

북동아시아 해역에서 인공위성 관측에 의한 해수면온도의 오차 특성

박경애^{1,*} · Futoki Sakaida² · Hiroshi Kawamura²

¹서울대학교 지구과학교육과/해양연구소, 151-748, 서울시 관악구 신림동 산 56-1

²Center for Atmospheric and Oceanic Studies, Tohoku University, Sendai, Japan

Error Characteristics of Satellite-observed Sea Surface Temperatures in the Northeast Asian Sea

Kyung-Ae Park^{1,*}, Futoki Sakaida², and Hiroshi Kawamura²

¹Department of Earth Science Education/Research Institute of Oceanography, Seoul National University, Seoul 151-748, Korea

²Center for Atmospheric and Oceanic Studies, Tohoku University, Sendai, Japan

Abstract: An extensive set of both in-situ and satellite data regarding oceanic sea surface temperatures in Northeast Asian seas, collected over a 10-year period, was collocated and surveyed to assess the accuracy of satellite-observed sea surface temperatures (SST) and investigate the characteristics of satellite measured SST errors. This was done by subtracting in-situ SST measurements from multi-channel SST (MCSST) measurements. 845 pieces of collocated data revealed that MCSST measurements had a root-mean-square error of about 0.89°C and a bias error of about 0.18°C. The SST errors revealed a large latitudinal dependency with a range of $\pm 3^\circ\text{C}$ around 40°N, which was related to high spatial and temporal variability from smaller eddies, oceanic currents, and thermal fronts at higher latitudes. The MCSST measurements tended to be underestimated in winter and overestimated in summer when compared to in-situ measurements. This seasonal dependency was discovered from shipboard and moored buoy measurements, not satellite-tracked surface drifters, and revealed the existence of a strong vertical temperature gradient within a few meters of the upper ocean. This study emphasizes the need for an effort to consider and correct the significant skin-bulk SST difference which arises when calculating SST from satellite data.

Keywords: sea surface temperature, satellite, accuracy, error characteristics

요약: 북동아시아 해역에서 10년 동안 관측된 광범위한 해양관측 자료와 인공위성 자료를 이용하여 인공위성이 관측한 해수면온도의 정확도를 평가하고 오차(인공위성 해수면온도-실측수온)의 특성을 조사하였다. 845개의 일치점 자료를 분석한 결과 위성 해수면온도(MCSST)는 해양 관측치에 대해 0.89°C의 제곱평균오차와 0.18°C의 편차를 보였다. 위성수온의 오차는 40°N에서 $\pm 3^\circ\text{C}$ 에 달하는 위도에 따른 의존성을 보였는데 이는 고위도 해역에 존재하는 작은 소용돌이, 해류, 열전선의 큰 시공간적 변동성과 관련 있는 것으로 판단된다. 많은 수의 위성 해수면온도 자료는 겨울철에 해양 관측치보다 낮게 산출되고 여름철에는 높게 산출되는 경향이 있었다. 이러한 계절적 의존성은 인공위성 표층부이 자료가 아닌 해양조사선과 계류부이의 수온자료에서 발견되었는데 해양 상층의 수 m 이내에 강한 수직적 수온 구배가 있음을 보여준다. 본 연구는 인공위성 자료로부터 해수면온도를 산출할 때 해양 피층과 그 아래 층 사이의 수온 차이를 고려하고 보정하려는 노력이 필요함을 강조한다.

주요어: 해수면온도, 인공위성, 정확도, 오차 특성

*Corresponding author: kapark@snu.ac.kr

Tel: 82-2-880-7780

Fax: 82-2-874-3289

서 론

해수면온도는 해양을 이해하는 가장 기본적인 변수 중의 하나이다. Prabahara et al.(1974)과 McMillin (1975), McClain et al.(1985) 이후 인공위성 자료로부터 해수면온도를 산출하려는 시도가 활발히 이루어져 현재까지 다양한 알고리즘이 개발되어 활용되고 있다. 해수면온도 영상자료로부터 해양 상층부에 존재하는 중규모 소용돌이, 열전선, 해류 분포 등 다양한 해양 현상을 발견할 수 있게 되었고 이들의 공간적 분포 및 시간적 변화를 조사할 수 있게 되었다. 해수면온도 영상은 해색, 해수면높이, 해상풍 등 다른 위성이 관측한 변수들과 함께 해양 현상의 시공간적 변화와 관련된 물리적, 생지화학적 과정을 종합적으로 이해할 수 있게 되었다. 또한 해수면온도는 해양-대기 상호작용, 열속(heat flux) 변화에 관여하기 때문에 최근의 급격한 기후변화의 지시자 역할을 하고 있으며, 전 지구의 해양-대기 순환 및 기후 모델의 중요한 입력 자료로 널리 활용되고 있다.

원격탐사 기술이 발달함에 따라 열적외선 영역 뿐만 아니라 극초단파 영역도 해수면온도산출에 활용할 수 있게 되어 구름 분포에 상관없는 해수면온도 영상을 획득할 수 있게 되었다(Wentz et al., 2000). 극궤도 위성과 정지궤도 위성, 그리고 극초단파 위성이 관측한 해수면온도 영상을 합성하여 하루 수차례 전 대양의 해수면온도를 실시간으로 감시하는 수준에 이르게 되었다. 전 세계의 많은 연구소와 기관, 대학들이 다양한 해상도의 해수면온도 영상 자료를 제공하고 있고, 이러한 자료를 과학적, 교육적으로 널리 활용하는 추세이다. 그런데 현재까지 배포되고 있는 인공위성 해수면온도장은 대기에 의한 효과, 위성 측기의 문제점, 대기-해양 경계층 조건, 해양 상층부의 상태와 관련된 문제점을 가지고 있으며, 서로 다른 인공위성 자료를 합성함으로써 발생하는 문제점들도 포함하고 있다(Donlon et al, 1999). 이러한 문제점들은 전 지구 뿐 만아니라 우리나라 주변 바다에서도 국지적으로 많은 오차를 가지는 것으로 보고되었다(Park et al., 1999). 일반적으로 인공위성이 산출한 해수면온도의 정확도는 0.5°C에서 1°C 이내라고 말하고 있으나, 제품평균오차가 아닌 개개의 해수면온도가 가지는 오차는 이보다 훨씬 크게 나타났다(Barton, 1995; Strong and McClain, 1984; Walton et al., 1998).

본 연구에서는 동북아시아 해역에서 NOAA 극궤도 위성이 관측한 인공위성 해수면온도를 실제 해양 관측치와 비교하여 정확도와 오차의 특성을 정량적으로 파악하고 오차 발생의 가능한 요인을 분석하고자 한다.

연구 방법

연구 해역

북동아시아 해역은 같은 위도대의 태평양 해역에 비하여 해수면온도의 진폭이 상당히 크며 뚜렷한 계절적인 특성을 가진다(Yashayaev et al., 2001). 동해의 경우 해수면온도의 계절변동이 전체 시간적 변동의 90% 이상을 차지하여 태평양 중앙부에 비해 상대적으로 매우 높다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 NASA/JPL (National Aeronautics and Space Administration/ Jet Propulsion Laboratory)이 생산한 기후학적 해수면온도는 오호츠크해와 동해 북부 해역이 2월에 0°C 이하의 극저온의 해수면온도를 가지고, 반대로 여름철 20°N 부근의 북동태평양은 상당히 높은 해수면온도를 가진다. 여름과 겨울의 해수면온도 차이는 동해와 황해에서 20°C 이상의 큰 값을 가지는 해역도 있다 (Fig. 1c).

이러한 계절적인 수온의 변화가 큰 해역은 해양과 대기 조건이 다양하여 인공위성 자료로 계산된 해수면온도는 실제 바다온도와 큰 차이를 보일 수 있다. 특히 해빙이 형성되는 해역의 조건에서 인공위성으로 구한 해수면온도의 정확도와 오차 특성에 대한 연구는 해양 관측 자료가 부족하여 연구가 활발하게 진행되지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 동해 북부 해역과 같은 매우 낮은 해수면온도를 가지는 해역이 포함될 수 있도록 연구 해역을 위도 10~60°N, 경도 110~170°E 범위로 설정하였다.

해수면온도 및 정확도 계산

해수면온도를 산출하는 알고리즘은 Prabahara (1974) 이후 다양하게 개발되고 발전되어 왔는데 대표적인 알고리즘 종류에 MCSST(Multi-channel Sea Surface Temperature), CPSST(Cross-Product SST), NLSST(Non-Linear SST), PFSST(PathFinder SST) 등이 있다(McClain, 1985; Walton, 1988; Walton et al., 1998; Vazquez et al., 1995). 본 연구에서는 그 중에서 비교적 안정적으로 많이 사용되고 있는 11 μ m

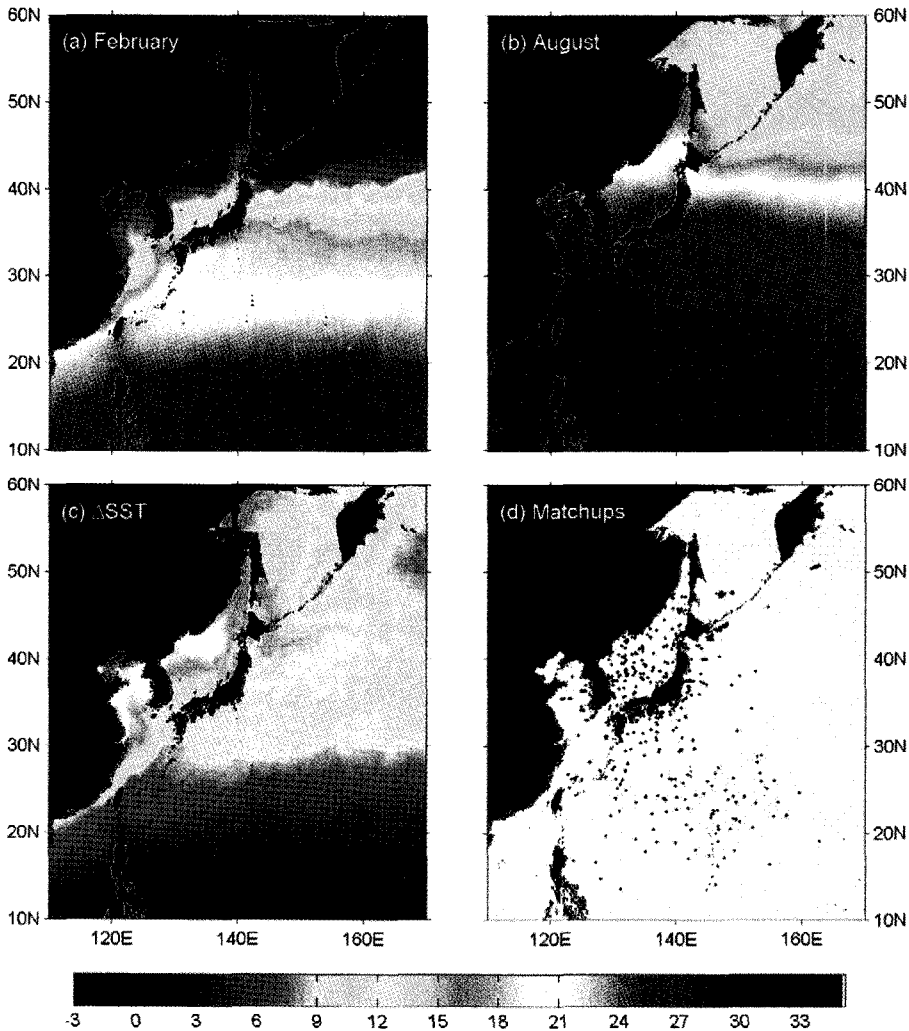


Fig. 1. Climatological sea surface temperature distributions in (a) February and (b) August from NOAA satellite data of NASA/JPL, (c) SST difference (Δ SST) between February and August, and (d) the locations of matchup points between NOAA satellite data and oceanic in-situ temperature measurements.

와 $12\ \mu\text{m}$ 파장대를 사용하는 split-window MCSST 알고리즘을 활용하였다. 기본적인 해수면온도 산출식은 식 (1)과 같고 Table 1에 제시한 바와 같이 낮과 밤에 따라 각각 다른 계수들을 사용하였다.

$$MCSST = aT_i + b(T_i - T_j) + c(T_i - T_j)(\sec\theta - 1) + d \quad (1)$$

여기서 θ 는 위성천정각, T_i 는 $11\ \mu\text{m}$ 부근의 AVHRR 밴드 4의 휘도온도($^{\circ}\text{C}$), 그리고 T_j 는 $12\ \mu\text{m}$ 부근의 AVHRR 밴드 5의 휘도온도($^{\circ}\text{C}$)를 나타낸다. NOAA-11, 12, 14 위성에 대해서는 NGSST 연구팀에서 유도한 계수들을 활용하였고, NOAA-15, 16, 17 위성에 대

해서는 NOAA 산하 NESDIS(National Environmental Satellite Data and Information)에서 산출한 계수를 활용하였다.

일반적으로 인공위성 해수면온도의 정확도는 실제 해양관측 수온에 대한 제곱평균오차(RMSE; Root Mean Square Error)와 편차(Bias Error)로 표현한다. 각 오차는 식 (2), (3)과 같이 계산할 수 있다. 편차는 인공위성자료로 산출한 해수면온도에서 실측한 수온을 뺀 값들의 합을 구한 후 전체 자료의 개수로 나눈 값이다. 제곱평균오차는 두 수온간의 차이를 제공하여 평균을 취한 후 그 값의 제곱근을 구한 것이다.

Table 1. 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

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

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - x_i)^2} \quad (3)$$

여기에서 n 은 일치점의 개수, x_i 는 해양관측 수온, 그리고 X_i 는 인공위성 자료를 이용하여 계산한 해수면온도이다.

일치점 생산 과정

인공위성이 관측한 해수면온도의 정확도를 평가하기 위해서 해양 실측 자료와 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration) 인공위성 자료가 시·공간적으로 일정 범위 내에 있는 일치점(matchup point) 자료들을 선별하였다. 일본 Tohoku 대학의 NGSST (New Generation Sea Surface Temperature) 연구팀에서 일치점 데이터베이스를 생산하였으며 진행 과정을 간단히 요약하면 다음과 같다.

NOAA위성 HRPT(High Resolution Picture Transmission) 자료에서 AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)은 5가지 중심 파장대 (0.6, 0.9, 3.7, 11, 12 μm)를 가지고 있다. 각 파장대 별로 관측된 수치는 복사보정을 통하여 반사도나 휘도온도(brightness temperature)와 같은 물리량으로 전환하고, 다음으로 육상과 연안지역 및 섬 등의 정확한 위치를 알고 있는 지점들을 활용하여 지형보정을 한다. 구름 제거 과정은 주관적 판단 과정과 객관적

판단 과정을 거친다. 우선 화면에 각 가시영상 혹은 적외선 영상을 띄우고 육안으로 구름 유무를 주관적으로 판단한다. 이 과정을 통과한 영상 자료는 객관적 구름 탐색과정을 거친다. 화소가 구름으로 덮여 있거나 구름으로 오염되어 있을 경우는 제거한다. 그리고 과도한 태양 반짝임(sum glint)에 노출되어 있는 화소도 제거하며 육지 가까이 있는 부분도 일련의 과정을 거치면서 제거한다.

해양-위성 자료간의 최대 시간 격차는 3시간으로 설정하였다. 일반적으로 극궤도 위성의 경우는 1시간 이내의 범위를 주고 있으나, 연구 해역에서는 대기의 특성상 일치점의 자료가 매우 적을 것으로 예상되어 NGSST 연구팀에서 3시간으로 선정하였다. 공간 격차는 3 화소 단위를 주었는데 NOAA 위성의 경우 위성 직하점에서 1.1 km의 고해상력을 가지므로 직하점에서는 약 3 km 범위 이내에 존재한다. 그런데 위성의 주사각(scan angle)이 큰 영역, 즉 주사폭의 가장자리 부분은 지구 곡률 효과와 주사각 효과 때문에 10 km를 상회하는 공간적인 차이를 가질 수 있다.

방대한 NOAA 인공위성의 원시 자료를 재처리하고 일련의 보정 단계를 거치려면 오랜 시간이 필요하다. 이러한 이유로 1994년부터 2003년까지 NOAA-11호에서 NOAA-17호까지의 모든 인공위성 자료를 처리하지는 못하였으며, 각 년도의 임의의 달을 선택하여 데이터베이스를 생산하였다. 일치점 데이터베이스에는 위성 일련번호, 구름 유무, 육지와 해양 등을 나타내는 수, 위성의 고유 번호, 위성 주사각의 정보, 5가지 AVHRR 밴드 자료, 적외선 영역의 휘도온도,

가시영역의 평균 반사도, 반사도의 공간적 표준편차, 열적외영역의 평균 휘도온도, 구름 flag, 그리고 태양-위성-천정과 관련된 위치각 정보, 관측 시각, 위도 경도 등 위치 정보, 수심 정보, 해양관측 자료 정보 등을 기록하였다.

연구 결과 및 고찰

일치점 자료의 분포 특성

1994년부터 2003년까지 선택한 달에 대해 인공위성-해양관측 자료를 비교한 결과 총 845개의 일치점을 얻었다. Table 2에 주어진 년도와 달에 생산된 일치점 자료들의 수를 제시하였다. 일치점의 분포는 구름의 유무, 인공위성 궤도, 그리고 해양 자료가 관측된 위치, 시간 정보에 따라 그 개수가 달라진다. 이러한 일치점들의 위치에 관한 정보는 인공위성이 산출한 해수면온도의 오차를 이해하고자 할 때 중요하게 활용된다.

Fig. 1d에 일치점들의 위치를 나타내었는데 특히 동해 전역에 많이 분포하고 일본의 동쪽 해안과 중위도 태평양에도 다수 분포하고 있다. 일치점들은 연구 영역에 대하여 전체적으로 넓게 분포하고 있으나 50°N 이상의 고위도에서는 일치점의 개수가 매우 적게 생산되었다. Fig. 2a에 나타난 일치점들의 위도별 분포를 보면 최대 빈도수가 40~45°N 영역에 나타나고 있다. 이 영역에 분포하는 총 일치점의 수는 247개이고 이는 전체의 29.2%에 해당한다. 50°N 이상의 고위도에서는 17개, 그리고 10~20°N 영역에서는 모두 32개의 일치점이 생산되었다. 이러한 위도별 일치점들의 분포는 본 연구에서 앞으로 논의할 인공위성

해수면온도 오차가 주로 40°N 부근의 중위도 해양의 특성을 상대적으로 더 많이 표현하게 될 것임을 암시한다.

인공위성 해수면온도는 -2°C에서 32°C까지 다양하게 분포하는데 특히 20~25°C 범위에 가장 큰 빈도수가 존재하며 전체의 26.7% 해당하는 226개의 일치점이 분포하였다. 7°C 이하에서는 6.7%에 해당하는 57개의 일치점만이 존재하였다. 0°C 이하의 극히 낮은 인공위성 해수면온도를 보이는 일치점은 5개만이 생산되었다. 비록 자료의 수가 매우 적지만 이러한 결과는 극한 상황에서의 해수면온도의 정확도를 평가하고 오차를 통하여 해양-대기 상호작용을 이해할 수 있는 기회를 제공한다는 점에서 귀중하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

인공위성 해수면온도의 정확도

Fig. 3은 해양관측 수온과 인공위성 관측 해수면온도를 비교한 그림이다. 관측 수온에 대한 위성 수온의 제공평균오차는 약 0.89°C, 편차는 약 0.18°C로 나타났다. 사용한 자료의 기간이 10년이기 때문에 상당한 오차가 있으리라 예상되지만 제공평균오차는 0.89°C 정도로 비교적 높은 정확도를 보였다. 일반적으로 극궤도 위성과 정지위성 자료를 이용하여 산출한 SST의 오차는 1K 이내로 알려져 왔다(McClain, 1985; Walton, 1988; Walton et al., 1998; Vazquez et al., 1995). 그러나 이 오차는 제공평균오차에 해당하고, 개개의 해수면온도는 실제 해양관측 수온에 1K 이상의 차이를 보이는 경우가 상당히 많다.

위성 해수면온도와 해양 관측 수온의 차이가 지니는 다양한 특성을 이해하기 위하여, 두 수온의 차이

Table 2. Distribution of the number of collocated data between NOAA satellite data and oceanic in-situ measurements for the corresponding months from 1994 to 2003. The months are arbitrarily selected

Month Year	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

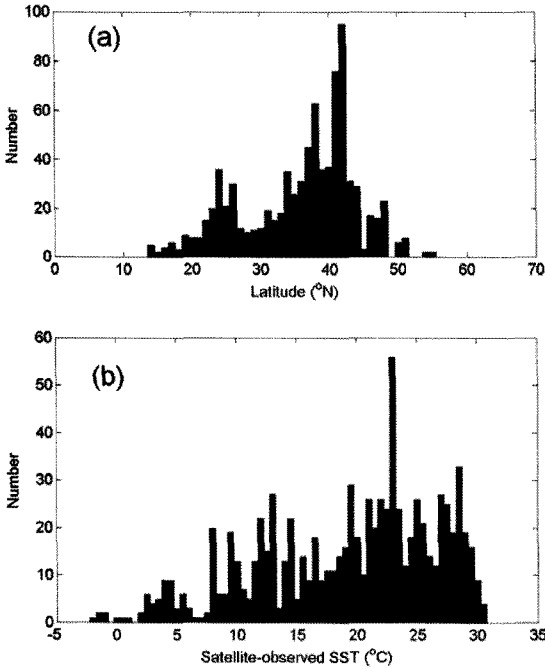


Fig. 2. Histograms of the matchup points according to (a) latitude and (b) satellite-observed sea surface temperature.

값을 해양 관측 수온에 대한 함수로 Fig. 4에 도시하였다. 위성 해수면온도에서 해양 관측 수온을 뺀 값을 본 연구에서는 해수면온도 오차로 정의하였다. 해수면온도 오차는 해양관측 수온에 대하여 대략 $-3\sim 3^{\circ}\text{C}$ 이내에 분포한다(Fig. 4). 그러나 자세히 살펴보면 오차는 양의 값에 많이 분포하고 음의 값에는 상대적으로 적게 분포하고 있는 것을 볼 수 있다. 전체 일치점의 59.6%가 양의 영역에 존재하고 있고, 편차도 0.18°C 로 양의 값을 보였다. 즉 인공위성이 관측한 해수면온도는 실제 해양관측 수온에 비하여 전체적으로 높게 계산되고 있음을 알 수 있다.

위도 · 계절별 특성 및 요인 고찰

오차의 분포 특성을 이해하기 위하여 각 오차를 위도에 대한 함수로 Fig. 5에 도시하였다. 일치점의 오차는 빈도수가 가장 큰 40°N 부근에서 크게 나타났다. 전체적으로 20°N 이하의 저위도보다는 35°N 이북의 중위도 해역이 $-3\sim 3^{\circ}\text{C}$ 까지 넓은 오차의 범위를 가지고 있었다. 우선 빈도수가 많으므로 오차 역시 다양한 해양-대기 조건의 영향을 받아 큰 오차 범위를 가질 것으로 추정된다.

중위도의 연구 해역에는 쿠로시오 해류(Kuroshio

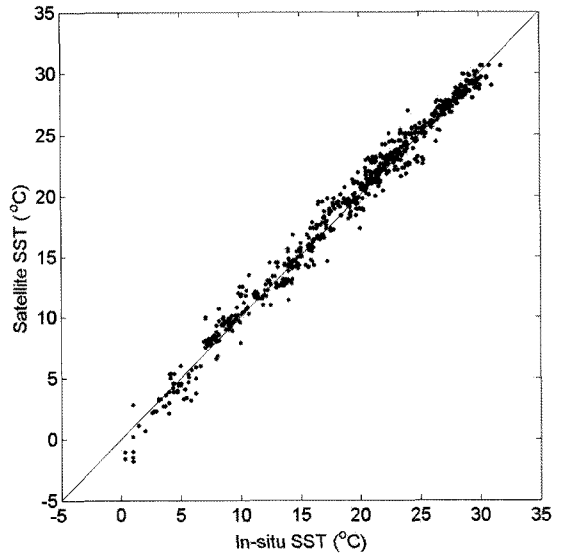


Fig. 3. Comparison of in-situ SST and satellite-derived SST.

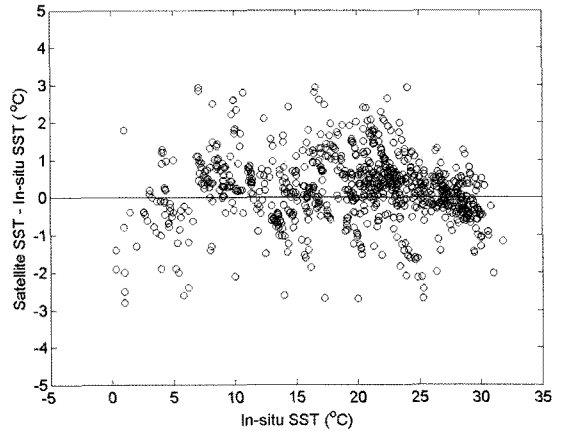


Fig. 4. Distribution of SST errors (satellite SST minus in-situ SST) as a function of in-situ SST.

Current)와 오야시오 해류(Oyashio Current)가 존재하여 쿠로시오-오야시오 열전선이 잘 발달되어 있고 동해 중앙부에는 극전선(Subpolar Front)이 잘 발달되어 있다(Park et al., 2007). 전선에 위치하는 화소들은 일치점 생산과정에서 모두 제거하였지만, 일부 화소들은 전선대의 가장자리에서 공간적으로 수온 변동이 큰 곳, 즉 열전선의 전이대에 위치할 수 있다. 이러한 화소들은 인공위성 해수면온도의 오차를 크게 만드는데 기여할 것으로 판단된다.

또한 열전선대와 전이대 부근에는 공간적 변동 외에 시간적 변동성도 크다. 일치점 산출시 시간적 한

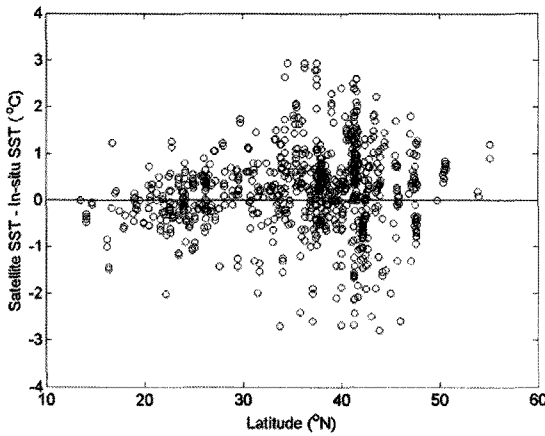


Fig. 5. Meridional distribution of SST differences between satellite-retrieved SSTs and oceanic in-situ surface temperatures.

계가 크면 클수록 해류 자체나 열전선대 자체의 수평적 이류에 의하여 오차가 커질 것이다. 인공위성 센서가 어느 한순간에 바라보는 해상의 한 점(IFOV; Instantaneous Field of View)내에 시공간적 변동성이 큰 현상이 있으면, 인공위성은 IFOV내에서 방출하는 해양의 평균적인 에너지를 관측하게 되지만 해양 관측 장비는 주어진 시간, 주어진 어떤 특정 정점의 수온을 관측하기 때문에 두 수온사이의 차이는 커질 수밖에 없다. 즉 현상의 시공간적 변화가 클수록 위성-해양 일치점의 역할을 제대로 기대하기 어렵다. 따라서 Fig. 5에서와 같이 수온의 공간적 변동성이 상대적으로 큰 40°N 부근에서는 해수면온도 오차도 증가할 것으로 추정된다.

위성-해양 해수면온도의 차이는 해양과 대기의 다양한 조건에 따라서 변화한다. 특히 중위도 해역은 사계절 변화가 뚜렷이 존재하여 이러한 특성이 해수면온도 오차에 반영될 것으로 보여진다. Fig. 6은 이러한 계절적 특성을 이해하기 위하여 두 수온 사이의 차이를 1월부터 12월까지 월별로 나타낸 것이다. 오차들이 시간에 대하여 전체적으로 고르게 분포하고 있으나 겨울철 2월과 3월에는 -3°C까지 음의 오차가 특이하게 크게 나타나고, 8월경에는 양의 오차가 크게 나타났다. 이러한 오차들이 발생한 위도를 조사한 결과 모두 30°N 보다 높은 위도에 분포하였다. 위도 30°N 보다 고위도에 있는 일치점들을 추출하여 오차의 범위를 조사한 결과 Fig. 7과 같은 결과를 얻었다.

인공위성 자료로 계산한 해수면온도가 2월과 3월에는 해양관측 수온보다 훨씬 낮게 산출되는 경향성

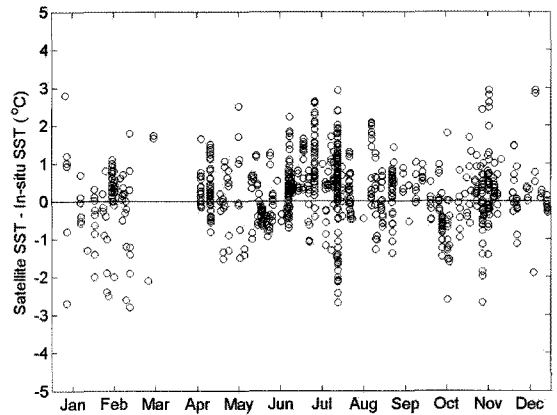


Fig. 6. Monthly distribution of SST errors (satellite MCSST minus in-situ SST).

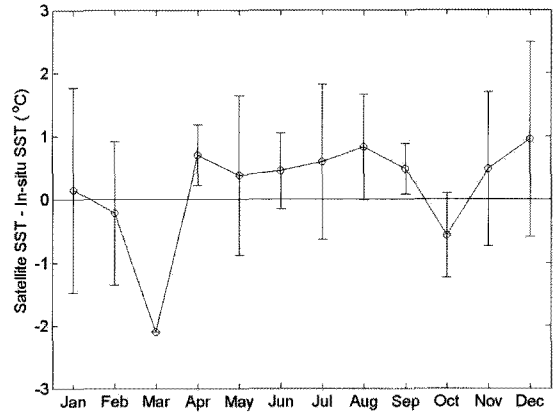


Fig. 7. Monthly variation of SST errors at high latitudes greater than 30°N.

이 있었다. 겨울철 대기 온도는 해양의 수온보다 훨씬 낮아서 해양의 표면은 대기로 열을 잃게 되고, 인공위성이 관측하는 수 μm 이하의 해양 피층(Skin Layer)의 수온은 급격하게 떨어진다(Donlon et al., 1999). 그런데 대부분의 해양 관측 측기는 이런 해양 피층의 온도를 직접 측정할 수 없고 표면에서 수 m 정도 깊이 사이에서 측정을 하게 된다. 이러한 수온을 Bulk 수온이라고 한다. 겨울철에 열을 뺀 피층의 수온은 Bulk 수온보다 매우 낮아서 겨울철 대기의 냉각효과로 인한 Skin-Bulk 수온의 차이가 크게 나타나게 되고, 이러한 경향성이 인공위성이 관측한 해수면온도의 오차로 표출된 것으로 사료된다. 따라서 Fig. 7의 겨울철 저평가된 해수면온도는 겨울철의 강한 해양-대기 상호작용의 결과로 해석할 수 있다.

6월에서 8월의 여름철에 양의 오차가 많이 나타났

다. 즉 인공위성으로 관측한 온도가 실제 해양 관측치에 비하여 여름철에 훨씬 높게 산출되었다. 음의 오차도 분포하나 양의 오차가 상대적으로 훨씬 많은 빈도수를 가지고 있어서 양의 오차값은 95% 범위 내에서 통계적으로 유의하다(Fig. 7). 여름철 이러한 큰 양의 오차에 대하여 Donlon et al.(1999)는 바람이 없거나 매우 약한 낮 동안에는 강력한 태양에너지가 피층으로 전달되고 해양의 안정도를 증가시켜서 해수의 수직적 혼합을 제한하게 되어 나타난다고 보고하였다. 이 경우 해양의 측기는 Bulk 수온을 관측하고 인공위성은 해양의 피층을 관측하게 되어 이 두 온도간의 차이는 증폭될 것이고, 결과적으로 인공위성이 산출한 해수면온도의 오차는 여름철에 양의 값으로 나타날 것이다. 인공위성 해수면온도 오차의 계절적 특징은 해면으로 입사된 태양에너지의 양, 바람의 크기, 그리고 관측 측기의 수심에 따른 효과가 결합되어 생성된 것으로 유추할 수 있지만, 본 연구에서는 바람 자료의 부족으로 해수면온도에 미치는 바람의 영향은 다루지 않았다. Donlon et al.(1999)은 바람으로 인하여 인공위성 해수면온도의 오차가 최대 3~4°C에 달할 수 있음을 해양 조사선을 이용한 관측에서 정량적으로 밝혀낸 바 있다. 그러나 본 연구는 제한된 일치점 자료를 바탕으로 실시한 결과이므로, 좀 더 많은 일치점 자료를 재생산하고 또 관련된 기상 자료도 수집하고 분석하여야, 신뢰도 높은 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

관측 깊이에 따른 영향

해수면온도 오차의 계절적 특성에 관한 앞 절의 결과는 해양의 상층부의 수온이 수직적으로 다양한 구조를 가질 가능성을 제시하고 있다. 본 연구에서 활용한 해양관측 자료는 대부분 인공위성 표층 부이와 연구조사선 관측 혹은 계류된 부이에서 측정된 것이다. 이 관측기기들은 일반적으로 서로 다른 깊이에서 수온을 관측하고 있다. 인공위성 표층부이는 해수면에서 15~20 cm 정도에서 수온을 관측하고, CTD (Conductivity, Temperature, Depth)는 경우에 따라 다르나 대략 1~3 m에서 수온을 관측한다. 따라서 해양 관측 자료의 수심에 따른 해수면온도 오차의 특성을 파악하기 위하여 일치점 데이터베이스를 인공위성 추적 표층부이에 의한 부류와 그 외 CTD, 정선 혹은 계류 관측에 의한 부류로 크게 두 가지로 나누었다. 그 결과 431개의 표층 부이자료와 414개의 나머지

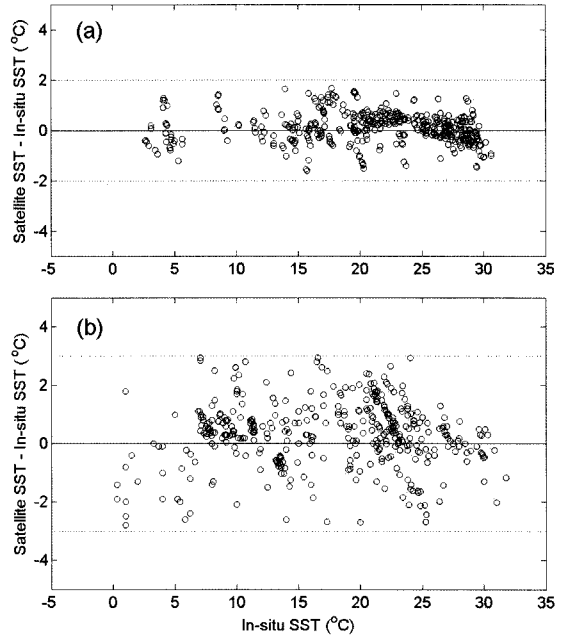


Fig. 8. Distribution of SST errors (satellite SST minus in-situ SST) from (a) satellite-tracked drifters and (b) CTD-based oceanic in-situ measurements as a function of in-situ SST. The dotted lines represent the upper and lower limit of the SST errors.

Table 3. RMS and bias errors of satellite-tracked surface drifters and oceanic measurements from shipboard or moored buoy instruments.

	Satellite Surface Drifter	Shipboard Moored Buoy	Total
Number	431	414	845
Depth (m)	<0.2	<3	<3
RMS (°C)	0.61	1.10	0.89
Bias (°C)	0.0750	0.2986	0.1846

CTD 자료를 얻었다. 이는 전체 자료의 각각 51%, 49%에 해당하여 전체 자료가 거의 균등하게 두 가지 부류로 나뉘어졌음을 알 수 있다.

이 두 가지 해양 측기에 따른 오차를 Table 3에 나타내었다. 일치점들을 분류하지 않고 전체 해양관측 SST에 위성 SST를 비교한 결과도 Table 3에 ‘Total’란에 나타내었다. 전체 자료는 앞서 언급한 바와 같이 약 0.89°C의 RMS 오차와 0.18°C 정도의 편차를 보였다. Fig. 8a에 표층부이 수온에 대한 인공위성 해수면온도 오차를 나타내었다. 두 수온 사이의 차이는 전체적으로 ±2°C 범위 이내에 분포하고 제곱평균오차는 0.61°C, 편차는 0.0750°C를 보이며(Table

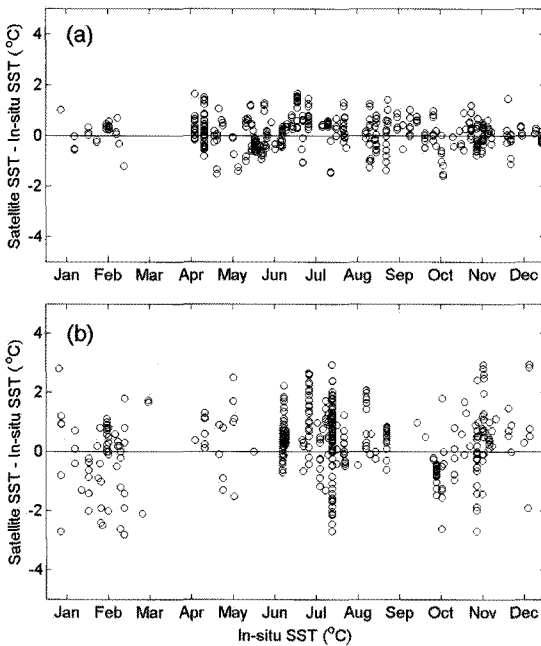


Fig. 9. Monthly variations of SST errors for (a) satellite-tracked drifters and (b) CTD-based oceanic in-situ measurements.

3) 해양 수온에 따른 어떤 특징적인 경향성은 발견되지 않았다. 반면에 Fig. 8b에 나타난 바와 같이 나머지 부류의 오차들은 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 범위에 상대적으로 넓게 분포하였다. 이 부류의 수온에 대한 인공위성 해수면온도는 상대적으로 큰 1.10°C 의 제공평균오차와 0.2986°C 의 편차를 보였다(Table 3).

이런 오차 특성은 해양의 표층 수온이 수직적으로 일정하지 않고 연직적인 변화 구조를 가지고 있고 이러한 구조가 인공위성이 관측하는 피층과 Bulk 수온과의 차이를 유발할 가능성을 제시한다.

Fig. 9a는 위성 자료로 산출한 해수면온도를 인공위성 추적 표층 부이가 관측한 수온과 비교한 것이다. 두 수온의 차이는 1월부터 12월까지 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 범위 내에서 골고루 분포하고 있어서, 계절에 따른 특별한 경향성을 찾기는 어려웠다. 이는 표층 부이의 깊이가 인공위성이 관측하는 해수 표면과 상대적으로 더 가깝기 때문에 표층 부이의 수온이 해수면온도의 변화를 잘 반영하고 있는 것으로 추정된다. 반면에 Fig. 9b처럼 표층부이보다 깊은 수심을 관측한 CTD 자료와 같은 해양 관측치는 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 의 넓은 오차의 범위를 보였다. 겨울철인 2월을 중심으로 -3°C 까지 음의 오차가 크게 나타나고, 여름철인 8월을 중심으로 $+3^{\circ}\text{C}$

까지 양의 오차가 크게 나타나는 등 계절에 따른 경향성이 나타났다. 앞서 언급한 바와 같이 여름철의 음의 오차는 양의 오차보다 빈도수가 적어서 통계적으로 양의 오차가 유의미하게 나타났다. 표층 부이 이외의 자료는 대부분 수심 1m 보다 깊은 곳에서 관측되었기 때문에 해양 피층의 급격한 수온 변화에 상대적으로 빠르게 반응하지 않는다. 따라서 인공위성이 관측한 해수면온도는 Bulk 수온에 비하여 여름에는 더 높게 산출되고 겨울에는 더 낮게 산출되는 경향이 있는 것이다. 이러한 경향성은 NOAA 인공위성 자료를 활용한 동해 연구에서 Park et al.(1999)에 의하여 유사하게 언급된 바 있다.

결론

인공위성이 관측한 자료를 이용하여 해수면온도를 산출하는 알고리즘은 대부분 경험적 방법에 기초하고 있다. 해수면을 관측한 인공위성의 피층 온도(skin temperature)를 Bulk 해수면온도로 바꾸기 위하여 실제 Bulk 수온을 관측한 다음 해수면온도 계수를 회귀 분석하는 방법으로 유도해왔다. 유도된 해수면온도 계수의 성능은 일반적으로 제공평균오차의 크기와 편차로 평가되었다. 본 연구의 결과를 보면 해양 표층의 수직적인 분포 특성에 따라서 서로 다른 깊이에서 측정된 수온은 인공위성 해수면온도와 큰 오차를 보였다. 인공위성 추적 부이 자료는 0.61°C , 해양 조사선 자료는 1.1°C 의 제공평균오차를 보였으며 산술적으로 보면 표층 부이 자료가 더 높은 정확도를 보여 주었다. 표층 부이 자료가 훨씬 작은 RMS 오차를 보였던 것은 표층 부이가 다른 관측 장비보다 해수 표면과 훨씬 가까운 곳에서 측정되었기 때문에 피층의 변화를 유사하게 따른 것으로 판단된다. 그런데 인공위성 자료로부터 해수면온도를 추정하는 방법들 중 경험적인 방법을 흔히 사용하는 근본적인 취지는 해양 피층보다는 Bulk에 해당하는 수온을 알고자 하는 노력에서 나온다. 인공위성이 피층을 관측하더라도 산출된 위성 SST가 해양의 Bulk 수온을 표현하도록 의도하였다면, 표층 부이와 같이 RMS 오차가 낮다고 해서 반드시 좋은 것은 아니다. 해양조사선에 의한 실측 수온과의 차이가 비록 크더라도 우리가 관심이 있는 Bulk 수온을 더 적절히 표현할 수 있는 것이다. 따라서 해수의 표층의 수온이 해양-대기의 다양한 요인에 의해 시공간적으로 크게 변화

기 때문에 Bulk 수온 자료를 좀 더 많이 수집하고 활용하여야 할 것이다.

최근에 인공위성 해수면온도 자료가 점점 더 많이 보급되고 있고 해양수치모델, 해양-대기 결합 기후 모델 등에 널리 활용되고 있으나 인공위성 수온장의 지니는 오차의 특성과 여러 가지 한계점 및 적용시의 제한점에 대해서는 잘 알려지지 않았다. 본 연구 결과는 인공위성이 산출한 해수면온도 오차가 해양과 대기의 조건에 따라서 다양한 시공간적 변화를 가지고 있음을 제시한다. 오차에 대한 정확한 이해가 없이는 해양 현상에 대한 이해도 제한적일 수밖에 없으며 수치모델의 입력 자료로 활용될 때에도 비정상적인 해를 생산할 수도 있음을 주지해야 한다. 이러한 연구를 뒷받침하기 위해서는 우리나라 주변 해양의 표층에 대한 정밀한 관측이 이루어져야 하고 해양 표층에서 수 m 이내에서 이루어지고 있는 해양 표층의 해양물리학적 과정에 대한 이해가 선행되어야 할 것이다.

사 사

이 연구는 서울대학교 신입교수연구정착금으로 지원되는 연구비에 의하여 수행되었습니다. 국립기상연구소 정지위성 CMDPS 사업과 ARGO 사업에 의해서도 부분적으로 지원받았습니다. NGSST Matchup 데이터베이스는 일본 Tohoku 대학과 북동아시아 대학 및 연구소 사이의 국제적 협력연구의 결과물입니다. 저자들은 Junko Takeda와 Teruhisa Simada 박사님의 도움에 감사드립니다. 논문을 면밀히 검토해 주신 윤희주 교수님, 홍철훈 교수님께 감사드립니다.

참고문헌

- Barton, I., 1995, Satellite-derived sea surface temperature: Current status. *Journal of Geophysical Research*, 100, 8777-8790.
- Donlon, C.J., Nightingale, T.J., Sheasby, T., Turner, J., Robinson, I.S., and Emery, W.J., 1999, Implications of the oceanic thermal skin temperature deviation at high wind speed. *Geophysical Research Letters*, 26, 2505-2508.
- McClain, E.P., Pichel, W.G., and Walton, C.C., 1985, Comparative performance of AVHRR-based multichannel sea surface temperature. *Journal of Geophysical Research*, 90, 3655-3661.
- McMillin, L.M., 1975, Estimation of sea surface temperatures from two infrared window measurements with different absorption. *Journal of Geophysical Research*, 80, 5113-5117.
- Park, K.A., Chung, J.Y., Kim, K., Choi, B.H., and Lee, D.K., 1999, Sea surface temperature retrievals optimized to the East Sea (Sea of Japan) using NOAA/AVHRR data. *Marine Technology Society Journal*, 33, 23-35.
- Park, K.A., Ullman, D.S., Kim, K., Chung, J.Y., and Kim, K.R., 2007, Spatial and temporal variability of Satellite-observed Subpolar Front in the East (Japan) Sea. *Deep Sea Research (Part I)*, 54, 453-470.
- Prabakahara, C., Dalu, G., and Kunde, V.G., 1974, Estimation of sea surface temperature from remote sensing in the 11-13 μm window region. *Journal of Geophysical Research*, 79, 5039-5044.
- Strong, A.E. and McClain, E.P., 1984, Improved ocean surface temperatures from space comparisons with drifting buoys. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 65, 138-142.
- Vazquez, J., Tran, A., Sumagaysay, R., Smith, E.A., and Hamilton, M., 1995, NOAA/NASA AVHRR Oceans Pathfinder Sea Surface Temperature Data Set User's Guide Version 1.2. Jet Propulsion Laboratory Technical Report, 53 p.
- 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., Pichel, W.G., Sapper, J.F., and May, D.A., 1998, The development and operational application of nonlinear algorithms for the measurement of sea surface temperatures with NOAA polar-orbiting environment satellites. *Journal of Geophysical Research*, 103, C12, 27999-28012.
- Wentz, F.J., Gentemann, C., Smith, D., and Chelton, D., 2000, Satellite measurements of sea surface temperature through clouds. *Science*, 288, 847-850.
- Yashayaev, I.M. and Zverevaev, I.I., 2001, Climate of the seasonal cycle in the North Pacific and the North Atlantic. *International Journal of Climatology*, 21, 401-417.