

GK-2A AMI
Algorithm Theoretical Basis
Document

해수면온도
(Sea Surface Temperature)

서울대학교 박경애

Version 1.0

2019. 04. 15.



국가기상위성센터
National Meteorological Satellite Center

<수정 이력>

문서 버전	수정내용	과학코드 버전	수정일	작성자
0.1	초안 작성	0.1.0.0	2015.03.28	박경애 이은영
0.2	Hybrid 해수면온도 알고리즘 추가	0.2.0.0	2016.01.17	박경애 이은영
0.3	Proxy 자료 변경 (COMS/MI → Himawari-8/AHI) 및 Multi-band (4-band) 해수면온도 알고리즘 추가	0.3.0.0	2017.01.18	박경애 우혜진
0.4	해수면온도 품질관리 알고리즘 추가	0.4.0.0	2017.11.20	박경애 우혜진
0.5	해수면온도 품질관리 flag 추가	0.5.0.0	2018.11.20	박경애 우혜진
1.0	최종 해수면온도 산출 알고리즘 반영	1.0.0.0	2019.04.15	박경애 우혜진

<목차>

1. 개요	1
1.1 목적.....	1
1.2 사용자.....	1
1.3 내용.....	1
1.4 관련 문서.....	2
2. 알고리즘 소개	3
2.1 개요.....	3
2.2 알고리즘 흐름도.....	3
2.3 입력자료.....	4
2.3.1 L1B.....	4
2.3.2 L2.....	5
2.3.3 보조 자료.....	5
2.4 이론적 배경.....	5
2.5 수학적 설명.....	7
2.5.1 전통적 해수면온도 산출 알고리즘.....	7
2.5.2 Hybrid 해수면온도 산출 알고리즘.....	7
2.5.3 Multi-band (4-band) 해수면온도 산출 알고리즘.....	9
2.5.4 산출 해수면온도 품질 관리.....	9
2.5.4 해수면온도 합성장.....	10
2.6. 산출물.....	10
3. 모의자료 및 검증	11
3.1 모의 입력자료 및 검증자료.....	11
3.2 검증 방법.....	12
3.2.1 일치점 자료 생산 결과.....	12
3.2.2 해수면온도 산출계수 유도 결과.....	13
3.2.3 해수면온도 산출 결과.....	15
3.2.4 산출 해수면온도 검증 방법.....	15
3.3 검증 결과.....	16
4. 현업운영 시 고려사항	17
4.1 수치계산 고려사항.....	17
4.2 프로그래밍 및 절차상의 고려사항.....	17

4.3 품질 평가 및 진단.....	17
4.4 예외사항 처리.....	17
4.5 검증 알고리즘.....	17
5. 가정 및 제한.....	18
5.1 성능	18
5.2 예상 센서 성능.....	18
5.3 개선을 위한 사전 계획.....	18
6. 참고문헌.....	19

<표 목차>

표 2.1 위성 해수면온도 산출 알고리즘.....	4
표 2.2 센서 자료 입력 목록.....	4
표 2.3 L2 자료 입력 목록.....	5
표 2.4 보조 자료 입력 목록.....	5
표 2.5 산출물 목록.....	10
표 3.1 타 위성 해수면온도 산출 사용채널 비교.....	11
표 3.2 Himawari-8/AHI 모의자료로 생산한 위성관측-해양실측 일치점 자료 결과.....	13
표 3.3 낮 시간대 경험적 회귀 해수면온도 산출 계수.....	13
표 3.4 밤 시간대 경험적 회귀 해수면온도 산출 계수.....	14
표 3.5 Hybrid 해수면온도 산출 계수.....	14
표 3.6 Multi-band (4-band) 해수면온도 산출 계수.....	14
표 3.7 산출 해수면온도 검증 결과.....	16

<그림 목차>

그림 2.1. 여러 가지 해수면온도의 정의.....	6
그림 3.1. 모의 입력자료 예시.....	12
그림 3.2. 해수면온도 산출 예시.....	15
그림 3.3. 산출 해수면온도와 실측 해수면온도 비교.....	16

약어표

ABI	Advanced Baseline Imager
AHI	Advanced Himawari Imager
AMI	Advanced Meteorological Imager
ATBD	Algorithm Theoretical Base Document
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
BT	Brightness Temperature
GK-2A	Geostationary Korea Multi-Purpose Satellite - 2A
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite
GTS	Global Telecommunication System
HSST	Hybrid SST
IR	Infrared
LUT	Look Up Table
MCSST	Multi-Channel Sea Surface Temperature
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MSST	Multi-band SST
NLSST	Non-Linear Sea Surface Temperature
OSTIA	Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis
RMSE	Root Mean Squared Error
RTM	Radiative Transfer Model
SEVIRI	Spanning Enhanced Visible and Infrared Imager
SST	Sea Surface Temperature
UTC	Coordinated Universal Time
VIIRS	Visible/Infrared Imager/Radiometer Suite

1. 개요

- 본 이용자 사용설명서(Algorithm Theoretical Base Document, ATBD)에서는 GeoKOMPSAT-2A (GK-2A) 위성의 Advanced Meteorological Imager (AMI) 센서 자료로부터 해수면온도를 산출하기까지의 전 과정을 간략하게 설명함.
- 1절에서는 ATBD의 목적, 사용자, 내용, 관련문서 정보에 대한 정보를 간략하게 제시하고, 이후에서 알고리즘 운영에 직접적으로 필요한 구체적인 사항을 소개함.
- 2절에서는 해수면온도 산출 흐름도와 알고리즘 수행에 필요한 입력자료를 제시하고 알고리즘에 관한 이론적 배경과 수학적 설명을 소개함. 3절에서는 모의자료와 알고리즘 검증 방법 및 결과에 대한 내용을 제시함.
- 4절에서는 현업에서 본 알고리즘을 운영할 때 고려해야 할 사항들을 소개하고, 5절에서는 알고리즘을 사용할 때 고려해야 할 가정들과 알고리즘의 문제점들에 대해서 다룸.

1.1 목적

- 이 ATBD는 GK-2A/AMI로부터 해수면온도를 산출하는 과정에 필요한 물리적 배경과 수치 계산 과정을 간략하게 제시함.
- 입·출력 자료, 예상되는 성능, 현업 운영 시 고려해야 할 사항, 그 외에 해수면온도 산출에 필요한 가정들과 개발된 알고리즘의 제한점에 관한 전반적인 내용을 제공함.

1.2 사용자

- 본 설명서의 사용자는 해수면온도를 산출하는 알고리즘의 물리적 배경이나, 산출된 해수면온도 자료를 통해 연구를 진행하고자 하는 사람들이며 이들에게 해수면온도 처리과정과 기본적인 정보를 제공하고자 함.
- GK-2A 해수면온도 산출 알고리즘 개발 연구의 결과물로서 관리자 및 연구자들에게 필요한 정보를 제공함.
- 추후 사용자들이 해수면온도 알고리즘을 충분히 숙지할 수 있도록 하여 이후 추가 연구에 도움을 줄 수 있도록 함.

1.3 내용

- GK-2A/AMI 자료를 이용하여 해수면온도를 산출하기 위해 필요한 이론적 기반을 다루고 있으며, 다음과 같이 주요한 내용으로 구성됨.

- 시스템 개요: 해수면온도 산출 알고리즘의 목적, AMI 센서와 관련된 세부 사항, 산출물 요구사항의 간단한 설명을 제공함.
- 알고리즘 소개: 해수면온도 산출 알고리즘의 일반적인 처리 흐름과 입·출력 자료 및 해수면온도 산출 알고리즘에 대한 이론적인 배경 및 수학적 근거를 제시함.
- 해수면온도 산출 알고리즘의 검증: 모의자료를 해수면온도 산출 알고리즘에 적용한 결과를 바탕으로 검증을 수행한 결과를 제시함.
- 현업 운영 시 고려사항: 수치계산, 프로그래밍 및 절차상 고려사항, 품질 평가 및 진단, 최종 산출물이 가질 수 있는 문제점과 한계점 등을 포함한 예외사항 처리에 관한 내용을 제공함.

1.4 관련 문서

- 해수면온도 알고리즘은 GK-2A의 구름탐지 mask, 해빙 mask 정보를 활용하므로 아래와 같은 타 변수의 ATBD도 해수면온도 알고리즘을 이해하는데 도움이 될 것임.
 - GK-2A/AMI 구름탐지 mask 산출물 ATBD

2. 알고리즘 소개

2.1 개요

GK-2A/AMI 해수면온도 산출 알고리즘은 아래와 같은 과정으로 구성되어 있으며 해수면온도 산출 알고리즘의 개괄적인 내용은 2.4-2.5절에서 다룬다.

- 위성관측자료-해양실측자료-복사전달모델(Radiative Transfer Model; RTM) 모의자료-해수면온도 기후장 자료-해수면온도 초기치 자료의 일치점 자료 생산 및 저장
- 회귀분석법을 활용한 해수면온도 산출 계수 유도 및 저장
- 사용자에게 의해 선택된 알고리즘에 따른 해수면온도 산출 및 품질 관리 후 저장

2.2 알고리즘 흐름도

GK-2A/AMI 자료가 실시간으로 수신됨과 동시에 위성관측자료-해양실측자료-RTM 모의자료-해수면온도 기후장 자료-해수면온도 초기치 자료의 일치점 자료를 생산하고, 이를 이용하여 해수면온도 산출 알고리즘에 필요한 경험적 회귀 해수면온도 (Multi-band (4-band) SST, NLSST, MCSST)의 산출 계수와 Hybrid 해수면온도의 계수를 각각 유도하여 저장한다. 그리고 유도한 계수를 이용하여 해수면온도를 실시간으로 계산한다. 이와 같은 과정이 수행되기 위해서는 아래와 같은 자료들이 필요하다.

- AMI 채널별 관측자료
- 구름탐지 mask 자료
- 해양/육지 mask 자료
- 표층부이 위치, 시간, 수온정보
- 채널별 RTM 모의자료
- 해수면온도 기후장 자료
- 해수면온도 초기치 자료(first-guess)로서의 해수면온도 합성장 (Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis; OSTIA) 혹은 실시간 NLSST

휘도온도 (brightness temperature; BT) 자료 또는 휘도온도 자료와 RTM 산출 청천휘도온도의 차이값 및 해양 실측값 또는 해양 실측값과 first-guess 해수면온도 사이의 경험적 관계식으로 해수면온도를 계산할 때, 표 3.1에 정리한 여러 가지 해수면온도 산출 알고리즘들에 대해 다양하게 산출 계수를 유도할 수 있으며 사용자의 편의와 필요에 따라 알고리즘을 선택하여 적용할 수 있도록 구성하였다. Multi-band (4-band) 해수면온도 알고리즘을 GK-2A/MI 해수면온도 산출을 위한 기본 알고리즘으로 설정하였으며 부가적으로 MCSST 및 NLSST, Hybrid 해수면온도 알고리즘을 필요에 따라 선택하여 적용할 수 있도록 하였다.

해수면온도 산출은 낮과 밤에 모두 수행되며, 구름없이 맑다고 판별된, 즉, 구름탐지 결

과 맑음(clear)으로 판단된 픽셀에 대해서만 수행한다. 구름탐지 mask는 기본적으로 선행 처리 알고리즘의 산출물을 적용한다. 높은 정확도의 해수면온도를 산출하기 위하여 구름 탐지 mask 적용과 더불어 해수면온도 품질 관리 알고리즘을 적용하여 잔존하는 구름에 의해 오염된 픽셀을 추가로 제거한 후 해수면온도 자료가 저장되도록 하였다.

표 2.1 위성 해수면온도 산출 알고리즘 ($T_{8.7}$, $T_{10.5}$, $T_{11.2}$, $T_{12.3}$: 8.7, 10.5, 11.2, 12.3 μm 에서의 GK-2A/AMI 관측 휘도온도, $T_{CS10.5}$, $T_{CS12.3}$: 10.5, 12.3 μm 에서의 RTM 모의 휘도온도, C_* : 해수면온도 산출 계수, θ : 위성천정각, T_{FG} : 해수면온도 초기치)

Method	Channel	Equation
MCSST	Split	$MCSST_S = C_1 T_{10.5} + C_2 (T_{10.5} - T_{12.3}) + C_3 (T_{10.5} - T_{12.3}) (\sec \theta - 1) + C_4$
NLSST	Split	$NLSST_S = C_1 T_{10.5} + C_2 T_{FG} (T_{10.5} - T_{12.3}) + C_3 (T_{10.5} - T_{12.3}) (\sec \theta - 1) + C_4$
Hybrid SST	Split	$HSST = T_{FG} + C_1 (T_{10.5} - T_{CS10.5}) + C_2 T_{FG} ((T_{10.5} - T_{CS10.5}) - (T_{12.3} - T_{CS12.3})) + C_3 ((T_{10.5} - T_{CS10.5}) - (T_{12.3} - T_{CS12.3})) (\sec \theta - 1) + C_4$
Multi-band (4-band) SST	4 Channels	$MSST = C_1 T_{10.5} + C_2 (T_{10.5} - T_{12.3}) + (C_3 (T_{10.5} - T_{8.7}) + C_4 (T_{10.5} - T_{11.2})) (\sec \theta - 1) + (C_5 (T_{10.5} - T_{8.7}) + C_6 (T_{10.5} - T_{11.2}) + C_7 (T_{10.5} - T_{12.3})) T_{FG} + C_8$

2.3 입력자료

2.3.1 L1B

표 2.2는 AMI 관측 자료와 geolocation 정보로부터 산출된 자료를 정리한 것이다. AMI 채널별 원시자료를 수신 받아 미리 작성되어 있는 조건표(Look Up Table; LUT)와 비교하여 채널별 휘도온도 값으로 변환하는 과정을 거쳐서 내려온 자료를 활용한다.

표 2.2 센서 자료 입력 목록

Name	Description	Dimension
Ch11 AMI BT	Calibrated AMI L1b BT in channel 11	grid (lon, lat)
Ch13 AMI BT	Calibrated AMI L1b BT in channel 13	grid (lon, lat)
Ch14 AMI BT	Calibrated AMI L1b BT in channel 14	grid (lon, lat)
Ch15 AMI BT	Calibrated AMI L1b BT in channel 15	grid (lon, lat)

2.3.2 L2

표 2.3에 GK-2A/AMI 관측 자료를 사용하여 산출된 L2/3 자료 중 해수면온도 산출 알고리즘에 입력자료로 활용되는 자료를 나열하였다.

표 2.3 L2 자료 입력 목록

Name	Description	Dimension
AMI cloud mask	AMI L2 cloud mask data	grid (lon, lat)
AMI sea ice mask	AMI L3 sea ice mask data	grid (lon, lat)

2.3.3 보조 자료

표 2.4에 해수면온도 산출 알고리즘에 입력되는 보조 자료들을 나열하였다.

표 2.4 보조 자료 입력 목록

Name	Description	Dimension
Latitude	Pixel latitude	grid (lon, lat)
Longitude	Pixel longitude	grid (lon, lat)
Satellite zenith	AMI satellite zenith angles	grid (lon, lat)
Solar zenith	AMI solar zenith angles	grid (lon, lat)
land/sea mask	Land/sea mask	grid (lon, lat)
Simulated clear-sky BT	RTM simulated clear-sky BT	grid (lon, lat)
SST climatology	Daily SST climatology (mean, standard deviation, maximum, minimum)	grid (lon, lat)
First-guess SST field	OSTIA SST or real-time MCSST	grid (lon, lat)

2.4 이론적 배경

해수면의 적외선 방출은 해양의 표면에서부터 깊이 10 μm 이내에서 이루어지는 것으로, 피층 수온(skin SST)과 밀접한 관련이 있다 (e.g., Saunders, 1967; Robinson et al., 1984; Donlon and Robinson, 1997; Donlon et al., 2002; Minnett, 2003). 반면에 해양 현장실측자료는 측정 장비에 따라서 깊이가 차이가 있지만 일반적으로 “bulk SST”를 측정한다. 해수면에서의 열 교환으로 인하여 skin SST와 bulk SST 사이에는 몇 도 정도의 작은 차이가 발생한다 (e.g., Gentemann et al., 2003; Horrocks et al., 2003; Gentemann, 2007; Gentemann and Minnett, 2008). 이러한 차이는 바람이 약하며, 구름이 없는 맑은 날에는 해수 표층에서의 혼합이 억제되어

차이가 더욱 증가한다 (Fairall et al., 1996; Murray et al., 2000; Wick et al., 2002; Castro et al., 2003; Stuart-Menteth et al., 2003; Tanashi et al., 2003; Nardielli et al., 2005). 그림 2.1은 주/야간의 전형적인 해수면온도 수직 구조와 깊이에 따른 여러 형태의 수온을 나타내고 있다. 인공위성 skin SST 산출물의 타당성을 검증하기 위하여 현장 관측된 bulk SST 자료를 이용하기에는 여러 제약이 따른다. 최근에는 야간의 해수면 온도를 구하기 위해 약 0.17 K의 일정한 오프셋(offset)을 적용하여 skin SST를 bulk SST로 변환하기도 하며, 풍속 자료가 활용 가능할 때에는 아래와 같은 관계식을 이용하여 변환하기도 한다 (Donlon et al., 2002).

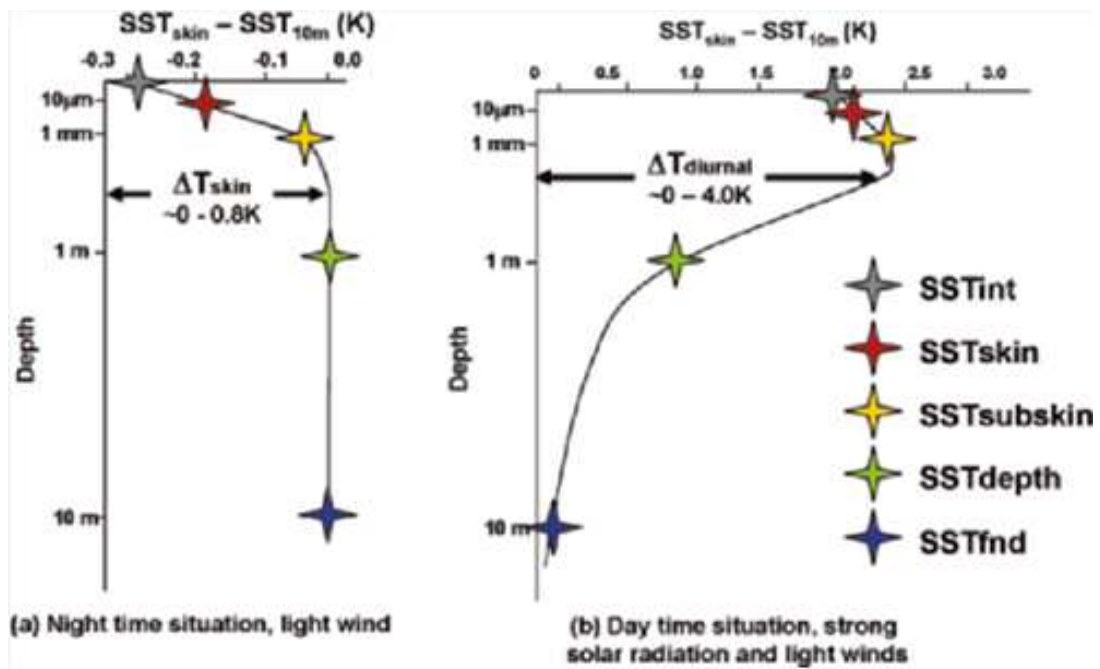


그림 2.1. 여러 가지 해수면온도의 정의 (Donlon et al., 2007)

$$SST_{bulk} = SST_{skin} - [0.14 + 0.30 \exp(-u/3.70)] \quad (2.1)$$

여기서 SST_{bulk} 와 SST_{skin} 는 각각 bulk SST와 skin SST이며, u 는 풍속이다. 주간에는 수온약층의 일 변동으로 인하여 skin SST와 bulk SST의 관계가 더욱 복잡해진다. 모델을 돌리기 위해서는 해수면에서의 flux 자료와 함께 그 동안의 축적된 해수면온도 자료들이 있어야 한다. 본 ATBD에서는 실제 해양관측을 바탕으로 한 해수면온도와 인공위성 해수면온도 자료를 비교할 때, skin SST와 bulk SST의 차이를 고려하지 않고 사용하였다. 회귀분석 알고리즘의 계수를 구할 때에는 위성에서 얻은 휘도온도와 실측 bulk SST의 일치점 자료(matchup)를 산출하여 이용하였다. 참고적으로, Castro et al.(2010)은 AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) 휘도온도와 bulk SST의 일치점 자료로 회귀분석한 결과의 정확도가 skin SST와의 일치점 자료로 회귀분석한 결과에 비해서, 그 정확성이 나쁘지 않으며, 오히려 더 정확한 결과가 나오기도 한다는 것을 보인 바 있다.

2.5 수학적 설명

2.5.1 전통적 해수면온도 산출 알고리즘

1970년대 이후로 인공위성 적외영역의 자료들을 이용해 해수면온도를 추정할 수 있는 알고리즘이 개발되었다. 대표적인 알고리즘이 다중채널회귀분석법 (MCSST; Multi-Channel Sea Surface Temperature)이다 (Prabhakara et al., 1974; McMillin, 1975; Barton, 1985; McClain et al., 1985).

$$MCSST_D = a_1 T_{10.5} + a_2 (T_{3.8} - T_{10.5}) + a_3 (T_{3.8} - T_{10.5})(\sec\theta - 1) + a_4 \quad (2.2)$$

$$MCSST_D = a_1 T_{10.5} + a_2 (T_{10.5} - T_{12.3}) + a_3 (T_{10.5} - T_{12.3})(\sec\theta - 1) + a_4 \quad (2.3)$$

$$MCSST_T = a_1 T_{10.5} + a_2 (T_{3.8} - T_{12.3}) + a_3 (T_{3.8} - T_{12.3})(\sec\theta - 1) + a_4 \quad (2.4)$$

해수면온도 산출시 사용되는 파장에 따라 dual window MCSST ($MCSST_D$), split window MCSST ($MCSST_S$), triple window MCSST ($MCSST_T$)로 구분된다. MCSST 알고리즘에서 대기 영향의 비선형성을 고려한 것이 Walton et al. (1998)의 비선형 알고리즘(NLSST; Non-Linear Sea Surface Temperature)으로, 다음과 같이 표현된다.

$$NLSST_D = a_1 T_{10.5} + a_2 T_{FG} (T_{3.8} - T_{10.5}) + a_3 (\sec\theta - 1) + a_4 \quad (2.5)$$

$$NLSST_D = a_1 T_{10.5} + a_2 T_{FG} (T_{10.5} - T_{12.3}) + a_3 (T_{10.5} - T_{12.3})(\sec\theta - 1) + a_4 \quad (2.6)$$

$$NLSST_T = a_1 T_{10.5} + a_2 T_{FG} (T_{3.8} - T_{12.3}) + a_3 (\sec\theta - 1) + a_4 \quad (2.7)$$

이 알고리즘에서 표면온도 (해수면온도 초기치) T_{FG} 는 정확히 모르기 때문에 일평균 합성장을 사용하거나, split window MCSST로 대체하거나, 또는 정기적으로 예보되는 모델의 출력 자료를 사용하기도 한다. NLSST 또한 해수면온도 산출 시 사용되는 파장에 따라 dual window NLSST ($NLSST_D$), split window NLSST ($NLSST_S$), triple window NLSST ($NLSST_T$)로 구분된다. GK-2A/AMI 해수면온도 산출 알고리즘에서는 사용자의 목적에 따라 MCSST와 NLSST를 산출할 때 split window MCSST와 split window NLSST 알고리즘을 선택하여 해수면온도를 산출한다.

2.5.2 Hybrid 해수면온도 산출 알고리즘

최근 복사전달모델(RTM)의 준실시간 수행이 가능해짐에 따라, 수치모델 산출물을 입력하여 채널별 청천휘도온도 (simulated clear-sky BT)를 모의하는 것이 가능해졌다. 이러한 발전을 배경으로 Ignatov et al. (2010) 및 Petrenko et al. (2011)은 위성관측 채널별 휘도온도와 복사전달모델로 모의한 채널별 청천휘도온도의 차이값, 그리고 해양실측 해수면온도와 초기치 해수면온도의 차이값 사이의 회귀계수를 산출하여 추가 스케일링(scaling) 과정을 거치는 형태의 Hybrid 해수면온도 (HSST) 알고리즘을 제안하였다.

Hybrid 해수면온도는 전통적인 경험적 알고리즘인 MCSST 또는 NLSST와 달리 위성 채널 관측 자료와 복사전달 모델에서 모의된 자료의 차를 기반으로 함에 따라 회귀 분석을 활용하여 계수를 산출한다. 우선 식 2.8에서 초기치 해수면온도인 T_{FG} 를 이항한 후 위성 관측 채널별 휘도온도($T_{10.5}$, $T_{12.3}$)와 복사전달모델로 모의한 채널별 청천휘도온도($T_{CS10.5}, T_{CS12.3}$)의 차이값, 그리고 해양실측 해수면온도와 초기치 해수면온도(T_{FG})의 차이값 사이의 회귀계수를 산출한다. 이 때 계산 가능한 중간단계의 해수면온도 값을 least-square Hybrid 해수면온도라고 지칭하여 SST_{LSH} 로 나타내었다. 이때 선형 회귀에 의해서 얻어진 중간단계의 계수들을 b_{LSn} ($n = 1,2,3,4$)로 표현하였다.

$$\begin{aligned} SST_{LSH} = & T_{FG} + b_{LS1}(T_{10.5} - T_{CS10.5}) + b_{LS2}T_{FG}\{(T_{10.5} - T_{CS10.5}) - (T_{12.3} - T_{CS12.3})\} \\ & + b_{LS3}\{(T_{10.5} - T_{CS10.5}) - (T_{12.3} - T_{CS12.3})\}(sec\theta - 1) + b_{LS4} \end{aligned} \quad (2.8)$$

다음 단계에서는 이 계수들을 스케일링 해주는 과정이 필요하다. NLSST (식 2.6)에서 오프셋항을 제외하고 계산한 근사값과 초기치 해수면온도 사이의 표준편차값을 구한다. 또한, least-square Hybrid 해수면온도 (식 2.8)에서도 마찬가지로 오프셋항을 제외하고 계산한 근사값과 초기치 해수면온도 사이의 표준편차값을 구한다. 이 둘의 비를 오프셋을 제외한 나머지 항에 곱해주면 새로운 Hybrid SST의 계수를 얻게 되고, 오프셋항도 실측수온의 평균값에서 새로운 계수로 계산한 근사값의 평균값을 빼줌으로써 새로운 오프셋항을 얻게 된다. 이 과정을 식으로 나타내면 아래의 식 2.9-2.12 과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_{NL} = & std[a_1(T_{10.5} - T_{CS10.5}) + a_2T_{FG}\{(T_{10.5} - T_{CS10.5}) - (T_{12.3} - T_{CS12.3})\} + \\ & a_3\{(T_{10.5} - T_{CS10.5}) - (T_{12.3} - T_{CS12.3})\}(sec\theta - 1) - T_{FG}] \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{LSH} = & std[b_{LS1}(T_{10.5} - T_{CS10.5}) + b_{LS2}T_{FG}\{(T_{10.5} - T_{CS10.5}) - (T_{12.3} - T_{CS12.3})\} + \\ & b_{LS3}\{(T_{10.5} - T_{CS10.5}) - (T_{12.3} - T_{CS12.3})\}(sec\theta - 1) + T_{FG}] \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$b_n = (\sigma_{NL}/\sigma_{LSH})b_{LSn} \quad (n = 1,2,3) \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} b_4 = & mean(T_{IS}) - mean((\sigma_{NL}/\sigma_{LSH})[b_{LS1}(T_{10.5} - T_{CS10.5}) \\ & + b_{LS2}T_{FG}\{(T_{10.5} - T_{CS10.5}) - (T_{12.3} - T_{CS12.3})\} \\ & + b_{LS3}\{(T_{10.5} - T_{CS10.5}) - (T_{12.3} - T_{CS12.3})\}(sec\theta - 1) - T_{FG}] \end{aligned} \quad (2.12)$$

여기서 T_{IS} 는 실측 수온 자료이다. 이렇게 스케일링 과정을 거친 새로운 계수들로부터 식 2.13과 같이 최종적인 Hybrid 해수면온도 산출식이 얻어진다.

$$HSST = T_{FG} + b_1(T_{10.5} - T_{CS10.5}) + b_2T_{FG}\{(T_{10.5} - T_{CS10.5}) - (T_{12.3} - T_{CS12.3})\} + b_3\{(T_{10.5} - T_{CS10.5}) - (T_{12.3} - T_{CS12.3})\}(\sec\theta - 1) + b_4 \quad (2.13)$$

2.5.3 Multi-band (4-band) 해수면온도 산출 알고리즘

최근 Himawari-8/AHI (Advanced Himawari Imager), GOES-16 (Geostationary Operational Environmental Satellite -16)/ABI (Advanced Baseline Imager)와 같은 해수면온도 산출 시 사용할 수 있는 밴드가 4개 이상인 센서가 탑재되어 발사됨에 따라 기존의 2-3개의 채널을 이용하여 경험적 회귀분석법을 통한 해수면온도 산출 알고리즘을 기본으로 한 Multi-band (4-band) 해수면온도 산출 알고리즘이 제안되었다 (Kramar et al., 2016).

기존 극궤도 및 정지궤도 위성에서 해수면온도 산출을 위해 활용된 경험적 회귀분석 알고리즘과 다른 점은 10–13 μm 범위 내인 채널 13–15 자료와 중심 파장이 8.6 μm 인 채널 11 자료를 추가로 사용하여 4개의 채널 자료를 활용하는 것과 해수면온도 산출 시 밤/낮을 구분하지 않고 하나의 식을 사용한다는 것이다. 하나의 식을 활용함으로써 밤/낮 경계에서 해수면온도의 불일치성이 제거될 수 있다(Kramar et al., 2016).

$$MSST = a_1T_{10.5} + a_2(T_{10.5} - T_{12.3}) + \{a_3(T_{10.5} - T_{8.6}) + a_4(T_{10.5} - T_{11.2})\}(\sec\theta - 1) + \{a_5(T_{10.5} - T_{8.6}) + a_6(T_{10.5} - T_{11.2}) + a_7(T_{10.5} - T_{12.3})\}T_{FG} + a_8 \quad (2.14)$$

여기서 $T_{8.6}$, $T_{10.5}$, $T_{11.2}$, $T_{12.3}$ 은 해당 채널의 위성 관측 휘도온도이다.

2.5.4 산출 해수면온도 품질 관리

구름 탐지 mask를 적용한 후 별도의 해수면온도 품질 관리 과정은 총 6단계로 나뉜다. 첫 번째 단계에서는 산출된 해수면온도 값이 특정 최소값 이하이거나 최대값 이상이면 이상값으로 제거한다. 두 번째 단계에서는 해수면온도 산출에 활용되는 채널 11, 13, 14, 15에 대하여 대기복사모델에서 모의된 청천휘도온도 자료와 위성 관측 자료의 차를 활용하여 특정 기준값 이상이면 구름으로 판별하여 제거한다. 세 번째 단계에서는 기후장 자료를 활용하여 산출된 해수면온도의 품질을 검사하고 이상값으로 판단되는 자료는 제거한다. 네 번째 단계에서는 구름 가장자리에서의 이상값을 제거하기 위하여 기준 영역 내에서 기후장 자료로 판별된 구름 화소와 청천 화소와의 특성을 비교하여 구름과 특성이 가까울 경우 구름으로 판별하여 제거한다. 마지막으로 해수면온도는 공간적인 변동 특성이 구름에 비해 작은 특성을 이용하여 기준 영역 내의 표준편차 값이 기준값 이상이면 제거하여 한 화소보다 크기가 작은 구름이 제거될 수 있도록 한다(Ignatov et al., 2010; Petrenko et al., 2010). 이에 추가적으로 구름역과 청천역에서의 채널 자료의 특성 차를 활용하여 구름에 의해 오염된 픽셀을 제거하기 위하여 화소별 채널 자료에 대한 기준값을 적용하였다.

2.5.4 해수면온도 합성장

GK-2A/AMI 영상 해수면온도를 활용하여 1일, 5일, 10일 해수면 온도장을 생산을 위해서는 단순 평균 기법을 활용할 수 있다. 주어진 화소(i, j)의 시계열 자료($k = 1, \dots, N$)를 이용하여 시간에 대하여 평균을 구하는 방법은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$SST(i, j) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N SST_k(i, j) \quad (2.15)$$

2.6. 산출물

첫 번째 단계에서 위성-실측-RTM-기후장-해수면온도 초기치 일치점 자료를 생산한다. 두 번째 산출계수 유도 단계에서는 이를 바탕으로 회귀분석을 하여 알고리즘별로 낮/밤의 산출계수를 유도하여 저장하게 된다. 이후 세 번째 해수면온도 산출 단계에서는 선택된 알고리즘을 바탕으로 산출된 해수면온도와 품질 정보를 저장하며, 정확도를 살펴보기 위한 RMSE, bias 오차값을 함께 출력한다.

표 2.5 산출물 목록

Name	Category	Description	Dimension
Matchup dataset	Product	Satellite-buoy-RTM-first-guess SST matchup data	Single ASCII file
SST retrieval coefficients	Product	Retrieval coefficients for Regression SST	Single ASCII file
Error statistics	Product	RMSE and bias	Single ASCII file
Retrieved SST	Product	Regression SST	grid (lon,lat)
SST quality flag	Product	flag of cloud mask, SST range test, RTM test, climatology test, adaptive test, uniformity test, threshold test, twilight area, sunglint area	grid (lon,lat)

3. 모의자료 및 검증

3.1 모의 입력자료 및 검증자료

표 3.1 타 위성 해수면온도 산출 사용채널 비교

GK-2A/AMI		Himawari-8/AHI		GOES-R/ABI		MODIS		VIIRS	
Ch#	Wavelength (μm)	Ch#	Wavelength (μm)	Ch#	Wavelength (μm)	Ch#	Wavelength (μm)	Ch#	Wavelength (μm)
-	-	-	-	-	-	20	3.750	M12	3.700
-	-	-	-	-	-	21	3.959	-	-
7	3.830	7	3.9	7	3.90	22	3.959	M13	4.050
-	-	-	-	-	-	23	4.050	-	-
11	8.592	11	8.6	11	8.50	-	-	-	-
13	10.403	13	10.4	13	10.35	-	-	-	-
14	11.212	14	11.2	14	11.20	31	11.030	M15	10.763
15	12.364	15	12.3	15	12.30	32	12.020	M16	12.013
5 channels		5 channels		5 channels		6 channels		4 channels	

표 3.1 은 해수면온도 계산에 사용될 채널을 선택하기 위하여 여러 위성들의 파장대를 서로 비교한 표이다. MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)는 여러 밴드를 다양하게 가지고 있으나 극궤도 위성이라 GK-2A 정지위성과는 성격이 많이 다를 것으로 예상되어 GK-2A/AMI 와 유사한 관측 채널을 가진 Himawari-8/AHI 를 선택하였다. 산출 해수면온도 자료의 불연속성을 제거하기 위하여 Hybrid SST 알고리즘과 Multi-band (4-band) SST 알고리즘의 경우 낮과 밤을 구분하지 않고 채널 11, 13, 14, 15 자료의 일부 혹은 모두 사용하여 해수면온도 계수를 산출하였다. 그림 3.1 은 모의자료로 사용된 Himawari-8/AHI 11, 13, 14, 15 번 채널 자료의 예시이다.

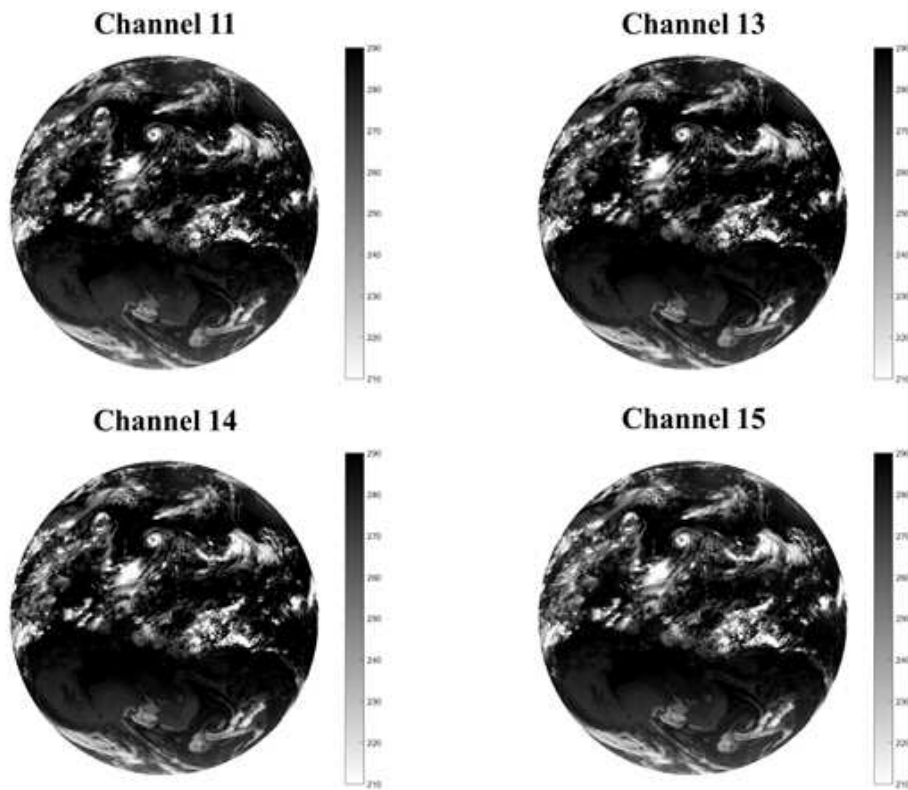


그림 3.1. 모의 입력자료 예시 (Himawari-8/AHI Ch11 ($8.6 \mu\text{m}$), Ch13 ($10.4 \mu\text{m}$), Ch14 ($11.2 \mu\text{m}$), Ch15 ($12.3 \mu\text{m}$))

3.2 검증 방법

3.2.1 일치점 자료 생산 결과

해수면온도 산출식에 필요한 계수들은 위성 채널별 관측 자료와 해양실측자료, 혹은 해수면온도 초기치와 해양실측 자료의 차, 위성 채널별 관측 자료와 RTM 모의 자료 사이의 차를 활용하여 경험적 회귀분석법을 실시하여 얻는다. 이를 위해서는 정확하게 보정된 다량의 해양관측 자료가 필요하다. 해양관측자료는 관측 자료의 시간정보, 위치(위도, 경도), 수온과 관측 깊이에 관한 정보를 포함하고 있어야 한다. 그리고 계산된 해수면온도의 오차의 특성을 이해하기 위해서 대기 상태에 관한 자료도 저장하여야 한다. 부이의 종류에 따라서 대기 온도, 해상풍 등에 관한 부가 정보들을 포함하고 있어서 산출된 해수면온도의 오차의 크기와 특성 그리고 오차에 영향을 주는 여러 가지 요인들을 파악할 수 있다.

현재 실시간으로 수집이 가능한 해양관측 자료로는 기상청 GTS (Global Telecommunication System)를 통해 수집되는 인공위성 표층 뜰개부이 자료가 있다. 이 자료는 현재 실시간으로 체계적으로 운용되고 있기 때문에 가장 안정적으로 자료를 공급 받을 수 있는 자료이다. 따라서 본 연구에서는 계수 산출뿐만 아니라, 검증과정에서도 뜰개부이 자료를 활용한다.

GK-2A 위성과 채널 특성이 비슷한 Himawari-8/AHI 채널 자료를 가지고, 최대 시간 격차

는 5분, 공간 최대 격차는 Himawari-8/AH 해상도에 해당하는 2 km로 설정하여 위성관측-해양실측 일치점 자료를 구하였다. 이러한 조건을 만족하는 자료들을 선별하여, 하나의 행에 해양실측자료의 관측 년, 월, 일, 시, 분, 고유번호, 수온과 위성관측자료의 관측 년, 월, 일, 시, 분, 위도, 경도, 위성천정각, 5개 각 채널별 휘도온도, 3×3 영역 내에서의 최소값, 최대값, 표준편차 등을 순차적으로 기록한다. 필요에 따라서 대기 온도, 관측 깊이 등을 기록하였다. 여기에서 구름이 있거나, 해수면온도의 큰 오차를 야기시킬 것으로 예상되는 문제가 있는 화소들은 제거하였다. 이를 위해서 선행 산출물의 구름탐지와 해빙 mask 결과를 적용하였다. 모의자료를 활용한 일치점 자료 생산 결과는 표 3.2에 나타내었다.

표 3.2 Himawari-8/AHI 모의자료로 생산한 위성관측-해양실측 일치점 자료 결과

Collocation	Area	Period	Number of data points
Himawari-8/AHI - <i>in-situ</i> - RTM	Full Disk	2017.07.24 - 2017.08.07	6,766

3.2.2 해수면온도 산출계수 유도 결과

위성자료가 수신되면, 3.2.1에서 언급한 일치점자료가 생산될 것이다. 이렇게 생산된 일치점 자료를 이용하여 각 위성관측 휘도온도와 해양실측수온 간의 회귀분석을 통해서 알고리즘별 산출계수를 유도한다. 전통적인 회귀분석 알고리즘의 경우 낮과 밤의 알고리즘을 따로 적용하기 위하여 태양천정각 80°를 기준으로 낮과 밤을 나눈 후, 각각의 계수를 구하도록 한다. 표 3.3과 3.4에 GK-2A 모의자료로부터 유도한 전통적인 회귀분석 알고리즘별 낮과 밤의 해수면온도 산출계수 정보들을 각각 나타내었다. Hybrid 알고리즘과 Multi-band (4-band) 알고리즘은 낮/밤 구분 없이 통합된 계수를 유도하였다. 계산된 산출계수 정보들은 표 3.5와 3.6에 각각 나타내었다.

표 3.3 낮 시간대 경험적 회귀 해수면온도 산출 계수

===== SST Coefficients =====						
Multi-channel SST -----						
Split : $MCSST_S = C_1T_{10.5} + C_2(T_{10.5} - T_{12.3}) + C_3(T_{10.5} - T_{12.3})(\sec\theta - 1) + C_4$						
Non-linear SST -----						
Split : $NLSST_S = C_1T_{10.5} + C_2T_{FG}(T_{10.5} - T_{12.3}) + C_3(T_{10.5} - T_{12.3})(\sec\theta - 1) + C_4$						
Algorithm	C1	C2	C3	C4	RMS	Bias
MCSST_S	1.009796	0.954815	0.413480	0.234944	0.696260	0
NLSST_S	0.878102	0.039690	0.370040	2.766626	0.541502	0

표 3.4 밤 시간대 경험적 회귀 해수면온도 산출 계수

===== SST Coefficients =====						
Multi-channel SST -----						
Split : $MCSST_S = C_1T_{10.5} + C_2(T_{10.5} - T_{12.3}) + C_3(T_{10.5} - T_{12.3})(\sec\theta - 1) + C_4$						
Non-linear SST -----						
Split : $NLSST_S = C_1T_{10.5} + C_2T_{FG}(T_{10.5} - T_{12.3}) + C_3(T_{10.5} - T_{12.3})(\sec\theta - 1) + C_4$						
Algorithm	C1	C2	C3	C4	RMS	Bias
MCSST_S	1.000994	1.230888	0.406061	-0.296407	0.603739	0
NLSST_S	0.905816	0.038784	0.399890	2.450389	0.487401	0

표 3.5 Hybrid 해수면온도 산출 계수

===== SST Coefficients =====						
Hybrid SST -----						
$HSST = T_{FG} + C_1(T_{10.5} - T_{CS10.5}) + C_2T_{FG}((T_{10.5} - T_{CS10.5}) - (T_{12.3} - T_{CS12.3}))$ $+ C_3((T_{10.5} - T_{CS10.5}) - (T_{12.3} - T_{CS12.3}))(\sec\theta - 1) + C_4$						
Algorithm	C1	C2	C3	C4	RMS	Bias
HSST	0.884830	0.05632	-0.296796	-0.050822	0.510627	-0.005796

표 3.6 Multi-band (4-band) 해수면온도 산출 계수

===== SST Coefficients =====						
Multi-band (4-band) SST -----						
$MSST = C_1T_{10.5} + C_2(T_{10.5} - T_{12.3}) + (C_3(T_{10.5} - T_{8.7}) + C_4(T_{10.5} - T_{11.2}))(\sec\theta - 1)$ $+ (C_5(T_{10.5} - T_{8.7}) + C_6(T_{10.5} - T_{11.2}) + C_7(T_{10.5} - T_{12.3}))T_{FG} + C_8$						
Algorithm	C1	C2	C3	C4	RMS	Bias
	C5	C6	C7	C8		
HSST	0.934258	-1.135175	0.565654	0.961823	0.456154	0
	-0.043901	-0.044272	0.082092	3.204209		

3.2.3 해수면온도 산출 결과

앞에서 산출된 각 알고리즘의 계수를 활용하여 해수면온도를 계산한다. 기본적으로 Multi-band (4-band) 해수면온도를 산출하며 선택에 따라 split window MCSST 및 NLSST, hybrid 해수면온도를 산출한다. 그림 3.2는 2017년 7월 27일 15 UTC의 자료를 활용하여 해수면온도를 산출한 예시이다.

Sea Surface Temperature (20170727 1500)

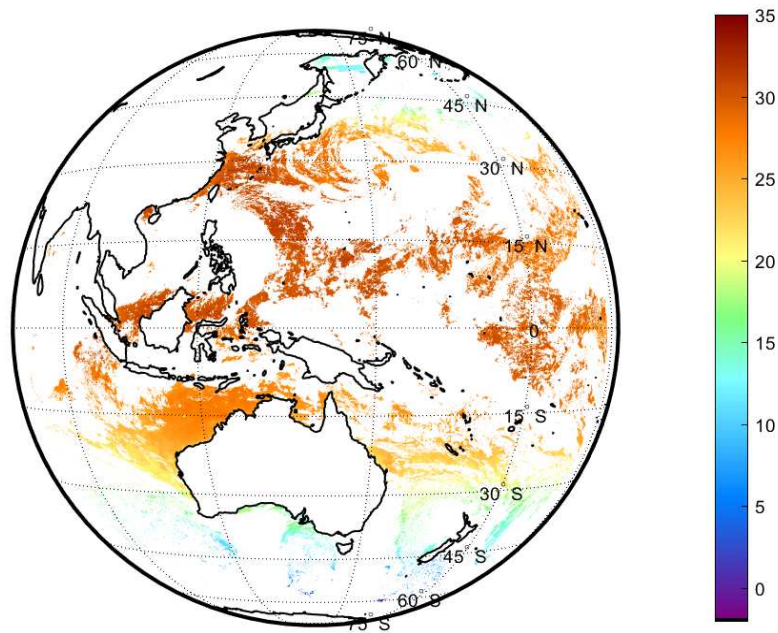


그림 3.2. 해수면온도 산출 예시 (2017년 7월 27일 15 UTC)

3.2.4 산출 해수면온도 검증 방법

해수면온도 산출물의 정확도를 평가하기 위해서는 계수 산출 때와 마찬가지로 표층뜯개 실측자료를 활용한다. 그리고 마찬가지로 위성-해양 자료 간의 최대 시간 격차는 5분, 공간 최대 격차는 위성의 해상도에 해당하는 2 km로 설정하여, 위성-실측 값 사이의 RMSE (root mean square error)와 bias를 제시한다.

계산된 해수면온도의 정확도는 해양실측자료와 비교하여 RMSE, bias로 표현한다. 각각은 아래의 식과 같이 정의된다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - x_i)^2} \quad (4.1)$$

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - x_i) \quad (4.2)$$

여기서 X_i 와 x_i 는 각각 산출 해수면온도와 실측 수온이며, n 은 일치점 자료 개수이다.

3.3 검증 결과

위에서 제시된 해수면온도 산출 알고리즘을 2016년 8월 1일부터 2017년 7월 31일까지 1년 간의 Himawari-8/AHI 자료에 적용하여 모의검증시험을 수행하였다. 그림 3.3은 Multi-band (4-band) 해수면온도를 해양실측수온과 비교한 결과를 나타낸다. 정량적인 검증 결과를 제시하기 위하여 표 3.7에 산출 해수면온도의 RMSE와 bias를 나타냈다.

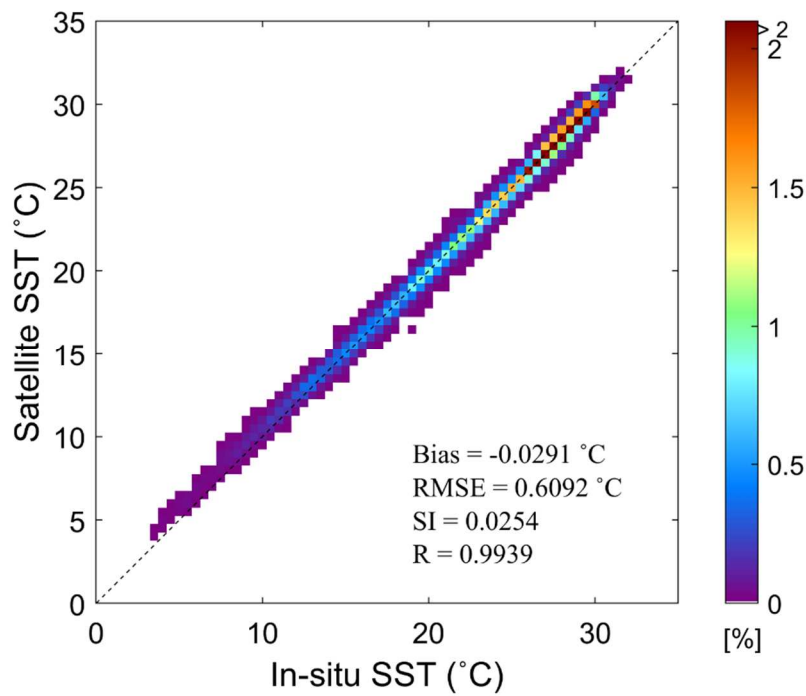


그림 3.3. 산출 해수면온도와 실측 해수면온도 비교

표 3.7 산출 해수면온도 검증 결과

	Period	Area	Number of data points	RMSE (°C)	Bias (°C)
Multi-band (4-band) SST	2016.08.01 - 2017.07.31	Full-disk	27,542	0.61	-0.03

4. 현업운영 시 고려사항

4.1 수치계산 고려사항

- 경험적 회귀분석으로 산출되는 해수면온도 산출 계수의 정확도 평가를 위해서 위성-부이 일치점 자료를 실시간으로 생산하여 해수면온도 산출물의 오차를 모니터링 하여야 함.
- GK-2A/AMI와 성능이 유사한 다른 위성의 해수면온도와도 비교하여 오차 모니터링을 실시하여 비상시에는 오차 원인을 파악하고 대처하여야 함.

4.2 프로그래밍 및 절차상의 고려사항

- 해당 사항 없음.

4.3 품질 평가 및 진단

- 자료 제공 시 각 화소별로 산출된 해수면온도의 품질 정보를 제공.
- 표층부이 수온 자료와 산출 해수면온도 자료의 실시간 일치점 생성 과정에서 산출되는 전구 데이터베이스를 활용하여 산출 자료의 오차값의 시계열 자료를 제공할 수 있도록 함.

4.4 예외사항 처리

- 해당 사항 없음.

4.5 검증 알고리즘

- 산출 해수면온도에 대한 검증을 수행하기 위해서는 실시간으로 높은 정확도의 실측자료를 확보하는 것이 필요함.
- 현재 안정적으로 사용할 수 있는 GTS 뜰개부이자료의 경우, 뜰개부이의 운용에 있어서도 실측자료가 잘 나오지 않는 영역(예, 동해 북부, 오토츠크해)에서의 관측수를 늘리는 등의 체계 보완이 필요함.
- 이 외에도 정확도 높은 선박 관측 및 외해에서의 고정부이 관측자료가 다량 확보될수록 검증뿐만 아니라, 산출계수를 유도하는 과정에서도 큰 기여를 할 수 있을 것으로 예상됨.

5. 가정 및 제한

5.1 성능

- GK-2A의 해수면온도 알고리즘이 성공적으로 수행되기 위해서는 다음과 같은 조건이 만족되어야 함.
- 1) 해수면온도 계산의 정확도는 거의 대부분 해수면온도 산출 이전의 GK-2A의 구름탐지 mask 정보에 의존함. 반드시 구름탐지 mask 산출물의 정확도 향상이 요구됨.
 - 2) 표층부이의 위치정보, 수온 정보가 실시간으로 수집 및 처리되어야 있어야 함.
 - 3) 해수면온도 초기치 (first-guess SST) 자료로 활용되는 해수면온도 합성장 자료 (OSTIA SST)가 수집되어 있어야 하며 혹은 실시간 MCSST 또는 NLSST가 계산되어야 함.

5.2 예상 센서 성능

- 해당사항 없음.

5.3 개선을 위한 사전 계획

- MCSST, NLSST, Hybrid SST, Multi-band (4-band) SST 등 다양한 알고리즘들의 성능을 지속적으로 평가하여 활용 용도에 최적화된 해수면온도 자료를 산출하여야 함.
- 구름 탐색이나 태양천정각, 태양반사각, 여명기 및 sunlint와 관련된 여러 한계값들이 해수면온도 산출 알고리즘에 사용되고 이런 값들은 여러 단계의 실험을 실시하여 경험적으로 최적값을 결정할 것임.
- 경험적 회귀분석 방법의 정확도를 높이기 위해서는 많은 해양관측자료 수집이 필수적이므로, 이를 확보하기 위해서 다각도로 긴밀한 협력관계를 구축하여야 함.
- 해양관측 자료의 실시간 검증과정에 대한 지속적인 보정 노력이 요구됨.
- 여전히 해수면온도 계산에 큰 걸림돌이 되는 구름 제거 문제를 해결하기 위해서, 과거의 해수면온도 기후 값이나 이전의 합성장과 비교해주는 방법을 활용하나 추가로 구름이나 그와 유사한 화소, 문제의 소지가 있는 화소를 제거하는 방법이 지속적으로 연구되고 활용되어야 함.

6. 참고문헌

- Barton I.J., 1985. Transmission model and ground-truth investigation of satellite-derived sea surface temperatures. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 24: 508-516.
- Castro S.L., G.A. Wick, and W.J. Emery, 2003. Further refinements to models for the bulk-skin SST difference. *Journal of Geophysical Research*, 108: 3377, doi:10.1029/2002JC001641.
- Castro S.L., G.A. Wick, P.J. Minnett, A.T. Jessup, and W.J. Emery, 2010. The impact of measurement uncertainty and spatial variability on the accuracy of skin and subsurface regression-based sea surface temperature algorithms. *Remote Sensing of Environment* 114: 2666-2678.
- Donlon, C.J. and I.S. Robinson, 1997. Observations of the oceanic thermal skin in the Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 102: 18585-18606.
- Donlon, C.J., P.J. Minnett, and C. Gentemann, T. J. Nightingale, I. J. Barton, B. Ward, and M. J. Murray, 2002. Toward improved validation of satellite sea surface skin temperature measurements for climate research, *Journal of Climate*, 15: 353–369.
- Donlon, C.J., I. Robinson, K. Casey, J. Vasquez, E. Armstrong, C. Gentemann, D. May, P. LeBorgne, J. Piollé, I. Barton, H. Beggs, D.J.S. Poulter, C. Merchant, A. Bingham, S. Heinz, A. Harris, G. Wick, B. Emery, A. Stuart-Menteth, P. Minnett, B. Evans, D. Llewellyn-Jones, C. Mutlow, R. Reynolds, H. Kawamura, and N. Rayner, 2007. The GODAE high resolution sea surface temperature pilot project (GHRSSST-PP). *Bulletin of American Meteorological Society*, 88: 1197–1213.
- Fairall, C.W., E.F. Bradley, J.S. Godfrey, G.A. Wick, J.B. Edson, and G.S. Young, 1996. Cool-skin and warm-layer effects on SST. *Journal of Geophysical Research*, 101: 1295-1308.
- Gentemann, C.L., C.J. Donlon, A. Stuart-Menteth, and F. Wentz, 2003. Diurnal signals in satellite SST measurements. *Geophysical Research Letters*, 30(3): 1140, doi: 10.1029/2002GL016291.
- Gentemann, C.L., 2007. Diurnal warming at the ocean surface. Ph.D. Dissertation, University of Miami, 163pp.
- Gentemann, C.L. and P.J. Minnett, 2008. Radiometric measurements of ocean surface thermal variability. *Journal of Geophysical Research*, 113, C08017, doi: 10.1029/2007JC004540.
- Horrocks, L.A., B. Candy, T.J. Nightingale, R.W. Saunders, A. O'Carroll, and A.R. Harris, 2003. Parameterizations of the ocean skin effect and implications for satellite-based measurement of SST. *Journal of Geophysical Research*, 108(C3): 3096, doi:10.1029/2002JC001503.
- Ignatov, A., B. Petrenko, N. Shabanov, Y. Kihai, P. Dash, and X. Liang, 2010. GOES-R Advanced Baseline Imager (ABI) algorithm theoretical basis document for sea surface temperature. NOAA NESDIS Center for Satellite Applications and Research.
- Kramar, M., A. Ignatov, B. Petrenko, Y. Kihai, and P. Dash, 2016. Near Real Time SST retrievals from Himawari-8 at NOAA using ACSPO system. *Proceedings SPIE 9827*, Ocean Sensing and

Monitoring VIII, 98270L.

- McClain E.P., W.G. Pichel, and C.C. Walton, 1985. Comparative performance of AVHRR-based multichannel sea surface temperature. *Journal of Geophysical Research*, 90: 3655-3661.
- McMillin, L.M., 1975. Estimation of SSTs from two infrared window measurements with different absorption. *Journal of Geophysical Research*, 80: 5113–5117.
- Minnett, P.J., 2003. Radiometric measurements of skin SST: the competing roles of the diurnal thermocline and the cool skin. *International Journal of Remote Sensing*, 24: 5033-5047.
- Murray, J.M., M.R. Allen, C.J. Merchant, A.R. Harris, and C.J. Donlon, 2000. Direct observations of skin-bulk SST variability. *Geophysical Research Letters*, 27: 1171–1174.
- Nardielli, B.B., S. Marullo, and R. Santoleri, 2005. Diurnal variations in AVHRR SST fields: A strategy for removing warm layer effects from daily images. *Remote Sensing of Environment*, 95: 47-56.
- Petrenko, B., A. Ignatov, N. Shabanov, and Y. Kihai, 2011. Development and evaluation of SST algorithms for GOES-R ABI using MSG SEVIRI. *Remote Sensing of Environment*, 115: 3647-2658.
- Petrenko, B., A. Ignatov, Y. Kihai, and A. Heidinger, 2010. Clear-Sky Mask for the Advanced Clear-Sky Processor for Oceans, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 27(10): 1609-1623.
- Prabhakara, C., G. Dalu, and V.G. Kunde, 1974. Estimation of SST from remote sensing in the 11-13 μm window region. *Journal of Geophysical Research*, 79: 5039-5044.
- Robinson, I.S., N.C. Wells, and H. Charnock, 1984. The sea surface boundary layer and its relevance to the measurement of SST by airborne and spaceborne radiometers. *International Journal of Remote Sensing*, 5(1), 19-45
- Saunders, P.M., 1967. Aerial measurement of SST in the infrared. *Journal of Geophysical Research*, 72: 4109-4117.
- Stuart-Menteth, A.C., I.S. Robinson, and P.G. Challenor, 2003. A global study of diurnal warming using satellite-derived SST. *Journal of Geophysical Research*, 108: 3155, doi:10.1029/2002JC001534.
- Tanashi, S., H. Kawamura, T. Takahashi, and H. Yusa, 2003. Diurnal variations of SST over the wide-ranging ocean using VISSR onboard GMS. *Journal of Geophysical Research*, 108: 3216, doi:10.1029/2002JC001313
- Walton, C.C., W.G. Pichel, J.F. Sapper, and D.A. May, 1998. The development and operational application of nonlinear algorithms for the measurement of sea surface temperatures with NOAA polar-orbiting environment satellites. *Journal of Geophysical Research*, 103(C12): 27999-28012.
- Wick, G., J. Bates, and D. Scott, 2002, Satellite and skin-layer effects on the accuracy of SST measurements from the GOES satellites. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(11): 1834-1847.