

GK-2A AMI

Algorithm Theoretical Basis

Document

상향단파복사 : 대기상한 (RSR)

하향단파복사 : 지표면 (DSR)

흡수단파복사 : 지표면 (ASR)

장정필, 이규태
강릉원주대학교

Version 1.1

2019. 10. 01.

<수정 이력>

문서 버전	수정내용	과학코드 버전	수정일	작성자
0.1	GK-2A/AMI를 이용한 RSR, DSR, ASR 산출의 초기 버전	0.1.0.0	2016.01	이상호, 이규태, 조일성, 김부요, 박혜인
0.2	GK-2A/AMI의 6개 단파 채널을 이용한 RSR, DSR, ASR 알고리즘 추가	0.2.0.0	2017.01	이상호, 김부요, 이규태, 조일성
0.3	SR (RSR, DSR, ASR) 알고리즘 의 통합 그리고 알고리즘 시험 및 검증 결과 추가	0.3.0.1	2018.01	장정필, 김부요, 이규태, 조일성,
0.4	ASR 알고리즘 수정 및 ATBD 수정 및 보완	0.5.5.1	2018.11	장정필, 김부요, 이규태
1.0	ATBD 수정	0.6.0.1	2019.03	장정필, 김부요, 이규태
1.1	ATBD 수정 및 보완	0.6.0.1	2019.10	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	4
2.3.1 L1B	5
2.3.2 L2.....	5
2.3.3 보조 자료	5
2.4 이론적 배경	5
2.5 수학적 설명	6
2.6. 산출물	8
3. 모의자료 및 검증	10
3.1 모의 입력자료 및 검증자료	10
3.2 검증 방법	14
3.3 검증 결과	15
4. 현업운영 시 고려사항	29
4.1 수치계산 고려사항	29
4.2 프로그래밍 및 절차상의 고려사항.....	29
4.3 품질 평가 및 진단	30
4.4 예외사항 처리	30
4.5 검증 알고리즘	31
5. 가정 및 제한	32
5.1 성능	32
5.2 예상 센서 성능	32
5.3 개선을 위한 사전 계획	32

6. 참고문헌.....	33
--------------	----

<표 목차>

표 2.3.1. 단파 복사 산출 기본 입력 자료.....	4
표 2.6.1. 단파 복사 산출물 규격.....	8
표 2.6.2. RSR 산출 정보.....	8
표 2.6.3. DSR 산출 정보.....	9
표 2.6.4. ASR 산출 정보.....	9
표 3.1.1. Himawari-8/AHI와 GK-2A/AMI의 채널에 따른 중심과장.....	10
표 3.1.2. 단파 복사 산출을 위한 Himawari-8/AHI 정보.....	11
표 3.3.1. Himawari-8/AHI 자료를 이용한 GK-2A/AMI RSR (100 km)과 Terra/CERES 자료의 통계 분석 결과.....	22
표 3.3.2. Himawari-8/AHI 자료를 이용한 GK-2A/AMI DSR (100 km)과 Terra/CERES 자료의 통계 분석 결과.....	26
표 3.3.3. Himawari-8/AHI 자료를 이용한 GK-2A/AMI ASR (100 km)과 Terra/CERES 자료의 통계 분석 결과.....	28
표 4.2.1. 단파 복사 알고리즘 개발에 따른 관리 요소 및 방안.....	30

<그림 목차>

그림 2.2.1. 단파 복사 (SR) 산출 알고리즘을 위한 자료처리 흐름도	3
그림 3.1.1. 2017년 9월 1일 0130 UTC에서 Himawari-8/AHI를 이용한 RGB 합성 영상 (a)과 Himawari-8/AHI 자료를 이용한 GK-2A/AMI RSR (b)	12
그림 3.1.2. 2016년 10월 1일 Himawari-8/AHI 자료를 이용한 GK-2A/AMI DSR 산출 결과 0000 UTC (a), 0300 UTC (b)	13
그림 3.1.3. 2017년 8월 1일 Himawari-8/AHI 자료를 이용한 GK-2A/AMI ASR 산출 결과 0000 UTC (a), 0300 UTC (b)	14
그림 3.3.1. 2015년 8월부터 2016년 7월까지의 매월 1일 사례에서 이 알고리즘에 의한 결과와 Terra/CERES의 RSR (20 km)와 두 자료의 백분율 오차 그리고 Terra/CERES의 칭천 비율	16
그림 3.3.2. 2016년 4월 1일에 Sun glint angle	19
그림 3.3.3. Himawari-8/AHI와 Terra/CERES의 RSR 산점도 (그림에서 음영은 1 Wm ⁻² 간격마다 일치하는 2차원 빈도분포를 나타내며 빨간선은 선형 회귀를 나타내고 검정선은 1:1 라인을 의미함)	20
그림 3.3.4. 2017년 8월 3일에서 Himawari-8/AHI 자료를 이용한 GK-2A/AMI RSR (100 km) (a)과 Terra/CERES와의 백분율 오차 (b)	21
그림 3.3.5. Himawari-8/AHI 자료를 이용해 산출한 GK-2A/AMI와 Terra/CERES의 DSR (20km) (a, b)과 두 자료의 백분율 오차 (c) 및 산점도 (d)	24
그림 3.3.6. 2017년 8월 3일에서 Himawari-8/AHI 자료를 이용한 GK-2A/AMI DSR (100 km) (a)과 Terra/CERES와의 백분율 오차 (b)	25
그림 3.3.7. 2017년 8월 3일에서 Himawari-8/AHI 자료를 이용한 GK-2A/AMI ASR (100 km) (a)과 Terra/CERES와의 백분율 오차 (b)	27

약어표

ABI	Advanced Baseline Imager
ADM	Angular Distribution Model
AHI	Advanced Himawari Imager
AMI	Advanced Meteorological Imager
ASR	Absorbed Shortwave Radiation at the surface
ATBD	Algorithm Theoretical Basis Document
CERES	Clouds and the Earth's Radiant Energy System
CLD	Cloud detection
COMS	Communication Ocean and Meteorological Satellite
DSR	Downward Shortwave Radiation at the surface
DLR	Downward Longwave Radiation
ERBE	Earth Radiation Budget Experiment
GK-2A	Geostationary Korea Multi-Purpose Satellite 2A
GOES-R	Geostationary Operational Environmental Satellite-R series
MI	Meteorological Imager
MPE	Mean Percentage Error
RAA	Relative Azimuth Angle
RMSE	Root Mean Square Error
RSR	Reflected Shortwave Radiation at the top of the atmosphere
SBDART	Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer
SAL	Surface Albedo
SR	Shortwave Radiation
SGA	Sun glint Angle
SZA	Solar Zenith Angle
VZA	Viewing Zenith Angle

1. 개요

차세대 정지궤도위성 GK-2A/AMI 센서에 의한 단파 복사 계산 알고리즘 내용들이 이 장에 소개되어 있다. 여기에서 단파 복사는 대기상한에서의 상향단파복사 (RSR)와 지표면에서의 하향단파복사 (DSR) 및 흡수단파복사 (ASR)로 구분된다.

1.1 목적

대기상한에서의 상향단파복사 (RSR) 계산 알고리즘은 구름-복사 상호작용과 열대 대류 활동 및 이동 그리고 몬순과 계절 변동성 등의 연구 활용을 목적으로 한다. 지표면에서의 하향단파복사 (DSR)는 DLR과 함께 지표면의 복사수지 분석을 위한 중요 요소이기 때문에 정확한 계산을 위하여 복사모델로 직접 계산하는 것이 일반적이거나 복사모델 가동을 위한 입력 자료가 제공되지 않을 경우 경험적으로 산출한다. 그리고 지표면에서의 흡수 단파복사 (ASR)는 기상기후 시스템과 수문학적 과정 분석을 위한 중요한 요소이다.

1.2 사용자

단파 복사 산출물은 기상청 관련부서와 농수산업 그리고 신재생에너지 (태양광 및 태양열) 분야 등의 종사자들에게 제공 된다. 그리고 이 문서는 단파복사 알고리즘을 유지 관리 및 수정하는 사람들에게 유용하게 사용된다.

1.3 내용

이 알고리즘 기술 분석서에는 단파복사 알고리즘에 대한 이론적인 배경과 입출력 자료의 특성 및 산출물들 (RSR, DSR, ASR)에 대하여 상세히 설명되어 있다.

1.4 관련 문서

이 알고리즘은 GOES-R ABI ATBD DSR/RSR v2.0 및 ATBD ASR v1.0에 근거한다.

2. 알고리즘 소개

2.1 개요

대기상한에서 반사되는 단파복사는 지표면 (15%)과 대기 상태 (20%) 및 구름 (65%) 특성에 따라 변화하고 특히 구름에 의한 단파복사의 흡수 및 산란 과정은 지구 대기 복사수지와 에너지 균형에 중요한 영향을 미친다. 따라서 1960년 이후부터 대기상한에서의 단파복사 측정을 위하여 많은 노력을 하였고 비교적 최근에는 인공위성 센서인 ERBE (Luther et al., 1986)와 CERES (Wielicki et al., 1996)의 경우 ADM (Loeb et al., 2003)을 적용하여 단파복사를 산출하였다. 그러나 이러한 센서는 극궤도 위성에 탑재되어 특정 지역을 연속 관측 (하루에 약 2회) 할 수 없고 공간해상도 (20 km 이상)가 조밀하지 못한 단점 (Hatzianastassiou et al., 2004) 때문에 정지궤도위성의 필요성이 제기된다.

즉 정지궤도 위성센서 GK-2A/AMI의 경우는 채널별 반사율 자료와 회귀모형을 이용하여 대기상한에서의 광대역 (단파 영역) 반사율 및 단파복사를 산출하게 되고 이때 사용되는 회귀모형은 구름의 광학두께 및 지표면 특성 등에 따른 복사전달모델 결과에 의하여 만들어진다 (Wysocki et al., 1987; Laszlo et al., 1988; Buriez et al., 2007; Wang and Liang, 2016). 그러나 GK-2A/AMI 단파 영역의 채널들은 서로 상관성이 높기 때문에 (Nanni and Demattè, 2006; Mokhtari and Busu, 2011) 다중공선성에 따른 회귀계수 정확성 감소 문제가 발생될 수 있다. 따라서 대기상한에서의 광대역 (단파 영역) 반사율 및 단파복사 계산을 위한 이 알고리즘에서는 능형회귀모형(Draper et al., 1966; Kleinbaum et al., 2013)을 사용하였고 이 기술 분석서의 핵심은 GK-2A/AMI의 협대역 센서 자료를 광대역으로 변환하는 것이며 다음의 2.2~2.6 장에서 자세히 작성하였다.

2.2 알고리즘 흐름도

단파 복사 (SR) 산출 알고리즘을 위한 자료처리 흐름도는 그림 2.2.1과 같다. 즉 채널별 복사휘도를 채널별 반사율로 환산하고 이 값을 대기 조건에 따른 보조 자료 (위도, 경도, 육해상 구분, 지표면 피복 분류, 태양 천정각, 위성 천정각, 상대 방위각, 구름의 유무)와 회귀계수 조건표에 따라 광대역 알베도 및 대기 투과율로 변환하여 단파복사를 산출한다. 이 연구에서 사용된 회귀계수는 SBDART (Ricchiuzzi et al., 1998) 복사전달모델을 이용하여 각 대기조건에 따라 회귀모형을 통해 조건표로 작성된다.

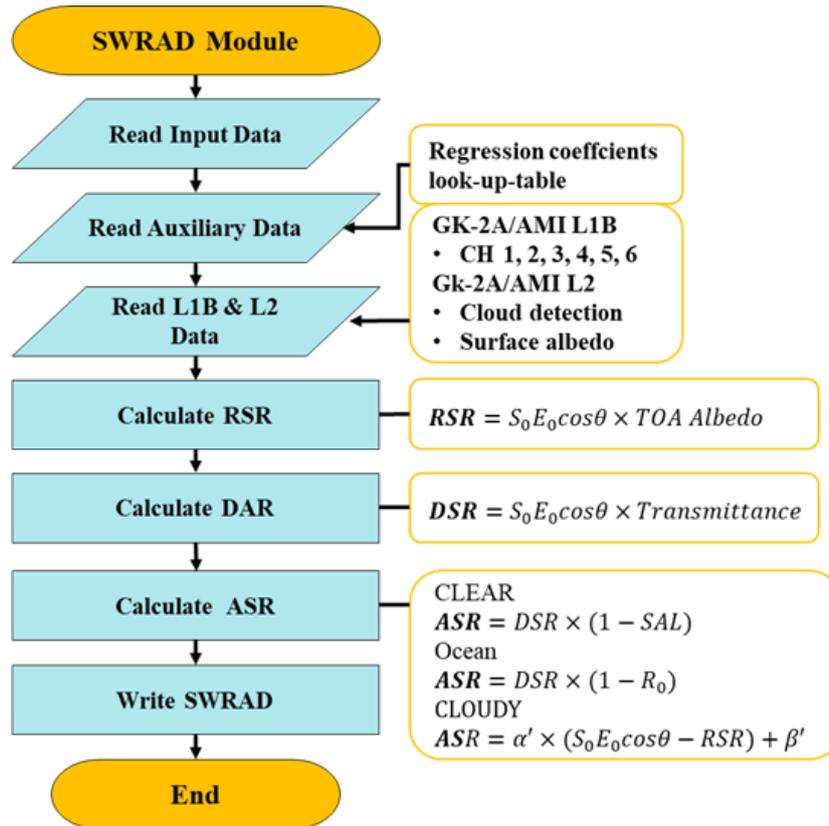


그림 2.2.1. 단파 복사 (SR) 산출 알고리즘을 위한 자료처리 흐름도.

1) 기본 데이터

GK-2A/AMI의 L1B 단파채널 1-6번 복사휘도, L2 구름 탐지 및 지표면 알베도 자료, 보조 자료 (위도, 경도, 육해상 구분, 지표면 피복 분류, 태양 천정각, 위성 천정각, 상대 방위각) 그리고 회귀계수 조건표 사용된다.

2) Calculate RSR

GK-2A/AMI 단파채널 1-6번 복사휘도 자료를 반사율로 환산한 후 대기상한에서의 광대역 알베도를 산출하여 RSR을 계산한다.

3) Calculate DSR

대기상한에서의 광대역 알베도를 대기 투과율로 변환하여 DSR을 산출한다.

4) Calculate ASR

조건에 따라 DSR과 지표면 알베도 (GK-2A/AMI L2 지표면 알베도 (SAL) 또

는 Fresnel 방정식을 이용한 해양 알베도 (R_0)를 이용하여 ASR을 산출하고 지표면 알베도 자료가 없을 경우 RSR과의 상관성을 이용하여 ASR을 산출한다.

2.3 입력자료

단파복사 산출 알고리즘에 필요한 입력자료는 표 2.3.1과 같이 Himawari-8/AHI L1B 단파채널 1-6번 복사휘도 자료가 사용되고 보조 자료는 화소별 위도, 경도, 육해상 구분, 지표면 피복 분류, 태양 천정각, 위성 천정각, 상대 방위각, 회귀계수 조건표가 사용된다. 그리고 GK-2A 선행 산출물로는 L2 구름 탐지 및 지표면 알베도가 필요하다.

표 2.3.1. 단파 복사 산출 기본 입력 자료.

자료	유형	설명
1 (Blue)	Input	GK-2A/AMI L1B Radiance (0.47 μm)
2 (Green)	Input	GK-2A/AMI L1B Radiance (0.51 μm)
3 (Red)	Input	GK-2A/AMI L1B Radiance (0.64 μm)
4 (NIR)	Input	GK-2A/AMI L1B Radiance (0.86 μm)
5 (NIR)	Input	GK-2A/AMI L1B Radiance (1.38 μm)
6 (NIR)	Input	GK-2A/AMI L1B Radiance (1.61 μm)
Latitude	Input	GK-2A/AMI 중심 위도
Longitude	Input	GK-2A/AMI 중심 경도
Landsea	Input	GK-2A/AMI 중심 위·경도에 따른 육해상 구분
Landcover	Input	GK-2A/AMI 중심 위·경도에 따른 지표면 분류
SZA	Input	GK-2A/AMI 중심 위·경도에 따른 태양 천정각
VZA	Input	GK-2A/AMI 중심 위·경도에 따른 위성 천정각
RAA	Input	GK-2A/AMI 중심 위·경도에 따른 상대 방위각
CLD	Input	GK-2A/AMI L2 구름 탐지
SAL	Input	GK-2A/AMI L2 지표면 알베도
LUT	Input	Regression Coefficients

2.3.1 L1B

GK-2A/AMI의 L1B 단파채널 1-6번 채널이 입력자료로 사용된다.

2.3.2 L2

구름 탐지 및 지표면 알베도 자료가 사용된다.

2.3.3 보조 자료

위도, 경도, 육해상 구분, 지표면 피복 분류, 태양 천정각, 위성 천정각, 상대 방위각 및 회귀계수 조건표가 사용된다.

2.4 이론적 배경

대기 중의 단파복사는 대기의 구성 성분과 지표면 특성에 따라 변화하게 되며 특히 구름의 유무와 고도 및 형태는 중요 요소이다. 이와 같은 단파복사 알고리즘은 물리적 근거에 따른 직접 방법보다는 통계적 근거에 의한 간접방법이 많이 사용된다. 이 연구에서도 간접적인 방법으로서 채널별 복사휘도 자료를 반사율로 환산하고 대기조건 및 보조 자료 그리고 회귀계수 조건표를 이용하여 식 3.5.1과 같이 광대역알베도와 대기 투과율 및 단파복사를 계산한다 (식 3.5.2 ~ 3.5.5). 이 알고리즘에서 사용된 회귀계수는 SBDART (Ricchiazzi et al., 1998) 복사전달모델과 각 대기조건 (태양 천정각, 위성 천정각, 상대 방위각, 지표면 특성, 구름의 유무)에 따라 조건표로 작성된다. 즉 이러한 회귀계수는 SBDART를 이용하여 태양 천정각 (0° , 10° , 20° , 30° , 40° , 50° , 60° , 65° , 70° , 75° , 80° , 85° 의 총 12개), 위성 천정각 ($0-85^{\circ}$ 까지 5° 간격의 총 18개), 상대 방위각 ($0-180^{\circ}$ 까지 10° 간격의 총 19개), 표준대기조건 (열대, 중위도 여름, 중위도 겨울, 아북극 여름, 아북극 겨울, 미국 표준대기의 총 6개; McClatchey et al., 1972) 그리고 지표면 특성 (해양, 식생, 눈, 모래의 총 4개; Tanré et al., 1990; Reeves et al., 1975; Wiscombe and Warren, 1980; Staetter and Schroeder, 1978)에 따라 계산되었고 또한 추가적으로 청천 영역에서 에어로졸 종류(시골, 도시, 해양, 대류권의 총 4개)와 시정(5, 10, 15, 20 km의 총 4개) 그리고 구름 영역에서 구름광학두께(8, 16, 32, 64, 128의 총 5개)와 구름 높이(2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 km의 총 8개)에 대하여 계산되었다. 이러한 수치 실험을 위하여 사용되는 회귀모형은 다중선형회귀모형 또는 능형회귀모형으로 계산할 수 있고 다중선형회귀모형은 최소제곱법으로 회귀계수가 결정되나 GK-2A 알고리즘에서와 같이 단파 채널들 간의 상관성이 높으면 다중공선성

존재하여 회귀계수 정확성이 감소되기 때문에 이 알고리즘에서는 능형회귀모형이 사용되었다.

2.5 수학적 설명

단파 복사 산출 알고리즘은 다음과 같다. 즉 대기상한에서의 광대역알베도는 채널별 복사휘도 자료를 이용하여 다음의 식 (2.5.1)과 같은 회귀식으로 계산된다.

$$\begin{aligned} \text{TOA albedo} &= \sum_{i=1}^6 c_i(\theta_0, \varphi_0, \vartheta, \text{Surface type, Absence/presence of clouds})\rho_i \quad (2.5.1) \\ &= c_1\rho_{0.47\mu\text{m}} + c_2\rho_{0.51\mu\text{m}} + c_3\rho_{0.64\mu\text{m}} + c_4\rho_{0.86\mu\text{m}} + c_5\rho_{1.38\mu\text{m}} + c_6\rho_{1.61\mu\text{m}} \end{aligned}$$

여기서 c_{1-6} 는 회귀계수는 각 대기조건에 따라 계산되며 ρ_i 는 각 채널의 반사율을 의미한다. 그리고 이 연구 산출물인 RSR은 식 2.5.1을 이용하여 다음과 같이 산출된다.

$$\text{RSR} = S_0 \cos(\theta_0) \frac{d_0^2}{d^2} \times \text{TOA albedo} \quad (2.5.2)$$

여기서 S_0 , $\cos(\theta_0)$, $\frac{d_0^2}{d^2}$, TOA albedo는 각각 태양 상수, 태양 천정각, 태양과 지구 사이의 거리, 광대역 알베도를 의미한다.

DSR은 식 2.5.3을 이용해 대기의 투과율을 변환한 후 식 2.5.4를 이용하여 산출된다.

$$\text{Transmittance} = (\alpha \times \text{TOA albedo}) + \beta \quad (2.5.3)$$

$$\text{DSR} = S_0 \cos(\theta_0) \frac{d_0^2}{d^2} \times (\text{Transmittance}) \quad (2.5.4)$$

여기서 α 와 β 는 구름의 유무와 육해상 구분에 따른 회귀계수가 적용된다.

ASR은 앞에서 산출된 DSR과 GK-2A L2 지표면 알베도 (SAL)를 이용해 다음과 같이 산출한다.

$$\text{ASR} = \text{DSR} \times (1 - \text{SAL}) \quad (2.5.5)$$

그러나 GK-2A에서 산출되는 지표면 알베도 (SAL)의 경우 육상만을 산출하고 있으며 구름이 있을 경우 산출되지 않기 때문에 지표면 알베도 (SAL)가 산출되지 않는 지역은 RSR과의 상관관계를 이용하여 다음과 같이 산출한다.

$$ASR = \alpha' \times \left(S_0 \frac{d_0^2}{d^2} \cos \theta - RSR \right) + \beta' \quad (2.5.6)$$

해양의 경우 Fresnel reflection 방법 (Vardavas et al, 1995)을 이용하여 해양에서의 알베도를 계산할 수 있으며 이를 이용하여 ASR을 산출한다.

$$ASR = DSR \times (1 - R_0) \quad (2.5.7)$$

$$R_0 = 0.5 \left[\left(\frac{\sin a}{\sin b} \right)^2 + \left(\frac{\tan a}{\tan b} \right)^2 \right] + 0.016 \times \cos \varnothing \quad (2.5.8)$$

$$a = \varnothing - \sin^{-1}[\sin \varnothing / 1.333] \quad (2.5.9)$$

$$b = 2\varnothing - a \quad (2.5.10)$$

$$\varnothing = -\cos^{-1} \mu \quad (2.5.11)$$

$$\mu = \cos \theta \quad (2.5.12)$$

R_0 는 해양에서의 알베도, θ 는 태양 천정각 (SZA)이다.

2.6. 산출물

단파 산출물들은 GK-2A/AMI의 L1B 단파 채널 자료와 L2 (구름탐지 및 지표면 알베도) 자료 그리고 회귀계수 조건표에 의하여 표 2.6.1과 같은 규격으로 산출된다.

표 2.6.1. 단파 복사 산출물 규격.

산출물 요소	대기상한에서의 상향단파복사 (RSR)	지표면에서의 하향단파복사 (DSR)	지표면에서의 흡수단파복사(ASR)
산출 영역	전구(FD)		
산출 시기	주(SZA ≤ 70° , VZA ≤ 70°)		
구름 관련도	유		
연직 해상도	없음		
수평 해상도	FD : 2 km		
생산 주기	매 10분		
사용 채널	0.47, 0.51, 0.64, 0.86, 1.38, 1.60 μm		
산출 정확도	85 Wm ⁻²	85 Wm ⁻²	85 Wm ⁻²

단파복사 산출물은 각각 RSR, DSR, ASR로 저장되고 Quality flag은 태양 및 위성 천정각에 따라 표 2.6.2, 표 2.6.3, 표 2.6.4과 같이 표시된다.

표 2.6.2. RSR 산출 정보.

변수	설명
RSR	공간 해상도 2 km × 2 km의 반구 영역, 시간 해상도 약 10분
Quality_flag1	0: Bad (value < 0 or value > 1300 Wm ⁻²) 1: Good (0 ≤ value ≤ 1300 Wm ⁻²)
Quality_flag2	0: Bad (SZA > 70° , VZA > 70° , SGA < 20°) 1: Good (SZA ≤ 70° , VZA ≤ 70° , SGA ≥ 20°)

표 2.6.3. DSR 산출 정보.

변수	설명
DSR	공간 해상도 2 km × 2 km의 반구 영역, 시간 해상도 약 10분
Quality_flag1	0: Bad (value < 0 or value > 1500 Wm ⁻²) 1: Good (0 ≤ value ≤ 1500 Wm ⁻²)
Quality_flag2	0: Bad (SZA > 70° , VZA > 70° , SGA < 20°) 1: Good (SZA ≤ 70° , VZA ≤ 70° , SGA ≥ 20°)

표 2.6.4. ASR 산출 정보.

변수	설명
ASR	공간 해상도 2 km × 2 km의 반구 영역, 시간 해상도 약 10분
Quality_flag1	0: Bad (value < 0 or value > 1200 Wm ⁻²) 1: Good (0 ≤ value ≤ 1200 Wm ⁻²)
Quality_flag2	0: Bad (SZA > 70° , VZA > 70° , SGA < 20°) 1: Good (SZA ≤ 70° , VZA ≤ 70° , SGA ≥ 20°)

3. 모의자료 및 검증

3.1 모의 입력자료 및 검증자료

단파 복사 산출을 위한 모의 입력 자료는 표 3.1.1 및 3.1.2와 같이 GK-2A/AMI와 유사한 Himawari-8/AHI 자료를 사용하였다. 그리고 L1B 단파 채널 1, 2, 4은 1 km 해상도이고 채널 3은 0.5 km 해상도이기 때문에 각각 2 by 2 또는 4 by 4 화소 (pixel) 평균을 취하여 2 km 해상도로 공간 일치하였다.

검증을 위해 사용된 자료는 극 궤도 위성인 Terra에 탑재된 CERES의 SSF XTRK Edition4A SR(RSR, DSR, ASR) 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. Himawari-8/AHI와 GK-2A/AMI의 채널에 따른 중심파장.

Channel	Himawari-8/AHI	Channel	GK-2A/AMI
1	0.46 μm	1	0.47 μm
2	0.51 μm	2	0.51 μm
3	0.64 μm	3	0.64 μm
4	0.86 μm	4	0.86 μm
		5	1.38 μm
5	1.60 μm	6	1.61 μm
6	2.30 μm		

표 3.1.2. 단파 복사 산출을 위한 Himawari-8/AHI 정보.

Channel	Wavelength [μm]	Resolution		
		Spatial [km]	Numbers of pixels	Temporal
1 (Blue)	0.43 – 0.48	1.0	11,000	
2 (Green)	0.50 – 0.52	1.0	11,000	
3 (Red)	0.63 – 0.66	0.5	22,000	Every 10– minutes
4 (NIR)	0.85 – 0.87	1.0	11,000	Full Disk
5 (NIR)	1.60 – 1.62	2.0	5,500	
6 (NIR)	2.25 – 2.27	2.0	5,500	

1) RSR

모의 자료를 이용한 RSR의 산출 결과는 그림 3.1.1과 같다. 이 그림은 2017년 9월 1일 0130 UTC의 사례로써 그림 3.1.1a는 Himawari-8/AHI의 RGB 합성 영상이며 b는 Himawari-8/AHI 자료를 이용하여 GK-2A/AMI 알고리즘으로 산출한 RSR이다. 즉 이들 그림과 같이 RSR 값은 구름 영역에서 크고 청천 영역에서 작으며 이러한 특성은 Himawari-8/AHI의 RGB 합성 영상과 이 알고리즘에 의한 산출 결과가 잘 일치한다.

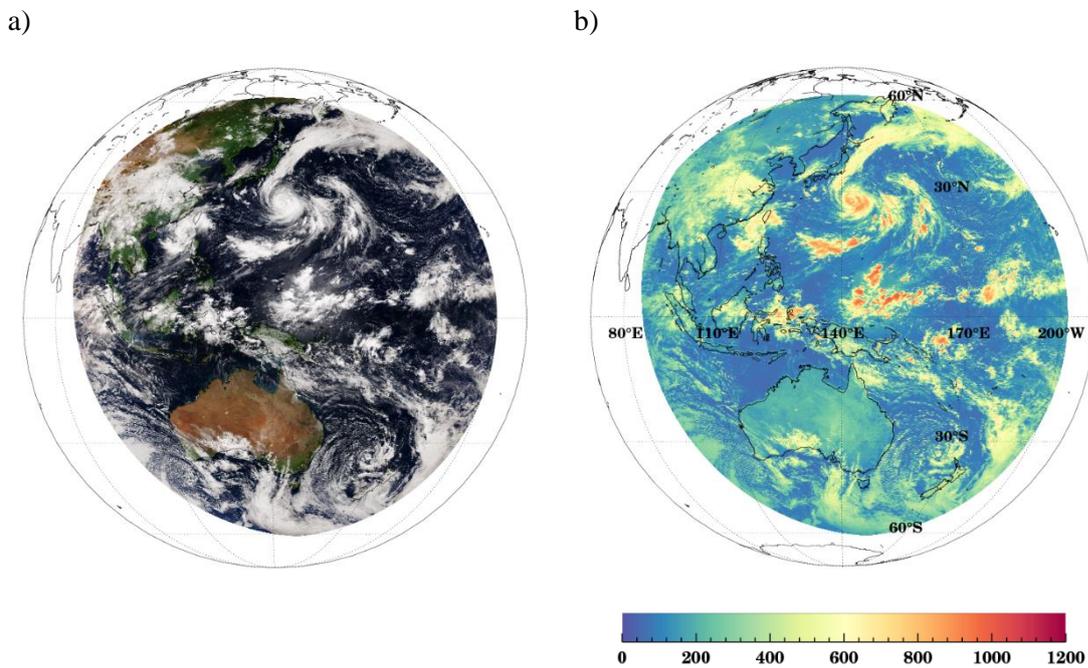
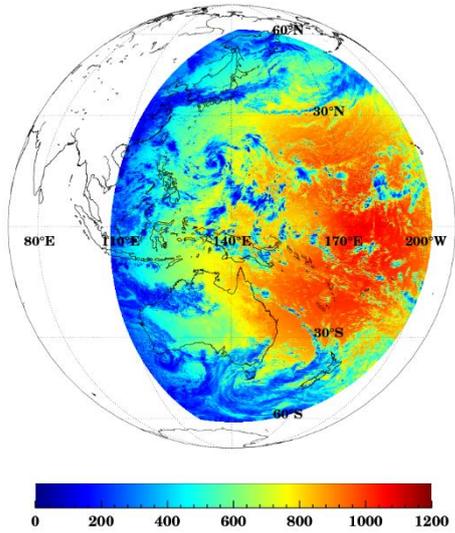


그림 3.1.1. 2017년 9월 1일 0130 UTC에서 Himawari-8/AHI를 이용한 RGB 합성 영상 (a)과 Himawari-8/AHI 자료를 이용한 GK-2A/AMI RSR (b).

2) DSR

그림 3.1.2는 2016년 10월 1일 0000 UTC와 0300 UTC에 산출된 DSR 결과이다.

a)



b)

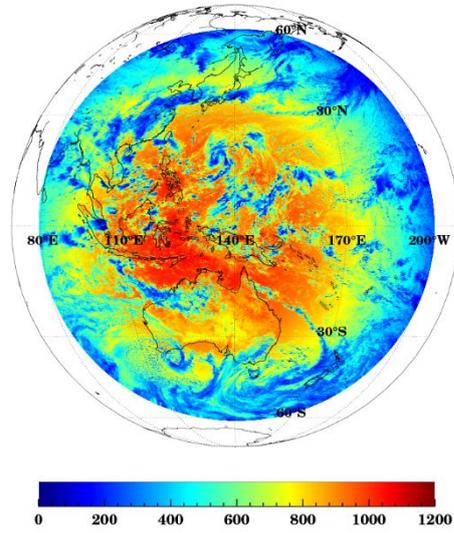


그림 3.1.2. 2016년 10월 1일 Himawari-8/AHI 자료를 이용한 GK-2A/AMI DSR 산출 결과 0000 UTC (a), 0300 UTC (b).

3) ASR

그림 3.1.3은 2017년 8월 1일 0000 UTC와 0300 UTC에 산출된 ASR 결과이다.

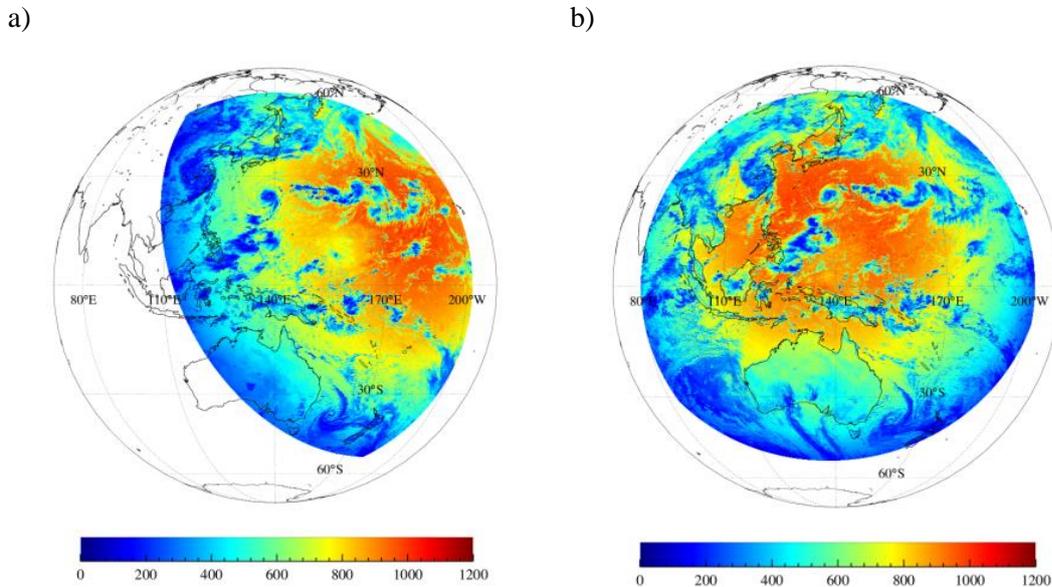


그림 3.1.3. 2017년 8월 1일 Himawari-8/AHI 자료를 이용한 GK-2A/AMI ASR 산출 결과 0000 UTC (a), 0300 UTC (b).

3.2 검증 방법

단파 복사 산출물은 검증을 위하여 극궤도 위성 CERES 자료와 비교하였다. 이 알고리즘에서는 반구 영역 및 호주 영역을 지나가는 스캔 사례 (특정 시간대)에서 CERES의 자료와 비교하였고 그 결과는 상관계수 (R)와 편이 (Bias) 및 평균제곱근오차 (RMSE) 그리고 평균백분율오차 (MPE) 등으로 나타내었다. 그리고 AHI와 CERES 자료의 시·공간 해상도가 다르기 때문에 반구 영역의 경우 CERES의 위·경도를 기준으로 10 km 이내의 화소들을 평균하였고 한반도 영역에서는 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ (예: 100 km \times 100 km) 간격으로 격자화시켜 공간 일치시켰다. 또한 시간 일치를 위해서 AHI의 관측 시각 (예: 0010 UTC)을 기준으로 ± 10 분 이내의 CERES 자료 (예: 0000-0020 UTC)를 이용하였다.

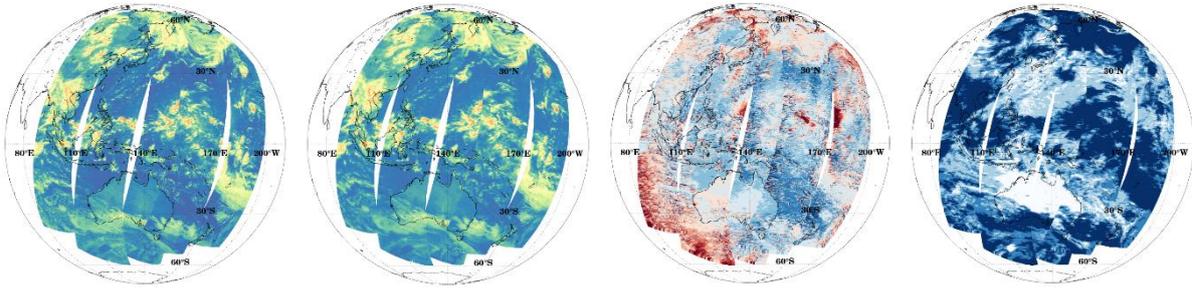
3.3 검증 결과

1) RSR

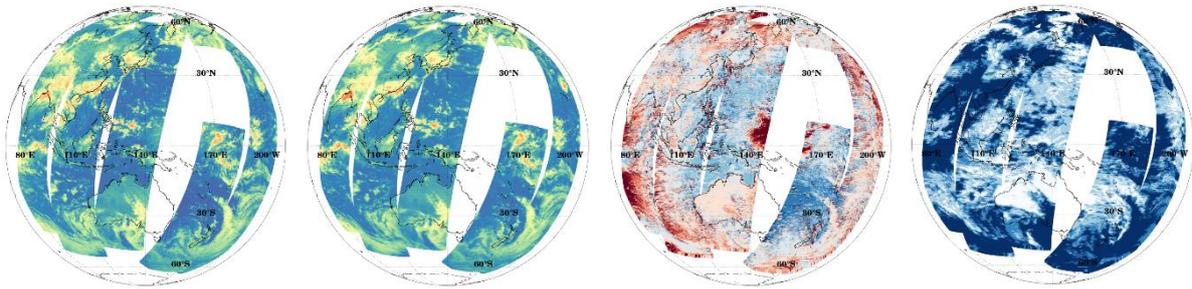
이 연구에서 사용된 사례는 2015년 8월부터 2016년 7월까지의 매월 1일의 주간 사례 중에서 Himawari-8/AHI와 Terra/CERES 자료가 동시에 존재하는 사례로 선정하여 비교 분석을 하였다. 그림 3.3.1과 같이 해당 사례에 대한 연구 결과와 Terra/CERES의 RSR 및 두 자료의 백분율오차 그리고 Terra/CERES의 청천 비율을 나타내었다. 이러한 청천 비율은 0-100%에 따라 구름을 상세 분류하였다 (overcast: < 5%, partly cloudy: 5-50%, mostly cloudy: 50-95%, clear: \geq 95-100%). 또한 주간에 위성과 태양 천정각이 70° 이하인 영역에 대해 수행하였기 때문에 각 사례마다 약 3-5개의 스캔 영역이 분석되었다. 그러나 2015년 11월 1일과 2016년 2월 1일 및 2016년 3월 1일 사례들은 Himawari-8/AHI 자료가 없기 때문에 1-2개의 스캔 영역이 분석되었다.

이 그림에서 이 알고리즘 결과와 CERES의 RSR은 구름의 유무와 지표면 특성에 따라 서로 다르며 고위도로 갈수록 태양 천정각이 커지기 때문에 현저하게 작아졌다. 즉 청천 영역은 지표면 알베도에 따라 지표면과 대기에 의한 다중 산란효과를 일으키고 알베도가 높은 육지 (0.12-0.36)는 상향단파복사 값이 약 150 Wm^{-2} 이었으나 해양 (0.03-0.06)은 약 80 Wm^{-2} 로 이었다. 그러나 구름 영역에서는 지표면 특성보다 구름 특성 (광학두께, 높이, 종류 등)에 따라 좌우되며 약 $300-1200 \text{ Wm}^{-2}$ 로 큰 변동성을 보였다. 또한 두 자료의 백분율오차는 중위도 해양에서 30 % 이상의 큰 차이가 발생되었고 그 원인은 태양 반사광 (sun glint) 때문이다 (Bertrand et al., 2005; Decoster et al., 2014). 그 예로서 2016년 4월 1일 사례에서 태양 반사광이 20° 이하일 경우 위에서 설명한 오차 영역과 일치하였다 (그림 3.3.2). 그리고 구름 영역에서의 두 자료의 차이는 시·공간 불일치 그리고 위성 및 태양 천정각의 증가에 따른 조건표 불확실성 때문이다 (Vázquez-Navarro et al., 2013; Wang and Liang, 2016).

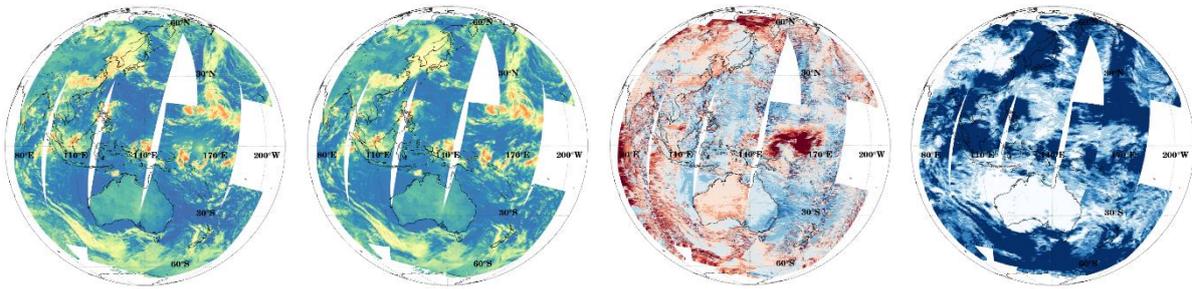
August 1st, 2015 (R=0.96, RMSE=44.99 Wm⁻², MPE=-4.21 %)



September 1st, 2015 (R=0.95, RMSE=47.36 Wm⁻², MPE=2.28 %)



October 1st, 2015 (R=0.96, RMSE=49.06 Wm⁻², MPE=4.00 %)



November 1st, 2015 (R=0.96, RMSE=49.68 Wm⁻², MPE=0.45 %)

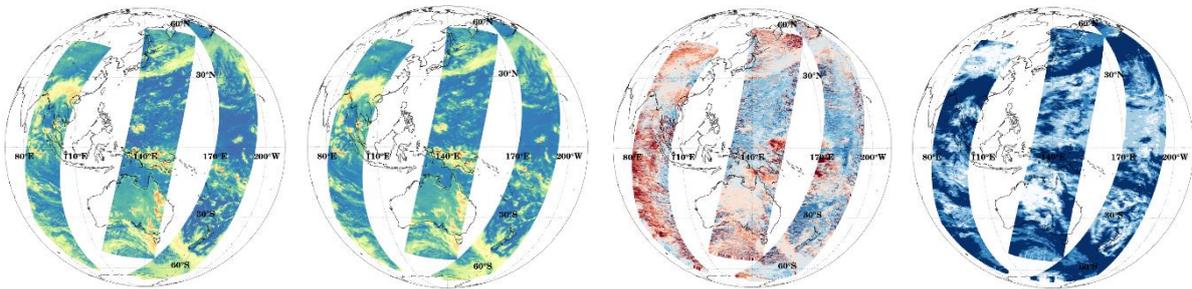
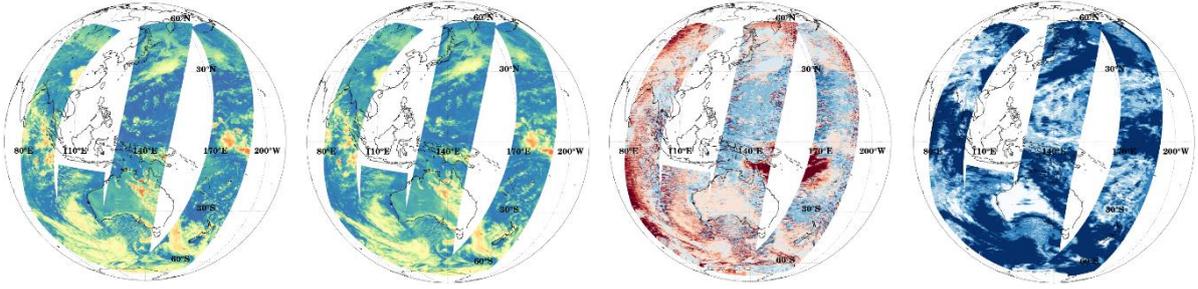
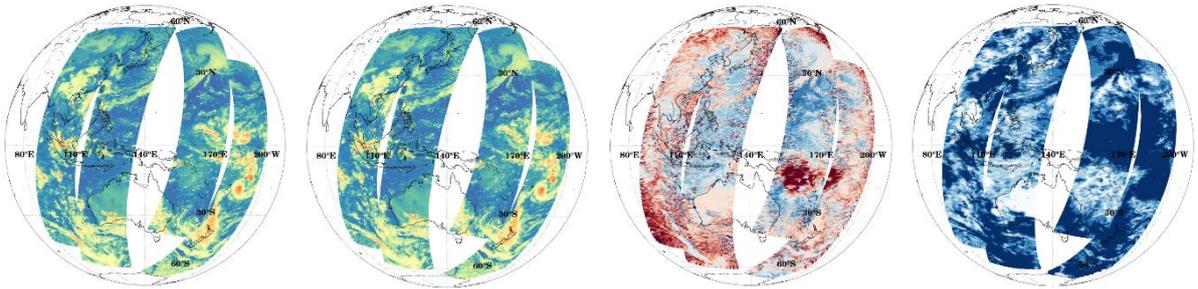


그림 3.3.1. 2015년 8월부터 2016년 7월까지의 매월 1일 사례에서 이 알고리즘에 의한 결과와 Terra/CERES의 RSR (20 km)와 두 자료의 백분율 오차 그리고 Terra/CERES의 청천 비율.

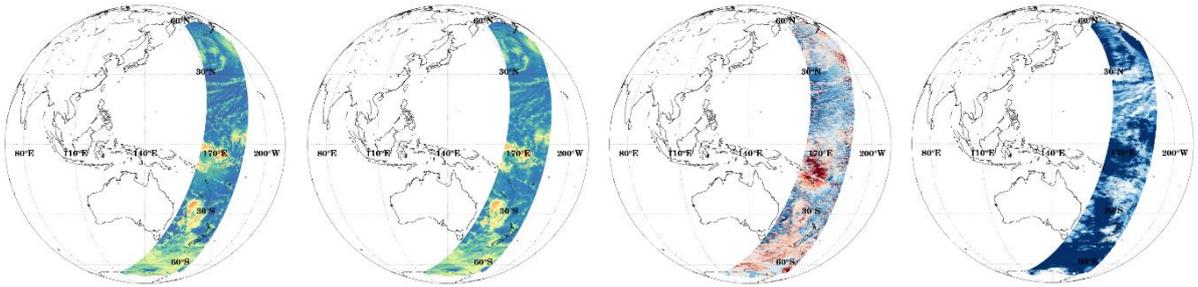
December 1st, 2015 (R=0.96, RMSE=53.64 Wm⁻², MPE=4.10 %)



January 1st, 2016 (R=0.96, RMSE=54.71 Wm⁻², MPE=4.73 %)



February 1st, 2016 (R=0.96, RMSE=47.84 Wm⁻², MPE=-3.23 %)



March 1st, 2016 (R=0.96, RMSE=46.30 Wm⁻², MPE=1.69 %)

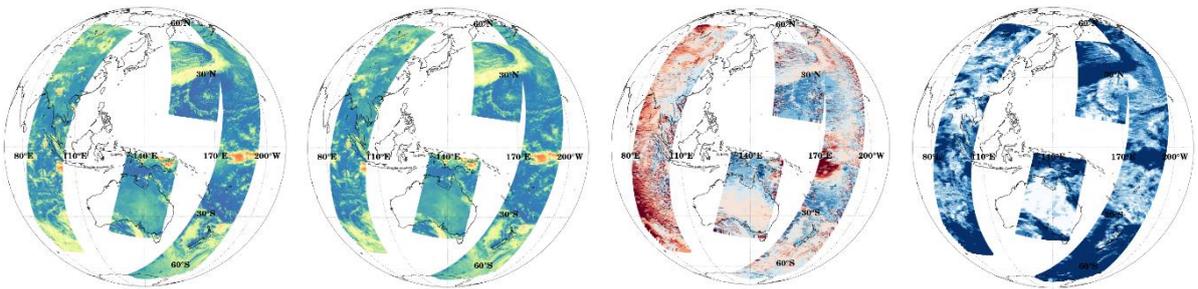
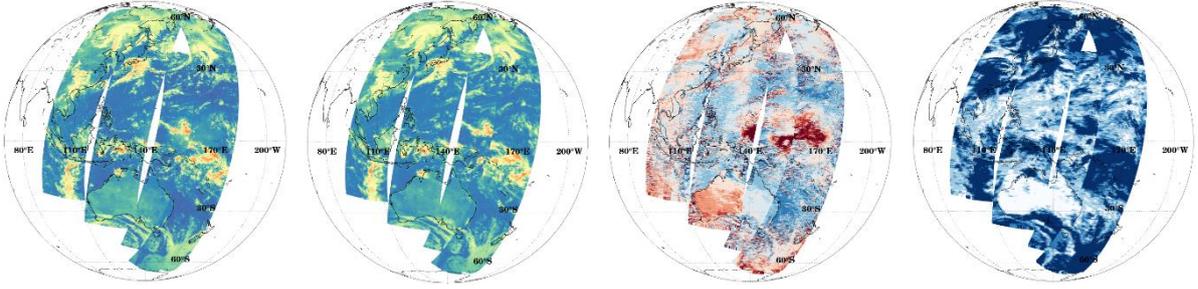
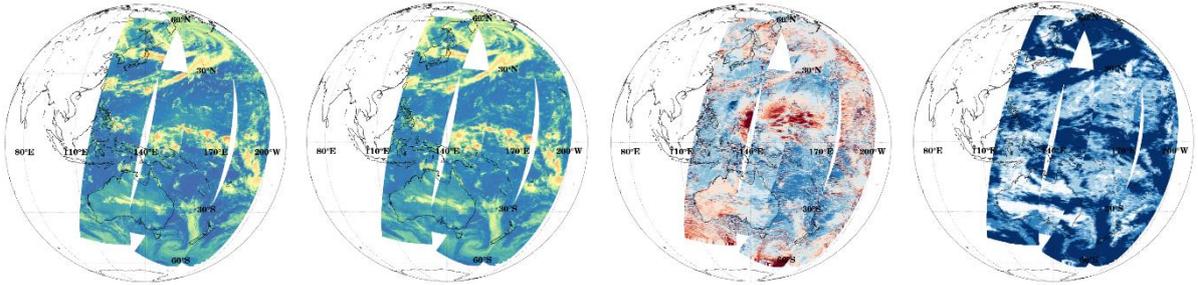


그림 3.3.1. 계속.

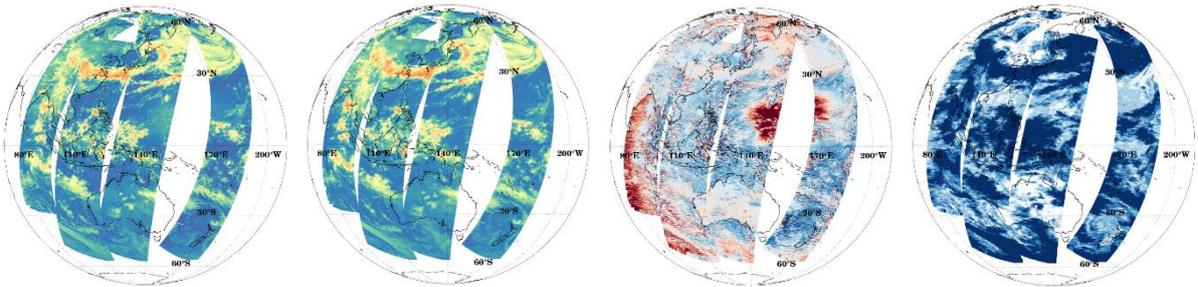
April 1st, 2016 (R=0.96, RMSE=47.32 Wm⁻², MPE=-1.03 %)



May 1st, 2016 (R=0.97, RMSE=43.02 Wm⁻², MPE=-4.90 %)



June 1st, 2016 (R=0.97, RMSE=49.37 Wm⁻², MPE=-3.92 %)



July 1st, 2016 (R=0.96, RMSE=50.59 Wm⁻², MPE=-3.16 %)

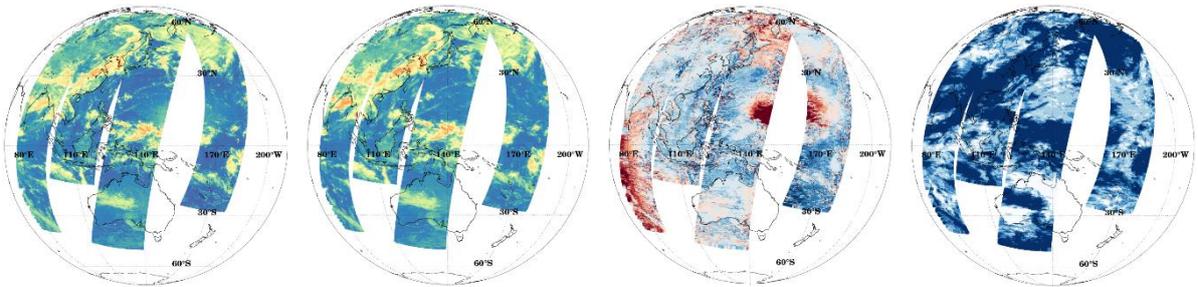


그림. 3.3.1. 계속.

그리고 그림 3.3.1에서처럼 지표면 특성 및 구름 유무에 따른 차이가 있음에도 불구하고 해당 사례에서 두 자료의 상관계수는 0.95 이상으로 높았고 평균제곱근오차와 평균백분율오차는 각각 54.71 Wm^{-2} 와 -4.90% 이하로 분포하였다. 특히 그림 3.3.3에서와 같이 전체 사례에 대한 두 자료의 상관계수는 0.96으로 0.001의 유의수준이었고 편이와 평균제곱근오차는 각각 2.48 Wm^{-2} 와 49.19 Wm^{-2} 로 나타났다. 이러한 결과는 Vazquez-Navarro et al. (2013) 결과와 유사하였으나 위성 자료의 공간 해상도가 클수록 그리고 장기간에 대한 자료가 많을수록 상관계수뿐만 아니라 (Li et al., 2005) 편이와 평균제곱근오차가 좋아진다 (Bhartia, 2016; Wang and Liang, 2017).

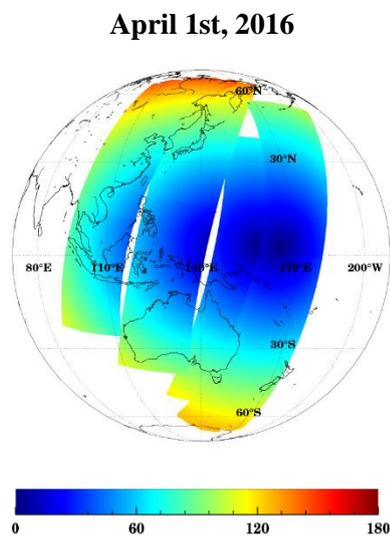


그림 3.3.2. 2016년 4월 1일에 Sun glint angle.

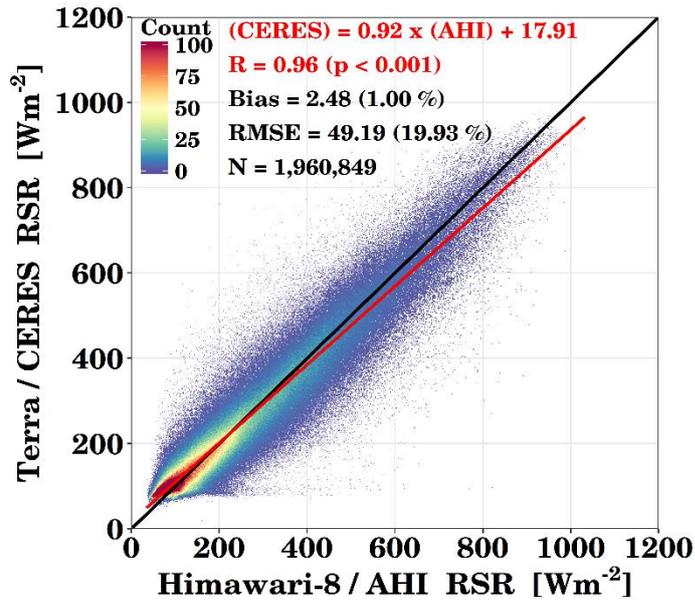
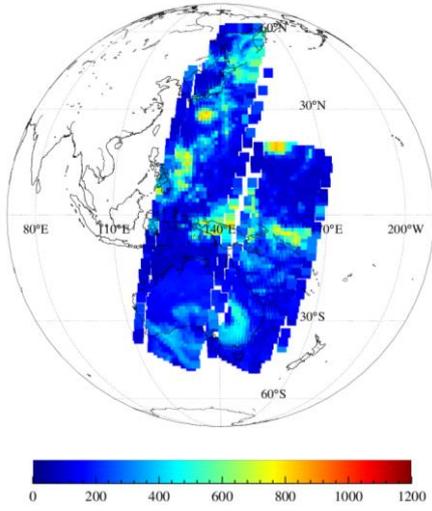


그림 3.3.3. Himawari-8/AHI와 Terra/CERES의 RSR 산점도 (그림에서 음영은 1 Wm^{-2} 간격마다 일치하는 2차원 빈도분포를 나타내며 빨간선은 선형 회귀를 나타내고 검정선은 1:1 라인을 의미함).

그리고 반구 영역에 대한 검증뿐만 아니라 호주 영역을 지나가는 특정 시간대의 스캔 사례를 선정하여 비교하였다. 즉 2017년 8월 3일 사례에 대하여 RSR의 산출 결과는 극궤도 위성의 Terra/CERES와 비교하였고 그 오차는 그림 3.3.4에 나타내었다. 이 그림에서와 같이 백분율 오차는 중위도 해양 영역을 제외하면 $\pm 30\%$ 내외로 보였고 중위도 해양은 태양 반사광 (sun glint)으로 인한 오차이다. 그리고 전체 자료에 대한 상관계수와 평균제곱근오차는 각각 0.96과 42.40 Wm^{-2} 이었고 이 사례뿐만 아니라 2017년 7월 24일부터 8월 7일까지 (총 15 사례)의 평균제곱근오차는 38.53 Wm^{-2} 로 최종 목표정확도 ($< 85 \text{ Wm}^{-2}$)를 만족하였다 (표 3.3.1 참조).

a)



b)

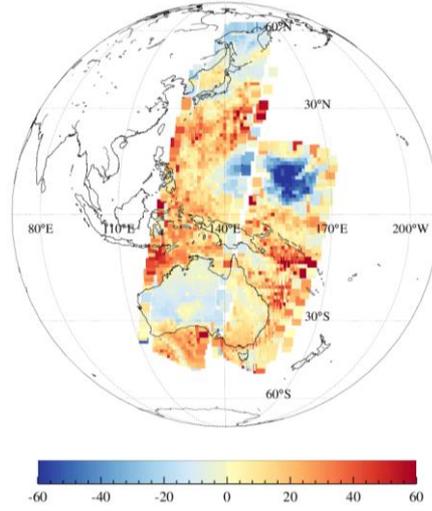


그림 3.3.4. 2017년 8월 3일에서 Himawari-8/AHI 자료를 이용한 GK-2A/AMI RSR (100 km) (a) 과 Terra/CERES와의 백분율 오차 (b).

표 3.3.1. Himawari-8/AHI 자료를 이용한 GK-2A/AMI RSR (100 km)과 Terra/CERES 자료의 통계 분석 결과.

Date [Year-Month- Day]	R	Bias	RMSE	N
2017-07-24	0.96	5.35	40.25	1,139
2017-07-25	0.98	13.51	35.84	2,615
2017-07-26	0.98	10.21	38.52	4,004
2017-07-27	0.99	29.90	34.90	651
2017-07-28	0.99	21.13	35.90	1,657
2017-07-29	0.98	13.41	35.07	1,751
2017-07-30	0.97	9.59	38.63	4,686
2017-07-31	0.98	9.06	30.66	2,768
2017-08-01	0.97	7.41	44.68	2,343
2017-08-02	0.94	7.93	49.55	1,790
2017-08-03	0.96	6.31	42.40	2,864
2017-08-04	0.97	8.57	36.47	4,429
2017-08-05	0.97	4.55	37.29	1,789
2017-08-06	NAN	NAN	NAN	NAN
2017-08-07	0.97	-0.68	37.06	1,804
All	0.97	9.47	38.53	34,290

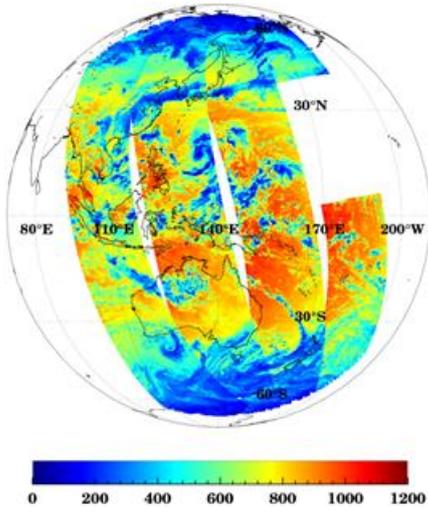
Note: R is the correlation coefficient, Bias in of mean error in Wm^{-2} , RMSE is the root mean square error in Wm^{-2} , N is the number of pairs, NAN is the not a number.

2) DSR

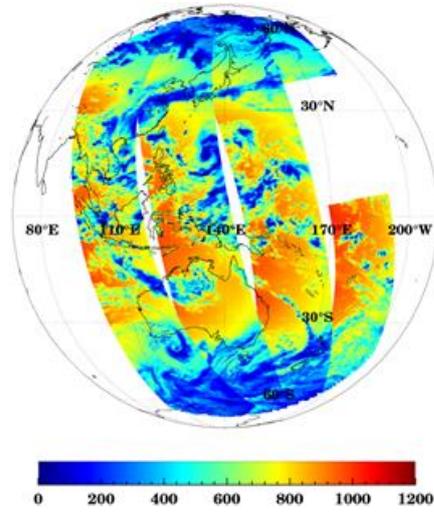
DSR 또한 RSR과 동일하게 CERES 자료를 이용해 반구 영역 및 호주를 지나가는 사례 검증하였다. 반구 영역의 경우 그림 3.3.5는 태풍 차바가 발생한 2016년 10월 1일에 대한 사례로서 a)는 Himawari-8/AHI 자료를 이용하여 GK-2A/AMI 알고리즘으로 산출한 결과이고 b)는 CERES 자료이며 c)는 두 자료의 백분율 오차 (percentage error) 그리고 d)는 산포도이다. 즉 이 알고리즘 결과 (AHI)와 CERES 자료와의 상관계수는 0.95이고 Bias와 RMSE는 각각 $12.07 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 과 $80.27 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 로 나타났다.

그리고 그림 3.3.6은 2015년 8월 3일에 호주 영역을 지나가는 사례로서 a)는 GK-2A/AMI 알고리즘에 AHI 자료를 이용한 산출 결과이고 b)는 CERES 자료와의 백분율 오차이다. 이 그림에서도 CERES 자료와의 상관계수는 0.96이고 RMSE는 77.75 Wm^{-2} 로 나타났고 이 사례뿐만 아니라 2017년 8월 1일부터 8월 7일까지 (총 7 사례)의 평균제곱근오차는 79.94 Wm^{-2} 로 최종 목표정확도 ($< 85 \text{ Wm}^{-2}$)를 만족하였다 (표 3.3.2 참조).

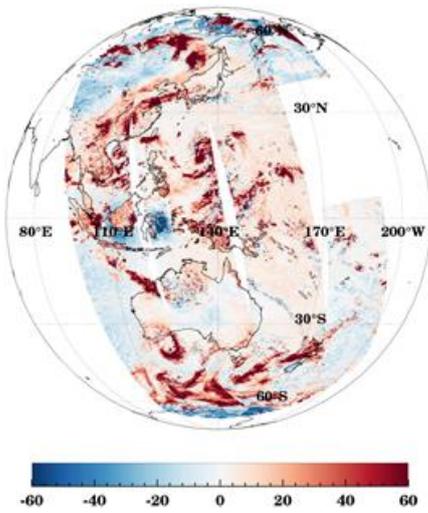
a)



b)



c)



d)

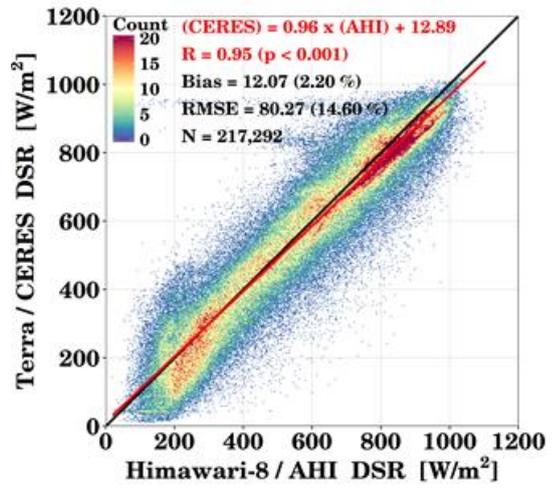
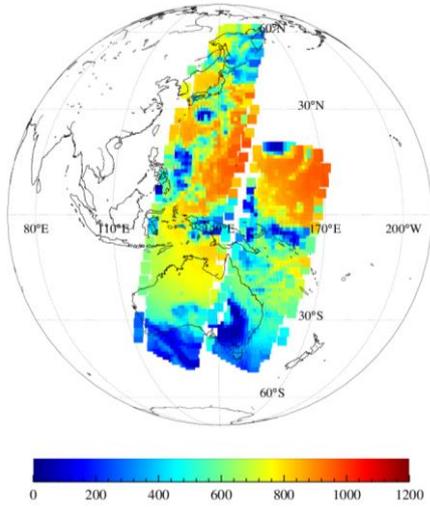


그림 3.3.5. Himawari-8/AHI 자료를 이용해 산출한 GK-2A/AMI와 Terra/CERES의 DSR (20 km) (a, b)과 두 자료의 백분율오차 (c) 및 산점도 (d).

a)



b)

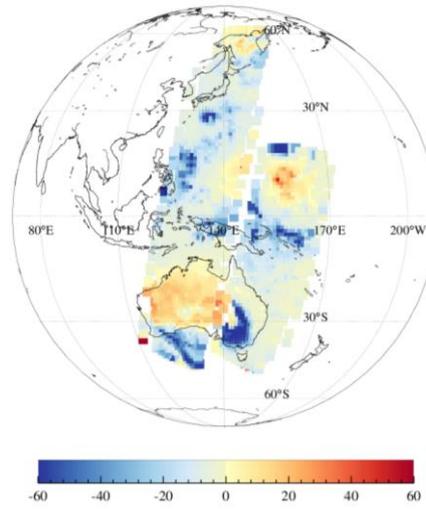


그림 3.3.6. 2017년 8월 3일에서 Himawari-8/AHI 자료를 이용한 GK-2A/AMI DSR (100 km) (a) 과 Terra/CERES와의 백분율 오차 (b).

표 3.3.2. Himawari-8/AHI 자료를 이용한 GK-2A/AMI DSR (100 km)과 Terra/CERES 자료의 통계 분석 결과.

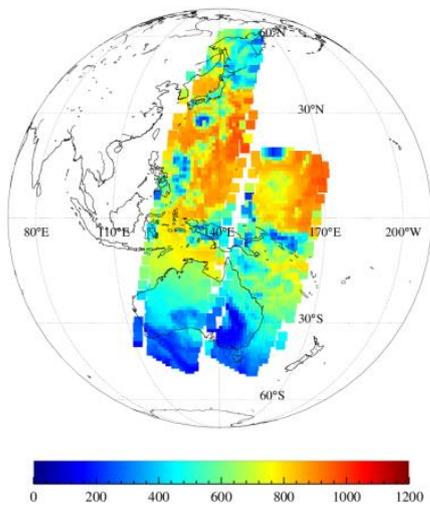
Date [Year-Month- Day]	R	Bias	RMSE	N
2017-08-01	0.95	-54.44	87.70	2,299
2017-08-02	0.94	-40.26	83.15	1,750
2017-08-03	0.96	-41.75	77.75	2,799
2017-08-04	0.96	-51.12	80.89	4,339
2017-08-05	0.95	-39.53	75.08	1,755
2017-08-06	NAN	NAN	NAN	NAN
2017-08-07	0.95	-39.53	71.39	1,770
All	0.95	-44.74	79.94	14,712

Note: R is the correlation coefficient, Bias in of mean error in Wm^{-2} , RMSE is the root mean square error in Wm^{-2} , N is the number of pairs, NAN is the not a number.

3) ASR

ASR의 알고리즘 결과는 2017년 8월 3일에 대하여 CERES 자료와 비교하였고 이들의 상관계수는 0.96이었으며 RMSE는 75.54 Wm^{-2} 이었고 이 사례뿐만 아니라 2017년 8월 1일부터 8월 7일까지 (총 7 사례)의 평균제곱근오차는 78.38 Wm^{-2} 로 최종 목표정확도 ($< 85 \text{ Wm}^{-2}$)를 만족하였다 (표 3.3.3).

a)



b)

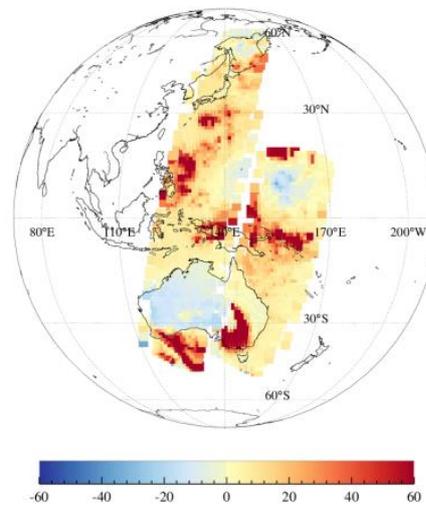


그림 3.3.7 2017년 8월 3일에서 Himawari-8/AHI 자료를 이용한 GK-2A/AMI ASR (100 km) (a)과 Terra/CERES와의 백분율 오차 (b).

표 3.3.3. Himawari-8/AHI 자료를 이용한 GK-2A/AMI ASR (100 km)과 Terra/CERES 자료의 통계 분석 결과.

Date [Year-Month- Day]	R	Bias	RMSE	N
2017-08-01	0.95	57.72	88.01	2299
2017-08-02	0.95	42.88	82.10	1750
2017-08-03	0.96	42.77	75.54	2800
2017-08-04	0.96	52.99	78.91	4331
2017-08-05	0.96	42.52	73.47	1755
2017-08-06	NAN	NAN	NAN	NAN
2017-08-07	0.96	35.29	68.56	1769
All	0.96	47..20	78.38	14704

Note: R is the correlation coefficient, Bias in of mean error in Wm^{-2} , RMSE is the root mean square error in Wm^{-2} , N is the number of pairs, NAN is the not a number.

4. 현업운영 시 고려사항

4.1 수치계산 고려사항

단파 복사 알고리즘 산출의 경우 대기 조건 (태양 천정각, 위성 천정각, 상대 방위각, 지표면 특성, 구름의 유무)에 따른 회귀계수 조건표는 현재 Himawari-8/AHI의 채널에 근거하여 작성되었으나 추후 GK-2A/AMI에 대한 조건표로 수정될 것이다. 또한 단파 복사 알고리즘은 각 화소별 계산을 위한 충분한 메모리 및 저장소 확보가 요구된다.

4.2 프로그래밍 및 절차상의 고려사항

단파 복사 알고리즘은 표 4.2.1과 같이 L1B 자료와 선행 산출물이 입력 자료로 사용되고 이들 자료가 누락될 경우 알고리즘 수행이 불가하거나 품질 저하 현상이 발생할 수 있기 때문에 QC flag 작성이 필요하다.

표 4.2.1. 단파 복사 알고리즘 개발에 따른 관리 요소 및 방안.

발생 현상		관리 방안
L1B 입력자료	L1B 단파 복사휘도 (0.46, 0.51, 0.64, 0.86, 1.38, 1.61 μm) 자료가 수신되지 않는 경우	채널 자료가 누락되면 알고리즘 수행이 불가하기 때문에 QC flag에 상황 작성
	L1B 자료가 수신되었으나 자료의 품질이 낮은 경우	알고리즘은 수행되나 QC flag에 저품질 자료 상태 작성
	기하학 정보(화소에 따른 위도, 경도, 육해상 구분), 대기 조건(태양 천정각, 위성 천정각, 상대 방위각, 지표면 특성) 자료가 수신되지 않는 경우	기하학 정보에 따라 조건표를 작성되었기 때문에 알고리즘 수행이 불가함을 QC flag에 작성
선행 산출물로 부터의 입력자료	L2 구름 탐지 (CLD) 및 지표면 알베도 (SAL) 자료가 수신되지 않는 경우	L2 구름 탐지 (CLD) 및 지표면 알베도 (SAL) 자료가 누락될 경우 알고리즘 수행이 불가하기 때문에 QC flag에 작성
	L2 구름 탐지 (CLD) 및 지표면 알베도 (SAL) 자료가 수신되었으나 품질이 낮은 경우	알고리즘은 수행되나 QC flag에 저품질 자료임을 작성

4.3 품질 평가 및 진단

단파 복사 산출 결과에 대한 유효 화소의 수 점검, 이미지의 검사를 통한 이상치 점검, 음의 단파복사 산출값 점검, 매 10분마다 산출되고 있는지에 대한 연속성 점검 등에 대하여 품질 평가 및 진단 한다.

4.4 예외사항 처리

단파 복사 알고리즘은 표 4.2.1과 같이 입력자료 및 선행 산출물 자료가 누락되는 경우에 대한 조치 사항을 요약하였고 향후 L2 구름 탐지의 플래그에 따른 정확성과 오류 시 플래그에 기록할 계획이다.

4.5 검증 알고리즘

검증은 극 궤도 위성인 Terra 또는 Aqua의 CERES SR(RSR, DSR, ASR)과 함께 GK-2A SR(RSR, DSR, ASR) 자료를 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 영역으로 평균하고 GK-2A 관측 시각을 기준으로 ± 5 분 이내의 CERES 자료와 비교 분석되어야 한다. 또한 이 자료는 VZA와 SZA이 70° 이내에서 분석되어야 한다. Sun glint 지역의 경우 위성간 큰 오차를 유발할 수 있어 Sun glint angle이 20° 이내의 지역은 검증에서 제외한다. 예를 들어 0100 UTC에 산출된 GK-2A SR은 0055-0105 UTC에 관측된 CERES SR과 비교분석될 수 있다.

5. 가정 및 제한

5.1 성능

단파 복사 알고리즘에서 사용되는 회귀계수 조건표는 GK-2A 발사 이후 환경 변화로 인한 수정보완이 가능하다. 또한 ASR과 DSR 알고리즘은 GK-2A 선행산출물인 L2 지표면 알베도 (SAL)와 구름 탐지 (CLD)에 의해 그 성능이 좌우된다.

5.2 예상 센서 성능

GK-2A/AMI의 단파 복사 알고리즘들은 Himawari-8/AHI 자료를 이용하였으나 추후 두 위성의 채널 차이에 따른 조건표 및 결과 검증 개선 작업 수행이 요구 된다.

5.3 개선을 위한 사전 계획

회귀계수 조건표는 위성 및 태양 천정각의 증가에 따라 오차가 커질 수 있기 문에 적절한 각도 설정이 필요하고 또한 구름 영역에서의 알고리즘 정확성 향상을 위한 개선 연구가 필요할 것으로 판단된다.

6. 참고문헌

- AWG Radiation Budget Application Team, 2010. Goes-r advanced baseline imager (abi) algorithm theoretical basis document for absorbed shortwave radiation (surface). version 1.0. Noaa nesdis center for satellite applications and research, 43 pp (Available online at https://www.goes-r.gov/products/ATBDs/option2/RB_ASR_v1.0_no_color.pdf).
- AWG Radiation Budget Application Team, 2012. Goes-r advanced baseline imager (abi) algorithm theoretical basis document for downward shortwave radiation (surface), and reflected shortwave radiation (toa), version 2.0. Noaa nesdis center for satellite applications and research, 104 pp (Available online at <https://www.goes-r.gov/products/ATBDs/baseline/baseline-DSR-v2.0.pdf>).
- Bertrand, C., Clerbaux, N., Ipe, A., Dewitte, S., and Gonzalez, L., 2005. Angular distribution models, anisotropic correction factors, and mixed clear-scene types: A sensitivity study. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(1), 92-102.
- Bhartia, P. K., 2016. Top-of-the-atmosphere shortwave flux estimation from satellite observations: an empirical neural network approach applied with data from the A-train constellation. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9, 2813.
- Buriez, J. C., Parol, F., Poussi, Z., and Viollier, M., 2007. An improved derivation of the top-of-atmosphere albedo from POLDER/ADEOS-2: 2. Broadband albedo. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D19).
- CHOU, M. and Suarez, M. J., 1999. A Solar Radiation Parameterization for Atmospheric Studies, (Vol. 15), NASA/TM-1999-104606.
- Decoster, I., Clerbaux, N., Baudrez, E., Dewitte, S., Ipe, A., Nevens, S., Blazquez, V., and Cornelis, J., 2014. Spectral aging model applied to meteosat first generation visible band. *Remote Sensing*, 6(3), 2534-2571.
- Draper, N. R., Smith, H., and Pownell, E., 1966, *Applied regression analysis*. Wiley New York, 3.
- Hatzianastassiou, N., Fotiadi, A., Matsoukas, C., Pavlakis, K., Drakakis, E., Hatzidimitriou, D., and Vardavas, I., 2004. Long-term global distribution of earth's shortwave radiation budget at the top of atmosphere. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 4(5), 1217-1235.
- Iqbal, M., 2012. *An introduction to solar radiation*. Elsevier.
- Kleinbaum, D., Kupper, L., Nizam, A., and Rosenberg, E., 2013. *Applied regression analysis and other multivariable methods*. Nelson Education.
- Laszlo, I., Gruber, A., and Jacobowitz, H., 1988. The relative merits of narrowband channels for estimating broadband albedos. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 5(6), 757-773.
- Li, Z., Cribb, M. C., Chang, F. L., Trishchenko, A., and Luo, Y., 2005. Natural variability and sampling

- errors in solar radiation measurements for model validation over the Atmospheric Radiation Measurement Southern Great Plains region. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D15).
- Loeb, N. G., Manalo-Smith, N., Kato, S., Miller, W. F., Gupta, S. K., Minnis, P., and Wielicki, B. A., 2003. Angular distribution models for top-of-atmosphere radiative flux estimation from the Clouds and the Earth's Radiant Energy System instrument on the Tropical Rainfall Measuring Mission satellite. Part I: Methodology. *Journal of applied meteorology*, 42(2), 240-265.
- Luther, M. R., Cooper, J. E., and Taylor, G. R., 1986. The Earth radiation budget experiment nonscanner instrument. *Reviews of Geophysics*, 24(2), 391-399.
- McClatchey, R. A., Fenn, R. W., Selby, J. A., Volz, F. E., and Garing, J. S., 1972. Optical properties of the atmosphere (No. AFCRL-72-0497). Air Force Cambridge Research Labs Hanscom AFB MA.
- Mokhtari, M. H. and Busu, I., 2011. Downscaling Albedo from moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) to advanced space-borne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) over an agricultural area utilizing ASTER visible-near infrared spectral bands. *International Journal of Physical Sciences*, 6(24), 5804-5821.
- Nanni, M. R., and Demattê, J. A. M., 2006. Spectral reflectance methodology in comparison to traditional soil analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 70(2), 393-407.
- Reeves, R. G., Anson, A., and Landen, D., 1975. *Manual of Remote Sensing* American Society of Photogrammetry. Falls Church, Virginia, 2(22).
- 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(10), 2101-2114.
- Staetter, R. and Schroeder, M., 1978. Spectral characteristics of natural surfaces. In *Proc. Int. Conf. on Earth Observation from Space and Management of Planetary Resources*. Toulouse, France: Council of Europe, Commission of the European Communities, and European Association of Remote Sensing Laboratories.
- Tang, B., Li, Z. L., and Zhang, R., 2006. A direct method for estimating net surface shortwave radiation from MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 103(1), 115-126.
- Tanré, D., Deroo, C., Duhaut, P., Herman, M., Morcrette, J. J., Perbos, J., and Deschamps, P. Y., 1990. Technical note Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum: the 5S code. *International Journal of Remote Sensing*, 11(4), 659-668.
- Vardavas, I. M., and Koutoulaki, K., 1995. A model for the solar radiation budget of the northern hemisphere: Comparison with Earth Radiation Budget Experiment data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 100(D4), 7303-7314.

- Vázquez-Navarro, M., Mayer, B., and Mannstein, H., 2013. A fast method for the retrieval of integrated longwave and shortwave top-of-atmosphere upwelling irradiances from MSG/SEVIRI (RRUMS). *Atmospheric Measurement Techniques*, 6(10), 2627-2640.
- Wang, D. and Liang, S., 2016. Estimating high-resolution top of atmosphere albedo from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data. *Remote Sensing of Environment*, 178, 93-103.
- Wang, D. and Liang, S., 2017. Estimating top-of-atmosphere daily reflected shortwave radiation flux over land from MODIS data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(7), 4022-4031.
- Wielicki, B. A., Barkstrom, B. R., Harrison, E. F., Lee III, 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(5), 853-868.
- Wiscombe, W. J. and Warren, S. G., 1980. A model for the spectral albedo of snow. I: Pure snow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 37(12), 2712-2733.
- Wydick, J. E., Davis, P. A., and Gruber, A., 1987. Estimation of broadband planetary albedo from operational narrowband satellite measurements.
- Zo, I. S., Jee, J. B., and Lee, K. T., 2014. Development of GWNU (Gangneung-Wonju National University) one-layer transfer model for calculation of solar radiation distribution of the Korean peninsula. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 50(1), 575-584.