B. L., and Helder, D. L., 2012. Forty-year calibrated record of earth-reflected radiance from LANDSAT: A review. *Remote Sensing of Environment*, 122, 30–40. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.06.026>

Obata, K., Tsuchida, S., Yamamoto, H., and Thome, K., 2017. Cross-calibration between ASTER and MODIS visible to near-infrared bands for improvement of ASTER radiometric calibration. *Sensors*, 17(8), 1793. <https://doi.org/10.3390/s17>



- 081793
- Pust, N. J., and Shaw, J. A., 2011. Comparison of skylight polarization measurements and MODTRAN-P calculations. *Journal of Applied Remote Sensing*, 5(1), 053529. <https://doi.org/10.1117/1.3595686>
- Rao, C. N., Chen, J., Sullivan, J., and Zhang, N., 1999. Post-launch calibration of meteorological satellite sensors. *Advances in Space Research*, 23(8), 1357–1365. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(99\)00284-7](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(99)00284-7)
- Rees, G., 2013. *Physical principles of remote sensing* (3rd ed.). Cambridge University Press. <https://www.cambridge.org/9781107004733>
- Seo, S. B., 2014. Relative compensation method for degradation of visible detectors using improved direct histogram specification. *Electronics Letters*, 50(6), 446–447. <https://doi.org/10.1049/el.2013.3900>
- Sridhar, V., Mehta, K. B., Prajapati, R., Babu, K., Suthar, N., and Shukla, A., 2013. Absolute vicarious calibration of OCM2 and AWiFS sensors using a reflectance-based method over land sites in the Rann of Kutch, Gujarat. *International Journal of Remote Sensing*, 34(16), 5690–5708. <https://doi.org/10.1080/01431161.2013.792967>
- Teillet, P. M., Fedosejevs, G., Gauthier, R. P., O’neill, N. T., Thome, K. J., Biggar, S. F. et al., 2001. A generalized approach to the vicarious calibration of multiple Earth observation sensors using hyperspectral data. *Remote Sensing of Environment*, 77(3), 304–327. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00211-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00211-5)
- Thome, K. J., Arai, K., Tsuchida, S., and Biggar, S. F., 2008. Vicarious calibration of ASTER via the reflectance-based approach. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(10), 3285–3295. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2008.928730>
- Thuillier, G., Hersé, M., Labs, D., Foujols, T., Peetermans, W., Gillotay, D. et al., 2003. The solar spectral irradiance from 200 to 2400 nm as measured by the SOLSPEC spectrometer from the Atlas and Eureca missions. *Solar Physics*, 214, 1–22. <https://doi.org/10.1023/A:1024048429145>
- Yeom, J. M., Hwang, J., Jung, J. H., Lee, K. H., and Lee, C. S., 2017. Initial radiometric characteristics of KOMPSAT-3A multispectral imagery using the 6S radiative transfer model, well-known radiometric tarps, and MFRSR measurements. *Remote Sensing*, 9(2), 130. <https://doi.org/10.3390/rs9020130>
- Yeom, J. M., Ko, J., Hwang, J., Lee, C. S., Choi, C. U., and Jeong, S., 2018. Updating absolute radiometric characteristics for KOMPSAT-3 and KOMPSAT-3A multispectral imaging sensors using well-characterized pseudo-invariant tarps and microtops II. *Remote Sensing*, 10(5), 697. <https://doi.org/10.3390/rs10050697>