

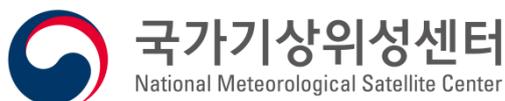
GK-2A AMI
Algorithm Theoretical Basis
Document

지표면 반사도
(Surface Albedo)

한경수 부경대학교
이경상 부경대학교

Version 1.0

2019. 04. 15.



<수정 이력>

문서 버전	수정내용	과학코드 버전	수정일	작성자
0.1	초안 작성	0.1.0.0	2015.03.30	한경수 이창석
0.2	산출 과정 및 결과 내용 추가	0.2.0.0	2016.01.30	한경수 이경상
0.3	산출 과정 및 결과 내용 수정	0.4.0.0	2016.11.30	한경수 이경상
0.4	적설역의 알베도 산출 과정 추가	0.4.1.1	2017.11.15	한경수 이경상
0.5	광대역 전환 계수 수정 및 검증 결과 추가	0.4.2.1	2018.12.10	한경수 이경상
1.0	검토 의견에 따른 수정 및 최신화	0.5.3.1	2019.04.15	한경수 이경상

<목차>

1. 개요.....	10
1.1 목적.....	10
1.2 사용자.....	10
1.3 내용.....	10
1.4 관련 문서.....	10
2. 알고리즘 소개.....	11
2.1 개요.....	11
2.2 알고리즘 흐름도.....	12
2.3 입력자료.....	13
2.3.1 L1B.....	13
2.3.2 L2.....	14
2.3.3 보조 자료.....	15
2.4 이론적 배경.....	18
2.4.1 대기보정.....	18
2.4.2 BRDF 모델링.....	19
2.4.3 배경 지표 반사도.....	20
2.4.4 분광 알베도.....	20
2.4.5 광대역 전환.....	21
2.5 수학적 설명.....	21
2.5.1 대기보정.....	21
2.5.2 BRDF 모델링.....	23
2.5.3 배경 지표 반사도.....	27
2.5.4 분광 알베도.....	28
2.5.5 광대역 전환.....	30
2.6. 산출물.....	31
3. 모의자료 및 검증.....	42
3.1 모의 입력자료 및 검증자료.....	42
3.1.1 모의 입력자료 및 산출 결과.....	42
3.1.2 검증 자료.....	46
3.2 검증 방법.....	47

3.2.1	검증 지수 및 요구 정확도.....	47
3.2.2	시공간 일치 방법	47
3.2.3	검증 화소 선정.....	48
3.3	검증 결과.....	48
4.	현업운영 시 고려사항	53
4.1	수치계산 고려사항	53
4.2	프로그래밍 및 절차상의 고려사항	53
4.3	품질 평가 및 진단	53
4.4	예외사항 처리.....	53
4.4.1	채널 TOC 반사도	53
4.4.2	채널 BRDF parameters & FVBAR	54
4.4.3	채널 배경 지표 반사도.....	54
4.4.4	채널 black/white sky 분광 알베도.....	54
4.4.5	Black/white sky 광대역 알베도.....	54
4.5	검증 알고리즘.....	54
5.	가정 및 제한.....	55
5.1	성능	55
5.2	예상 센서 성능	55
5.3	개선을 위한 사전 계획	55
6.	참고문헌	56

<표 목차>

Table 2.1. Spectral characters of GK-2A/AMI	14
Table 2.2. GK-2A/AMI level2 product used in the GK-2A SAL algorithm.....	15
Table 2.3. Ancillary data used in GK-2A SAL algorithm	16
Table 2.4. Input parameter and its increment for constructing 6S-based LUT.....	17
Table 2.5. Kernel integral of white sky for Roujean model (Roujean et al., 1992) .	29
Table 2.6. Narrow-to-broadband conversion coefficients for GK-2A/AMI shortwave bands (band 1~4, 6)	30
Table 2.7. Content of the BRDF parameters product file	32
Table 2.8. Content of the FVBAR product file	35
Table 2.9. Content of the TOC reflectance product file	36
Table 2.10. TOC reflectance data quality flag information	37
Table 2.11. TOC reflectance input data quality flag information.....	38
Table 2.12. Contents of the BSR product file	39
Table 2.13. Content of the surface albedo product file	40
Table 2.14. Black sky and white sky broadband albedo quality flag information ...	41
Table 3.1. Detail information of AHI used as proxy data	42
Table 3.2. Information of MCD43C3 data used for validation	46
Table 3.3. Temporal and spatial resolution and required accuracy of GK-2A/AMI broadband albedo.....	47

<그림 목차>

Figure 2.1. Flow chart of the GK-2A SAL algorithm. This algorithm is divided into and online mode and an offline mode.	13
Figure 2.2. Pre-calculated atmospheric correction coefficients (a) and interpolated atmospheric correction using MCS method (b) (top : xa, bottom : xb).....	23
Figure 2.3. Plot of geometric (a) and volumetric (b) kernel of BRDF model by roujean et al (1992). A negative part of the VZA indicates that RAA is 0° (backward scattering) and positive part of the VZA indicates that RAA is 180° (forward scattering).....	25
Figure 2.4. Concept of observed and reproduced reflectance on polar orbit (left) and geostationary orbit (right) satellite red triangle and blue solid line represent observed and reproduced reflectance respectively.	27
Figure 2.5. Concept of optimization of BRDF modeling.	27
Figure 2.6. Kernel integral of black sky for Roujean model (Roujean et al., 1992).	29
Figure 3.1. Estimated TOC reflectance using proxy data at each reflectance channels at 03:00 UTC on July 28, 2017.....	43
Figure 3.2. Estimated BSR using proxy data at 3 reflectance channels at 03:00 UTC on August 1, 2017.	43
Figure 3.3. Spatial distribution of K0 and FVBAR on August 4, 2017 and August 1, 2017 respectively.....	44
Figure 3.4. Estimated black sky narrowband albedo using proxy data at each reflectance channels on July 31, 2017.....	44
Figure 3.5. Estimated white sky narrowband albedo using proxy data at each reflectance channels on July 31, 2017.....	45
Figure 3.6. Estimated black (left) and white (right) sky broad albedos on July 31, 2017.	45
Figure 3.7. Comparison between estimated albedo by this algorithm and MODIS albedo product in snow-free condition (left : Black-sky albedo, right : White-sky albedo).	49
Figure 3.8. Comparison between estimated albedo by this algorithm and MODIS albedo product in snowy condition (left : Black-sky albedo, right : White-sky albedo).	49
Figure 3.9. Time series of RMSE and bias for surface broadband albedo from July 3,	

2017 to August 7, 2017.	50
Figure 3.10. RMSE (upper) and bias (lower) (left: black sky, right: white sky) of broadband albedo according to land type (IGBP scheme).	51
Figure 3.11. Time series of black sky broadband albedo according to land type (blue : estimated albedo by GK-2A algorithm, red : MODIS albedo product) .	52
Figure 3.12. Time series of white sky broadband albedo according to land type (blue : estimated albedo by GK-2A algorithm, red : MODIS albedo product) .	52

약어표

AMI	Advanced Meteorological Imager
AOD	Aerosol Optical Depth
BRDF	Bidirectional Reflection Distribution Function
BSR	Background Surface Reflectance
CAMS	Copernicus Atmosphere Monitoring Service
CLD	Cloud Mask
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EUMETSAT	European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites
FVBAR	Fixed Viewing BRDF-Adjusted Reflectance
GCM	Global Climate Model
GK-2A	Geo-KOMPSAT-2A
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite
LUT	Look-Up Table
MCS	Minimum Curvature Surface
MODIS	MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer
MSG	Meteosat Second Generation
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NMSC	National Meteorological Satellite Center
NWP	Numerical Weather Forecast
RAA	Relative Azimuth Angle
RMSE	Root Mean Square Error
RTM	Radiative Transfer Model
SAL	Surface ALbedo
SC	Snow Cover
SEVIRI	Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager
SZA	Solar Zenith Angle
TOA	Top Of Atmosphere
TOC	Top Of Canopy
TOZ	Total Column Ozone
TPW	Total Precipitable Water
VIIRS	Visible/Infrared Imager/Radiometer Suite
VZA	Viewing Zenith Angle

1. 개요

1.1 목적

GK-2A 지표면 반사도 기술분석서는 정지궤도 기상위성인 GeoKompsat-2A (GK-2A)의 Advanced Meteorological Imager (AMI) 센서에서 관측된 Level 1B의 자료로부터 지표면 광대역 알베도 산출에 대한 자세한 설명과 물리적 기반을 제공하는데 그 목적이 있다. 지표면 광대역 알베도는 지표-대기 상호작용 및 에너지 수지를 조절하는 중요한 변수이다.

1.2 사용자

기존의 알고리즘을 수정하거나 유지·보수하고자 하는 사람, 연구자를 포함한 모든 사용자

1.3 내용

지표면 반사도의 기술분석서의 주요 내용은 다음과 같다.

- 개요: 지표면 반사도 알고리즘의 목적, AMI 센서의 특성, 그리고 산출물에 대한 간단한 기술
- 알고리즘 소개: 지표면 광대역 알베도 산출에 필요한 입력자료에서부터 이론적 및 수학적 배경과 최종 산출물에 대한 소개
- 가정과 한계: 알고리즘의 전체적인 평가 및 개선을 위한 향후 계획

1.4 관련 문서

NMSC, 2018, ‘영상 장면분석 표면분야 알고리즘 개발(5)’ 최종보고서

2. 알고리즘 소개

2.1 개요

지표면 광대역 알베도는 지표와 대기 사이에서 에너지와 수분 균형을 결정하는 중요한 기후 요소 중 하나로써, Global Climate Model (GCM), Numerical Weather Forecast (NWF) 모델의 forcing data로 활용 된다. 또한 지표면 광대역 알베도의 변화는 토지 피복과 토지 이용 변화의 중요한 지시자이며 장기간의 변화 분석을 통해 식생-알베도-기후 피드백 작용을 이해하는데 도움을 줄 수 있다.

본 알고리즘은 GK-2A/AMI에서 관측된 대기상한 (Top Of Atmospheric, TOA) 반사도로부터 지표면 광대역 알베도를 산출하는 알고리즘이며 일반적으로 TOA 반사도로부터 지표면 광대역 알베도를 산출하기 위해서는 아래의 3가지 과정을 필요로 한다 (Liang, 2003; Schaaf et al., 2008; LSA SAF, 2012).

- 1) 대기 보정 (Atmospheric correction)
- 2) Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) 모델링
- 3) 광대역 전환 (Narrow-to-broadband conversion)

이러한 과정은 MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) 와 같은 극궤도 위성 탑재되어있는 센서뿐만 아니라 Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager (SEVIRI)와 같이 정지궤도 위성에 탑재되어있는 센서들도 지표면 광대역 알베도를 산출하기 위해 사용하고 있으며 본 알고리즘에서도 이러한 3가지 단계를 거쳐 지표면 광대역 알베도를 산출하게 된다. 먼저 대기보정을 통해 TOA 반사도에서 대기의 영향을 제거하여 지표면 (Top Of Canopy, TOC) 반사도를 산출하게 되며, BRDF 모델링을 통하여 지표면의 이등방성 반사 특성을 나타내는 경험적 계수 및 분광 알베도를 산출한다. 위의 두 과정은 AMI의 각 밴드 별 (1~4, 6)로 진행하게 된다. 마지막으로 통계적 기법을 통해 채널 분광 알베도를 광대역 알베도로 전환하기 위한 계수를 산출 한 후 광대역 전환 과정을 통하여 최종 산출물인 지표면 광대역 알베도를 산출한다.

2.2 알고리즘 흐름도

GK-2A 지표면 반사도 알고리즘의 전체적인 흐름은 Figure 2.16과 같다. 본 알고리즘은 2.1에서 언급한 것과 같이 대기 보정, BRDF 모델링, 광대역 전환 과정을 거쳐 최종적으로 지표면 광대역 알베도를 산출하게 된다. 본 연구에서 사용한 BRDF 모델은 반 경험적 모델로 지표의 이등방성 반사율은 등방성 산란과 표면산란 그리고 체적산란의 합으로 이루어진다고 가정하며, 각각의 산란은 물리적 커널과 경험적 계수로 결정된다. 따라서 BRDF 모델링을 통해 BRDF parameter를 산출하기 위해서는 구름이 없는 조건에서 최소 3회 이상의 관측이 되어야 하며 다양한 각도 조건에서 관측된 자료가 필요하다. 하지만 GK-2A/AMI는 multi-angle 센서가 아니기 때문에 일정 기간의 자료를 합성하여 BRDF 모델링을 수행하게 된다. 본 연구에서는 BRDF 모델링의 정확도 및 공백 화소의 비율을 고려하여 BRDF 모델링을 위한 합성 기간을 5일로 선정하였다. 또한 지속적인 구름으로 인해 발생하는 공백 화소에 대해서는 이전 4일 까지의 BRDF parameter를 이용한 Missing Gap Filling을 수행하였다. 일정 기간의 자료를 합성하고 BRDF 모델링을 수행하는 것은 시간이 많이 걸리는 과정이기 때문에 효율적인 처리를 위하여 전체적인 알고리즘을 offline mode과 online mode으로 나누었다. Offline mode에서는 BRDF 모델링 합성 기간 동안의 시계열 자료를 이용하여 BRDF 모델링을 통해 BRDF parameter, 정규화 반사도를 산출 및 저장하게 된다. 또한 Online mode에서는 대기 보정을 통해 각 단파 채널의 TOC 반사도를 산출 할 뿐만 아니라 offline mode에서 미리 산출된 BRDF parameter를 이용하여 Full Disk 영역의 지표면 광대역 알베도를 1일의 시간 간격으로 산출하게 된다. 이 과정에서 중간 산출물로서 GK-2A/AMI 5개 반사도 채널에 대한 배경지표 반사도와 분광 알베도를 산출 및 저장한다.

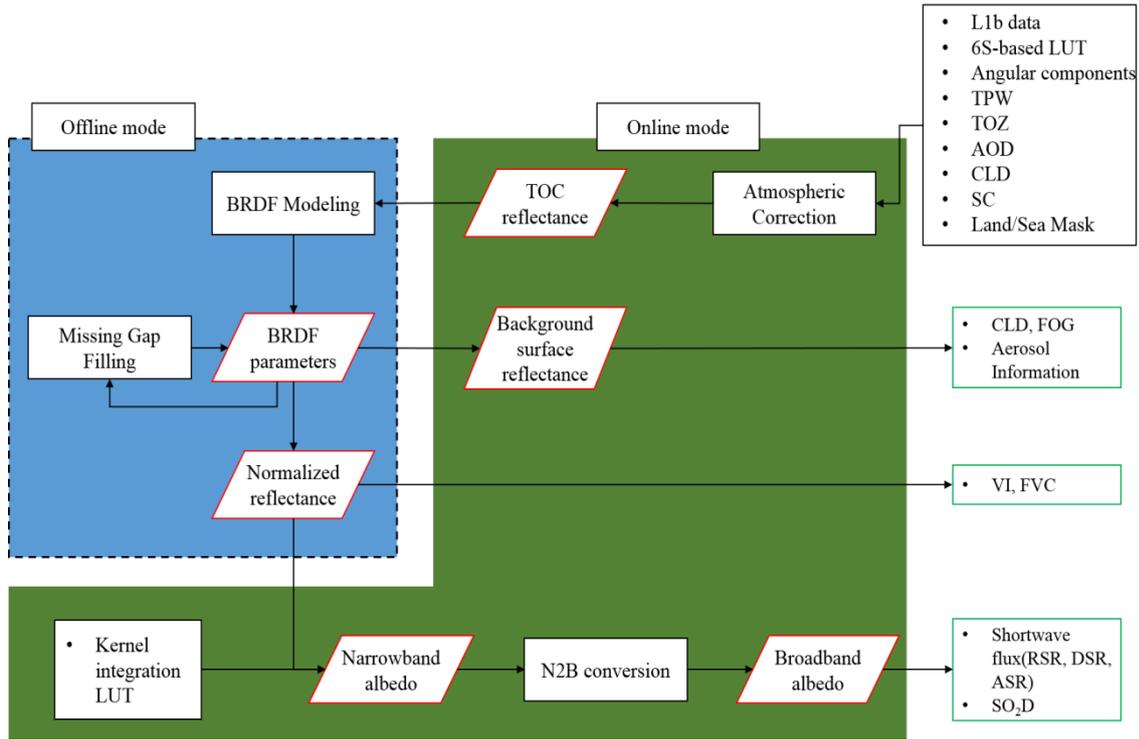


Figure 2.1. Flow chart of the GK-2A SAL algorithm. This algorithm is divided into and online mode and an offline mode.

2.3 입력자료

2.3.1 L1B

본 알고리즘에서는 GK-2A/AMI 16개 채널자료 중 태양광 영역에 해당하는 1, 2, 3, 4, 6번 밴드의 TOA 복사량을 사용한다 (Table 2.1). 5번 밴드 ($1.38\mu\text{m}$)의 경우, 단파 영역에 해당하지만 대기 중에 존재하는 수증기에 의한 강한 흡수가 일어나는 파장대이다. 따라서 구름이 없는 청천역에서도 해당 밴드 관측 자료는 지표면의 정보를 얻을 수 없으므로 해당 알고리즘에서는 사용하지 않는다.

Table 2.1. Spectral characters of GK-2A/AMI

Channel Number	Central Wavelength (μm)	Spatial resolution (km)	Used in SAL algorithm
1	0.470	1	√
2	0.511	1	√
3	0.640	0.5	√
4	0.865	1	√
5	1.380	2	
6	1.610	2	√
7	3.830	2	
8	6.241	2	
9	6.952	2	
10	7.344	2	
11	8.592	2	
12	9.625	2	
13	10.403	2	
14	11.212	2	
15	12.364	2	
16	13.31	2	

2.3.2 L2

본 알고리즘에서는 총 5개의 GK-2A/AMI Level 2 산출물 (CLD, SC, AID, TPW, TOZ)을 선행자료로써 사용한다 (Table 2.2). 모든 GK-2A/AMI Level 2

산출물은 대기 보정 알고리즘의 입력 자료로 사용된다.

Table 2.2. GK-2A/AMI level2 product used in the GK-2A SAL algorithm

Data	Description	Used
CLD	GK-2A/AMI Cloud Mask product	Atmospheric correction
SC	GK-2A/AMI Snow Cover product	Atmospheric correction
AOD	GK-2A/AMI Aerosol Optical Depth product	Atmospheric correction
TPW	GK-2A/AMI Total Precipitable Water product	Atmospheric correction
TOZ	GK-2A/AMI Total Column Ozone product	Atmospheric correction

2.3.3 보조 자료

지표면 광대역 알베도 알고리즘에서 사용하는 보조 자료는 Table 2.3과 같다.

Table 2.3. Ancillary data used in GK-2A SAL algorithm

Data	Description	Used
Land/Sea Mask	Land–Sea Mask	Atmospheric correction
6S–based LUT	Atmospheric correction coefficients (xa, xb, xc) according to AMI observing geometry, spectral response function and atmospheric condition (AOD, TPW, TOZ)	Atmospheric correction
Climatology AOD	AOD climatology from Berthelot et al (1994)	Atmospheric correction
Climatology TPW	Climatology TPW from Lee et al (2015)	Atmospheric correction
Climatology TCO	Climatology TCO from Lee et al (2015)	Atmospheric correction
Kernel Integration LUT	geometric, volumetric kernel integration according to angle component	Estimate spectral albedo
Aerosol Type	Aerosol Type data	Atmospheric correction
SZA	Solar zenith angle	Atmospheric correction BRDF
VZA	Viewing zenith angle	Atmospheric correction BRDF
RAA	Relative azimuth angle	Atmospheric correction BRDF

■ Land/Sea Mask

GK-2A 지표면 반사도 알고리즘의 산출물은 육지 화소에 한하여 산출되며 해상 및 내륙의 수계지역은 산출 대상에서 제외된다. Land/Sea Mask는 육지 화소가 아

닌 지역을 구분하는데 사용된다.

■ 6S 기반 LUT

본 알고리즘에서는 많은 연구에서 사용되고 검증된 Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S) 복사전달모델을 사용하여 대기보정을 수행하였다. 6S는 위성채널의 폭은 2.5 nm로 나누어 대기보정을 수행하여 높은 정확도를 가지고 있지만 현업에서 사용하기에 속도가 느린 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 Look-Up Table (LUT) 방법을 사용한다. LUT 작성을 위한 입력 파라미터의 범위 및 간격은 Table 2.4과 같다.

Table 2.4. Input parameter and its increment for constructing 6S-based LUT

Input parameter (unit)	Min	Max	Increment
SZA (°)	0	80	5
VZA (°)	0	80	5
RAA (°)	0	180	10
TOZ (cm-atm)	0.25	0.35	0.05
TPW (g/cm ²)	0	5	1
AOD	0.01, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.5, 2		
Aerosol Type	Continental, Background desert, Maritime		

■ AOD/TPW/TOZ 기후치

AOD, TPW, TOZ는 대기 보정 시 6S 기반 LUT로부터 대기 보정 계수를 선택하

기 위한 입력 자료로 사용된다. 대기 조건 자료의 부재로 인한 지표면 반사도의 공백 화소를 방지하기 위하여 GK-2A/AMI Level 2 AOD, TPW, TOZ 산출물의 자료를 사용할 수 없을 경우 기후치를 대신하여 사용한다. AOD 기후치는 Berthelot et al (1994)이 제시한 방법을 사용하였으며, TPW와 TOZ 기후치는 Lee et al (2015)의 연구에 따라 결정하였다.

■ Kernel Integration LUT

Kernel Integration LUT는 BRDF 모델을 구성하고 있는 geometric kernel과 volumetric kernel을 각도 성분에 따라 적분한 값으로 black/ white sky 분광 알베도를 산출에 사용된다. 본 알고리즘에서는 kernel 적분 값을 태양 천정각 및 위성 천정각에 따라 미리 계산하여 LUT 형태로 구축하였다.

■ Aerosol type

Aerosol type 자료는 대기 보정 시 에어로솔 유형을 설명하기 위해 사용된다. GK-2A/AMI는 실시간 aerosol type을 제공하기 않기 때문에 ECMWF CAMS에서 제공하는 다년간의 daily aerosol type을 이용하여 aerosol type 자료를 구축하였다.

2.4 이론적 배경

2.4.1 대기보정

지표면 알베도는 지표로 입사하는 태양의 복사에너지와 지표에서 반사되는 에너지의 비율이다. 태양광이 지표로 입사해서 지표반사를 통해 다시 위성센서에 감지되기까지 태양광은 대기를 통과하게 된다. 이때 태양 에너지는 광경로 상에 존재하는 대기 중의 수증기나 오존과 같은 기체와 에어로졸에 의한 흡수 또는 산란의 영향을 받게 된다. 전자의 경우 위성센서에서 관측되는 에너지가 감소되는 반면 후자의 경우 대기 조건에 따라 위성에서 측정된 태양 에너지는 증가 또는 감소될 수 있다. 이는 위성 기반 지표 변수를 산출함에 있어 오차 요인으로 작용하기 때문에 정확한 지표면 알베도를 산출하기 위해서는 먼저 대기 보정을 통해 대기효과의 제

거가 필요하다. GK-2A 지표면 알베도 알고리즘에서는 대기 보정을 수행하기 위하여 6S 복사전달 모델을 이용하였다. 2.3.3에서 언급한 것과 같이 정확도 및 처리효율을 고려하여 LUT 방법을 사용하였다 (Vermote and Vermeulen, 1999; Gao et al., 2000; Liang et al., 2001; Lyapustin et al., 2011). 6S 복사 전달 모델의 입력 자료로는 각도 성분 (태양 천정각, 위성 천정각, 상대 방위각)과 대기 조건 (총가장수량, 총오존량, 에어로솔광학두께)을 사용하였으며 LUT 구성 요소는 각 입력 파라미터 조건 별 대기 보정 계수 (x_a , x_b , x_c)이다.

LUT를 사용하여 대기 보정을 수행할 경우 입력 파라미터의 간격에 따른 불연속면이 발생하며 특히 태양 천정각 및 위성 천정각의 영향을 가장 크게 받는다. 따라서 본 알고리즘에서는 6S RTM을 기반으로 작성한 LUT를 태양 천정각과 위성 천정각에 따라 상세화를 수행하여 사용하였다.

2.4.2 BRDF 모델링

일반적인 지표는 태양광의 입사각도와 관찰자의 시야각에 따라 동일한 지표라도 다른 반사율을 가지는 비등방성 반사특성을 가진다. 알베도는 각도에 따라 변하지 않는 대상 지표가 가지는 일정한 반사율을 말한다. 따라서 모든 각도에 대한 지표면의 이등방성 반사율을 고려할 수 있는 BRDF 모델링은 지표면 알베도 생산에 필수적인 과정이며 현재 Terra/Aqua, SPOT, Suomi NPP 등과 같은 극궤도 위성 뿐만 아니라 GOES-R, MSG와 같은 정지궤도 위성에서도 BRDF 모델링을 통해 지표면 광대역 알베도를 산출하고 있다.

현재 지표면 알베도 자료를 지속적으로 산출하고 있는 The National Aeronautics and Space Administration (NASA)와 European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT)에서는 동일한 형태의 선형 반경험적 BRDF 모델을 사용하고 있다. 반경험적 모델은 물리모델에 비해 계산이 빠르고 다양한 토지피복에 적용이 가능하며 경험적 모델에 비해 적은 수의 관측자료를 이용하여 BRDF 모델링이 가능한 장점이 있다 (Wanner et al., 1995). NASA와 EUMETSAT에서 사용하는 BRDF 모델을 구성하는 kernel중 geometric kernel의 경우 NASA는 Li and Strahler (1986)에 의해 제시된 Li-

Sparse kernel을 사용하며 EUMETSAT은 Roujean et al. (1992)에 의해 제시된 Roujean geometric kernel을 사용하고 있다. 본 알고리즘에서는 Roujean model을 사용하여 BRDF 모델링을 수행하였으며 이에 대한 자세한 설명은 2.5.2에 언급되어 있다.

2.4.3 배경 지표 반사도

지표면 반사도는 식생지수, 식생유형 등의 다양한 지표면 정보를 산출하는데 필수적인 요소이다. 하지만 위성 관측은 관측 당시의 구름 존재 유무, 대기 조건에 따라 넓은 지역에서 지표면 반사도를 산출하지 못한다는 문제점이 있다. BRDF 모델은 지표면 반사도를 등방성 산란, 표면 산란, 체적 산란의 합으로 정의하고 있으며 각 요소를 구성하는 커널과 커널의 기여도인 BRDF parameters는 관측 당시의 각도 성분 및 BRDF 모델링을 통해 산출할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 BRDF 모델링을 통해 산출된 BRDF parameters를 이용하여 배경 지표 반사도를 생산하였다. 이는 구름의 유무 및 대기 조건에 영향을 받지 않는 지표면의 이등방성 반사율을 의미한다.

2.4.4 분광 알베도

실제 알베도는 blue sky 알베도라고 하며, 직달 성분과 대기성분에 의한 산란 성분에 대한 알베도로 구성된다. 위성자료를 이용한 알베도 산출에는 바로 blue sky 알베도를 구하지 않고 대기의 상태를 완전 투과가 일어나는 black sky 알베도와 태양광이 대기 내에서 완전 산란이 일어나는 white sky 알베도로 구분하여 생산하고 있다. 각도성분에 따른 BRDF 커널의 적분 과정은 모든 각도에 대한 이등방성 반사도를 고려하기 위해 수행되며, black sky와 white sky를 구분하기 위한 필수 과정이다. Black sky의 경우 BRDF 모델을 구성하는 각 커널을 위성 천정각과 상대 방위각으로 적분을 수행하며, white sky의 경우 black sky kernel 적분 결과를 다시 태양 천정각으로 적분을 수행하게 된다. 이에 대한 자세한 설명은 2.5.4에 기술되어 있다.

2.4.5 광대역 전환

실제 지구의 에너지 및 수분 지수를 결정하는 것은 지표면 광대역 알베도이다. 기후연구를 위해서는 위성으로 관측된 좁은 파장대의 분광 알베도를 광대역 알베도로 전환하는 과정이 필요하게 되며 이는 경험적, 통계적 관계를 기반으로 수행된다. Liang (2001)은 다양한 위성의 분광 알베도를 복사전달모델과 항공기에 탑재된 광학센서를 이용하여 생산된 광대역 자료와 통계적 분석을 통해 각 분광 알베도에 가중치를 설정하여 광대역 알베도를 생산하였으며 이는 실제 MODIS의 광대역 알베도를 산출하는데 사용되고 있다 (Luchet et al., 2000). 본 알고리즘에서도 이와 같은 방법으로 AMI 각 채널의 분광 알베도를 지표면 광대역 알베도로 전환하기 위한 AMI 분광 알베도의 가중치 및 식을 산출하였다.

2.5 수학적 설명

2.5.1 대기보정

본 알고리즘에서는 위성에서 관측된 TOA 반사도에서 대기 효과를 제거하여 TOC 반사도를 산출하기 위해서 6S 복사전달모델을 사용하였다. 6S 복사전달모델은 Vermote et al. (1997)에 의해 개발되었으며 벡터버전인 6SV는 2005년에 개발되었다. 6SV는 아래 식 2.1과 2.2를 통해 TOC 반사도를 산출한다.

$$\rho_{TOA}(\theta_s, \theta_v, \phi) = T_g(\theta_s, \theta_v) \left[\rho_{R+A} + T^\downarrow(\theta_s) T^\uparrow(\theta_s) \frac{\rho_s}{1 - S \rho_s} \right] \quad (2.1)$$

$$\rho_s = \frac{\frac{\rho_{TOA}(\theta_s, \theta_v, \phi)}{T_g(\theta_s, \theta_v)} - \rho_{R+A}}{T^\downarrow(\theta_s) T^\uparrow(\theta_v)} \quad (2.2)$$

ρ_{TOA} 는 채널의 TOA 반사도를 의미하며, θ_s, θ_v, ϕ 는 각각 태양천정각, 위성천정각, 상대방위각을 의미한다. 또한 T_g 는 H₂O, CO₂, O₂, O₃와 같은 주요 흡수 가스에 대한 총 가스 전달을 나타낸다. S는 대기의 하단에 등방성 빛이 들어갔을 때 대기에 의해 반사된 정규화된 복사조도인 대기의 spherical 알베도를 나타낸다. ρ_{R+A} 는 대기 분자와 에어로졸 산란에 의해 나타나는 고유의 반사도를 의미하며 T^\downarrow 와 T^\uparrow 는

각각 태양-지표, 위성-지표의 복사경로상의 대기 총 투과율을 의미한다.

6SV는 위성 채널의 밴드 폭을 2.5nm로 분할하여 계산하기 때문에 높은 정확도를 가지고 있지만 계산 과정이 복잡하고 계산 시간이 오래 걸리기 때문에 많은 양의 위성영상을 단기간에 처리하는 현업에서 대기보정 모델로 사용하기에는 어려움이 있다. 따라서 본 알고리즘에서는 2.4.1에서 언급했듯이 이러한 문제를 해결하기 위해서 LUT 방법을 사용하였다. LUT 방법은 입력 파라미터의 조건에 따라 필요한 계수들을 사전에 산출해두고 실제 대기보정 시에는 관측 조건에 가장 가까운 조건에 해당하는 계수를 사용하는 것으로, 높은 정확도와 빠른 계산시간으로 인해서 여러 연구 및 현업에서 사용되고 있다. LUT 방법은 입력 파라미터의 종류 및 간격을 결정하는 것이 중요하다. 본 알고리즘에서 사용된 LUT를 구축하기 위한 입력 파라미터 및 간격은 Table 2.4와 같으며 LUT를 구성하는 각 입력 파라미터의 간격은 정확도 및 처리 시간을 고려하여 결정하였다. 구축된 6S 기반 LUT는 6SV 복사전달 모델의 출력물인 3개의 대기보정계수(x_a , x_b , x_c)로 이루어져 있으며 식 2.3을 통해 대기 보정을 수행하였다.

$$\rho_{TOC} = \frac{x_a \times L - x_b}{1 - x_c(x_a \times L - x_b)} \quad (2.3)$$

ρ_{TOC} 는 대기 보정 후 산출된 TOC 반사도를 의미하며 L 은 위성의 센서에서 관측된 TOA 복사휘도를 의미한다. x_a , x_b , x_c 는 각각 path radiance, 태양 입사 각과 위성의 보기각에 따른 총 산란 투과도, 대기 기저로 입사하는 등방성 빛의 대기 반사율을 나타낸다. (Vermote and Vermeulen, 1999).

6S 복사전달모델을 통해 구축된 6S 기반 LUT를 사용하여 대기 보정을 수행했을 경우, 산출된 TOC 반사도는 LUT를 구성하는 입력 파라미터의 간격에 따라 불연속면이 발생하며 이는 특히 태양천정각 및 위성천정각의 영향을 크게 받고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 본 알고리즘에서는 6SV 기반 LUT를 그대로 사용하지 않고 6SV 복사전달 모델에서 제공하는 3개의 대기보정계수 중 태양천정각과 위성천정각에 영향을 받는 x_a 와 x_b 에 대해 Minimum Curvature Surface (MCS) 기법을 이용해서 상세화한 후 사용하였다. MCS 기법은 Smith and Wessel

(1990)에 의해 개발되었으며 많은 양의 자료를 상세화하는데 적합하며 빠른 계산 속도를 가지고 있다. 상세화 전·후의 6S 기반 LUT는 Figure 2.2와 같다. 상세화된 LUT는 태양천정각 및 위성천정각에 따른 대기 보정 계수의 변화경향 및 높은 태양천정각과 위성천정각에서 침두되는 경향을 잘 표현하고 있다.

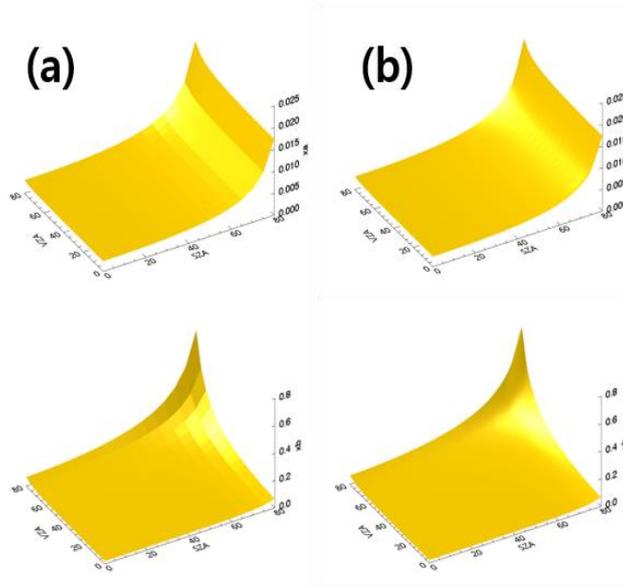


Figure 2.2. Pre-calculated atmospheric correction coefficients (a) and interpolated atmospheric correction using MCS method (b) (top : xa, bottom : xb).

2.5.2 BRDF 모델링

본 연구에서는 BRDF 모델링을 수행하기 위해서 반경험적 BRDF 모델 중 하나인 Roujean BRDF 모델을 사용하였다. Roujean BRDF 모델은 Roujean et al. (1992)에 의해 개발되었으며 Ross-Thick volumetric kernel과 Roujean geometric kernel 및 각 산란의 정도를 나타내는 경험적 계수로 구성되어 있다 (식 2.4.)

$$R(\theta_s, \theta_v, \phi) = K_0 + K_1 \cdot f_1(\theta_s, \theta_v, \phi) + K_2 \cdot f_2(\theta_s, \theta_v, \phi) \quad (2.4)$$

위 식에서 θ_s , θ_v , ϕ 는 각각 태양천정각, 위성천정각, 상대방위각을 의미한다. f_1 과 f_2 은 각각 geometric 커널과 volumetric 커널을 의미하며 지표면에서 일어나는 geometric 산란과 volumetric 산란을 표현한다. Roujean et al. (1992)는 f_1 과 f_2 를 태양-지표-위성이 이루는 각도성분으로 표현하였으며 아래와 같다.

$$\begin{aligned}
 f_1(\theta_s, \theta_v, \phi) &= \frac{1}{2\pi} [(\pi - \phi) \cos \phi + \sin \phi] \tan \theta_s \tan \theta_v \\
 &\quad - \frac{1}{\pi} \left(\tan \theta_v + \tan \theta_s + \sqrt{\tan^2 \theta_v + \tan^2 \theta_s} \right. \\
 &\quad \left. - 2 \tan \theta_s \tan \theta_v \cos \phi \right)
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

$$f_2(\theta_s, \theta_v, \phi) = \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{1}{\cos \theta_s + \cos \theta_v} \left[\left(\frac{\pi}{2} - \zeta \right) \cos \zeta + \sin \zeta \right] - \frac{1}{3} \tag{2.6}$$

$$\zeta = \arccos[\cos \theta_v \cos \theta_s + \sin \theta_v \sin \theta_s \cos \phi] \tag{2.7}$$

Figure 2.3은 각기 다른 태양천정각 조건 (0° , 30° , 60°)에서 위성천정각에 따른 geometric 커널과 volumetric 커널을 나타낸다.

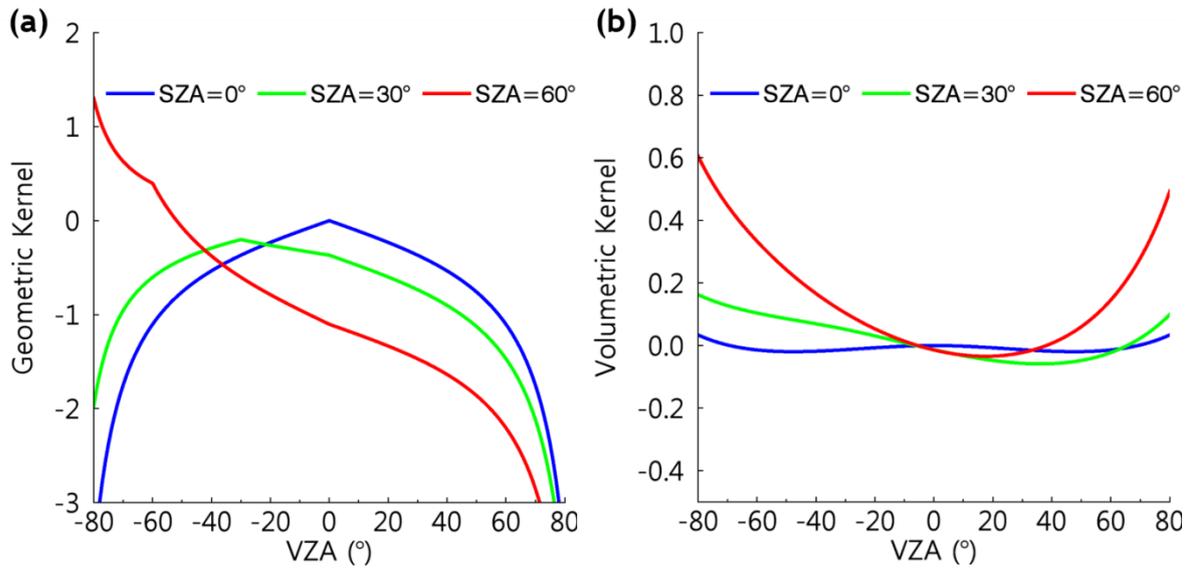


Figure 2.3. Plot of geometric (a) and volumetric (b) kernel of BRDF model by roujean et al (1992). A negative part of the VZA indicates that RAA is 0° (backward scattering) and positive part of the VZA indicates that RAA is 180° (forward scattering).

극궤도 위성은 BRDF 모델링 합성기간 동안 다양한 위성천정각 조건에서의 지표면 반사도를 관측하는 반면 GK-2A와 같은 정지궤도 위성의 경우 각 화소는 고정된 위성천정각 조건에서 지표면 반사도를 관측한다 (Figure 2.4). 따라서 정지궤도 위성의 경우 BRDF 모델을 통해서 지표면의 이등방성 반사율을 모의할 때 정지궤도 위성은 극궤도에 비해 관측된 지표면 반사도에 더욱 민감하게 반응하며 비물리적인 경험적 계수를 산출할 가능성이 있다. 이러한 효과를 최소화하기 위해 본 알고리즘에서는 BRDF 모델링을 통해 생산된 정규화 반사도를 이용하여 최적화를 수행하였다.

기존의 극궤도 위성을 기반으로 개발된 BRDF 모델링은 커널 내부에 각도 성분을 변조하여 ($\theta_v = 0^\circ$, $\theta_s =$ 평균 태양천정각) 반사도 정규화 과정을 수행한다 (Duchemin and Maisongrande, 2002). 위성관측 지표면 반사도와 BRDF 모델로 모의된 반사도, 그리고 각도성분을 변조한 반사도간의 합차를 통해 정규화를 수행하며 식 (2.8)과 같다.

$$\rho_{norm} = \rho_{model}(\theta_s = mean, \theta_v = 0, \phi = mean) + \rho_{measured}(\theta_s, \theta_v, \phi) - \rho_{model}(\theta_s, \theta_v, \phi) \quad (2.8)$$

ρ_{norm} 은 변조된 반사도이며, ρ_{model} 은 관측 당시의 각도 성분을 이용하여 모의된 지표면 반사도이다. $\rho_{measured}$ 은 위성으로 관측된 지표면 반사도를 말하며 합성 기간 동안의 평균을 통해 합성된 정규화 반사도를 산출하게 된다. 정지궤도 위성의 반사도 정규화 과정에서 위성천정각을 천저 (0°)로 변조할 경우 통계적 제한으로 인해 비물리적인 정규화 반사도가 산출될 가능성이 있다. 따라서 본 알고리즘에서는 정규화 반사도 산출을 위한 반사도 정규화 과정에서 위성천정각을 천저로 변조하지 않고 AMI 각 화소의 위성천정각을 그대로 사용하였으며 태양천정각과 상대방위각은 합성 기간 동안의 평균을 사용하였다. (식 2.9)

$$\rho_{norm} = \rho_{model}(\theta_s = mean, \theta_v = \theta_v, \phi = mean) + \rho_{measured} - \rho_{model}(\theta_s, \theta_v, \phi) \quad (2.9)$$

Figure 2.5는 본 연구에서 수행된 BRDF 모델링 optimizing의 개념도이다. 먼저 BRDF 모델의 경험적 계수 (K_0, K_1, K_2)를 BRDF 모델 inversion 과정을 통해 계산하고 이를 이용하여 정규화 반사도를 산출한다. 이 후, 이등방성 반사를 나타내는 K_0 를 정규화 반사도로 변조, BRDF 모델 inversion을 거쳐 K_1, K_2 를 산출, 산출된 BRDF parameters를 이용하여 정규화 반사도를 산출하는 과정을 반복하여 BRDF 모델의 optimizing을 수행하였다.

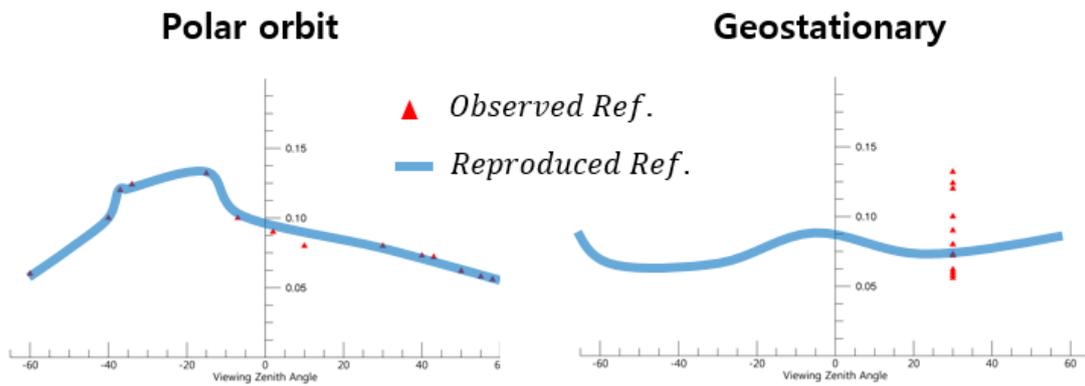


Figure 2.4. Concept of observed and reproduced reflectance on polar orbit (left) and geostationary orbit (right) satellite red triangle and blue solid line represent observed and reproduced reflectance respectively.

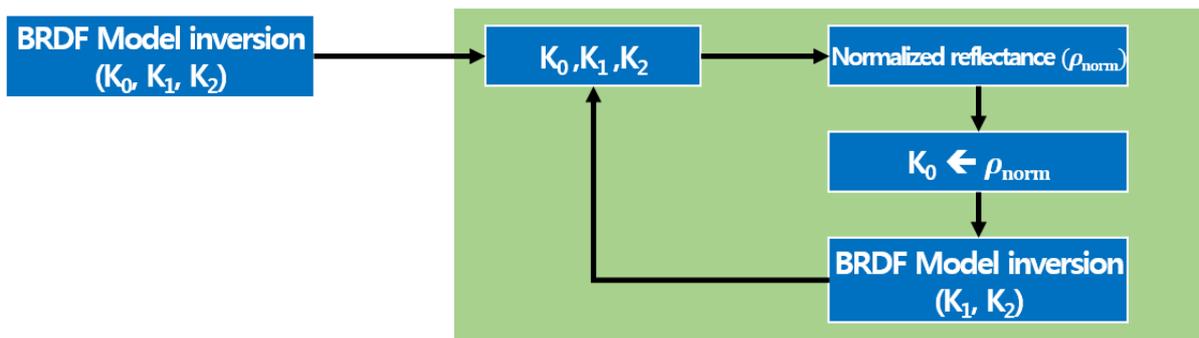


Figure 2.5. Concept of optimization of BRDF modeling.

2.5.3 배경 지표 반사도

배경 지표 반사도는 BRDF parameters와 관측 당시의 각도 성분을 이용하여 산출된다 (식 2.10). 지표면 반사도는 짧은 기간에 크게 변하지 않는다는 가정 하에 하루 전의 BRDF parameters를 사용하였다.

$$BSR(\theta_s, \theta_v, \phi) = K'_0 + K'_1 f_1(\theta_s, \theta_v, \phi) + K'_2 f_2(\theta_s, \theta_v, \phi) \quad (2.10)$$

위 식에서 BSR은 채널 배경 지표 반사도를 의미한다. 또한 θ_s, θ_v, ϕ 는 각각 관측 당시의 태양천정각, 위성천정각, 상대방위각을 의미하며 K'_0, K'_1, K'_2 은 offline

mode에서 산출된 하루 전 날짜의 BRDF parameters를 의미한다.

2.5.4 분광 알베도

알베도를 산출하기 위해서는 태양, 위성, 지표가 이루는 모든 각도를 고려해야 한다. 지구는 구형을 이루고 있으며 구형 알베도를 생산하기 위해서는 각도성분에 대해 BRDF 모델을 구성하는 각 커널의 적분과정이 필요하다. 위성기반의 알베도는 실제 알베도인 blue sky 알베도를 직접적으로 계산하지 않고 대기의 상태를 극과 극으로 가정한 상태의 알베도인 black sky 알베도와 white sky 알베도로 구분하여 생산한다. Black sky 알베도는 대기 중에서 태양광의 산란이 없이 모두 투과하는 상태를 뜻하며, white sky 알베도는 대기 중에서 태양광이 모두 산란되는 상태를 뜻한다. 이러한 black sky 알베도와 white sky 알베도는 BRDF 모델을 구성하는 geometric kernel과 volumetric kernel의 적분을 통해 산출된 반구 특성 함수를 이용하여 생산된다. Black sky의 반구 특성 함수는 식 2.11과 같이 계산된다.

$$h_b(\theta_s) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} f_k(\theta_s, \theta_v, \phi) \sin(\theta_v) \cos(\theta_v) d\theta_v d\phi \quad (2.11)$$

여기서 h_b 는 black sky의 반구 특성함 수를 의미하며 태양천정각에 대한 함수로 정의된다. White sky의 반구 특성 함수 (h_w)는 black sky의 반구 특성 함수를 다시 태양천정각에 대하여 적분하여 생산된다 (식 2.12).

$$h_w = 2 \int_0^{\pi/2} h_b(\theta_s) \sin(\theta_s) \cos(\theta_s) d\theta_s \quad (3.12)$$

Figure 2.21과 Table 2.5은 각각 black sky와 white sky의 반구 특성 함수를 나타내고 있다. Black sky와 white sky의 반구 특성함수는 고정된 kernel식을 통해 산출되므로 반복적인 계산을 지양하기 위해서 조건표로 저장하여 사용하였다.

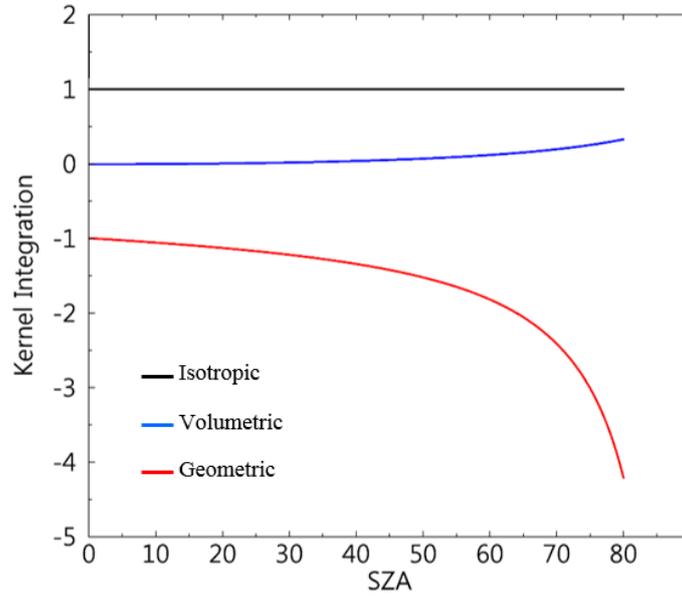


Figure 2.6. Kernel integral of black sky for Roujean model (Roujean et al., 1992).

Table 2.5. Kernel integral of white sky for Roujean model (Roujean et al., 1992)

Isotropic	Geometric	Volumetric
1	-128159	0.080283

분광 알베도는 위성에 탑재된 반사도 채널의 폭에 해당하는 알베도이며 BRDF parameters와 커널 적분을 통해 산출된 black sky와 white sky의 반구특성함수를 이용한 선형 다항식으로 산출된다. GK-2A/AMI의 각 반사도 채널의 black sky와 white sky 분광 알베도 산출식은 각각 식 2.13와 2.14와 같다.

$$\alpha_{bs,\beta}(\theta_s) = \sum_{n=0}^2 K_{n,\beta} \cdot h_b(\theta_s) \quad (2.13)$$

$$\alpha_{ws,\beta} = \sum_{n=0}^2 K_{n,\beta} \cdot h_w \quad (2.14)$$

$\alpha_{bs,\beta}$ 와 $\alpha_{ws,\beta}$ 는 각각 밴드 β 에서의 black sky와 white sky 분광 알베도를 의미하며 K_n 는 당일의 BRDF parameters를 의미한다.

2.5.5 광대역 전환

본 알고리즘에서 광대역 알베도는 각 반사도 채널의 분광 알베도를 이용한 1차 회귀식을 통해 산출된다 (식 2.15).

$$\Lambda = \omega_0 + \omega_1\alpha_1 + \omega_2\alpha_2 + \omega_3\alpha_3 + \omega_4\alpha_4 + \omega_6\alpha_6 \quad (2.15)$$

Λ 는 광대역 알베도를 나타낸다. α 는 각 반사도 채널의 분광 알베도를 의미하며 ω 는 각 반사도 채널의 광대역 전환 계수를 의미한다. ω 는 reference 자료와의 선형회귀분석을 통해 도출되며 본 알고리즘에서는 reference 자료로 정확도가 검증되어 다수의 연구에서 사용되고 있는 MODIS 광대역 알베도 자료를 사용하였다. GK-2A/AMI 반사도 채널의 광대역 전환계수는 Table 2.6과 같다.

Table 2.6. Narrow-to-broadband conversion coefficients for GK-2A/AMI shortwave bands (band 1~4, 6)

	Snow-free (Black sky (White sky))	Snow-covered (Black sky (White sky))
ω_0	0.0449 (0.0483)	0.2906 (0.240)
ω_1	-0.0802 (-0.0712)	0.2843 (-0.106)
ω_2	-0.1240 (-0.1388)	-0.1502 (0.367)

ω_3	0.1128 (0.0988)	0.3253 (0.425)
ω_4	-0.0256 (0.0077)	0.0657 (-0.151)
ω_6	0.5042 (0.4954)	-0.2662 (-0.148)

2.6. 산출물

본 알고리즘의 출력 자료는 크게 online mode의 산출물 offline mode의 산출물로 구분되며 모든 자료는 NetCDF (Network Common Data Form) 형식의 파일로 출력된다. Offline mode에서는 BRDF parameters와 FVBAR에 대한 산출물이 생산되며 online mode에서는 10분 주기의 채널 TOC 반사도 및 채널 배경지표 반사도 산출물과 1일 주기의 지표면 알베도 산출물이 있다. 각각의 산출물은 아래와 같은 이름의 형식으로 저장된다. 아래 이름 형식에서 *YYYY*, *MM*, *DD*, *hh*, *mn*은 각각 자료 취득 날짜에 대한 연, 월, 일, 시, 분을 의미한다.

- BRDF parameters : gk2a_ami_le2_brdf_fd020_YYYYMMDD0000.nc
- FVBAR : gk2a_ami_le2_fvbar_fd020_YYYYMMDD0000.nc
- 채널 TOC 반사도 : gk2a_ami_le2_toc_fd020_YYYYMMDDhhmn.nc
- 채널 배경지표 반사도 : gk2a_ami_le2_bsr_fd020_YYYYMMDDhhmn.nc
- 지표면 알베도 : gk2a_ami_le2_sal_fd020_YYYYMMDD0000.nc

본 알고리즘에서 산출되는 자료들의 공간해상도는 2km이다.

■ BRDF parameters 산출물

BRDF parameters 산출물 파일에 포함되어 있는 자료는 Table 2.7과 같다. BRDF parameters 산출물 파일에는 GK-2A/AMI 반사도 채널의 지표면 이등방성 반사 특성을 나타내는 BRDF parameters 뿐만 아니라 BRDF 모델링의 오차를 의미하는 RMSE, missing gap filling 과정에서 몇 일전의 날짜를 사용했는지를 의미하는 age, BRDF 모델 합성 기간 동안 관측된 총 관측 횟수 (Num_obs) 및 적설 화소의 관측 비율 (snow percentage)가 포함되어 있다.

Table 2.7. Content of the BRDF parameters product file

Name	Variable type	Scale factor	Description	Valid range
K0_b01	2byte unsigned integer	10,000	BRDF Model parameter K_0 at Band 1	0~10000
K0_b02	2byte unsigned integer	10,000	BRDF Model parameter K_0 at Band 2	0~10000
K0_b03	2byte unsigned integer	10,000	BRDF Model parameter K_0 at Band 3	0~10000
K0_b04	2byte unsigned integer	10,000	BRDF Model parameter K_0 at Band 4	0~10000
K0_b06	2byte unsigned integer	10,000	BRDF Model parameter K_0 at Band 6	0~10000
K1_b01	2byte signed integer	10,000	BRDF Model parameter K_1 at Band 1	– 30000~30000

K1_b02	2byte signed integer	10,000	BRDF Model parameter K_1 at Band 2	– 30000~30000
K1_b03	2byte signed integer	10,000	BRDF Model parameter K_1 at Band 3	– 30000~30000
K1_b04	2byte signed integer	10,000	BRDF Model parameter K_1 at Band 4	– 30000~30000
K1_b06	2byte signed integer	10,000	BRDF Model parameter K_1 at Band 6	– 30000~30000
K2_b01	2byte signed integer	10,000	BRDF Model parameter K_2 at Band 1	– 30000~30000
K2_b02	2byte signed integer	10,000	BRDF Model parameter K_2 at Band 2	– 30000~30000
K2_b03	2byte signed integer	10,000	BRDF Model parameter K_2 at Band 3	– 30000~30000
K2_b04	2byte signed integer	10,000	BRDF Model parameter K_2 at Band 4	– 30000~30000
K2_b06	2byte signed integer	10,000	BRDF Model parameter K_2 at Band 6	– 30000~30000
RMSE_b01	2byte unsigned	10,000	BRDF modeling Root Mean	0~10000

	integer		Square Error at band1	
RMSE_b02	2byte unsigned integer	10,000	BRDF modeling Root Mean Square Error at band2	0~10000
RMSE_b03	2byte unsigned integer	10,000	BRDF modeling Root Mean Square Error at band3	0~10000
RMSE_b04	2byte unsigned integer	10,000	BRDF modeling Root Mean Square Error at band4	0~10000
RMSE_b06	2byte unsigned integer	10,000	BRDF modeling Root Mean Square Error at band6	0~10000
Age_b01	Unsigned byte	–	Age information at Band 1	0~4
Age_b02	Unsigned byte	–	Age information at Band 2	0~4
Age_b03	Unsigned byte	–	Age information at Band 3	0~4
Age_b04	Unsigned byte	–	Age information at Band 4	0~4
Age_b06	Unsigned byte	–	Age information at Band 6	0~4
Snow percentage	Unsigned byte	–	Observation rate of snow cover during synthesis period	0~100
Num_obs	2byte Signed integer	–	Number of observation during BRDF modeling composite period	4~450

■ FVBAR 산출물

FVBAR 산출물 파일에 포함되어 있는 자료는 Table 2.8와 같다. FVBAR 산출물 파일에는 GK-2A/AMI 반사도 채널의 정규화 반사도 자료가 포함되어 있다. 각 채널 정규화 반사도에 대한 품질 정보는 BRDF parameters 산출물 파일에 존재하는 자료와 동일하기 때문에 FVBAR 산출물 파일에서는 포함되어있지 않다.

Table 2.8. Content of the FVBAR product file

Name	Variable type	Scale factor	Description	Valid range
FVBAR_b01	2byte unsigned integer	10,000	Fixed viewing BRDF-adjusted reflectance at Band 1	0~1
FVBAR_b02	2byte unsigned integer	10,000	Fixed viewing BRDF-adjusted reflectance at Band 2	0~1
FVBAR_b03	2byte unsigned integer	10,000	Fixed viewing BRDF-adjusted reflectance at Band 3	0~1
FVBAR_b04	2byte unsigned integer	10,000	Fixed viewing BRDF-adjusted reflectance at Band 4	0~1
FVBAR_b06	2byte unsigned integer	10,000	Fixed viewing BRDF-adjusted reflectance at Band 6	0~1

■ 채널 TOC 반사도 산출물

채널 TOC 반사도 산출물 파일에 포함되어 있는 자료는 Table 2.9과 같다. 채널

TOC 반사도 산출물 파일에는 GK-2A/AMI 반사도 채널의 지표면 반사도 및 품질 정보 자료 (DQF_TOC)와, 입력 자료의 품질 정보(IQF_TOC)가 포함되어 있다. DQF_TOC와 IQF_TOC는 1byte encoding으로 되어있으며 이에 대한 정보는 각각 Table 2.10, Table 2.11와 같다.

Table 2.9. Content of the TOC reflectance product file

Name	Variable type	Scale factor	Description	Valid range
TOC_b01	2byte unsigned integer	10,000	Top of canopy reflectance at band 1	0~1
TOC_b02	2byte unsigned integer	10,000	Top of canopy reflectance at band 2	0~1
TOC_b03	2byte unsigned integer	10,000	Top of canopy reflectance at band 3	0~1
TOC_b04	2byte unsigned integer	10,000	Top of canopy reflectance at band 4	0~1
TOC_b06	2byte unsigned integer	10,000	Top of canopy reflectance at band 6	0~1
DQF_TOC	Unsigned byte	-	Top of Canopy Reflectance data quality flags	0~255

IQF_TOC	Unsigned byte	–	Top of Canopy Reflectance input data quality flags	0~255
---------	------------------	---	---	-------

Table 2.10. TOC reflectance data quality flag information

Bit	Binary code	Description
0	0	$SZA \leq 70^\circ$
	1	$70^\circ < SZA < 80^\circ$
1	0	Snow-free
	1	Snow-covered
2	0	Land
	1	Water
3	0	Clear
	1	Cloudy
4	0	Day ($SZA < 80^\circ$)
	1	Night ($SZA \geq 80^\circ$)
5	0	$VZA < 80^\circ$
	1	$VZA \geq 80^\circ$
6	0	Unused
	1	Unused
7	0	AHI disk
	1	Space

Table 2.11. TOC reflectance input data quality flag information

Bit	Binary code	Description
0	0	Used GK-2A AOD data
	1	Used climatology AOD data
1	0	Used GK-2A TPW and TCO data
	1	Used climatology TPW and TOC data
2	0	Good band quality (band 1)
	1	Bad band quality (band 1)
3	0	Good band quality (band 2)
	1	Bad band quality (band 2)
4	0	Good band quality (band 3)
	1	Bad band quality (band 3)
5	0	Good band quality (band 4)
	1	Bad band quality (band 4)
6	0	Good band quality (band 6)
	1	Bad band quality (band 6)
7	0	Unused
	1	Unused

■ 채널 배경지표 반사도 산출물

채널 배경지표 반사도 산출물 파일에 포함되어 있는 자료는 Table 2.12과 같다. 채널 배경지표 반사도 산출물 파일에는 GK-2A/AMI 반사도 채널의 배경지표 반사도 자료가 포함되어 있으며 채널 배경지표 반사도는 BRDF parameters를 이용하여 산출되므로 별도의 품질 정보가 포함되어있지 않다.

Table 2.12. Contents of the BSR product file

Name	Variable type	Scale factor	Description	Valid range
BSR_b01	2byte unsigned integer	10,000	Background surface reflectance at band 1	0~1
BSR_b02	2byte unsigned integer	10,000	Background surface reflectance at band 2	0~1
BSR_b03	2byte unsigned integer	10,000	Background surface reflectance at band 3	0~1
BSR_b04	2byte unsigned integer	10,000	Background surface reflectance at band 4	0~1
BSR_b06	2byte unsigned integer	10,000	Background surface reflectance at band 6	0~1

■ 지표면 알베도 산출물

지표면 알베도 산출물 파일에 포함되어 있는 자료는 Table 2.13과 같다. 지표면 알베도 산출물 파일에는 GK-2A/AMI 반사도 채널의 black sky 분광 알베도 (BSA_b01~4,6), white sky 분광 알베도 (WSA_b01~4,6), black sky 광대역 알베도 (BSA), white sky 광대역 알베도 (WSA) 및 black/white sky 광대역 알베도의 품질 정보 (DQF_BSA, DQF_WSA)가 포함되어 있다. DQF_BSA와 DQF_WSA 자료에 대한 정보는 Table 2.14과 같다.

Table 2.13. Content of the surface albedo product file

Name	Variable type	Scale factor	Description	Valid range
BSA_b01	2byte unsigned integer	10,000	Black sky narrowband albedo at band 1	0~10000
BSA_b02	2byte unsigned integer	10,000	Black sky narrowband albedo at band 2	0~10000
BSA_b03	2byte unsigned integer	10,000	Black sky narrowband albedo at band 3	0~10000
BSA_b04	2byte unsigned integer	10,000	Black sky narrowband albedo at band 4	0~10000
BSA_b06	2byte unsigned integer	10,000	Black sky narrowband albedo at band 6	0~10000
WSA_b01	2byte signed integer	10,000	White sky narrowband albedo at band 1	0~10000
WSA_b02	2byte signed integer	10,000	White sky narrowband albedo at band 2	0~10000
WSA_b03	2byte signed integer	10,000	White sky narrowband albedo at band 3	0~10000

WSA_b04	2byte signed integer	10,000	White sky narrowband albedo at band 4	0~10000
WSA_b06	2byte signed integer	10,000	White sky narrowband albedo at band 6	0~10000
BSA	2byte signed integer	10,000	Black sky broadband albedo	0~10000
WSA	2byte signed integer	10,000	White sky broadband albedo	0~10000
DQF_BSA	Unsigned byte	–	Black sky broadband albedo quality flag	0~1
DQF_WSA	Unsigned byte	–	White sky broadband albedo quality flag	0~1

Table 2.14. Black sky and white sky broadband albedo quality flag information

Data	Binary code	Description
DQF_BSA	0	Bad quality (Black sky broadband albedo)
	1	Good quality (Black sky broadband albedo)
DQF_WSA	0	Bad quality (White sky broadband albedo)
	1	Good quality (White sky broadband albedo)

3. 모의자료 및 검증

3.1 모의 입력자료 및 검증자료

3.1.1 모의 입력자료 및 산출 결과

본 연구에서는 현재 JMA에서 운용중인 Himawari-8/AHI 자료를 사용하였다. AHI는 가시 영역부터 적외 총 영역까지 16개의 채널을 보유하고 있으며 AMI와 유사한 채널 구성을 가지고 있다. 또한 Himawari-8 역시 정지궤도 위성으로 GK-2A와 태양-지표-센서간의 기하학적 관계가 유사하기 때문에 모의자료로써 적합하다. 본 연구에서 모의자료로 사용한 AHI의 5개 반사도 채널의 정보는 Table 3.1과 같다.

Table 3.1. Detail information of AHI used as proxy data

band number	wave length (μm)	Central wave length (μm)	spatial resolution (km)
1	0.43-0.48	0.47	1
2	0.50-0.52	0.51	1
3	0.63-0.66	0.63	0.5
4	0.85-0.87	0.86	1
5	1.60-1.62	1.61	2

해당 모의자료를 이용하여 산출된 채널 TOC 반사도, 채널 배경지표 반사도, 채널 BRDF parameters, 채널 정규화 반사도, 채널 black/white sky 분광 알베도, black/white sky 광대역 알베도는 Figure 3.1~Figure 3.6과 같다.

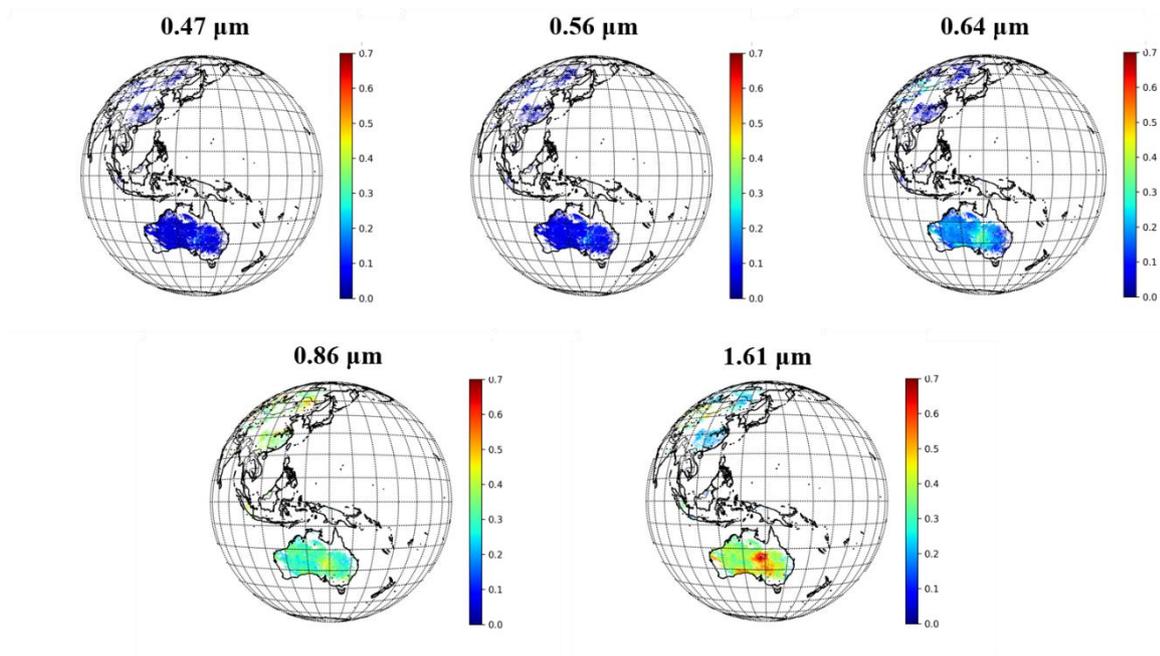


Figure 3.1. Estimated TOC reflectance using proxy data at each reflectance channels at 03:00 UTC on July 28, 2017.

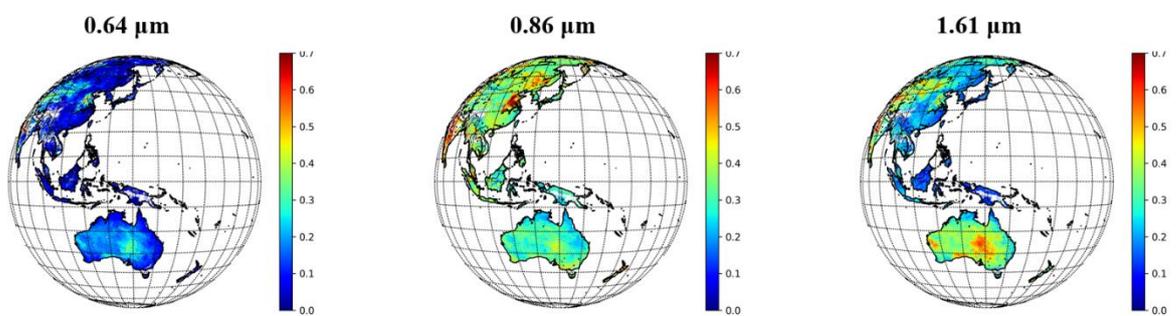


Figure 3.2. Estimated BSR using proxy data at 3 reflectance channels at 03:00 UTC on August 1, 2017.

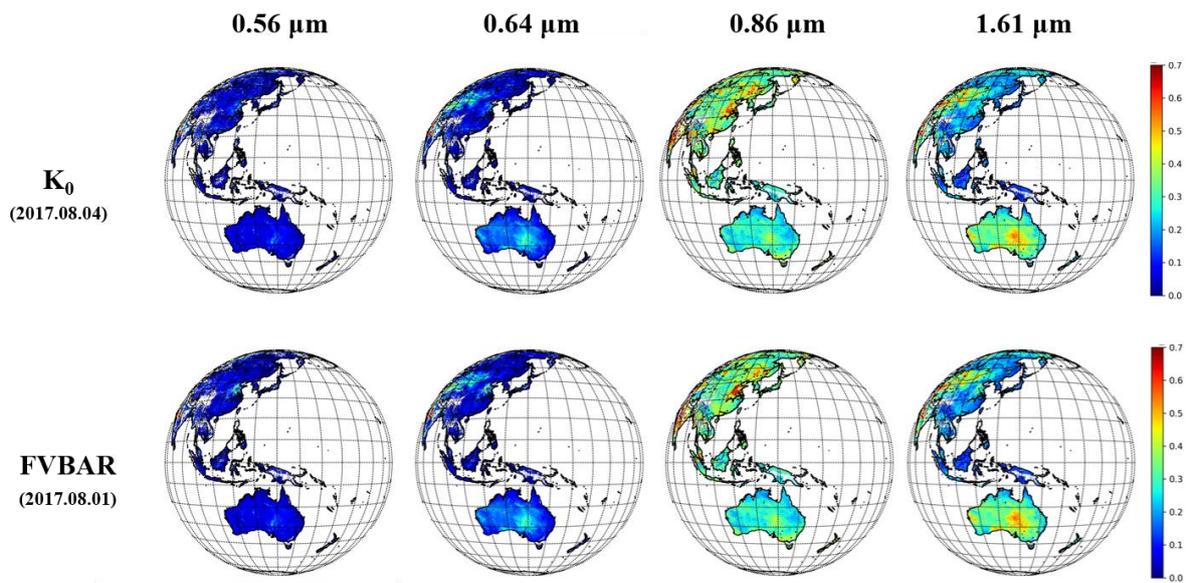


Figure 3.3. Spatial distribution of K_0 and FVBAR on August 4, 2017 and August 1, 2017 respectively.

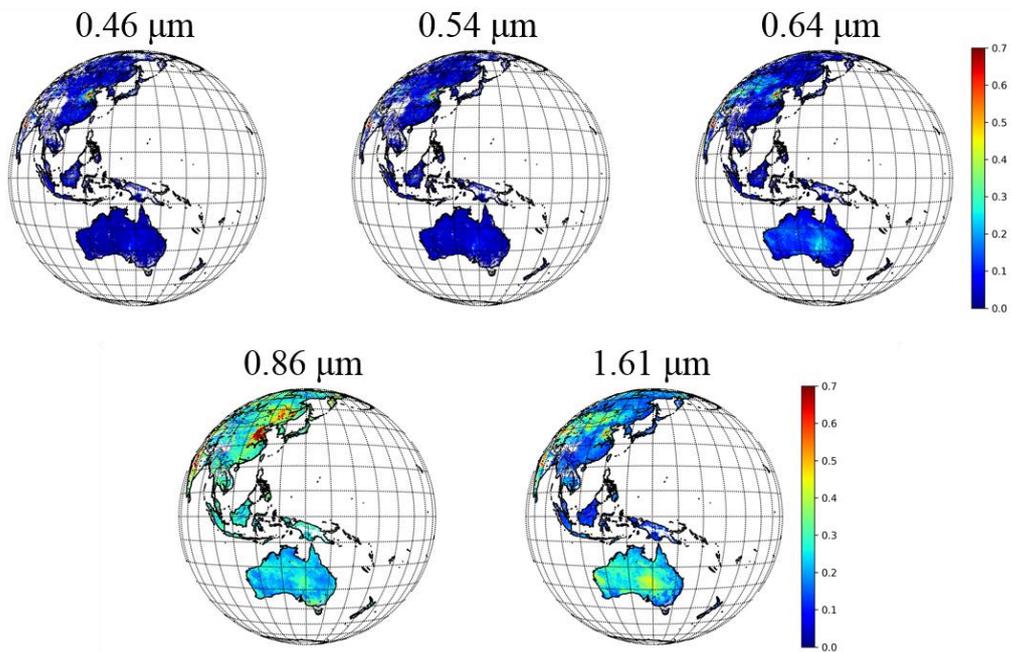


Figure 3.4. Estimated black sky narrowband albedo using proxy data at each reflectance channels on July 31, 2017.

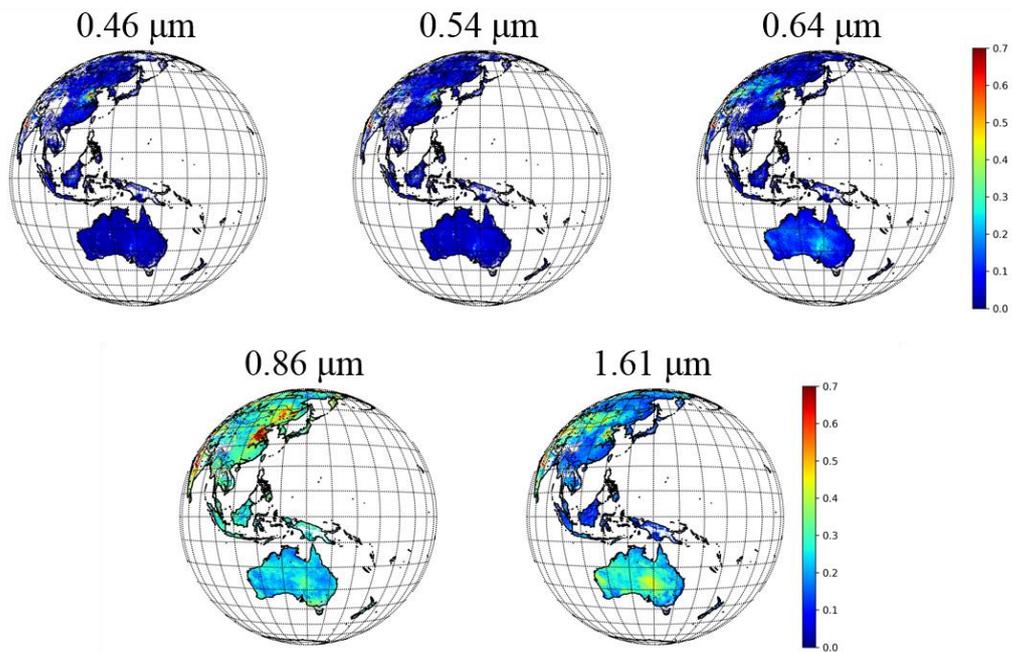


Figure 3.5. Estimated white sky narrowband albedo using proxy data at each reflectance channels on July 31, 2017.

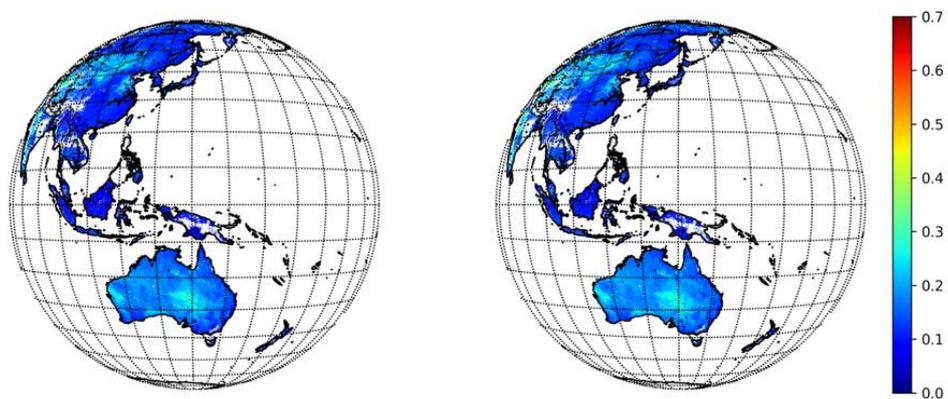


Figure 3.6. Estimated black (left) and white (right) sky broad albedos on July 31, 2017.

3.1.2 검증 자료

본 알고리즘을 검증하기 위해 MODIS 광대역 알베도 자료 (MCD43C3)를 사용하였다. MODIS는 극궤도 위성인 Terra/Aqua에 탑재된 다분광센서로 36개의 채널과 500 m 또는 1 km 이하의 공간해상도를 가지고 있다. 또한 MODIS는 관측 횟수가 적다는 극궤도 위성의 관측 특성을 보완하기 위해 EOS-AM Terra와 EOS-PM Aqua에 탑재된 MODIS 센서 자료를 복합 사용하여 지표면 광대역 알베도를 생산하고 있다. MODIS 광대역 알베도는 Liang et al. (2002)에 초기 결과가 검증되었으며 30m 공간해상도를 가지는 Landsat 광대역 알베도와의 비교 결과 0.028의 오차를 나타내고 있다. Cescatti et al. (2012)에 따르면 다년간의 MODIS 자료를 flux tower 관측치와 비교한 결과 0.728 이상의 높은 결정계수와 0.06 이하의 낮은 오차를 보이고 있다. 또한 대부분의 검증 자료와의 비교 시 5% 미만의 정확도를 나타내고 있다.

현재 NASA에서는 장기간의 BRDF 산출물을 사용하여 정확도를 향상시킨 V006 산출물을 제공하고 있으며 BRDF 모델링 시 관측 반사도에 시간에 따른 가중치를 적용하여 1일 자료를 제공하고 있다. 본 연구에서 검증에 사용한 자료에 대한 정보는 Table 3.2와 같다.

Table 3.2. Information of MCD43C3 data used for validation

Data	Description	Spatial resolution	Temporal resolution
Albedo_BSA_shortwave	Black sky broadband albedo in shortwave range	0.05 degree	1-day
Albedo_WSA_shortwave	White sky broadband albedo in shortwave range	0.05 degree	1-day
Percent_Snow	Percent of snow cover	0.05 degree	1-day

3.2 검증 방법

본 알고리즘의 산출물 중 채널 TOC 반사도, 채널 배경지표 반사도, BRDF parameters, FVBAR, 채널 분광 알베도는 위성 관측 당시의 태양-지표-위성의 기하학적 관계 및 채널의 분광 반응 함수에 영향을 받기 때문에 최종 산출물인 black/white sky 광대역 알베도를 대상으로 적설역 (snow-covered land)과 일반 지표 (snow-free land)에 대해 검증을 수행한다.

3.2.1 검증 지수 및 요구 정확도

GK-2A/AMI 지표면 광대역 알베도의 검증 지수로서 Root Mean Square Error (RMSE)를 사용한다. RMSE는 추정 값 또는 모델이 예측한 값과 실제 값의 차이를 다룰 때 흔히 사용되는 척도이며 정밀도를 표현하는데 적합한 지수이다. GK-2A/AMI 지표면 광대역 알베도의 요구 정확도는 Table 3.3과 같다.

Table 3.3. Temporal and spatial resolution and required accuracy of GK-2A/AMI broadband albedo

Product	Temporal resolution	Spatial resolution	Required accuracy
Black/white sky Broadband albedo	Daily	2km	Snow-covered land : RMSE < 0.09 Snow-free land : RMSE < 0.05

3.2.2 시공간 일치 방법

GK-2A/AMI 지표면 광대역 알베도와 MCD43C3 자료의 시간해상도는 1일로 동일하지만 공간 해상도의 경우 각각 2km와 0.05 degree로 차이를 보이고 있다. 지표면 광대역 알베도는 해당 화소 안에 존재하는 지표면의 평균적인 반사율을 의미하므로 두 자료간의 공간 일치를 위하여 최근접 화소를 기준으로 일정 영역내에 존재하는 다중 화소의 GK-2A/AMI 지표면 광대역 알베도 자료를 이용하여 최종

지표면 광대역 알베도의 품질의 검증을 수행하였다.

3.2.3 검증 화소 선정

MODIS와 GK-2A/AMI 간의 적설 탐지 산출물의 차이가 존재할 뿐만 아니라 BRDF 모델링시 적설역 처리 기법의 차이가 존재한다. 이에 따른 오차를 방지하기 위하여 GK-2A 지표면 반사도 알고리즘의 BRDF parameters 산출물에 포함되어 있는 snow percentage 자료와 MCD43C3 자료 내에 포함되어있는 Percent_snow 자료를 이용하여 일반 지표와 적설역의 검증 화소를 선정한다. 일반 지표의 경우, 다중 화소의 snow percentage 자료가 모두 0이고 Percent_snow 자료의 화소 값이 0일 경우에 한하여 검증 화소로 선정하였고 반대로 적설역은 다중 화소의 snow percentage 자료가 모두 100이고 Percent_snow 자료의 화소 값이 1인 경우에 검증 화소로 선정하였다. 또한 GK-2A/AMI 지표면 광대역 알베도의 검증 시 GK-2A/AMI 지표면 광대역 알베도 자료의 공간대표성을 확보하기 위하여 일정 영역 내에 존재하는 다중 화소 중 절반 이상의 화소에 값이 존재할 경우에 한하여 검증을 수행한다.

3.3 검증 결과

모의 자료를 이용하여 산출된 GK-2A 지표면 알베도를 평가하기 위하여 산출 기간 중 동일 날짜에 해당하는 MCD43C3 자료와의 검증을 수행하였다. Figure 3.7과 Figure 3.8은 각각 일반 지표와 적설역에 대한 GK-2A 지표면 알베도의 검증 결과이다. 일반 지표의 경우 black/white sky에서 각각 RMSE 0.032996, 0.035666, bias 0.003619, 0.003412로 목표 정확도를 만족하였으며 적설역의 경우에도 black/white sky에서 각각 RMSE 0.0859657, 0.080908, bias -0.000025, 0.004149로 목표 정확도를 만족하는 오차를 보이고 있었다. 이러한 오차는 MODIS와 AHI의 관측 횟수의 차이, 합성기간의 차이뿐만 아니라 입력 자료인 CLD 및 SC의 차이에 의해 나타난 것으로 사료된다. 또한 일반 지표와 적설역의 검증 결과에서 대부분의 자료가 1 대 1 대응선 상에 위치해 있지만 적설역의 경우 0.75 이상의 높은 알베도 구간에서 GK-2A 지표면 알베도가 MODIS에 비해

과소 추정하는 경향을 보이고 있었다. 이는 적설역의 광대역 전환 계수가 겨울 철 자료 확보 기간인 5일의 자료를 이용하여 생산되었기 때문에 나타나는 오차로 사료되며 추후 보다 장기간의 자료를 이용하여 적설역의 광대역 전환 계수를 업데이트 할 필요가 있다. Figure 3.9는 2017년 7월 3일부터 2017년 8월 7일까지 지표면 알베도의 일별 검증 결과를 나타낸 그래프이다. 모든 기간에 대해 0.05 이하의 낮은 RMSE와 bias를 보이며 안정적인 정확도를 보이고 있다.

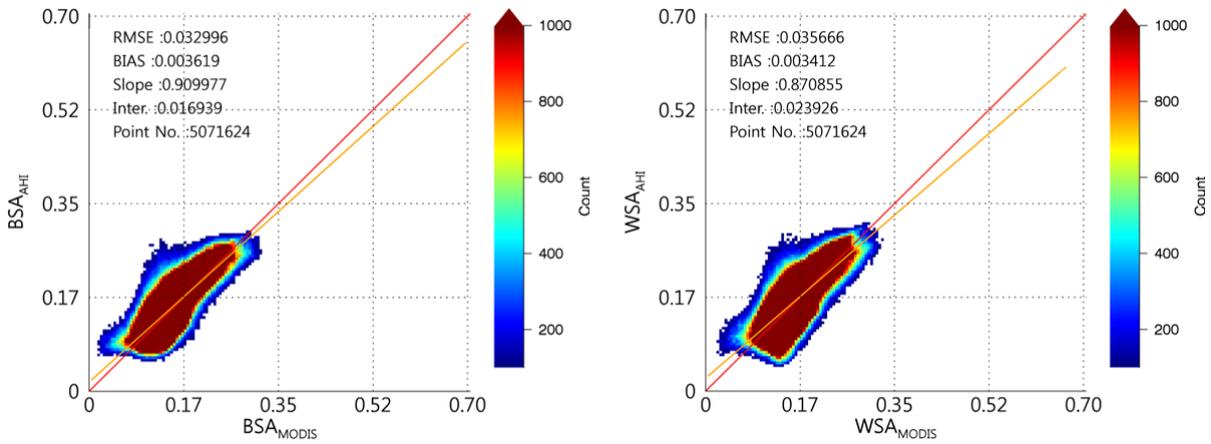


Figure 3.7. Comparison between estimated albedo by this algorithm and MODIS albedo product in snow-free condition (left : Black-sky albedo, right : White-sky albedo).

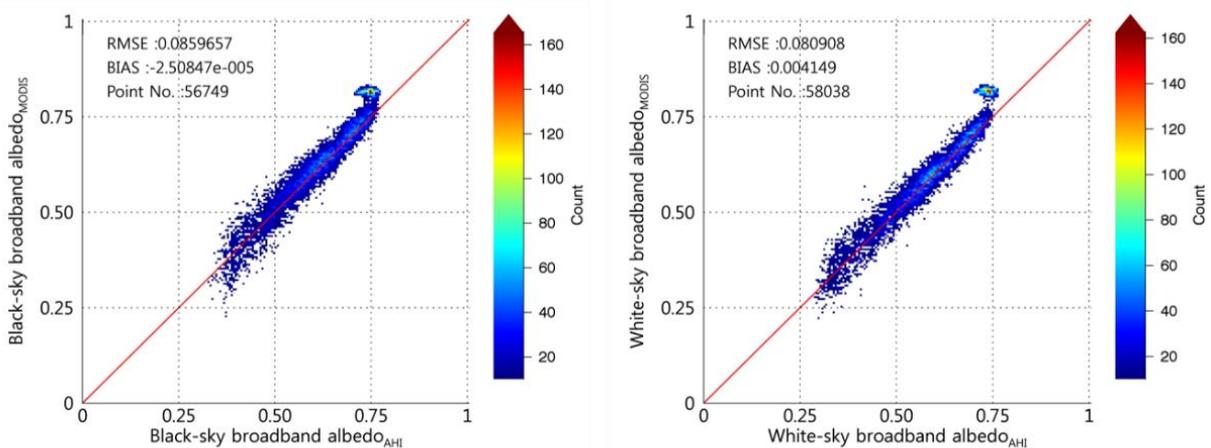


Figure 3.8. Comparison between estimated albedo by this algorithm and MODIS albedo product.

MODIS albedo product in snowy condition (left : Black-sky albedo, right : White-sky albedo).

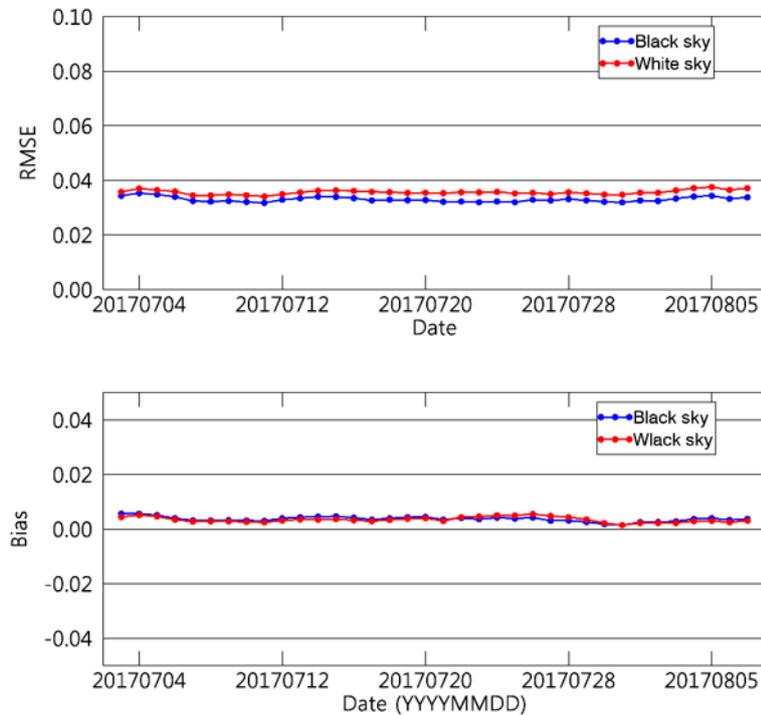


Figure 3.9. Time series of RMSE and bias for surface broadband albedo from July 3, 2017 to August 7, 2017.

지표면 광대역 알베도는 지표 타입에 따라 변화하기 때문에 지표 타입 별 GK-2A 지표면 광대역 알베도를 검증하였다 (Figure 3.10). 검증 결과 모든 지표 타입에서 0.05 이하의 낮은 RMSE와 bias를 보이고 있으며 특정 지표타입에서 오차가 커지는 경향은 보이지 않는다. 가장 높은 RMSE는 상록 활엽수림 (1)에서 나타나고 있다. 상록 활엽수림이 존재하는 지역은 주로 적도 부근으로 구름의 빈도가 높은 지역이기 때문에 MODIS와 GK-2A/AMI의 구름 탐지 결과의 차이가 존재하여 다른 지표타입에 비해 높은 오차가 보이는 것으로 사료된다. Figure 3.11과 Figure 3.12는 관목지, 나지, 농지, 초지에 대한 black sky와 white sky 지표면 광대역 알베도의 시계열을 나타낸다. GK-2A/AMI와 MODIS의 지표면 광대역 알베

도는 black/white sky에서 모두 유사한 값을 보이고 있다. Black sky의 경우, 관목지에서는 과대 추정의 경향을 보이고 있고 농지에서 다소 과소 추정하는 경향을 보이고 있다. White sky의 경우, 나지와 관목지에서는 과대 추정의 경향을 보이고 있으며 초지에서는 과대 추정 경향을 보이고 있다. 또한 GK-2A 지표면 광대역 알베도는 MODIS 자료에 비해 시계열상에서 큰 변동성을 보이고 있다. 이는 현재 매시 자료를 이용하여 대기보정, BRDF 모델링, 광대역 전환을 수행하였기 때문으로 사료되며 추후 10분 자료를 이용하여 지표면 광대역 알베도를 생산 할 경우 개선되어 보다 안정적인 시계열 변화 양상을 나타낼 것으로 사료된다.

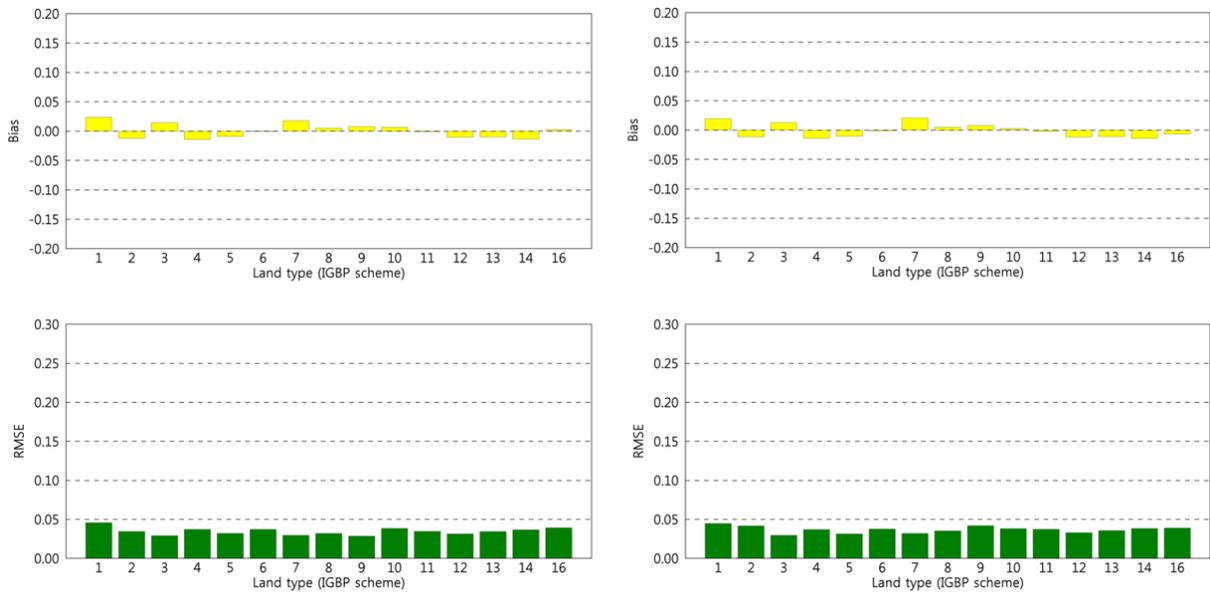


Figure 3.10. RMSE (upper) and bias (lower) (left: black sky, right: white sky) of broadband albedo according to land type (IGBP scheme).

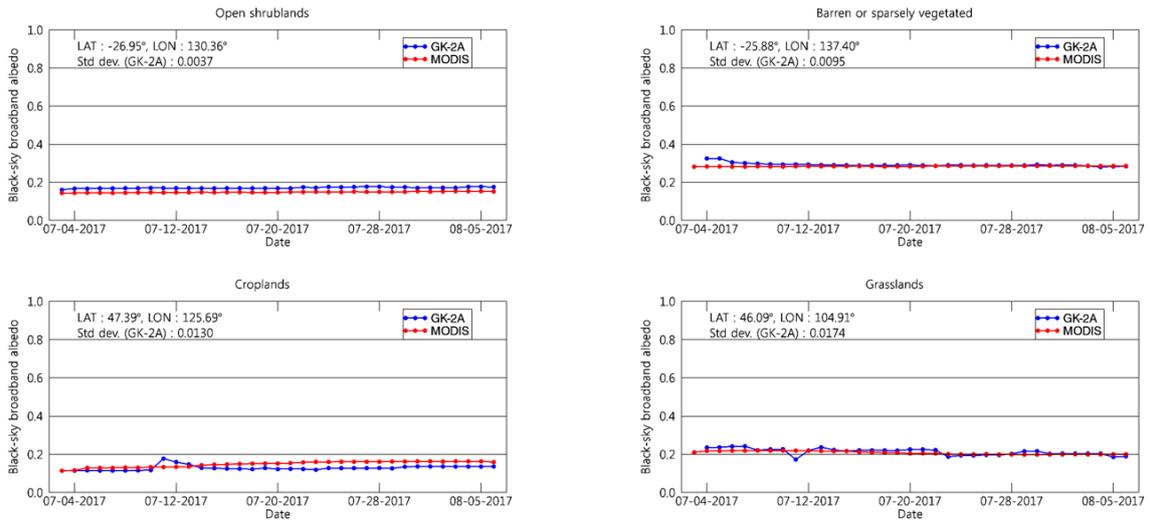


Figure 3.11. Time series of black sky broadband albedo according to land type (blue : estimated albedo by GK-2A algorithm, red : MODIS albedo product).

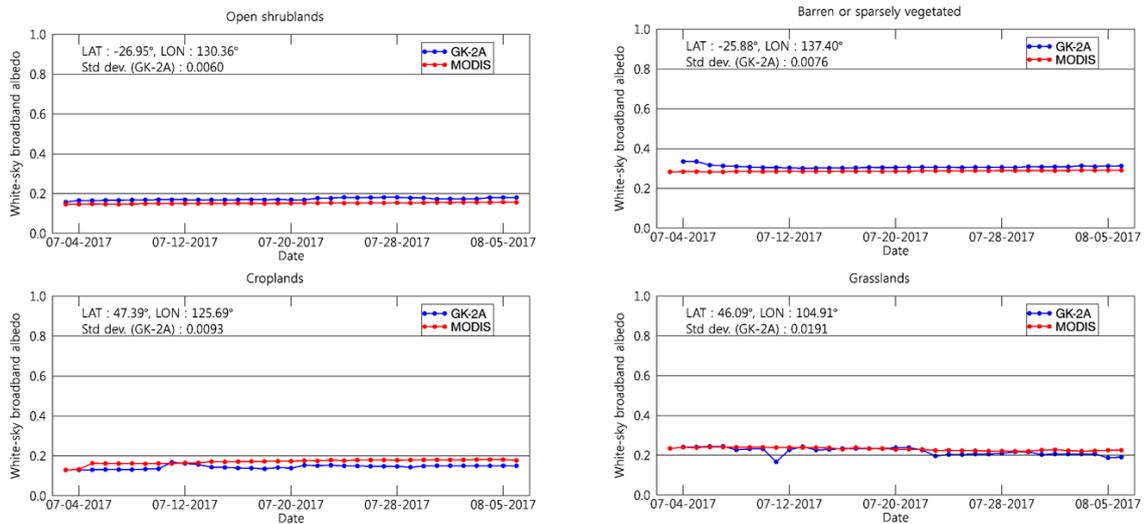


Figure 3.12. Time series of white sky broadband albedo according to land type (blue : estimated albedo by GK-2A algorithm, red : MODIS albedo product).

4. 현업운영 시 고려사항

4.1 수치계산 고려사항

정확한 지표면 알베도를 산출하기 위해서는 대기효과를 제거하는 대기보정 과정이 필요하다. 대기 복사전달모델은 계산 과정이 복잡하며 처리 시간이 길기 때문에 현업에서 사용하기에는 적합하지 않다. 지표면 반사도 알고리즘에서는 현업에서의 효율적인 처리를 위하여 입력 parameter와 그 범위에 따라 사전에 산출된 복사전달모델의 결과를 LUT로 구축하였다. 또한 kernel integration은 고정된 BRDF 모델을 통해 산출되므로 반복적인 계산을 지양하기 위하여 LUT 형태로 저장하였다.

4.2 프로그래밍 및 절차상의 고려사항

BRDF 모델링을 수행하기 위해서는 청천역에서 관측된 충분한 양의 시계열 자료가 필요하므로 일정 기간 동안 AMI full-disk영역에서 관측된 모든 화소에 대한 시계열 자료를 입력 자료로 사용한다. 이는 자료의 양과 처리 시간을 고려할 때 효율적이지 않으며 BRDF parameter는 짧은 시간에 크게 변하지 않는다. 이러한 이유로 많은 양의 자료를 필요로 하는 BRDF 모델링은 offline mode에서 수행하였으며 online mode에서 알베도를 산출할 때는 offline mode에서 산출된 1일 전의 BRDF parameter를 사용하였다.

4.3 품질 평가 및 진단

지표면 반사도 알고리즘에서는 산출되는 자료의 품질을 평가하기 위하여 추후 연구를 통해 산출물별 QC를 제공할 것이다. QC에는 산출물의 품질 뿐만 아니라 입력 자료의 품질, 육/해상 구분, 구름 및 적설의 존재유무에 대한 정보가 포함될 것이다.

4.4 예외사항 처리

4.4.1 채널 TOC 반사도

- 해당 화소가 구름 탐지에서 구름으로 관측되었거나 fill value인 경우

- 해당 화소가 수계 또는 야간일 경우
- 해당 화소의 센서 관측 자료가 불량일 경우

4.4.2 채널 BRDF parameters & FVBAR

- 5일 이상 해당 화소가 지속적으로 구름으로 관측되었거나 센서 자료의 불량으로 인하여 청천역에서의 센서 관측 자료가 부족할 경우

4.4.3 채널 배경 지표 반사도

- 4.4.2의 이유로 BRDF 모델링이 수행되지 않아 해당 화소의 BRDF parameter가 fill value인 경우

4.4.4 채널 black/white sky 분광 알베도

- 4.4.2의 이유로 BRDF 모델링이 수행되지 않아 해당 화소의 BRDF parameter가 fill value인 경우

4.4.5 Black/white sky 광대역 알베도

- 4.4.2의 이유로 BRDF 모델링이 수행되지 않아 해당 화소의 BRDF parameter가 fill value인 경우
- 광대역 전환에 필요한 최소한의 분광 알베도가 산출되지 않았을 경우

4.5 검증 알고리즘

- 3.2.3의 검증 화소 선정 조건에 해당하지 않는 경우

5. 가정 및 제한

5.1 성능

지표면 반사도 알고리즘 개발에 있어서의 가정은 다음과 같다.

- 지표면의 이등방성은 BRDF 모델을 통해 표현 될 수 있다.
- 지표면의 BRDF component는 짧은 기간 동안 일정하다.
- 구름탐지 자료는 가능한 모든 구름에 의해 오염된 화소를 제거한다.

5.2 예상 센서 성능

GK-2A 지표면 반사도 알고리즘은 Himawari-8/AHI 의 반사도 채널을 모의자료로 활용하여 개발되었다. AHI는 AMI와 유사한 채널을 보유하고 있지만 중심파장이 같은 채널이라도 Spectral Response Function (SRF)의 차이를 보일 수 있다. 이러한 이유로 AMI의 on-orbit test 기간 동안 AMI의 대기 보정계수 산출 및 광대역 전환 계수를 산출하는 과정이 진행되어야 한다.

5.3 개선을 위한 사전 계획

현재 광대역 알베도 생산을 위한 광대역 전환 계수는 snow-free condition과 snowy-condition에서 각각 35일, 5일의 자료를 이용하여 훈련한 후 산출되었다. 지표면 광대역 알베도는 계절적인 변동성을 가지지만 현재 훈련에 사용된 기간이 짧기 때문에 이를 반영하기 어렵다. 따라서 추후 자료의 축적을 통해 1년 이상의 자료를 이용하여 광대역 전환 계수 산출을 위한 훈련자료를 구축하고 이를 이용하여 광대역 전환 계수를 도출할 예정이다. 이를 통해 지표면 광대역 알베도의 정확도 및 시계열에서 나타나는 안정도를 향상 시킬 수 있을 것으로 사료된다.

6. 참고문헌

- Berthelot B., Dedieu G., Cabot F. and S. Adam., 1994. Estimation of surface reflectances and vegetation index using NOAA/AVHRR: Methods and results at global scale, Communications for the 6th International Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, Val d'Isère, France, Jan. 17–21, 1994.
- Duchemin, B., & Maisongrande, P., 2002. Normalisation of directional effects in 10-day global syntheses derived from VEGETATION/SPOT:: I. Investigation of concepts based on simulation. *Remote Sensing of Environment*, 81(1), 90–100.
- Gao, F., X. Li, A. Strahler, and C. Schaaf, 2000. Evaluation of the Li transit kernel for BRDF modeling, *Remote Sensing Reviews*, 19(1–4): 205–224.
- Land SAF, 2012. The EUMETSAT Satellite Application Facility on Land Surface Analysis (LSA SAF), Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD), Land Surface Albedo Products: LSA-101 (MDAL), LSA-102(MTAL), LSA-108 (MDAL-MC), LSA-109 (MTAL-MC).
- Lee, C.S., J.M. Yeom, H.L. Lee, J.J. Kim, and K.S. Han, 2015. Sensitivity Analysis of 6S-Based Look-Up Table for Surface Reflectance Retrieval, *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 51(1), 91–101.
- Li, X. and Strahler, A. H., 1986. Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of a conifer forest canopy. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, (6), 906–919.
- Liang, S., 2000. Numerical experiments on the spatial scaling of land surface albedo and leaf area index, *Remote Sensing Reviews*, 19(1–4), 225–242.
- Liang, S., H. Fang, and M. Chen, 2001. Atmospheric Correction of Landsat ETM+ Land Surface Imagery – Part I : Methods, *IEEE Transactions*

- on *Geoscience and Remote Sensing*, 39(11): 2490–2498, doi: 10.1109/36.964986.
- Liang, S., H. Fang, M. Kaul, T.G. Van Niel, T.R. McVicar, J.S. Pearlman, and K.F. Huemmrich, 2003. Estimation and validation of land surface broadband albedos and leaf area index from EO-1 ALI data, *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 41 (6): 1260–1267.
- Lucht, W., Schaaf, C. B., & Strahler, A. H., 2000. An algorithm for the retrieval of albedo from space using semiempirical BRDF models, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38 (2), 977–998.
- Lyapustin, A., Martonchik, J., Wang, Y., Laszlo, I. and Korkin, S., 2011. Multiangle implementation of atmospheric correction (MAIAC): 1. Radiative transfer basis and look-up tables. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D3).
- Roujean, J.L., M. Leroy, and P.Y. Deschamps, 1992. A Bidirectional Reflectance Model of the Earth' s Surface for the Correction of Remote Sensing Data, *Journal of Geophysical Research*, 97(D18): 20455–20468.
- Schaaf, C., Martonchik, J., Pinty, B., Govaerts, Y., Gao, F., Lattanzio, A., Liu, J., Strahler, A. and Taberner, M., 2008. Retrieval of surface albedo from satellite sensors. In *Advances in Land Remote Sensing* (pp. 219–243). Springer Netherlands.
- Smith, W. H. F. and Wessel, P., 1990. Gridding with continuous curvature splines in tension. *Geophysics*, 55 (3), 293–305.
- Vermote, E.F. and A. Vermeulen, 1999. Atmospheric Correction Algorithm: SPECTRAL REFLECTANCES (MOD09) version 4.0. Algorithm Technical Background Document (ATBD).

- Wanner, W., X. Li, and A.H. Strahler, 1995. On the derivation of kernels for kernel-driven models of bidirectional reflectance, *Journal of Geophysical Research*, 100(D10): 21077–21089.
- Yeom, J.M. and H.O. Kim, 2013. Feasibility of using Geostationary Ocean Colour Imager (GOCI) data for land applications after atmospheric correction and bidirectional reflectance distribution function modelling, *International Journal of Remote Sensing*, 34(20): 7329–7339.