

GK-2A AMI
Algorithm Theoretical Basis
Document

대기상한 상향장파복사
(OLR)

장정필, 이규태
강릉원주대학교

Version 1.1

2019. 10. 02.



국가기상위성센터
National Meteorological Satellite Center

<수정 이력>

문서 버전	수정내용	과학코드 버전	수정일	작성자
0.1	GK-2A AMI를 이용한 OLR 산출의 초기 알고리즘	0.1.0.1	2016.01.01.	김부요, 이규태
0.2	단일 채널과 다중 채널을 이용한 알고리즘 내용 추가	0.2.0.1	2017.01.01.	김부요, 이규태
0.3	산출된 OLR과 CERES OLR의 검증 내용 추가	0.3.0.1 0.4.0.1	2018.01.01.	김부요, 이규태
0.4	산출된 OLR의 분석 내용 추가, ATBD 수정 및 보완	0.5.5.1	2018.11.01.	김부요, 이규태
0.5	ATBD 수정	0.5.5.1	2019.03.01.	김부요, 이규태
1.0	ATBD 수정	0.5.5.1	2019.04.24.	김부요, 이규태
1.1	ATBD 수정 및 보완	0.6.1.1	2019.10.02	장정필, 이규태

<목차>

1. 개요	1
1.1 목적	1
1.2 사용자	1
1.3 내용	1
1.4 관련 문서	1
2. 알고리즘 소개	2
2.1 개요	2
2.2 알고리즘 흐름도	2
2.3 입력자료	3
2.3.1 L1B	3
2.3.2 L2.....	3
2.3.3 보조 자료	3
2.4 이론적 배경	3
2.5 수학적 설명	4
2.6 산출물	5
3. 모의자료 및 검증	6
3.1 모의 입력자료 및 검증자료	6
3.2 검증 방법	8
3.3 검증 결과	8
4. 현업운영 시 고려사항	12
4.1 수치계산 고려사항	12
4.2 프로그래밍 및 절차상의 고려사항.....	12
4.3 품질 평가 및 진단	12
4.4 예외사항 처리	12
4.5 검증 알고리즘	12
5. 가정 및 제한	13
5.1 성능	13
5.2 예상 센서 성능	13
5.3 개선을 위한 사전 계획	13

6. 참고문헌.....	14
--------------	----

<표 목차>

표 2.6.1. OLR 산출 자료.....	5
표 3.1.1. 모의 입력자료로 사용된 Himawari-8 AHI 채널과 GK-2A AMI의 채널별 중심파장 정보.....	6
표 3.1.2. OLR 산출을 위한 Himawari-8 AHI 정보.....	7
표 3.1.3. OLR 산출을 위한 복사전달모델 설정.....	7
표 3.3.1. 2017년 7월 31일 사례 전체에 대한 CERES와 산출된 OLR의 구름 유무에 따 른 bias와 RMSE 그리고 상관계수 (bias 및 RMSE의 단위는 Wm^{-2} 임).....	11

<그림 목차>

그림 2.2.1. OLR 산출 알고리즘 흐름도.....	2
그림 3.3.1. 3.3-100 μm 로 적분된 시뮬레이션 결과 ($\text{OLR}_{3.3-100}$)와 OLR_1 과 OLR_2 그리고 OLR_4 의 산포도. 여기서 적색 실선은 1대1 선이고 파란색 실선은 회귀 선이며, RMSE의 단위는 Wm^{-2} 임.....	8
그림 3.3.2. Himawari-8 AHI 채널을 이용한 상향장파복사 산출 결과 ($\text{VZA } 70^\circ$ 미만 영역) (a) 0000 UTC, b) 1200 UTC)와 한반도 지역의 일주기 변화 (0000-2350 UTC).....	9
그림 3.3.3. 2017년 7월 31일 주간과 야간 사례의 OLR_2 와 OLR_4 그리고 CERES와의 차이 분포.....	10

약어표

ABI	Advanced Baseline Imager
AHI	Advanced Himawari Imager
AMI	Advanced Meteorological Imager
CERES	Clouds and the Earth's Radiant Energy System
COMS	Communication, Ocean and Meteorological Satellite
GK-2A	Geostationary Korea Multi-Purpose Satellite 2A
MI	Meteorological Imager
MJO	Madden-Julian Oscillation
OLR	Outgoing Longwave Radiation
SBDART	Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer
VZA	Viewing Zenith Angle

1. 개요

대기상한에서의 상향장파복사 (OLR)는 지표면과 대기 및 구름 등에서 방출되는 장파복사의 총량을 의미한다. 이는 기상 및 기후 연구 분야 연구를 위한 중요 요소로써 남방진동과 몬순 및 계절변동 등 다양한 분석에 활용되며 구름-복사 상호작용 이해에 필수적인 기상 요소이다. 특히 OLR의 연속적인 관측은 매 순간의 자료가 요구되는 물리 과정 이해를 위한 필수 요소이다 (Taylor, 2012). 그리고 구름의 유무와 지표면 및 연직 온도 그리고 수증기량의 변화는 OLR 변화를 잘 반영하고 실시간 OLR 모니터링 자료는 열대성 대류와 MJO 및 엘니뇨 등의 관찰에도 주요하게 활용된다. 또한 극궤도위성과 비교하여 GK-2A와 같은 정지궤도위성의 자료는 시간 연속성이 뛰어나고 넓은 공간을 관측할 수 있기 때문에 활용성이 높은 장점이 있다. 이 산출물 (대기상한에서의 상향장파복사)은 기상과 기후 관련 현업 및 연구를 위한 중요 자료로 활용될 수 있고 여기에 기술되는 상세 알고리즘 개발 과정은 사용자들의 이해와 분석을 도울 목적으로 제공된다.

1.1 목적

이 기술서는 천리안 위성의 후속으로 차세대 기상위성인 GK-2A AMI에 의한 화소 단위의 대기상한 상향장파복사 (OLR) 산출 알고리즘을 이론적 배경에서부터 산출 과정과 특성 등에 대한 자세한 내용을 제공하는데 목적이 있다.

1.2 사용자

기상과 기후 및 복사 수치 관련 현업 및 연구자들에게 중요하게 사용된다.

1.3 내용

이 알고리즘 분석서는 GK-2A AMI 센서로부터 관측된 복사휘도를 이용하여 OLR을 추정하는 방법을 서술하였다.

1.4 관련 문서

이 알고리즘은 기상청 통신해양기상위성 개발사업 (V)의 통신해양기상위성 기상자료처리시스템 개발 (V) (발간번호 11-1360395-000003-10)에 근거한다.

2. 알고리즘 소개

2.1 개요

OLR은 지구대기 상한에서 방출되는 상향장파복사로서 지표면과 구름 그리고 흡수기체에 따른 대기 조성 등에 의하여 변화한다. 인공위성에 의한 OLR 산출은 극궤도 위성 (광대역 센서)과 정지궤도 위성 (협대역 센서)에 의하여 수행되고 극궤도 위성의 광대역 센서는 전 지구 영역을 관측하는 장점이 가지고 있으며 정지궤도 위성의 협대역 센서는 특정지역의 높은 시공간 해상도 자료를 생산한다. 여기에서는 GK-2A 협대역 센서를 이용한 OLR 산출 과정을 다음의 2.2-2.6장에서 서술한다.

2.2 알고리즘 흐름도

OLR 산출 알고리즘의 단계별 구성은 그림 2.2.1과 같다.

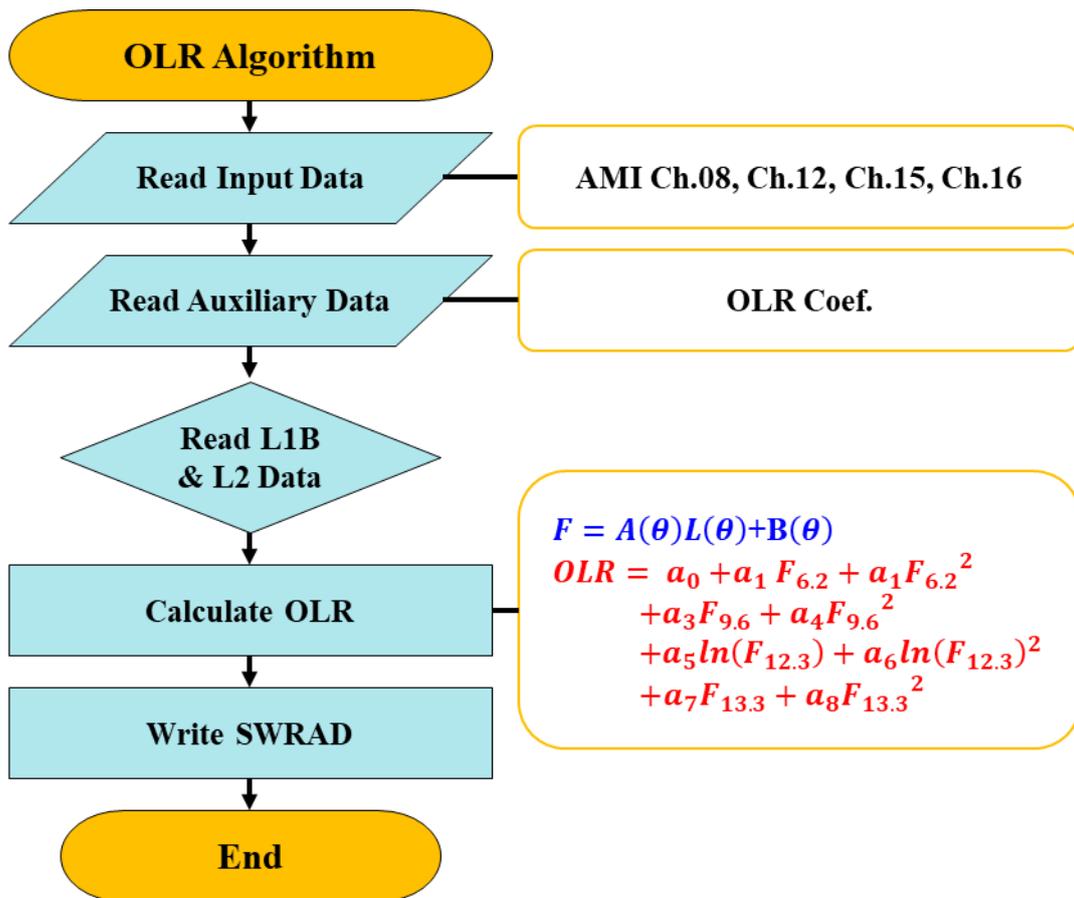


그림 2.2.1. OLR 산출 알고리즘 흐름도.

1) 기본 데이터

기본 데이터는 GK-2A AMI 채널 8번, 12번, 15번, 16번 복사휘도 자료와 위성천정각 및 위·경도 자료이다.

2) 데이터 전처리

GK-2A AMI 채널 8번, 12번, 15번, 16번 복사휘도 자료를 복사조도 변환한 후 광대역 복사조도 (OLR) 산출을 준비한다.

3) OLR 산출

기본 데이터와 전처리 과정을 거치고 1-4개의 채널이 사용되어 경험적으로 산출된다.

2.3 입력자료

2.3.1 L1B

GK-2A AMI 8, 12, 15, 16번 채널이 입력자료로 사용된다.

2.3.2 L2

OLR 산출에 L2 자료를 입력자료로 사용하지 않는다.

2.3.3 보조 자료

위·경도 및 VZA 자료가 사용된다.

2.4 이론적 배경

협대역 채널 복사휘도 자료에 의한 OLR의 산출은 경험적인 방법에 근거한다. 즉 GK-2A AMI 채널의 협대역 복사휘도 자료는 Limb Darkening Function (Abel and Gruber, 1979; Schmetz and Liu, 1988)을 이용하여 협대역 복사조도로 변환하고 이것을 다시 광대역 복사조도 (OLR)로 변환한 것으로써 식 (2.4.1)과 같이 구성될 수 있다. 이때 각 단계별로 필요한 회귀식의 계수는 SBDART (Ricchiazzi et al., 1998)와 같은 복사전달 모델을 이용하여 대기 조건 (태양천정각, 위성천정각, 대기 연직프로파일, 지표면 온도, 수증기량, 구름 높이, 구름 광학두께)에 따라 계산된 결과로부터 산출될 수 있

다. 그리고 OLR 산출에 사용된 채널 정보에 따라 산출된 OLR의 정확도가 달라질 수 있다 (Ellingson et al., 1989).

$$OLR = a_0(\theta) + \sum_i a_i(\theta) \times L_i(\theta) \quad (2.4.1)$$

a_0 : 회귀 계수 ($W m^{-2}$)

a_i : 변수 i 번째의 회귀 계수 ($sr cm^{-1}$)

L_i : 변수 i 의 복사 휘도 ($W m^{-2}(sr cm^{-1})^{-1}$)

θ : VZA

2.5 수학적 설명

위성천정각에 따른 복사휘도와 복사조도 그리고 협대역 복사조도와 광대역 복사조도를 회귀함수로써 식 (2.5.1)–(2.5.4) 과정을 거친다. 식 (2.5.4)는 4개의 채널을 이용한 방법 (OLR₄; Kim and Lee, 2019)이다 (1개의 채널만 이용한 방법 OLR₁; Kim and Lee, 2019, 2개의 채널을 이용한 방법 OLR₂; Kim et al., 2018). 이때 각 산출 방법에서 선택된 채널은 협대역 복사조도로부터 광대역 복사조도 (OLR)로 변환하는 과정에서 COT, 수증기, 오존, 이산화탄소 등에 대하여 OLR이 민감하게 변하는 채널이다.

$$F = A(\theta)L(\theta) + B(\theta) \quad (2.5.1)$$

$$A(\theta) = k_0 + k_1(\sec\theta - 1) + k_2(\sec\theta - 1)^2 \quad (2.5.2)$$

$$B(\theta) = k_3 + k_4(\sec\theta - 1) + k_5(\sec\theta - 1)^2 \quad (2.5.3)$$

$$OLR_{6.2+12.4} = a_0 + a_1F_{6.2} + a_2F_{6.2}^2 + a_3F_{9.6} + a_4F_{9.6}^2 + a_5\ln(F_{12.3}) + a_6\ln(F_{12.3})^2 + a_7F_{13.3} + a_8F_{13.3}^2 \quad (2.5.4)$$

여기서 F 는 협대역 복사조도, L 은 협대역 복사휘도, θ 는 위성천정각, k_0-k_5 는 복사휘도를 복사조도로 변환하기 위한 위성천정각에 따른 회귀계수 그리고 a_0-a_8 은 OLR 산출을 위한 회귀계수이다.

2.6 산출물

이 연구를 통한 산출물의 정보는 표 2.6.1과 같다.

표 2.6.1. OLR 산출 자료.

변수	설명
OLR	공간 해상도 2 km × 2 km의 반구 영역, 시간 해상도 약 10분
Quality_flag1	0: Bad (value < 0 Wm ⁻² or value > 500 Wm ⁻²) 1: Good (0 Wm ⁻² ≤ value ≤ 500 Wm ⁻²)
Quality_flag2	0: Bad (VZA > 70°) 1: Good (VZA ≤ 70°)

3. 모의자료 및 검증

3.1 모의 입력자료 및 검증자료

모의실험을 위한 입력자료로써 표 3.1.1과 같이 GK-2A AMI와 유사한 Himawari-8 AHI를 사용하였다. 그리고 OLR 산출에 사용된 Himawari-8 AHI 채널의 공간해상도 및 배열 정보는 표 3.1.2와 같다.

검증을 위해 사용된 자료는 극 궤도 위성인 Terra에 탑재된 CERES의 SSF XTRK Edition4A OLR 자료를 사용하였다. 이 자료는 CERES의 관측시각 내에서 20 km × 20 km의 공간해상도로 관측을 수행한다. CERES 복사량 자료는 구름 탐지 정확도가 매우 우수하여 다른 복사량 자료보다 정확도가 높아 많은 연구에 활용된다.

표 3.1.1. 모의 입력자료로 사용된 Himawari-8 AHI 채널과 GK-2A AMI의 채널별 중심파장 정보.

Ch.	Himawari-8 AHI	Ch.	GK-2A AMI
7	3.9	7	3.9
8	6.2	8	6.2
9	6.9	9	7.0
10	7.3	10	7.3
11	8.6	11	8.5
12	9.6	12	9.6
13	10.4	13	10.4
14	11.2	14	11.2
15	12.4	15	12.3
16	13.3	16	13.3

표 3.1.2. OLR 산출을 위한 Himawari-8 AHI 정보.

자료	해상도	설명	배열
Channel 08	2km×2km	Himawari-8 AHI at Channel 08	5500 × 5500
Channel 12	2km×2km	Himawari-8 AHI at Channel 12	5500 × 5500
Channel 15	2km×2km	Himawari-8 AHI at Channel 15	5500 × 5500
Channel 16	2km×2km	Himawari-8 AHI at Channel 16	5500 × 5500

즉 AHI의 채널 정보와 2.5장에 작성된 회귀식을 이용하여 OLR을 산출하였고 이때 각 회귀식의 계수들은 SBDART 모델을 이용하여 표 3.1.3과 같이 실제 대기에서 나타날 수 있는 기상 조건을 시뮬레이션하여 협대역 복사조도와 광대역 복사조도 (OLR)의 관계를 도출하였다.

표 3.1.3. OLR 산출을 위한 복사전달모델 설정.

변수	설정 값	N
Spectral Band [μm]	5.44-7.03, 9.33-9.93, 11.18-13.65, 12.86-13.76, 3.3-100	5
Atmospheric Profile	Tropical, Mid-Latitude Summer & Winter, Sub-Arctic Summer & Winter, US Standard	6
VZA [$^{\circ}$]	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85	18
COT	2, 4, 8, 16, 32, 64, 128	7
Cloud Height [km]	0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16	9
Temperature, H ₂ O, CO ₂ , O ₃ , etc.	Default	

3.2 검증 방법

검증은 Kim et al. (2018)과 Kim and Lee (2019) 방법에 따라 Terra CERES의 위·경도와 공간해상도 ($20 \text{ km} \times 20 \text{ km}$)를 기준으로 GK-2A OLR 자료를 평균하였고 GK-2A 관측 시각을 기준으로 ± 5 분 이내의 CERES OLR 자료와 비교 분석하였다.

3.3 검증 결과

복사전달모델에서 시뮬레이션된 협대역 복사조도와 광대역 복사조도의 관계는 그림 3.3.1과 같다. 협대역 복사조도로부터 OLR로 변환된 결과들은 $3.3\text{--}100 \mu\text{m}$ 로 적분된 OLR과 0.997 이상의 높은 상관성을 나타내었고 4개의 채널을 사용한 OLR₄의 경우 다른 결과들보다 RMSE가 낮았으며 채널 수가 많을수록 OLR 산출 결과가 양호하였다.

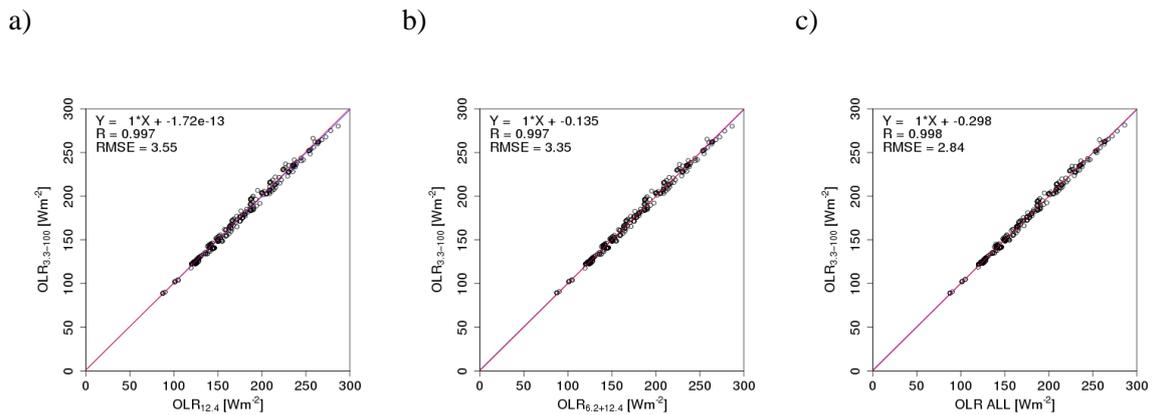
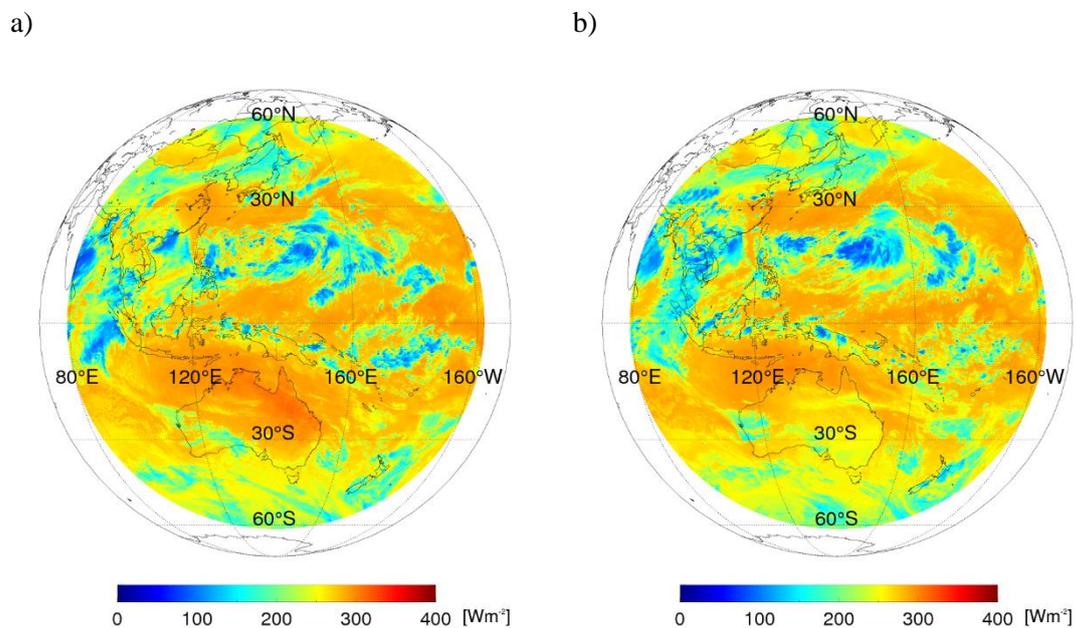


그림 3.3.1. $3.3\text{--}100 \mu\text{m}$ 로 적분된 시뮬레이션 결과 ($\text{OLR}_{3.3-100}$)와 OLR_1 과 OLR_2 그리고 OLR_4 의 산포도. 여기서 적색 실선은 1대1 선이고 파란색 실선은 회귀선이며, RMSE의 단위는 Wm^{-2} 임.

모의자료를 이용한 OLR_2 (Kim et al., 2018)의 산출 결과는 그림 3.3.2와 같다. 이 그림은 2017년 8월 28일 주간 (0000 UTC)과 야간 (1200 UTC)의 사례로써 구름 영역 보다 구름이 존재하지 않는 지역의 OLR이 크게 나타났다. 특히 주간과 야간에 지표면 온도차이가 뚜렷한 호주대륙은 OLR의 변화가 크게 나타났다. 그리고 한반도 지역 ($122\text{--}132^\circ \text{ E}$, $33\text{--}43^\circ \text{ N}$)에 대하여 0000–2350 UTC의 OLR 일주기 (diurnal cycle)를 나타낸 결과 Comer et al. (2007)과 유사한 변화 경향이 나타났다. 즉 지표면 온도가 높아지는 정오에 OLR의 최대가 나타나고 반대로 지표면 온도가 낮아지는 새벽에 최소

가 나타났다. OLR의 일주기는 지표면 온도에 큰 영향을 받으며 구름과 수증기 등에 따라 감쇠를 나타내기 때문에 기상 변화 분석에 매우 유용한 자료로 활용된다.



c)

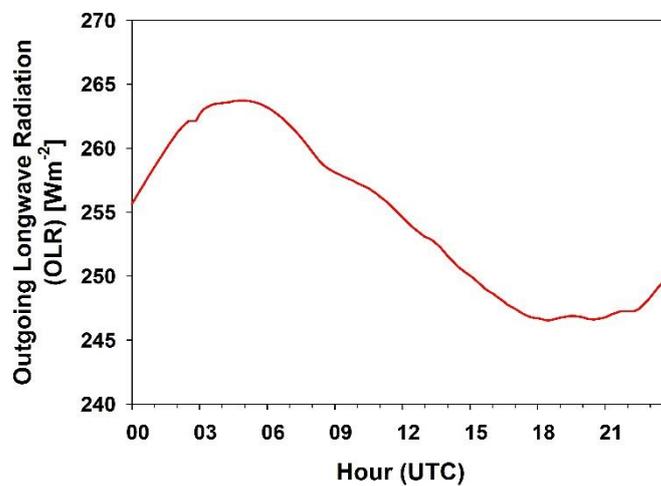


그림 3.3.2. Himawari-8 AHI 채널을 이용한 상향장파복사 산출 결과 (VZA 70° 미만 영역) (a) 0000 UTC, b) 1200 UTC)와 한반도 지역의 일주기 변화 (0000-2350 UTC).

OLR 산출 결과를 검증하기 위하여 극 궤도 위성 (Terra)에 탑재된 CERES

(Barkstrom et al., 1989; Wielicki et al., 1996)의 OLR과 비교하여 그 차이를 그림 3.3.3에 나타내었다. 이 그림은 2017년 7월 31일 주간과 야간에 관측된 CERES OLR과 OLR₂와 OLR₄를 20 km × 20 km 간격으로 격자화 시켜 비교분석한 것이다. 이때 CERES OLR은 주간인 0100-0130 UTC에 약 30분 관측되었으며 이 자료와 관측 시각을 일치시키기 위해 AHI는 0100, 0110, 0120, 1030 UTC 자료를 이용하였고 AHI 관측 시각을 기준으로 ±5분 내에 CERES 자료가 존재할 경우 비교 분석하였다. 야간의 경우 1330-1400 UTC에 관측된 CERES와 관측 시각 일치를 위해 AHI는 1300, 1310, 1320, 1330 UTC 자료를 이용하여 비교 분석에 사용하였다. 또한 VZA이 클수록 극 궤도 위성과 정지궤도 위성으로 산출된 결과의 차이가 커지기 때문에 VZA이 70° 미만일 때의 자료를 분석하였다. 그 결과 OLR₂와 OLR₄ 모두 주간과 야간에 관측된 CERES OLR과 유사한 분포를 보였고 bias와 RMSE는 표 3.3.1과 같이 나타났다. OLR₂와 OLR₄ 모두 최종 목표정확도인 20 Wm⁻²를 만족시키고 있으며 OLR₄의 경우 OLR₂보다 bias와 RMSE가 약 1 Wm⁻² 작게 나타났으나 지속적인 회귀계수의 보정이 필요하다.

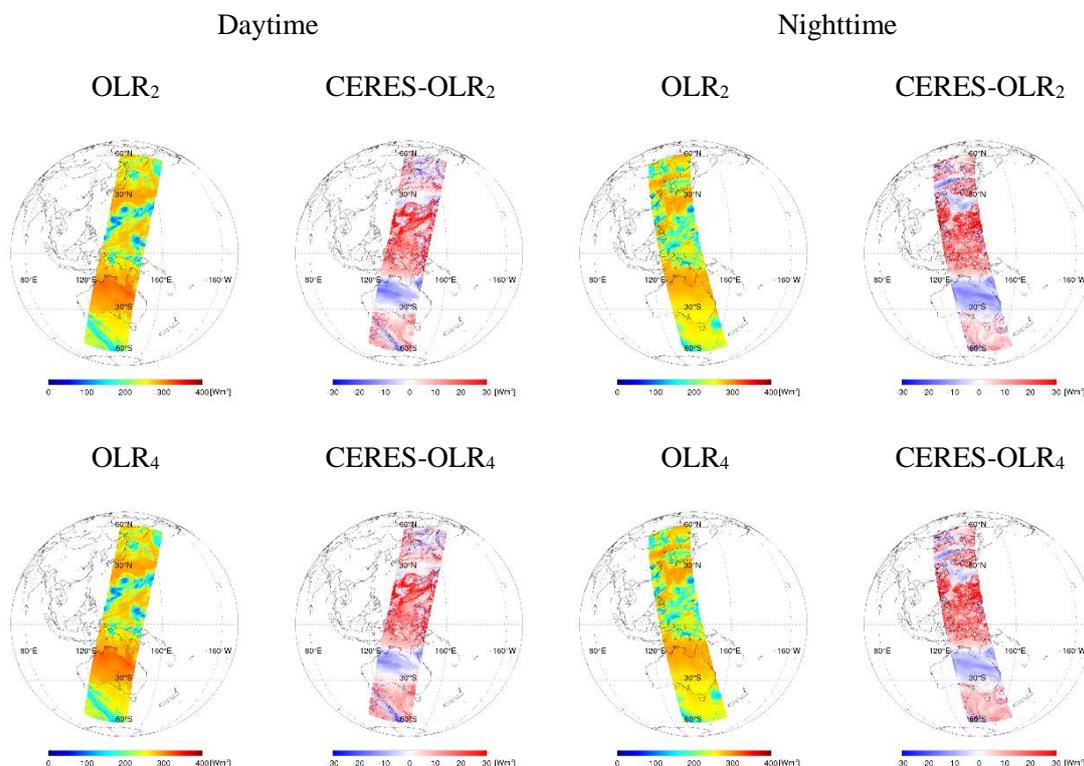


그림 3.3.3. 2017년 7월 31일 주간과 야간 사례의 OLR₂와 OLR₄ 그리고 CERES와의 차이 분포.

표 3.3.1. 2017년 7월 31일 사례 전체에 대한 CERES와 산출된 OLR의 구름 유무에 따른 bias와 RMSE 그리고 상관계수 (bias 및 RMSE의 단위는 Wm^{-2} 임).

	All			Cloudy			Cloud-free		
	Bias	RMSE	R	Bias	RMSE	R	Bias	RMSE	R
OLR ₂	4.70	12.60	0.97	6.74	13.87	0.96	-2.51	6.04	0.95
OLR ₄	3.51	12.04	0.97	4.88	13.20	0.96	-1.05	6.07	0.93

4. 현업운영 시 고려사항

4.1 수치계산 고려사항

현재 개발된 OLR 산출 알고리즘은 AMI의 채널 8번, 12번, 15번, 16번을 이용하여 OLR을 산출 할 수 있으나 분광반응함수 또는 변환 계수의 수정으로 지속적인 회귀 계수 보정이 이뤄져야 될 수 있다.

4.2 프로그래밍 및 절차상의 고려사항

OLR 산출의 주 입력 자료인 GK-2A AMI의 채널 8번, 12번, 15번, 16번 자료 부재 시 정확성 감소 및 산출 불능 상황이 발생할 수 있으므로 비상계획 (contingency plan) 수립이 필요하다.

4.3 품질 평가 및 진단

이 연구결과는 극 궤도 위성인 Terra 또는 Aqua의 CERES 자료로부터 평가될 수 있고 경우에 따라서는 복사 모델을 통한 결과와도 비교될 수 있다.

4.4 예외사항 처리

OLR은 GK-2A AMI의 채널 8번, 12번, 15번, 16번 자료를 이용하여 산출될 수 있지만 입력되는 채널 정보에 따라 OLR을 산출 할 수 있고 입력자료가 없을 경우 OLR 산출이 불가하다.

4.5 검증 알고리즘

검증은 극 궤도 위성인 Terra 또는 Aqua의 CERES OLR과 함께 GK-2A OLR 자료를 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 영역으로 평균하고 GK-2A 관측 시각을 기준으로 ± 5 분 이내의 CERES OLR 자료와 비교 분석되어야 한다. 또한 이 자료는 VZA이 70° 이내에서 분석되어야 한다. 예를 들어 0100 UTC에 산출된 GK-2A OLR은 0055-0105 UTC에 관측된 CERES OLR과 비교분석 될 수 있다.

5. 가정 및 제한

5.1 성능

정지궤도위성에 탑재 센서를 이용할 경우 위성 천정각 증가에 따라 오차가 증가하기 때문에 COMS MI의 경우 70° 미만의 자료를 이용하고 있으며 추후 계속된 연구를 통해 적절한 위성 천정각을 결정하여야 할 것이다.

5.2 예상 센서 성능

OLR은 적외 영역의 채널 자료를 사용하여 산출되기 때문에 밤낮 구분 없이 산출 가능한 장점이 있다. 이 연구를 통하여 채널 8번과 15번의 두 채널을 이용하여 OLR 산출 알고리즘이 시험되고 있으며 다양한 채널을 이용한 OLR 산출 알고리즘이 개발되고 있어 예상되는 결과는 CERES와 비교하여 큰 차이 없이 양호한 결과 산출이 예상된다.

5.3 개선을 위한 사전 계획

이 알고리즘을 통해 산출되는 OLR은 복사량 변환 단계마다 회귀계수가 필요하다. 그리고 현재 GK-2A 채널 8번과 15번을 이용하여 OLR을 산출하고 있지만 지속적인 연구를 통해 다양한 채널의 활용이 요구되며 그 이유는 OLR의 산출 정확도가 특정 채널에 포함된 기상 정보에 따라 다를 수 있기 때문이다. 그리고 Global Space-based Inter-Calibration System (GSICS)과 같은 전지구 위성에서 관측된 자료로부터 산출물의 보정과 극 궤도 위성 자료를 이용한 방법 (Doelling et al., 2013, 2016)에 의하여 산출 정확도 향상을 기대해볼 수 있다. 이 경우 산출물은 정지궤도 위성의 협대역 센서 자료를 이용하여 경험적으로 산출되기 때문에 인위적인 차이와 회귀식에 의한 비선형적인 오차를 포함하고 있다. 따라서 기준이 될 수 있는 자료로부터 복사량의 보정을 통해 기상 및 기후 관측의 개선을 야기할 수 있다 (Goldberg et al., 2011).

6. 참고문헌

- Abel, P. G. and Gruber, A., 1979. An improved model for the calculation of longwave flux at 11 μm . NOAA Technical Report, NESS 106, NTIS PB80-119431, 24 pp.
- Barkstrom, B., Harrison, E., Smith, G., Green, R., Kibler, J., Cess, R., and the ERBE Science Team, 1989. Earth Radiation Budget Experiment (ERBE) archival and April 1985 results. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 70, 1254-1262.
- Comer, R. E., Slingo, A., and Allan, R. P., 2007. Observations of the diurnal cycle of outgoing longwave radiation from the Geostationary Earth Radiation Budget instrument. *Geophysical research letters*, 34(2).
- Doelling, D. R., Loeb, N. G., Keyes, D. F., Nordeen, M. L., Morstad, D., Nguyen, C., Wielicki, B. A., Young, D. F., and Sun, M., 2013. Geostationary enhanced temporal interpolation for CERES flux products. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 30(6), 1072-1090.
- Doelling, D. R., Sun, M., Nguyen, L. T., Nordeen, M. L., Haney, C. O., Keyes, D. F., and Mlynarczyk, P. E., 2016. Advances in Geostationary-Derived Longwave Fluxes for the CERES Synoptic (SYN1deg) Product. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 33(3), 503-521.
- Ellingson, R. G., Yanuk, D. J., Lee, H. T., and Gruber, A., 1989. A technique for estimating outgoing longwave radiation from HIRS radiance observations. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 6(4), 706-711.
- Goldberg, M., Ohring, G., Butler, J., Cao, C., Datla, R., Doelling, D., Gärtner, V., Hewison, T., Iacovazzi, B., Kim, D., Kurino, T., Lafeuille, J., Minnis, P., Renaut, D., Schmetz, J., Tobin, D., Wang, L., Weng, F., Wu, X., Yu, F., Zhang, P., and Zhu, T., 2011. The global space-based inter-calibration system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(4), 467-475.
- Kim, B. Y., Lee, K. T., Jee, J. B., and Zo, I. S., 2018. Retrieval of outgoing longwave radiation at top-of-atmosphere using Himawari-8 AHI data. *Remote Sensing of Environment*, 204, 498-508.
- Kim, B. Y. and Lee, K. T., 2019. Using the Himawari-8 AHI Multi-Channel to Improve the Calculation Accuracy of Outgoing Longwave Radiation at the Top of the Atmosphere. *Remote Sensing*, 11(5), 589.
- Ricchiazzi, P., Yang, S., Gautier, C., and Sowle, D., 1998. SBDART: A research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the earth's atmosphere. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, 2101-2114.
- Schmetz, J., and Liu, Q., 1988. Outgoing radiation and its diurnal variation at regional scales derived from METEOSAT. *Journal of Geophysical Research*, 93, 11192-11204.
- Taylor, P. C., 2012. Tropical outgoing longwave radiation and longwave cloud forcing diurnal cycles

from CERES. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 69(12), 3652-3669.

Wielicki, B. A., Barkstrom, B. R., Harrison, E. F., Lee, R. B., Smith, G. L., and Cooper, J. E., 1996. Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES): An earth observing system experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, 853-868.