

대전 지역 UV-A 자외선 복사량을 이용한 GK-2A와 HIMAWARI 위성의 구름 광학 두께 비교

이동규¹ · 김창기^{2*} · 염성수³ · 김현구² · 강용혁²

¹연세대학교 지구전문대학부 대기과학 전공, 석사과정

²한국에너지기술연구원 신재생자원지도연구실, 책임연구원

³연세대학교 지구전문대학부 대기과학 전공, 교수

Comparison of Cloud Optical Thickness of GK-2A and HIMAWARI Satellites by Using UV-A Irradiance in Daejeon

Lee Dong Kyu¹ · Kim Chang Ki^{2*} · Yum Seong Soo³ · Kim Hyun-Goo² · Kang Yong-Heack²

¹MS Candidate, Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University

²Principal Researcher Ph.D., New and Renewable Energy Resource Map Laboratory, Korea Institute of Energy Research

³Professor, Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University

*Corresponding author: cckim@kier.re.kr

Abstract

Cloud optical thickness, also known as cloud optical depth, is an indicator that quantitatively shows the attenuation effect of solar radiance by clouds in the atmosphere and is calculated through statistical models or the radiative transfer model of each satellite using its observation data and ancillary data. Therefore, even for observations performed at the same location and time, the retrieved COT differ from satellite to satellite. Thus, this study aims to verify the retrieved COT of the GK-2A and HIMAWARI satellites, which are Korean and Japanese geostationary satellites, respectively, covering the Korean Peninsula. To verify the COT data, the method used by Qin et al. (2019) was used, where the COT was indirectly verified by calculating downward radiation using satellite-retrieved data such as COT, cloud phase, and cloud top pressure as parameters and comparing this with ground-observed radiation. In this study, a radiative transfer model, libRadtran 2.0.4, was used to calculate UV-A radiation and compare it with observed data in Daejeon as the true value for the cloud phase retrieved from each satellite. When comparing the COT from both satellites directly, the values from HIMAWARI tended to be larger than the data from GK-2A. A comparison of the UV-A radiation shows that the observed values are seemingly larger than the satellite results, indicating that both satellites may overestimate the cloud optical depth. Additionally, when both satellites were estimated to have the same cloud phase, HIMAWARI showed better parameters for RMSE and MAE, whereas GK-2A was better when GK-2A and HIMAWARI had different cloud phase estimates. By comparing the freezing level from the vertical profile and the cloud top height from each satellite, the actual cloud phase was estimated, which showed that GK-2A had better performance in estimating cloud phases.

Keywords: 자료 분석(Data analysis), 구름 광학 두께(Cloud optical thickness), 복사전달모델(Radiative transfer model)

OPEN ACCESS



Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.43, No.3, pp.87-98, June 2023
<https://doi.org/10.7836/kjes.2023.43.3.087>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 30 March 2023

Revised: 4 May 2023

Accepted: 15 May 2023

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

기호 및 약어 설명

- AOD : Aerosol Optical Depth, 에어로졸 광학 깊이
- COT : Cloud Optical Thickness, 구름 광학 두께
- CTP : Cloud Top Pressure, 운정 고도(hPa)
- GHI : Global Horizontal Irradiance, 수평면 전일사량
- KST : Korea Standard Time, 한국 표준시
- MAE : Mean Absolute Error, 평균 절대 오차
- MBE : Mean Biased Error, 평균 편향 오차
- RTM : Radiative Transfer Model, 복사 전달 모델
- RMSD : Root Mean Squared Difference, 평균 제곱근 차
- RMSE : Root Mean Squared Error, 평균 제곱근 오차
- R_{TOA} : Radiation at Top of Atmosphere, 대기 밖 복사량($W m^{-2}$)
- R_{VIS} : Radiation of Visible Wavelength Channel, 가시채널 복사량($W m^{-2}$)
- R_{NIR} : Radiation of Near Infra-red Wavelength Channel, 근적외선 채널 복사량($W m^{-2}$)
- R_c : Cloud Reflectivity, 구름 반사도
- r : Correlation Coefficient, 상관 계수
- STD : Standard Deviation, 표준편차
- T_c : Cloud Transmissivity, 구름 투과도

1. 서론

IPCC 6차 평가 보고서에 따르면 태양 에너지는 미세먼지와 같은 에어로졸보다 구름에 의하여 4배 이상 크게 감쇄하며, 장기간의 변동성을 고려할 경우 구름의 감쇄 효과는 에어로졸에 비해 최대 8배 이상 증가함을 보였다¹⁾. 따라서 태양복사 에너지의 감쇄 효과에 대한 구름의 불확실성이 높으므로 태양에너지 자원량을 평가하고 일사량 등을 예측함에 있어 구름의 감쇄 효과를 정량적으로 수치화 하고 이를 검증하는 단계가 필수적이다²⁾. 구름 감쇄 효과는 구름 광학 두께(Cloud Optical Depth, COT)로 나타내며, Sunphotometer나 Skyradiometer 등의 장비로 지상에서 직접적으로 관측할 수 있는 에어로졸 광학 깊이(Aerosol Optical Depth, AOD)와는 달리 COT를 지상에서 직접 측정할 수 있는 관측 장비가 없다. 이에 대한 대안으로 위성 영상으로부터 COT를 산출하게 된다. 일반적으로 위성영상 산출물은 특정 파장대에 따른 복사 휘도(Radiance)와 같은 물리량을 관측한 Level 1B (L1B) 자료와 기온, 수증기 연직분포와 같은 보조 자료를 이용하여 복사 전달 모델로부터 추정된 Level2 (L2)로 구분된다. COT는 이 중 L2에 포함 되므로 동일 파장대에서 동일 위치를 동일 시간에 관측하더라도 산출 알고리즘에 따라 COT는 변하게 된다.

최근까지 다양한 위성의 COT 자료를 검증하기 위한 연구는 Qin et al. (2019)²⁾나 Turner and Eloranta (2008)³⁾ 등 여러 연구를 통해 계속되어 왔으나, 2019년도에 한국의 정지궤도위성인 천리안 2호 기상 위성(GK-2A)이 임무를 시작한 이후로 GK-2A에서 산출되는 COT의 정확도에 대한 검증 연구는 수행된 바 없다. 따라서 본 연구에서는 GK-2A의 COT에 대한 정확도를 검증하고자 Qin et al. (2019)²⁾에서 제시한 연구 방법을 사용하였다. 해당 연구에서도 지상에서 COT를 직접 관측 할 수 없기 때문에 위성 산출물과 단순 회귀 모형을 이용하여 지표면에 도달하는 수평면 전일사량(GHI)을 계산하고 이를 지상 관측값과 비교하였는데, 본 연구에서는 구름 미세 물리 특성의 비선형성을 반영하기 위하여 복사전달모형을 활용한 자외선 복사량을 계산하였고, 이를 지상 관측값과 비교하여 간접적으로 평가하고자 한다. 앞서 설명하였듯이 COT 산출물의 정확도는 산출 알고리즘에 의존하므로 동일 지역, 동일 시간에 동일한 파장역으로 관측업무를 수행하는 일본의 정지궤도 위성 HIMAWARI-8의 COT도 GK-2A와 동일한 방법으로 분석하여 산출 알고리즘에 따른 차이를 파악하고자 한다.

2. 연구 자료

2.1 위성 자료

대한민국 국가기상위성센터와 일본 JAXA HIMAWARI 모니터링 시스템에서 각각 제공하는 GK-2A와 HIMAWARI 위성영상 L2 산출물 중 운정 고도(Cloud Top Pressure, CTP), 구름 광학 두께(Cloud Optical Thickness, COT), 운상(Cloud Phase)을 사용하였다. 두 위성 산출물의 공간해상도가 2 km이므로 한국에너지기술연구원(36.383°N, 127.359°E)과 가장 근접한 지점을 선택하였다. 2021년 3월 1일부터 2022년 2월 28일까지 매일 07 KST부터 20 KST까지 10분 간격으로 생산된 자료를 활용하였으며 산출물에서 함께 제공하는 품질 플래그를 통해 자료를 검정하였다.

2.1.1 현업 위성의 COT 산출 과정 소개

본 연구의 목표가 각 위성에서 산출된 COT 자료의 검증이므로 두 위성에서 관측된 위성영상으로부터 COT를 산출하는 과정을 확인할 필요가 있다. Fig. 1은 COT 자료의 산출 과정을 나타낸 순서도로서 먼저 위성에서 관측을 통해 구름이 없는 격자점인지(Clear Sky) 구름이 있는 격자점(Cloudy Sky)인지 확인하여 유효한 격자점(Valid Pixel)인지를 판단한다. 유효한 격자점에 대하여 위성에서 관측한 여러 파장대별 복사 휘도를 사용하여 구름 투과도와 구름 반사도 등을 계산하고, 운정 고도와 운상 등 보조 자료와 함께 COT 산출 알고리즘에 입력된다. COT 산출 알고리즘은 위성영상 처리속도 등을 고려할 때 복사 전달 모델을 통해 미리 COT에 대한 조건표(Look-Up Table)를 작성하여 입력된 운정 고도, 운상, 구름 투과도 및 구름 반사도에 해당하는 COT 값을 산출하도록 구성되어 있다^{4,5)}.

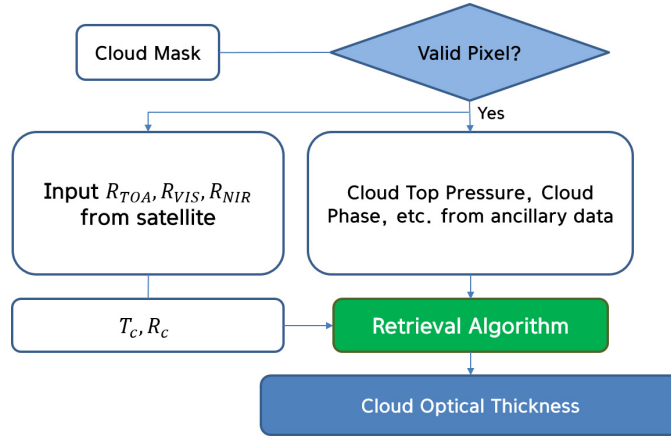


Fig. 1 Typical flow chart for COT retrieval of GK-2A and HIMAWARI satellites

2.2 관측 자료

관측 자료로는 UV-A (Ultraviolet-A) 영역(300 ~ 400 nm 파장대) 자외선 복사량 자료를 사용하였는데, 해당 영역의 자외선은 파장이 더 긴 가시광선 영역에서 보다 대기 중의 수증기나 구름 입자에 의한 흡수가 작고, UV-B (Ultraviolet-B)나 UV-E (Ultraviolet-E)영역에 비해 오존에 의한 흡수율이 작아 복사 전달 모델로부터 자외선 복사량을 산출할 때 외부 영향이 작을 것으로 사료된다. UV-A 자외선 복사량은 한국에너지기술연구원 에서 EKO사의 MS-701 분광강도계로 관측하였고, 분석에 사용한 시간대는 위성자료 수집시간과 동일하도록 설정하였다.

2.3 복사 모델 기반 자외선 복사량

본 연구에서 사용된 복사 전달 모델은 LibRadtran 2.0.4⁶⁾ 버전으로, Emde et al. (2015)⁷⁾에서 이전 버전인 2.0.1 버전에 대한 검증이 진행 된 바 있으며, 복사량을 계산하고 모의하는 데에 있어 국내외 여러 연구자들에 의해 흔히 사용되는 모델이다⁸⁾. 입력 변수로서 위성 관측 시간에 해당되는 태양 천정각, 방위각, 운정 고도, 운 상, COT를 사용하여 UV-A 자외선 복사량을 계산하였다.

3. 연구 방법

COT 산출 알고리즘에서 운정 고도, 운상 등 입력 변수의 민감도를 확인하기 위하여 우선 각 위성 산출물 중 운상에 따라 GK-2A와 HIMAWARI 위성에서 산출되는 COT 산출물을 분류하였고, 개별 특성을 분석하였다. 특히, 통계적 유의성을 높이기 위하여 Fig. 2와 같이 산포도에서 두 위성의 COT 간 선형 회귀로부터 95% 신뢰 구간을 설정하여 이를 기준으로 이상치 자료군(Outlier Data)과 정상치 자료군(Normal Data)로 구분하였다. 위와 같이 분류된 운상과 자료군에 대해서 Qin et al. (2019)²⁾에서 사용된 연구 방법을 차용하여 두 위성으로부터 산출된 COT의 정확도를 UV-A 자외선 복사량을 이용하여 간접적으로 평가하였다. 그리고 운상에 따른

COT 특성과 UV-A 자외선 복사량을 개별 비교하고 평가함에 있어 평균, 표준편차, 결정계수, RMSE, MAE와 MBE 등의 지표를 사용하였다.

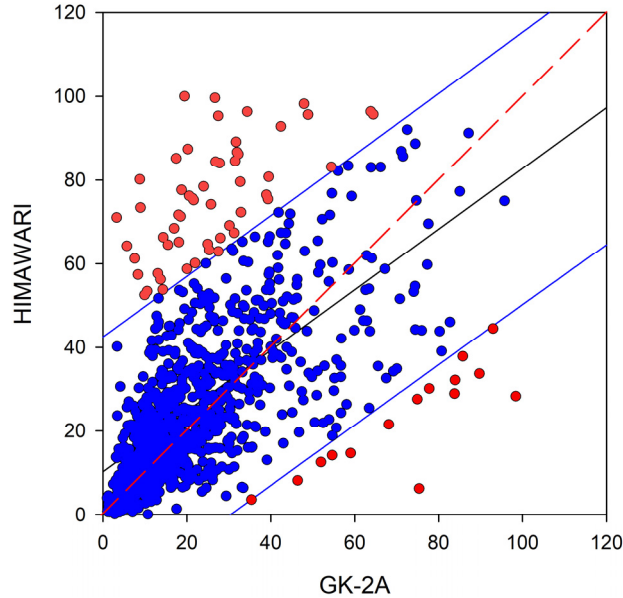


Fig. 2 Example plot of COT data: normal data (blue circle), outlier data (red circle). Black and blue solid line indicates simple linear regression line and 95% confidence interval, respectively. The perfect regression is given as red dashed line

4. 결과

두 위성의 COT 산출물의 평균, 표준편차, 결정계수와 RMSD를 이용하여 운상에 따른 COT 특성을 비교하였고, 각 분류 유형에 대한 COT 산출물의 정확도는 결정계수, RMSE, MAE와 MBE를 이용하여 평가하였다.

4.1 운상에 따른 L2 산출물 자료 수

운상을 구분함에 있어 GK-2A와 HIMAWARI는 동일하게 액체상(Liquid Phase), 얼음상(Ice Phase)로 구분하고 위성영상으로부터 상을 특정할 수 없는 경우 불확실 자료군(Uncertain Data)으로 구분하였다^{9,10}. 불확실 자료군은 일반적으로 운상 구분과정에서 적운과 같이 구름 내에 액체상과 얼음상이 동시에 존재하는 혼합상(Mixed Phase)일 때 또는 다층운(Multi-Layer Cloud)이 발생하여 운상을 하나로 구분하기 어려운 경우로 구성된다. 다만, L2 산출물에서는 불확실 자료군으로 구분된 원인은 제공하지 않으므로 본 연구에서는 불확실 자료군은 이후 분석에서 제외하였다. 운상에 따라 L2 산출물의 자료수를 분류한 결과를 Table 1에 나타내었다. 품질 관리가 된 유효한 자료는 총 3087개로, 두 위성이 모두 얼음상이라고 추정된 경우가 1486개로 가장 많았으며, GK-2A는 얼음상으로 구분하였으나 HIMAWARI는 액체상으로 구분한 경우는 84개였다. 다만, GK-2A가 액체상으로, HIMAWARI가 얼음상으로 추정된 경우는 없으므로 이후 분석에서는 제외하였다.

Table 1 Summary of data classification by cloud phase

	Number	HIMAWARI		
		Liquid	Ice	Uncertain
GK-2A	Liquid	955	0	3
	Ice	84	1486	442
	Uncertain	86	4	27

4.2 COT의 비교

분류된 운상에 따른 정상치 자료군의 COT 특성을 Fig. 3에 제시하였고, 통계적 특성을 Table 2에 정리하였다. 운상 구분에 관계없이 HIMAWARI의 평균 COT가 GK-2A의 산출물보다 크고, 표준편차도 HIMAWARI의 경우가 더 높다. 따라서 HIMAWARI 위성의 COT는 COT 산출 알고리즘에서 입력변수에 민감도가 높음을 짐작할 수 있다. 정상치 자료군에서 HIMAWARI 위성으로부터 산출된 COT의 표준편차는 감소하여 GK-2A와 HIMAWARI 위성 간 COT의 상대적인 차이가 감소함을 알 수 있다(Table 2). 운상별로 비교하면 두 위성의 COT 모두 액체상보다 얼음상일 때 낮았다. 이것은 ISCCP 연구 결과를 바탕으로 얼음상일 때 구름이 대부분 광학적으로 두께가 낮은 권운계열인 것으로 사료된다¹¹⁾. Fig. 3에서 나타나듯이 두 위성간의 COT 차이는 액체상

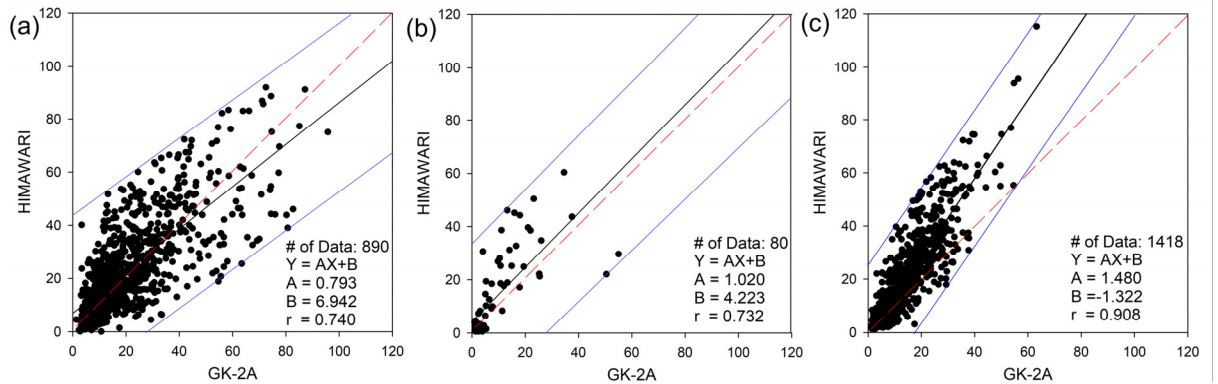


Fig. 3 Scatter plot of GK-2A and HIMAWARI COT data taken from Normal data for (a) liquid phase, (b) different phase, and (c) ice phase

Table 2 Major characteristics of COT of Normal dataset for liquid phase, different phase and ice phase.

		All data		Normal data		Outlier data	
		Mean	RMSD	Mean	RMSD	Mean	RMSD
Liquid Phase	GK-2A	22.60 ± 17.01	17.69	21.58 ± 15.87	12.17	36.54 ± 24.38	50.70
	HIMAWARI	26.74 ± 20.32		24.06 ± 17.02		63.36 ± 25.68	
Different Phase	GK-2A	9.21 ± 11.00	16.58	8.65 ± 10.81	11.17	20.45 ± 8.30	57.22
	HIMAWARI	16.11 ± 20.78		13.05 ± 15.07		77.28 ± 12.67	
Ice Phase	GK-2A	11.95 ± 10.69	14.61	10.91 ± 8.89	8.39	33.75 ± 18.72	56.58
	HIMAWARI	17.43 ± 20.02		14.82 ± 14.49		71.80 ± 35.76	

(a)이나 운상이 다른 자료군 (b)에 비해 얼음상 (c)일 때 낮으므로 COT 산출 알고리즘에서 빙정입자에 대한 복사특성에 대한 민감도가 낮은 것으로 유추된다. 마지막으로 두 위성에서 운상을 달리 구분하였을 때 두 위성 간 평균 COT 차이가 가장 높은 것으로 보아 운상이 산출 결과에 끼치는 영향이 작지 않음을 알 수 있다.

4.3 복사 전달 모델 계산 자외선 복사량과 지상 관측 일사량의 비교

두 위성에서 산출된 COT의 정확도를 평가하기 위하여 UV-A 자외선 복사량 관측값과 복사 전달 모델로부터 얻어진 UV-A 자외선 복사량을 비교하여 정상치 자료군에 대하여 Fig. 4에 제시하였고, 아울러 통계적 특성을 각 운상 유형에 대해서 Table 3, Table 4 그리고 Table 5에 정리하였다. 운상에 관계없이 HIMAWARI 위성의 COT를 사용하여 산출된 UV-A 자외선 복사량이 GK-2A를 이용한 경우 보다 낮았다. 이것은 Table 2에 제시된 것처럼 HIMAWARI의 COT가 GK-2A의 산출물보다 크기 때문이다. 그럼에도 불구하고 두 위성의 COT 산출물을 이용하여 모의된 UV-A 자외선 복사량은 모두 관측값보다 낮아 음의 MBE를 보인다. 따라서 두 위성 모두 COT를 산출하는 과정에서 COT를 과도모의하고 있음을 간접적으로 유추할 수 있다. 액체상과 얼음상에 대해서 정상치 자료군은 HIMAWARI 위성영상 기반 UV-A 자외선 복사량이 관측값과 좀 더 높은 상관도를 보이고, RMSE도 낮음을 보인다. 다만 MBE는 음의 방향으로 좀 더 증가한 것으로 보여 GK-2A 위성영상 기반 UV-A 자외선

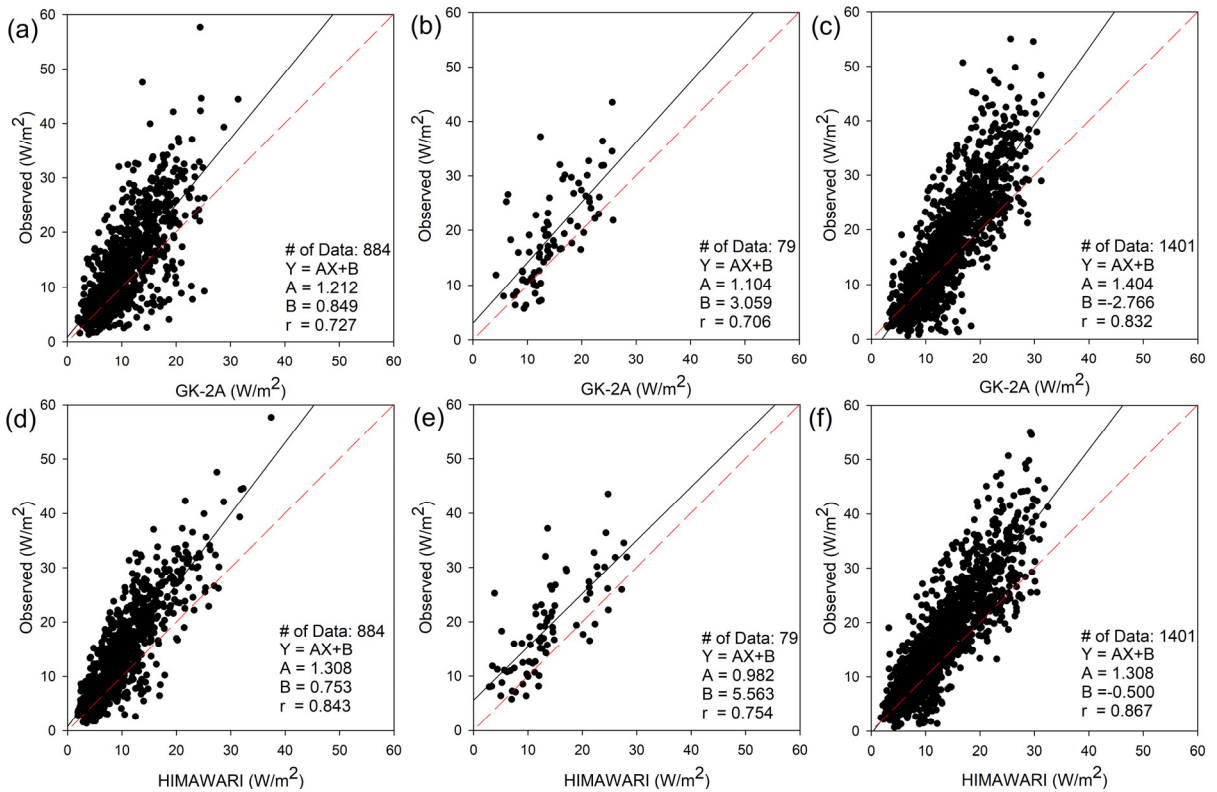


Fig. 4 Scatter plot of observation for Normal dataset with UV-A irradiance derived by GK-2A in (a) liquid phase, (b) different phase and (c) ice phase; by HIMAWARI for (d) liquid phase, (e) different phase and (f) ice phase

Table 3 Major characteristics of UV-A irradiance derived from satellites with observation for liquid phase. The number inside bracket indicates the number of data for All data, Normal data and Outlier data

		Mean (W m ⁻²)	RMSE (W m ⁻²)	<i>r</i>	MAE (W m ⁻²)	MBE (W m ⁻²)
All data (948)	GK-2A	10.50	6.66	0.71	4.79	-2.98
	HIMAWARI	9.66	6.12	0.84	4.58	-3.82
	Observation	13.48	-	-	-	-
Normal data (884)	GK-2A	10.73	6.59	0.73	4.80	-3.12
	HIMAWARI	10.01	6.12	0.84	4.61	-3.84
	Observation	13.86	-	-	-	-
Outlier data (64)	GK-2A	7.34	7.49	0.26	4.67	-1.05
	HIMAWARI	4.83	6.17	0.77	4.05	-3.55
	Observation	8.39	-	-	-	-

Table 4 Same as Table 3 but for different phase

		Mean (W m ⁻²)	RMSE (W m ⁻²)	<i>r</i>	MAE (W m ⁻²)	MBE (W m ⁻²)
All data (83)	GK-2A	14.29	7.48	0.71	5.47	-4.32
	HIMAWARI	13.34	7.61	0.77	5.90	-5.26
	Observation	18.61	-	-	-	-
Normal data (79)	GK-2A	14.58	7.55	0.71	5.49	-4.58
	HIMAWARI	13.85	7.68	0.75	5.97	-5.31
	Observation	19.16	-	-	-	-
Outlier data (4)	GK-2A	8.60	5.87	0.57	4.92	0.90
	HIMAWARI	3.34	6.28	0.26	4.48	-4.35
	Observation	7.70	-	-	-	-

Table 5 Same as Table 3 but for ice phase

		Mean (W m ⁻²)	RMSE (W m ⁻²)	<i>r</i>	MAE (W m ⁻²)	MBE (W m ⁻²)
All data (1469)	GK-2A	13.72	6.59	0.84	4.76	-2.78
	HIMAWARI	12.95	6.38	0.87	4.68	-3.55
	Observation	16.50	-	-	-	-
Normal data (1401)	GK-2A	14.08	6.66	0.83	4.83	-2.93
	HIMAWARI	13.38	6.45	0.87	4.75	-3.63
	Observation	17.01	-	-	-	-
Outlier data (68)	GK-2A	6.31	4.88	0.24	3.22	0.32
	HIMAWARI	4.15	4.56	0.51	3.11	-1.84
	Observation	5.99	-	-	-	-

복사량은 과도모의 또는 과소모의하는 경향이 동시에 나타남을 알 수 있다. 특히 Fig. 4을 보면 HIMAWARI 위성영상 기반 UV-A 자외선 복사량의 분포가 회귀선을 중심으로 좁은 분포를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 이러한 경향은 두 위성이 서로 운상을 구분을 달리할 때 바뀐다. 운상이 다른 경우 정상치 자료군에서 RMSE, MAE, MBE 모두 HIMAWARI 위성영상 기반 UV-A 자외선 복사량이 GK-2A보다 높음을 알 수 있다.

5. 토 의

Table 2로부터 HIMAWARI의 COT가 GK-2A에 비해 크게 산출 되는 것으로 나타났으며, 이는 COT를 산출하는데 사용되는 산출 알고리즘의 차이로 추정된다. Fig. 4에서 확인할 수 있듯이 두 위성 모두 얼음상으로 구분 한 경우가 액체상으로 구분 한 경우에 비하여 신뢰 구간이 작으며 상관계수는 높은 것으로 보아 COT 산출 알고리즘 내에서 운상에 따른 정확도의 차이가 있음을 유추할 수 있다. 두 위성의 산출물로부터 얻어진 UV-A 자외선 복사량은 관측값에 비해 낮은 것으로 보였는데, 각 위성이 산출한 COT값이 과대모의 되었기 때문으로 보인다. 두 위성이 모두 동일하게 운상을 구분하였을 때 HIMAWARI 위성영상 기반 UV-A 자외선 복사량이 GK-2A 위성을 활용할 때보다 더 나은 것으로 평가되었지만 운상이 상이하게 구분하였을 때는 GK-2A 위성영상 기반 UV-A 자외선 복사량이 더 작은 RMSE를 보였다. 그러므로 운상 구분에 의한 차이가 COT 및 UV-A 자외선 복사량에 미치는 영향이 있을 것으로 사료되어 운상 구분에 대한 평가를 수행하였다.

Table 1에서 두 위성이 서로 상이하게 운상을 구분한 경우는 84개 사례로 해당 관측일에 두 위성의 운정 고도 산출물과 오산 공군기지에서 매일 09 KST와 15 KST에 관측되는 라윈존데 데이터로부터 얻어진 기온의 연직 프로파일을 비교하여 운상을 추정하였다. 실제로 GK-2A와 HIMAWARI L2 산출물에서 운상은 GK-2A의 경우 통합 국지예보모델(Unified Model - Local Data Assimilation and Prediction System)으로부터 예측된 기온의 연직프로파일을 통해 결정된다⁹⁾. JAXA HIMAWARI 모니터링 시스템도 유사한 방법으로 HIMAWARI 위성의 운정 고도 산출물과 현업 수치기상예측 모델의 기온 연직 프로파일을 비교하여 운상을 결정한다¹²⁾. Fig. 5는 2021년 7월 10일 15 KST의 기온 연직분포를 나타낸 예시로서 빙결 고도(0°C)는 약 600 hPa임을 알 수 있다. GK-2A와 HIMAWARI 위성은 각각 운정 고도를 약 400 hPa과 300 hPa로 추정하였다. 그러므로 관측된 빙결 고도와 비교해볼 때 운상은 얼음상으로 구분되어야 하지만 HIMAWARI 위성은 액체상으로 구분하여 운상 추정에서 오차가 있음을 알 수 있다. 84개의 모든 사례에 대해서 운상을 검증한 결과를 Table 6에 기술하였다. 74개의 사례에서 HIMAWARI 위성의 운정 고도는 빙결고도보다 높아 구름은 얼음상으로 분석되었는데, 운상 산출물은 액체상으로 구분하였다. 반면, GK-2A 위성의 운정 고도는 대부분의 사례에서 빙결고도보다 높음을 보이고 또한 운상 산출물도 얼음상으로 분류하여 운상 산출과정에서 성능은 GK-2A 위성이 더 높음을 알 수 있다. 따라서 운상 구분에 대한 차이가 COT 및 UV-A 자외선 복사량 모델 결과에 영향을 미쳤음을 확인할 수 있다. 빙결고도와 각 위성에서 산출된 운정 고도의 평균값을 Table 6에 함께 나타내었는데 GK-2A의 빙결 고도가 더 높음을 알 수 있다. 운상 산출 과정에서 기온의 연직프로파일을 수치기상예측 모델로부터 확보하는

데 수치기상예측 모델의 오차를 감안할 때 빙결 고도와의 차이가 낮은 HIMAWARI 위성의 경우 운정 고도와 빙결 고도를 비교하는 과정에서 운상을 잘못 추정할 가능성이 있음을 알 수 있다.

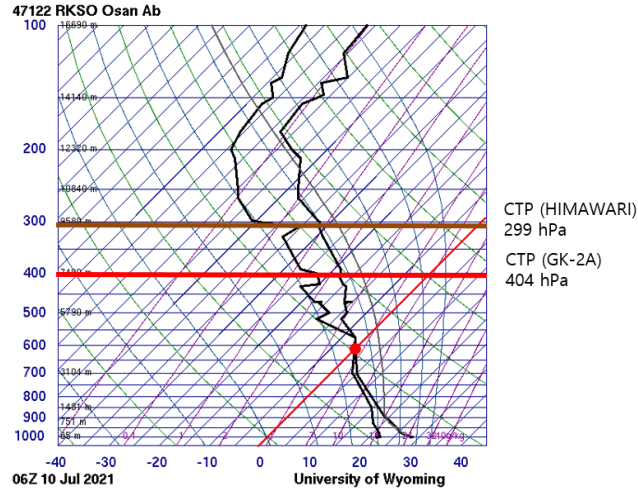


Fig. 5 Vertical soundings of air and dew point temperature measured at Osan, July 10th, 2021, 15 KST. Cloud Top Pressure from HIMAWARI and GK-2A are indicated by red and brown solid lines, respectively

Table 6 Summary of comparison between freezing level and CTP of each satellite

	Success	Fail	Mean Freezing Level (hPa)	Deviation from Freezing Level (hPa)
GK-2A	82	2	630	-211
HIMAWARI	10	74	630	-160

6. 결론

본 연구에서 GK-2A와 HIMAWARI로부터 산출되는 COT 자료를 검증하였다. 위성 자료의 운상을 토대로 두 위성의 COT를 분류하고 개별 특성을 분석해보았으며, 복사 전달 모델을 활용해 UV-A 자외선 복사량을 계산하고 이를 지상 관측값과 비교하여 자료를 평가하였다. 분석 결과 HIMAWARI가 GK-2A에 비해 COT를 크게 산출하는 경향이 나타났으며, 산포도 또한 HIMAWARI가 더 크게 나타났다. 복사 전달 모델과 위성 산출 자료를 활용하여 UV-A 자외선 복사량을 계산하였고, 관측값과의 비교로부터 GK-2A가 운상의 정확도에서 HIMAWARI에 비해 상대적으로 나은 성능을 보였으나 COT를 산출하는 알고리즘의 성능은 HIMAWARI가 더 높은 성능을 가졌다는 결론을 도출하였다. 두 위성에서 산출되는 COT 자료를 검증하는 과정을 통해 각 위성이 가진 특성을 파악해볼 수 있었으며, 각 위성 산출 과정의 개선 방향에 대한 지표가 될 수 있을 것으로 보인다.

향후 연구에서 GK-2A의 운상 정확도가, 그리고 HIMAWARI의 COT 산출 알고리즘의 성능이 상대적으로 높다는 것을 근거로 GK-2A의 운상을 토대로 COT 자료를 HIMAWARI의 COT를 기준으로 하여 편향 수정

(Bias Correction)하고, 이 과정을 통해 수집한 자료를 본 연구와 동일한 방법론으로 지상 관측값과 비교해보면 더 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다. 추가적으로 본 연구에서는 대전 소재의 한국 에너지기술연구원 지점에 대해서 1년간의 데이터를 활용하여 연구를 진행하였는데, 다른 지점, 그리고 장기간에 대해 연구를 확장시켜 분석을 시도해 볼 필요가 있다.

후기

본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업(C3-2412)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

REFERENCES

1. Forster, P., Storelvmo, T., Armour, K., Collins, W., Dufresne, J.-L., Frame, D., Lunt, D.J., Mauritsen, T., Palmer, M. D., Watanabe, M., Wild, M., and Zhang, H., The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity, In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 923-1054, 2021, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-7/>.
2. Qin, Y., Steven, A. D. L., Schroeder, T., McVicar, T. R., Huang, J., Cope, M., and Zhou, S., Cloud Cover in the Australian Region: Development and Validation of a Cloud Masking, Classification and Optical Depth Retrieval Algorithm for the Advanced Himawari Imager, *Frontiers in Environmental Science*, Vol. 7, 20, 2019, <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00020>.
3. Turner, D. D. and Eloranta, E. W., Validating Mixed-Phase Cloud Optical Depth Retrieved From Infrared Observations With High Spectral Resolution Lidar, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol. 5, No. 2, pp. 285-288, 2008, <https://doi.org/10.1109/LGRS.2008.915940>.
4. GK-2A AMI Algorithm Theoretical Basis Document, Retrieval Algorithm of Daytime Cloud Optical Depth and Micro-physics (주간 구름광학두께 및 미세물리량 산출 알고리즘), 2019. <https://nmsc.kma.go.kr/homepage/html/base/cmm/selectPage.do?page=static.edu.atbdGk2a>. last accessed on 24th March 2023.
5. Nakajima, T. Y. and Nakajima, T., Wide-Area Determination of Cloud Microphysical Properties from NOAA AVHRR Measurements for FIRE and ASTEX Regions, *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 52, No. 23, pp. 4024-4059, 1995, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1995\)052<4043:WADOCM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1995)052<4043:WADOCM>2.0.CO;2).
6. LibRadtran, 2020. <https://www.libradtran.org/doku.php?id=start>. last accessed on 24th March 2023.
7. Emde, C., Buras-Schnell, R., Kylling, A., Mayer, B., Gasteiger, J., Hamann, U., Kylling, J., Richter, B., Pause, C., Dowling, T., and Bugliaro, L., The libRadtran Software Package for Radiative Transfer Calculations (Version 2.0.1), *Geoscientific Model Development*, Vol. 9, No. 5, pp. 1647-1672, 2016, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1647-2016>.
8. Črnivec, N. and Mayer, B., Towards an Improved Treatment of Cloud – Radiation Interaction in Weather and Climate Models: Exploring the Potential of the Triple Clouds Method for Various Cloud Types using LibRadtran 2.0.4, *Geoscientific Model Development*, Vol. 14, No. 6, pp. 3663-3682, 2021, <https://doi.org/10.5194/gmd-14-3663-2021>.

9. GK-2A AMI Algorithm Theoretical Basis Document, Cloud Top Products (운정산출물), 2019. <https://nmsc.kma.go.kr/homepage/html/base/cmm/selectPage.do?page=static.edu.atbdGk2a>. last accessed on 24th March 2023.
10. Letu, H., Yang, K., Nakajima, T. Y., Ishimoto, H., Nagao, T. M., Riedi, J., Baran, A. J., Ma, R., Wang, T., Shang, H., Khatri, P., Chen, L., Shi, C., and Shi, J., High-resolution Retrieval of Cloud Microphysical Properties and Surface Solar Radiation using Himawari-8/AHI Next-generation Geostationary Satellite, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 239, 111583, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111583>.
11. Rossow, W. B. and Schiffer, R. A., Advances in Understanding Clouds from ISCCP, *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 80, No. 11, pp. 2261-2288, 1999, [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1999\)080<2261:AIUCFI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1999)080<2261:AIUCFI>2.0.CO;2).
12. Bessho, K., Date, K., Hatashi, M., Ikeda, A., Imai, T., Inoue, H., Kumagai, Y., Miyakawa, T., Murata, H., Ohno, T., Okutama, A., Oyama, R., Sasaki, Y., Shimazu, Y., Shimoji, K., Sumida, Y., Suzuki, M., Taniguchi, H., Tsuchiyama, H., Uesawa, D., Yokota, H., and Yoshida, R., An Introduction to Himawari-8/9 – Japan’s New-Generation Geostationary Meteorological Satellites, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 94, No. 2, pp. 151-183, 2016, <https://doi.org/10.2151/jmsj.2016-009>.