

Research Article

한반도 주변해역 대기환경에 대한 싱글채널 온도추정 알고리즘의 불확도 추정

이종혁¹⁾ · 강경웅¹⁾ · 백승일²⁾ · 김원국^{3)*}

Uncertainty Estimation of Single-Channel Temperature Estimation Algorithm for Atmospheric Conditions in the Seas around the Korean Peninsula

Jong Hyuk Lee¹⁾ · Kyung Woong Kang¹⁾ · Seungil Baek²⁾ · Wonkook Kim^{3)*}

Abstract: Temperature of the Earth's surface is a crucial physical variable in understanding weather and atmospheric dynamics and in coping with extreme heat events that have a great impact on living organisms including humans. Thermal sensors on satellites have been a useful means for acquiring surface temperature information for wide areas on the globe, and thus characterization of its estimation uncertainty is of central importance for the utilization of the data. Among various factors that affect the estimation, the uncertainty caused by the algorithm itself has not been tested for the atmospheric environment of Korean vicinity. This study derives the uncertainty of the single-channel algorithm under the local atmospheric and oceanic conditions by using reanalysis data and buoy temperature data collected around Korea. Atmospheric profiles were retrieved from two types of reanalysis data, the fifth generation of European Centre for Medium-Range Weather Forecasts reanalysis of the global climate and weather (ERA5) and Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications-2 (MERRA-2) to investigate the effect of reanalysis data. MODerate resolution atmospheric TRANsmision (MODTRAN) was used as a radiative transfer code for simulating top of atmosphere radiance and the atmospheric correction for the temperature estimation. Water temperatures used for MODTRAN simulations and uncertainty estimation for the single-channel algorithm were obtained from marine weather buoys located in seas around the Korean Peninsula. Experiment results showed that the uncertainty of the algorithm varies by the water vapor contents in the atmosphere and is around 0.35K in the driest atmosphere and

Received June 7, 2023; Revised June 19, 2023; Accepted June 23, 2023; Published online June 30, 2023

¹⁾ 부산대학교 토목공학과 학부과정생(Undergraduate Student, Department of Civil Engineering, Pusan National University, Busan, Republic of Korea)

²⁾ 부산대학교 사회환경시스템공학과 박사과정생(PhD Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University, Busan, Republic of Korea)

³⁾ 부산대학교 사회환경시스템공학과 부교수(Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University, Busan, Republic of Korea)

* Corresponding author: Wonkook Kim (wonkook@pusan.ac.kr)

Copyright © 2023 by The Korean Society of Remote Sensing. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

0.46K in overall, regardless of the reanalysis data type. The uncertainty increased roughly in a linear manner as total precipitable water increased.

Keywords: Sea surface temperature, Thermal infrared sensors, Uncertainty, Single-channel algorithm

요약: 지구 표면에 대한 정보는 기상 및 대기 역학의 이해나 인간을 포함한 동물에 큰 영향을 미치는 극한 열 현상에 대응함에 있어서 핵심적인 지구 물리량이다. 지구 영역에 대한 온도를 추정하기 위하여 위성에 탑재된 열적외선 센서가 널리 활용되어 왔는데, 정밀한 활용을 위해서는 온도 추정 과정의 불확도에 대한 이해가 선행되어야 한다. 하지만 온도추정 불확도에 영향을 미치는 많은 요소 중에서 한반도 주변의 환경 하에서의 온도추정 알고리즘의 불확도 산정에 대한 연구는 미미하였다. 본 연구에서는 한반도 주변의 대기 및 해양 조건하에서 범용성이 높은 single-channel 알고리즘의 불확도를 추정하는 연구를 수행하였다. 알고리즘의 입력자료로 필요한 재분석자료(reanalysis)의 영향성을 평가하기 위하여 두 가지의 재분석자료, 즉 fifth generation of European Centre for Medium-Range Weather Forecasts reanalysis of the global climate and weather (ERA5)와 Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications-2 (MERRA-2)를 사용하였고, 복사전달모델은 MODerate resolution atmospheric TRANsmision (MODTRAN)을 사용하였다. MODTRAN 모의와 온도 추정 정확도 검증에 사용되는 현장 관측 수온은 한반도 인근 해역에 위치한 해양 기상 부이(buoy)로부터 획득했다. 실험 결과, 알고리즘 불확도는 대기 수증기량에 따라서 선형에 가깝게 증가하는 것을 확인하였고, 가장 건조한 조건에서는 약 0.35K 그리고 평균적으로 0.45K 가량의 불확도가 발생함을 확인하였다. 이러한 결과는 재분석자료의 종류에 상관없이 유사하게 도출되어 알고리즘이 가지는 순수한 불확도라고 추정할 수 있었다.

주요어: 수표면 온도, 열적외선 센서, 불확도, Single-channel 알고리즘

1. 서론

수표면 온도는 지구의 기상 현상과 해양 현상을 이해함에 있어서 필수적인 변수이다. 지구의 기상 현상과 해양 현상은 대기와 바다의 에너지 교환에 의해서 주로 발생하며, 수표면에서 이루어지는 에너지 교환에 대한 이해는 다양한 기후 및 환경 변화에 관한 연구를 가능하게 한다(von Schuckmann et al., 2016). 위성은 광범위한 지역에 대해서 연속적인 관측이 가능하기 때문에, 위성으로 획득한 수표면 온도는 기후 및 환경 변화에 관한 연구뿐만 아니라 다양한 분야에서 중요한 자료이다. 위성을 이용한 수온 추정에는 long wave infrared (LWIR) 대역에 해당하는 9.5-13 μm 대역과 mid wave infrared (MWIR) 대역에 해당하는 3.5-4.1 μm 대역이 사용된다(Minnett et al., 2019). 일반적인 해수의 수온에서 플랑크 함수의 정점은 10 μm 인근에서 형성되기 때문에, 9.5-13 μm 대역은 타 대역보다 상대적으로 강한 신호량을 획득한다는 장점이 있다. 3.5-4.1 μm 대역에서 측정된 신호량은 9.5-13 μm 대역에서 측정된 신호량보다 작지만 온도 변화에 민감하다는 장점이 있다.

지난 수십여 년간 LWIR과 MWIR 대역을 이용한 여러 가지 수온 추정 알고리즘들이 개발되었다(Li et al., 2013). 대표적인 수온 추정 알고리즘에는 단일 열적외선 대역을 활용한 single-channel 알고리즘과 다중 열적외선 대역을 활용한 split-window 알고리즘이 있다(Li et al., 2013). 다중 열적외선 대역을 보유한 위성들은 일반적으로 높은 수온추정 정확도와 빠른 연산력을 가지는 split-window 알고리즘을 표준 수온 추정 알고리즘으로 채택한다. 하지만 단일 대역을 사용한 수온 추정이 이루어져야 하는 경우도 존재한다. 10 m 이하의 공간 해상도를 가지는 초고해상도 열적외선 위성처럼 다중 열적외선 대역을 탑재하는 데 어려움이 있거나, Landsat 8 thermal infrared sensors (TIRS)와 같이 2개의 열적외선 밴드 중 하나를 사용하지 못할 때는, single-channel 알고리즘을 사용한 수온 추정이 수행되어야 한다.

Single-channel 알고리즘은 이론적으로는 정확한 수표면 온도를 제공하지만, 알고리즘의 수온 추정 정확도는 대기 프로파일의 부정확도에 영향을 받는다. 예를 들어, single-channel 알고리즘은 대기 수증기량이 증가함에 따라 온도추정 정확도가 급격하게 떨어지는 현상

을 보인다(Li et al., 2013). 수증기 외에도 대기환경의 수직농도 분포(온도, 오존, 미세기체 등)의 유형을 일컫는 대기 프로파일에 따라서 온도추정 알고리즘의 불확도가 다르게 나타난다. Single-channel 알고리즘을 통해 수표면 온도를 추정하기 위해서는 3가지 대기 매개변수(투과도, 상향 복사휘도, 하향 복사휘도)에 대한 계산이 필요한데, 대기 매개변수는 해당 시각 및 장소에서의 태양광 정보(방향, 복사량)와 대기프로파일에 의하여 결정되기 때문이다. 하지만 대기영향 평가가 중요함에도 불구하고 우리나라 주변 해역에서의 single-channel 알고리즘의 성능 평가가 많이 이루어지지 않았다. Single-channel 알고리즘에 영향을 미치는 주요 대기 변수는 수증기, 오존, 기온 등이 있는데, 이 변수들을 바탕으로 3가지 대기 매개변수를 통해 대기보정이 이루어지기 때문이다. 특정 시간, 특정 장소에서의 수증기, 오존, 기온 등에 대한 대기프로파일을 획득하는 방법은 직접관측, 수치모델 활용 등 여러가지 방법이 있지만 위성센서 검보정에서는 주로 전 지구에 대해 고도별로 과거자료가 생산되어 있는 재분석자료(reanalysis)를 사용하는 것이 일반적이다.

주로 사용되는 재분석자료로는 National Centers for Environmental Prediction, fifth generation of European Centre for Medium-Range Weather Forecasts reanalysis of the global climate and weather (ERA5), Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications-2 (MERRA-2)와 같은 자료로 모두 전 지구 영역에 대하여 일정 시간간격(1~6시간마다)과 고도별(37~42개 층) 수증기, 오존, 기온에 대한 자료를 제공한다는 점은 같지만 연계되어 있는 수치모델의 종류가 다르고 공간해상도, 시간해상도 등에 있어서 조금씩 차이를 가지고 있다. 특히, 국소적인 지역 수준에서 자료의 정확도가 상이할 수 있기 때문에 복수의 재분석자료 유형의 차이가 온도추정에 미치는 영향에 대한 연구가 필요하다. 하지만 이러한 재분석자료의 유형과 한반도 주변의 국지적인 대기프로파일 특성에 국한하여 온도추정 불확도를 분석한 연구는 아직 수행되지 못하였다.

본 연구에서는 MERRA-2와 ERA5의 두 가지 재분석 자료를 이용하여 한반도 주변 해역에서의 이론적인 수온 추정 불확도를 계산한다. 이론적인 수온 추정 불확도라 함은 실제 위성자료를 이용한 온도 추정이 아니라,

복사전달모의를 통하여 생산된 대기상단 복사휘도(top of atmosphere [TOA] radiance)에 온도추정 알고리즘을 적용하여 추정한 불확도를 일컫는다. 이는 실제 위성영상을 사용할 경우 해당 시각, 장소에서의 정확한 대기 프로파일을 알 수 없어 대기프로파일의 영향을 정확히 추산할 수 없기 때문에, 실제 한반도 주변 해양 부이(buoy)에서 관측된 수표면 온도자료와 대기프로파일 자료를 사용하여 재분석자료 자체가 가지는 불확도를 제외한 알고리즘 자체의 불확도를 추정하기 위함이다. 대상 밴드는 온도추정에 가장 많이 사용되는 LWIR 대역(9.5-13 μm)을 대상으로 하였고, 실질적인 위성 추정 사례를 재현하기 위하여 Landsat 8 위성의 LWIR 대역 중 미광에 의한 영상 품질 저하의 문제가 발생하지 않은 Band 10 (10.6-11.19 μm)의 분광반응 함수를 사용하였다(National Aeronautics and Space Administration, 2023). 한반도 주변의 338개 부이 자료에서 산출된 온도자료를 2022년 1월~2022년 12월 기간에 대하여 수집했고, 각 수온 자료의 시각 및 장소에 해당하는 대기프로파일을 재분석자료로부터 획득하여 MODerate resolution atmospheric TRANsmision (MODTRAN)을 통해 대기상단 복사휘도를 모의하였다. 모의된 복사휘도 자료에 single-channel 알고리즘을 적용하여 산출된 수표면 온도 추정값을 부이의 관측값과 비교하여 전체적인 온도 추정 과정의 불확도를 산출하였다.

2. 연구 방법

지구 표면으로부터 방사되는 에너지는 대기 중의 매질과 상호작용하면서 센서까지 도달하며, 방사 에너지의 전파 과정은 식(1)의 형태로 표현할 수 있다. L_{obs} 는 대기상단 복사휘도, L_d 는 하향 복사휘도, L_u 는 상향 복사휘도, L_T 는 표면의 흑체복사량, τ 는 대기 투과도, ϵ 는 표면의 방사율을 의미한다.

$$L_{obs} = (L_T \cdot \epsilon + (1 - \epsilon) \cdot L_d) \cdot \tau + L_u \quad (1)$$

2.1. 대기상단 복사휘도 모의

MODTRAN을 이용한 대기상단 복사휘도 모의를 위해서는 표면 온도와 표면 방사율, 대기프로파일 설정이 필요하다. 본 연구에서는 한반도 인근 해역의 기상 부이

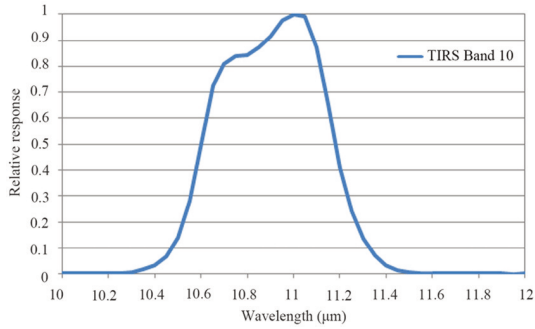


Fig. 1. The spectral response function of Band 10 of Landsat 8 (Wang et al., 2015).

에서 획득한 실제 수온 자료를 표면 온도로 사용했고, 표면 방사율은 Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) spectral library에 있는 해수의 방사율을 사용하였다. 모의에 필요한 대기프로파일의 설정을 위해서는 MERRA-2와 ERA5로부터 획득한 대기 변수(상대습도, 지오폠펌셜[geopotential] 고도, 대기 온도, 기압)를 사용하였다. 일반적으로 분광 반응 함수 간격의 0.05~0.5배에 해당하는 간격으로 MODTRAN 모의를 수행하며, 간격이 좁을수록 모의 정확성이 향상된다. Landsat 8 Band 10의 분광 반응 함수 범위에 해당하는 파장대에 대하여 분광 반응 함수 간격의 0.05배인 2.5 nm 간격으로 모의한 후, 분광 반응 함수에 따른 가중평균을 수행하여 Band 10에 대한 대기상단 복사휘도를 산출하였다(Fig. 1).

2.2. 온도 추정

Single-channel Landsat surface temperature 알고리즘은 MODTRAN으로 모의한 3가지 대기 매개변수, 위성 관측 대기상단 복사휘도, 표면의 방사율을 복사 전달 방정식에 대입해서 표면의 흑체 복사량을 계산하는 이론을 기반으로 설계되었다(Cook, 2014). 복사 전달 방정식의 풀이를 통해서 구해진 표면의 흑체 복사량은 플랑크 법칙을 통해서 표면 온도로 변환된다.

$$L_{obs} = L_T \cdot \tau + L_u \quad (2)$$

$$L_d = \frac{L_{obs} - L_u - L_T c}{1 - c} \quad (3)$$

표면의 방사율이 1일때 복사 전달 방정식은 식(2)의 형태로 간략하게 표현된다. 복사 전달 방정식에서 하향

복사휘도 L_d 를 좌변으로 이항하고 나머지 변수들을 우변으로 이항하면 복사전달방정식은 식(3)의 형태로 정리 된다.

2.2.1. 대기 투과도, 상향 복사휘도 산출

273K, 310K의 흑체를 표면 조건으로 설정해서 모의한 대기 상단 복사휘도 L_{obs} 와 273K, 310K의 흑체 복사량 L_T 를 각각 식(2)에 대입한다. 대기 투과도 τ 와 상향 복사휘도 L_u 는 273K, 310K의 표면 조건에서 구해진 연립 방정식의 풀이를 통해서 계산된다.

2.2.2. 하향 복사휘도 산출

표면의 방사율을 0.9, 표면의 온도를 대기 최하단 온도와 동일하게 설정해서 MODTRAN으로 대기상단 복사휘도 L_{obs} 를 모의한다. 대기 투과도 τ , 상향 복사휘도 L_u , 대기상단 복사휘도 L_{obs} , 대기 최하단 온도의 흑체 복사량 L_T , $c=0.9$ 를 식(3)에 대입해서 하향 복사휘도 L_d 를 계산한다.

3. 연구자료

3.1. 재분석자료

본 연구에서는 MERRA-2와 ERA5의 두 가지 재분석 자료에서 상대습도, 대기온도, 대기고도, 기압의 대기 변수를 획득하여 MODTRAN의 입력자료로 사용하였다. 부이가 관측한 시간에 대응하는 대기 자료를 얻기 위해 각 재분석자료가 제공하는 인접한 두 시간대의 자료를 선형 보간하였다. MERRA-2는 Goddard Earth Observing System-5 (GEOS-5)를 기반으로 생성된 NASA Global Modeling and Assimilation Office (GMAO)의 재분석자료로, $0.5^\circ \times 0.625^\circ$ 의 공간해상도와 3시간의 시간해상도를 가진다(Global Modeling and Assimilation Office, 2015). 자료 제공 지연시간(latency)은 약 1달이다.

ERA5는 Integrated Forecast System (IFS)을 기반으로 생성된 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)의 재분석자료로, $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 의 공간해상도와 1시간의 시간해상도를 가진다(Copernicus Climate Change Service, 2017). 자료 제공 지연시간은 약 1주이다. 두 종류의 재분석자료에 대한 요약을 Table 1에 제공하였다.

Table 1. Information of reanalysis data used in the simulation

Reanalysis data	MERRA-2	ERA5
Temporal resolution	3 hour	1 hour
Spatial resolution	0.5° × 0.625°	0.25° × 0.25°
Numerical weather prediction model	GEOS-5	IFS
Provider	NASA GMAO	ECMWF
Latency	About 1 month	About 1 week

3.2. 현장 수온 자료

본 연구에서는 대한민국 기상청이 운영하는 한반도 인근 28개의 해양 기상 부이 중 National Data Buoy Center (NDBC)와 연동되어 있는 부이(ID: 22101, 22102, 22103, 22104, 22105, 22106, 22107, 22108)로부터 현장 수온 자

Table 2. Buoy ID and location of the NDBC buoy used in the simulation

Buoy number	Latitude	Longitude
22101	37°14'10"N	126°01'08"E
22102	34°47'36"N	125°46'37"E
22103	34°00'05"N	127°30'05"E
22104	34°46'00"N	128°54'00"E
22105	37°28'50"N	129°57'00"E
22106	36°21'00"N	129°47'00"E
22107	33°05'00"N	126°02'00"E
22108	36°15'00"N	125°45'00"E

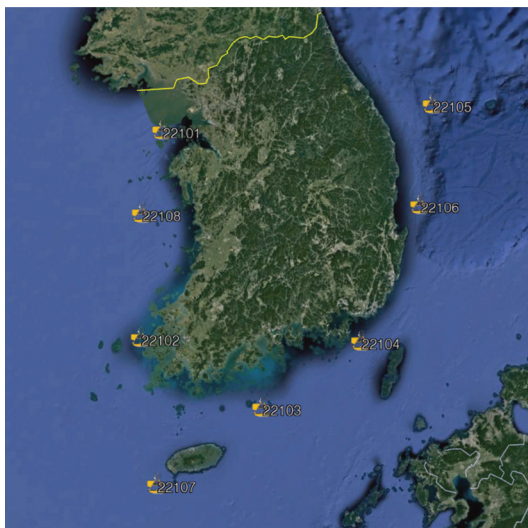


Fig. 2. Location of marine weather buoys used to obtain water temperature data.

료를 획득하였다(Table 2). Fig. 2는 수온 자료 획득에 사용한 해양 기상 부이의 위치를 나타낸 지도이다. 모의에 사용된 자료는 2022년 1~12월 기간의 자료 중에서 월별로 약 30개씩 총 338개를 추출하였다. 추출된 수온 자료의 최저 수온과 최고 수온은 각각 275.95K, 303.15K이다.

4. 연구결과

본 연구에서는 각 재분석자료를 이용해 얻은 MODTRAN 모의값 간의 차이를 비교하기 위해, MODTRAN 모의값 MERRA-2에서 ERA5를 뺀 차이를 계산하였다. 모의 결과의 차이는 다음과 같다. (a) 대기 상단 복사휘도 차이의 평균 0.0686 W/m²/μm/sr, 표준편차 0.1767 W/m²/μm/sr, (b) 상향 복사휘도 차이의 평균 -1.3146 W/

Table 3. Mean and standard deviation of the difference in MODTRAN simulated values

MODTRAN simulation value	Mean	Standard deviation
(a) TOA radiance (W/m ² /μm/sr)	0.0686	0.1767
(b) Upwelled radiance (W/m ² /μm/sr)	-1.3146	1.6254
(c) Downwelled radiance (W/m ² /μm/sr)	-1.7782	2.1208
(d) Transmittance	0.1560	0.1897

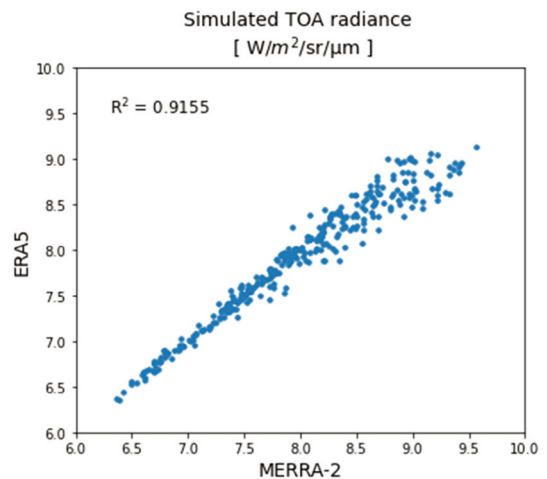


Fig. 3. Scatter plot of simulated TOA radiance with MERRA-2 and ERA5.

$m^2/\mu m/sr$, 표준편차 $1.6254 W/m^2/\mu m/sr$, (c) 하향 복사휘도 차이의 평균 $-1.7782 W/m^2/\mu m/sr$, 표준편차 $2.1208 W/m^2/\mu m/sr$, (d) 대기 투과도 차이의 평균 0.1560 , 표준편차 0.1897 로 나타났다(Table 3). Fig. 3은 MERRA-2와 ERA5를 이용해서 모의한 대기 상단 복사휘도의 산점도이며, 두 재분석자료를 이용해서 모의한 대기 상단 복사휘도 간의 결정계수(R^2)는 약 0.9155 이다.

대기 중 수증기량에 따른 온도 추정 성능을 비교하기 위해서 수증기량에 따라 6개의 구간으로 나누어 온도 추정 정확도를 산출한 결과, 두 재분석자료 모두 수증기량이 증가함에 따라서 온도 추정 정확도가 감소하는 경향을 보였다. 추정 불확도는 $0 g/cm^2$ 이상, $1 g/cm^2$ 미만의 수증기량(w) 구간에서 root mean square error (RMSE) $0.3691K$ (MERRA-2), $0.3688K$ (ERA5)이고, 수증기량이 $5 g/cm^2$ 이상일 때는 RMSE $0.5077K$ (MERRA-2), $0.5023K$ (ERA5)이다. 전체 수증기량 구간에 대한 RMSE는 $0.4186K$ (MERRA-2), $0.4163K$ (ERA5)로 나타났다. 두 재분석자료 모두 전체 수증기량 구간에 대하여 약 $0.42K$ 의 Bias와 약 $0.07K$ 의 표준편차를 보였으며, 표준편차는 Bias에 비해서 상대적으로 낮은 수치를 나타냈다. 보다 자세한 수증기량 별 온도추정 성능은 Table 4에 요약되어 있다.

Table 4. Comparison of temperature estimation accuracy based on water vapor and reanalysis data

Reanalysis data	Water vapor (g/cm^2)	Bias (K)	Standard deviation (K)	RMSE (K)
MERRA-2	All	0.4240	0.0675	0.4186
	$0 \leq w < 1$	0.3656	0.0504	0.3691
	$1 \leq w < 2$	0.4266	0.0513	0.4296
	$2 \leq w < 3$	0.4181	0.0557	0.4218
	$3 \leq w < 4$	0.4632	0.0332	0.4644
	$4 \leq w < 5$	0.4911	0.0321	0.4922
ERA5	$5 \leq w$	0.5069	0.0286	0.5077
	All	0.4215	0.0661	0.4163
	$0 \leq w < 1$	0.3654	0.0502	0.3688
	$1 \leq w < 2$	0.4242	0.0511	0.4273
	$2 \leq w < 3$	0.4148	0.0555	0.4185
	$3 \leq w < 4$	0.4586	0.0333	0.4598
	$4 \leq w < 5$	0.4865	0.0325	0.4876
$5 \leq w$	0.5014	0.029	0.5023	

5. 토의 및 결론

두 종류의 재분석자료를 통해 모의한 결과를 보았을 때, 같은 시각 같은 위치에 대한 재분석자료라고 하여도 그 종류에 따라 대기상단 복사휘도나 3개 매개변수에서 상당히 큰 차이가 나타남을 볼 수 있다. 이는 주로 재분석자료에 따라 다른 수증기량에 의한 것인데, 주목할 만한 점은 재분석자료마다 대기프로파일과 그로 인한 대기 매개변수가 다름에도 불구하고 온도 추정 불확도는 유사하다는 점이다. 이는 근본적으로 각 재분석자료에 의거하여 대기상단 복사휘도를 모의했기 때문으로 대기보정에 사용되는 대기프로파일이 정확하다면 알고리즘 자체에 의한 온도추정 불확도는 $0.37-0.5K$ 가량임을 보여준다. 알고리즘에 의한 온도 추정 불확도는 수증기량이 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있었고, 이 역시 두 재분석자료에서 유사한 방식으로 나타났다.

추후 연구로는 모의에 사용된 재분석자료와 대기보정에 사용되는 재분석자료 간의 차이를 설정하여 재분석자료의 불확도에 따른 온도 추정 불확도를 추산하는 주제를 생각해 볼 수 있다. 두 재분석자료는 공히 공신력 있는 기관 및 모델을 이용하여 제작된 자료이지만, 공간해상도의 차이나 고도해상도의 차이로 국지적으로는 상당히 다른 값을 가질 수 있음이 확인되었던 만큼 우리나라 주변의 계절별, 고도별, 대기 변수별 차이에 따른 온도 추정 불확도에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다.

사사

이 논문은 2021년 정부(방위산업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(UD210026VD).

Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

References

- Cook, M. J., 2014. *Atmospheric compensation for a Landsat land surface temperature product*. Doctoral dissertation, Rochester Institute of Technology, Rochester, NY, USA. <https://scholarworks.rit.edu/theses/8513>
- Copernicus Climate Change Service, 2017. Welcome to the climate data store. Available online: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home> (accessed on June 19, 2023).
- Global Modeling and Assimilation Office, 2015. GES DISC: MERRA-2 tavg1_2d_slv_Nx: 2d,1-Hourly, Time-Averaged, Single-Level, Assimilation, Single-Level Diagnostics V5.12.4 (M2T1NXSLV). Available online: <https://doi.org/10.5067/VJAFPLIICSIV> (accessed on Apr. 1, 2023).
- Li, Z. L., Tang, B. H., Wu, H., Ren, H., Yan, G., Wan, Z. et al., 2013. Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. *Remote Sensing of Environment*, 131, 14–37. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.12.008>
- Minnett, P. J., Alvera-Azcárate, A., Chin, T. M., Corlett, G. K., Gentemann, C. L., Karagali, I. et al., 2019. Half a century of satellite remote sensing of sea-surface temperature. *Remote Sensing of Environment*, 233, 111366. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111366>
- National Aeronautics and Space Administration, 2023. Spectral response of the thermal infrared sensor. Available online: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-8/spacecraft-instruments/thermal-infrared-sensor/spectral-response-of-the-thermal-infrared-sensor/> (accessed on Apr. 1, 2023).
- von Schuckmann, K., Palmer, M. D., Trenberth, K. E., Cazenave, A., Chambers, D., Champollion, N. et al., 2016. An imperative to monitor Earth's energy imbalance. *Nature Climate Change*, 6(2), 138–144. <https://doi.org/10.1038/nclimate2876>
- Wang, F., Qin, Z., Caiying, S., Tu, L., Karnieli, A., and Zhao, S., 2015. An improved mono-window algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat 8 thermal infrared sensor data. *Remote Sensing*, 7(4), 4268–4289. <https://doi.org/10.3390/rs70404268>