



해수면온도
알고리즘 기술 분석서

Code: NMSC/SCI/ATBD/SST
Issue: 1.0 Date:2012.12.21
File: NMSC-SCI-ATBD-SST_v1.0.hwp
Page: 41



국가기상위성센터
National Meteorological Satellite Center

해수면온도
(SST: Sea Surface Temperature)
알고리즘 기술 분석서
(SST-v1.0)

NMSC/SCI/ATBD/SST, Issue 1, rev.0
2012.12.12



해수면온도
알고리즘 기술 분석서

Code: NMSC/SCI/ATBD/SST
Issue: 1.0 Date:2012.12.21
File: NMSC-SCI-ATBD-SST_v1.0.hwp
Page: 41

REPORT SIGNATURE TABLE

Function	Name	Signature	Date
Prepared by			
Reviewed by			
Authorised by			



해수면온도
알고리즘 기술 분석서

Code: NMSC/SCI/ATBD/SST
Issue: 1.0 Date:2012.12.21
File: NMSC-SCI-ATBD-SST_v1.0.hwp
Page: 41

DOCUMENT CHANGE RECORD

Version	Date	Pages	Changes

차 례

1. 개요
2. 배경 및 목적
 - 2.1. 해수면온도 산출 방법의 물리적 배경 및 한계
 - 2.2. CMDPS 산출물로서의 중요성 및 활용 목적
3. 알고리즘
 - 3.1. 이론적인 배경 및 근거
 - 3.2. 산출방법
 - 3.3. 산출과정
 - 3.3.1. 단계별 산출과정 개요
 - 3.3.2. 일치점 자료
 - 3.3.3. 구름화소 제거과정
 - 3.3.4. 해수면온도 계수 유도
 - 3.3.5. 해수면온도 계산
 - 3.3.6. 해수면온도 합성장 계산
 - 3.3.7. 복사전달모델에 기초한 해수면온도 계수
 - 3.3.8. 해수면온도 Quality Flag 선정
 - 3.4. 검증
 - 3.4.1. 검증방법
 - 3.4.2. 검증자료
 - 3.4.3. 시공간일치방법
 - 3.4.4. 검증결과분석
4. 산출결과 해석
5. 천리안 위성 발사후 COMS화 및 알고리즘 개선
 - 5.1. SST 계수 COMS화
 - 5.2. 알고리즘 개선
 - 5.3. COMS화 후 검증결과
6. 문제점 및 개선 가능성
7. 참고문헌

List of Tables

- Table 1 : SST equation formula used for the derivation of regression coefficients. The temperatures T3, T4, T5 are the brightness temperatures of channels $3.75\mu\text{m}$, $10.8\mu\text{m}$, and $12.0\mu\text{m}$, respectively.
- Table 2 : Information of collocation database on area, period, data numbers over the East Asian seas.
- Table 3 : Information of collocation database on area, period, data numbers for the full disk region.
- Table 4 : Contents for eliminating cloudy or partly-cloudy pixel of daytime COMS data.
- Table 5 : Contents for eliminating cloudy or partly-cloudy pixels of nighttime COMS data.
- Table 6 : Daytime SST Coefficients for MTSAT-1R data over the East Asian Seas.
- Table 7 : Nighttime SST Coefficients for MTSAT-1R data over the East Asian Seas.
- Table 8 : Daytime SST Coefficients for MTSAT-1R data over the full disk region.
- Table 9 : Nighttime SST Coefficients for MTSAT-1R data over the full disk region.
- Table 10 : Coefficients of split window MCSST using the response function of each channel of MTSAT-1R and radiative transfer model (MODTRAN 4). SZA is satellite zenith angle.
- Table 11 : Coefficients of daytime SST equations using the response function of each channel of MTSAT-1R and radiative transfer model (MODTRAN 4). SZA is satellite zenith angle.
- Table 12 : Coefficients of nighttime SST equations using the response function of each channel of COMS and radiative transfer model (MODTRAN 4). SZA is satellite zenith angle.
- Table 13 : Information on available oceanic in-situ surface temperatures.
- Table 14 : Coefficients of MCSST equations using each channel of COMS and GTS buoy data.
- Table 15 : Statistical comparison between RTM based(old) and newly calculated coefficients

List of Figures

- Figure 1 : Conceptual diagram for SST estimation process.
- Figure 2 : Location of collocation data points between MTSAT-1R data and GTS drifter data at the region of the East Asia.
- Figure 3 : Location of collocation data points between MTSAT-1R data and GTS drifter data for the daytime and nighttime MTSAT-1R passes over the full disk region.
- Figure 4 : Threshold for the $11-12\mu\text{m}$ test as a function of the $11\mu\text{m}$ BT. Curve a) is for the nadir view within 50 km of the sub-satellite track, and curve b) the same for the corresponding forward view.
- Figure 5 : An example of sea surface temperature distribution estimated from the split window MCSST equation for MTSAT-1R data (31 October 2005)
- Figure 6 : (a) Visible image, (b) IR image, and (c) cloud mask image of MTSAT 1R full disk data on 31 October 2005.
- Figure 7 : Examples of SST images of AQUA/AMSR-E used for SST composite process.
- Figure 8 : An SST composite image based on simple average method
- Figure 9 : SST image from OI composite technique using 8×8 window ($L_x=180\text{km}$, $L_y=180\text{km}$)
- Figure 10 : An image of SST errors from OI composite technique using 8×8 window ($L_x=180\text{km}$, $L_y=180\text{km}$)
- Figure 11 : Positions of TIGR data points colored according to an observation month.
- Figure 12 : Response function of MTSAT-1R channels 2, 3, 4, and 5.
- Figure 13 : Comparison of insitu SST and (a) daytime and (b) nighttime SST estimated based on RTM and TIGR data.
- Figure 14 : Monthly sea surface temperature climatology on February, May, August, and November using 9km pathfinder SST dataset of NASA/JPL.
- Figure 15 : SST quality flags.
- Figure 16 : Comparison of buoy SST and SST estimated from MTSAT-1R.
- Figure 17 : Latitudinal variation of RMS errors of MTSAT-1R SST to buoy measurements.

Figure 18 : Comparison of GTS buoy SST and SST estimations using (a) daytime and (b) nighttime MTSAT-1R data.

Figure 19 : SST errors as a function of wind speed at low latitude area within 10 degrees from the equator.

Figure 20 : Frequency probability (%) of low wind speed (<6m/s) for the period of 1999~2005.

Figure 21 : Comparison of GTS buoy SST and SST estimations using (a) daytime and (b) nighttime COMS data

Figure 22 : Comparison of SST estimations using (a) RTM based coefficients and (b) newly calculated coefficients.

Figure 23 : Schematic plots of vertical temperature profiles of the layer within a few meters from the sea surface according to daytime and nighttime. Oceanic instruments of satellite-tracked surface drifting buoy and CTD measures sea surface temperatures at different depth.

Figure 24 : Sea surface temperature averaged for (a) daytime ascending passes and (b) nighttime descending passes of AQUA/AMSR-E in August, 2002. (c) is the average map of SST difference between daytime and nighttime SST for the same day and (d) shows the maximum of diurnal difference of each day for a month of August in 2002.

List of Acronyms

ARGO	Array for Real-time Geostrophic Oceanography
COMS	Communication, Ocean, and Meteorological Satellite
CTD	Conductivity, Temperature, and Depth
IR	Infrared
IOT	In-Orbit Test
JPL	Jet Propulsion Laboratory
MTSAT-1R	Multi-functional Transport Satellite 1 Replacement
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NGSST	New Generation Sea Surface Temperature
NOAA	National Oceanic & Atmospheric Administration
MCSST	Multi-Channel Sea Surface Temperature
NESDIS	National Environmental Satellite, Data, and Information Service
OI	Optimum Interpolation
PFSST	PathFinder Sea Surface Temperature
RTM	Radiative Transfer Model
SST	Sea Surface Temperature
TIGR	TOVS Initial Guess Retrieval
TOVS	TIROS-N Operational Vertical Sounder

1. 개요

급변하는 전지구규모의 기후변동을 이해하고 예측하기 위해서 과거 그 어느 때보다 해양의 역할이 강조되고 있다. 기상예보를 보다 정확하게 하려면 우수한 성능을 가진 컴퓨터 수치 모델도 중요하지만 모델에 입력되는 해양-대기 자료는 더욱 중요하다. 바다 위를 지나온 대기는 바다와 열, 수증기, 운동량 등을 교환함으로써 변형되기 때문에 보다 정확하고 정밀한 고해상도의 해양 자료가 필요하다. 다양한 해양 자료들 중에서 특히 해수면온도는 해양과 대기의 연결고리 역할을 하기 때문에 가장 중요한 변수들 중의 하나이다. COMS 정지위성은 30분마다 자주 관측하므로 구름 때문에 가려져서 볼 수 없었던 상당히 넓은 해역의 해수면온도장을 파악할 수 있게 해준다. 이러한 빈번한 관측은 NOAA 위성과 같은 극궤도위성 자료의 단점을 보완하고 전체적으로 해수면온도장의 정확도를 향상시킬 수 있는 기회를 제공한다. COMS 위성의 해수면온도 알고리즘은 기본적으로 열적외 밴드의 자료와 실제 해양 관측치를 비교하고 경험적 회귀분석을 통하여 해수면온도 공식에서 필요한 계수들을 생산한다. 이에 필요한 구름제거 과정은 해수면온도 계산에 앞서 이미 이루어지고 있는 구름탐지 알고리즘의 결과를 활용한다. 아울러 구름 과정에서 실패할 가능성을 고려하여 해수면온도 계산 과정에서도 비이상적으로 저온이거나 고온의 값으로 평가될 때에는 자체적으로 flag를 주도록 하였다. 후처리 과정에서는 계산된 해수면온도 영상자료들을 일정기간 동안 모아서 기간 평균된 합성장을 생산한다. 이후 이 문서는 해수면온도 알고리즘의 이론적 배경과 근거, 산출방법, 검증 방법, 시공간 일치자료 생성방법, 그리고 검증 결과로 구성되어 있다.

2. 배경 및 목적

2.1. 해수면온도 산출 방법의 물리적 배경 및 한계

해수면온도는 기후감시, 수치예보모델의 입력자료, 다양한 해양 현상들을 이해하는데 이용되므로 가능한 높은 정확도를 가지도록 산출되어야 한다. 인공위성 자료로부터 해수면온도를 산출하는 방법에는 해양실측 자료와 비교하여 경험적으로 계수들을 산출하는 방법도 있고, 해양 실측치 대신 수치모델에서 나온 해수면온도 자료를 활용하는 방법도 있다. 또 레인존데 관측 자료를 입력 자료로 한 복사전달모델을 수행하고, COMS 기상탐재체의 적외채널 반응함수를 이용하여 이론적인 휘도온도를 구한 후, 복사전달모델의 계산에서 이용한 해수면온도 자료를 이용하여 회귀계수를 구하기도 한다.

복사전달모델을 이용한 이 방법은 결국 해양의 피층의 온도를 산출하게 되는데 해양의 표층온도는 깊이와 시간에 따라 변화가 심하다. 인공위성이 관측한 해양의 복사량은 수 μ m 깊이의 해양 피층(skin)에서 나온 것이기 때문에 실제 해양-대기의 상호작용에 관여하

는 표면하 bulk 온도와 시간과 요인에 따라 상당한 차이가 있다. 그리고 해면에서 방출된 복사량도 대기를 통과하면서 얇은 구름, 수증기, 안개 등에 의하여 흡수되어 실제 해양의 복사량과 다른 결과를 가져온다. 따라서 이러한 대기의 흡수효과와 해양의 깊이에 따른 온도변화를 고려하기 위하여 복사모델에 의존하는 방법보다는 해양의 bulk 온도를 적외채널들의 휘도온도 차이와 비교하는 경험적 다중회귀분석법(MCSST; Multi-Channel SST)을 흔히 선택하고 있다. 해양 표층의 수온구조와 대기 구조가 낮과 밤에 따라 다르기 때문에 주야간을 구별하여 해수면온도 산출계수를 생산한다.

Prabhakara et al.(1974)가 인공위성에서 관측된 적외영역의 자료들로 부터 해수면온도를 추정할 수 있는 다중채널회귀분석법(MCSST; Multi-Channel Sea Surface Temperature)의 이론적 배경을 처음으로 제안한 이후, 이 방법을 이용하여 McMillin(1975), McClain(1985) 등이 인공위성 자료로부터 해수면온도를 산출하기 시작하였다. 그 뒤 Barton(1985)이 인공위성 센서에 도달한 해면복사량은 해면과 위성 사이에 존재하는 대기를 통과하는 경로에도 영향을 받는다는 사실을 지적하면서, 산출식에 위성천정각(Satellite zenith angle)을 도입할 것을 제안하였고, 이후 미국 NOAA/NESDIS는 해수면온도 산출식에 위성천정각을 고려하여 대기보정을 하는 기본적 골격을 갖추게 되었다. 이후 Walton(1988)과 Walton et al.(1998)에 의해 비선형 알고리즘(NLSST; Non-linear SST)의 이론적 배경이 제안되고 아래 제시된 식과 같이 오늘까지 활용되어 오고 있다. 또한 NASA/JPL에 의하여 대기 중의 수증기 함량의 다소(split window BT difference 0.7을 기준함)에 따라 서로 다른 계수들을 유도하여 쓰는 PFSST(Path Finder SST) 방법이 활용되고 있다.

COMS 해수면온도 알고리즘은 기본적으로 다중채널 회귀분석법에 기초하고 있으며, 위성 초기 운용기간에는 COMS 반응함수와 복사전달모델을 활용하여 산출한 공식을 사용하도록 구성되어 있다. 이 경험적 회귀방법은 실제 해양관측 자료와 비교한 collocation 자료의 개수와 정확도에 크게 의존한다. 가능한 많은 해양 관측 자료를 수집하여야 하는 단점이 있고, 일치된 자료가 없는 해역의 경우 그 해역의 특성은 적절히 반영되지 못하는 단점이 있다. 특히 관심 해역이 계절적으로 변동이 심할 경우에는 적어도 1년 정도 자료를 수집하여야 산출되는 해수면온도의 정확도는 향상될 수 있다.

2.2. CMDPS 산출물로서의 중요성 및 활용 목적

해수면온도는 해양의 가장 기본적인 변수이므로 COMS 해수면온도는 실시간 고해상도로 해양의 상태를 감시할 수 있다. 실시간 해수면온도 분포를 이용하여 장단기 해양의 변동성을 파악할 수 있으며, 해양-대기 상호작용에 대한 이해를 증진시킬 수 있다. 특히 지구환경 변화 및 기후 변화 감시와 예측을 위한 고해상도 해수면온도장의 실시간 입력 자료를 생산하여 자료동화에 활용함으로써 기상/기후 예보 예측력을 향상시킨다. 또한 빈번하게 발생하고 있는 예측이 어려운 악기상들의 요인을 파악하고 해양-대기-육상의 다중작용을 이

해하는데 도움이 된다.

3. 알고리즘

3.1. 이론적인 배경 및 근거

1970년대 이후로 미국의 NESDIS는 전구규모 해수면온도(SST)를 생산하고 운영하여 왔다. NOAA 7호가 발사 이전까지 해수면온도(SST) 알고리즘은 11 μ m 휘도온도를 기반으로 생산되었다. NOAA 9호에는 split window 채널들이 있었으나, NOAA 10호의 경우에 12 μ m 채널이 없어서 11 μ m 단일채널을 사용하여 다음과 같이 대략 산출하였다.

(1)

이후 1981년 NOAA 7호가 발사되었는데 이 위성은 11, 12, 3.7 μ m채널로 구성이 되었고 다중 채널을 사용한 좀 더 정확한 해수면온도 알고리즘이 개발되기 시작하였다. Prabhakara et al.(1974)가 인공위성 적외영역의 자료들을 이용해 해수면온도를 추정할 수 있는 다중채널회귀분석법(MCSST; Multi-Channel Sea Surface Temperature)의 이론적 배경을 처음으로 제안하였다. 이 방법을 이용하여 McMillin(1975), McClain(1985) 등이 인공위성 자료로부터 해수면온도를 다음과 같은 알고리즘으로 산출하기 시작하였다.

$$SST = T_i + \gamma(T_i - T_j) \quad (2)$$

여기서 T_i 에 의해 주어지고 γ 는 수증기 흡수계수이다.

그 후 Barton(1985)이 인공위성 센서에 도달한 해면방사량은 대기통과 경로에 의존한다는 사실을 지적하면서, 산출식에 위성천정각(Satellite zenith angle)을 도입할 것을 제안하였고, 이후 미국 NOAA/NESDIS는 해수면온도 산출식에 위성천정각을 고려하여 대기 보정을 하는 다음과 같은 MCSST의 기본적인 골격을 갖추게 되었다.

$$SST = a + bT_i + c(T_i - T_j) + d(T_i - T_j)(\sec\theta - 1) \quad (3)$$

그런데 대기가 매우 습할 때에는 γ 값이 일정하지 않게 되어 SST의 오차가 커지게 된다. Walton(1988)은 이러한 의 비선형성으로 발생하는 문제를 해결하기 위하여 아래와 같은 CPSST (Cross Product Sea Surface Temperature) 알고리즘을 개발하였다.

(4)

여기서

이다.

이 알고리즘을 좀 더 보완한 것이 Walton et al(1998)의 NLSST(Non-Linear Sea Surface Temperature) 알고리즘이고 다음과 같이 표현된다.

(5)

이 알고리즘에서 표면온도 는 정확히 모르기 때문에 split window MCSST로 대체하거나 정기적으로 예보되는 모델의 출력 자료를 사용하기도 한다. 현재 개발된 COMS 알고리즘에서는 MCSST 방법을 기본 방법으로 채택하고 있다.

NASA/JPL은 대기 중의 수증기 함량의 다소에 따라 서로 다른 계수들을 유도하여 쓰는 PFSST(Path Finder SST) 방법을 개발하여 활용하고 있다. PFSST 알고리즘은 NLSST와 매우 유사하나, 대기의 습한 정도에 따라 값이 0.7을 기준으로 서로 다른 알고리즘을 사용하고 있다.

(6)

이 알고리즘에 있는 각 계수들은 지속적인 해양-위성 Matchup database를 바탕으로 매월 다르게 사용되고 있다. 이렇게 유도된 계수들이 안정적으로 활용되기 위해서는 주어진 기간 동안 상당히 많은 해양 자료가 요구된다.

사용자 요구사항에 명시된 바와 같이 COMS 해수면온도를 각 영상은 물론 1일, 5일, 10일, 한 달 평균된 해수면온도장을 생산하여야 한다. 해수면온도 합성장을 만드는 데는 여러 가지 방법을 사용할 수 있으나, 그 중에서 가장 단순한 평균 방법과 최근에 와서 가장 많이 활용되고 있는 OI(Optimal Interpolation) 기법이 있다. 우선 주어진 화소의 시계열 자료를 이용하여 시간에 대하여 평균을 구하는 방법은 다음과 같이 표현할 수 있다.

(7)

다른 하나는 아래와 같은 3-D OI 방법을 사용하는 것인데, 관련되는 이론적 배경은 다음과 같다. 관측치 y 는 관측모델 H 와 관측에러 n 으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

(8)

여기서 흔히 가정하듯이 관측오차나 x 와 n 사이에 상관성이 없다고 가정하면,

(9)

가 된다. x 와 n 의 covariance 행렬은 이다. OI는 일반적으로 공분산의 최소를 만족하는 해 X 를 구하는 것이므로 다음과 같은 행렬 P 의 대각 성분을 최소화하는 조건을 만족하는 X 를 구하면 된다.

(10)

이 식의 해는

(11)

가 된다. 이를 다른 형태로 표현하면

(12)

로 표현할 수 있고,

(13)

를 만족하는 X 도 동일한 해가 된다. 이 OI 방법은 객관적으로 오차를 최소화할 수 있는 방법이긴 하지만 역행렬과 공분산행렬 계산 등 상당한 메모리가 요구되고, 계산 과정에서 현상의 시공간 스케일에 따라 생산된 온도장이 상당히 평활화(smooth)될 수 있다.

위의 식에서 Δx 에 해당하는 행렬을 구하여 SST 시공간 합성장으로 활용하였다. 식 (12) 는 Bretherton et al.(1976)의 방법으로 아래와 같이 표현할 수 있다. 식 (14)의 A는 관측 자료벡터의 자기 상관(autocorrelation) 행렬이고, Δt 는 식 (15)과 같이 계산한다.

$$(14)$$

$$(15)$$

여기서 Δx 와 Δt 는 각각 동서방향과 남북방향의 거리이고, Δt 는 시간이다. 합성하고자 하는 화소 주변의 자료에 OI 방법을 사용할 때, 일정 시간 간격 Δt 와 공간 규모 Δx 를 설정해 주어야 한다. 각 규모는 각 방향으로의 해양 현상의 규모(decorrelation scale)에 해당한다. 동서, 남북방향의 공간 규모를 180 km로 일정하게 주면서, 내삽할 시공간 윈도우 영역을 전체 북태평양에서 이동하면서 합성장을 생산한다.

3.2. 산출방법

해수면온도 산출식의 계수들은 해양자료-위성자료간의 matchup 자료를 이용하여 경험적 회귀분석을 통해 얻는다. 사용한 알고리즘은 Table 1에 각각 나타내었다. T3, T4, T5는 COMS 채널들(SWIR3.75 μ m, IR10.8 μ m, IR12.0 μ m)의 휘도온도들을 각각 나타낸다. 구름 탐색과정에서 clear로 판정된 화소에 대해서 COMS channel 2(SWIR 3.75 μ m), channel 4(IR10.8 μ m), channel 5(IR12.0 μ m)의 휘도온도를 이미 산출된 해수면온도 계수를 이용하여 Table 1의 식에서와 같은 연산을 통하여 해수면온도를 계산한다. 사용할 수 있는 계수들은 비상시 발생할 수 있는 채널 자료들의 소실 등을 고려하여 다양하게 산출하여 두었다. 이상의 방법에서 3.7 μ m 자료에 문제가 있을 경우는 dual, triple window 방법은 모두 사용할 수 없다(Bernstein, 1982). 현재 default로 정해진 방법은 split window MCSST 방법이다. MTSAT-1R의 경우 초기 운용기간에 위성 자료와 수치모델 자료를 일치시켜 매일 해수면온도 산출 계수를 조정하였다. NASA/JPL Pathfinder에서는 PFSST를 활용하고 있는데 IR channel의 차를 0.7 $^{\circ}$ C 기준으로 각각 다른 알고리즘을 사용하여 SST를 산출한다. 그런데 이 방법은 실시간으로 적용하고 있지 않으며, 자료 수신과 해양자료 수집 후 한 달 자료들을 모아서 계수를 만든다. PFSST 생산물 목록에 보면 계수들이 월 단위로 바뀌고 있다. COMS 해수면온도 알고리즘은 IOT 기간 동안 수집된 해양 자료들을 이용하여 경험적 회귀분석법을 사용하여 계수를 구한 뒤 이후 이 계수들을 해수면온도 산출시 공식에 대입하여 사용한다.

Table 1. SST equation formula used for the derivation of regression coefficients. The temperatures T3, T4, T5 are the brightness temperatures of channels 3.75 μ m, 10.8 μ m, and 12.0 μ m, respectively.

Method	Window	Formular	Condition
Single channel SST without satellite zenith angle correction	single channel	$SST3 = C1 \cdot T3 + C2$	-
		$SST4 = C1 \cdot T4 + C2$	-
		$SST5 = C1 \cdot T5 + C2$	-
Multi-channel SST without satellite zenith angle correction	dual	$SST34 = C1 \cdot T4 + C2 \cdot (T3 - T4) + C3$	-
	split	$SST45 = C1 \cdot T4 + C2 \cdot (T4 - T5) + C3$	-
	triple	$SST345 = C1 \cdot T4 + C2 \cdot (T3 - T5) + C3$	-
Multi-channel SST with satellite zenith angle correction	dual	$MCSST34 = C1 \cdot T4 + C2 \cdot (T3 - T4) + C3 \cdot (T3 - T4) \cdot (\text{secsza} - 1) + C4$	-
	split	$MCSST45 = C1 \cdot T4 + C2 \cdot (T4 - T5) + C3 \cdot (T4 - T5) \cdot (\text{secsza} - 1) + C4$	-
	triple	$MCSST345 = C1 \cdot T4 + C2 \cdot (T3 - T5) + C3 \cdot (T3 - T5) \cdot (\text{secsza} - 1) + C4$	-
Multi-channel Non-linear SST	dual	$NLSST34 = C1 \cdot T4 + C2 \cdot MCSST45 \cdot (T3 - T4) + C3 \cdot (\text{secsza} - 1) + C4$	-
	split	$NLSST45 = C1 \cdot T4 + C2 \cdot MCSST45 \cdot (T4 - T5) + C3 \cdot (T4 - T5) \cdot (\text{secsza} - 1) + C4$	-
	triple	$NLSST345 = C1 \cdot T4 + C2 \cdot MCSST45 \cdot (T3 - T5) + C3 \cdot (\text{secsza} - 1) + C4$	-
PFSST (PathFinder SST)	split	$PFSST1 = C11 \cdot T4 + C12 \cdot MCSST45 \cdot (T4 - T5) + C13 \cdot (T4 - T5) \cdot (\text{secsza} - 1) + C14$	$T4 - T5 < 0.7$
		$PFSST2 = C21 \cdot T4 + C22 \cdot MCSST45 \cdot (T4 - T5) + C23 \cdot (T4 - T5) \cdot (\text{secsza} - 1) + C24$	$T4 - T5 > 0.7$

3.3. 산출과정

3.3.1. 단계별 산출과정 개요

COMS SST 알고리즘은 시기적으로 나누어 보면 IOT 기간 동안에 이루어질 해수면온도 산출의 전처리 과정들과 IOT 기간 후의 실시간 처리과정, 그리고 후처리 과정으로 나눌 수 있다(Fig. 1). 전처리 과정에서는 해양 관측 자료들을 수집하고 해양자료-위성자료 matchup database를 생산하고, 이를 이용하여 해수면온도 계수를 산출한다. IOT 기간 중에 해수면온도 영상자료가 필요할 경우를 대비하여 COMS 발사 전 COMS 채널의 반응함수가 정해지면 이 반응함수와 복사전달모델, 그리고 TIGR 자료를 이용하여 각 채널이 관측하게 될 휘도온도값을 이론적으로 산출하고 이 값들을 이용하여 미리 해수면온도 계수를 산출하여 둔다. IOT 기간에는 이 계수를 활용한다. IOT 기간 이후 COMS 자료가 실시간으로 수신될 때에는 수신됨과 동시에 실제 해양관측자료를 이용하여 유도한 계수를 이용하여 해수면온도를 실시간으로 계산한다. 다음으로 후처리 과정에서는 일정 시간마다 해수면온도 영상자료들을 묶어서 사용자가 요구하는 기간 합성장을 산출한다.

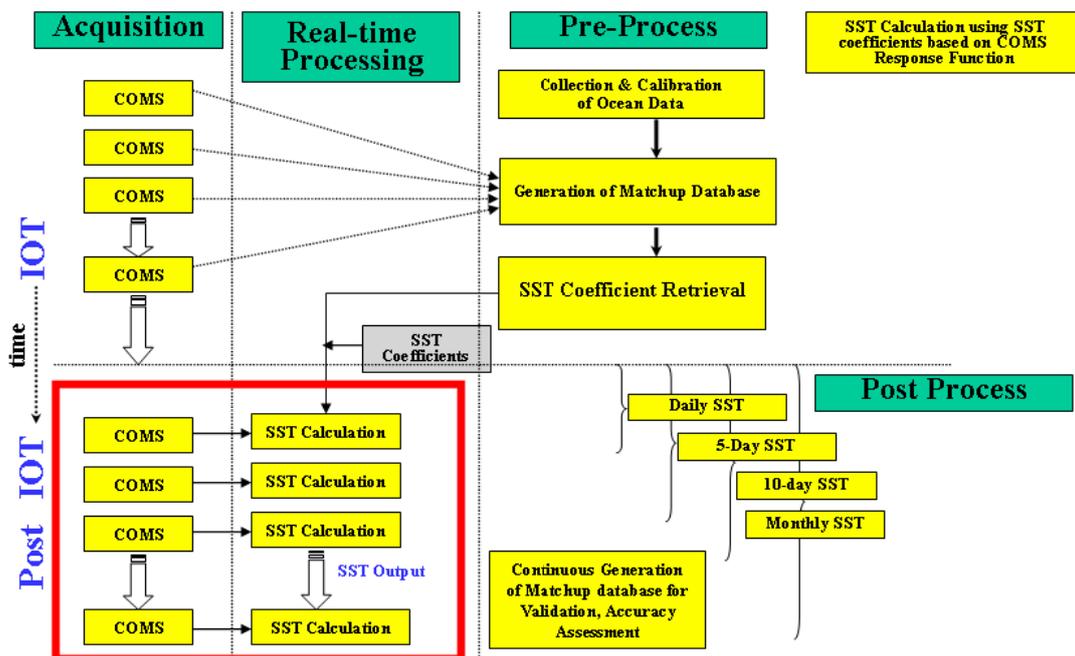


Fig. 1. Conceptual diagram for SST estimation process.

COMS 적외채널들의 밝기 온도 자료로부터 해양 관측치를 이용하여 경험적관계식으로 해수면온도를 계산하는데, 기존의 여러 가지 해수면온도 산출 알고리즘들 중에서 사용자의 편의와 필요에 따라 선택할 수 있도록 구성되어 있다. 현재 default 알고리즘은 split window MCSST이나 위성 발사 후 각 채널 자료의 문제가 발생할 수도 있으므로 이를 대

비하여 다른 알고리즘에 필요한 계수들도 생산해 두어서 사용자가 선택할 수 있도록 하였다. 해수면온도 산출식에 필요한 계수들은 실제 해양관측자료와 적외선 영역의 휘도온도 자료를 이용하여 경험적 회귀분석법을 실시하여 유도하는데, 이 방법은 정확하게 보정된 다량의 해양관측 자료가 필요하다. 인공위성추적 표층부이(drifter), ARGO 프로트, CTD 로 부터 관측한 수온 자료가 대표적이며, 연안 고정부이 자료, 외해에 계류한 해상부이 자료도 수집하여 활용할 수 있다. COMS 발사 후 3~6개월간의 초기 운용기간 동안 COMS 영역 내의 존재하는 모든 수온 자료를 수집할 수 있도록 긴밀한 협력을 사전에 구하여야 한다. 또한 각 대학 및 연구소에서 선박 관측을 실시하게 될 경우 해수표층의 수온 관측을 독려하도록 한다.

자동화로 생성된 Matchup database 외에 다른 collocation data를 추가하여 해수면온도 산출계수를 새로이 구하고 싶을 경우에는 sst_coeff.f90 routine을 다시 한 번 수행하도록 한다. 최종적으로 산출된 계수는 sst_coeff_d.out, sst_coeff_n.out 파일을 수정하여 정해진 디렉토리에 두면 이후 일련의 과정에서 이들 파일을 읽어 들어서 해수면온도 계산 과정을 수행하게 된다.

3.3.2. 일치점 자료

해수면온도 계수를 구하려면, 우선 실제 관측한 해양자료와 COMS 인공위성 자료의 Collocation matchup database를 생산하고, 이 자료들을 이용하여 여러 알고리즘들을 적용시켜야 필요한 계수들을 얻을 수 있다. 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.

실시간으로 수집이 가능한 해양 자료로는 기상청 GTS망에 올라오는 인공위성 표층부이 자료가 있다. 이 자료는 지금까지 실시간으로 체계적으로 운용되고 있기 때문에 어려움 없이 가장 안정적으로 자료를 공급 받을 수 있을 것으로 보인다.

COMS 위성은 아직 발사 전이므로 COMS 위성과 가장 유사한 MTSAT-1R 자료를 이용하여 collocation database를 시범적으로 만들어 보았다. 해양-위성 자료간의 최대 시간격차는 30분으로 주었으며, 공간격차는 위성의 지상 해상도를 고려하여 5 km로 주었다. 이러한 조건을 만족하는 자료들을 선별하여 아래와 같은 matchup database를 만들었다. 실시간으로 운용할 경우에는 일치된 자료들이 기존의 database에 자동으로 추가되도록 구성하였다.

Matchup database에는 하나의 행에 해양자료의 관측년도, 월, 일, 시, 분, 위성자료 위도, 경도, 태양천정각, 위성천정각, 위성 각 채널자료 채널 1, 2, 3, 4, 5, 중심화소에서 채널 1, 4, 5의 최소값, 최대값, 해양자료의 위도, 경도, 해양부이의 고유 id, 해양관측

Table 2. Information of collocation database on area, period, data numbers over the East Asian Seas.

Matchup Database	Area	Period	# of matchups Day	# of matchups Night
MTSAT-1R - GTS Drifter	10°S ~ 60°N 80°E ~ 180°E	2005.7 ~ 2006.6	19540	72451

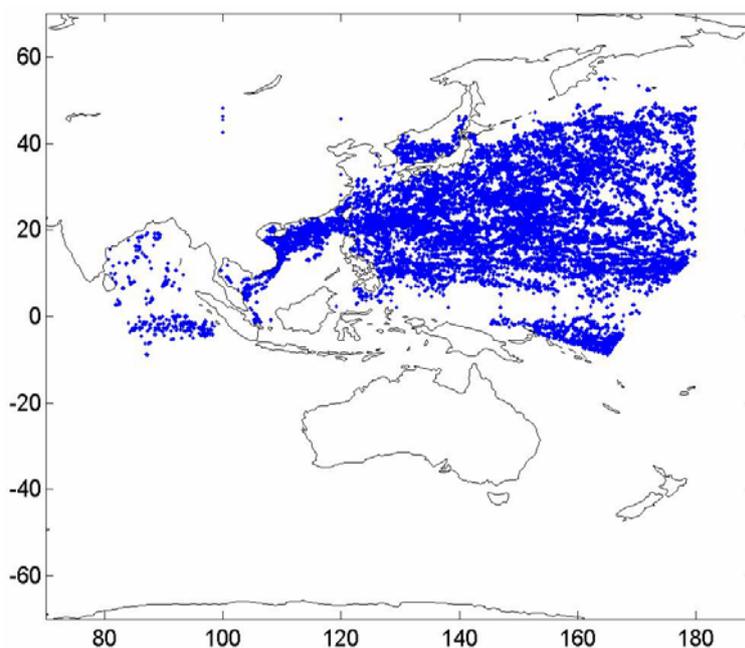


Fig. 2. Location of collocation data points between MTSAT-1R data and GTS drifter data at the region of the East Asia.

수온, 위성 구름 flag, 3x3 영역에서 각 채널의 최소값과 최대값, 표준편차값, 해양관측 깊이, 해양추정온도, 해양관측 풍향, 풍속, 대기 온도가 순차적으로 기록되도록 하였다. 이들 자료는 해수면온도식의 계수를 산출할 때도 활용되고, 산출된 해수면온도의 정확도를 평가하기 위한 기초 자료로도 활용된다. 2005년 7월부터 2006년 6월까지 MTSAT-1R 자료와 GTS Drifter 자료를 비교한 결과, 낮과 밤에 각각 19,540, 72,451개의 collocation 자료를 얻었고, Fig. 3에 Collocation point들의 위치를 나타내었다.

COMS 위성 자료 외 구름 mask, 육지 mask, 위성천정각 등이 필요하다. 일반적으로 각 화소에서 태양천정각이 주어진 값(<80°)보다 크고 작은지를 기준으로 낮과 밤을 구분하고,

Table 3. Information of collocation database on area, period, data numbers for the full disk region.

Matchup Database	Area	Period	# of matchups Day	# of matchups Night
MTSAT-1R - GTS Drifter	60°S ~ 60°N 80°E ~ 180°E	2007.9 ~ 2008.6	6,182	93,536

구분 결과에 맞추어서 주야간 계수를 활용한다. 그런데 이렇게 할 경우 하나의 영상자료에 낮과 밤의 서로 다른 계수를 사용하게 되어서 최종적으로 계산된 해수면온도 영상의 중간 부분에 공간적으로 불연속선이 생길 수 있다. 이는 마치 해양에서 남북으로 길게 뻗은 수온 전선대가 분포하고 있는 것처럼 보여서 계산된 해수면온도 자료를 수치모델 등의 입력 자료로 적절하지 않게 된다. 이러한 급작스런 공간적 해수면온도 변화는 해양-대기 모델에서 해양-대기 경계층내의 stability를 변화시켜서 기상 및 해양 변화를 초래할 수 있다. 그런데 해양에서는 해 뜬 후 2~3 시간까지는 성층이 완전하게 발달하지 않아서 동일한 알고리즘으로 전체 해역의 해수면온도를 구해도 무방할 것으로 보인다. 물론 오차는 있으나 불연속선으로 인한 문제보다는 작은 영향을 줄 것으로 생각된다. 따라서 위성의 수신 시각을 기준으로 낮과 밤 알고리즘을 구분하도록 하였다.

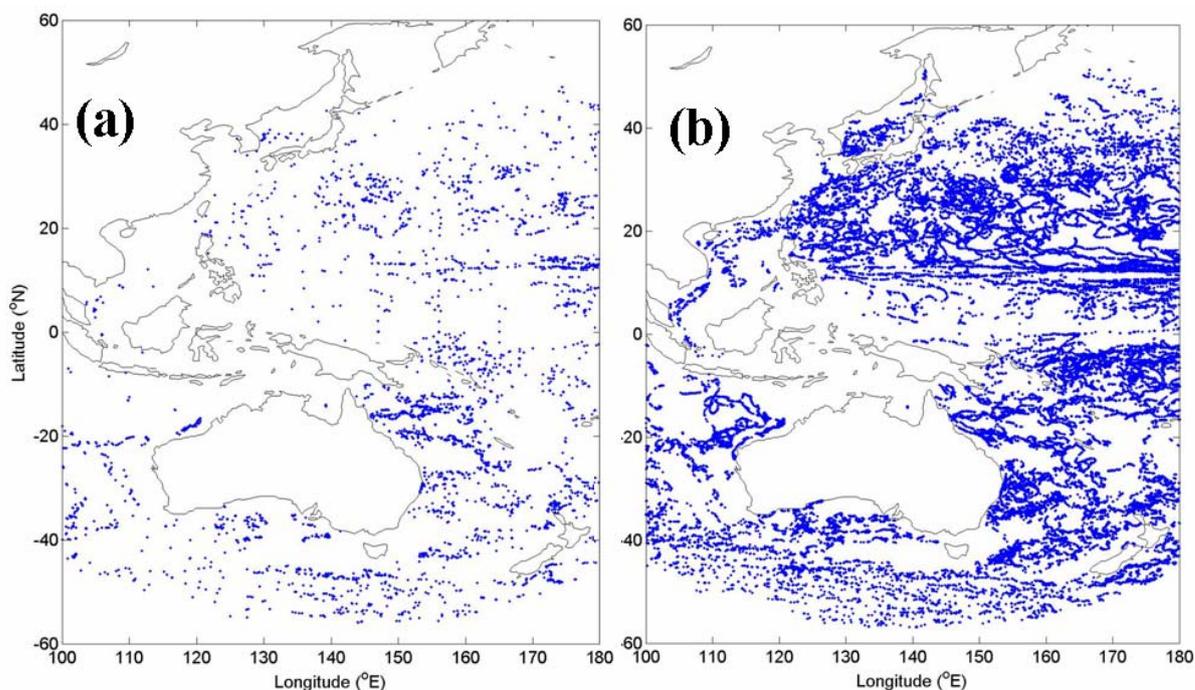


Fig. 3. Location of collocation data points between MTSAT-1R data and GTS drifter data for the daytime and nighttime MTSAT-1R passes over the full disk region.

전구 영역을 관측한 MTSAT-1R의 2007년 9월부터 2008년 6월까지 9개월 자료를 활용하여 부이 자료와 비교하여 Matchup Database를 생산하였다. Table 3과 같이 낮에 6,182개 밤에 93,536개의 일치점 자료가 생산되었다. 밤의 자료가 월등히 많은 것은 밤의 경우 가시영역의 반사도 자료가 없어서 구름 제거 과정이 완벽하지 못한 것에 기인한 것으로 판단된다. Fig. 3은 전구 영역에 관하여 얻은 모든 일치점 자료들의 위치를 나타낸다.

3.3.3. 구름화소 제거과정

일치점 자료를 이용하여 구름에 의해 오염된 화소들을 제거하기 위하여 Table 4, Table 5와 같은 과정을 거치도록 하였다. 비 이상적인 화소를 제거하기 위하여 COMS 채널 반응함수를 사용하여 산출한 해수면온도 추정치에 대한 제한범위를 두었으며, 해수면온도 기후 평균장과의 비교를 통해 크게 저평가되는 화소도 제거하였다.

Cirrus에 의해 오염된 화소를 제거하기 위하여 Thin Cirrus 동적 테스트 단계를 채택하였다. 여기에서 활용한 Thin Cirrus Test는 Fig. 4와 같다. Thin Cirrus 제거를 위하여 채널 4와 5의 휘도온도 차이에 한계값을 주게 되는데 일정한 값을 사용하지 않고 channel 4의 값에 따라 1°C에서 6°C까지 변하는 동적 경계치를 적용하였다. 사용한 식은 아래 (16)과 같다. 만약 channel 4의 온도가 20°C이면 한계치를 6°C로 일정하게 준다.

$$\text{ch45_diff_threshold} = 0.0032 * (\text{Tir1})^2 + 0.0996 * \text{Tir1} + 1.6071 \quad (16)$$

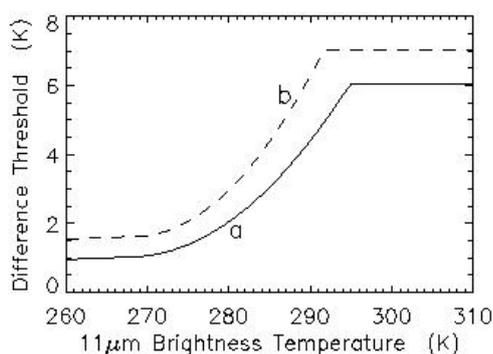


Fig. 4. Threshold for the 11-12µm test as a function of the 11µm BT. Curve a) is for the nadir view within 50 km of the sub-satellite track, and curve b) the same for the corresponding forward view.

Table 4. Contents for eliminating cloudy or partly-cloudy pixel of daytime COMS data.

조건	조건 내용	한계값 A
1	channel 1 반사도가 6보다 작은가 ?	<6
2	3x3영역 내에서 채널1의 반사도의 표준편차값이 0.5보다 작은가 ?	<0.5℃
3	3x3영역 내에서 채널4의 휘도온도의 표준편차값이 1보다 작은가 ?	<1℃
4	3x3영역 내에서 채널5의 휘도온도의 표준편차값이 1보다 작은가 ?	<1℃
5	위성천정각이 65보다 작은가 ?	<65
6	채널 4 중심 화소의 값이 -3℃보다 큰가 ?	>-3℃
7	채널 4 중심 화소의 값이 -3.5℃보다 큰가 ?	>-3.5℃
8	3x3영역 내에서 채널1 반사도의 최대값에서 최소값을 뺀 차이가 3보다 작은가 ?	<3
9	3x3영역 내에서 채널4 휘도온도의 최대값에서 최소값을 뺀 차이가 3보다 작은가 ?	<3℃
10	3x3영역 내에서 채널5 휘도온도의 최대값에서 최소값을 뺀 차이가 3보다 작은가 ?	<3℃
11	채널4에서 채널 5 휘도온도값을 뺀 값이 0보다 크고 6보다 작은가 ?	0℃< <6℃
12	관측된 부이의 온도가 -2보다 크고 35보다 작은가 ?	-2℃< <35℃
13	RTM 계수를 사용하여 구한 sst_guess에서 부이 온도를 뺀 값이 -4℃보다 큰가 ?	>-4℃
14	부이온도와 기후학적 평균값의 차이가 3℃보다 작은가 ?	<3℃
15	RTM 계수를 사용하여 구한 sst_guess에서 기후학적 수온 평균을 뺀 값이 -4℃보다 큰가 ?	>-4℃
16	채널4와 5의 차이가 동적 Cirrus 경계값보다 작은가 ?	<

Table 5. Contents for eliminating cloudy or partly-cloudy pixels of nighttime COMS data

조건	조건 내용	한계값 A
1	3x3영역 내에서 채널4의 휘도온도의 표준편차값이 1보다 작은가 ?	<1℃
2	3x3영역 내에서 채널5의 휘도온도의 표준편차값이 1보다 작은가 ?	<1℃
3	위성천정각이 65보다 작은가 ?	<65
4	채널 4 중심 화소의 값이 -3℃보다 큰가 ?	>-3℃
5	채널 4 중심 화소의 값이 -3.5℃보다 큰가 ?	>-3.5℃
6	3x3영역 내에서 채널4 휘도온도의 최대값에서 최소값을 뺀 차이가 3℃보다 작은가 ?	<3℃
7	3x3영역 내에서 채널5 휘도온도의 최대값에서 최소값을 뺀 차이가 3℃보다 작은가 ?	<3℃
8	채널4에서 채널 5 휘도온도값을 뺀 값이 0℃보다 크고 6℃보다 작은가 ?	0℃ < <6℃
9	관측된 부이의 온도가 -2℃보다 크고 35℃보다 작은가 ?	-2℃ < <35℃
10	RTM 계수를 사용하여 구한 sst_guess에서 부이 온도를 뺀 값이 -4℃보다 큰가 ?	>-4℃
11	부이온도와 기후학적 평균값의 차이가 3℃보다 작은가 ?	<3℃
12	RTM 계수를 사용하여 구한 sst_guess에서 기후학적 수온 평균을 뺀 값이 -4℃보다 큰가 ?	>-4℃
13	채널4와 5의 차이가 동적 Cirrus 경계값보다 작은가 ?	<

3.3.4. 해수면온도 계수 유도

해수면온도 산출식에 필요한 계수들을 구하기 위하여 우선 가장 먼저 기본적으로 입력되어야 하는 자료는 Level 1B 자료와 해양관측 수온자료이다. 해양관측자료는 시간정보, 위치(위도, 경도), 수온과 관측 깊이에 관한 정보를 포함하고 있어야 한다. 이 정보들을 이용하여 COMS 위성 자료와 비교하여 해양자료와 위성자료가 주어진 시간(30분)이내에 있고, 일정 거리(5 km)이내에 있는지 비교하고, 구름이 없는 일치점(matchup points)들의 자료를 저장한다. 이런 작업은 위성 발사 후 초기 운용기간 동안 실시될 것이다. 이 때 입력 자료로서 COMS 채널들(SWIR3.75 μ m, IR10.8 μ m, IR12.0 μ m)의 휘도온도가 필요하고, 위성의 시간정보도 필요하다.

두 번째 단계는 이 matchup 자료를 이용하여 해수면온도 산출식의 계수들을 회귀분석을 통해 얻어내는 과정이다. 낮과 밤 알고리즘을 따로 적용하기 위하여 위성수신시각을 기준으로 일단 낮과 밤을 나눈 후 주야간의 계수들을 구하였다. 여기서 구름이 있거나, SST의

큰 오차를 야기 시킬 것으로 예상되는 문제가 있는 화소들을 제거하게 되는데, 이때 태양천정각, 위성천정각, 가시영역 반사도, 구름탐색정보(cloud mask)가 입력되어야 한다. 실제 해양관측 수온자료와 COMS 인공위성 자료를 이용하여 각 알고리즘에서 사용하게 될 계수들을 일련의 경험적 회귀분석을 통하여 산출한다. Table 4와 5에 동아시아 영역에 대한 MTSAT-1R Collocation 자료를 이용하여 산출한 해수면온도 산출계수들을 나타내었다.

전구 영역에 대한 낮과 밤의 해수면온도 산출 공식은 Table 6과 Table 7에 각각 나타내었다. Split Window MCSST의 경우 낮과 밤에 대하여 각각 0.92 °C와 0.75 °C의 오차를 보였다.

Table 6. Daytime SST Coefficients for MTSAT-1R data over the East Asian Seas

```

===== Daytime SST Coefficients & Regression Errors =====
I. Single channel SST without satellite zenith angle correction -----
   SST3 = C1*T3 + C2 , SST4 = C1*T4 +C2 , SST5 = C1*T5 + C2
II. Multi-channel SST without satellite zenith angle correction -----
   Dual   : SST34 = C1*T4 + C2*(T3-T4) + C3
   Split  : SST45 = C1*T4 + C2*(T4-T5) + C3
   Triple : SST345 = C1*T4 + C2*(T3-T5) + C3
III. Multi-channel SST with satellite zenith angle correction -----
   Dual   : MCSST34 = C1*T4 + C2*(T3-T4) + C3*(T3-T4)*(secsza-1) + C4
   Split  : MCSST45 = C1*T4 + C2*(T4-T5) + C3*(T4-T5)*(secsza-1) + C4
   Triple : MCSST345 = C1*T4 + C2*(T3-T5) + C3*(T3-T5)*(secsza-1) + C4
IV. Non-linear SST -----
   Dual   : NLSST34 = C1*T4 + C2*MCSST45*(T3-T4) + C3*(secsza-1) + C4
   Split  : NLSST45 = C1*T4 + C2*MCSST45*(T4-T5) + C3*(T4-T5)*(secsza-1) + C4
   Triple : NLSST345 = C1*T4 + C2*MCSST45*(T3-T5) + C3*(secsza-1) + C4
V. PFSST -----
   T4-T5<0.7 : PFSST1 = C1*T4 + C2*MCSST45*(T4-T5) + C3*(T4-T5)*(secsza-1) + C4
   T4-T5>0.7 : PFSST2 = C1*T4 + C2*MCSST45*(T4-T5) + C3*(T4-T5)*(secsza-1) + C4
=====
Algorithm :   C1      C2      C3      C4      RMS      Bias
SST3      :      0      0      0      0      0      0
SST4      :  1.101010  3.267147  0      0      1.471338  0.000220
SST5      :  1.102342  4.604476  0      0      1.990979  0.000144
SST34     :      0      0      0      0      0      0
SST45     :  1.115510 -0.410952  3.505930  0      1.655351  0.000219
SST345    :      0      0      0      0      0      0
MCSST34   :      0      0      0      0      0      0
MCSST45   :  1.037155  2.118685  0.457718  1.684577  0.847684  0.000218
MCSST345  :      0      0      0      0      0      0
NLSST34   :      0      0      0      0      0      0
NLSST45   :  0.978148  0.073093  0.819438  3.017323  0.839714  0.000218
NLSST345  :      0      0      0      0      0      0
PFSST1    :  1.032548  0.033559  2.798520  2.265775  0      0
PFSST2    :  0.967750  0.075641  0.744650  3.142197  0.834190 -0.000003
=====

```

Table 7. Nighttime SST Coefficients for MTSAT-1R data over the East Asian Seas

```

===== Daytime SST Coefficients & Regression Errors =====
I. Single channel SST without satellite zenith angle correction -----
   SST3 = C1*T3 + C2 , SST4 = C1*T4 +C2 , SST5 = C1*T5 + C2
II. Multi-channel SST without satellite zenith angle correction -----
   Dual   : SST34 = C1*T4 + C2*(T3-T4) + C3
   Split  : SST45 = C1*T4 + C2*(T4-T5) + C3
   Triple : SST345 = C1*T4 + C2*(T3-T5) + C3
III. Multi-channel SST with satellite zenith angle correction -----
   Dual   : MCSST34 = C1*T4 + C2*(T3-T4) + C3*(T3-T4)*(secsza-1) + C4
   Split  : MCSST45 = C1*T4 + C2*(T4-T5) + C3*(T4-T5)*(secsza-1) + C4
   Triple : MCSST345 = C1*T4 + C2*(T3-T5) + C3*(T3-T5)*(secsza-1) + C4
IV. Non-linear SST -----
   Dual   : NLSST34 = C1*T4 + C2*MCSST45*(T3-T4) + C3*(secsza-1) + C4
   Split  : NLSST45 = C1*T4 + C2*MCSST45*(T4-T5) + C3*(T4-T5)*(secsza-1) + C4
   Triple : NLSST345 = C1*T4 + C2*MCSST45*(T3-T5) + C3*(secsza-1) + C4
V. PFSST -----
   T4-T5<0.7 : PFSST1 = C1*T4 + C2*MCSST45*(T4-T5) + C3*(T4-T5)*(secsza-1) + C4
   T4-T5>0.7 : PFSST2 = C1*T4 + C2*MCSST45*(T4-T5) + C3*(T4-T5)*(secsza-1) + C4
-----
Algorithm :   C1          C2          C3          C4          RMS          Bias
SST3   :   0.618372   13.834317          0          0   3.004241   -0.000171
SST4   :   1.109305   3.566514          0          0   1.431108   -0.000281
SST5   :   1.119503   5.014503          0          0   1.917330   -0.000265
SST34  :   1.242919  -0.510877   0.204503          0   3.037746   -0.000297
SST45  :   1.120677  -0.258814   3.731531          0   1.535777   -0.000281
SST345 :   1.499304  -1.276618  -4.021108          0   6.542086   -0.000342
MCSST34 :   1.103189   0.190857  -0.251158   3.812083   1.310965   -0.000280
MCSST45 :   1.025495   2.105861   0.317668   1.950496   0.898502   -0.000286
MCSST345 :   1.082864   0.198658  -0.233103   4.010041   1.272329   -0.000274
NLSST34 :   1.140475   0.005283   1.440987   2.780641   1.317590   -0.000290
NLSST45 :   0.962003   0.071604   0.695688   3.415856   0.904371   -0.000257
NLSST345 :   1.128961   0.005973   1.574879   2.761372   1.265849   -0.000284
PFSST1 :   1.018411   0.033853   2.067455   2.606112          0          0
PFSST2 :   0.000000   0.000000   0.000000   0.000000   0.000000   0.000000
=====

```

Table 8. Daytime SST Coefficients for MTSAT-1R data over the full disk region

```

===== Daytime SST Coefficients & Regression Errors =====
I. Single channel SST without satellite zenith angle correction -----
   SST3=C1*T3 + C2 , SST4=C1*T4 +C2 , SST5=C1*T5 + C2
II. Multi-channel SST without satellite zenith angle correction -----
   Dual   : SST34 =C1*T4 + C2*(T3-T4) + C3
   Split  : SST45 =C1*T4 + C2*(T4-T5) + C3
   Triple : SST345=C1*T4 + C2*(T3-T5) + C3
III. Multi-channel SST with satellite zenith angle correction -----
   Dual   : MCSST34 =C1*T4 + C2*(T3-T4) + C3*(T3-T4)*(secsza-1) + C4
   Split  : MCSST45 =C1*T4 + C2*(T4-T5) + C3*(T4-T5)*(secsza-1) + C4
   Triple : MCSST345=C1*T4 + C2*(T3-T5) + C3*(T3-T5)*(secsza-1) + C4
IV. Non-linear SST -----
   Dual   : NLSST34 =C1*T4 + C2*MCSST45*(T3-T4) + C3*(secsza-1) + C4
   Split  : NLSST45 =C1*T4 + C2*MCSST45*(T4-T5) + C3*(T4-T5)*(secsza-1) + C4
   Triple : NLSST345=C1*T4 + C2*MCSST45*(T3-T5) + C3*(secsza-1) + C4
V. PFSST -----
   T4-T5<0.7 : PFSST1=C1*T4 + C2*MCSST45*(T4-T5) + C3*(T4-T5)*(secsza-1) + C4
   T4-T5>0.7 : PFSST2=C1*T4 + C2*MCSST45*(T4-T5) + C3*(T4-T5)*(secsza-1) + C4
-----
Algorithm :   C1         C2         C3         C4         RMS         Bias
SST3      :         0         0         0         0         0         0
SST4      :  1.118537   4.373433         0         0         2.211642   0.000093
SST5      :  1.087934   6.759830         0         0         3.027127  -0.000031
SST34     :         0         0         0         0         0         0
SST45     :  1.142775  -0.524149   4.829164         0         2.583136   0.000103
SST345    :         0         0         0         0         0         0
MCSST34   :         0         0         0         0         0         0
MCSST45   :  1.039460   2.254069   0.827841   1.356577   0.920695   0.000084
MCSST345  :         0         0         0         0         0         0
NLSST34   :         0         0         0         0         0         0
NLSST45   :  0.962569   0.073570   0.846559   3.280368   0.929144   0.000072
NLSST345  :         0         0         0         0         0         0
PFSST1    :  1.015200   0.028266   2.588066   2.367115         0         0
PFSST2    :  0.953931   0.075317   0.829028   3.347202   0.919693   0.000069
-----
NLSST345  :  1.128961   0.005973   1.574879   2.761372   1.265849  -0.000284
PFSST1    :  1.018411   0.033853   2.067455   2.606112         0         0
PFSST2    :  0.000000   0.000000   0.000000   0.000000   0.000000   0.000000
=====

```

Table 9. Nighttime SST Coefficients for MTSAT-1R data over the full disk region

```

===== Daytime SST Coefficients & Regression Errors =====
I. Single channel SST without satellite zenith angle correction -----
   SST3 = C1*T3 + C2 , SST4 = C1*T4 +C2 , SST5 = C1*T5 + C2
II. Multi-channel SST without satellite zenith angle correction -----
   Dual   : SST34 = C1*T4 + C2*(T3-T4) + C3
   Split  : SST45 = C1*T4 + C2*(T4-T5) + C3
   Triple : SST345 = C1*T4 + C2*(T3-T5) + C3
III. Multi-channel SST with satellite zenith angle correction -----
   Dual   : MCSST34 = C1*T4 + C2*(T3-T4) + C3*(T3-T4)*(secsza-1) + C4
   Split  : MCSST45 = C1*T4 + C2*(T4-T5) + C3*(T4-T5)*(secsza-1) + C4
   Triple : MCSST345 = C1*T4 + C2*(T3-T5) + C3*(T3-T5)*(secsza-1) + C4
IV. Non-linear SST -----
   Dual   : NLSST34 = C1*T4 + C2*MCSST45*(T3-T4) + C3*(secsza-1) + C4

```

Split : NLSST45 = C1*T4 + C2*MCSST45*(T4-T5) + C3*(T4-T5)*(secsza-1) + C4
 Triple : NLSST345 = C1*T4 + C2*MCSST45*(T3-T5) + C3*(secsza-1) + C4
 V. PFSST -----
 T4-T5 < 0.7 : PFSST1 = C1*T4 + C2*MCSST45*(T4-T5) + C3*(T4-T5)*(secsza-1) + C4
 T4-T5 > 0.7 : PFSST2 = C1*T4 + C2*MCSST45*(T4-T5) + C3*(T4-T5)*(secsza-1) + C4

Algorithm :	C1	C2	C3	C4	RMS	Bias
SST3 :	0.332760	33.623623	0	0	5.822398	0.000421
SST4 :	1.139808	4.142020	0	0	2.192024	0.000504
SST5 :	1.114067	6.617064	0	0	3.024306	0.001120
SST34 :	1.140771	0.002094	4.220372	0	2.196253	0.000573
SST45 :	1.167966	-0.447931	4.453465	0	2.506680	0.000478
SST345 :	1.140401	0.001488	4.196631	0	2.193992	0.000567
MCSST34 :	1.003139	-0.181777	0.034983	-1.170931	1.986488	0.000503
MCSST45 :	0.994029	2.491340	0.357038	2.027301	0.948271	0.000463
MCSST345 :	1.028180	-0.142605	0.037031	0.439372	2.079351	0.000464
NLSST34 :	0.642803	-0.007881	-0.876466	4.377641	1.575938	0.000496
NLSST45 :	0.929538	0.079242	0.661543	3.760773	0.987222	0.000478
NLSST345 :	0.644384	-0.008108	-1.095006	4.554994	1.666535	0.000521
PFSST1 :	0.996325	0.045977	2.325685	2.587247	0	0
PFSST2 :	0.915195	0.079351	0.560849	4.087021	0.979372	0.000325

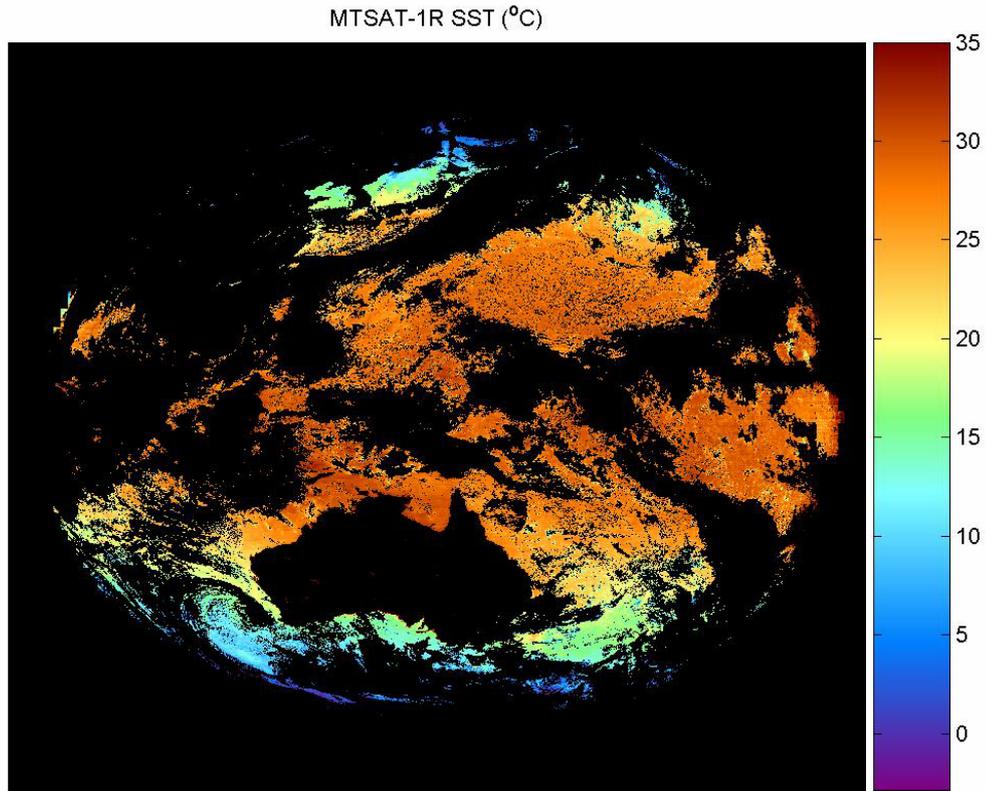


Fig. 5. An example of sea surface temperature distribution estimated from the split window MCSST equation for MTSAT-1R data (31 October 2005)

3.3.5. 해수면온도 계산

2005년 10월 31일에 관측한 MTSAT-1R 영상 자료에 아래 (16)과 같은 MTSAT-1R Split window MCSST 계수와 식을 적용하여 해수면온도를 계산하였다. 동일 영상에 대해 미리 구한 구름 flag 결과를 활용하여, 구름이 있는 화소는 계산하지 않고 구름이 없고 깨끗한 화소만 해수면온도 계산 과정을 거치도록 하였다(Fig. 6). 계산된 해수면온도 분포는 Fig. 5에 나타내었다.

(16)

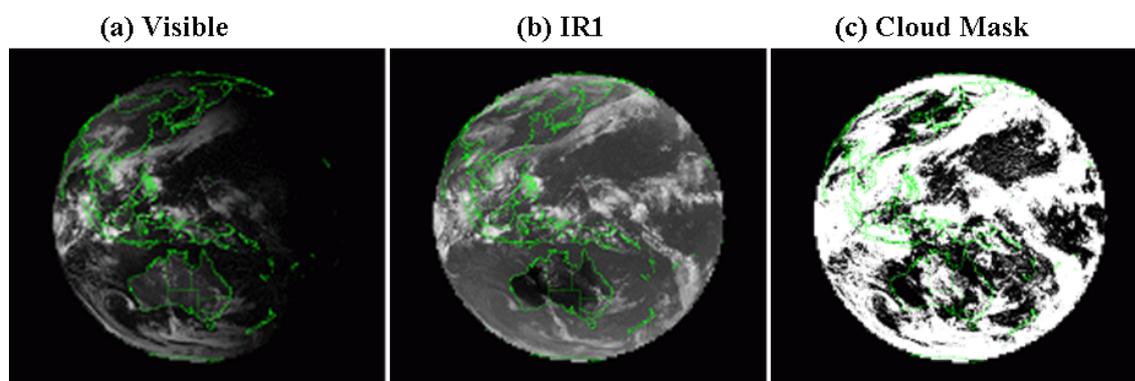


Fig. 6. (a) Visible image, (b) IR image, and (c) cloud mask image of MTSAT 1R full disk data on 31 October 2005.

3.3.6. 해수면온도 합성장 계산

해수면온도 소프트웨어의 입출력 파일과 수행 조건을 제어하는 파일에서 합성하고자 하는 기간(예를 들어 5일)을 지정해주면, 해당 해수면온도 파일들을 검색하여 합성장을 생산한다. 제어 파일에서 단순 평균을 할 것인지, 3D-OI 기법을 사용할 것인지 방법을 선택하여 주면 그 방법에 따라 일련의 해수면온도 영상자료들을 추출하여 합성장을 생산한다.

MTSAT-1R 자료를 활용하기에 앞서 2003년 12월 1일부터 15일까지의 AQUA/AMSR-E가 관측한 낮과 밤 해수면온도 영상 자료를 이용하였다. 개발된 합성장 모듈은 단순평균 방법, OI 방법이 모두 잘 수행되었으나 OI 방법은 많은 메모리를 요구하였고 계산 시간도 오래 걸리는 단점이 있었다.

SST 자료는 Fig. 6의 영상자료를 사용하였다. 정지위성영상과 달리 극궤도 위성 자료를 활용하였기 때문에 위성의 주사폭과 궤도에 따라서 중간에 관측되지 않은 부분을 많이 포함하고 있다. 입·출력문 제어 파일에서 합성하고자 하는 기간과 중심 시간을 주면 해수면온도 파일을 검색하여 합성장을 생산하도록 하였다. Fig. 7은 단순 평균한 해수면온도의 합성장 결과를 나타낸다. 30°N 이북에서 해양의 크고 작은 소용돌이 구조도

잘 보여주고 있다. 사용한 자료가 극초단파 자료로서 구름을 투과하나 매우 두꺼운 구름과 강수가 있을 경우는 해수면온도를 계산할 수 없다. Fig. 7에서 잘 볼 수 있듯이 이와 같은 문제로 인하여 적도에서 10°N 사이의 상당히 많은 화소들에서 해수면온도가 계산되지 않았다.

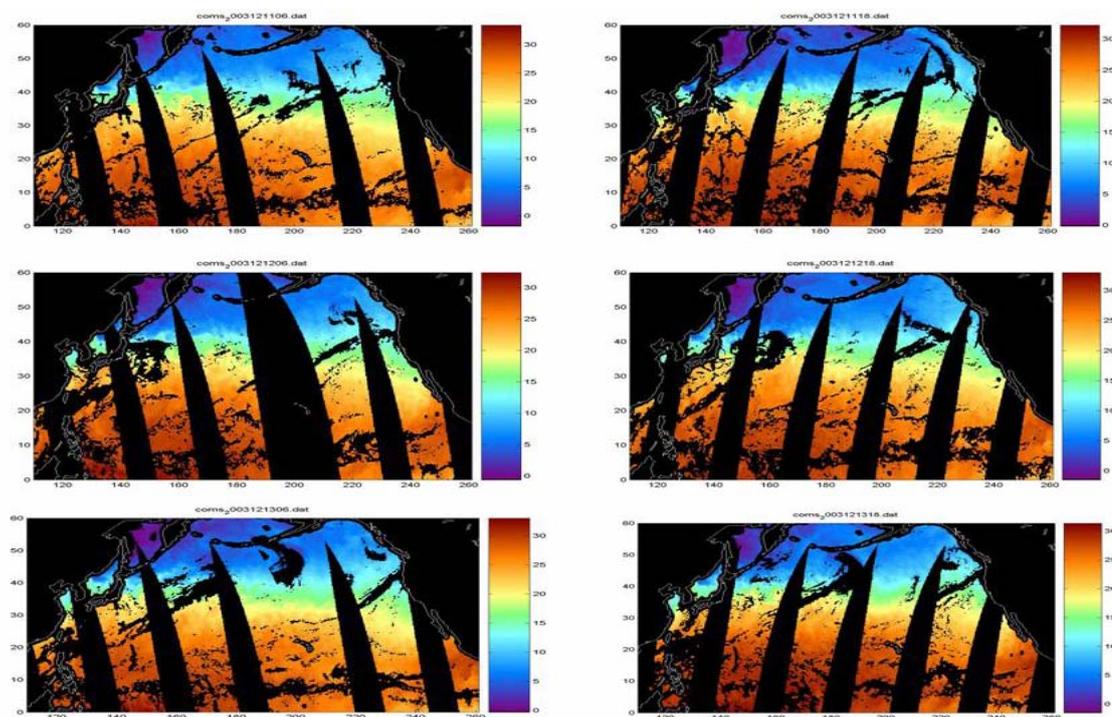


Fig. 7. Examples of SST images of AQUA/AMSR-E used for SST composite process

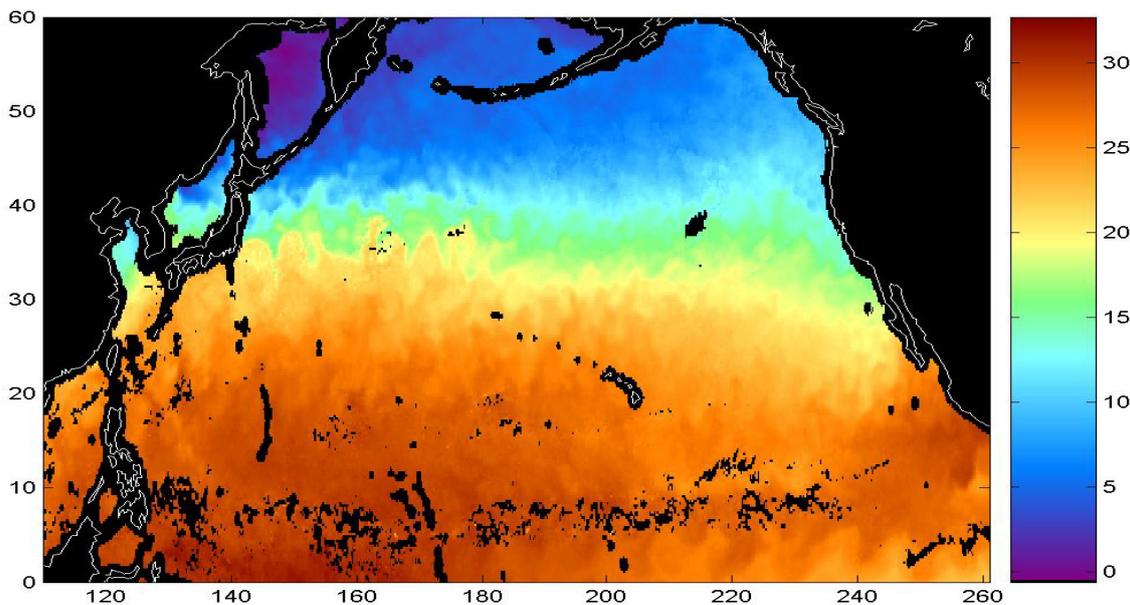


Fig. 8. An SST composite image based on simple average method

Fig. 8은 OI 방법을 사용한 해수면온도 합성장이다. OI 방법을 사용할 때 내삽할 시간과 공간 스케일을 주어야 한다. 본 실험에서는 각 동서/남북 공간 규모로 L_x 는 180 km, L_y 는 180 km로 주었고, moving window size는 8x8을 주었다. 이러한 합성장은 자료가 없는 곳에서 오차를 최소화하여 가상적으로 만들어낸 장이기 때문에 각 화소에서 오차의 정도를 계산해낼 수 있다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이 전체적으로 0.5°C 이내의 오차를 보이는데, 0.4°C가 넘는 큰 오차는 주로 연안에서 발견된다. 이는 사용한 자료가 Microwave SST 자료이기 때문에 원래부터 해안선으로부터 50 km 범위 이내에는 자료가 없다. 따라서 연안에 발견된 큰 오차는 원래 자료가 없고 주변 자료들을 이용하여 계산해내는 과정에서 발생한 것이다. 그리고 저위도 지방에 SST가 없었던 화소에서 역시 0.15°C 내의 상대적으로 큰 오차를 보인다. 이런 부분을 제외하면 태평양 전체를 봤을 때 0.02°C의 상당히 적은 오차를 보인다.

Fig. 8과 9의 결과를 비교해보면 OI 합성장은 장점과 단점을 가진다. 자료가 없는 부분은 최소의 오차를 가지도록 객관적으로 내삽하여 모두 채울 수 있으나 단순평균장에서 볼 수 있었던 크고 작은 소용돌이 구조는 상당히 평활화(smoothing)하는 경향이 있다. 이러한 경향은 적용한 윈도우의 크기에 의존하는데, 크기가 클수록 평활화가 크게 나타난다. 해양에서 소용돌이의 크기는 기본적으로 각 해역이 가지는 Rossby 변형반경의 크기와 선형적인 관계에 있다. 즉 위도에 따라 이 공간 스케일은 감소한다. 그런데 동일한 윈도우 크기로 저위도와 고위도에 적용하였기 때문에 적도 가까이 위도에서는 실제 현상의 스케일을 재현할 수 있으나 고위도로 갈수록 실제 현상보다 크기는 10배나 큰 윈도우를 사용하므로 자세한 해양 구조들이 사라지게 되는 것이다. 이러한 현상을 해결하려면 윈도우 크기를 위도와 해역에 대한 함수로 주어야 한다, 그런데 국외의 거의 대부분의 기관에서도 전구의 해수면온도 OI 합성장을 만들 때 이러한 사항에 대해서 고려하지 않고 동일한 값을 사용하고 있다. 또 한 가지 OI의 문제점은 상당한 컴퓨터 메모리와 계산 시간이 든다는 점이다. 이러한 부분을 고려하여 COMS 합성장 처리 과정에서는 단순합성장과 OI 합성장 중에서 사용자가 선택하여 처리할 수 있도록 구성하였다.

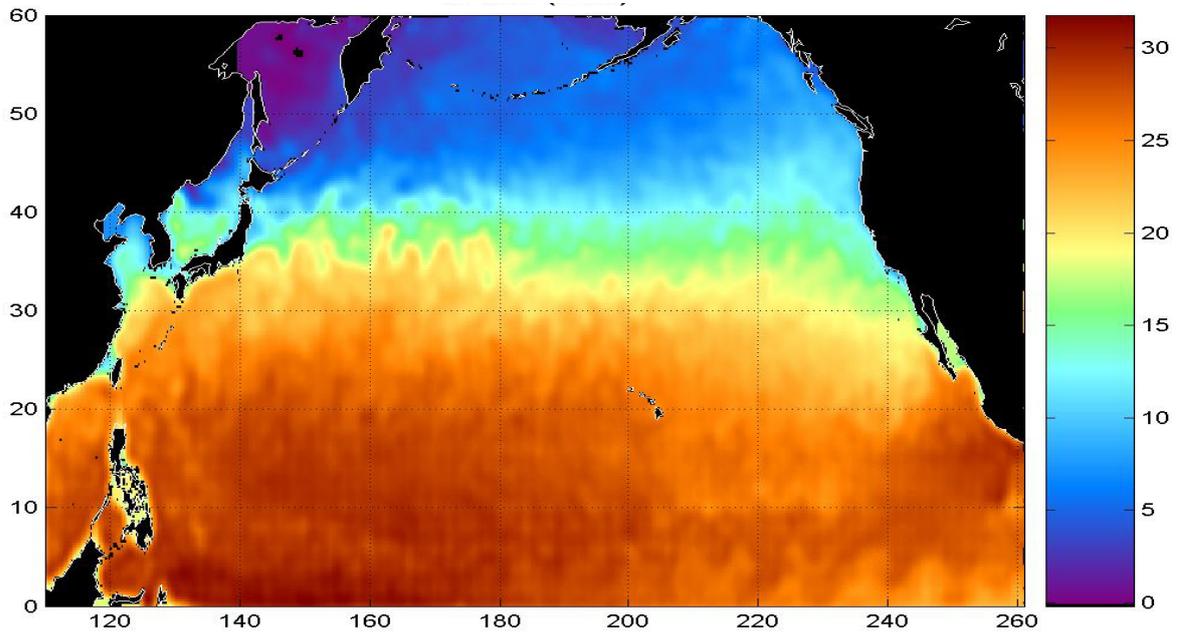


Fig. 9. SST image from OI composite technique using 8x8 window ($L_x=180\text{km}$, $L_y=180\text{km}$)

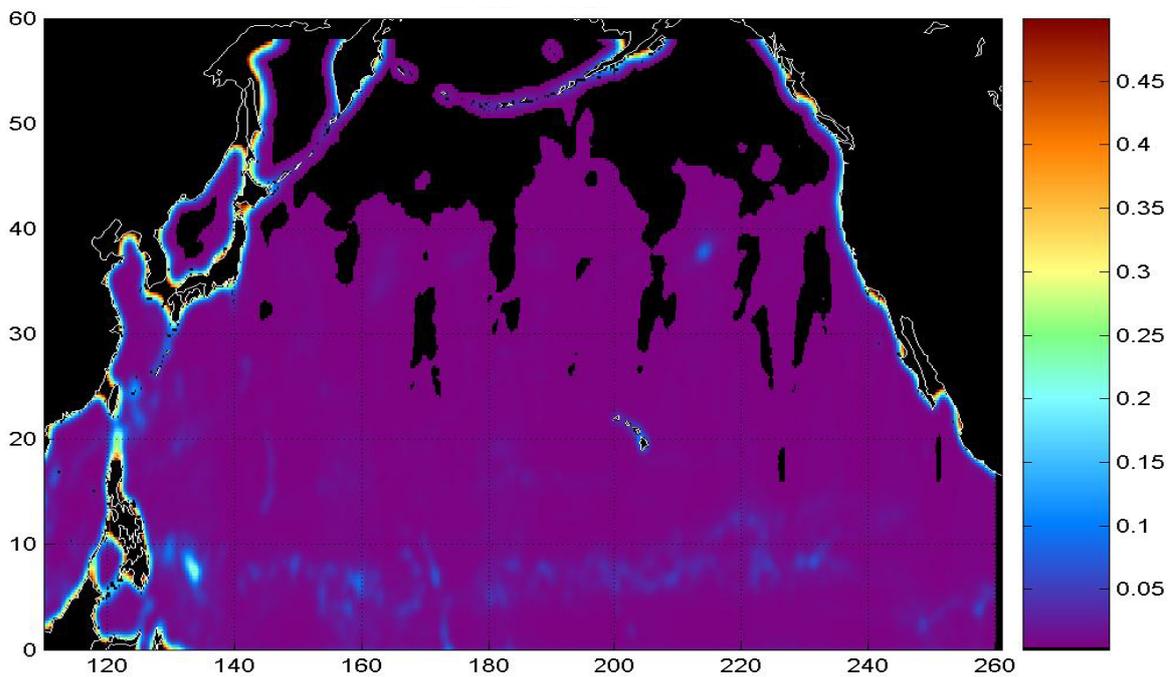


Fig. 10. An image of SST errors from OI composite technique using 8x8 window ($L_x=180\text{km}$, $L_y=180\text{km}$)

3.3.7. 복사전달모델에 기초한 해수면온도 계수

IOT 기간 중에는 해양-위성 matc up database가 만들어지고 있으므로 경험적 회귀법을 통한 해수면온도 계수를 얻을 수 없다. 이 기간 중에도 COMS 인공위성이 관측한 해수면온도의 대략적 값을 산출할 필요가 있다. 이를 위해서 COMS 각 채널의 반응함수가 공개되면 IOT 기간 이전에 미리 계수들을 산출해 두어야 한다. 이 반응함수와 레원존데 관측자료, 그리고 복사전달 모델을 이용하면 SST 계수들을 산출할 수 있다. MTSAT-1R의 반응함수를 이용하여 시범적으로 SST 계수를 구하였다. Fig. 11에 사용한 TIGR 관측 자료의 위치를 표시하였다. 각 점들의 색깔은 관측 월을 나타낸다. TIGR 자료 중 COMS 영역에 맞는 자료들을 추출하였는데 총 6304개의 자료를 이용하였다.

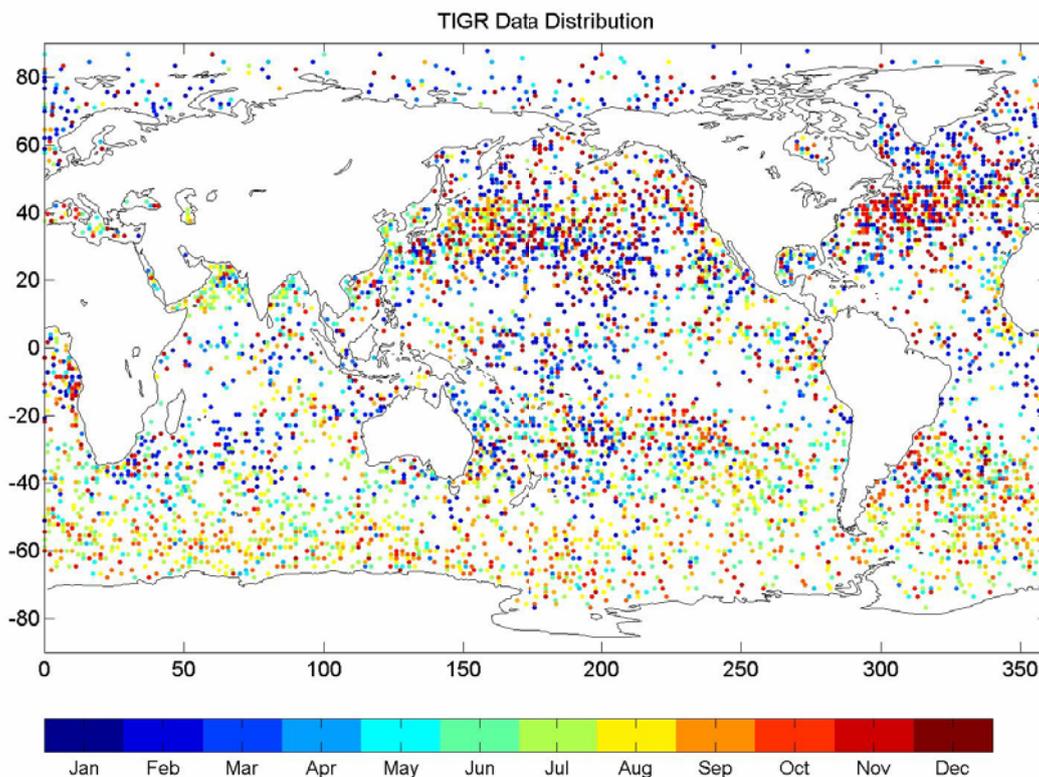


Fig. 11. Positions of TIGR data points colored according to an observation month.

MTSAT-1R 반응함수(Fig. 12)와 TIGR 자료를 복사전달 모델(MODTRAN 4)을 이용하여 위성이 관측할 휘도온도를 모의하였으며 그 결과를 이용하여 Split window MCSST 해수면온도 계수를 산출하였다. Table 8에 유도된 계수들을 나타내었다. Fig. 13은 TIGR 자료의 해수면온도와 위성이 관측하게 될 해수면 온도를 비교한 것이다. 계산된 해수면온도의 RMS 오차는 낮과 밤에 대하여 각각 0.47°C, 0.46°C 정도이고, bias 오차는 0.0349°C, 0.0220°C로 나타났다. 일단 COMS 자료가 수신되고 센서의 검보정이

이루어져서 휘도온도가 산출되기 시작하면 복사전달 모델을 이용한 모의실험이 이루어지고 여기서 IOT 기간 동안 사용하게 될 해수면온도 계수가 산출될 것이다.

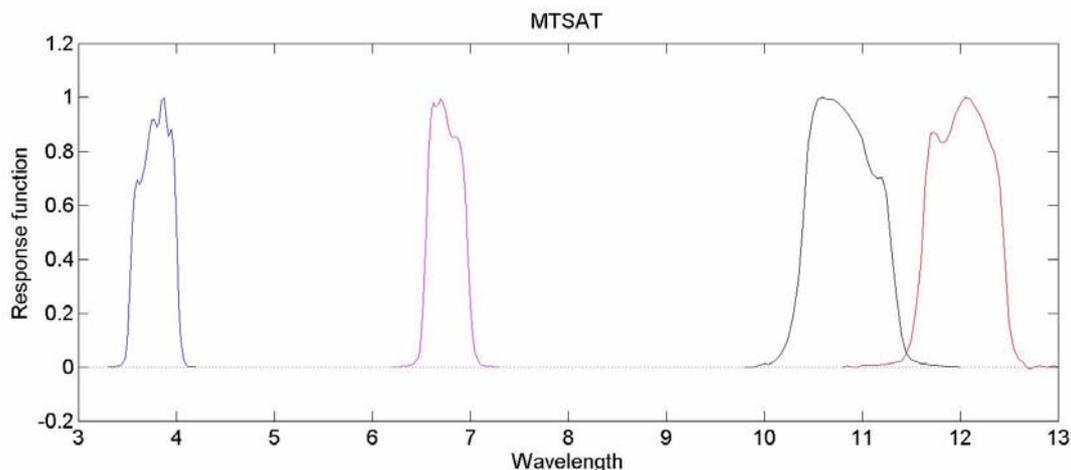


Fig. 12. Response function of MTSAT-1R channels 2, 3, 4, and 5.

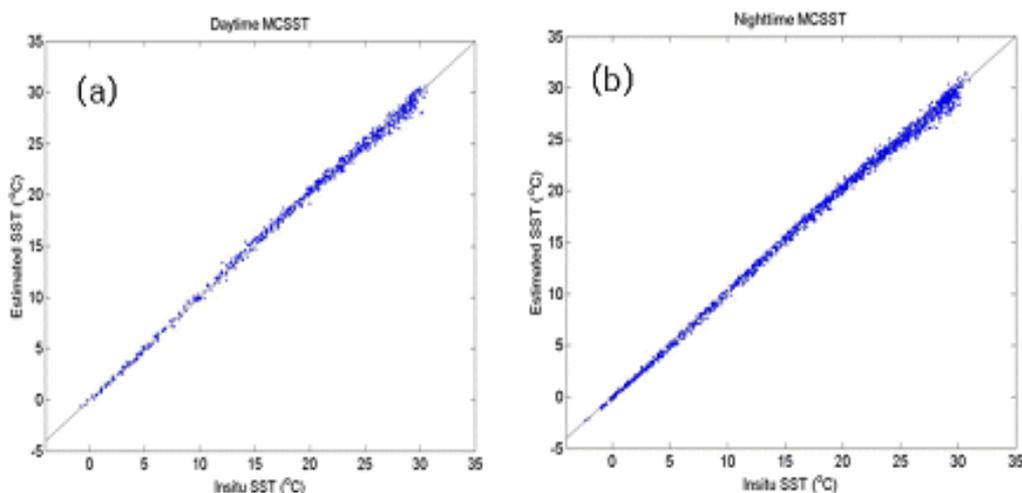


Fig. 13. Comparison of insitu SST and (a) daytime and (b) nighttime SST estimated based on RTM and TIGR data.

Table 10. Coefficients of split window MCSST using the response function of each channel of MTSAT-1R and radiative transfer model (MODTRAN 4). SZA is satellite zenith angle.

$$\text{MCSST}_{45} = C1 * T4 + C2 * (T4 - T5) + C3 * (T4 - T5) * (\sec\text{SZA} - 1) + C4$$

	C1	C2	C3	C4
Day	0.9689	2.9475	0.0013	0.0356
Night	0.9690	2.9693	0.0034	0.0223

COMS 반응함수를 사용하여 산출한 해수면온도 산출식은 Table 11과 Table 12에 제시하였다. 낮 시간의 SST계수는 아래와 같이 산출되었으며, MCSST 경우 0.46°C 정도의 오차를 보였다.

Table 11. Coefficients of daytime SST equations using the response function of each channel of COMS and radiative transfer model (MODTRAN 4). SZA is satellite zenith angle.

```

===== Daytime SST Coefficients & Regression Errors =====
I. Single channel SST without satellite zenith angle correction -----
   SST3=C1*T3 + C2 , SST4=C1*T4 +C2 , SST5=C1*T5 + C2
II. Multi-channel SST without satellite zenith angle correction -----
   Dual   : SST34 =C1*T4 + C2*(T3-T4) + C3
   Split  : SST45 =C1*T4 + C2*(T4-T5) + C3
   Triple : SST345=C1*T4 + C2*(T3-T5) + C3
III. Multi-channel SST with satellite zenith angle correction -----
   Dual   : MCSST34 =C1*T4 + C2*(T3-T4) + C3*(T3-T4)*(secsza-1) + C4
   Split  : MCSST45 =C1*T4 + C2*(T4-T5) + C3*(T4-T5)*(secsza-1) + C4
   Triple : MCSST345=C1*T4 + C2*(T3-T5) + C3*(T3-T5)*(secsza-1) + C4
IV. Non-linear SST -----
   Dual   : NLSST34 =C1*T4 + C2*MCSST45*(T3-T4) + C3*(secsza-1) + C4
   Split  : NLSST45 =C1*T4 + C2*MCSST45*(T4-T5) + C3*(T4-T5)*(secsza-1) + C4
   Triple : NLSST345=C1*T4 + C2*MCSST45*(T3-T5) + C3*(secsza-1) + C4
V. PFSST -----
   T4-T5<0.7 : PFSST1=C1*T4 + C2*MCSST45*(T4-T5) + C3*(T4-T5)*(secsza-1) + C4
   T4-T5>0.7 : PFSST2=C1*T4 + C2*MCSST45*(T4-T5) + C3*(T4-T5)*(secsza-1) + C4
-----
Algorithm :   C1           C2           C3           C4           RMS           Bias
SST3      :           0           0           0           0           0
SST4      :   1.244006   67.558578           0           0   2.224829   -0.001258
SST5      :   1.263684   74.969238           0           0   3.171289   -0.029487
SST34     :           0           0           0           0           0
SST45     :   1.280421   -0.396898   77.692726           0   2.510136    0.056822
SST345    :           0           0           0           0           0
MCSST34   :           0           0           0           0           0
MCSST45   :   0.983029   2.994210   -0.062712   -4.886696   0.469934   -0.000062
MCSST345  :           0           0           0           0           0
NLSST34   :           0           0           0           0           0
NLSST45   :   0.992674   -0.012223   -0.090130   -2.478041   0.494294   -0.000062
NLSST345  :           0           0           0           0           0
PFSST1    :   0.992556   -0.008123   -0.322725   -1.669036           0           0
PFSST2    :   1.024593   -0.012589   -0.007421    5.358628   0.446060   -0.000120
=====

```

Table 12. Coefficients of nighttime SST equations using the response function of each channel of COMS and radiative transfer model (MODTRAN 4). SZA is satellite zenith angle.

```

===== Nighttime SST Coefficients & Regression Errors =====
I. Single channel SST without satellite zenith angle correction -----
   SST3 = C1*T3 + C2 , SST4 = C1*T4 +C2 , SST5 = C1*T5 + C2
II. Multi-channel SST without satellite zenith angle correction -----
   Dual   : SST34 = C1*T4 + C2*(T3-T4) + C3
   Split  : SST45 = C1*T4 + C2*(T4-T5) + C3
   Triple : SST345 = C1*T4 + C2*(T3-T5) + C3
III. Multi-channel SST with satellite zenith angle correction -----
   Dual   : MCSST34 = C1*T4 + C2*(T3-T4) + C3*(T3-T4)*(secsza-1) + C4
   Split  : MCSST45 = C1*T4 + C2*(T4-T5) + C3*(T4-T5)*(secsza-1) + C4
   Triple : MCSST345 = C1*T4 + C2*(T3-T5) + C3*(T3-T5)*(secsza-1) + C4
IV. Non-linear SST -----
   Dual   : NLSST34 = C1*T4 + C2*MCSST45*(T3-T4) + C3*(secsza-1) + C4
   Split  : NLSST45 = C1*T4 + C2*MCSST45*(T4-T5) + C3*(T4-T5)*(secsza-1) + C4
   Triple : NLSST345 = C1*T4 + C2*MCSST45*(T3-T5) + C3*(secsza-1) + C4
V. PFSST -----
   T4-T5<0.7 : PFSST1 = C1*T4 + C2*MCSST45*(T4-T5) + C3*(T4-T5)*(secsza-1) + C4
   T4-T5>0.7 : PFSST2 = C1*T4 + C2*MCSST45*(T4-T5) + C3*(T4-T5)*(secsza-1) + C4
=====
Algorithm :      C1          C2          C3          C4          RMS          Bias
SST3      :      1.068117    19.775133      0          0          0.362724    0.019607
SST4      :      1.312248    85.103638      0          0          2.208658   -0.030031
SST5      :      1.375620   103.933884      0          0          3.207777    0.006134
SST34     :      1.426230    -0.433452   115.867805      0          2.996922    0.373096
SST45     :      1.356633    -0.452766    97.211502      0          2.530137   -0.150844
SST345    :      1.395405    -0.238079   107.611496      0          2.795779    0.087616
MCSST34   :      1.018311     1.237338    -0.001922     6.542321    0.159026    0.000425
MCSST45   :      0.987531     2.987707    -0.030238    -3.705343    0.488966    0.000422
MCSST345  :      1.005114     0.887679    -0.004679     2.411832    0.148573    0.000413
NLSST34   :      1.018823    -0.005025     0.029409     6.647904    0.175099    0.000418
NLSST45   :      0.996328    -0.012199    -0.043112    -1.517478    0.521346    0.000427
NLSST345  :      1.009309    -0.003606     0.060947     3.420751    0.182597    0.000432
PFSST1    :      1.015329    -0.005061     0.300644     4.529645      0          0
PFSST2    :      1.033278    -0.012769     0.009341     7.492883    0.445236    0.000227
=====

```

3.3.8. 해수면온도 Quality Flag 선정

해수면온도를 산출하는 첫 번째 단계는 앞선 과정의 구름탐색 결과를 이용한다. 육지나 구름으로 판별된 화소는 해수면온도를 계산하지 않고, 구름이 없는 clear 화소로 판별된 경우에만 해수면온도 공식을 적용하여 해수면온도 영상자료를 얻는다. 그런데 구름탐색알고리즘이 매우 정밀하고 정확하다 하더라도 얇은 구름은 쉽게 찾아내지 못할 수

있다. 이럴 경우 계산된 해수면온도장은 실제 값에 비하여 비정상적으로 저하될 수 있다. 이러한 비정상적인 화소들은 flag를 주어서 다음 단계에서 사용되지 못하도록 하여야 한다. flag를 주기 위해서 여러 가지 방법을 활용할 수 있는데 위성자료 수신 시간을 기준으로 이전 3일간의 평균장을 사용하기도 하고 기후평균 값을 사용하기도 한다. COMS 해수면온도의 flag 과정은 이 두 가지, 즉 이전 3일 평균된 OI 합성장을 사용하거나 기후평균을 이용하는 방법들 중 사용자가 선택할 수 있도록 설계하였다. 현재로서는 이전 3일 합성장이 없는 상태이기 때문에 기후학적 평균을 이용하는 방법이 default로 지정되어 있다.

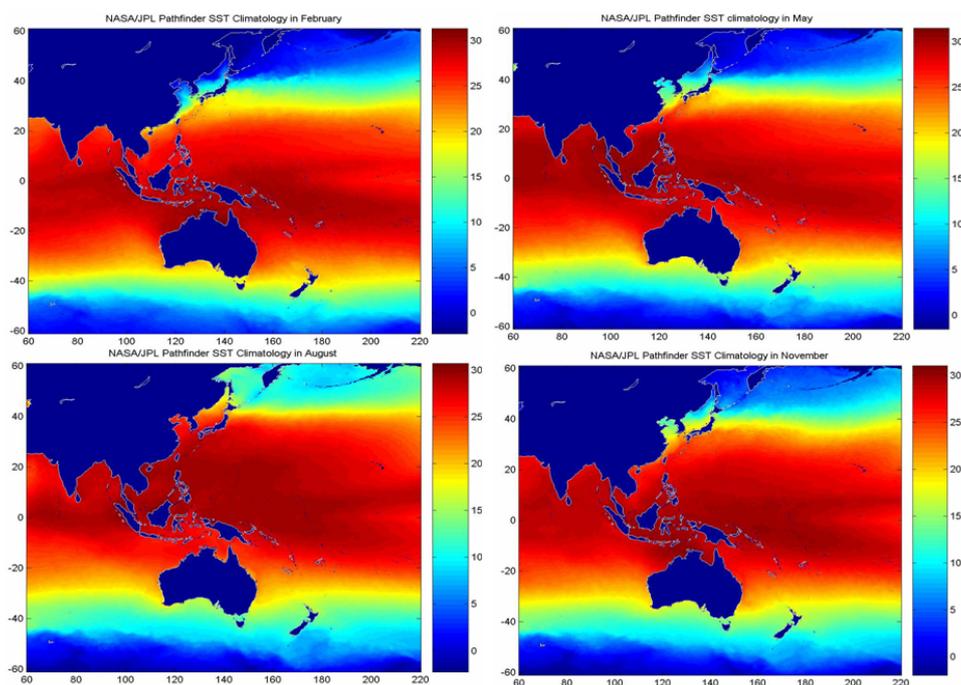


Fig. 14. Monthly sea surface temperature climatology on February, May, August, and November using 9km pathfinder SST dataset of NASA/JPL.

Fig. 14는 NASA/JPL 9 km SST pathfinder 자료를 이용하여 구한 대표적인 월별 해수면온도 분포도이다. COMS 위성 자료의 수신 날짜와 시간이 주어지면, 12개의 달들 중에서 그 날짜와 인근한 두개 달의 월평균을 읽은 다음, 시간에 대해서 선형적으로 내삽하여 위성시각에 해당하는 기후 평균장을 계산한다. 계산된 해수면온도가 이 값에 비해 5°C이상 차이가 날 때에는 비이상적인 값으로 flag를 주어 해수면온도장에 포함되지 않도록 하였다. 자세한 flag 값은 Fig. 15에 나타내었다.

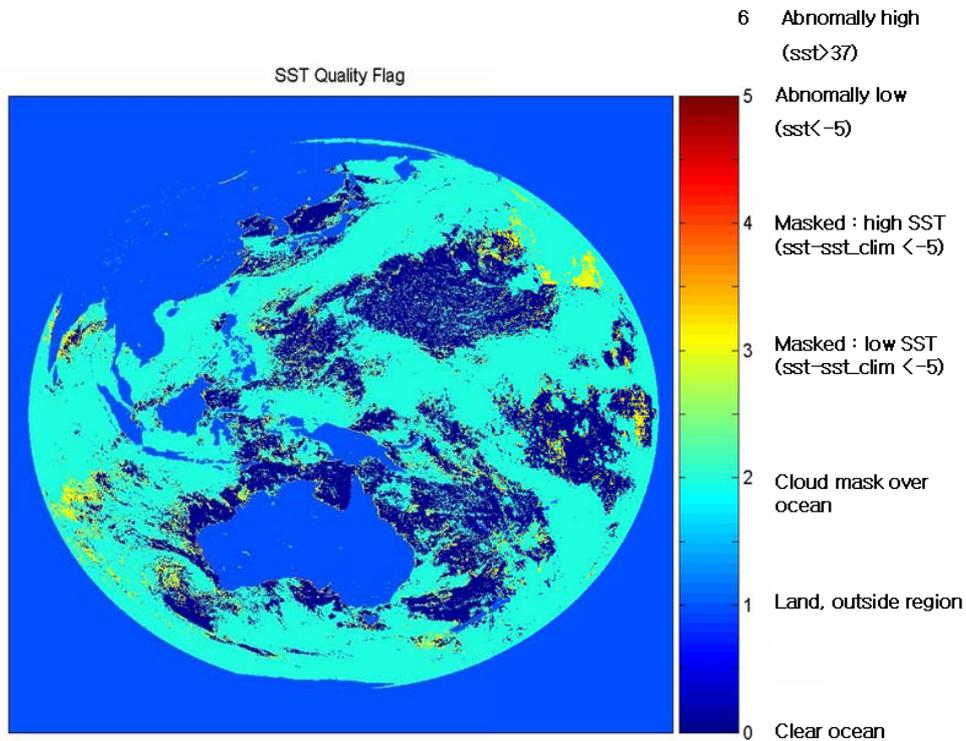


Fig. 15. SST quality flags.

3.4. 검증

3.4.1. 검증방법

계산된 해수면온도의 정확도는 실제 해양관측자료와 비교하여 RMSE 오차, Bias 오차로 표현한다. Bias는 아래와 같이 계산된 해수면온도와 실측 수온 사이의 차를 구한 후 그 차의 합을 자료 개수로 나눈 값이다. 엄밀히 말하면 평균편차에 해당한다. 자료 개수가 매우 많을 경우에는 이 값은 소수점 아래 셋째~넷째자리 수로 거의 0에 수렴하기 때문에 매우 작은 값을 지닌다. 따라서 경우에 따라서 평균편차대신 순수한 편차의 합을 Bias로 사용하기도 한다. 여기에서는 혼동을 피하기 위하여 평균을 한 경우에는 평균편차로 명시하여 쓰고, 그렇지 않고 순수한 편차의 합을 사용하였을 경우는 편차로 사용하기로 한다.

(17)

3.4.2. 검증자료

해수면온도의 정확도를 평가하기 위하여 가장 먼저 하여야 할 일은 해양자료를 수집하는 것이다. 현재 실시간으로 수집 가능한 자료는 기상청의 GTS 망에 올라오는 인공위성 표층 부이(Drifter) 자료이다. 그런데 이 자료는 Table 13에 나타내었듯이 해수면으로부터 매우 가까운 깊이(~20cm)에서 수온을 관측하기 때문에 Bulk 수온을 제대로 표현하지 못한다. 가을부터 바람이 세어지고 해양 상층의 혼합이 활발한 경우에는 이 수온은 Bulk 수온을 대신할 수 있으나, 여름철 일사량이 강해지고 계절수온약층이 뚜렷한 시기에는 적절하지 않다. 중위도 이북 해역이 여기에 해당하며 여름철 해수면온도장에서 상대적으로 큰 오차가 발생할 수 있다. 해양-대기 상호작용으로 생기는 대부분의 현상은 해양 피층보다는 Bulk 수온에 좌우한다. 따라서 이러한 수온을 위성자료에서 반영을 하려면 경험적 회귀분석에 Bulk에 해당하는 자료를 활용하여야 한다. 인공위성 표층부이 외에 ARGO float 자료, CTD 관측 자료, 고정 부이 자료 등을 활용할 수 있다. 그런데 해양자료는 관측 후 정밀한 보정과정을 거쳐야 하는 제한점이 있기 때문에 실시간 활용이 용이하지 않는 부분이 있다. 따라서 IOT 기간 동안 관련기관들의 적극적인 협조를 미리 요청해 두어야 한다.

Table 13. Information on available oceanic in-situ surface temperatures.

관측기기	관측수심	수집 가능처	비고
Drifter	15~20cm	기상청 GTS 자료 해양조사원 해류도 제작팀 국립수산과학원	
CTD	1~5m	해양조사원, 국립수산과학원, 해양연구원, 각 대학	
ARGO	3~5m	기상연구소 ARGO팀, 국제 ARGO Data Center, 해양연구원	
Mooring Buoy	1~10m	해양연구원, 국립수산과학원, 각 대학	

3.4.3. 시공간일치방법

계산된 해수면온도의 정확도 평가를 위해서 우선 해양-위성 자료 간 시간적으로 공간적으로 일치하는 Matchup Database를 만들어야 한다. 통상 해양관측자료는 시간정보, 위치(위도, 경도), 수온과 관측 깊이에 관한 정보를 포함하고 있으므로 이 정보들을 이용하여 COMS 위성 자료와 비교하여 해양자료와 위성자료가 주어진 시간(30분) 이내에 있고, 일정 거리(5km) 이내에 있는지를 비교하고, 구름 탐색과정에서 생산된 구름 flag를 조사하여 구름이 없고 문제가 되지 않는 일치점 자료들을 구하고 관련된 일련의 자료를 저장한다.

이 때 입력 자료로서 COMS 채널들(SWIR3.75 μ m, IR10.8 μ m, IR12.0 μ m)의 휘도온도, 위도 경도 등 위치 정보, 위성의 시간정보도 분 단위로 필요하다. 또한 위성 및 태양의 천정각, 구름 및 육지 mask 자료 등도 필요하다. 이러한 matchup 과정은 GTS Drifter 자료만 제때에 활용할 수 있다면 실시간으로 collocation data를 생산할 수 있고, 기존에 만들어진 matchup database에 자동으로 추가될 수 있다. 전체적으로 그런 기능을 수행하도록 구성 되어 있고, 제어 파일에서 실시간 matchup 과정이 수행되도록 고려하였다.

하나의 행에 해양자료 관측년도, 월, 일, 시, 분, 위성자료 위도, 경도, 태양천정각, 위성천정각, 위성 각 채널자료 채널 1, 2, 3, 4, 5, 중심화소에서 채널 1, 2, 3, 4, 5의 최소값, 최대값, 해양자료의 위도, 경도, 해양부이의 고유 id, 해양관측 수온, 위성 구름 flag, 3x3 영역에서 채널 4의 표준편차값, 채널1의 표준편차값, 해양관측 깊이, 해양추정 온도, 해양관측 풍향, 풍속, 대기 온도가 순차적으로 기록된다. 이들 자료는 해수면온도식의 계수를 산출할 때 활용되고, 정확도와 성능 평가를 위한 기초자료로 활용된다. 개발된 SST관련 모듈들은 matchup 자료들을 찾아서 파일로 저장하는 기능을 성공적으로 수행하였다.

시공간 일치점을 구한 자료에 구름 오염 화소를 제거하였다. 자세한 과정은 앞서 언 Table 4, Table 5에서 설명하였으며 구체적인 한계치도 제시하였다.

3.4.4. 검증결과분석

지난 1년(2005년 7월 ~ 2006년 6월) 동안 동아시아 영역에서 관측된 GTS Drifter 자료와 MTSAT-1R 자료를 이용하여 서로 시공간적으로 일치하는 database를 만들고 오차를 분석하였다. Split window MCSST의 경우 낮과 밤에 대해 각각 0.84 $^{\circ}$ C, 0.89 $^{\circ}$ C 오차를 나타내었다(Fig. 16). SST 오차(Buoy SST - MTSAT-1R SST)를 위도별로 나누어 평균 RMSE를 조사해 본 결과 Fig. 17에 나타난 것처럼 북위 10~20N 근처가 0.8 $^{\circ}$ C 정도의 낮은 오차를 보이고 고위도로 갈수록 오차는 증폭되어 1.2 $^{\circ}$ C 이상의 큰 값을 보이고 있다.

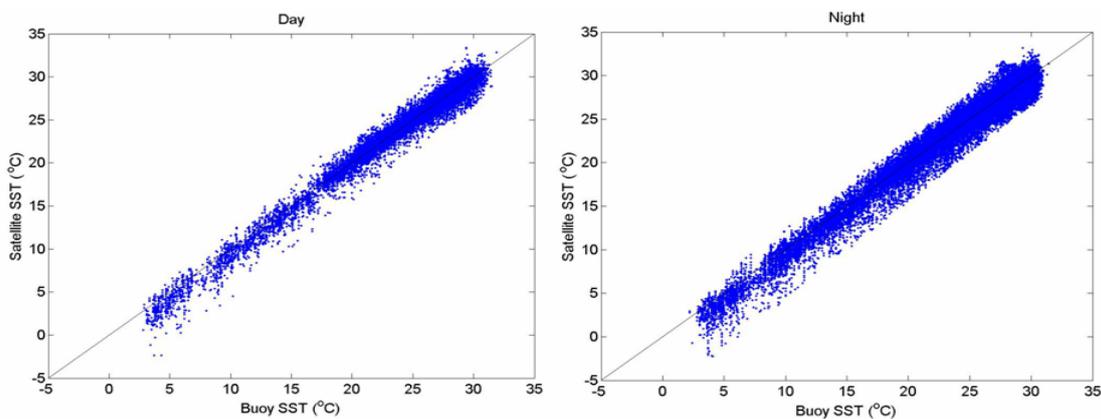


Fig. 16. Comparison of buoy SST and SST estimated from MTSAT-1R.

전구 영역에 대하여 GTS 부이 자료와 MTSAT-1R SST 계산 결과를 분석한 결과를 Fig. 18에 제시하였다. 낮과 밤의 자료 모두 0.9°C 정도의 RMS 오차를 보였다.

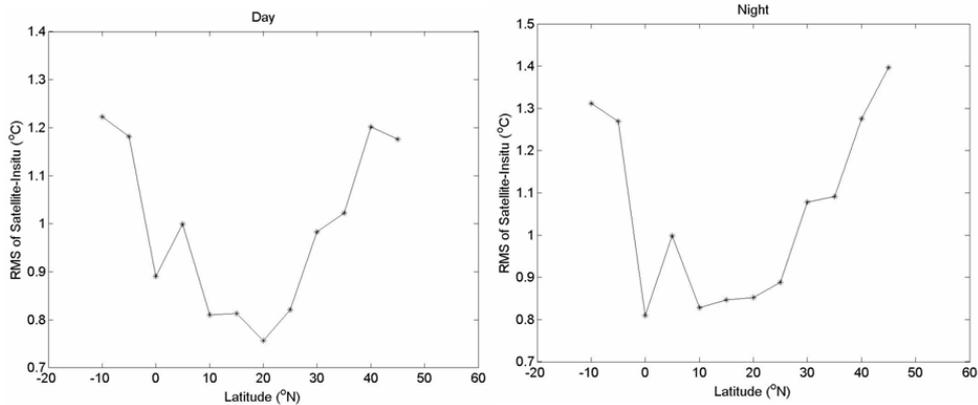


Fig. 17. Latitudinal variation of RMS errors of MTSAT-1R SST to buoy measurements.

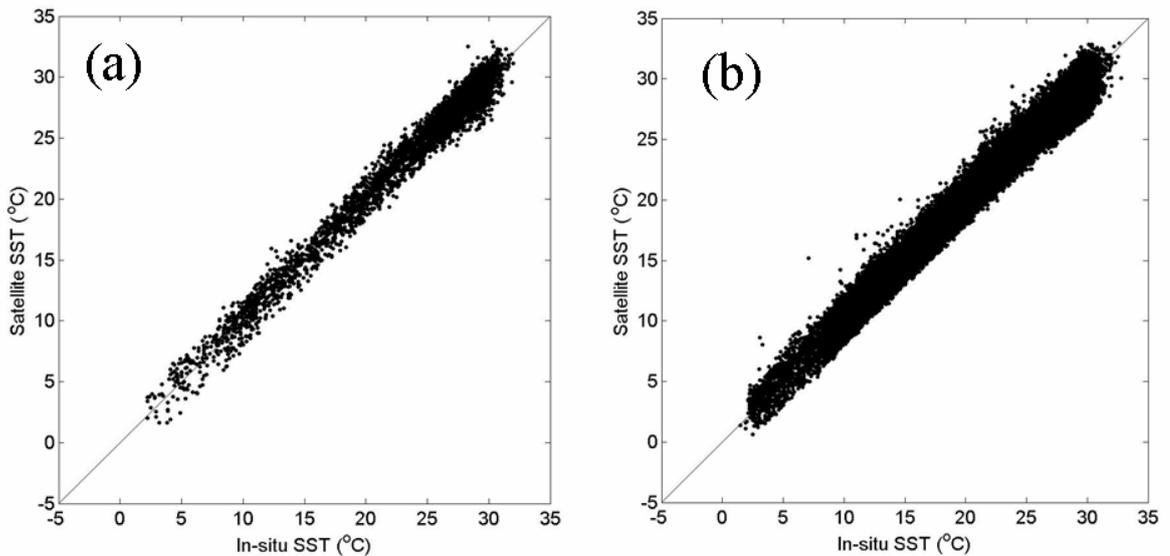


Fig. 18. Comparison of GTS buoy SST and SST estimations using (a) daytime and (b) nighttime MTSAT-1R data.

4. 산출결과 해석

산출된 해수면온도는 해양의 다양한 특성과 센서 자체의 오차, 대기에 의한 영향 등 다양한 요인으로 실제 해양 관측 치와 차이가 날 수 있다. 이러한 차이는 어쩔 수 없이 발생하지만 그 원인에 대한 이해가 있어야 앞으로 산출될 해수면온도장이 사용자의 목적에 적합한지 판단할 수 있다. 따라서 여러 가지 matchup database를 바탕으로 인공위성으로 구한 해수면온도의 오차의 특성을 조사하였다.

NASA/JPL 5년 동안의 NOAA-14 matchup database의 rms 오차는 $1.02\text{ }^{\circ}\text{C}$, bias는 $-0.1097\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 계산되었고, ARGO자료와 AQUA/AMSR-E 자료간의 3년 동안의 3118개의 matchup 자료는 ascending pass에 대하여 $0.85\text{ }^{\circ}\text{C}$, descending pass에 대하여 $0.71\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 rms 오차를 가지는 것으로 평가되었다. 동북아시아 국가들의 네트워크를 통하여 공동으로 생성한 NGSST matchup database는 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 정도의 오차를 보였는데, 지역과 계절과 일간 변화에 따라 해수면온도 오차도 크게 변동하였고, 특히 바람이 약하고 일사량이 큰 날 오차가 큰 것으로 나타났다(Fig. 19). 바람이 약하게 부는 확률을 지난 6년 동안의 QuikSCAT 바람 자료를 이용하여 계산해 본 결과(Fig. 20), 적도 지방을 중심으로 약한 바람이 자주 나타나고 멕시코 서쪽 부분, 인도양 등 국지적으로 바람이 약하게 나타나서 낮과 밤에 따른 온도차와 오차가 커짐을 알 수 있었다. 따라서 이들 해역의 해수면온도장을 사용할 때에는 주의가 요구된다. COMS 영역에서도 적도 가까이에서 바람이 낮을 확률이 80% 이상이어서 여름철 일사량이 강할 때 COMS 위성이 관측한 주간 해수면온도장도 실제보다 높게 산출될 가능성이 있다. 반대로 야간에 바람이 강할 경우에는 수직 혼합이 활발해서 문제가 없으나 약할 경우에는 해양의 피층은 대기로의 열 손실을 입게 되어 아래의 bulk 수온보다 현저히 떨어질 가능성이 있으므로 사용자의 목적에 따라 산출된 해수면온도장을 조심스럽게 활용하여야 한다.

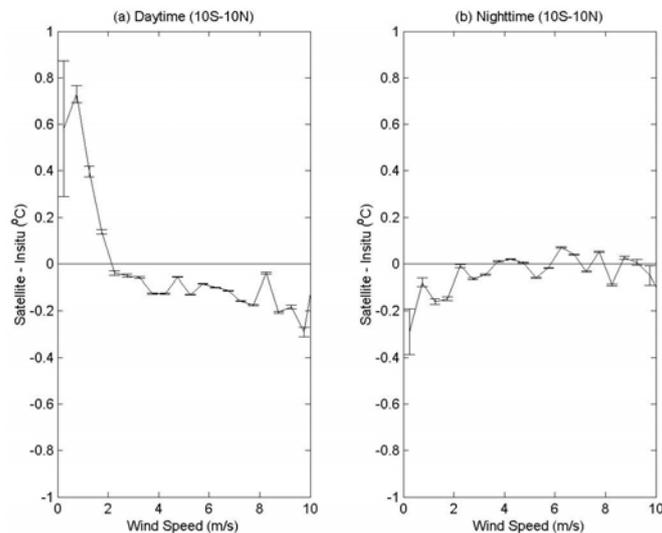


Fig. 19. SST errors as a function of wind speed at low latitude area within 10 degrees from the equator.

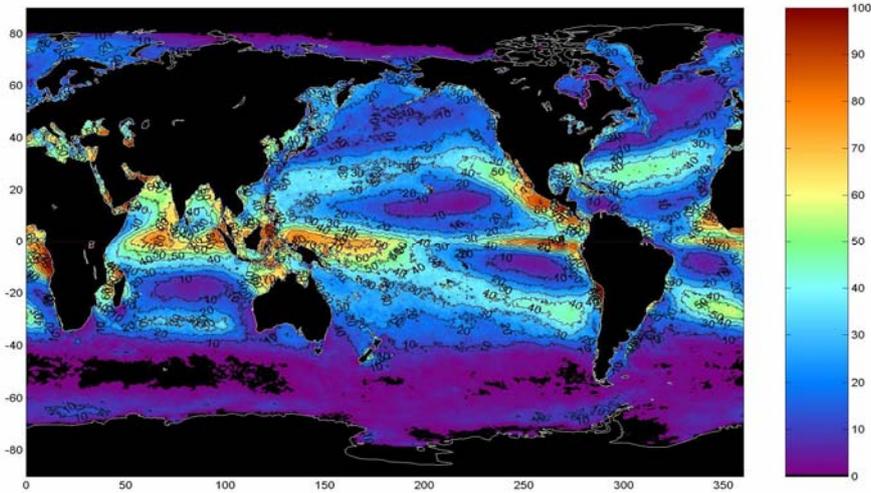


Fig. 20. Frequency probability (%) of low wind speed (<6m/s) for the period of 1999~2005.

5. 천리안위성발사 후 COMS화 및 알고리즘 개선

5.1 새로운 계수 산출

2011년 4월에서 6월까지의 GTS 부이 자료와 천리안 위성 관측 자료를 가지고 새로운 MCSST 계수를 구하여 현업에 적용하였으며(Table 14), 기존의 RTM에 기반한 계수에 비해 정확도가 향상되었다. 계수를 구하기 위한 부이 자료와 이 계수로부터 구해진 해수면온도를 비교하면 다음과 같다(Fig. 21).

Table 14. Coefficients of MCSST equations using each channel of COMS and GTS buoy data.

```

===== Daytime SST Coefficients & Regression Errors =====
I. Multi-channel SST with satellite zenith angle correction
Split : MCSST45 =C1*Tb11 + C2*(Tb11-Tb12) + C3*(Tb11-Tb12)*(sec θ 1) + C4
-----
Algorithm :      C1           C2           C3           C4           RMS           Bias
MCSST45 : 0.985098    2.338343    0.545135  -0.321399  0.703923  0.000105

===== Nighttime SST Coefficients & Regression Errors =====
Algorithm :      C1           C2           C3           C4           RMS           Bias
MCSST45 : 0.975640    2.496965    0.353631  -0.031189  0.735682  -0.000010

=====
* T3 : COMS SWIR TBB, T4:COMS IR1 TBB, T5: COMS IR2 TBB

```

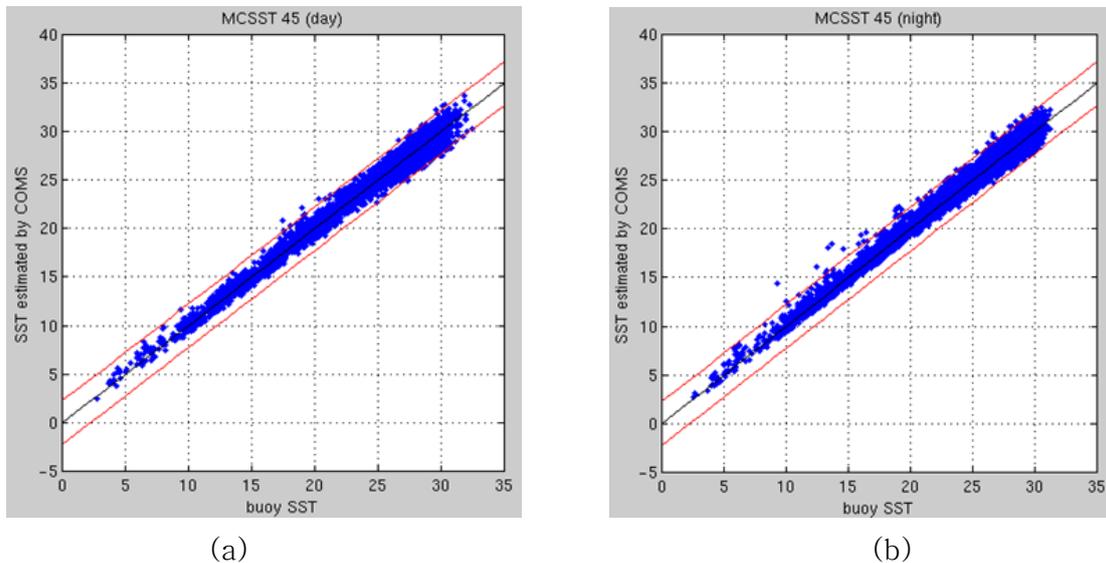


Fig. 21. Comparison of GTS buoy SST and SST estimations using (a) daytime and (b) nighttime COMS data

5.2 알고리즘 개선

해수면 온도 탐지의 오차를 발생시키는 요인 중 가장 큰 요인인 구름에 의한 오염을 최소한으로 줄이기 위하여 구름 탐지 알고리즘을 강화 하였다. 먼저 thin cirrus test (Fig. 4; 식(16))를 계수를 구할 때뿐만 아니라 해수면 온도 산출 시에도 적용하여 구름 영향을 제거하였다. 또한 기후학적 평균값(Fig. 14)와 큰 차이를 보이는 경우에도 구름으로 간주하여 제거하였다. 이렇게 구해진 해수면 온도는 Fig 24(b)와 같으며 전에 사용된 계수에 비하여 새로 계산된 계수는 전체적으로 조금 낮은 온도 분포를 보여주고 있다.

5.3. COMS화 후 검증결과

새로운 계수와 구름탐지 개선을 통한 결과를 기존의 결과와 통계적으로 비교하였다 (Table 15). 4월에서 6월까지 부이 자료와 비교한 결과, RMSE는 2.597에서 2.037로, 그리고 상관계수(R)은 0.935에서 0.96으로 증가되어 COMS화 되어 계산된 계수가 실제 해수면 온도와 더욱 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 이는 CMDPS SST 참고정확도인 RMSE 2.247, R 0.94보다 높게 나타났으며 Bias의 경우에 기준과 거의 거의 일치하는 -1.119도로 나타났다. 부이와 비교했을 때 COMS에서 측정된 값이 음의 Bias를 가지는 이유는 구름의 영향이 완전히 제거되지 못한 것과 계절별로 다른 특성을 가지는 해수면 온도를 하나의 계수로 산출하는데 따른 오차로 생각된다.

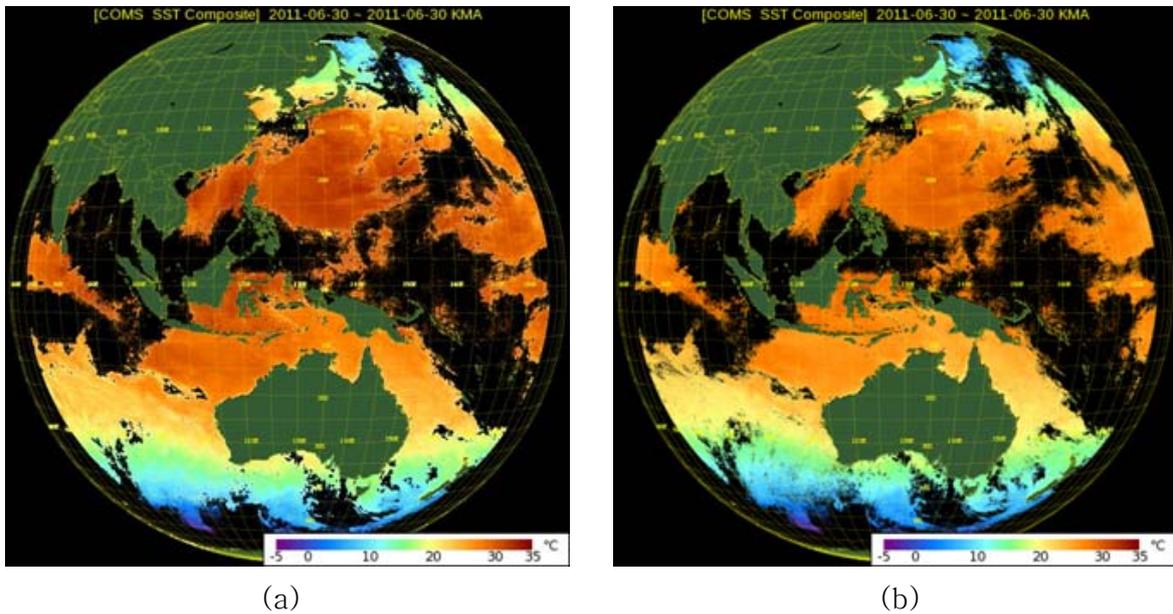


Fig. 22. Comparison of SST estimations using (a) RTM based coefficients and (b) newly calculated coefficients.

Table 15. Statistical comparison between RTM based(old) and newly calculated coefficients

		RMSE	BIAS	R	N
April, 2011	OLD SST	2.757	0.730	0.920	296757
	NEW SST	1.973	-1.081	0.964	268532
	NEW SST(CN)	1.917	-1.011	0.964	225789
May, 2011	OLD SST	2.419	0.878	0.948	287883
	NEW SST	2.097	-1.219	0.963	266580
	NEW SST(CN)	2.037	-1.136	0.962	221556
June, 2011	OLD SST	2.599	1.073	0.926	307219
	NEW SST	2.038	-1.06	0.945	281300
	NEW SST(CN)	1.969	-0.965	0.933	234767
ALL	OLD SST	2.597	0.896	0.935	891859
	NEW SST	2.037	-1.119	0.96	816412
	NEW SST(CN)	1.974	-1.036	0.959	682112
	Target value	2.247	-1.052	0.94	

6. 문제점 및 개선 가능성

현재의 해수면온도 계산 과정은 해양관측 자료와 COMS 인공위성 자료사이에 Collocation 자료를 우선 생산한 후, 이들 자료를 경험적 회귀분석을 통해 해수면온도 계수를 산출하고 있다. 이 과정에서 가장 중요한 단계는 정확하고도 많은 해양관측 자료 수집에 있다. 현재는 기상청 GTS 망에 올라오는 Drifter buoy 수온 자료를 활용하고 있으나 해양 Bulk 수온을 표현하기 위해서는 다양한 기기를 이용하여 관측한 수온이 필요하다. CTD 자료는 국립해양조사원, 국립수산과학원, 연구소, 각 대학 등에서 관측하고 있고, 국립해양조사원은 매년 상당수의 Drifter를 직접 띄우고 있으며, 연안정지 수온관측, 계류부이 관측, 그리고 ARGO 프로트 수온 자료가 있다. 이들 자료는 정밀한 보정 과정을 거쳐야 활용 가능하다. 따라서 COMS 띄우기 전 이러한 자료들을 확보하기 위한 긴밀한 협력과 노력이 필요하다.

해양의 수온을 측정하는 기기들이 일정한 수심을 유지하도록 하는 것은 쉬운 일이 아니다. 표층 뜰개는 표면 가까이 20 cm 내에 위치하고 있어서 해상 상태가 조용할 경우에는 어느 정도 일정한 깊이를 유지하지만 파랑, 풍랑 등 해수 표면에서 수직적 운동이 활발한 경우에는 일정 수심을 유지하기 어렵다. CTD 자료는 자료 보정단계에서 피층 가까이에서 관측된 수온은 보통 버리고 표층 수온에 해당하는 수 m 수온 자료를 사용한다. 따라서 앞에서 보였던 인공위성 해수면온도 오차의 다양한 특성은 이러한 관측기기들이 수온을 관측하는 깊이가 다르다는 점과 해양의 수직적 수온 구조가 일변화를 한다는 점에서 찾아볼 수 있다.

밤과 낮에 따른 일반적 수온의 수직적 구조 변화를 Fig. 23에 개념적으로 나타내었다. 낮에는 Fig. 23과 같이 인공위성이 관측하는 피층의 수온이 가장 높고 수심이 깊어질수록 급격히 감소하여 일정한 수온에 도달하고, 밤에는 Fig. 23b와 같이 해수 표면 부분의 냉각이 이루어짐에 따라 표면이 가장 낮은 수온을 가지게 되고 수심이 깊어질수록 수온이 증가하는 양상을 보이는 구조를 생각해 볼 수 있다. 그러나 해양 수면 가까이의 수온의 수직적 구조가 반드시 Fig. 23을 따르는 것은 아니다. 낮에 바람이 많이 불 경우 표층의 혼합이 활발하고 피층에서 대기로 열 손실이 발생하여 피층의 수온이 더 낮을 수도 있다. 또한 밤에 더운 대기의 수평적 이류로 인하여 해양 피층이 국지적으로 가열되어 표층의 수온보다 더 높을 수도 있다. 이런 의미에서 Fig. 23은 여러 가지 가능성 중에서 가장 대표적인 두 가지 수직적 구조를 나타낸 것이다.

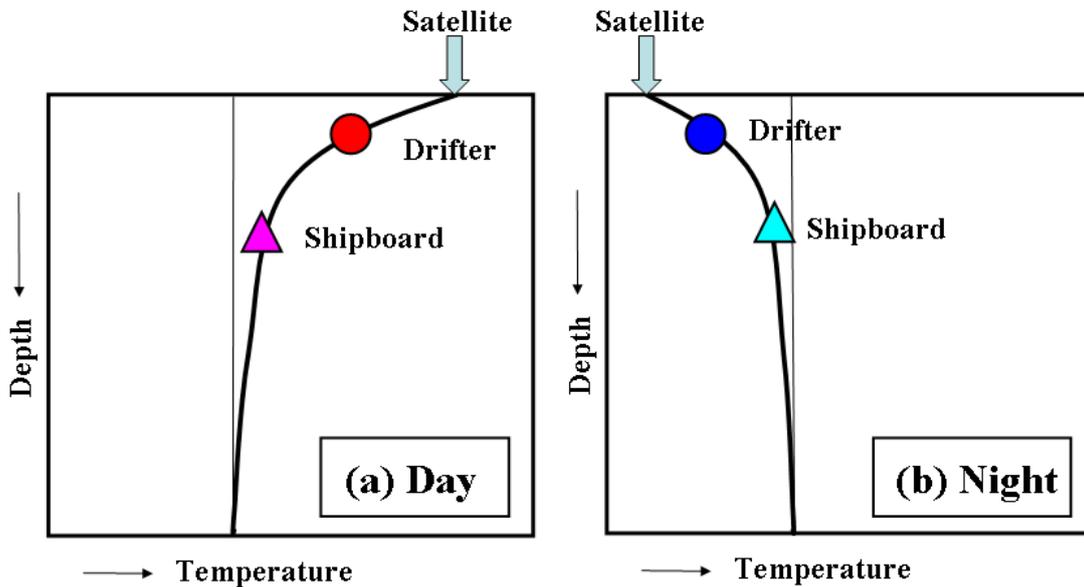


Fig. 23. Schematic plots of vertical temperature profiles of the layer within a few meters from the sea surface according to daytime and nighttime. Oceanic instruments of satellite-tracked surface drifting buoy and CTD measures sea surface temperatures at different depth.

해양 피층의 수온은 표층 수온과 낮과 밤에 따라서 크기는 2.5°C 정도의 차이를 가질 수 있다. 본 연구에서 활용한 적외선 영상 자료는 해수면에서 수 μm 이내에서 나오는 복사에너지를 관측하지만 수심 20cm~5m 사이에서 관측한 수온 자료에 경험적으로 회귀분석을 한 계수를 통하여 해수면온도로 산출되기 때문에 엄밀히 말하자면 수 μm 의 해수면온도도 아니고 해양 표층수온도 아니다. 그런데 위성 SST가 해양 조사선에서의 CTD 관측보다는 표층 뜰개 수온과 더 유사하게 나타나고 CTD 수온에 대해서는 다양한 요인에 의하여 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 까지 큰 차이를 보였다. 대양에 대하여 위성 해수면온도 계수를 유도할 때 CTD나 계류 부이에서 관측한 수온 자료는 보정 단계를 거쳐야 하기 때문에 시간적으로 늦게 획득될 수 있으나, 표층 뜰개 자료는 거의 실시간으로 얻을 수 있기 때문에 해수면온도 계수 유도에 가장 많이 활용되고 있다. 표층 뜰개 관측 자료가 많으면 많을수록 유도된 계수들은 표층 뜰개 수온의 변화를 가장 많이 반영할 것으로 유추할 수 있다. 해양 피층의 수온은 해양-대기 사이의 분자적 확산보다도 바람에 의한 강한 난류적 혼합에 의하여 쉽게 바뀔 수 있는 온도이다. 따라서 해양 피층의 온도도 중요하지만 해수면 아래 표층 수온을 아는 것이 해양 현상을 좀 더 잘 이해할 수 있고, 해양 순환모델, 기후-일기 예측모델의 입력 자료로도 더 적절하게 활용할 수 있다. 따라서 해수 표층 수온의 수직 구조에 대한 많은 현장 관측이 이루어져야 하고, 이를 활용하여 SST 오차의 국지적 특성에 대한 이해가 선행되어야 할 것이다.

해수면온도의 주야간 변화(Diurnal Variation)를 보기 위하여 일사량이 여름철 해수면

온도의 시계열 영상 자료를 분석하였다. AVHRR과 같은 적외 센서 자료는 야간에 가시 영상이 없는 야간에는 구름 탐색에 실패할 가능성이 크다. 구름으로 오염된 영역은 주변보다 상당히 낮은 해수면온도를 생산하게 되어서 해수면온도의 일간변화가 실제 해양의 현상이 아니라 해수면온도 산출시의 구름 탐색의 실패 때문에 증폭될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 구름에 의해 흡수되지 않고 사용할 수 있는 AQUA/AMSR-E 극초단파 센서의 해수면온도 자료를 활용하였다. 자료 기간은 2002년 8월 한 달로 정하였다.

Fig. 24a와 24b는 주간 Ascending Pass와 야간 Descending Pass에 대한 해수면온도평균 분포도이다. 평균 수온장과 주야간 해수면온도 차이(Fig. 21c), 그리고 각 화소에서 주야간 수온 차이의 최대값(Fig. 24d)을 식 (18)과 (19)으로 부터 구하였다.

(18)

(19)

여기서 θ 와 ϕ 는 임의 화소의 위도와 경도 에서 관측된 주간과 야간의 해수면온도이다. N 는 각 화소에서 전체 자료기간동안 주간, 야간에 관측된 해수면온도 자료의 개수를 나타내고, N_{day} 는 주간과 야간 동시에 해수면온도가 관측된 곳의 해수면온도 자료의 개수를 나타낸다. 극초단파 센서를 사용하였다더라도 강한 강우나 두꺼운 수직운이 발달해 있을 경우는 해수면온도 자료를 사용할 수 없으므로, 해수면온도 자료의 수는 모든 화소에서 위치 의 함수로 표현된다. 주야간 수온차이의 평균 분포도는 모든 화소에 대하여 주야간의 일간 해수면온도 차이를 먼저 구한 후 나중에 평균을 취하여 얻었다.

4월이나 11월과 같이 봄철과 가을철에는 해수의 수직적 성층이 여름보다 작기 때문에 일교차가 작게 나타난다. 따라서 하루 중 해수면온도의 일간변화가 가장 큰 8월을 선택하였고, 2002년 8월 한 달 동안의 자료를 이용한 낮과 밤의 해수면온도 평균장을 Fig. 24a와 24b에 나타내었다. 육안으로 해수면온도 차이를 식별하기는 쉽지 않다. Fig. 24c는 매일의 해수면온도 일변화를 구한 후 각 화소에서 전체 기간 동안의 평균을 나타낸다. 음의 값은 일본 동쪽 쿠로시오 해류가 있는 곳, 대만 북쪽 동중국해, 그리고 10°N 와 20°N 사이의 저위도 해역에서 나타나고, 전체적으로 1.5°C까지 양의 값이 많이 분포하고 있다. 동해의 경우 동해 북서쪽이 남동쪽보다 해수면온도 일교차가 크게 나타났다. Fig. 24c는 일교차를 시간 평균을 하였기 때문에 실제로 일간변화가 큰 현상이 표현되지

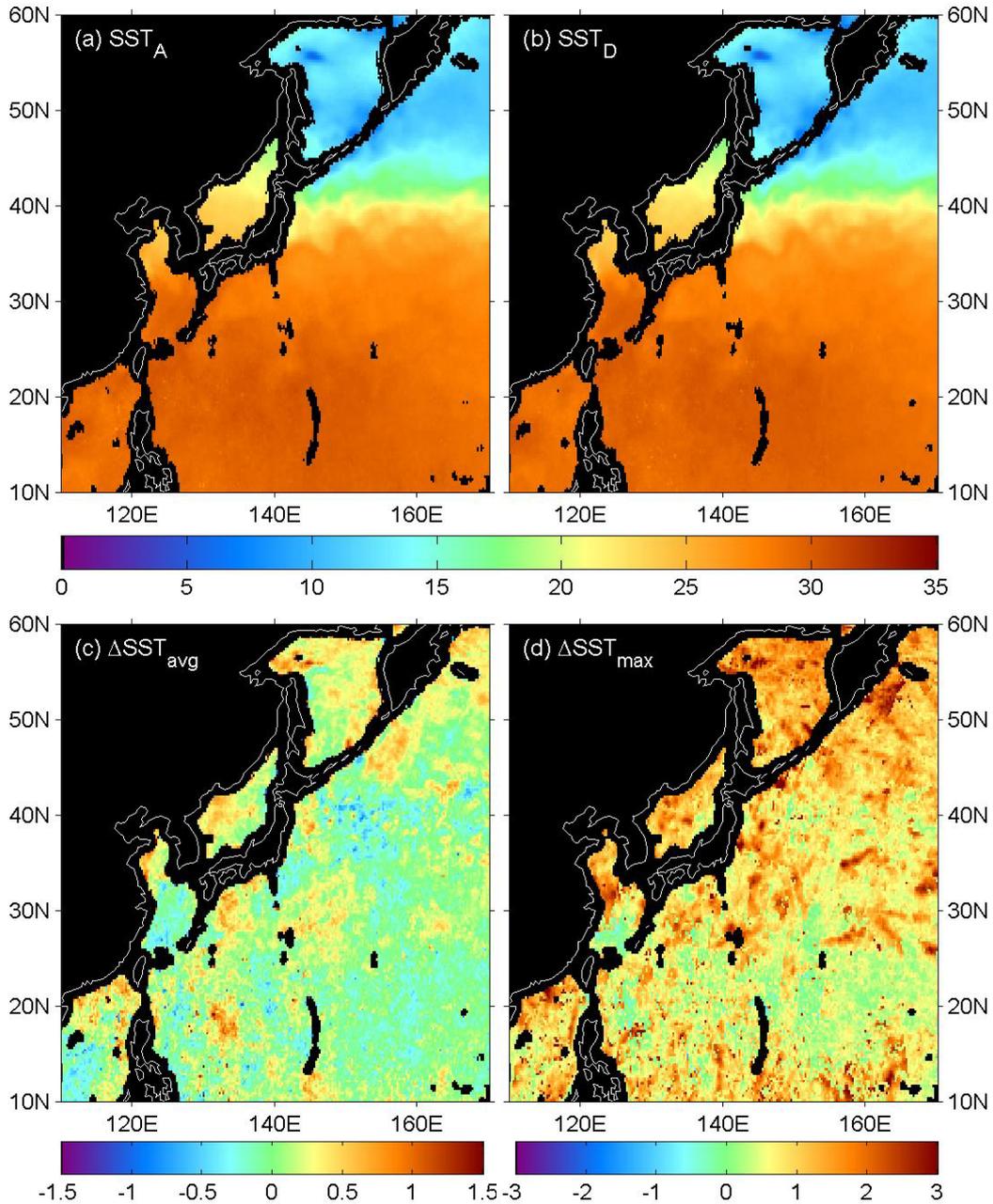


Fig. 24. Sea surface temperature averaged for (a) daytime ascending passes and (b) nighttime descending passes of AQUA/AMSR-E in August, 2002. (c) is the average map of SST difference between daytime and nighttime SST for the same day and (d) shows the maximum of diurnal difference of each day for a month of August in 2002.

않을 수 있다. 따라서 한 달 동안 해수면온도 일교차들의 최대치를 조사하여 Fig. 24d에 도시하였다. 한 달 동안의 최대값은 98 % 이상의 화소가 양의 값을 보였으며 42 % 이상은 1 °C 이상으로 낮 수온이 밤 수온보다 훨씬 높게 나타났다. 이러한 해수면온도 일교차

는 바람이 약하고 해수면으로 태양 일사량의 유입이 크며 해양에 성층이 잘 발달되어 있을 때 일반적으로 크게 나타난다고 보고되었다(Donlon et al., 2002). 해수면온도의 일교차는 해양-대기 현상의 변화에 많은 영향을 준다. Cornillon and Strammer(1985)는 월별 해수면온도장을 산출할 때 SST 일교차가 포함되면 0.2 °C 정도의 수온이 상승하고 이는 열속(Heat Flux)으로 5 Wm^{-2} 에 달한다고 지적하였다. NOAA/AVHRR의 경우 심한 경우에는 일간 변화가 6.6°C까지 도달한 경우도 있었다(Flament et al., 1994). 이러한 문제점은 해양의 수직적 구조를 파악하기 위한 보다 많은 관측이 필요함을 시사한다. 0~3 m 사이의 수온을 지속적으로 관측할 수 있다면 수치예보모델에 입력되는 해수면온도장을 재가공하는 기술을 개발할 수 있을 것으로 예상된다.

낮과 밤이 동시에 한 영상에 존재할 경우 현재의 알고리즘은 낮과 밤 중 어느 하나를 결정하여 그 공식을 사용하도록 하였다. 이는 낮과 밤을 구분하여 하나의 영상에 서로 다른 알고리즘을 사용하였을 경우 발생하는 해수면온도장의 불연속 경계면을 막기 위함이다. 이러한 불연속 경계면이 수치모델의 입력장으로 바로 활용이 될 경우에는 마치 해양에 큰 열전선이 있는 것으로 작용하여 해양-대기 경계층의 안정도를 변화시키게 된다. 안정도의 변화와 공간적 차이는 수치모델에 해양-대기 상호작용으로 인한 현상들을 생성한다. 모델 예측의 정확도가 입력 자료에 의해 달라지며 예측 가능하지 않은 방향으로 모델의 결과가 나올 수 있다. matchup database를 지속적으로 생산하고 분석하여 이 영역에서 발생할 수 있는 오차의 시공간적인 특성을 파악하고 대처하여야 할 것이다. MTSAT-1R 자료와 Buoy 자료 사이의 실시간 matchup 과정이 이루어지고 많은 수의 matchup database가 생산된다면 이러한 특성을 파악할 수 있을 것이다.

구름은 해수면온도 계산에 가장 큰 걸림돌이다. 구름 탐지가 완벽하지 못할 경우 대부분의 해수면온도는 낮게 산출된다. 이러한 값들은 과거의 해수면온도 기후값이나 이전의 합성장과 비교하여 제거해 준다. 그런데 해양은 자체적으로 같은 시기라도 년 변동이 큰 해역에서는 이러한 접근 방법이 적절하지 않을 수 있다. 각 해역에 대한 시공간적 변동성에 대한 이해가 있어야 sst flag를 줄 때 threshold 값을 일률적으로 주지 않고 지역적 특성을 고려하여 변화하게 할 수 있을 것이다.

7. 참고문헌

- Bernstein R. L., 1982, Sea surface temperature estimation using the NOAA-6 satellite Advanced Very High Resolution Radiometer, J. Geophys. Res., 87, C12, 9455-9465.
- Barton I. J., 1985, Transmission model and ground-truth investigation of satellite-derived sea surface temperatures, J. Clim. Appl. Meteorol., 24, 508-516.
- Donlon, C. J., T. J. Nightingale, T. Sheasby, J. Turner, I. S. Robinson, and W.

- J. Emery, 1999. Implications of the oceanic thermal skin temperature deviation at high wind speed. *Geophysical Research Letters*, 26(16): 2505–2508.
- Donlon, C. J., P.J. Minnett, 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, *J. Climate*, 15: 353–369.
- Flament, P., J. Firing, M. Sawyer and C. Trefois, 1994. Amplitude and horizontal structure of a large diurnal sea surface warming event during the Coastal Ocean Dynamics Experiment. *J. Phys. Oceanogr.*, 24: 124–139.
- McClain E.P., Pichel W.G. and Walton C .C., 1985, Comparative performance of AVHRR–based multichannel sea surface temperature. *J. Geophys. Res.*, 90, 3655–3661.
- McMillin, L. M., 1975, Estimation of sea surface temperatures from two infrared window measurements with different absorption, *J. Geophys. Res.*, 80, 5113–5117.
- Prabakahara C., Dalu G. and Kunde V.G., 1974, Estimation of sea surface temperature from remote sensing in the 11 – 13 μm window region, *J. Geophys. Res.*, 79, 5039–5044.
- Walton, C.C., 1988, Nonlinear multichannel algorithms for estimating sea surface temperature with AVHRR satellite data. *J. Applied Meteor.*, 27, 115–124.
- 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, *J. Geophys. Res.*, 103, C12, 27999–28012.