

## 인공위성관측 해수면온도와 현장관측 수온의 비교를 통해 본 해양 피층-표층 수온의 차이

박경애\*<sup>†</sup> · Futoki Sakaida\*\* · Hiroshi Kawamura\*\*

\*서울대학교 지구과학교육과/해양연구소

\*\*Center for Atmospheric and Oceanic Studies, Tohoku University, Sendai, Japan

### Oceanic Skin-Bulk Temperature Difference through the Comparison of Satellite-Observed Sea Surface Temperature and In-Situ Measurements

Kyung-Ae Park\*<sup>†</sup>, Futoki Sakaida\*\*, and Hiroshi Kawamura\*\*

\*Department of Earth Science Education / Research Institute of Oceanography, Seoul National University

\*\*Center for Atmospheric and Oceanic Studies, Tohoku University, Sendai, Japan

**Abstract :** Characteristics of skin-bulk sea surface temperature (SST) differences in the Northeast Asia seas were analyzed by utilizing 845 collocated matchup data between NOAA/AVHRR data and oceanic in-situ temperature measurements for selected months from 1994 to 2003. In order to understand diurnal variation of SST within a few meters of the upper ocean, the matchup database were classified into four categories according to day-night and drifter-shipboard measurements. Temperature measurements from daytime drifters showed a good agreement with satellite MCSST (Multi-Channel Sea Surface Temperature) with an RMS error of about 0.56°C. Poor accuracy of SST with an rms error of 1.12°C was found in the case of daytime shipboard CTD (Conductivity, Temperature, Depth) measurements. SST differences between MCSST and in-situ measurements are caused by various errors coming from atmospheric moist effect, coastal effect, and others. Most of the remarkable errors were resulted from the diurnal variation of vertical temperature structure within a few meters as well as in-situ oceanic temperatures at different depth, about 20 cm for a satellite-tracked drifting buoy and a few meters for shipboard CTD or moored buoy. This study suggests that satellite-derived SST shows significant errors of about  $\pm 3^{\circ}\text{C}$  in some cases and therefore it should be carefully used for one's purpose, on the base of in-depth understanding of skin-bulk SST difference and vertical temperature structure in regional sea.

**Key Words :** sea surface temperature, skin, bulk, diurnal variation, MCSST.

**요약 :** 1994년부터 2003년까지 임의로 선택한 달들에 대하여 NOAA/AVHRR 인공위성 자료와 해양 현장수온 관측 자료사이에서 획득된 845개의 일치점 자료를 활용하여 북동아시아 해역에서 해양 피층-표층 해수면온도 차이의 특성을 분석하였다. 해양 상층 수 m내에서의 해수면온도의 일간 변화를 이해하기 위하여 일치점 데이터베이스는 낮과 밤, 표층 뜰개-선박 관측에 따라서 모두 네 가지 부류로 분류하였다. 주간

접수일(2008년 5월 8일), 수정일(1차 : 2008년 5월 25일, 2차 : 6월 1일), 게재확정일(2008년 6월 7일).

<sup>†</sup> 교신저자: 박경애(kapark@snu.ac.kr)

표층 뜰개에 의한 수온 자료는 인공위성 해수면온도와 0.56°C의 가장 작은 제곱평균오차를 보여서 위성관측 수온과 가장 잘 일치하였다. 주간 선박관측에 의한 CTD 수온 자료는 1.12°C의 큰 제곱평균오차를 보여서 네 부류 중에서 가장 좋지 않은 정확도를 보였다. 위성 해수면온도와 현장 관측 해수면온도의 차이는 그 외에도 대기의 수증기 함량 효과, 연안으로부터 거리의 영향 등 다양한 요인에 의해 발생하였다. 그 중에서 가장 주목할 만한 오차는 수 m 이내 수온의 수직적 구조의 일간 변화에서 발생하였으며, 이는 표층 부이는 20 cm 정도, 선박 관측기기는 수 m로 현장에서 서로 다른 깊이의 수온을 관측하기 때문에 발생한 것으로 판단된다. 본 연구는 그동안 광범위하게 사용되어온 위성 SST는 어떤 경우에는 ±3°C의 큰 오차를 만들 수 있으므로 국지적 해양에서 해양 피층-표층 해수면온도 차이와 수온의 수직적 구조에 대한 보다 깊은 이해가 뒷받침되어야 하며, 이를 바탕으로 위성 SST를 사용자의 목적에 맞추어 주의 깊게 사용되어야 함을 제시한다.

## 1. 서론

급변하는 전 지구 규모의 기후변동을 이해하고 예측하기 위해서 과거 그 어느 때보다 해양의 역할이 강조되고 있다. 해수면온도(Sea Surface Temperature; SST)는 해양의 여러 가지 변수들 중에서 대기-해양 상호작용을 결정하는 가장 중요한 인자이다. 해수면온도는 대기의 일기와 기후를 결정하는데 중요한 역할을 하기도 하고, 거꾸로 대기의 상태에 의해 해수면온도가 다시 영향을 받기도 한다. 위성 해수면온도의 공간 분포와 시간적 변화를 분석하면 해양의 현장 관측치만으로 다루기 힘들었던 해류, 해양순환, 엘니노(El Nino), 전선, 소용돌이, 태풍 등 거시적 해양현상에 대한 역학적 과정을 좀 더 깊게 이해할 수 있다. 또한 해수면온도는 해양 순환모델 및 수치예보모델 등에서 경계조건의 입력 자료로서 매우 중요한 역할을 하고 있다.

최근 NOAA/AVHRR (National Oceanic and Atmospheric Administration / Advanced Very High Resolution Radiometer), AQUA/AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS) 등 다양한 위성 센서를 통하여 전구의 SST 자료가 실시간 혹은 준실시간으로 배포되고 있으며, 이 자료는 대기와 해양 현상을 이해하고 예측하는데 널리 활용되고 있다. 그런데 위성 SST를 활용하는 많은 사용자들이 다른 SST를 같은 개념의 해수면온도로 인식하고 사용하고 있다. 위성 열적외선센서(infrared sensor)는 10 μm, 극초단파(microwave) 센서는 1 mm 이내의 해수 피층(skin layer)에서 나오는 복사에너지를 관측하므로 서로 다른 깊이의 SST를 나타낸다(Donlon *et al.* 1999). 위성에서 관측한 복사에너지는 복사검정을 통하

여 휘도온도(brightness temperature)로 전환되고, 다시 표층 뜰개(surface drifter)나 CTD(Conductivity, Temperature, Depth)로 관측한 수 m 수온, 즉 표층 수온(bulk temperature)과 경험적 회귀분석을 통하여 해수면온도 산출식의 계수를 구하는데 사용된다. 이 계수들은 Prabakahara *et al.*(1974) 이후 개발된 다중채널 해수면온도(Multi-Channel Sea Surface Temperature: MCSST) 산출식에서 위성 SST를 계산하는데 활용되고 있다.

인공위성이 관측한 해수면온도의 주야간 차이는 계절과 국지적 해양의 특성에 따라서 변화가 매우 심하다. AVHRR SST 일교차는 동해에서 ±3°C에 달하기도 하고(Park *et al.*, 1999), 캘리포니아 연안에서는 6.6°C까지 도달한다(Flament *et al.*, 1994). 이 정도의 수온 차이가 수치모델에 보정없이 직접적으로 입력된다면 비정상적인 해를 만들 수 있다. 그 동안 해수면에서부터 수심 10 m에 이르는 해양 표층에서 연직 수온 자료의 부족으로 표층에서 일어나는 해양-대기 상호작용 및 해양 물리학적 과정을 깊게 이해할 수 없었다. 인공위성 해수면온도에 활용되는 해양 수온자료는 크게 인공위성 표층 뜰개자료와 CTD 등 해양 관측기기에 의한 수온자료가 있다. 본 연구에서 인공위성 해수면온도를 피층온도(skin temperature)로 정의하고, 표층뜰개나 CTD 등 해양 기기가 관측한 수 m의 해수면온도를 표층온도(bulk temperature)로 정의하고 활용하였다. 이 두 종류의 해수면온도는 서로 다른 깊이에서 수온을 관측하고 있어서 해양의 성층 구조에 따른 피층과 표층 수온 차이에 대한 이해를 깊게 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 해양 관측 수온자료를 두 종류로 나눈 후 해양의 수직적 수온 구조의 변화에 따른 해양 피층-표층 수온

의 주야간 변화를 이해하는데 목적이 있다.

## 2. 자료 및 처리 방법

### 1) 인공위성 자료 및 해양관측 자료

본 연구에 활용한 인공위성 자료는 NOAA 위성의 HRPT (High Resolution Picture Transmission) 자료 중에서 AVHRR의 5가지 밴드를 사용하였다. 각 밴드의 중심 파장대는 0.6, 0.9, 3.7, 11, 12  $\mu\text{m}$ 에 있다. AVHRR 자료 데이터베이스는 일본 Tohoku 대학이 NGSST (New Generation Sea Surface Temperature) 해수면 온도 생산에 활용하고 있는 1994년에서 2003년까지의 자료를 사용하였다. 각 파장대별로 관측된 수치는 복사 검정을 통하여 밴드 1과 2의 자료는 반사도로, 나머지 밴드 자료는 휘도온도로 전환하였다(<http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/podug/html/c3/sec3-3.htm>). 다음으로 육상과 연안지역 및 섬 등의 정확한 위치를 알

고 있는 지점들을 활용하여 지형보정을 하였다.

우리나라 주변해와 같은 북서태평양 해역은 대륙과 인접해 있어서 겨울철 해양과 대기 조건에 의하여 해빙이 형성되기도 하고, 여름에는 30 $^{\circ}\text{C}$  정도의 상당한 높은 수온까지 상승하여 해수면온도의 계절 변화가 심한 곳이다. 따라서 이러한 겨울철과 여름철의 해양과 대기의 특성이 모두 반영될 수 있도록 연구 해역을 Fig. 1과 같이 위도 10~60 $^{\circ}\text{N}$ , 경도 110~170 $^{\circ}\text{E}$  범위로 설정하였다.

해양조사선을 이용한 정점, 정선 관측들은 대부분 CTD를 통하여 이루어진다. CTD는 해양의 수온을 전통적으로 관측하는 대표적인 장비이다. 현장에서 수심별로 수온과 염분을 동시에 측정할 수 있으며 전기전도도와 수압을 이용하여 수심을 알아낼 수 있다. CTD로 관측한 수온의 정확도는 0.001 $^{\circ}\text{C}$  정도로 매우 정확하다. 그런데 해양 표면에서 1 m 이내에는 해양파, 파쇄, 잔물결 등 변동이 매우 심하기 때문에 일반적으로 수심 1 m 보다 얇은 곳의 수온 자료는 보정 작업에서 제거한다. 따라서 본 연구에 활용된 CTD 자료는 해양 피층의 온도

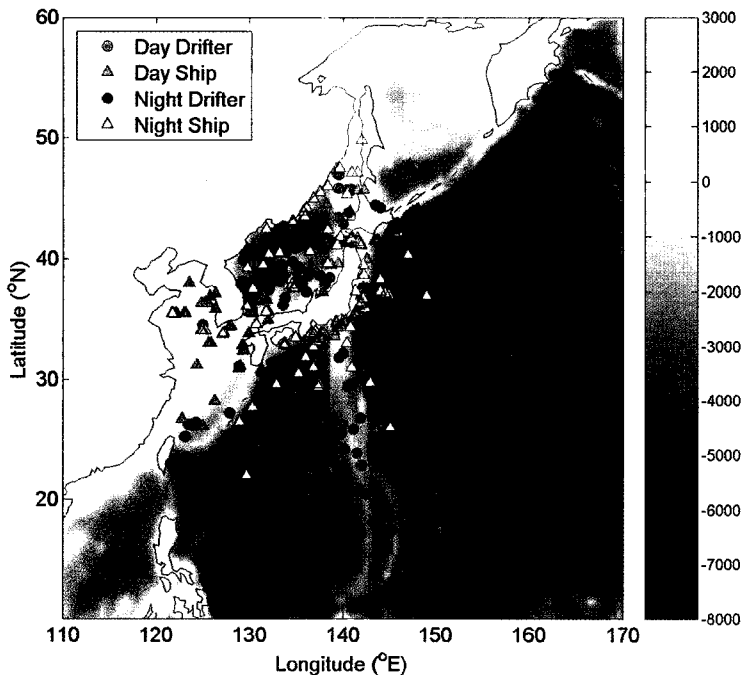


Fig. 1. Distribution of the collocated points between NOAA/AVHRR satellite data and oceanic in-situ temperature measurements according to day-night and instrument types. Oceanic in-situ measurements were classified into 4 categories of daytime drifter (red circle), daytime shipboard CTD measurements (pink triangle), nighttime drifter (blue circle), and nighttime CTD (cyan triangle). The background image shows orography and oceanic bathymetry in meters.

보다는 표층 수온으로 볼 수 있다.

또 다른 대표적인 해수면온도 측정 장비는 인공위성 추적 표층 뜰개이다. 수온 센서는 표면에서 평균적으로 20 cm 정도에 위치해 있으며 정밀도는 0.1°C 정도이다. CTD는 수온 변화가 매우 작은 수 천 m의 심층의 온도 변화를 알기에 적합하고, 해수면 가까이의 수온은 심층의 수 배 ~ 수백 배의 변화폭을 지니므로 정밀도가 떨어지더라도 본 연구에서 충분히 활용가능하다. 뜰개의 위치는 탑재된 GPS (Global Positioning System)로 알 수 있는데 대략 50~500 m 정도의 오차를 가지고 있다. 대부분의 해양 운동규모가 오차보다 훨씬 크고, 또 사용한 위성 센서의 공간해상력이 약 1.1 km이므로 본 연구의 일치점 생산과정의 위치 오차 측면에서는 무시할만하다. 인공위성 자료 기간에 관측한 모든 해양관측 자료를 수집하여 활용하였는데, 자료의 대부분은 NEARGOOS (North-East Asian Regional Global Ocean Observing System) 데이터베이스를 활용하였으며, NGSST를 위한 북동아시아 대학교 및 연구소 간의 국제적 협력으로 얻은 해양 관측 자료도 활용하였다.

2) 위성-해양자료 일치점 생산

해양 실측 수온자료와 NOAA 인공위성 자료가 시·공간적으로 일정 범위 내에 있는 일치점(matchup point) 자료들을 선별하였다. 우선 기본적인 복사검정, 지형보정 단계를 거친 NOAA 인공위성 자료의 가시영상 혹은 적외선 영상을 컴퓨터 화면에 띄운 후 구름 유무를 수동적으로 판단하였다. 해양 실측자료의 위치를

영상 자료 위에 표시하여 분석자의 육안으로 구름으로 덮여 있거나 구름으로 오염되어 있는 화소들을 제거하는 방식으로 진행되었다. 이 단계를 거친 화소들은 이후 객관적인 구름 탐색을 거치도록 하였다. 그리고 과도한 태양 반짝임(sun glint)에 노출되어 있는 화소와 육지 근처에 위치한 화소도 제거하였다(Sakaida *et al.*, 2000).

해양-위성 자료간의 시간 격차는 가능한 작을수록 좋지만, 선박 관측 기회가 많지 않고 연구 해역 특성상 일치점의 자료가 매우 적을 것으로 예상되어서 CTD 자료의 경우 3 시간 이내의 범위를 주었다. 해양에서 수 m의 수온은 해수면과 비교하여 일간변화가 상대적으로 거의 없음을 감안하여 이 시간적 격차는 허용 가능하다고 판단된다. 표층 뜰개의 경우 위성의 DCS(Data Collection System)로 수집되어서 위성 관측치와 함께 지상으로 송신되므로 위성자료와의 시간적 격차는 시간 한계치에 비해 무시할만하다. AVHRR 센서가 구별하는 해양 현상의 공간 규모가 3 km보다 훨씬 크기 때문에 해양-위성 자료간의 공간적 격차는 3 화소를 주었다. NOAA 위성 직하점에서는 약 3 km 범위에 해당하지만 위성 주사폭(scan width)의 가장자리 부분은 지구 곡률 효과와 주사각(scan angle) 효과 때문에 10 km를 상회하는 공간적인 차이를 가질 수 있다.

방대한 NOAA 인공위성의 원시 자료를 재처리하고 일련의 검정, 보정 단계를 거치려면 오랜 시간이 필요하다. 따라서 1994년부터 2003년까지 NOAA-11호에서 NOAA-17호까지의 모든 인공위성 자료를 처리하지는 못하였으며, 각 해의 임의의 달을 선택하여 데이터베이

Table 1. Distribution of the number of the matchup database between NOAA satellite data and oceanic in-situ measurements for arbitrarily selected months from 1994 to 2003

Year	Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Total
1994							2		2			38		42
1995			30					97					8	135
1996		11							64					75
1997					57					29				86
1998									4					4
1999							49					27		76
2000								63				20		83
2001		1							2					3
2002			7			46		11		23	78	25	36	226
2003		3	33	4			75							115
Total		15	70	4	57	46	126	171	72	52	78	110	44	845

스를 생산하였다(Table 1). 각 년도의 선택한 달은 해양 관측 자료가 상대적으로 많았을 때를 기준으로 하였는데, 이는 일반적으로 이루어지는 해양 관측이 봄, 가을 보다는 더 큰 수온 변화를 보이는 여름, 겨울 관측이 더 빈번히 이루어지고 있는 사실에 기초하여 선택하였다. 인공위성-해양관측 자료를 비교한 결과 총 845개의 일치점을 얻었다. Table 1은 주어진 연도와 달에 생산된 일치점 자료들의 수를 제시한 것이다. 일치점 데이터베이스에는 위성 일련번호, 육지와 해양 등을 나타내는 수, 위성의 고유 번호, 위성 주사각의 정보, 다섯 가지 AVHRR 밴드 자료, 적외선 영역의 휘도온도, 가시영역의 평균 반사도, 반사도의 공간적 표준편차, 열적외영역의 평균 휘도온도, 구름 유무, 그리고 태양-위성-천정과 관련된 위치각 정보, 관측 시각, 위도 경도 등 위치 정보, 수심 정보, 해양 관측 자료의 정보 등을 기록하였다. 본 연구에서 활용한 구름 탐색 방법은 Sakaida *et al.*(2000)의 기술을 따랐다.

### 3) 해수면온도 산출 및 정확도 평가

위성 자료로부터 해수면온도를 산출하는 알고리즘에는 대표적으로 MCSST, CPSST (Corrs-Product SST), NLSST (Non-Linear SST), PFSST (PathFinder SST) 등이 있다(McClain *et al.*, 1985; Walton, 1988; Walton *et al.*, 1998; Vazquez *et al.*, 1995). 이 중에서 11 μm와 12 μm 파장대를 사용하는 split-window MCSST 알고리즘이 가장 많이 안정적으로 사용되고 있

어서 본 연구의 비교에 활용하였다. MCSST 산출식은 식 (1)과 같고 주간과 야간 자료에 사용한 계수들은 Table 2에 제시하였다.

$$SST = aT_4 + b(T_4 - T_5) + c(T_4 - T_5)(\sec\theta_z - 1) + d \quad (1)$$

여기서  $\theta_z$ 는 위성천정각,  $T_4$ 는 11 μm 부근의 AVHRR 밴드 4의 휘도온도(°C), 그리고  $T_5$ 는 12 μm 부근의 AVHRR 밴드 5의 휘도온도(°C)를 나타낸다. NOAA-11, 12, 14 위성에 대해서는 NGSST 연구팀에서 유도한 계수들을 활용하였고, NOAA-15, 16, 17 위성에 대해서는 NOAA의 NESDIS (National Environmental Satellite Data and Information)에서 산출한 계수를 활용하였다.

인공위성 해수면온도의 정확도는 식 (2)와 같이 제곱평균오차(RMS; Root Mean Square Error)와 편차(Bias Error)로 계산하였다.

$$SST_e = SST_i - t_i$$

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (SST_i - t_i) \quad (2)$$

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (SST_i - t_i)^2}$$

여기에서  $n$ 은 일치점의 개수,  $t_i$ 는 해양관측 수온, 그리고  $SST_i$ 는 MCSST 알고리즘으로 계산된 위성 SST이다.  $SST_e$ 는 위성 온도에서 해양 관측 수온을 뺀 값으로 본 연구에서 위성 해수면온도의 오차로 정의하였다.

Table 2. Coefficients of the split-window MCSST equation (1) for NOAA satellites. The coefficients of NOAA-11, 12, 14 were derived by the NGSST team of Tohoku University and those of NOAA-15, 16, 17 were derived at NOAA/NESDIS

Satellite	Time	a	b	c	d
NOAA-11	Day	0.994994	2.249194	0.485238	1.997911
	Night	0.996243	2.019811	0.636677	1.768488
NOAA-12	Day	0.976624	2.259260	0.505390	8.121809
	Night	0.964344	2.250210	0.482484	10.525784
NOAA-14	Day	0.995297	2.141028	0.570288	1.440309
	Night	0.978227	2.080701	0.677174	6.392618
NOAA-15	Day	0.993892	2.752347	0.662999	1.753027
	Night	0.959456	2.663580	0.570613	12.120265
NOAA-16	Day	0.999317	2.301950	0.628966	-0.620000
	Night	0.995050	2.536550	0.753291	0.000000
NOAA-17	Day	1.010150	2.531500	1.000540	-3.440000
	Night	0.992818	2.499160	0.915103	1.944000

### 3. 위성 SST의 정확도 및 오차 특성

#### 1) 위성 SST의 주·야간별 관측기기별 정확도

본 연구의 자료를 활용하여 위성 해수면온도가 지니는 오차의 위도별 특성과 계절별 특성은 박 등(2008)에 의하여 기술되었고, 여기에서는 주야간에 따른 해양 피층과 표층의 수온차이의 변화를 이해하는데 주요한 목적이 있다. 따라서 1994년부터 2003년까지 선택한 달들에 대해 인공위성-해양관측 자료를 비교하여 얻은 전체 일치점 자료를 표층 뜰개 자료와 CTD 자료 등 현장 관측자료의 두 가지 부류로 나누고, 다시 낮과 밤에 따라 분류하여 총 4가지 부류로 나누었다. 각 부류의 개수와 전체 일치점 자료에서 차지하는 백분율을 Table 3에 나타내었다. 표층 뜰개와 CTD 관측에 의한 것이 각각 51%, 49%를 차지하여 거의 절반으로 나뉘어졌다. 이는 위성 해수면온도의 정확도를 분석하여 상호 결과를 비교할 때 어느 한 부류의 효과가 통계적으로 편중되지 않는 결과를 도출할 수 있을 것으로 예상된다. 낮과 밤의 분포를 보면 낮이 57%, 밤이 43%를 차지하여 낮과 밤의 구분도 관측기기에 의한 구분과 유사한 수준으로 서로 비교해 볼 수 있다. 이 네 가지 부류에 대하여 낮과 밤, 관측기기의 깊이에 따른 해수면온도의 정확도와 오차의 특성을 조사하였다. 각 부류에 대한 일치점의 위치는 Fig. 1에 도시하였다.

Fig. 2는 표층 뜰개 수온과 CTD 수온에 대하여 주·야간 인공위성 해수면온도를 비교한 그림이다. 위성 해수면온도가 해양 실측 수온에 대하여 선형의 비례관계를 보이고 있어서 전체적인 경향에서는 두 수온이 잘 일치하는 것으로 평가된다. Table 4에 각 부류에 대한 제곱평균오차와 편차를 나타내었다. 우선 관측기기에 상관없이 낮과 밤에 따른 오차를 비교해 보면 낮에 약

Table 3. The number of the matchup points classified into day or night and instrument types such as drifter and CTD. Percentage corresponding to each number of the matchups is shown in the parenthesis

Instruments	Time		
	Day	Night	Total
Drifter	232 (27.4%)	199 (23.3%)	431 ( 51%)
CTD etc.	250 (29.5%)	164 (19.4%)	414 ( 49%)
Total	482 (57.0%)	363 ( 43%)	845 (100%)

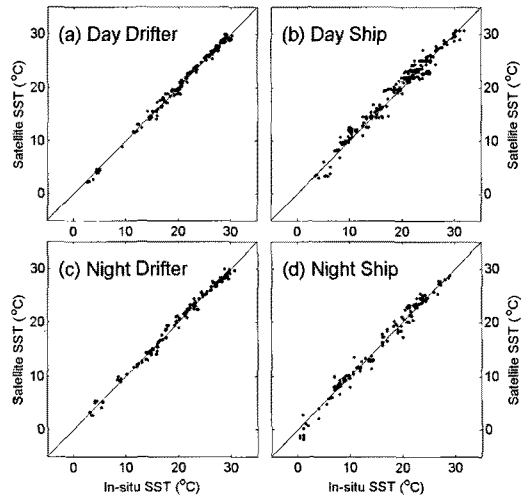


Fig. 2. Comparison of in-situ SST and satellite-derived SST for the cases of (a) daytime drifter temperature, (b) daytime shipboard CTD temperature, (c) nighttime drifter temperature, and (d) nighttime shipboard CTD temperature measurements from 1994 to 2003.

Table 4. RMS and bias errors of satellite-derived MCSST to in-situ SST by measurement time and different instruments such as satellite-tracking drifter and shipboard CTD

Instruments	RMS (°C)			Bias (°C)		
	Day	Night	Total	Day	Night	Total
Drifter	0.5636	0.6747	0.6177	0.0416	0.1140	0.0750
CTD etc.	1.1257	1.0569	1.1047	0.3993	0.1451	0.2986
Total	0.9168	0.8673	0.8967	0.2271	0.1281	0.1846

0.91°C, 밤에는 0.86°C를 보여서 주간보다 야간 위성 해수면온도가 보다 정확하게 산출되고 있다고 말할 수 있다. 특히 위성 SST는 표층 뜰개 수온에 대하여 약 0.56°C 오차를 가져서 1.12°C를 가진 CTD 자료에 비하여 월등히 높은 정확도를 보였다. 야간의 경우 표층 뜰개는 0.67°C, CTD 등 선박 관측자료는 1.05°C의 오차를 보여서 위성 SST는 낮과 밤의 두 경우 모두 표층 뜰개 SST에 더 근접해 있음을 알 수 있다. 낮과 밤에 상관없이 관측기기에 따른 정확도를 조사해보면 표층 뜰개는 0.61°C, CTD의 경우는 0.96°C의 정확도를 보였다. 관측기기에 관하여 종합해보면, 인공위성 해수면온도는 표층 뜰개의 관측과 더 밀접한 관련이 있음을 보여주는 것으로 해석할 수 있다. 네 가지 경우 중에서 표층 뜰개에 의한 수온 관측이 0.56°C로 가장 높은 정확도를 보였다. 관측기기와 주야간에 상관없이 모든 일치점 자료의 정확도는 대략 0.89°C에 달하였다. 그리고 편차는 네 가

지 부류에 대하여 모두 양의 편차 값을 보여서 위성 해수면온도가 해양 실측치에 비하여 평균적으로 높게 산출되었다.

위성 해수면온도와 해양 관측 수온의 차이가 지니는 다양한 특성을 이해하기 위하여, 두 수온의 차이 값을 해양 관측 수온에 대한 함수로 Fig. 3a에 도시하였다. 위성 SST 오차, 즉 위성 수온에서 해양 관측 수온을 뺀 값은 해양관측 수온에 대하여 전체적으로  $-3\sim 3^{\circ}\text{C}$  이내에 분포한다. Table 4에서  $0.18^{\circ}\text{C}$ 의 전체 자료에 대한 편차 값에서 볼 수 있듯이 SST 오차는 양의 범위에 많이 분포하고 음의 범위에는 상대적으로 매우 적게 분포하고 있다. Fig. 3b, 3d는 위성 SST가 표층 뜰개 수온에 대해  $-2^{\circ}\text{C}$ 에서  $2^{\circ}\text{C}$ 까지의 SST 오차 범위에 분포하고 있음을 보여준다. 반면에 CTD 자료와의 수온 차이는

$-3^{\circ}\text{C}$ 에서  $3^{\circ}\text{C}$ 까지 넓게 분포하고 있어서 위성 수온이 표층 뜰개가 관측한 수온보다는 CTD 수온과 더 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다.

Fig. 4는 해수면온도 오차의 분포를 빈도수로 도시한 것이다. 낮 동안 해수면이 가열됨에 따라 위성이 관측한 피층의 온도는 표층에서 강한 수직적 혼합이 이루어지지 않는 한 해수면 이하의 표층 온도와 상당한 차이를 가질 것으로 예상된다. Fig. 4b에서 볼 수 있듯이 체 자료의 70%가 양의 오차 범위에 분포하는 것으로 보아 위성 해수면온도는 네 가지 부류 중에서 낮 동안 CTD에 의해 관측된 수온에서 가장 높게 산출됨을 알 수 있다. 최대 빈도수의 위치도  $0.6\sim 0.8^{\circ}\text{C}$ 인 범위의 가장 큰 양의 오차범위에 존재하였다. 이는 Fig. 4a의 주간 표층 뜰개자료가  $0.2\sim 0.4^{\circ}\text{C}$ 인 범위에서 최대 빈도수가 나타

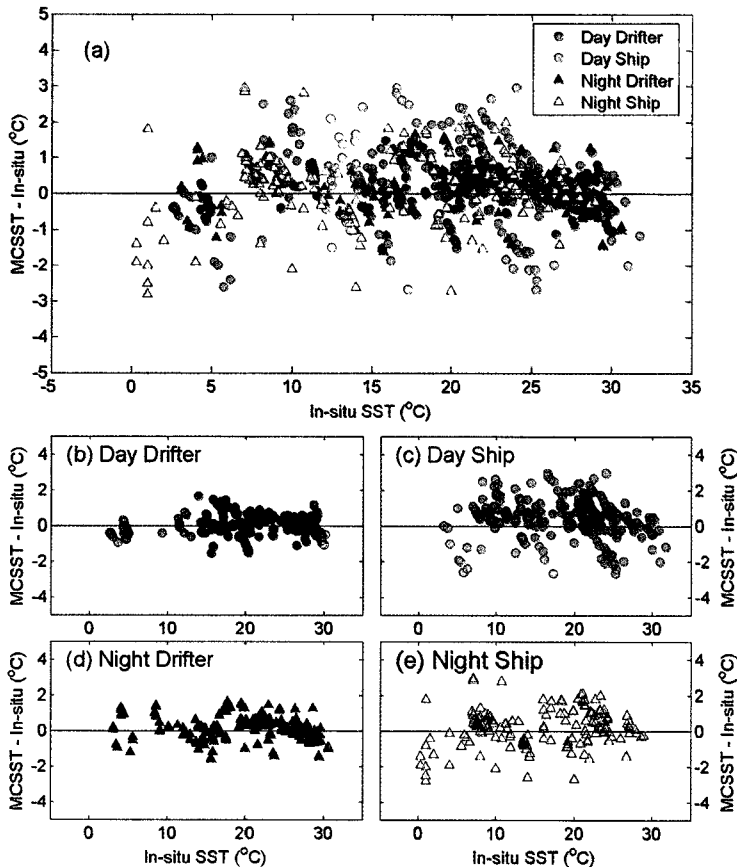


Fig. 3. Distribution of SST errors (satellite-derived SST minus in-situ SST) as a function of in-situ SST for the four cases of (a) daytime drifter temperature (red circle), (b) daytime shipboard measurements (pink circle), (c) nighttime drifter (blue triangle), and (d) nighttime CTD measurements (cyan triangle).

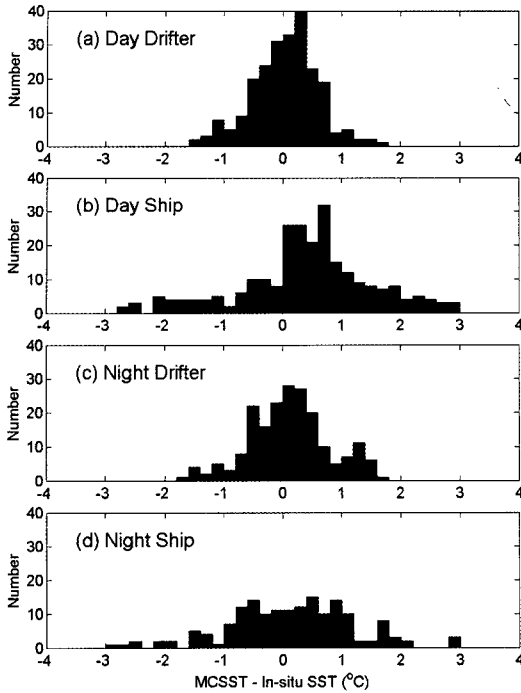


Fig. 4. Distribution of SST errors (satellite-derived SST minus in-situ SST) as a function of in-situ SST for four cases ; (a) daytime drifter, (b) daytime CTD, (c) nighttime drifter, and (d) nighttime CTD measurements.

난 점과 비교된다. 이를 통해 볼 때 낮 동안 관측된 위성 SST가 실제 수온에 비하여 과대평가되고 있음을 암시한다. 반면에 야간 인공위성 해수면온도의 오차(Fig. 4c, 4d)는 주간 오차에 비해 음과 양의 범위에 크게 편중되지 않고 골고루 분포하는 결과를 보였다(Fig. 4c, 4d).

## 2) 연안으로부터 거리에 따른 영향

Fig. 3a에서 하늘색 삼각형으로 표시한 바와 같이 해수면온도가 0~7°C로 낮은 경우에 위성 SST가 CTD 수온에 비하여 -3°C까지 낮게 산출되는 경향을 보였다. 이러한 오차 영역에 속하는 일치점들의 위치와 시간을 추적하여 그 특성을 이해하고자 우선 전체 자료 중에서 CTD로 관측되고 수온이 10°C 이하이며 위성온도와의 차이가 -0.5°C보다 큰 음의 오차를 가지는 일치점들을 추출하였다. 이 조건을 만족하는 자료는 모두 11개가 존재하였고, 이 일치점들의 위치를 Fig. 5에 붉은 색으로 표시하였다.

위성 SST가 실제 수온보다 매우 낮게 나타나는 CTD 자료들은 주로 연안 가까이 위치하였다. 러시아 연해 주 연안 해역과 블라디보스톡 남쪽, 사할린 서쪽 연안, 그리고 우리나라 서해안, 일본의 동쪽 연안에서 최대 -

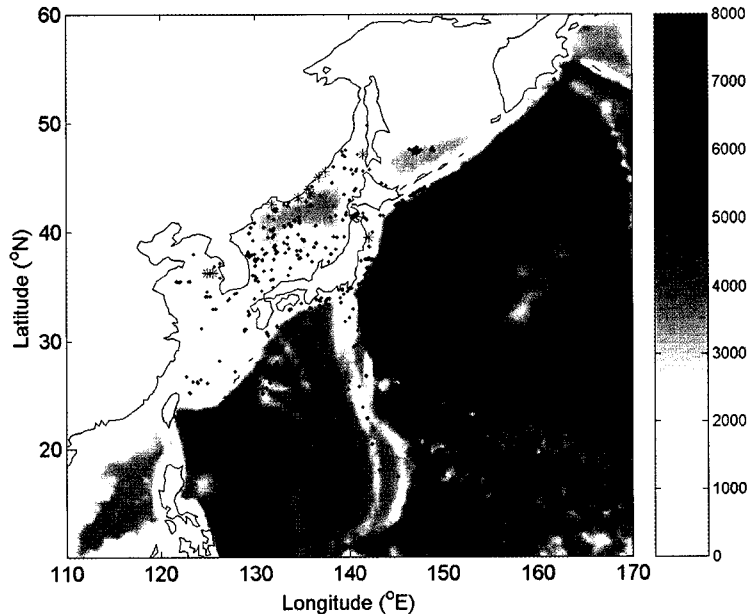


Fig. 5. Location of matchup points in red asterisks satisfying a condition that SST errors from nighttime CTD data show strong negative values of less than -0.5°C and in-situ SSTs of less than 7°C. The background image shows oceanic bathymetry in meters.



3°C에 달하는 해수면온도 오차를 보였다. 이 일치점들은 대륙이나 섬 연안에 위치하여 대륙이나 육지의 영향을 상대적으로 많이 받는 곳이다. 따라서 해수면온도 오차에 연안으로부터 거리가 어떤 영향을 끼치는지 조사하였다. Fig. 6은 네 가지 부류의 SST 오차를 연안으로부터의 거리의 함수로 나타낸 것이다. 연안으로부터의 거리 100 km를 기준으로 해서 볼 때 거리가 작은 연안쪽에서는 해수면온도 오차의 변동폭이 크게 나타나고, 100 km 보다 멀리 떨어져 있는 곳에서는 상대적으로 변동 폭이 적으며  $\pm 1^\circ\text{C}$ 내의 범위에 분포하고 있다. 이를 좀 더 명확하게 하기 위하여 연안으로부터의 거리에 따른 전체 SST 오차의 변동을 계산하여 Fig. 7에 나타내었다. 100 km 이내에 있는 일치점들은 해수면온도 오차 변동의 표준 편차가 0.9~1.2°C로 가장 큰 변화를

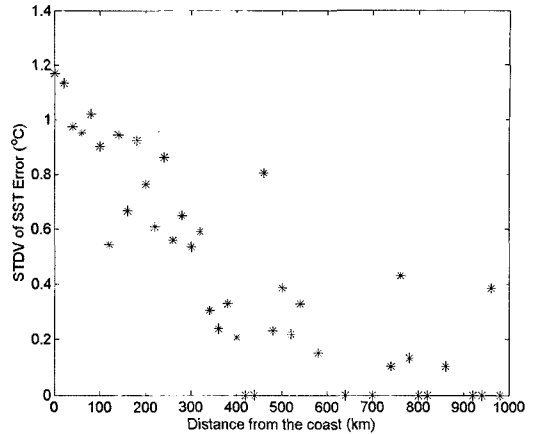


Fig. 7. Standard deviation of SST errors (satellite-derived SST minus in-situ SST) as a function of a distance from the nearest coast.

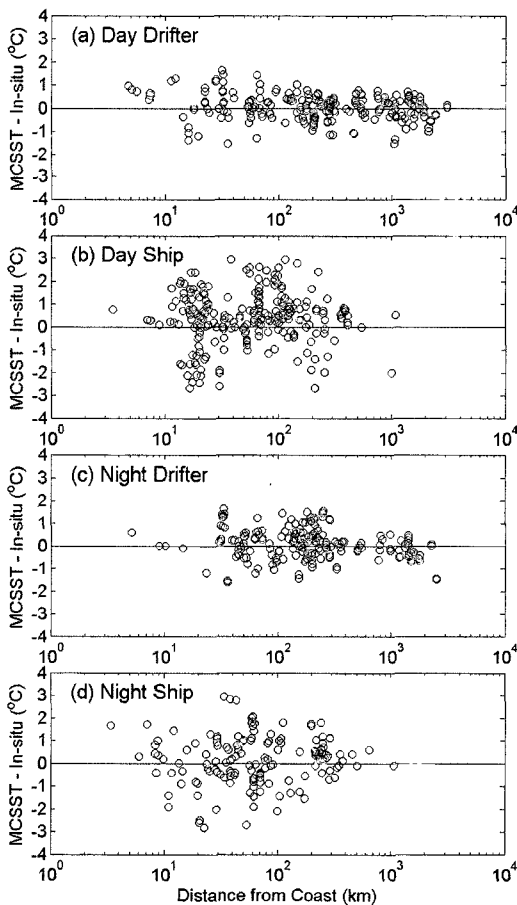


Fig. 6. Distribution of SST errors (satellite-derived SST minus in-situ SST) as a function of a distance from coast for four cases ; (a) daytime drifter, (b) daytime CTD, (c) nighttime drifter, and (d) nighttime CTD measurements.

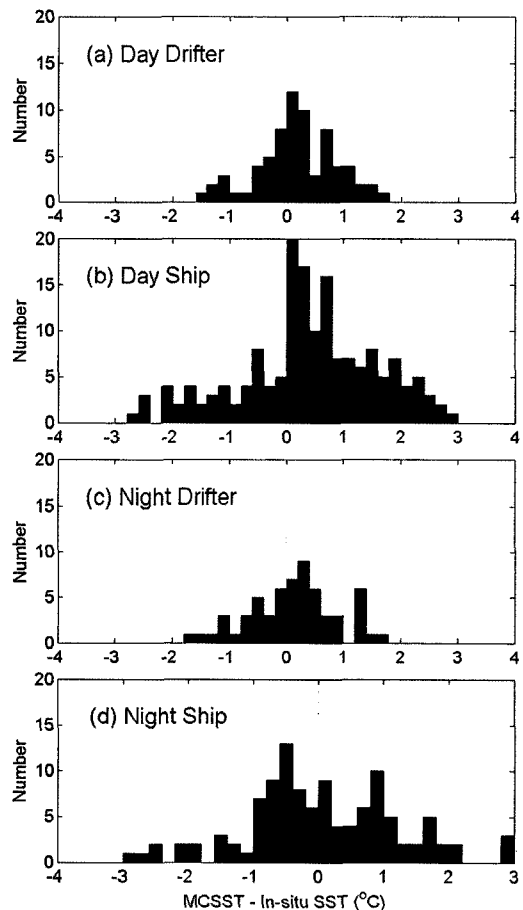


Fig. 8. Histogram of SST errors (satellite-derived SST minus in-situ SST) for (a) daytime drifter temperature, (b) daytime CTD temperature, (c) nighttime drifter temperature, and (d) nighttime CTD temperature measurements.

보였고 외해로 나갈 때 따라 해수면온도 오차의 변동 값도 급격히 감소하였다. 연안으로부터 500 km보다 먼 곳에 위치한 일지점에서는 0.2°C 이내의 변동을 보여서 연안에 의한 효과가 매우 적은 것으로 나타났다.

100 km 이내에 있는 일지점 자료 중에서 낮과 밤에 따라서 위성 수온이 현저하게 차이가 나는 요인들을 이해하기 위하여 Fig. 8과 같이 네 가지 부류에 대하여 위성 해수면온도 오차의 빈도수 분포를 조사하였다. Fig. 8a와 8c에 나타낸 표층 뜰개의 수온 자료를 비교해 보면 낮과 밤의 경우 모두 최대 빈도수가 양의 오차에서 발견되었으나 경향성은 매우 미약하였다. 반면, Fig. 8b와 8d와 같이 CTD 관측에 의한 낮 동안의 해수면온도 오차는 1°C 이하의 양의 범위에서 많은 빈도수가 분포하였고, 밤에는 최대 빈도수가 -0.5°C 근처의 음의 영역에서 발견되었다. 즉 낮 동안 입사된 태양에너지는 해수면을 가열하여 해수면 이하의 표층 수온보다 높아지고, 밤에는 반대로 해수면이 대기로 열을 잃게 됨에 따라 위성 SST가 표층 수온보다 낮게 산출되는 것으로 해석할 수 있다. 이러한 경향성은 앞에서도 언급되었으나 대륙이나 육지 가까이에서 크게 발견된다는 점은 주목할 만하다. 따라서 위성 SST 오차의 가능한 요인 중의 하나로써 연안의 영향을 볼 수 있었으며, 연안에서 주야간의 차이가 외해에 비해 훨씬 더 크고 변화도 심하다는 결과를 얻을 수 있었다.

### 3) 대기 수증기의 영향

대기 중의 수증기 함량에 따라서 AVHRR의 적외선 영역의 두 밴드의 휘도온도 값은 차이가 난다. 즉 대기 중의 수증기 함량이 많을수록  $T_{11\mu m} - T_{12\mu m}$ 는 커진다. 위성 해수면온도를 산출할 때 사용하는 선형알고리즘인 MCSST에서는 이러한 대기의 수증기에 의한 해수면온도의 차이를 고려하고 있으나 여전히 대기에 의한 효과를 완벽하게 제거하기 어렵다.  $T_{11\mu m} - T_{12\mu m}$  값이 0°C에 가까울수록 대기는 건조한 상태이며 이 값이 2°C 이상으로 커질 경우에는 대기는 습한 상태이다. 이러한 사실을 기초로 위성 SST의 오차를  $T_{11\mu m} - T_{12\mu m}$ 의 함수로 Fig. 9a에 도시하였다. 휘도온도 차이가 1.5°C 이하에 많이 분포하고 있어서 일지점 자료가 습한 대기보다는 건조한 대기에서 많이 수집되었음을 추측할 수 있다. 각 부류에 대한 오차를 살펴본 결과, Fig. 9e의 야

간 CTD 관측의 경우 위성 SST 오차가 대기 수증기 량에 대하여 양의 선형관계를 보였다. 최소자승법으로 회귀한 직선의 식은 다음과 같다.

$$MCSST - SST_{CTD, Night} = 0.4708(T_{11\mu m} - T_{12\mu m}) - 0.4072 \quad (3)$$

즉  $T_{11\mu m} - T_{12\mu m}$ 가 1°C 이하인 대기가 건조한 경우에는 위성 해수면온도가 낮게 계산되고, 반면에  $T_{11\mu m} - T_{12\mu m}$ 가 2°C 이상인 습한 경우에는 위성 해수면온도가 표층 수온에 비해 높게 산출되는 경향이 있었다. 이러한 경향성은 Park *et al.* (1994, 1999)에 의해서 동해에서도 발견되었다. Fig. 9b와 9d에 도시한 표층 뜰개의 경우도 기울기가 매우 작지만 비슷한 경향성을 보인다. 주간 CTD의 경우는 전체적으로 양의 오차를 많이 가지고 있고 대기의 수증기량에 대해서 특이한 함수관계를 가지고 있다고 보기 어렵다.

### 4) 해양 표층의 수직 구조의 영향

해양의 수온을 측정하는 기기들이 일정한 수심을 유지하는 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 표층 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.

본 연구에서 나온 결과들을 토대로 밤과 낮에 따른 일반적 수온의 수직적 구조 변화를 Fig. 10에 개념적으로 나타내었다. 낮에는 Fig. 10a와 같이 인공위성이 관측하는 표층의 수온이 가장 높고 수심이 깊어질수록 급격히 감소하여 일정한 수온에 도달하고, 밤에는 Fig. 10b와 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. 10을 따르는 것은 아니다. 낮에 바람이 많이 불 경우 표층의 혼합이 활발하고 표층에서 대기로 열

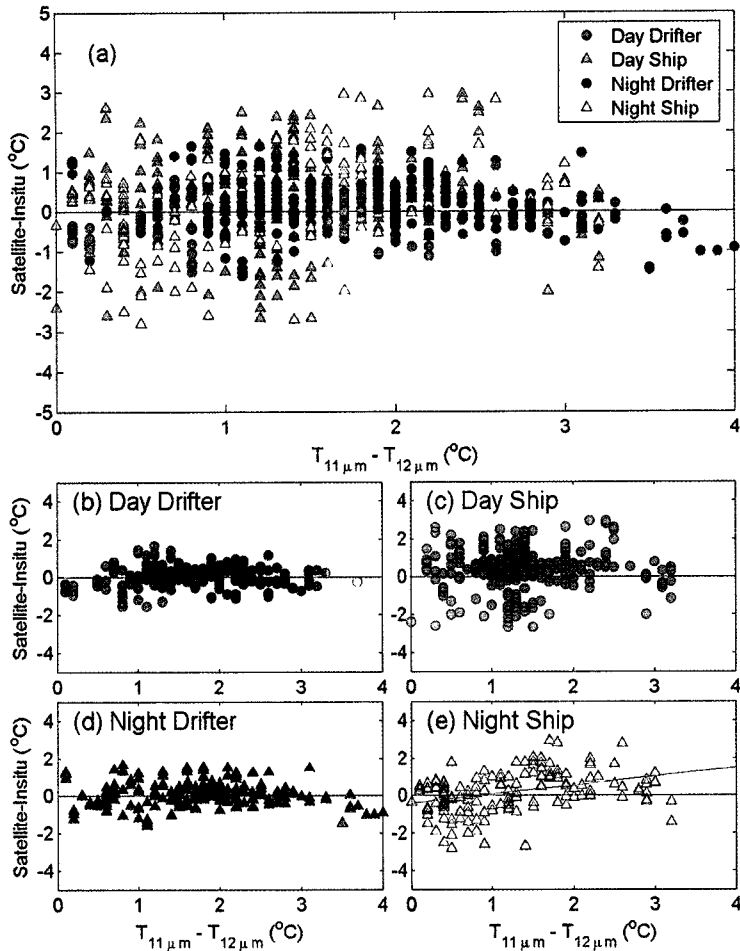


Fig. 9. Scatter plots of SST errors (satellite-derived SST minus in-situ SST) as a function of brightness temperature difference between AVHRR channel 4 and 5 for the four categories; (a) daytime drifter (red circle), (b) daytime shipboard measurements (pink circle), (c) nighttime drifter (blue triangle), and (d) nighttime CTD measurements (cyan triangle). The red line in (d) is a least-square fitted line to the errors.

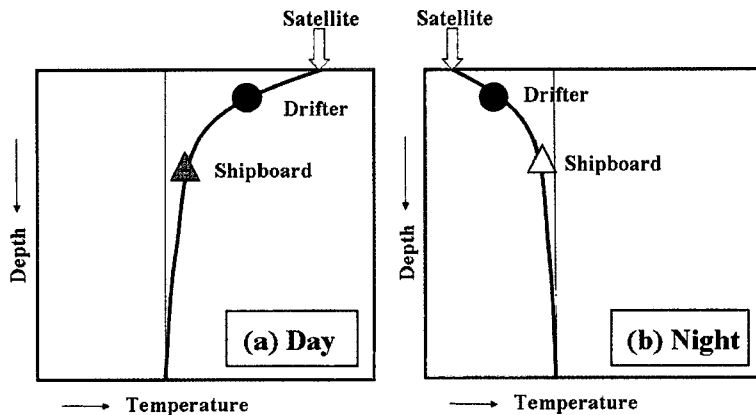


Fig. 10. Schematic plots of vertical temperature profiles of the layer within a few meters from the sea surface according to daytime and nighttime. Oceanic instruments of satellite-tracked surface drifting buoy and CTD measures sea surface temperatures at different depth.

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. 10은 여러 가지 가능성 중에서 가장 대표적인 두 가지 수직적 구조를 나타낸 것이다. 앞의 결과를 종합해보면 Fig. 10은 낮과 밤에도 적용이 되지만 여름과 겨울로 계절에 따른 변화로도 해석할 수 있다.

해양 피층의 수온은 표층 수온과 낮과 밤에 따라서 크게는 2.5°C 정도의 차이를 가질 수 있다. 본 연구에서 활용한 적외선 영상 자료는 해수면에서 수  $\mu\text{m}$  이내에서 나오는 복사에너지를 관측하지만 수심 20 cm~5 m 사이에서 관측한 수온 자료에 경험적으로 회귀분석을 한 계수를 통하여 해수면온도로 산출되기 때문에 엄밀히 말하자면 수  $\mu\text{m}$ 의 해수면온도도 아니고 해양 표층 수온도 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.

### 5) 해수면온도 평균장으로 본 주야간 변화

해수면온도의 주야간 변화(Diurnal Variation)를 보기 위하여 일사량이 여름철 해수면온도의 시계열 영상 자료를 분석하였다. AVHRR과 같은 적외 센서 자료는

야간에 가시영상이 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. 11a와 11b는 주간의 Ascending Pass와 야간의 Descending Pass에 대한 해수면온도평균 분포도이다. 평균 수온장과 주야간 해수면온도 차이(Fig. 11c), 그리고 각 화소에서 주야간 수온 차이의 최대값(Fig. 11d)을 식 (4)과 (5)로 부터 구하였다.

$$SST_{Aij} = \frac{1}{L_{ij}} \sum_{k=1}^{L_{ij}} SST_{Aij,k}$$

$$SST_{Dij} = \frac{1}{M_{ij}} \sum_{k=1}^{M_{ij}} SST_{Dij,k} \quad (4)$$

$$\overline{\Delta SST_{ij}} = \frac{1}{N_{ij}} \sum_{k=1}^{N_{ij}} (SST_{Aij,k} - SST_{Dij,k})$$

$$\Delta SST_{ij} = SST_{Aij} - SST_{Dij}$$

$$\Delta SST_{\max ij} = \{sst_{ij} | sst_{ij} \equiv \text{Max}(\Delta SST_{ij,1}, \Delta SST_{ij,2}, \dots, \Delta SST_{ij,N_{ij}})\} \quad (5)$$

여기서  $SST_{Aij}$ 와  $SST_{Dij}$ 는 임의 화소의 위도와 경도  $ij$ 에서 관측된 주간과 야간의 해수면온도이다.  $N_{ij}$ ,  $M_{ij}$ 는 각 화소에서 전체 자료기간동안 주간, 야간에 관측된 해수면온도 자료의 개수를 나타내고,  $N_{ij}$ 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  $ij$ 의 함수로 표현된다. 주야간 수온차이의 평균 분포도는 식 (3)의 세 번째 식과 같이 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 8

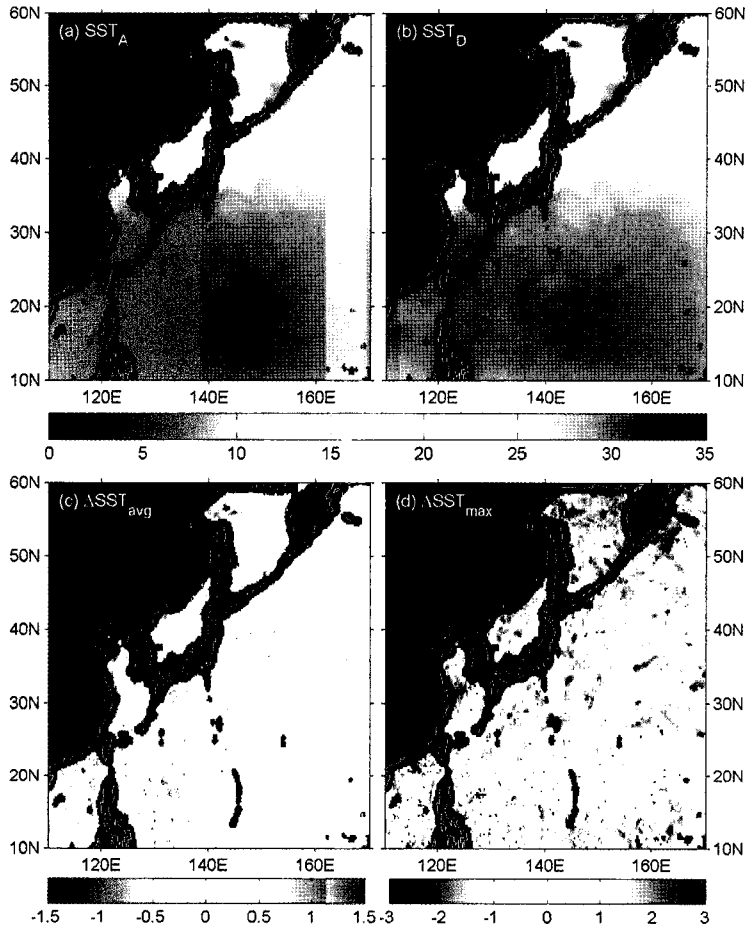


Fig. 11. Sea surface temperature averaged for (a) daytime ascending passes and (b) nighttime descending passes of AQUA/AMSR-E in August, 2002. (c) is the average map of SST difference between daytime and nighttime SST for the same day and (d) shows the maximum of diurnal difference of each day for a month of August in 2002.

월을 선택하였고, 2002년 8월 한 달 동안의 자료를 이용한 낮과 밤의 해수면온도 평균장을 Fig. 11a와 11b에 나타내었다. 육안으로 해수면온도 차이를 식별하기는 쉽지 않았다. Fig. 11c는 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°N와 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. 11c는 일교차를 시간 평균을 하였기 때문에 실제로 일간변화가 큰 현상이 표현되지 않을 수 있다. 따라서 한 달 동안 해수면온도 일교차들의 최대치를 조사하여 Fig. 11d에 도시하

였다. 한 달 동안의 최대값은 98% 이상의 화소가 양의 값을 보였으며 42% 이상은 1°C 이상으로 낮 수온이 밤 수온보다 훨씬 높게 나타났다. 이러한 해수면온도 일교차는 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  $5\text{Wm}^{-2}$ 에 달한다고 지적하였다. NOAA/AVHRR의 경우 심한 경우에는 일간 변화가 6.6°C까지 도달한 경우도 있었다(Flament *et al.*, 1994).

#### 4. 요약 및 결론

위성 SST는 실제 해양 관측 수온에 대하여 일반적으로 0.5~0.9°C의 RMS 오차를 가지고 있는 것으로 보고 되고 있으나(McClain, 1985; Walton, 1988; Walton *et al.*, 1998; Vazquez *et al.*, 1995), 개개의 위성 SST를 해양 관측 수온과 비교해보면 해양 표층 수온의 수직 구조의 일간변화와 해양-대기의 다양한 요인에 의하여 SST 오차는 ±3°C까지 큰 변동 범위를 가지고 있다. 이러한 SST 오차의 시공간적 특성과 요인들을 1994년부터 2003년까지 북동아시아 해역의 AVHRR 자료와 해양 관측 수온을 이용하여 분석하였다. 시간과 깊이에 따른 위성 SST 오차의 특성을 이해하기 위하여 위성-해양 일치점 자료들을 주간과 야간으로 나누고, 다시 해양의 수온을 관측하는 두 가지 대표적인 장비인 인공위성 추적 표층 뜰개와 선박에 의한 CTD 관측 자료로 나누어 총 네 가지 부류로 나누어서 분석하였다.

주간의 표층 뜰개가 0.56°C로 가장 작은 RMS 오차를 보였으며 주간 CTD 현장 관측수온이 1.12°C로 가장 높은 오차를 보였다. 야간의 SST가 0.86°C의 오차를 보였고, 주간에는 0.91°C의 오차를 보여서 야간의 SST가 보다 정확한 결과를 보였다. 전체적으로는 표층 뜰개가 0.61°C의 오차를 보임으로써 CTD 자료의 0.96°C보다 인공위성 SST에 훨씬 근접한 결과를 보였다. 이는 낮과 밤에 따른 해양 피층과 표층의 수직적 수온 변화 구조에서 기인한 것으로 판단된다. 해양의 관측 수온 자료는 서로 다른 깊이에서 관측하고 있다. 표층 뜰개의 수온계는 해수면에서 20 cm 정도에 위치하며, 일반적인 CTD 수온자료는 1~5 m 사이에 첫 번째 수온이 기록된다. 따라서 위성 SST는 해수면과 가까운 표층 뜰개가 관측한 깊이의 수온의 변화를 상대적으로 더 많이 반영하고 있음을 알 수 있다. 결국 위성 SST는 주간과 야간에 따라서 큰 일간 변화가 적은 표층 수온과는 차이가 많이 발생하게 되어 상대적으로 큰 RMS 오차를 보인 것으로 판단된다.

현재 국외에서는 해수면에서 표층에 해당하는 표층의 수직적 수온의 구조를 조사하고 이를 이용하여 위성 SST를 경험적으로 표층수온으로 전환하고자 하는 시도가 진행 중이다. 또 다른 연구 동향으로는 혼합층에서 이루어지는 해양 물리학적 과정과 해양-대기 상호작용

을 고려해 줄 수 있는 수치 모델의 개발을 통해 위성 SST를 모델의 첫 번째 수심의 격자에 맞는 수온으로 전환하려는 시도도 있다. 이러한 시도의 근본적인 원인은 본 연구의 결과와 같이 해양 표층의 수직적 구조의 일간 변화에 있다. 따라서 해양 표층의 Skin-Bulk간의 해수면온도 차이의 일간 변화에 대한 현장 관측이 지속적으로 이루어져야 하며, 해양 상층의 물리적 과정에 대한 모델 개발, 그리고 SST 오차의 해역별 특성에 대한 정량화가 이루어져야 위성 SST를 사용 목적에 맞게 보다 높은 정확도로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 사 사

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2008-4210)의 지원으로 수행되었습니다. NGSST 데이터베이스는 일본 Tohoku 대학에서 생산되었습니다. NGSST Matchup Database 생산을 담당한 Junko Takeda와 Teruhisa Simada 박사님의 도움에 감사드립니다. 논문을 세밀히 심사해주신 심사자들에게 감사드립니다.

#### 참고문헌

- 박경애, F. Sakaida, and H. Kawamura, 2008. 북동아시아 해역에서 인공위성 관측에 의한 해수면 온도의 오차특성, 한국지구과학회지, 29(3), 280-289.
- Cornillon, P. and L. Stramma, 1985. The distribution of diurnal sea surface temperature warming events in the western Sargasso Sea. *J. Geophys. Res.*, 90: 11811-11815.
- 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., W. G. Pichel, and C. C. Walton, 1985. Comparative performance of AVHRR-based multichannel sea surface temperature. *J. Geophys. Res.*, 90: 3655-3661.
- Park K. A., J. Y. Chung, K. Kim, and B. H. Choi, 1994. A study on comparison of satellite drifter temperature with satellite derived sea surface temperature of NOAA/NESDIS. *J. of the Korean Soc. of Remote Sensing*, 11(2), 83-107.
- Park, K. A., J. Y. Chung, K. Kim, B. H. Choi, and D. K. Lee, 1999. Sea surface temperature retrievals optimized to the East Sea (Sea of Japan) using NOAA/AVHRR data. *Marine Technology Society Journal*, 33(1): 23-35.
- Prabakahara C., G. Dalu, and V. G. Kunde, 1974. Estimation of sea surface temperature from remote sensing in the 11 - 13  $\mu\text{m}$  window region. *J. Geophys. Res.*, 79: 5039-5044.
- Sakaida F., J-I. Kudoh, and H. Kawamura, 2000. A-HIRES-The system to produce the high spatial resolution sea surface temperature maps of the western North Pacific using the AVHRR/NOAA, *J. Oceanography*, 56, 707-716.
- Vazquez, J., A. Tran, R. Sumagaysay, E. A. Smith, and M. Hamilton, 1995. NOAA/NASA AVHRR Oceans Pathfinder Sea Surface Temperature Data Set User's Guide Version 1.2. JPL Technical Report, 53p.
- Walton, C. C., 1988. Nonlinear multichannel algorithms for estimating sea surface temperature with AVHRR satellite data. *Journal of Applied Meteorology*, 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(12): 27999-28012.