

GK2A AMI

Algorithm Theoretical Basis

Document

LST (Land Surface Temperature)

개발자 정보

서명석 공주대학교

최윤영 공주대학교

Version 1.1

2019. 10. 15.



국가기상위성센터
National Meteorological Satellite Center

<수정 이력>

문서 버전	수정내용	과학코드 버전	수정일	작성자
0.1	국가기상위성센터 가이드라인에 따른 ATBD 초안 작성 (COMS/MI 자료를 이용한 버전)	0.1.0.0	2015. 03. 30	서명석 최윤영
0.2	1차 전문가 검토위원회의 질의응답 및 의견을 반영한 ATBD 수정 (COMS/MI 자료를 이용한 버전)	0.2.0.0	2016. 11.18	서명석 최윤영
0.3	국가기상위성센터 새 가이드라인에 따른 ATBD 수정	0.3.0.0	2017. 01. 07	서명석 최윤영
0.4	ATBD 전반적인 수정 2차 전문가 검토위원회 질의응답 및 의견을 반영 (Himawari-8/AHI 자료를 이용)	0.4.4.1	2017. 11. 17	서명석 최윤영
0.5	3차 전문가 검토위원회 질의응답 및 의견을 반영한 ATBD 수정 (Himawari-8/AHI 자료를 이용)	0.5.0.0	2018. 01. 15	서명석 최윤영
0.6	4차 전문가 검토위원회 질의응답 및 의견을 반영한 ATBD 수정 (Himawari-8/AHI 자료를 이용)	0.5.4.1	2018. 11. 19	서명석 최윤영
1.0	국가기상위성센터 ATBD 개선 필요 사항 및 새로운 국문 템플릿을 반영한 ATBD 수정 (Himawari-8/AHI 자료를 이용)	0.5.4.3	2019. 06. 15	서명석 최윤영
1.1	복사전달 모의과정, 결과, 지표면온도 산출 계수 변경과 관련된 ATBD 수정 (GK2A/AMI 자료를 이용)	0.6.4.1	2019.10.15	서명석 최윤영

<목차>

1. 개요.....	8
1.1 목적	8
1.2 사용자.....	8
1.3 내용	8
1.4 관련 문서.....	9
2. 알고리즘 소개.....	10
2.1 개요	10
2.2 알고리즘 흐름도	10
2.3 입력자료	12
2.3.1 L1B	12
2.3.2 L2.....	13
2.3.3 보조 자료.....	13
2.4 이론적 배경	14
2.4.1 복사전달모델 모의 및 과정.....	17
2.5 수학적 설명	19
2.6. 복사전달모델(MODTRAN4) 모의 결과	21
2.7. 산출물.....	24
3. 모의자료 및 검증	26
3.1 모의 입력자료 및 검증자료.....	26
3.2 검증 방법.....	27
3.3 검증 결과.....	27
4. 현업운영 시 고려사항	40
4.1 수치계산 고려사항	40
4.2 프로그래밍 및 절차상의 고려사항	40
4.3 품질 평가 및 진단.....	40
4.4 예외사항 처리	40
4.5 검증 알고리즘.....	40
5. 가정 및 제한.....	41
5.1 성능	41

5.2 예상 센서 성능	41
5.3 개선을 위한 사전 계획	41
6. 참고문헌	42

<표 목차>

Table 2.1. GK2A/AMI primary sensor data used in the LST algorithm.	5
Table 2.2. GK2A/AMI derived sensor data used in the LST algorithm.	5
Table 2.3. GK2A/AMI ancillary data used in the LST algorithm.	6
Table 2.4. Input conditions of the radiative transfer model simulations.	11
Table 2.5. Summary of the LST retrieval equations according to the BTDRanges. The number indicates the equation number in the text.	12
Table 2.6. LST retrieval algorithm output data.	16
Table 3.1. Comparison results of Himawari-8 LST data and MODIS LST product (collection 6) for months (November 2016, January, April, and July 2017).	24
Table 3.2. Comparison results of GK2A LST data and MODIS LST product (collection 6) for months (July, August and September 2019).	26

〈그림 목차〉

Fig. 2.1. Flow chart for the development and retrieval process of LST from GK2A/AMI.	4
Fig. 2.2. Diurnal variation of air temperature and LST in the atmospheric vertical profiles (blue line: SeeBor profile, red line: diurnal variation of air temperature profiles, yellow arrow: diurnal variation of air temperature, green arrow: diurnal variation of LST).	10
Fig. 2.3. Distribution of RMSEs between LST calculated from RTM simulated brightness temperature and reference LST according to different impacting factors: (a) brightness temperature differences (BTD) and surface lapse rate; (b) emissivity differences ($\Delta\epsilon$) and BTD; (c) satellite viewing zenith angle (VZA) and BTD.	13
Fig. 2.4. (a) Scatter plot (left) and (b) histogram (right) of difference between the reference LST and estimated LST using Himawari-8 LST retrieval algorithm.	14
Fig. 2.5. Distribution of RMSEs for the LST retrieval algorithms based on the different impacting factors: (a) BTD and surface lapse rate; (b) $\Delta\epsilon$ and BTD; (c) $\Delta\epsilon$ and surface lapse rate; (d) VZA and BTD; (e) VZA and surface lapse rate.	15
Fig. 2.6. Sample images of the GK2A land surface temperature from GK2A full disk scan data for the selected day (June 5, 2019, 0230 UTC).	17
Fig. 3.1. (a) Spatial distribution of Himawari-8 LST (top left), (b) MODIS LST (top right), (c) their differences (bottom left) and (d) scatter plot (bottom right) for the selected day (Nov. 21, 2016, 1300 UTC).	20
Fig. 3.2. Same as Fig. 3.1 except for the selected day (Jan. 25, 2017, 0300 UTC).	21
Fig. 3.3. Same as Fig. 3.1 except for the selected day (Apr. 5, 2017, 0100 UTC).	22
Fig. 3.4. Same as Fig. 3.1 except for the selected day (Jul. 6, 2017, 1800 UTC).	23
Fig. 3.5. Scatter plot between Himawari-8 LST and Tateno station from upward longwave radiation (red square symbol: daytime; blue circle symbol: nighttime).	24
Fig. 3.6. Scatter plot between Himawari-8 LST and Boseong observatory from (a) 2.6 m upward longwave radiation and (b) 60m upward longwave radiation.	25
Fig. 3.7. (a) Spatial distribution of GK2A LST (top left), (b) MODIS LST (top right), (c) their differences (bottom left) and (d) scatter plot (bottom right) for the selected day (July 26, 2019, 1340 UTC).	27
Fig. 3.8. Same as Fig. 3.7 except for the selected day (July 26, 2019, 0130 UTC).	28
Fig. 3.9. Same as Fig. 3.7 except for the selected day (July 26, 2019, 1540 UTC).	29
Fig. 3.10. Scatter plot of LST between GK2A and Tateno station from upward longwave radiation.	30

약어표

Acronyms	
AHI	Advanced Himawari Imager
AMI	Advanced Meteorological Imager
ATBD	Algorithm Theoretical Basis Document
BSRN	Baseline Surface Radiation Network
BTD	Brightness Temperature Difference
GK2A	GeoKompsat-2 Atmosphere
HITRAN	High Resolution Transmission
IR	Infrared
KMA	Korea Meteorological Administration
LOWTRAN	Low Resolution Transmission
LST	Land Surface Temperature
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MODTRAN	Moderate resolution atmospheric transmission
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NMSC	National Meteorological Satellite Center
RMSE	Root Mean Square Error
RTM	Radiative Transfer Model
SLSTR	Sea and Land Surface Temperature Instrument
SoZA	Solar Zenith Angle
SST	Sea Surface Temperature
SZA	Satellite Zenith Angle
USAF	United State Air Force
VCM	Vegetation Cover Method
VIIRS	Visible Infrared Imaging Radiometer Suite

1. 개요

1.1 목적

본 문서는 정지궤도 기상위성 GK2A/AMI(GeoKomsat-2 Atmosphere/Advanced Meteorological Imager) 자료로부터 지표면온도(land surface temperature: LST)를 산출하는 알고리즘 기술 분석서 version 1.1이다. 본 문서는 지표면온도 산출의 이론적 배경에서부터 산출자료의 특성에 이르기까지 상세한 내용을 제공하는데 목적이 있으며 GK2A/AMI Level 1B 자료로부터 지표면온도를 산출하는 과정, 산출물 그리고 산출물의 품질까지 기술하였다. 또한 GK2A/AMI 자료로부터 지표면온도를 산출하는데 사용되는 여러 계산과정과 다양한 보조 자료에 대한 설명 또한 포함되어 있다. AMI는 후속 정지궤도 기상위성 GK2A에 탑재된 광학 영상기로서 가시에서부터 적외 영역에 이르기까지 16개의 채널을 포함한 센서이다.

1.2 사용자

이 문서의 사용자는 일차적으로 위성자료로부터 지표면온도를 산출하는 이론적 배경이나 알고리즘 개선에 관심이 있는 알고리즘 개발 연구자이고 이차적으로는 위성으로부터 산출한 지표면온도를 다른 응용분야에 활용할 사용자들이다.

1.3 내용

이 문서는 GK2A/AMI Level-1B 자료로부터 지표면온도를 산출하는 이론적 배경을 제시하는 것으로 크게 다음과 같은 내용을 포함하고 있다.

- 개요: 지표면온도 산출 알고리즘의 목적, AMI 센서의 특성, 그리고 산출물에 대한 간단한 기술
- 알고리즘 소개: 지표면온도 산출에 필요한 입력 자료에서부터 이론적 배경 그리고 최종 산출물에 대한 소개
- 가정과 한계: 지표면온도 산출 알고리즘의 개발과정에 필요한 가정과 현 알고리즘의 한계에 대한 소개

1.4 관련 문서

- NMSC, 2015, 영상 장면분석/표면 분야 알고리즘 개발 (1) 연차보고서
- NMSC, 2016, 영상 장면분석/표면 분야 알고리즘 개발 (2) 연차보고서
- NMSC, 2017, 영상 장면분석/표면 분야 알고리즘 개발 (3) 연차보고서
- NMSC, 2017, 영상 장면분석/표면 분야 알고리즘 개발 (4) 연차보고서
- NMSC, 2018, 영상 장면분석/표면 분야 알고리즘 개발 (5) 연차보고서
- NMSC, 2019, 영상 장면분석/표면 분야 알고리즘 개발 (6) 연차보고서
- NMSC, 2019, GEO-KOMPSAT 2A Land Surface Emissivity Algorithm Theoretical Basis Document

2. 알고리즘 소개

본 장에서는 현재 수준의 개발된 알고리즘에 대한 자세한 내용을 기술하였다.

2.1 개요

GK2A/AMI 지표면온도 산출 알고리즘은 GK2A/AMI의 기본 산출물 중 하나로서 동아시아 및 GK2A/AMI의 관측 지역에서의 지표면온도를 정량적으로 산출하기 위한 것이다. 본 알고리즘은 지표면 방출율을 미리 알고 있으며 대기의 흡수는 분리대기창 기법을 통해 보정될 수 있다는 가정을 한다. 또한 경계층 아래의 기온의 일 변동, 지표면 방출율, 대기 중 수증기량, 위성 천정각 등 다양한 영향을 알고리즘에 고려하였다. 다양한 조건들(대기 프로파일, 방출율 등)이 고려된 지표면온도 모의자료를 생성하기 위해 복사전달 모델 모의를 실시하였다. 지표면온도 산출 알고리즘의 계수는 주간과 야간에 대해 각각 건조/보통/습윤 조건으로 나누어 구축된 지표면온도 모의자료를 사용하여 회귀 방법으로 도출하였다. 지표면온도 산출 알고리즘의 산출 수준은 복사전달모델에 처방된 지표면온도를 이용하여 평가하였으며 최종 검증은 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 지표면온도 및 현장관측 자료를 이용하였다.

2.2 알고리즘 흐름도

본 연구에서 개발한 지표면온도 알고리즘은 Fig. 2.1과 같이 크게 세 개의 부분으로 구성되어 있다. 첫 번째 단계는 GK2A/AMI 관측 지역의 다양한 대기/지면 상태 조건이 포함되도록 복사전달모델 모의 조건을 설계한다. 다음으로 설계된 모의 조건을 복사전달 모델에 적용하여 복사전달 모의 자료를 구축하는 부분이다. 두 번째 단계는 구축된 모의 자료에 분리대기창 기법을 적용하여 기온 감률(2 종류)과 대기 상태(3 종류)에 따라 주간과 야간에 대해 습윤/보통/건조 조건으로 나누어 여섯 개의 산출 식을 개발하는 부분이다. 위성 자료와 보조 자료들을 읽은 후 각 조건별로 산출 식을 통해 지표면온도를 산출한다. 세 번째 단계는 개발된 산출 알고리즘을 위성 자료에 적용하여 지표면온도를 산출한다. 이 때 산출된 지표면온도는 충분히 제거되지 않은 구름에 의해 비정상적으로 낮은 값으로 지표면온도가 산출될 수 있으므로 이를 제거하는 과정(후처리)이 수행된다. 마지막 단계는 산출된 지표면온도의 정확도 평가로 지상관측자료 또는 MODIS 지표면온도와 같이 품질이 보장된 다른 위성자료를 이용하여 정량적으로 검증을 실시한다.

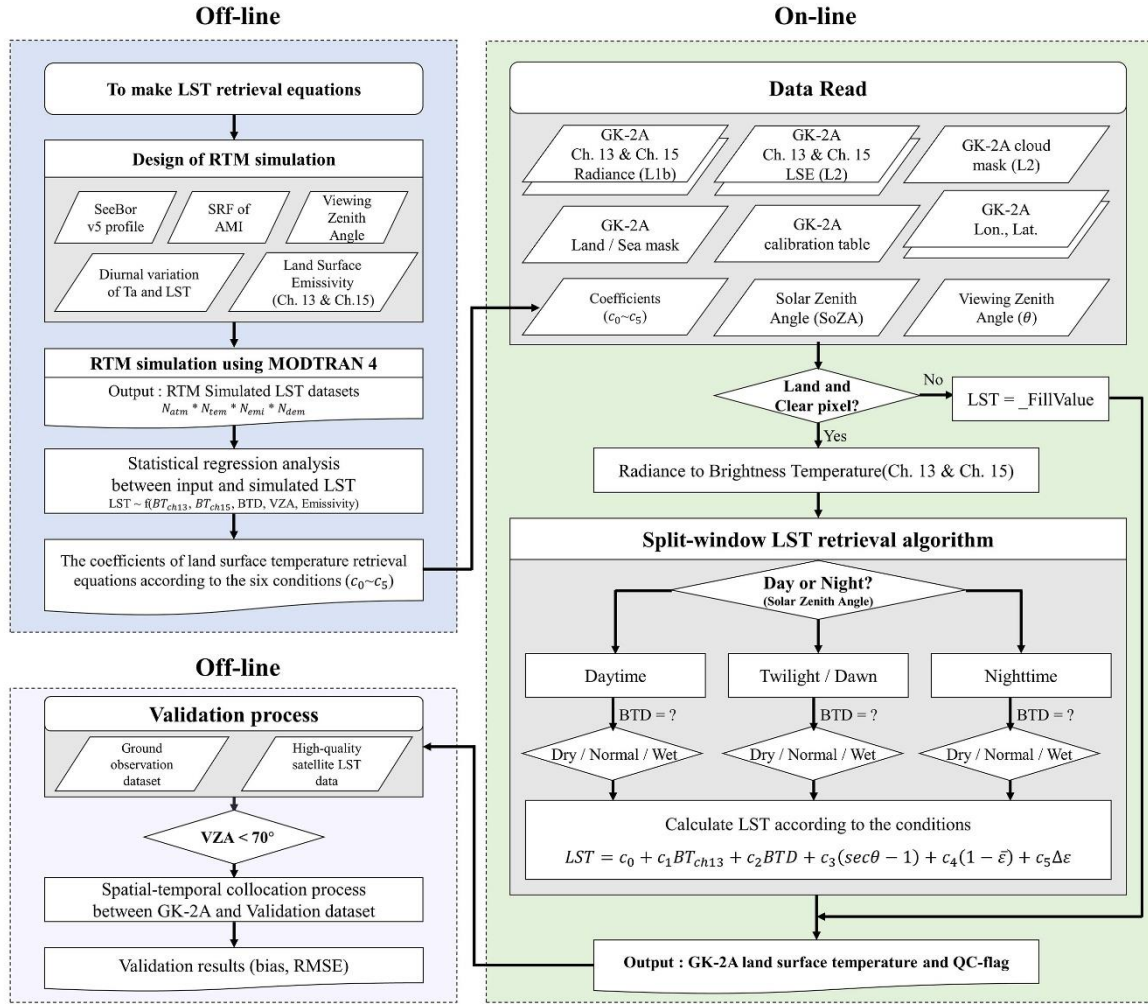


Fig. 2.1. Flow chart for the development and retrieval process of LST from GK2A/AMI.

2.3 입력자료

이 절에서는 GK2A/AMI 자료를 사용하여 지표면온도를 산출하는 과정에 필요한 입력 자료의 특성을 기술하였다. 알고리즘 입력 자료는 GK2A/AMI의 Level-1B 자료, 선행 산출물, 그리고 보조 자료가 있다.

2.3.1 L1B

지표면온도를 산출하기 위해 GK2A/AMI의 채널 13번과 채널 15번을 사용하며 공간해상도는 2 km, 관측주기는 10 분이다. 두 채널의 특징을 Table 2.1에 나타냈다.

Table 2.1. GK2A/AMI primary sensor data used in the LST algorithm.

Channel	Type	Center Wavelength (um)	Spatial resolution (km)	Temporal resolution (minutes)	Description	Use
13	IR	10.3539	2	10	AMI Channel 13 TOA radiance	Split-window algorithm input data
15	IR	12.3651	2	10	AMI Channel 15 TOA radiance	Split-window algorithm input data

2.3.2 L2

지표면온도는 청천인 육지 화소에 대해서만 산출되기 때문에 구름탐지 산출물이 선행자료로 필요하다. 구름 탐지 산출물은 공간해상도가 2 km이며 산출주기는 10분이다. 또한 지표면온도를 산출하기 위해 사용된 분리대기창 기법에서는 지표면 방출율을 알고 있다는 가정을 하므로 두 적외 채널의 지표면 방출율 자료가 필요하다. 지표면 방출율은 공간해상도가 2 km이며 산출주기는 1일이다. 지표면온도 산출에 필요한 L2 자료의 특징을 Table 2.2에 나타냈다.

Table 2.2. GK2A/AMI derived sensor data used in the LST algorithm.

Name	Spatial resolution (km)	Temporal resolution	Description	Use
Cloud detection	2	10 minutes	AMI cloud mask data	Distinguish clear pixel
Land surface emissivity channel 13	2	1 day	AMI Land Surface Emissivity channel 13	Split-window algorithm input data
Land surface emissivity channel 15	2	1day	AMI Land Surface Emissivity channel 15	Split-window algorithm input data

2.3.3 보조 자료

지표면온도를 산출하기 위해 필요한 보조 자료는 크게 정적 자료와 동적 자료로 나뉜다. 정적 입력 보조 자료는 청천인 육지 화소에 대해서만 지표면온도가 산출되므로 육지/해양 구분 자료가 필요하며 각 산출 식 조건에 따른 지표면온도 산출 계수 및 각 화소에 대한 위치정보(위도, 경도) 자료이다. 동적 입력 보조 자료는 주간과 야간을 구분하기 위한 태양 천정각과 지표면온도 산출식의 입력변수로 들어가는 위성 천정각이 있다. 보조자료의 특징은 Table 2.3과 같다.

Table 2.3. GK2A/AMI ancillary data used in the LST algorithm.

Name	Description	Use
Land/Sea mask	Land/Sea mask of each pixel	Distinguish land pixel
Coefficients of LST retrieval equations	Coefficients of LST retrieval algorithm (Day: Dry/Normal/Wet) (Night: Dry/Normal/Wet)	Calculate LST
Spectral emissivity look-up table	Spectral emissivity look-up table of AMI channel 13 and 15	Calculate land surface emissivity
Land use/cover data	Land use/cover of each pixel	Calculate land surface emissivity

2.4 이론적 배경

적외 영역의 복사전달방정식은 지면에서 방출되는 복사에너지와 대기와의 상호작용에 의해 결정된다. 열역학적 온도 T_s 의 지면에서 파장이 λ 일 때 방출되는 복사량은 플랑크 함수에 방출율 $\varepsilon(\lambda)$ 를 곱해 식 (2.1)과 같이 표현할 수 있다.

$$L(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda)B(\lambda, T_s) \quad (2.1)$$

일반적으로 전자기파가 대기를 통과하는 천정각이 $\theta(\mu = \cos(\theta))$ 일 때 흡수, 방출, 산란이 포함된 복사량은 복사전달 방정식(Schwarzschild 방정식)으로 표현할 수 있으며 식 (2.2)와 같다.

$$\mu \frac{dL_\lambda}{d\delta_\lambda} = -L_\lambda(\theta, \phi) + B_\lambda(T) \quad (2.2)$$

식 (2.2)에서 양 변에 적분인자 $\frac{\exp(\delta_\lambda/\mu)}{\mu}$ 를 곱하고 정리하면 식 (2.3)과 같다.

$$\exp\left(\frac{\delta_\lambda}{\mu}\right) \frac{dL_\lambda}{d\delta_\lambda} + \frac{1}{\mu} \exp\left(\frac{\delta_\lambda}{\mu}\right) L_\lambda(\theta, \phi) = \frac{1}{\mu} \exp\left(\frac{\delta_\lambda}{\mu}\right) B_\lambda(T) \quad (2.3)$$

좌 항을 완전 미분 형태로 정리하면 식 (2.4)와 같다.

$$\frac{dL_\lambda}{d\delta_\lambda} \left[\exp\left(\frac{\delta_\lambda}{\mu}\right) L_\lambda(\theta, \phi) \right] = \frac{1}{\mu} \exp\left(\frac{\delta_\lambda}{\mu}\right) B_\lambda(T) \quad (2.4)$$

여기에 광학두께 δ_λ 를 연직좌표로 $\delta_\lambda = 0$ 을 지표면, $\delta_\lambda = \delta_0$ 를 위성이라고 가정한 후 양 변을 지표면부터 위성까지 적분하면 식 (2.5)와 같다.

$$\begin{aligned} \int_0^{\delta_0} \frac{dL_\lambda}{d\delta_\lambda} \left[\exp\left(\frac{\delta_\lambda}{\mu}\right) L_\lambda(\theta, \phi) \right] &= \int_0^{\delta_0} \exp\left(\frac{\delta_\lambda}{\mu}\right) B_\lambda(T) \frac{d\delta_\lambda}{\mu} \\ \exp\left(\frac{\delta_\lambda}{\mu}\right) L_\lambda - L_0 &= \int_0^{\delta_0} \exp\left(\frac{\delta_\lambda}{\mu}\right) B_\lambda(T) \frac{d\delta_\lambda}{\mu} \end{aligned} \quad (2.5)$$

여기서 L_λ 는 위성에 도달하는 복사휘도, L_0 는 지표면에서 방출한 복사 휘도로 L_λ 에 대해 정리하면 식 (2.6)과 같다.

$$L_\lambda = L_0 \exp\left(-\frac{\delta_\lambda}{\mu}\right) + \int_0^{\delta_0} \exp\left(-\frac{(\delta_\lambda - \delta_\lambda')}{\mu}\right) B_\lambda(T) \frac{d\delta_\lambda'}{\mu} \quad (2.6)$$

탐재된 센서에 도달하는 파장 별 복사량은 지면에서 복사된 복사 휘도에 지표면부터 위성까지의 투과율을 곱한 값과 대기의 각 층에서 방출된 복사휘도의 기여량으로 표현된다. 여기서 지면이 흑체가 아니기 때문에 지면에서 방출된 복사 휘도는 지면에서의 상향 복사량과 대기에서의 하향복사의 반사량의 합으로 표현할 수 있다. 지면에서 방출된 복사량은 지표면온도와 방출율의 함수로 식 (2.6)을 풀어 쓰면 식 (2.7)과 같다(McMillin, 1975).

$$L_\lambda = [\varepsilon_\lambda B_\lambda(T_s) + (1 - \varepsilon_\lambda) L_\lambda^d] \tau_\lambda + L_\lambda^a \quad (2.7)$$

식 (2.7)에서 L_λ 는 위성에서 측정되는 파장 별 복사휘도를, L_λ^d 와 L_λ^a 는 각각 하향대기복사와 대기경로복사를 나타낸다. ε_λ 는 방출율, T_s 는 지표면 온도를 나타낸다. 위 식에서 보는 바와 같이 위성자료로부터 지표면온도를 계산하는 과정에서 반드시 대기의 영향을 고려해야 한다. 이를 위해 1) 대기경로복사(L_λ^a), 2) 대기 경로 투과율(τ_λ), 3) 하향 복사량(L_λ^d) 및 4) 지표면의 방출율을 정확하게 알아야 하며 위성 천정각 또한 고려해야 한다. 따라서 식 (2.7)을 실제 대기에 적용하기 위해서는 투과율 등과 같은 대기의 광학 속성을 알아야 한다. 대기 광학 속성은 온도와 습도 그리고 미량기체 농도로 대표되는 대기의 연직 구조에 따라 변한다. 대기 연직구조 및 지표면 온도, 방출율이 주어진 상태에서 복사전달 모델 모의를 수행하면 대기경로복사, 하향대기복사, 투과율에 대해 계산할 수 있으므로 주어진 대기 및 지표면 조건에 따라 대기 상단에서의 각 파장 별 단색복사휘도를 계산할 수 있다.

일반적으로 위성에 탑재된 센서에서는 측정값의 안정도와 정확도 향상을 위해 단위 파장이 아닌 일정 구간의 파장역에 대해 측정을 한다. 이 때 각 채널마다 파장별로 센서가

반응하는 정도를 나타내는 분광반응함수(Spectral Response Function: SRF)가 주어지며 복사전달모델로 모의된 단색복사휘도와 SRF를 이용하여 각 채널의 가중평균 복사량을 식 (2.8)과 같이 계산한다.

$$L_{measured} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda} f(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) d\lambda} \quad (2.8)$$

여기서 $L_{measured}$ 는 위성에서 측정된 복사량이며 $f(\lambda)$ 는 분광반응함수, L_{λ} 는 각 파장 별 단색복사휘도를 의미한다. 이렇게 구해진 복사량을 플랑크 방정식의 역 변환을 통해 각 채널 별 휘도 온도를 계산할 수 있다.

위의 식 (2.7)과 같이 기상위성에서 측정한 각 채널 별 휘도 온도 자료로부터 지표면온도를 정확히 산출하기 위해서는 1) 각 채널의 지표면 방출율 정보가 필요하며, 2) 지표면에서 방출된 복사 에너지가 대기 상단에 도달하기 전 통과해야 하는 대기의 특성 즉, 각 채널 별 대기의 투과율이 필요하며, 3) 대기의 각 층도 온도에 따라 에너지를 방출함으로써 대기경로상의 채널 별 복사에너지 방출량 정보 또는 기온과 습도의 연직 프로파일 정보가 필요하다. 따라서 2개 이상의 다중 채널의 자료를 이용함에도 불구하고 방정식보다 미지수가 많기 때문에 몇몇의 가정이 반드시 필요하다. 일반적으로 지표면온도의 시공간적 변동에 비해 지표면 방출율의 변동성이 작기 때문에 많은 경우, 특히 현업 측면에서 지표면온도를 산출하는 알고리즘 개발에서는 지표면 방출율을 이미 알고 있다고 가정하고 지표면온도 산출 알고리즘을 개발한다(Hook *et al.*, 1992; Li *et al.*, 1999).

위성에서 측정된 채널 별 복사휘도 온도로부터 지표면온도를 추정하는 방법에는 단일채널방법, 분리대기창 방법 및 다중 채널 방법 등이 있다. 대부분의 지표면온도 산출 알고리즘들은 분리대기창 기법을 사용하는데 이는 지표면의 방출율을 알고 있다고 가정하며 두 채널에서 대기에 의한 흡수정도가 다를 수 있음을 이용하여 대기의 효과를 제거할 수 있다고 가정한다(Becker and Li, 1990; Wan and Dozier, 1996; Li *et al.*, 2013; Xu *et al.*, 2014; Tang *et al.*, 2015). 특히 분리대기창 방법을 이용하면 수증기에 의한 대기영향을 보정할 수 있고 적용 방법이 매우 간단하기 때문에 많은 현업기관에서 사용되고 있다(Yu *et al.*, 2009; Sobrino *et al.*, 2013; Cho and Suh 2013b; Xu *et al.*, 2014). 본 연구에서 사용한 분리대기창 기법은 식 (2.9)과 같다.

$$LST = C_0 + C_1 BT_{ch13} + C_2(BT_{ch13} - BT_{ch15}) - C_3(sec\theta - 1) + C_4(1 - \bar{\epsilon}) - C_5\Delta\epsilon \quad (2.9)$$

식 (2.9)에서 $C_0 \sim C_5$ 는 산출 계수를 의미하며 BT_{ch13} 은 채널 13의 휘도 온도, $BT_{ch13} - BT_{ch15}$ 는 채널 13과 채널 15의 휘도 온도 차(Brightness Temperature Difference: BTD), θ 는 GK2A/AMI의 위성 천정각, ε 는 채널 13과 채널 15의 평균 지표면 방출율, 그리고 $\Delta\varepsilon$ 은 두 채널의 지표면 방출율 차이를 의미한다.

2.4.1 복사전달모델 모의 및 과정

미 공군(U.S. Air Force)에서 개발한 MODTRAN 4.2(moderate resolution transmission model)는 밴드모델 모수화를 적용한 복사전달모델(Radiative Transfer Model, RTM)로 대기 투과율 및 복사휘도, 복사수지를 자외선 파장역부터 적외 영역($0.2 \sim 10,000.0$ nm)까지 계산할 수 있다(Berk *et al.*, 1999). MODTRAN4.2는 HITRAN(high-resolution transmission molecular absorption database)을 기반으로 개발되었으며 파수 분해능이 0.1으로 향상되었다. LOWTRAN(low resolution transmission model) 기반이 일부 포함되어 있으며 분자산란, 구름, 안개, 비 등의 흡수/산란이 포괄적으로 고려된다. MODTRAN4.2에 대한 자세한 정보는 Berk *et al.* (1999)에 기술되어 있다.

해수면 온도와 달리 지표면온도는 위성자료와 1:1 대응되는 현장 관측 자료가 거의 없는 관계로 위성 자료로부터 지표면온도를 산출하기 위해서는 현장 관측 match-up database 와 유사한 자료를 준비하여야 한다. 현재 이러한 자료를 준비하는 방법으로는 수치모델 자료를 이용하거나 복사전달모델 (RTM)을 이용한다. 수치모델의 경우 고해상도의 다양한 자료를 이용할 수 있는 장점이 있는 반면 정확도가 낮은 문제점이 있고 복사전달 모델을 이용할 경우 고해상도와 짧은 주기의 기온과 습도의 프로파일 및 방출율 자료를 확보하기가 어려운 문제점이 있다. 본 연구에서는 현재 이 분야 복사전달 모의에서 많이 활용되고 있는 MODTRAN 4.2를 이용하여 모의자료를 만들어 지표면온도 산출 알고리즘을 개발하였다.

복사전달모델 모의에 입력 자료로 들어가는 SeeBor version 5 대기 연직 프로파일의 경우 대기 연직 기둥에 대해 주어진 101개 기압 층의 기온, 수증기량 등의 변수들이 제시되어 있다(Borbas *et al.*, 2005). 또한 각 지점의 지면 피복에 따라 10개 파장역에 대한 CIMSS 지표면 방출율도 함께 포함되어 있다. SeeBor 프로파일에는 지표면온도가 1개로 정의되어 있으나 지면 피복, 계절 및 날씨에 따라 다양하게 변하는 지표면온도의 일변동을 복사전달모의에서 고려하기 위해 선행 연구들(Wan, 1999; Yu *et al.*, 2005; Cho and Suh, 2013b; Choi and Suh, 2016; Choi and Suh, 2018; Yamamoto *et al.*, 2018)에서 사용한 실험설계를 결합하여 Fig. 2.2와 같이 기온과 지표면온도의 일 변동을 반영하

였다.

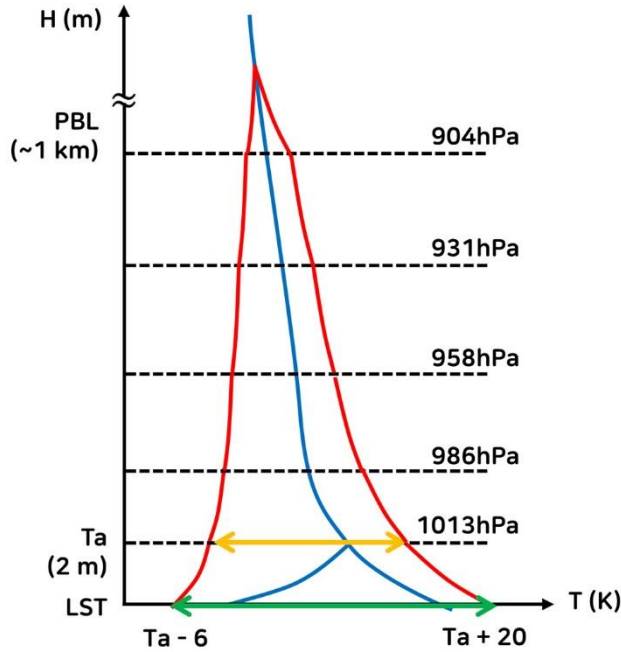


Fig. 2.2. Diurnal variation of air temperature and LST in the atmospheric vertical profiles (blue line: SeeBor profile, red line: diurnal variation of air temperature profiles, yellow arrow: diurnal variation of air temperature, green arrow: diurnal variation of LST).

Fig. 2.2와 같이 지표면온도의 일 변동은 기온을 기준으로 낮의 경우 $LST_{day} = Ta - 2 K \sim Ta + 20 K$, 밤의 경우 $LST_{ngt} = Ta - 6 K \sim Ta + 2 K$ 로 따로 나누어 처방하였다. 또한 각 관측소에서 측정된 기온(Ta)과 대기 경계층 아래에 해당되는 5개 층의 온도 프로파일들 또한 실제로 일 변동을 하기 때문에 Table 2.4와 같이 일 변동을 한다고 가정하여 복사전달모델에 처방하였다.

주어진 지표면온도와 대기조건에 따른 대기 상단에서의 각 채널 별 복사 휘도에 대한 모의자료를 생성하기 위해 Table 2.4에 제시한 바와 같이 다양한 대기와 지면 상태를 고려하여 복사전달모델 모의를 수행하였다. 전 지구에 대해 15,704개의 기후학적 대기 및 지면 상태를 포함한 SeeBor 프로파일 자료 중에서 위성 천정각이 50도 이내인 2694개 관측소 자료를 사용하였다. 지표면 방출율은 지면 피복의 종류 및 파장에 따라 방출율이 조금씩 다르기 때문에 GK2A/AMI 관측영역의 채널 13과 채널 15의 방출율의 분포를 분석하고 이를 복사전달모델에 고려하였다. 낮 시간에는 3,911,688개의 모의 자료

(2694(station) * 12(LST) * 11(ϵ_{ch13}) * 11($\Delta\epsilon$))가 구축되었으며, 밤 시간에 대해서는 1,629,870개의 모의자료(2694(station) * 5(LST) * 11(ϵ_{ch13}) * 11($\Delta\epsilon$))가 구축되었다. 복사전달모델에 입력된 지표면온도와 두 채널의 지표면 방출율, 위성 천정각과 복사전달 모델 모의를 통해 계산된 두 채널의 복사휘도로부터 산출된 휘도 온도 사이의 선형 회귀 분석을 통해 지표면온도 산출 계수를 결정하였다.

Table 2.4. Input conditions of the radiative transfer model simulations.

Subject	Conditions	
Atmospheric Profile	2694 SeeBor database (Version 5) (Satellite viewing zenith angle less than 50°)	
Diurnal variation of land surface temperature	Day: $T_a - 2K \sim T_a + 20K$ (a step of 2 K) Night: $T_a - 6K \sim T_a + 2K$ (a step of 2 K)	
Air Temperature (under the PBL Height)	904 hPa	$T_a^{'''''} = T_a^{''''} + (T_a^{'''} - T_a^{''})/3$
	931 hPa	$T_a^{''''} = T_a^{'''} + (T_a^{''} - T_a^{''})/3$
	958 hPa	$T_a^{'''} = T_a^{''} + (T_a^{'} - T_a^{''})/3$
	986 hPa	$T_a^{''} = T_a + (LST - T_a)/3$
	1013 hPa	$T_a^{'} = T_a + (LST - T_a)/2$
Emissivity	ϵ_{ch13} : 0.9400 ~ 0.9900 (a step of 0.005, 11 steps)	
	$-0.02 \leq \Delta\epsilon \leq 0.01$ (a step of 0.003, 11 steps) if (ϵ_{ch15}) > 1, $\epsilon_{ch15} = 0.9999$	

2.5 수학적 설명

이 절에서는 AMI 자료와 보조 자료를 이용하여 지표면온도를 산출하는 과정에서 사용되는 산출 식에 대해 설명한다. 본 연구에서는 주간/야간과 대기의 상태에 따라 6개의 지표면온도 산출 식을 개발하였다. 대기의 창 채널의 경우 가중함수가 지표면에서 가장 크기 때문에 대기상단에서의 복사 전달 모의된 복사 휘도에 미치는 영향도 지표면온도의 영향이 가장 큰 점을 고려하기 위해 주간에는 지표면온도가 기온보다 높으므로 ($T_a - 2$) K에서 ($T_a + 20$) K을 주간으로 하였고 야간에는 반대로 지표면온도가 기온보다 낮으므로 ($T_a - 6$) K에서 ($T_a + 2$) K을 야간으로 처방하였다. 또한 분리대기창 채널의 경우 수증기에 대한 민감도가 대기 중 수증기량에 따라 상이한 점을 반영하기 위하여 두 채널 휘도 온도 차(Brightness Temperature Difference: BTD)가 0 K 이하일 경우 일반적으로 수증기량이 적거나 에어로졸이 우세하므로 '건조', 7 K 이상일 경우 수증기량이 우세하므로 '습윤', 0 K에서 7 K까지 '보통' 알고리즘으로 구분하였다(Table 2.5). 즉, 지표

면온도의 산출 정확도 향상을 위해 기온 감률과 수증기 및 에어로졸 조건에 따라 총 6개 (2개(주간, 야간) × 3개(건조, 보통, 습윤))의 세부 산출식을 개발하였다 (식 2.10 ~ 식 2.15).

$$LST_{day/dry} = -2.484 + 1.009BT_{ch13} + 1.218(BTD) + 0.685(sec\theta - 1) + 49.530(1 - \bar{\epsilon}) - 79.841\Delta\epsilon \quad (2.10)$$

$$LST_{day/normal} = 2.868 + 0.986BT_{ch13} + 1.358(BTD) + 1.148(sec\theta - 1) + 61.566(1 - \bar{\epsilon}) - 76.448\Delta\epsilon \quad (2.11)$$

$$LST_{day/moist} = 55.826 + 0.796BT_{ch13} + 2.003(BTD) + 2.512(sec\theta - 1) + 65.350(1 - \bar{\epsilon}) - 74.165\Delta\epsilon \quad (2.12)$$

$$LST_{ngt./dry} = 4.003 + 0.986BT_{ch13} + 1.343(BTD) + 0.148(sec\theta - 1) + 45.216(1 - \bar{\epsilon}) - 79.232\Delta\epsilon \quad (2.13)$$

$$LST_{ngt./normal} = 1.602 + 0.992BT_{ch13} + 1.170(BTD) + 0.925(sec\theta - 1) + 51.920(1 - \bar{\epsilon}) - 53.374\Delta\epsilon \quad (2.14)$$

$$LST_{ngt./moist} = 27.019 + 0.890BT_{ch13} + 1.897(BTD) + 1.874(sec\theta - 1) + 73.339(1 - \bar{\epsilon}) - 67.972\Delta\epsilon \quad (2.15)$$

Table 2.5. Summary of the LST retrieval equations according to the BTD ranges. The number indicates the equation number in the text.

Conditions	BTD ranges	LST equation
Dry	$BTD < -1$	(2.10) for Day, (2.13) for Night
Dry-Normal	$-1 \leq BTD \leq 1$	Day: weighted sum of (2.10) and (2.11) Night: weighted sum of (2.13) and (2.14)
Normal	$1 < BTD < 6$	(2.11) for Day, (2.14) for Night
Normal-Wet	$6 \leq BTD \leq 8$	Day: weighted sum of (2.11) and (2.12) Night: weighted sum of (2.14) and (2.15)
Wet	$BTD > 8$	(2.12) for Day, (2.15) for Night

위 식들 (2.10 ~ 2.15)에서 BT_{ch13} 은 채널 13의 휘도 온도, BTD 는 채널 13과 채널 15의 BTD, θ 는 GK2A/AMI의 위성 천정각, ε 는 채널 13과 채널 15의 평균 지표면 방출율, 그리고 $\Delta\varepsilon$ 은 두 채널의 지표면 방출율 차이를 의미한다. 개발된 알고리즘은 주간과 야간에 적용이 용이하나 황혼 및 여명기에 알고리즘 간 차이로 인해 시간적 불연속이 발생할 수 있다. 이를 해소하기 위해 각 화소 별 태양 천정각 (Solar Zenith Angle: SoZA)이 80° 에서 100° 사이일 때 황혼 및 여명기라 가정하였다. 개발된 주간 및 야간 알고리즘 간 불연속을 해소하기 위하여 다음 식 (2.16 ~ 2.17)와 같이 SoZA을 고려하여 선형으로 가중 조합을 하였다.

$$LST = w \times LST_{day-wc} + (1 - w) \times LST_{ngt.-wc} \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned} w &= -\frac{1}{20} \times (SoZA) + 5 & (80^\circ \leq SoZA \leq 100^\circ) \\ w &= 1.0 & (SoZA \leq 80^\circ) \\ w &= 0.0 & (SoZA \geq 100^\circ) \end{aligned} \quad (2.17)$$

위 식 2.16과 식 2.17에서 w 는 가중치를 의미하고 LST_{day-wc} 와 $LST_{ngt.-wc}$ 은 각각 주간과 야간에 수증기 조건에 따라 지표면온도 산출 알고리즘으로 산출된 지표면온도 값이다. 개발된 지표면온도 산출 알고리즘의 산출 수준을 평가할 때는 통계적 평가 측도인 상관계수, 편의(Bias), 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error: RMSE)를 이용하였다.

2.6. 복사전달모델(MODTRAN4) 모의 결과

지표면온도 산출 알고리즘을 평가하기 위해 복사전달모델에 입력된 기준 지표면온도와 알고리즘으로부터 추정된 지표면온도를 비교하였다. 이 때, 전체 구축된 복사모의 자료에 대해 지표면온도 산출에 영향을 미치는 각 요소별 RMSE를 분석하고자 분리대기창 기법 식(2.9)을 사용하여 Fig. 2.3에 나타냈다.

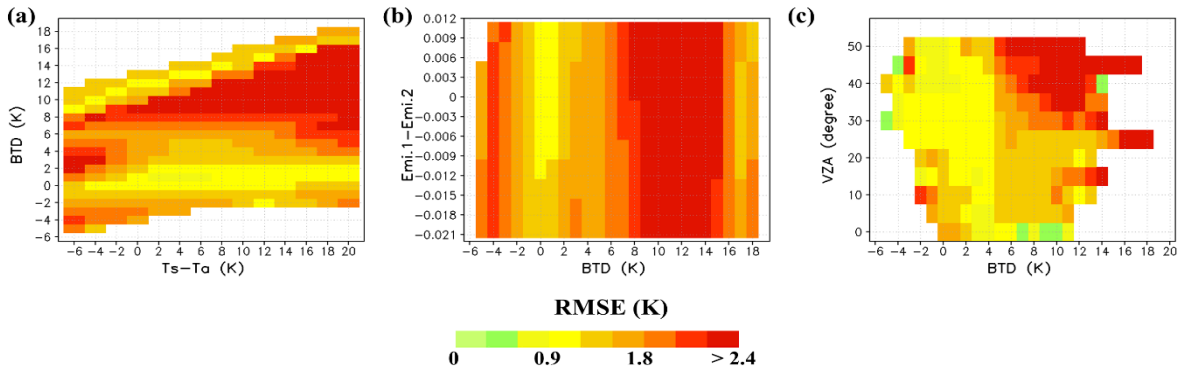


Fig. 2.3. Distribution of RMSEs between LST calculated from RTM simulated brightness temperature and reference LST according to different impacting factors: (a) brightness temperature differences (BTD) and surface lapse rate; (b) emissivity differences ($\Delta\epsilon$) and BTD; (c) satellite viewing zenith angle (VZA) and BTD.

Fig. 2.3은 복사전달모의에 입력된 기준 지표면온도와 복사전달 모의된 각 채널 별 휘도 온도로부터 하나의 회귀식으로 추정된 지표면온도에 대해 각 조건에 대해 RMSE의 분포를 의미한다. 해당 그림에서 하얀색으로 나타난 부분은 해당되는 범위에 복사 모의된 자료가 없어 RMSE가 계산되지 않은 부분이며 녹색으로 갈수록 RMSE가 작고 붉은 색을 띠수록 RMSE가 커 정확도가 낮아지는 것을 나타낸다. 전반적인 특징은 다른 요소보다 휘도 온도차에 가장 민감하게 RMSE가 변화하였다. 특히 휘도 온도차가 7 K보다 클 때 RMSE가 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 0 K보다 작을 때도 RMSE가 증가하는 것이 확인되었다. 이로 인해 앞서 2.5절 수학적 설명에서 언급하였듯 대기상단에서의 복사 전달 모의된 복사 휘도에 미치는 영향이 두 채널의 휘도 온도차에 가장 민감하므로 0 K과 7 K을 경계 값으로 설정하여 건조/보통/습윤의 조건으로 나누어 주간과 야간에 대해 회귀식을 도출하였다.

결정된 여섯 개의 지표면온도 산출 회귀식은 식(2.10 ~ 2.15)와 같으며 이를 적용하여

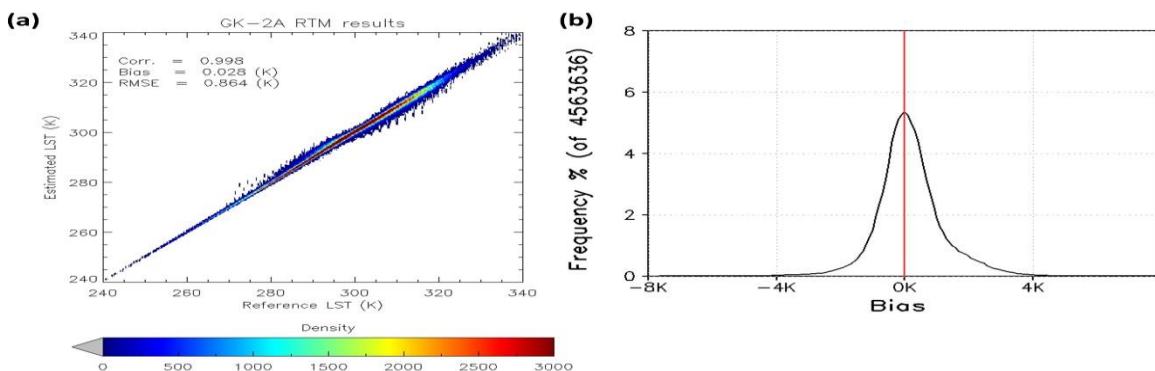


Fig. 2.4. (a) Scatter plot (left) and (b) histogram (right) of difference between the reference LST and estimated LST using GK2A/AMI retrieval algorithm.

기준 지표면온도와 추정된 지표면온도의 산점도와 편의의 분포를 Fig. 2.4에 나타내었다. 복사전달모의에 처방된 기준 지표면온도와 각 채널 별 모의 휘도온도 자료를 이용하여 도출된 지표면온도 산출 회귀식으로 추정된 지표면온도는 240 K에서 340 K의 넓은 범위에 대해 서로 잘 일치하고 있다. 두 지표면온도 간 상관계수는 0.998, 편의가 0.028 K, 그리고 RMSE가 0.864 K으로 나타나 개발된 산출 식으로부터 지표면온도가 잘 추정되고 있음을 확인할 수 있다. 산점도에서 나타났듯이 275~300 K의 구간에서는 기준 지표면온도보다 일부 과대 추정하였으며 305 ~ 320 K 사이와 같이 지표면온도가 고온일 때 기준 지표면온도에 비해 회귀 식으로 산출된 지표면온도가 과소 추정되는 문제점이 나타났다. 편의의 빈도 분포 그래프에서는 0 K을 기준으로 밀집되어 대칭에 가까운 정규분포를 나타냈으며 계통적 오차는 나타나지 않고 있다.

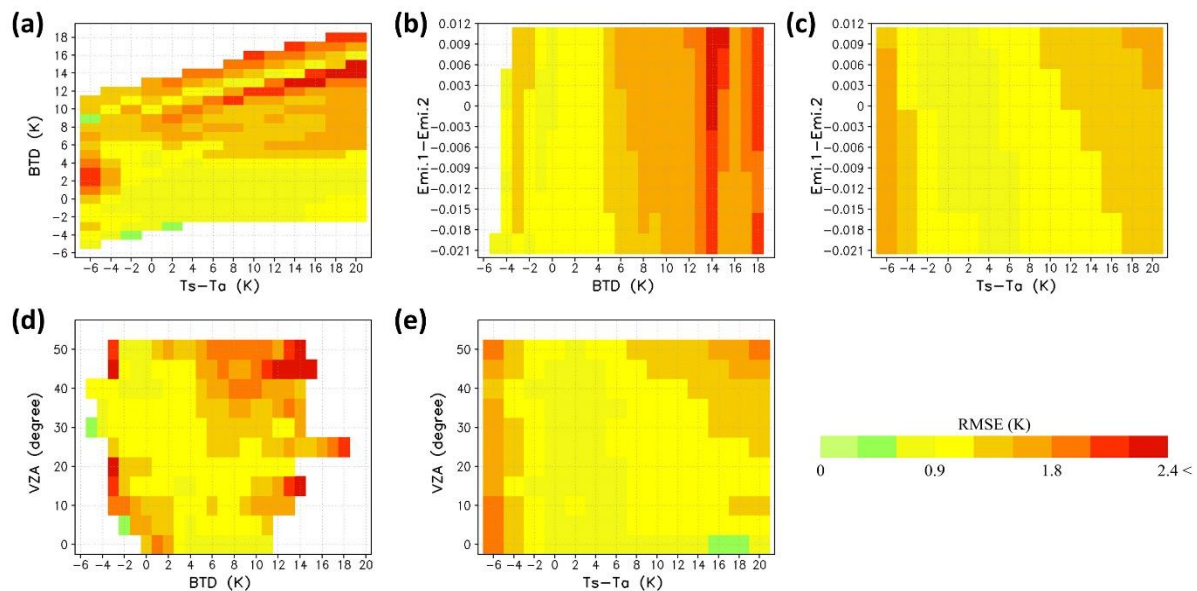


Fig. 2.5. Distribution of RMSEs for the LST retrieval algorithms based on the different impacting factors: (a) BTd and surface lapse rate; (b) $\Delta\epsilon$ and BTd; (c) $\Delta\epsilon$ and surface lapse rate; (d) VZA and BTd; (e) VZA and surface lapse rate.

Fig. 2.5는 지표면온도의 산출 정확도에 영향을 미치는 인자들 (기온감률, 휘도온도차, 지표면 방출율 차, 위성 천정각)에 따라 기준 지표면온도와 추정된 지표면온도 사이의 RMSE의 분포를 나타냈다. 전반적인 특징으로는 휘도온도차가 6 K 이상일 때 RMSE가 크게 나타나 산출 정확도가 떨어지는 점이다. 분리대기창의 두 채널이 에어로졸(Ch. 13) 및 수증기(Ch. 15)에 각각 상이하게 민감하여 발생하게 되는데 큰 양 및 음의 휘도온도차는 각각 대기 중 수증기량이 많거나 에어로졸이 많은 상태를 의미한다. 또한 위성 천

정각이 40도 이상이면서 휘도온도차가 8 K 보다 클 때 다른 조건보다 RMSE의 값이 상대적으로 매우 크게 나타나고 있다. 이는 위성 천정각이 커질수록 대기 통과길이가 길어져 대기의 영향이 증가되는 점과 수증기의 영향이 복합적으로 작용한 결과로 판단된다.

2.7. 산출물

지표면온도 산출 알고리즘의 출력자료는 크게 지표면 온도를 나타낸 자료(GK2A/AMI 관측 영역)와 산출자료의 품질에 대한 자료이다. 지표면온도는 10분 주기이므로 시간당 여섯 번 알고리즘 수행이 되어야 한다. 최종 산출물의 구조는 Table 2.6와 같다.

Table 2.6. [Summary](#) of LST retrieval algorithm output data.

Product name	Type	Name	Description
LST	short	long_name	AMI L2 Land Surface Temperature
		_Unsigned	TRUE
		_FillValue	65535
		Valid_max	33000
		Valid_min	21300
		scaling_factor	0.01
		add_offset	0
		units	K
DQF_LST	byte	long_name	AMI L2 Land Surface Temperature data quality flags
		_Unsigned	TRUE
		_FillValue	255
		Valid_max	4
		Valid_min	0
		units	none
		flag_meanings	0: normal 1: abnormal – satellite data receiving error 2: abnormal – auxiliary data error 3: abnormal – cloud mask data error 4: abnormal – exceeds the valid range of LST

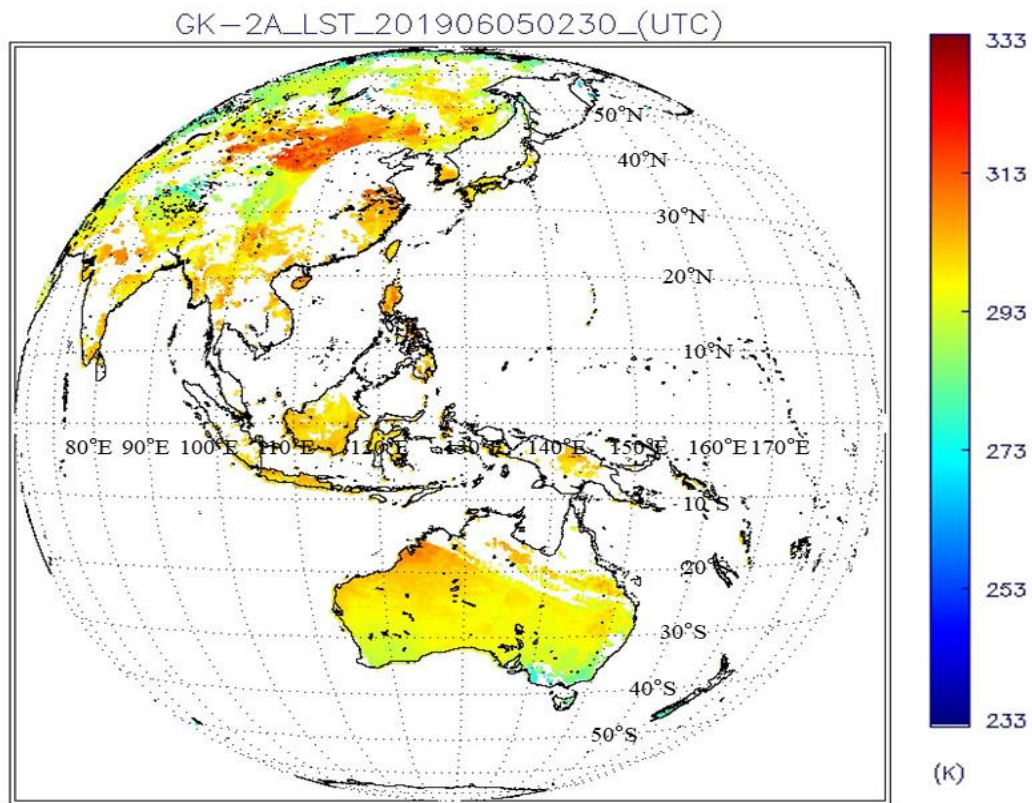


Fig. 2.6. Sample images of the GK2A land surface temperature from GK2A full disk scan data for the selected day (June 5, 2019, 0230 UTC).

Fig. 2.6은 2019년 6월 5일 0230 UTC의 GK2A/AMI Level 1B 관측 자료와 Level 2 자료 (구름탐지, 지표면 방출율)를 이용하여 산출된 지표면온도의 공간분포이다. 지표면 온도는 지리적 위치 및 지형에 따라 공간적으로 다르게 나타났으며 특히 중국과 몽고 국경지역과 호주 사막지역 등 건조한 지역에서 지표면온도가 상대적으로 높게 나타나고 있다. 또한 중국, 동남아, 인도지역과 호주 북부지역에서는 구름으로 인해 지표면온도가 산출되지 않았다.

3. 모의자료 및 검증

3.1 모의 입력자료 및 검증자료

국가기상위성센터에서는 2019년 7월 25일부터 천리안위성 2A호 자료의 정식서비스를 시작하였다. 정식서비스 시작 이전 기간에는 GK2A/AMI 자료를 사용할 수 없기 때문에 본 알고리즘에서는 GK2A와 궤도 특성이 같으며 위치도 근접한 Himawari-8/AHI 자료를 대체 입력 자료로 활용하였다. 앞에서 설명한 바와 같이 분리대기창 기법을 사용하여 지표면온도를 개발할 때는 두 개의 인접한 적외 채널을 사용한다. 본 연구에서는 Himawari-8/AHI 채널 13과 채널 15의 관측 자료 및 GK2A/AMI 채널 13과 채널 15의 관측자료를 사용하였다.

지표면온도는 청천인 육지 화소에 대해서만 산출되므로 구름탐지 자료가 필요하다. Himawari-8/AHI 지표면온도를 산출할 때는 구름 탐지 산출물의 경우 국가기상위성센터에서 개발한 GK2A 구름 탐지 알고리즘(v0531)을 Himawari-8 자료에 적용하여 산출된 자료를 제공받아 사용하였다(Lee *et al.*, 2016; NMSC, 2018). 또한 천리안위성 2A호의 정식서비스가 시작된 이후에는 GK2A 구름 탐지 산출물을 사용하였다. 구름탐지 산출물의 시간해상도는 10분이며 공간해상도는 2 km이다. 또한 분리대기창 기법을 적용하여 지표면온도를 산출할 때는 두 채널의 지표면 방출율을 미리 알고 있다고 가정하기 때문에 선행 산출된 지표면 방출율 자료가 필요하다. 지표면 방출율 자료는 GK2A 지표면 방출율 산출 알고리즘(v0511)을 Himawari-8 자료에 적용하여 산출된 자료를 사용하였으며 지표면 방출율 산출에는 식생지수와 적설탐지 자료의 산출이 선행되어야 한다. 구름 탐지 자료와 마찬가지로 천리안위성 2A호의 정식서비스가 시작된 이후에는 GK2A의 식생지수, 적설탐지 자료를 이용하여 산출된 GK2A 지표면 방출율 자료를 사용하였다. 지표면 방출율 자료의 공간 및 시간해상도는 각각 2 km와 8일 합성 주기로 매일 산출된다. 지표면온도 산출을 위해 필요한 보조 자료는 육지/해양 구분자료, 지표면온도 산출 계수 그리고 각 화소에 대한 위치정보(위도, 경도) 및 각도정보(태양 천정각, 위성 천정각) 자료가 필요하다.

산출된 지표면온도를 검증할 수 있는 GK2A 관측영역 내 가용 가능한 현장 관측 자료의 수가 제한적이다. 지표면온도 검증에 사용된 현장관측 자료는 Baseline Surface Radiation Network(BSRN) 중에서 일본의 Tateno 지점에서 관측된 상향 장파 복사 자료를 사용하였다(Ijima, 2016, 2019). 국립기상과학원에서 제공하고 있는 보성 글로벌 표준 기상관측소에서 측정된 2.6m, 60m 상향 장파 복사 자료도 지표면온도 검증을 위해 사용하였다. 상향 장파 복사 자료의 경우 이를 Stefan-Boltzmann 법칙으로 지표면

온도로 변환하여 검증에 사용하였다. 현장 관측 자료의 경우 공간대표성의 한계가 존재하므로 상대적으로 정확도가 우수한 것으로 알려진 MODIS 지표면온도를 유사 검증자료로 사용하였다.

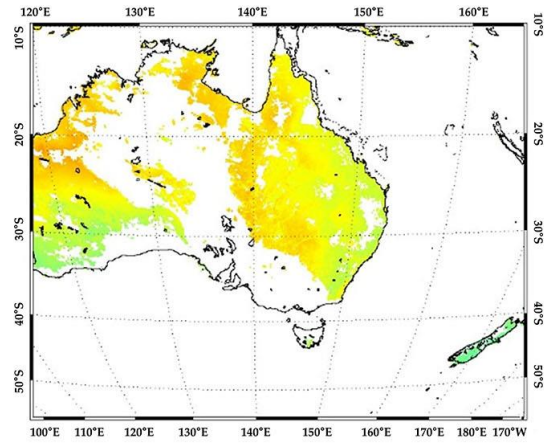
3.2 검증 방법

대체 입력 자료(Himawari-8) 및 천리안위성 2A호 자료로부터 산출된 지표면온도를 비교 검증하기 위해 MODIS 지표면온도(MOD11_L2, MYD11_L2 swath collection 6)를 사용하였다(NASA LP DAAC, 2013). 지표면온도는 시간적 변동이 매우 크기 때문에 검증하고자 하는 시간대에서 ± 5 분 이내의 MODIS 지표면온도 자료를 이용하여 검증을 실시하였다. 또한 입력 자료인 Himawari-8 채널 13, 15와 GK2A 채널 13, 15의 공간 해상도가 2 km인데 비해 MODIS 지표면온도의 공간해상도는 1 km로 다르기 때문에 각각 Himawari-8 화소와 GK2A에서 가장 가까운 MODIS 화소를 중심으로 9(3×3) 픽셀에 대해 5개 이상이 청천이면서 정상 산출된 화소일 때 이를 단순 평균하여 검증에 사용하였다. 현장 관측자료의 경우 동일 시간대이면서 입력 자료인 Himawari-8과 GK2A에서 가장 가까운 화소를 이용하여 검증을 실시하였다.

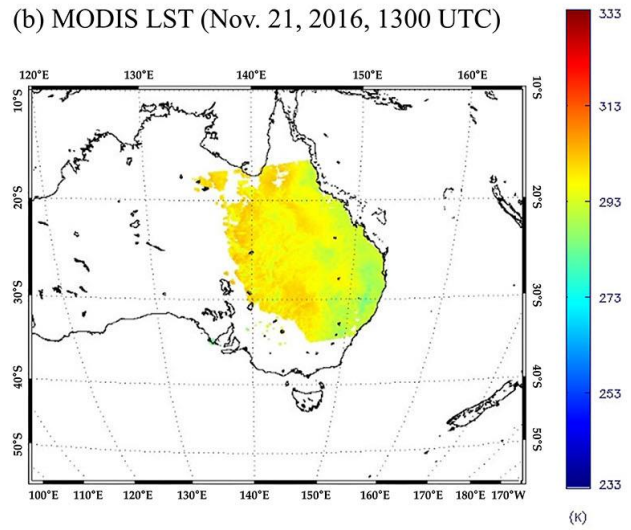
3.3 검증 결과

Fig. 3.1부터 Fig. 3.4는 지표면온도 산출 알고리즘을 Himawari-8/AHI 자료에 적용하여 산출된 지표면온도와 MODIS 지표면온도 그리고 두 자료 간의 차이의 공간분포와 산점도를 나타낸 것이다. 앞에서 언급한 시공간 일치 조건을 만족하는 화소만을 비교하였다. 따라서 공간분포 상에 MODIS의 경로에 따른 불연속이 존재하고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 계절 및 주야에 관계없이 Himawari-8 지표면온도와 MODIS 지표면온도 공간분포가 유사할 뿐만 아니라 두 온도 간의 차가 ± 4 K 이내로 분포하고 있다. 4개의 사례에서는 Himawari-8 지표면온도와 MODIS 지표면온도 간의 상관계수가 0.9 이상으로 나타났으며 bias와 RMSE 모두 2 K 이하로 작게 나타났다.

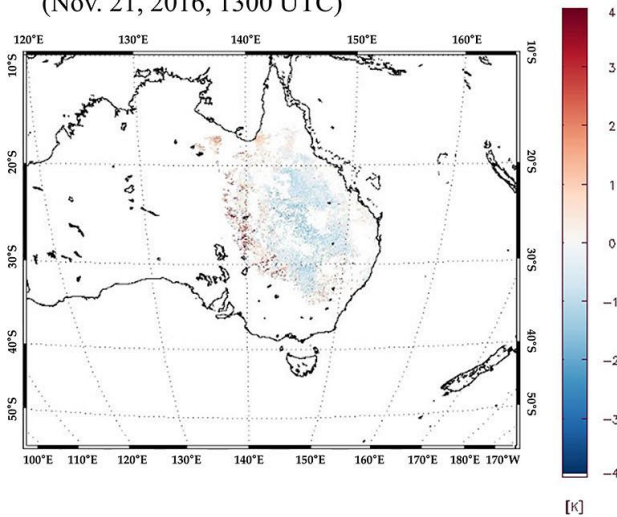
(a) Himawari-8 LST (Nov. 21, 2016, 1300 UTC)



(b) MODIS LST (Nov. 21, 2016, 1300 UTC)



(c) Diff. (Himawari-MODIS) LST (Nov. 21, 2016, 1300 UTC)



(d) Scatterplot between Himawari & MODIS LST

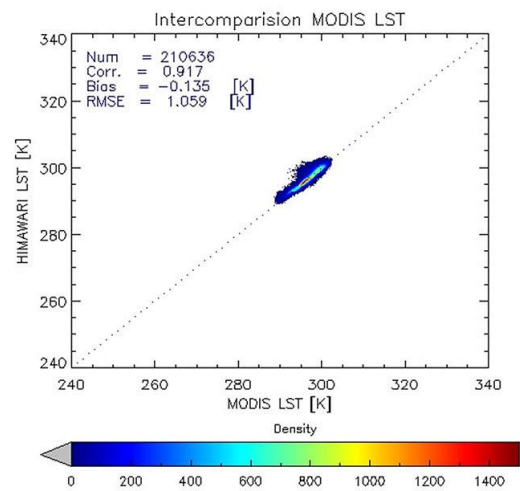


Fig. 3.1. (a) Spatial distribution of Himawari-8 LST (top left), (b) MODIS LST (top right), (c) their differences (bottom left) and (d) scatter plot (bottom right) for the selected day (Nov. 21, 2016, 1300 UTC).

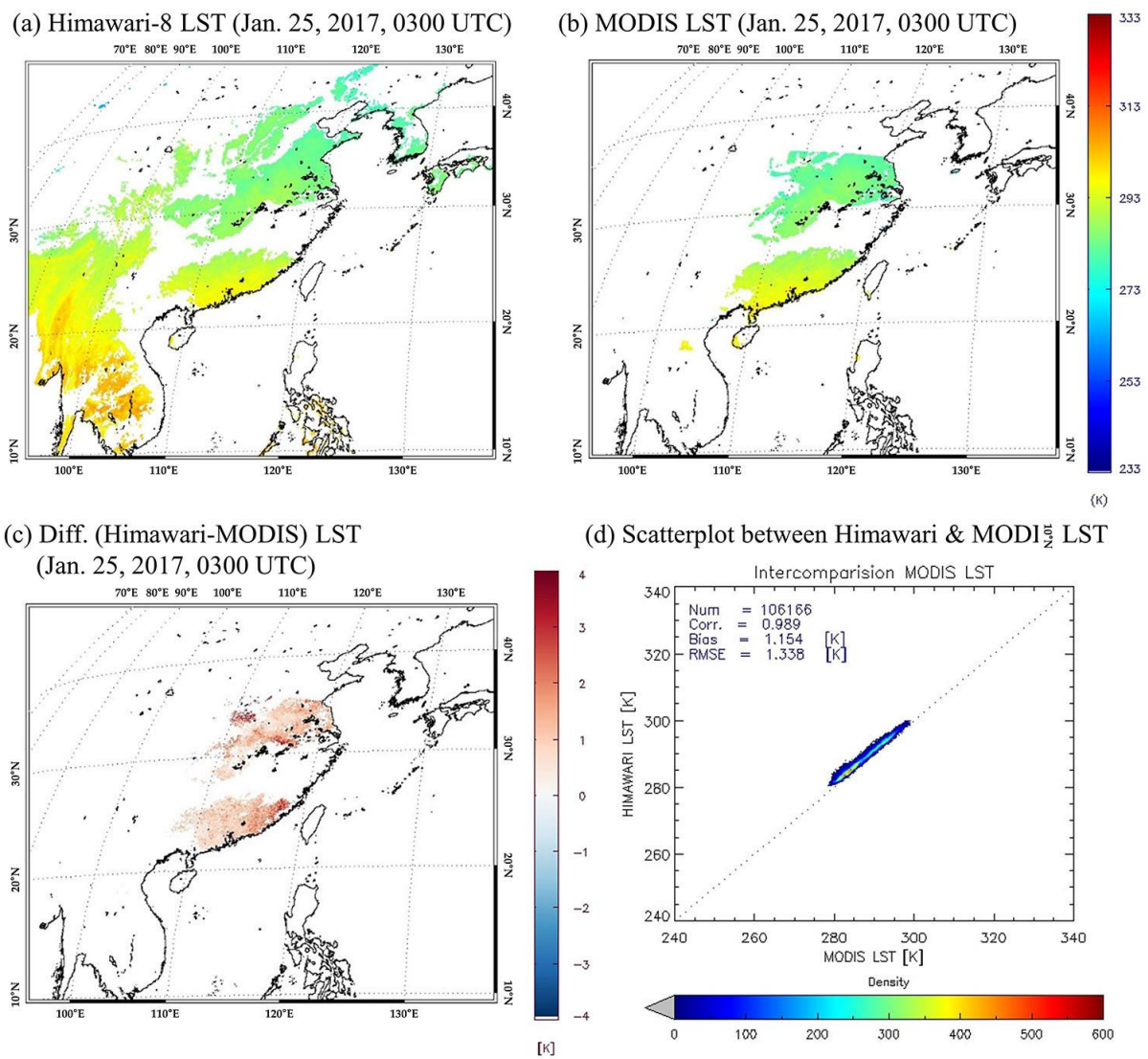
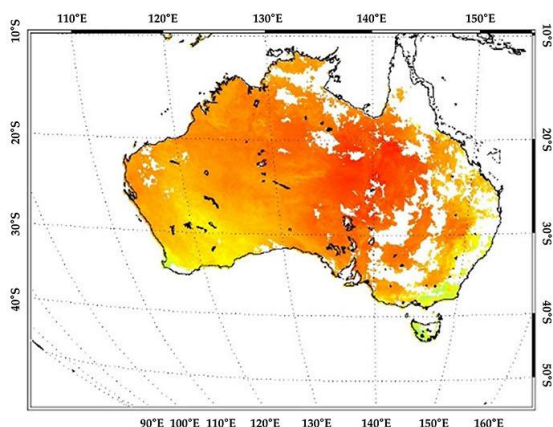
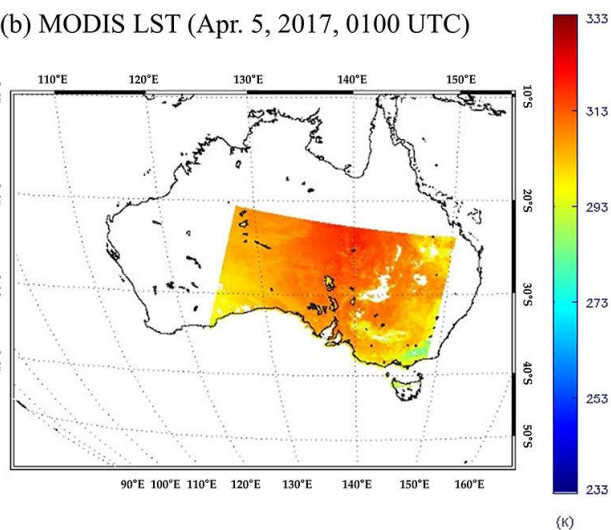


Fig. 3.2. Same as Fig. 3.1 except for the selected day (Jan. 25, 2017, 0300 UTC).

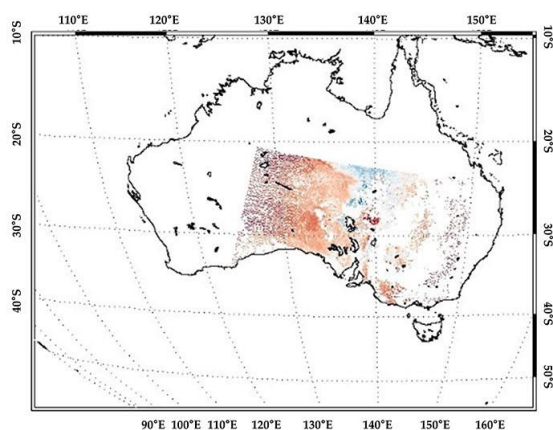
(a) Himawari-8 LST (Apr. 5, 2017, 0100 UTC)



(b) MODIS LST (Apr. 5, 2017, 0100 UTC)



(c) Diff. (Himawari-MODIS) LST
(Apr. 5, 2017, 0100 UTC)



(d) Scatterplot between Himawari & MODIS LST

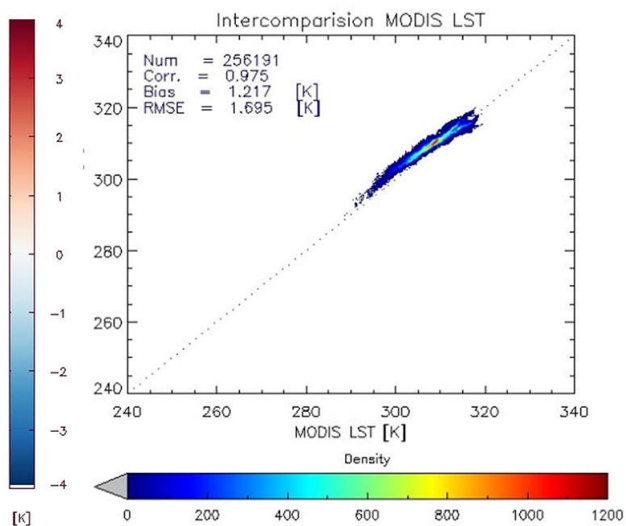
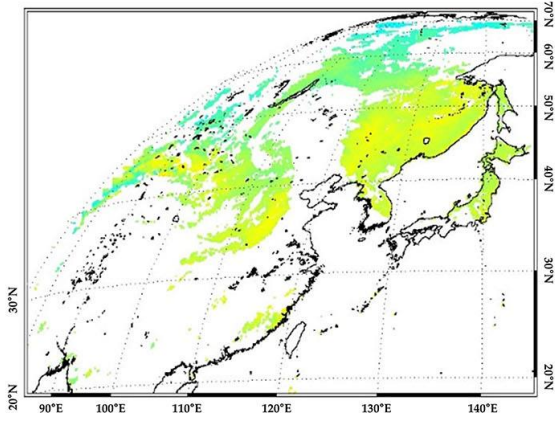
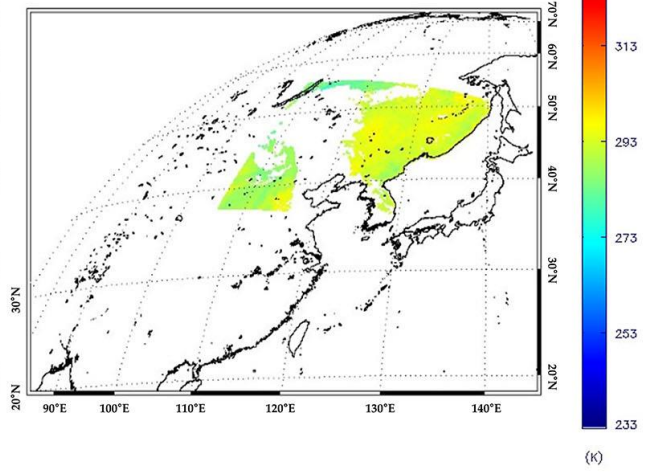


Fig. 3.3. Same as Fig. 3.1 except for the selected day (Apr. 5, 2017, 0100 UTC).

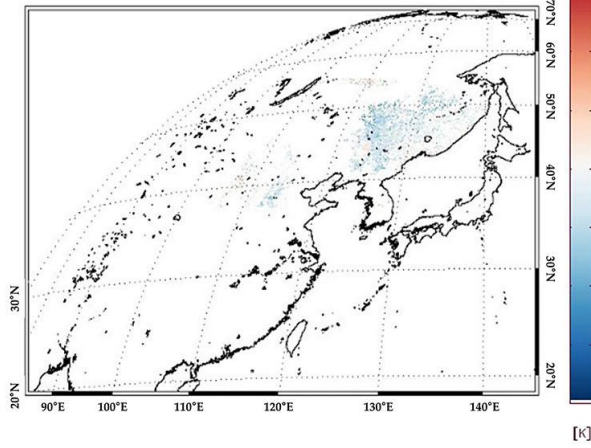
(a) Himawari-8 LST (Jul. 6, 2017, 1800 UTC)



(b) MODIS LST (Jul. 6, 2017, 1800 UTC)



(c) Diff. (Himawari-MODIS) LST
(Jul. 6, 2017, 1800 UTC)



(d) Scatterplot between Himawari & MODIS LST

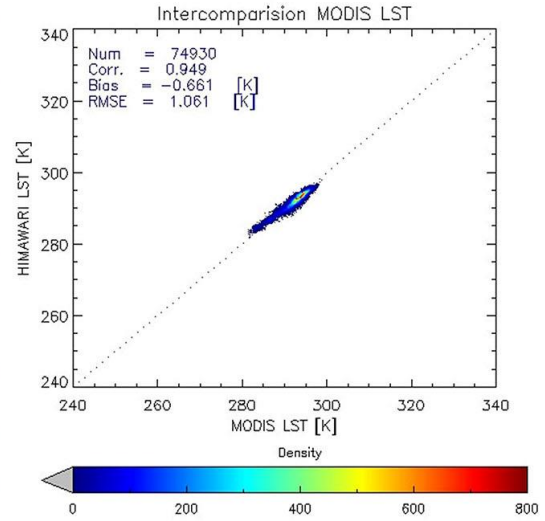


Fig. 3.4. Same as Fig. 3.1 except for the selected day (Jul. 6, 2017, 1800 UTC).

다양한 경우에 대해 산출 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 2016 년 11 월, 2017 년 1, 4, 7 월 총 4 개월에 대해 지표면온도를 산출하여 MODIS 지표면온도와 비교 검증을 하였으며 그 결과는 Table 3.1 에 나타났다. 두 지표면온도의 상관계수는 4 개 달 모두에서 야간보다 주간에 높게 나타났다. 편의의 경우 주간에는 여름인 2016 년 11 월에만 -0.23 K 의 한랭 편의가 나타났으나 그 외의 달에서는 온난 편의가 나타났다. 반면 야간의 경우 주간과는 다르게 전반적으로 모든 월에서 한랭 편의가 나타났으며 그 크기가 -0.3 K 이하를 보였다. RMSE 의 경우 전반적으로 야간보다 주간에 큰 값을 보였으며, 특히 2016 년 11 월의 경우 RMSE 가 2.53 K 으로 목표 정확도인 2.5 K 에 비해 조금 크게 나타났다. 반면 야간의 RMSE 는 4 개 월 모두 1.3 K 보다 작게 나타났다. 주간과 야간 시간대를 모두 합한 265 개 장면에 대한 결과에서는 상관계수가 0.92 , 편의는 0.2 K RMSE 는 1.78 K 으로 나타나 산출수준이 우수함을 보였다.

Table 3.1. Comparison results of Himawari-8 LST data and MODIS LST product (collection 6) for months (November 2016, January, April, and July 2017).

Month	Day				Night				Total (Day+Night)			
	# of scene	Corr.	Bias [K]	RMSE [K]	# of scene	Corr.	Bias [K]	RMSE [K]	# of scene	Corr.	Bias [K]	RMSE [K]
2016.11	40	0.91	-0.23	2.53	35	0.90	-0.10	1.02	75	0.91	-0.18	1.97
2017.01	24	0.89	0.20	2.22	18	0.87	-0.19	1.18	42	0.88	0.05	1.82
2017.04	38	0.94	0.68	2.02	31	0.87	-0.27	1.08	69	0.92	0.45	1.79
2017.07	46	0.96	0.59	1.72	33	0.90	-0.12	1.23	79	0.95	0.42	1.60
Total and Ave.	148	0.93	0.35	2.06	117	0.89	-0.15	1.12	265	0.92	0.20	1.78

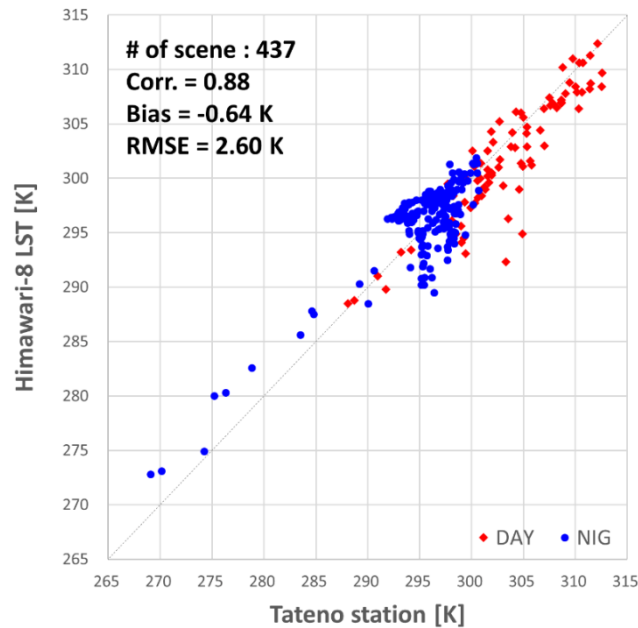


Fig. 3.5. Scatter plot between Himawari-8 LST and Tateno station from upward longwave radiation (red square symbol: daytime; blue circle symbol: nighttime).

또한 산출된 Himawari-8/AHI 지표면온도의 정량적인 검증을 위해 현장관측 자료인 BSRN 과 보성 글로벌 표준 기상 관측소의 상향 장파 복사량을 검증자료로 사용하였다. BSRN 중 일본의 Tateno 지점에서 관측된 상향 장파 복사량을 지표면온도로 변환하여 검증한 결과를 Fig. 3.5 에 나타내었다. 437 개 사례에 대해 상관계수가 0.88, 편의가 -0.64 K, RMSE 는 2.6 K 를 보였다. 주간에는 Himawari-8 지표면온도가 현장관측 지표면온도에 비해 과소 추정되는 경향이 나타났다. 반면 야간에는 저온 구간($270\sim 290$ K)에서 Himawari-8 지표면온도가 현장 관측 지표면온도보다 과대 추정되었으며 290 K 이상에서는 과소/과대 추정이 혼재되어 있다.

보성 관측소에서 관측된 상향 장파 복사량을 지표면온도로 변환한 검증결과를 Fig. 3.6 에 나타냈다. 해당 자료의 시간해상도는 30 분 간격이므로 Himawari-8 관측 시간대와 동일 시간대의 자료를 사용하였다. 검증 기간은 2016 년 8 월 5 일부터 26 일까지의 자료를 사용하였다. 전반적으로 측정고도에 관계없이 현장 관측된 복사량을 지표면온도로 변환한 값보다 Himawari-8 지표면온도가 낮게 추정하였다. 또한 주간(150 개)과 야간(189 개)에 관계없이 Himawari-8 지표면온도가 현장 관측된 복사량을 지표면온도로 변환한 값보다 낮게 추정되고 있으며 특히 야간에 현저하게 낮게 추정하는 사례가 발생하였다. 현장 관측 자료를 이용한 검증을 실시할 때는 관측 지점

주변의 지면이 균질 하게 이루어져 있어야 하지만 가장 가까운 위성 화소의 공간해상도를 고려하였을 때 이를 만족하기 어려워 공간대표성의 한계가 존재한다. 또한 장기간의 추가 검증을 통해 알고리즘의 성능 평가가 필요하다.

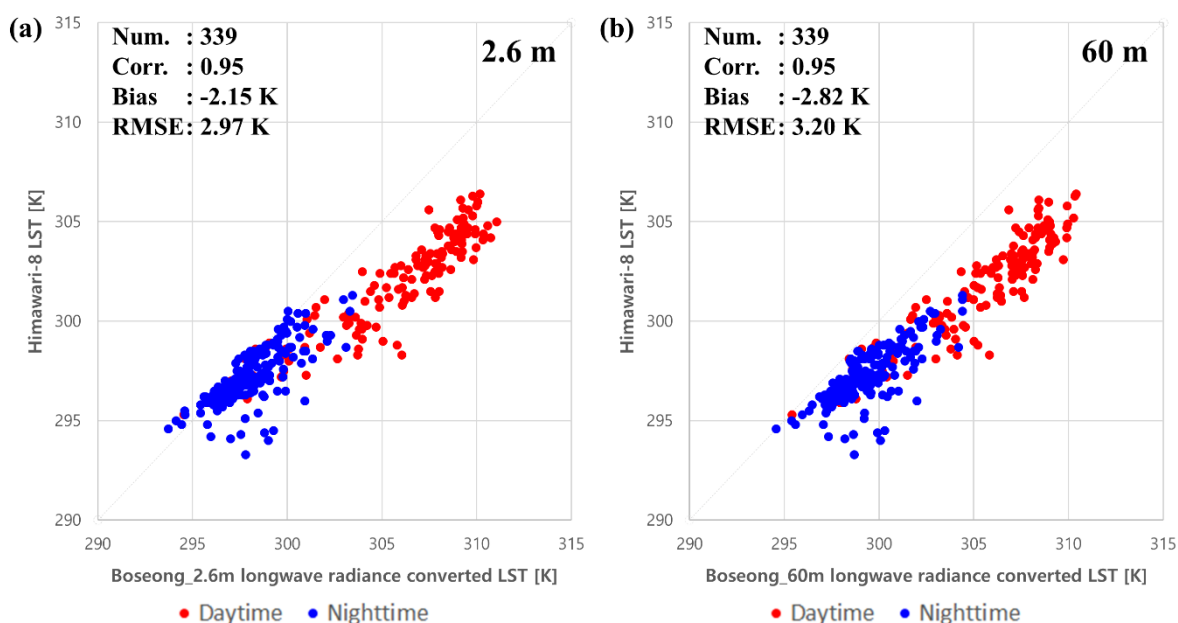


Fig. 3.6. Scatter plot between Himawari-8 LST and Boseong observatory from (a) 2.6 m upward longwave radiation and (b) 60m upward longwave radiation.

천리안위성 2A호의 현업 운영이 시작된 2019년 7월부터 9월까지 총 3개월에 대해 지표면온도를 산출하여 MODIS 지표면온도와 비교 검증을 실시하였으며 이에 대한 정량적 결과는 Table 3.2와 같다.

Table 3.2. Comparison results of GK2A LST data and MODIS LST product (collection 6) for the selected three months (July, August and September 2019).

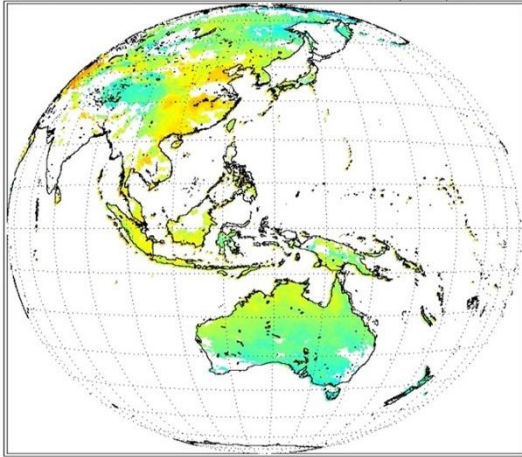
Month	MOD11_L2				MYD11_L2			
	# of pixel	Corr.	bias [K]	RMSE [K]	# of pixel	Corr.	bias [K]	RMSE [K]
2019.07	59,606,383	0.987	0.692	2.109	58,863,637	0.992	0.575	2.007

2019.08	101,727,374	0.986	0.883	2.379	91,286,816	0.991	0.676	2.231
2019.09	84,339,291	0.990	1.064	2.364	74,601,907	0.993	0.844	2.181
Total and Ave.	245,673,048	0.987	0.899	2.308	224,752,360	0.992	0.706	2.156
# of pixel : 470,425,408, Corr. = 0.990, bias = 0.806 K, RMSE = 2.235 K								

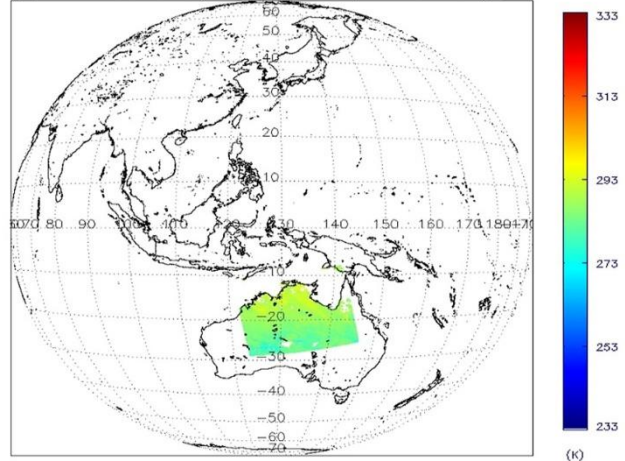
천리안위성 2A호 지표면온도와 MODIS 지표면온도의 상관계수는 Terra/Aqua 위성과 및 월에 관계없이 모두 0.986 이상으로 높게 나타나고 있다. 또한 편의의 경우 모든 월에서 1.1 K 미만의 온난 편의가 나타나고 있으며 RMSE의 경우 전체 기간 모든 위성에 대해 평균하였을 때 2.235 K으로 알고리즘 목표 정확도인 2.5 K보다 작게 나타나고 있다.

전체 평균하였을 때 편의와 RMSE는 목표 정확도를 충족하였지만 각 시간대별로 정확도를 분석하였을 때 일부 시간대에서 편의와 RMSE가 목표 정확도 이상으로 크게 나타나고 있다. GK2A 지표면온도, MODIS 지표면온도, 그리고 두 지표면온도의 차이에 대한 공간분포와 산점도를 Figs. 3.7 ~ 3.9에 나타내었다.

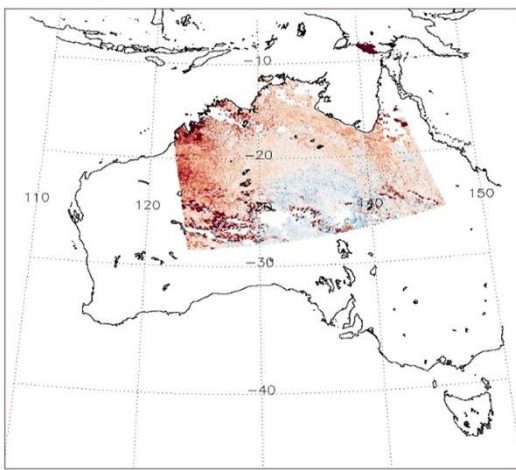
(a) GK2A LST (July 26, 2019, 1340 UTC)



(b) MODIS LST (July 26, 2019, 1345 UTC)



(c) Diff. (GK2A-MODIS) LST



(d) Scatterplot between GK2A & MODIS LST

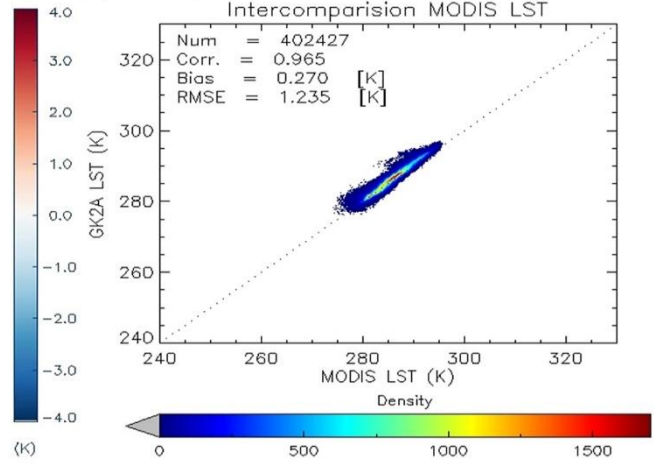
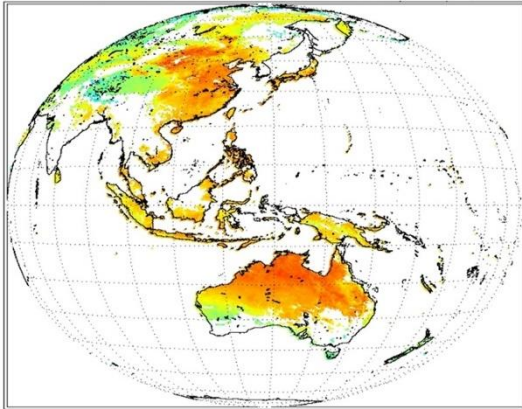


Figure 3.7는 2019년 7월 26일 1340 UTC에 대해 GK2A 지표면온도와 MODIS 지표면온도의 공간분포 그리고 두 LST의 차이와 산점도를 나타낸 것이다. 해당 시간대의

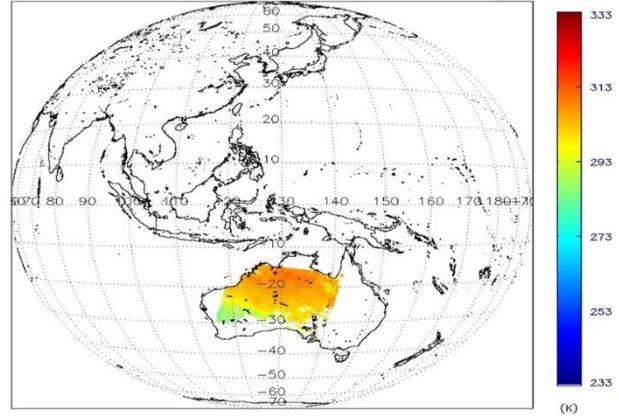
Fig. 3.7. (a) Spatial distribution of GK2A LST (top left), (b) MODIS LST (top right), (c) their differences (bottom left) and (d) scatter plot (bottom right) for the selected day (July 26, 2019, 1340 UTC).

검증 영역은 호주 중북부 지역으로 지표면온도가 275 K에서 300 K까지 나타난 사례이다. 해당 시간대의 경우 GK2A LST의 편의가 0.27 K이고 RMSE가 1.325 K로 1:1 선을 중심으로 밀집하여 MODIS 지표면온도와 비슷하게 산출되었음을 알 수 있다.

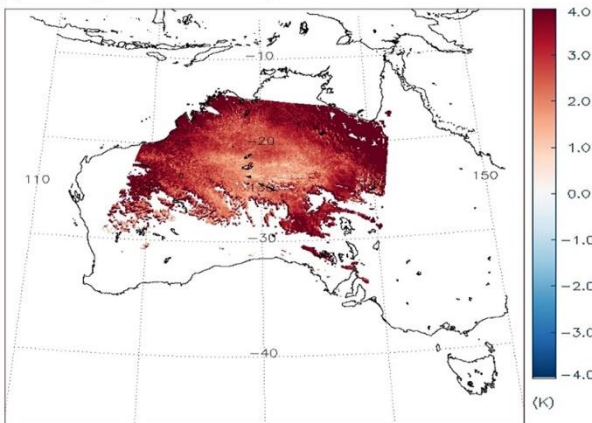
(a) GK2A LST (July 26, 2019, 0130 UTC)



(b) MODIS LST (July 26, 2019, 0135 UTC)



(c) Diff. (GK2A-MODIS) LST



(d) Scatterplot between GK2A & MODIS LST

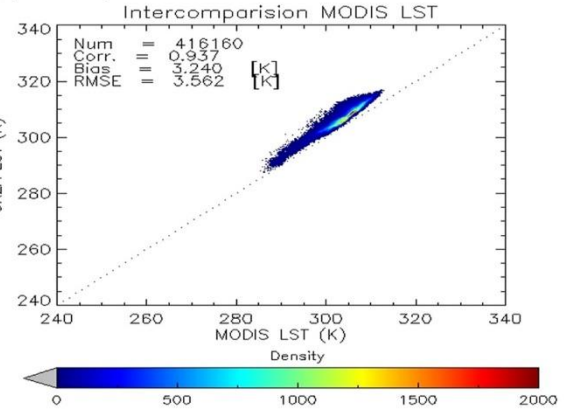


Fig. 3.8. Same as Fig. 3.7 except for the selected day (July 26, 2019, 0130 UTC).

Fig. 3.8은 2019년 7월 26일 0130 UTC에 대해 두 지표면온도의 공간분포와 산점도를 나타낸 것이다. 검증이 실시된 지역은 호주의 중부 지역으로 사막 및 나대지로 구성되어 있다. 해당 검증 사례의 경우 LST가 높게 나타나는 낮 시간대이고 비교지역이 사막 및 나대지라 LST의 일 변동이 40 K 이상 나타날 수 있는 지역이다. 즉, GK2A 관측 시간과 MODIS 관측 시간에 5분의 차이만 발생하여도 적지 않은 LST의 차이가 발생할 수 있다. 시공간 일치된 화소들에서는 LST가 285 K부터 320 K로 높게 나타났으며 상관계수는 0.937, 편의가 3.24 K, RMSE가 3.562 K로 목표 정확도보다 큰 값이 나타났다. 대부분의 GK2A LST가 1:1선 보다 위쪽으로 치우친 것에 의해 큰 온난편의 (+3.24K)가 나타난 것으로 판단된다.

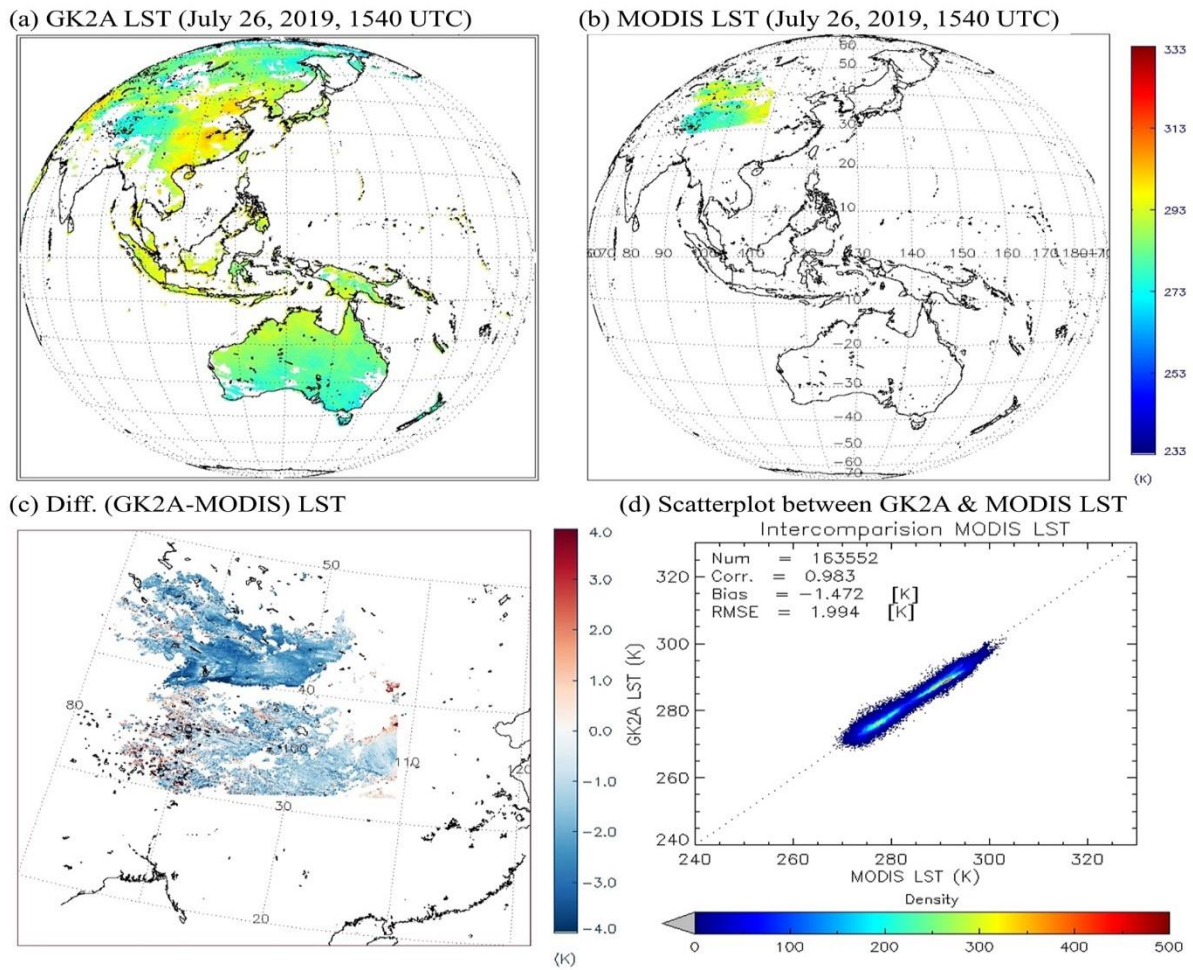


Fig. 3.9. Same as Fig. 3.7 except for the selected day (July 26, 2019, 1540 UTC).

Fig. 3.9는 2019년 7월 26일 1540 UTC에 대한 두 지표면온도의 공간분포와 산점도를 나타낸 것이다. 해당 시간대의 검증영역은 중국 중북부의 산악 및 사막지역이 혼재된 지역으로 전체적으로 MODIS 지표면온도보다 과소 추정하는 경향이 나타나고 있다. 두 지표면온도의 산점도에서도 270 K부터 300 K에 이르기까지 대부분의 화소가 1:1선을 기준으로 약간 아래에 위치하고 있다. 검증 결과 상관계수는 0.983, 편의는 -1.472 K 그리고 RMSE는 1.994 K를 보이고 있다.

산출된 GK2A 지표면온도의 정량적인 검증을 위해 Himawari-8 지표면온도와 동일하게 BSRN Tateno 지점의 상향 장파 복사량을 검증자료로 사용하였다. 검증에 사용된 기간은 2019년 7월 22일부터 31일까지이며 검증 결과를 Fig 3.10에 나타내었다.

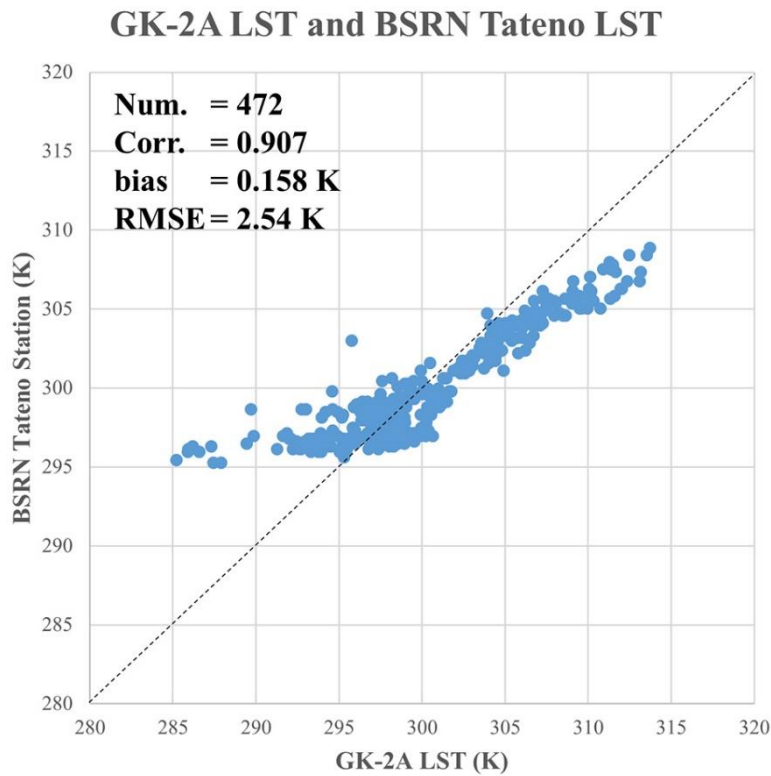


Fig. 3.10. Scatter plot of LST between GK2A and Tateno station from upward longwave radiation.

472개의 시간대에 대해 상관계수 0.907, 편의 0.158 K, RMSE는 2.54 K의 정확도를 보이고 있다. GK2A LST가 저온 구간(285~300 K)에서는 현장 관측 LST보다 과소 추정하고 있는 반면 300 K 이상에서는 전반적으로 과대 추정하고 있다. GK2A LST의 이러한 문제점은 검증을 수행한 기간이 GK2A 현업 운영이 막 시작된 10여일로 검증에 사용된 시간대가 한정된 것과 관련된 것으로 보인다. 따라서 본 연구에서는 앞으로도 다양한 사례에 대해 지속적인 검증과 분석을 통해 GK2A LST 산출 알고리즘의 산출수준을 평가하고 개선할 것이다. 또한 현장 관측 자료를 이용한 검증을 실시할 때는 현장 관측 자료가 관측소에서 가장 가까운 위성 화소를 대표할 수 있는지에 대한 공간대표성의 한계와 GK2A의 기하학적 보정 에러(Navigation error) 등이 오차를 발생시킬 수 있으므로 이러한 점들을 고려해야 한다.

4. 현업운영 시 고려사항

4.1 수치계산 고려사항

지표면온도 산출 알고리즘은 일차적으로 구름탐지 및 지표면 방출율의 산출이 이루어진 후에 지표면온도 산출이 시작되도록 설계되었다. 이 알고리즘은 계산식이 단순하기 때문에 수치 계산 시 특별히 고려할 사항은 없다.

4.2 프로그래밍 및 절차상의 고려사항

지표면온도 산출 알고리즘은 지표면으로 구분된 화소 중 청천인 화소에 대해서만 계산된다. 따라서 지표면온도 알고리즘은 구름 마스킹 과정이 끝난 이후에 수행될 것이다.

4.3 품질 평가 및 진단

지표면온도 산출 알고리즘의 성능은 기온 자료를 포함한 기상청의 지상 관측 자료와 잘 검정된 타 위성 자료(MODIS LST)를 이용하여 정기적으로 품질이 평가되어야 한다. 지표면온도의 통계적 평가 측도로는 편의(bias)와 평균 제곱근 오차(RMSE)를 이용할 것이다.

4.4 예외사항 처리

지표면온도 산출 알고리즘이 실행되기 전에 모든 채널과 보조 자료에 대하여 자료 및 품질자료가 존재하는지 알고리즘 수행 전에 확인되어야 한다. 지표면온도 산출 알고리즘은 각 화소에 대해 누락되거나 잘못된 품질의 채널 및 보조 자료를 flag 에 표시한다.

4.5 검증 알고리즘

지표면온도 산출 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 GK2A 관측 영역 내 가용 가능한 현장 관측 자료(BSRN, 보성 글로벌 표준 기상 관측소)와 잘 검정된 위성자료(MODIS LST)를 이용한 검증 알고리즘 이용하여 평가할 것이다.

5. 가정 및 제한

5.1 성능

지표면온도 산출 수준은 구름 마스킹 자료와 대기 및 지표면 정보(e.g. 지표면 방출율, 육지/바다 구분 자료, 지면 피복 자료)에 영향을 받는다. 또한 두 분리대기 창 채널의 복사 정확도와 네비게이션 정확도도 지표면온도 산출 수준에 영향을 미친다. 성능에 영향을 미치는 요인 중에서 구름 마스킹 자료와 방출율 자료는 지표면온도의 정확한 추정을 위해 가장 중요한 요소이다.

또한 지표면온도 산출에 사용되는 선행 자료인 지표면 방출율은 토양 수분에 큰 영향을 받는다. 하지만 GK2A의 관측영역에 대해 관측주기 및 공간해상도를 만족하는 토양 수분 자료가 전무한 실정으로 토양수분에 대한 고려를 하지 못하는 한계가 존재한다.

지표면온도 산출 알고리즘 버전 0441으로 산출된 지표면온도를 1년 간 MODIS 지표면온도를 이용하여 정확도를 평가하였을 때 상관계수는 0.94, 편의는 1.38 K, 그리고 RMSE는 2.42 K를 보였다. 전반적으로 산출된 두 지표면온도는 주간보다 야간에 더 유사한 공간분포를 보였다. 또한 주간과 야간을 모두 합친 결과에서는 겨울철(12, 1, 2월)의 월간 편의와 RMSE가 다른 계절보다 조금 더 크게 나타났다. 또한 SeeBor 프로파일을 이용하여 새로 개발한 지표면온도 알고리즘 버전 0541으로 산출된 4개월의 지표면온도를 MODIS 지표면온도와 비교분석한 결과 상관계수는 0.92, 편의는 0.2 K, RMSE는 1.78 K로 나타났다. 이전 버전과 비교할 때, 상관계수는 약간 감소하였으나 편의와 RMSE가 모두 감소되어 알고리즘 성능이 개선되었음을 확인할 수 있었다.

5.2 예상 센서 성능

지표면 온도 산출 알고리즘은 기본적으로 AMI의 성능이 계획했던 조건을 충족할 것이라고 가정한다. 하지만 지표면온도는 구름 마스크, 안개탐지, 에어로졸 탐지 자료들과 같은 여러 산출물에 영향을 받을 것이다. 따라서 이러한 알고리즘의 성능을 저하시키는 모든 문제들은 지표면온도 산출 알고리즘에도 영향을 미칠 것으로 판단된다.

5.3 개선을 위한 사전 계획

지표면온도 산출 수준 향상을 위해 GK2A/AMI 자료로부터 산출되는 최근의 식생지수(Normalized Difference Vegetation Index) 자료를 이용하여 다양한 유형의 지표면 정보(e.g. 지면 피복, 식생 비율, 지표면 방출율)를 도출하여 산출 알고리즘의 성능을 개선할 예정이다. 또한 GK2A/AMI의 현업 운영 전까지 지표면온도 산출계수의 미세 조정과 알고리즘 초기 성능 진단을 통해 알고리즘 최적화를 진행할 예정이다.

6. 참고문헌

- 국가기상위성센터, 2015, 영상 장면분석/표면분야 알고리즘 개발 (1) 연차보고서
- 국가기상위성센터, 2016, 영상 장면분석/표면분야 알고리즘 개발 (2) 연차보고서
- 국가기상위성센터, 2017, 영상 장면분석/표면분야 알고리즘 개발 (3) 연차보고서
- 국가기상위성센터, 2017, 영상 장면분석/표면분야 알고리즘 개발 (4) 연차보고서
- 국가기상위성센터, 2018, 영상 장면분석/표면분야 알고리즘 개발 (5) 연차보고서
- 국가기상위성센터, 2019, 영상 장면분석/표면분야 알고리즘 개발 (6) 연차보고서
- Becker, F., and Z. L. Li, 1990: Temperature-Independent Spectral Indices in Thermal Infrared Bands. *Remote Sensing of Environment*, **32(1)**, 17-33.
- Berk, A., G.P. Anderson, P.K. Acharya, J.H. Chetwynd, L.S. Bernstein, E. P. Shettle, M.W. Matthew, and S. M. Adler-Golden, 1999: MODTRAN 4 users' manual, report. *Air Force Research Laboratory Space Vehicles Directorate*, Hascom AFB, Mass.
- Borbás, E. E., Suzanne Wetzel Seemann, Hung-Lung Huang, Jun Li, and W. Paul Menzel, 2005: Global profile training database for satellite regression retrievals with estimates of skin temperature and emissivity. *Proceedings of the XIV. International ATOVS Study Conference, Beijing, China, University of Wisconsin-Madison, Space Science and Engineering Center, Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies (CIMSS), Madison, WI, 2005*, 763-770.
- Cho, A. R., and M. S. Suh, 2013b: Evaluation of Land Surface Temperature Operationally Retrieved from Korean Geostationary Satellite (COMS) Data. *Remote Sensing*, **5(8)**, 3951-3970.
- Choi, Y. Y., and M. S. Suh, 2016: Improvement of COMS land surface temperature retrieval algorithm by considering diurnal variation of air temperature, *Korean Journal of Remote Sensing*, **32(5)**, 435-452(in Korean with English abstract).
- Choi, Y. Y., and M. S. Suh, 2018: Development of Himawari-8/Advanced Himawari Imager (AHI) land surface temperature retrieval algorithm, *Remote Sensing*, **10(12)**, 2013.

- Hook, S. J., A. R. Gabell, A. A. Green, and P. S. Kealy, 1992: A comparison of techniques for extracting emissivity information from thermal infrared data for geological studies. *Remote Sensing of Environment*, **42**, 123-135.
- Ijima, O. 2016: Basic and other measurements of radiation at station Tateno (2016-08). Aerological Observatory, Japan Meteorological Agency, PANGAEA, <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.867410> (accessed on 15 October 2019).
- Ijima, O. 2019: Basic and other measurements of radiation at station Tateno (2019-07). Aerological Observatory, Japan Meteorological Agency, PANGAEA, <https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.906163> (DOI registration in progress, accessed on 15 October 15, 2019).
- Lee, B. I., S. R. Chung, and S. Baek, 2016: Development of cloud detection algorithm for GK2A/AMI. *The 7th Asia-Oceania/2nd AMS-Asia/2nd KMA Meteorological Satellite User's Conference, Songdo City, Republic of Korea, October 24-27, 2016*.
- Li, Z. L., F. Becker, M. P. Stoll, and Z. Wan, 1999: Evaluating six methods for extracting relative emissivity spectra from thermal infrared images. *Remote Sensing of Environment*, **69**, 197-214.
- Li, Z. L., B. H. Tang, H. Wu, H. Ren, G. Yan, Z. Wan, I. F. Trigo, and J. A. Sobrino, 2013: Satellite derived land surface temperature: Current status and perspectives. *Remote Sensing of Environment*, **131**, 14-37.
- McMillin, L. M., 1975: Estimation of sea surface temperature from two infrared window measurements with different absorption. *Journal of Geophysical Research*, **80(36)**, 5113-5117.
- NASA LP DAAC, 2013, MOD11_L2: MODIS/Terra Land Surface Temperature and Emissivity 5-Minute L2 Swath 1 km V006. *USGS Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota (<https://lpdaac.usgs.gov>)*, accessed January 15, 2018, at http://dx.doi.org/10.5067/MODIS/MOD11_L2.006.
- NASA LP DAAC, 2013, MYD11_L2: MODIS/Aqua Land Surface Temperature and Emissivity 5-Minute L2 Swath 1 km V006. *USGS Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota (<https://lpdaac.usgs.gov>)*, accessed January 15, 2018, at http://dx.doi.org/10.5067/MODIS/MYD11_L2.006.
- NMSC, 2018: GEO-KOMPSAT 2A Cloud Mask Algorithm Theoretical Basis Document
- NMSC, 2018: GEO-KOMPSAT 2A Land Surface Emissivity Algorithm Theoretical Basis Document
- Sobrino, J., J. Jiménez-Muñoz, C. Brockmann, A. Ruescas, O. Danne, P. North, ... and Z.

- Mitraka, 2013: Land surface temperature retrieval from Sentinel 2 and 3 Missions. In *Proceedings of the Sentinel-3 OLCI/SLSTR and MERIS/(A) ATSR Workshop 15–19 October 2012 Frascati, Italy*.
- Tang, B. H., K. Shao, Z. L. Li, H. Wu, F. Nerry, and G. Zhou, 2015: Estimation and validation of land surface temperatures from Chinese second-generation polar-orbit FY-3A VIRR data. *Remote Sensing*, **7(3)**, 3250-3273.
- Wan, Z., and J. Dozier, 1996: A Generalized Split-Window Algorithm for Retrieving Land-Surface Temperature Measurement from Space. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **34(4)**, 892-905.
- Wan, Z. 1999: MODIS land-surface temperature algorithm theoretical basis document (LST ATBD). *Institute for Computational Earth System Science, Santa Barbara*, 75.
- Xu, H., Y. Yu, D. Tarpley, F. M. Göttsche, and F. S. Olesen, 2014: Evaluation of GOES-R land surface temperature algorithm using SEVIRI satellite retrievals with in situ measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **52(7)**, 3812-3822.
- Yamamoto, Y., H. Ishikawa; Y. Oku, and Z. Hu, 2018: An algorithm for land surface temperature retrieval using three thermal infrared bands of Himawari-8. *Journal of the Meteorological Society of Japan, Ser. II*.
- Yu, Y., J. L. Privette, and A. C. Pinheiro, 2005: Analysis of the NPOESS VIIRS land surface temperature algorithm using MODIS data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **43(10)**, 2340-2350.
- Yu, Y., D. Tarpley, J. L. Privette, M. D. Goldberg, M. R. V. Raja, K. Y. Vinnikov, and H. Xu, 2009: Developing algorithm for operational GOES-R land surface temperature product. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **47(3)**, 936-951.