



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

한반도 연안 위성 및 수치모델 기반
해수면온도의 정확도에 관한 연구

濟州大學校 大學院

海洋氣象學 協同科程

白 庾 鉉

2016年 2月

석사학위논문

한반도 연안 위성 및 수치모델 기반
해수면온도의 정확도에 관한 연구

제주대학교 대학원

해양기상학 협동과정

백 유 현

2016年 2月

한반도 연안 위성 및 수치모델 기반 해수면온도의 정확도에 관한 연구

지도교수 문 일 주

백 유 현

이 논문을 이학 석사학위 논문으로 제출함

2015年 12月

백유현의 이학 석사학위 논문을 인준함

심사위원장 _____ (인)
위 원 _____ (인)
위 원 _____ (인)

제주대학교 대학원

2015年 12月

A study on an accuracy of satellite-observed
and numerical model-calculated SST
around the Korean peninsular

You-Hyun Baek
(Supervised by professor Il-Ju Moon)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the
degree of Master of science.

2015 . 12.

This thesis has been examined and approved.

Department of Marine Meteorology

GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

List of Figures	ii
List of Tables	vi
Abstract	vii
1. 서론	1
2. 자료 및 분석방법	4
2.1 재분석과 현장 관측 자료	4
2.2 분석방법	12
3. 결과	17
3.1. 부이 관측 자료와의 비교	17
3.2. 자료의 정확도	26
3.3. 해수면온도의 일일 변동성	38
4. 결론	52
참고문헌	55
부록	58
감사의 글	70

List of Figures

Fig. 1. Sea surface temperature based on satellite-observed data : (a) OISST.v2 AVHRR, (b) FNMOC-S, (c) G1SST, (d) OSTIA.7

Fig. 2. Sea surface temperature based on oceanic numerical model : (a) FNMOC-M, (b) HYCOM, (c) JCOPE2.9

Fig. 3. Bilinear interpolation scheme (Red point : in situ, black point : grid point).14

Fig. 4. Location of ocean buoys around the Korean peninsular.16

Fig. 5. Comparisons between model and buoy SST from January 2011 to December 2013.18

Fig. 6. Comparisons between the satellite and buoy SST from January 2011 to December 2013.19

Fig. 7. Scatter plots of satellite/model observed SST data versus in situ SST data in the period of January 2011 to December 2013. (a) FNMOC-M, (b) HYCOM, (c) JCOPE2, (d) FNMOC-S, (e) AVHRR, (f) OSTIA and (g) G1SST. Also shown are the correlation coefficients R, Bias and RMSE from linear regression analysis.21

Fig. 8. SST (a) bias and (b) RMSE of data set at each station.22

Fig. 9. Time series of monthly mean (a)Bias, (b)RMSE and (c) Correlation coefficient of FNMOC-M, HYCOM, JCOPE2, FNMOC-S, AVHRR, OSTIA and G1SST.25

Fig. 10. Occurrence mechanism of the SST cooling induce by the tidal mixing.27

Fig. 11. Time series of SST during the period of rapid water temperature changes which were induced by tidal mixing at Chilbal-do.27

Fig. 12. Distribution of (a) FNMOC-M, (b) HYCOM, (c) JCOPE2, (d) FNMOC-S, (e) AVHRR, (f) OSTIA, (g) G1SST, (h) MTSAT-2 (MTSAT2 satellite infrared image) at the July 26, 2013, and (i) in situ (Blended of Korea Hydrographic and Oceanographic Administration data and Korea Oceanographic Data Center data in the period July 2013 to September 2013) during the rapid water temperature changes which were induced by tidal mixing.	29
Fig. 13. Typhoons and typhoon tracks that caused SST change. (a) DAMREY, (b) TEMBIN, (c) BOLAVEN, (d) SANBA.	31
Fig. 14. Time series of SST during the period of rapid water temperature changes which were induced by typhoon at Mara-do.	32
Fig. 15. Distribution of (a) FNMOC-M, (b) HYCOM, (c) JCOPE2, (d) FNMOC-S, (e) AVHRR, (f) OSTIA, (g) G1SST, (h) TMI (TRMM Microwave Imager) at the September 1, 2012, and (i) in situ (Blend of Korea Hydrographic and Oceanographic Administration data and Korea Oceanographic Data Center data in the period July 2012 to September 2012) during the rapid water temperature changes which were induced by typhoon.	33
Fig. 16. Occurrence mechanism of the SST cooling induce by the upwelling.	34
Fig. 17. Time series of SST during the period of rapid water temperature changes which were induced by upwelling at Pohang.	35
Fig. 18. Time series of the wind speed and wind direction during (a) June, (b) July, (c) August, 2013 at Pohang.	35
Fig. 19. Time series of Korea Oceanographic Data Center (KODC) SST during upwelling at Gampo, Pohang and Homigot.	36

Fig. 20. Distribution of (a) FNMOC-M, (b) HYCOM, (c) JCOPE2, (d) FNMOC-S, (e) AVHRR, (f) OSTIA, (g) G1SST, (h) MTSAT-2 (MTSAT2 satellite infrared image) at the July 15, 2013, and (i) in situ (Blend of Korea Hydrographic and Oceanographic Administration data and Korea Oceanographic Data Center data in the period July 2013 to September 2013) during the rapid water temperature changes which were induced by upwelling.	37
Fig. 21. Time series of the daily mean difference (Gray line) and monthly mean difference (Black line) at (a) Deokjeokdo, (b) Ulleungdo, (c) Oeyeondo, (d) Pohang, (e) Chillbaldo, (f) Donghae,(g) Geojedo, (h) Marado, and (i) Geomundo during 2011-2013 years.	39
Fig. 22. Time series of diurnal variation at (a) Deokjeokdo, (b) Ulleungdo, (c) Oeyeondo, (d) Pohang, (e) Chillbaldo, (f) Donghae,(g) Geojedo, (h) Marado, and (i) Geomundo during 2011-2013 years.	40
Fig. 23. Spatial distribution of (a) Tidal ellipses for M2 tide and (b) tidal cycle at the Yellow sea. Circle is display Chilbal-do around (<i>ref</i> Moon 2005, Fig. 2).	43
Fig. 24. Time series of Chilbal-do SST and Heuksan-do tide level during August 2011.	45
Fig. 25. Same as in Fig. 24 but during August 2012.	45
Fig. 26. Time series of (a) SST and Tide level (Circle is SST cooling induced by tide mixing, Arrow is movement of the sea) during August 2, 2011, (b) Daily mean solar radiation and (c) Daily total cloud amount during August 2011.	46
Fig. 27. Time series of (a) SST and Tide level (Circle is SST cooling induced by tide mixing, Arrow is movement of the sea) during August 7-8, 2012, (b) daily mean solar radiation and (c) daily total cloud amount during August 2012.	47

Fig. 28. Time series of Chilbal-do SST and Heuksan-do tide level during July 2012.	48
Fig. 29. Same as in Fig. 28 but during July 2013.	48
Fig. 30. Time series of (a) SST and Tide level during July 29-30, 2012, (b) daily mean solar radiation and (c) daily total cloud amount during July 2012.	49
Fig. 31. Time series of (a) SST and Tide level during July 11-12, 2013, (b) daily mean solar radiation and (c) Daily total cloud amount during July 2013.	50
Fig. 32. Distribution of FNMOC-S from (a) July 29, 2011, 21:00 KST and (b) July 11, 2013, 21:00 KST.	51
Fig. A. 1. Scatter plots of with <i>in situ</i> SST data and satellite-observed SST (FNMOC-S, AVHRR, OSTIA, G1SST) during 2011-2013.	58
Fig. A. 2. Scatter plots of with <i>in situ</i> SST data and Model-calculated SST (FNMOC-S, AVHRR, OSTIA, G1SST) during 2011-2013.	59
Fig. A. 3. Compare with in situ SST data and satellite-observed/model-calculated SST data at (a) Chilbaldo, (b) Deokjeok-do, (c) Oeyeon-do, (d) Donghae, (e) Ulleung-do, (f) Pohang, (g) Geojeo-do, (h) Geomun-do, (i) Mara-do and (j) Ieo-do.	60

List of Tables

Table 1. Specification of different SST products.	7
Table 2. Input data and assimilation system of different SST products. ...	10
Table 3. Specification of different buoy station.	16
Table 4. Statistical analysis of different buoy station. The bold fonts shows the negative bias.	23
Table 5. Month of maximum and minimum diurnal variation of SST, amplitude of maximum variation.	40

Abstract

This study investigates the accuracy of daily satellite-composit (OSTIA, AVHRR, G1SST, FNMOC-S) and model-reanalysis (HYCOM, JCOPE2, FNMOC-M) sea surface temperature (SST) data in the coastal regions around the Korean Peninsula (KP) using data observed from buoys and ocean research station over 2011-2013. Analysis results reveals that among the satellite-composit data OSTIA has the lowest bias (0.33°C) and RMSE (0.94°C), respectively and FNMOC-S has the highest corrections ($R=0.99$), while G1SST, JCOPE2, and AVHRR have relatively larger RMSE (1.40°C , 1.69°C , 1.59°C , respectively). In particular, G1SST, which has the highest spatial resolution ($\sim 1\text{km}$), shows lower accuracy than OSTIA and FNMOC-S with lower resolution. This suggests that the spatial resolution of data is not a critical factor determining the accuracy of SST data in this region. Comparing the results according to regions, the errors were large in the western coastal regions of the KP where depth is shallow and tidal action is strong (for example, Chilbaldo and Dukjukdo buoy), while the errors were low in the East sea and open oceans where depth is deep (for example, Donghae, Ullengdo, Marado). Among the model-reanalysis data, FNMOC-M has the highest accuracy (RMSE= 1.06°C , $R=0.987$) followed by HYCOM (RMSE= 1.38°C , $R=0.978$). JCOPE2 shows the lowest accuracy even though JCOPE2 used the largest data in the western North Pacific for data assimilation (RMSE= 1.68°C , $R=0.969$).

It is found that the main sources of large errors in the SST data around the KP are from the rapid SST change during the event of tidal mixing, upwelling, and typhoon-induced cooling. Tidal mixing breaking stratifications in summer is known to produce large surface cooling in the western coast of the KP where tidal current is very strong and depth is shallow. Particularly, major errors of Chilbaldo located in the strong tidal regions occur during the strong tidal periods (high and spring tides). During the passage of two Typhoons, Bolaven and Tembin in 2012, a rapid SST drop of about 8°C has been observed at Mardo buoy. This is well simulated from the most data

except JCOPE2. From spatial distribution of G1SST, however, we found abnormal and unrealistic high SST in the regions where the typhoon-induced large cooling occurs, which is thought to be a result of replacing the cooled regions by using climatological SST data in their SST algorithm. In Pohang buoy, a significant SST drop (maximum 9°C decrease) was observed in July 2013 due to upwelling. This event is poorly simulated from most data although HYCOM has a similar tendency (but not for magnitude). This means that most SST data sets have problem to simulate upwelling in the East Sea, which requires cautions to use SST data in this region.

In general, daily mean SST data are widely used because of the nature of SST with slow temporal and spatial variability and the lack of high frequency ocean data. However, when (or where) the diurnal variation of SST is dominant, using the daily mean data may have significant limitations, particularly in simulating and explaining weather phenomena varying with short time scale such as torrential rains. The present study investigated the characteristics of diurnal SST variations in the seas around the Korean peninsula using the ocean buoys from the Korea Meteorological Administration (KMA). The diurnal variations were the largest in summer and the smallest in winter. Spatially they are large in the Yellow and South Seas and small in the East Sea. Among all the buoys, Chilbal-do and Geomun-do buoys reveal the largest variation, at which the magnitude reached up to 8°C in summer, while Donghae, Mara-do, and Ulleung-do buoys show a rather small diurnal variation within 5°C. The magnitudes of diurnal SST variations are mainly related to the variations of solar radiation with high and low peaks in 2-4 PM and 7-9 AM, respectively. In the Yellow Sea and the South Sea, tidal mixing in summer contributed to additional diurnal variations. These overall results suggest that an improved weather prediction in Korea, particularly during summer, requires the consideration of diurnal SST variation.

Keywords : Sea surface Temperature, Diurnal variation, Tides, Typhoon, Upwelling

1. 서론

대기-해양 상호작용의 기본적인 변수인 해수면온도는 시·공간적으로 넓은 범위를 포함한 다양한 해양현상들의 연구와 수치예보 모델의 중요한 변수이다 (Martin et al., 2012). 해수면온도자료는 지난 150년간 현장관측기술의 발달에 따라 수집되었으며 (Rayner et al., 2003), 해수면온도의 위성 측정은 1970년대부터 시작하였고 이후 Advanced Very High Resolution Radiometer Version 2 and 3 (AVHRR/2, AVHRR/3)의 고해상도 센서가 NOAA-7 (1981년 6월), NOAA-15 (1998년 5월)에 각각 탑재 되면서 정확한 고해상도 해수면온도 자료가 수집되었다. 또한 마이크로웨이브 센서가 위성에 탑재되어 해수면온도를 관측하면서 구름차폐 효과로 인한 자료의 결측을 해소 시켰다. 이에 따라 고해상도 해수면온도 자료의 정확도가 높아졌으며, 수요가 많아짐에 따라 연안에 대한 해수면온도 자료의 관심이 높아졌다. Martin et al. (2012)연구에서는 Group for High Resolution Sea Surface Temperature Level 4 (GHRSSST-L4)간의 A GHRSSST multi-product ensemble (GMPE)을 이용한 상호비교 및 평가를 했고 표면근처의 Argo데이터와 비교하여 0.40K의 표준편차 오차와 0.03K의 Bias를 나타냈다. Chassignet et al. (2007)은 The Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM)의 해수면온도 재분석자료를 이용해 멕시코만류의 흐름에 따른 북 아메리카 연안의 현장관측 자료와 비교하여 검증했으며, 그 결과 멕시코만 지역에서 0.7℃의 오차와 대서양의 플로리다 동부 해안에서 0.86℃의 오차를 보였다. 이외에도 Stark et al. (2007), Reynolds et al. (2007)은 The Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center (FNMOC)모델 재분석 자료와 OISST.v2.AVHRR (이하 AVHRR) 일일 위성 합성 자료를 이용해 현장 관측 자료와 비교하여 평가했다.

한반도 주변 해역에 대한 연구에 대해 Japan Coastal Ocean Predictability Experiment 2 (JCOPE2)모델의 해수면온도 재분석자료와 일본 주변 해역의 현

장 관측 자료간의 평가와 연구 (Miyazawa et al., 2003)가 있었으며, 약 1℃의 오차를 보였다. Xie et al., (2008)에서는 동중국해 및 서해 주위 연안의 부이와 배의 현장 관측 자료와 GHRSSST-L4자료들과의 상호 비교 및 평가가 연구되었고, 특히 수심이 알아짐에 따라 GHRSSST-L4자료들과 현장 관측 자료의 오차가 커짐을 나타냈다. 이 연구에서는 Operational SST and Sea Ice Analysis (OSTIA)자료가 -0.04의 Bias와 0.31의 오차를 보였으며, 이는 다른 GHRSSST-L4자료와 비교하여 가장 좋은 성능을 보였다.

한반도는 복잡한 해안선을 가지고 있으며, 해역별로 서로 상이한 특징이 있어 해수면온도의 정확도가 중요하다. 또한, 한반도는 편서풍대에 위치하고 있으며 서해와 대기의 상호작용에 직접적으로 영향을 받는다. 특히 겨울철 시베리아 고기압이 확장 하면서 찬 공기가 상대적으로 따뜻한 서해상으로 지날 때 해수면으로부터 열과 수분을 공급받게 되고 그로 인한 하층 대기의 불안정과 구름줄 (cloud street)과 같은 층적운형 구름 발생이 강설로 이어지며 (Cheong et al., 2006; Seol and Hong, 2006; Jeong et al., 2013), 해수면온도와 대기온도 차이가 심화될수록 강설이 강화된다. 이렇듯 한반도 주변 연안에서 정확한 해수면온도 관측 자료가 필요하다. 하지만 한반도 주변 해역은 현장 관측 자료가 부족하며, 위성 기반 자료와 모델의 재분석 자료에 의존해야 된다. 이에 따라 한반도 연안에 대한 여러 일일 위성 합성 및 수치모델 해수면온도 재분석자료는 상호비교와 평가를 통해 우선순위를 주어야 한다.

이전 연구들은 전 지구적인 영역에 대해 위성, 모델 기반의 해수면온도 자료 각각에 대한 정확도 및 성능 평가 연구가 주를 이루었고 연안에 대한 해수면온도 자료의 검증 연구에 대해 단일 자료에 대한 평가였으며, 여러 해수면온도 자료를 상호 비교한 연구는 진행되지 않았다. 특히 한반도 주변 관측 자료와 비교하여 위성 기반의 해수면온도 자료와 모델 기반의 해수면온도 자료를 모두 사용하여 검증한 연구는 없었다.

현재 여러 기관에서 산출되는 해수면온도 자료는 서로 다른 입력 자료간의 표층온도 (Sea surface skin temperature)에서 해수면온도 (Sea surface temperature)의 유도 방법, 합성 방법, 시·공간 해상도, 궤도 형태 (Orbit type), 해수면온도 산출계수 등으로 인해 차이가 발생하며 (Donlon et al.,

2002; Gentemann et al., 2004; Reynolds et al., 2005), 특히, 구름으로 인해 육지 부근에 위성자료가 없는 경우 내 · 외삽 및 자료동화 과정에서 그 차이가 더욱 커진다. 또한, 일일 위성 합성 및 수치모델 해수면온도 재분석 자료는 시 · 공간적인 변동성이 크지 않은 자연현상을 포함하지 않음으로 해수면온도의 차이를 발생 시킬 수 있다. 따라서 이러한 일 평균 해수면온도 자료들은 하루의 해수면온도를 정확히 대변하지 못한다. 특히, 수심이 얕고 조석이 강한 서해에서 해수면온도의 일 변화는 매우 큰 것으로 알려져 있다. 이렇듯 해수면 온도의 변동에 대한 원인과 특성을 분석해야 하며 이전 연구에서 해수면온도의 일 변동에 대한 연구 (윤용훈 등, 1997)는 일사량과 기온, 강수량 등 기본 해양-기상 인자들에 대해 진행되었고 해양 현상을 고려한 일 변동 연구는 없었다.

본 연구에서 기상부이 자료와 일일 위성 합성 및 수치모델 해수면온도 재분석 자료를 이용하여 한반도 주변 연안에서 해수면온도 자료의 정확도를 분석했다. 제 2장에서는 이 연구에 사용한 해수면온도 자료와 분석방법을 설명하고, 제 3 장에서는 각 자료와 현장 관측 자료간의 상호비교와 한반도 주변 해역의 해수면 온도 변동 특성을 조사했다. 제 4장에서는 결과를 제시한다.

2. 자료 및 분석방법

2.1 재분석과 현장 관측 자료

1) AVHRR SST (OISST.v2 AVHRR)

AVHRR 센서는 1978년 TIROS-N위성에 탑재되면서 해수면온도를 측정했고 현재까지 성능이 향상되어 여러 위성에 탑재되고 있다. 따라서 AVHRR SST (또는 Daily OISST)는 여러 위성의 AVHRR 센서로 측정한 해수면온도 자료와 현장관측자료 (Ships, Buoys)를 Optimum Interpolation (OI)기법으로 합성하여 1981년 9월부터 전 지구적인 격자로 산출한다 (Fig. 1(a)). OI 기법은 객관적으로 오차를 최소화할 수 있는 방법으로 다양한 해상도를 가진 자료를 합성할 때 많이 사용되는 기법이다. AVHRR SST는 NCEP의 T.Smith로부터 Optical Interpolation Sea Surface Temperature (OISST) 방법으로 개발 되었으며, 이후 Richard W. Reynolds에 의해 개선되어 “Reynolds SST” 라고 불린다. 초기 개발된 AVHRR SST는 시·공간 해상도가 낮았고(1° , 7-days), 이후 Reynolds에 의해 $1/4^{\circ}$ 의 공간 해상도와 시간 해상도를 하루 (Daily)로 개선했다. AVHRR SST는 30년간 (1982년 ~ 2011년) 기후 평균자료와의 아노말리를 계산해 이상치 (error)를 제거하고 있다.

또한, 이 자료는 마이크로웨이브 (Micro Wave ; MW) 센서를 이용하여 덜 정확하지만 구름의 존재에 대한 정보를 담고 있는 Advanced Microwave Scanning Radiometer-Earth Observing System (AVHRR+AMSR-E)자료를 2002년 6월부터 2011년 9월 까지 제공했다. 이후 AMSR-E가 2011년 10월 원인불명으로 생산을 멈춰 AVHRR+AMSR-E SST 자료를 생산하지 못했다. 하지만 2012년 5월 AMSR-2센서가 Global Change Observation Mission - Water (GCOM-W)위성에 탑재되어 발사되었고 이후 AVHRR+AMSR-2 SST

자료를 산출할 계획이 있다.

AVHRR SST는 위성 기반으로 산출된 해수면온도 자료 중에 가장 오래된 자료로써 의미가 있다.

2) FNMOC-S (FNMOC High Resolution SST/Sea Ice Analysis for GHRSSST)

GHRSSST에서 제공하는 위성 자료 기반 해수면온도 자료인 FNMOC-S는 2005년 6월부터 제공된다 (Fig. 1(b)). FNMOC-S는 입력 자료로 NOAA, MetOp 위성의 AVHRR와 GOES의 적외 센서 (Infrared; IR)를 사용하고 마이크로웨이브 센서로부터 측정된 해수면온도 자료를 사용하지 않는다. 하지만 FNMOC-S는 Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) 위성 시리즈에 탑재된 The Special Sensor Microwave Imager (SSM/I)와 The Special Sensor Microwave Imager Sounder (SSMIS)로 측정된 마이크로웨이브 기반의 해빙의 농도를 포함시켜 해빙의 가장자리의 해수면온도를 보다 정확하게 계산한다. 또한, 6시간 업데이트 주기로 6시간 이내에 자료를 제공하므로 주간 효과 (Diurnal effect)가 포함 되어 있으므로 사용에 유의해야한다.

3) G1SST (Global 1km Sea Surface Temperature)

NASA 제트추진연구소 (NASA Jet Propulsion Laboratory)에서 제공하는 Global 1km SST (G1SST)는 1km의 고해상도의 공간 해상도를 가진다 (Fig. 1(c)). G1SST는 극궤도 (Polar Orbit) 위성에서 산출된 해수면온도 자료뿐만 아니라 주요 정지궤도 (Geosynchronous Orbit) 위성에서 산출된 해수면 온도 자료 (SEVIRI/MSG, GOSE, MTSAT)를 사용했다 (Table 2). 이로 인해 해수면온도 자료의 공간 해상도를 향상시키고 충분한 해수면온도 자료로 인해 보간 (Interpolation) 하는 격자를 줄여 실제 해수면온도와 유사하게 산출했다. 또한 G1SST는 다른 위성 기반의 해수면온도 합성 자료와 달리 Two-dimensional Variational (2DVAR) 이용하여 합성했다. 이 합성 기법은 관측 오차와 배경오

차의 공분산으로 이루어진 비용함수 (Cost function)를 최소화 시키는 방법으로 OI 방법과 더불어 대표적인 자료동화기법이다.

4) OSTIA (Operational SST and Sea Ice Analysis)

정확하고 고해상도의 SST에 대한 수요가 급증하고, 새로운 해양-대기 시스템, 높은 해상도의 Numerical Weather Prediction (NWP)시스템, 고해상도 기후 데이터 개발에 맞춰 영국 기상청 (UK Met office)에서는 새로운 해수면온도와 해빙 분석 시스템을 개발했다 (Fig. 1(d)).

OSTIA는 노르웨이와 덴마크 기상 연구소에서 공동으로 운영하는 EUMETSAT OSI-SAF (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites, Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility) 해빙자료를 사용하여 정확한 해수면온도를 분석한다. 해빙 자료는 전 지구영역, 북반구, 남반구, 신뢰도, 플래그파일을 제공한다. OSTIA는 입력 자료의 품질 보정 시 낮 시간 때 관측에서 풍속이 약하면 해당 자료를 사용하지 않고 풍속이 6m/s이하면 관측 시간과 관련 없이 입력 자료에서 제외된다. 이를 통해 Diurnal warm layer가 SST에 포함 되는 것을 방지 한다. 또한, 각 관측 값에 대한 Probability of Gross Error (PGE)을 추정하고, 큰 값 (>0.5)은 제거된다. 이러한 해수면 온도자료들의 품질 보정 (Quality Control; QC)으로 인해 약 0.5%가 제거된다. 이렇게 보정된 각각의 해수면 온도자료들은 OI방법으로 보관된다. 이후 비어있는 격자는 이전 분석장과 기후장을 사용하고 지역적인 Bias 효과가 있는 곳은 *in situ* 자료로 보충된다. 최종적으로 합성된 OSTIA는 GHRSSST의 다른 합성 자료와 위성으로 산출된 해빙 자료와 비교하여 진단된 자료를 제공한다.

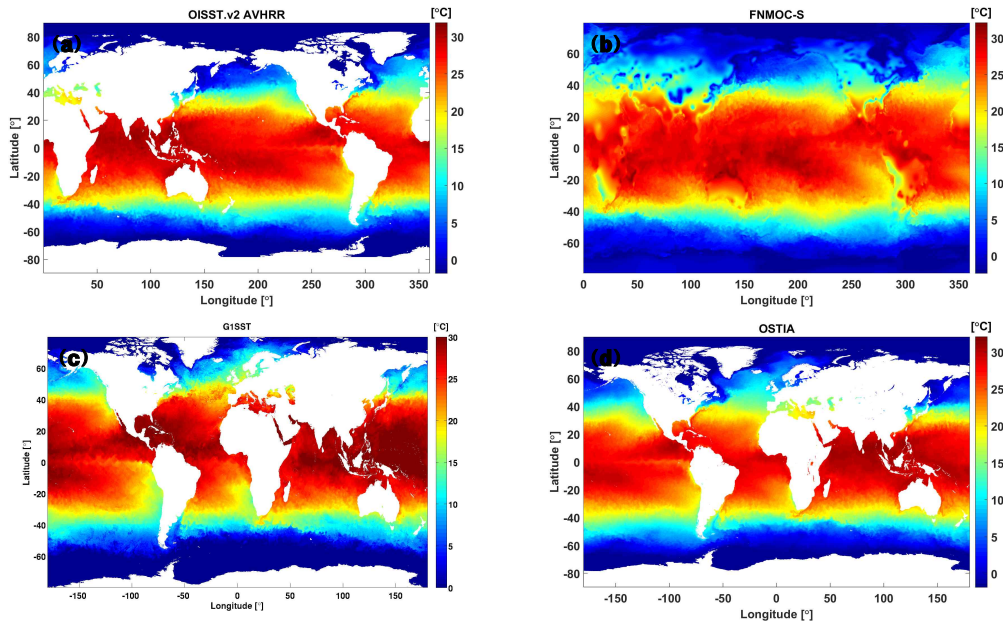


Fig. 1. Sea surface temperature based on satellite-observed data : (a) OISST.v2 AVHRR, (b) FNMOC-S, (c) G1SST, (d) OSTIA.

Table 1. Specification of different SST products.

Name of product	Space resolution	Time resolution	Institute, county	Period of data available
HYCOM	0.08/0.03° lon/lat	daily	U.S Naval Research Laboratory, USA	January 2003 ~ Present
JCOPE2	10km (at the Kuroshio region)	daily	Japan Agency for Marine Earth Science and Technology, Japan	January 1993 ~ Present
FNMOC-M	1/6/1/8° lon/lat	24h	Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center, USA	June 2005 ~ Present
OSTIA	0.05° lon/lat	daily	UK Met office, UK	April 2006 ~ Present
G1SST	1km	daily	NASA JPL, USA	June 2010 ~ Present
AVHRR	0.25° /0.25° lon/lat	daily	NCDC/NOAA, USA	September 1981 ~ Present
FNMOC-S	10km	6h	Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center, USA	June 2005 ~ Present

5) FNMOC-M (FNMOC High Resolution Ocean Analysis for GODAE)

FNMOC-M은 Global Ocean Data Assimilation Experiment (US GODAE)에서 제공하는 미 해군 수치 기상 및 해양 센터의 고해상도 해양 재분석 자료 (FNMOC-M)이다 (Fig. 2(a)). FNMOC-M은 FNMOC-S에 포함하는 위성 자료와 함께 *in situ* 온도 프로파일, Argo의 염분 프로파일, Conductivity, Temperature, Depth (CTD), Expendable Bathythermograph (XBT), 위성으로 측정된 Surface Height Anomalies (SSHA), MODAS synthetic profile을 Three-dimensional multivariate optimum interpolation (3D MVOI) 기법으로 자료동화하여 제공한다. FNMOC-M은 24시간의 업데이트 주기를 갖으며, 실시간으로부터 9시간 이내에 자료를 사용할 수 있다. FNMOC-S 자료와 달리 FNMOC-M은 하루의 시간해상도를 가지므로 주간 효과가 포함 되지 않으며, 풍속이 6m/s 미만, 일사량이 100W/m² 초과되면 해당 위성 데이터는 사용하지 않는다. 또한, FNMOC-S 자료에 비해 해양 프로파일 자료가 다수 포함되어 있어 해양의 특성을 고려하여 사용할 시 용이하다.

6) HYCOM (The Hybrid Coordinate Ocean Model)

HYCOM은 미 해군 연구소 (U.S Naval Research Laboratory)에서 제공하는 모델로써 Rainer Bleck팀에 의해 개발된 The Miami Isopycnic-Coordinate Ocean Model (MICOM)의 Vertical coordinate의 문제점을 해결하기 위해 개발된 전 지구 해양 순환 모델이다 (Fig. 2(b)).

HYCOM은 Mercator-curve linear의 수평 격자와 33개의 z-levels에 대해 Navy Coupled Ocean Data Assimilation-Three Dimension Multi-variate Optimum Interpolation (NCODA-3DVAR)자료 동화 시스템을 사용 하며 실시간 해양 예측 시스템을 제공하고. 5일 과거 재분석과 5일 예보자료를 산출한다. NCODA-3DVAR는 5가지의 해양변수 (Temperature, Salinity, Geopotential, Velocity (u, v))를 포함한다. HYCOM SST는 Reynolds and Smith (R&S)기후자료와 비교하여 월별 아노말리, 연평균 차이, Root Mean Square Error (RMSE), 상관도와 Skill Score를 산출하여 보정한다.

7) JCOPE2 (Japan Coastal Ocean Predictability Experiment 2)

쿠로시오 해류의 정확한 추적 및 관측 목적을 가지고 있는 일본 해양과학기술 센터 (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology : JAMSTEC)에서 제공하는 해양모델 JCOPE2 (Fig. 2(c))는 $1/12^\circ$ 공간 해상도로 1993년 1월부터 제공하고 있으며, 2008년부터 Fisheries Research Institution *in situ* DATA (FRDATA)를 추가했다. 그로 인해 일본 주변에서의 *in situ* 데이터의 자료동화는 Kuroshio frontal waves, Oyashio intrusion, mesoscale eddies를 매우 효과적으로 포착할 수 있었다. 이외 자료동화시에 JASON-1, GEOSAT위성에서 측정된 SSHA, NAVOCEANO MCSST의 SST, ARGO와 Ship에서 관측된 온도/염분 프로파일을 사용한다. 산출된 JCOPE2는 쿠로시오 해역에 대해 1°C 이하의 해수면 온도와 0.2psu 염분 오차를 나타낸다.

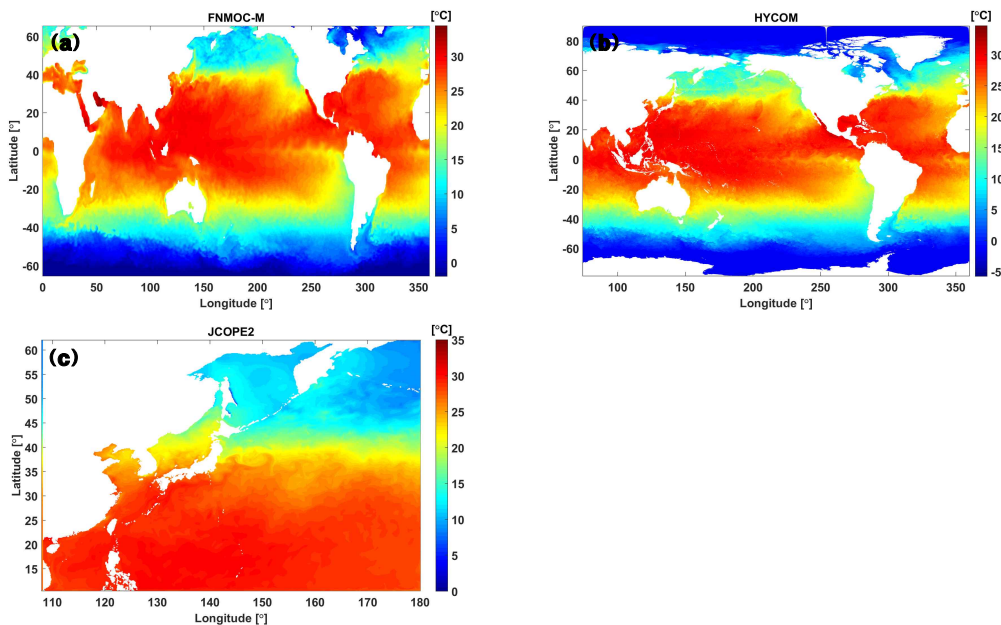


Fig. 2. Sea surface temperature based on oceanic numerical model : (a) FNMOC-M, (b) HYCOM, (c) JCOPE2.

Table 2. Input data and assimilation system of different SST products.

Name of product	Input data	Assimilation system
	SST : GAC/LAC MCSST, GOES, Ship, Buoy	
HYCOM	Profile : XBT, CTD, PALACE Float, Fixed Buoy, Drifting Buoy Altimeter SSHA SSM/I Sea Ice SST : NAVOCEANO MCSST	NCODA, 3D MVOI
JCOPE2	SSHA : JASON-1, Geosat SubSST/Salinity : ARGO and Ship	OI, 3D MVOI
FNMOC-M	FRDATA (FRDATA(Fisheries Research Institution DATA) FNMOC-S, In situ temperature, Salinity profiles from ARGO float, CTD, XBT, SSHA, MODAS synthetic	NCODA, 3D MVOI
OSTIA	AATSR/Envisat, AVHRR/NOAA, AVHRR/MetOp, AMSR-E/Aqua, TMI/TRMM, SEVIRI/MSG, OSI-SAF, In situ	OI
GISST	AATSR/Envisat, AVHRR/NOAA, AVHRR/MetOp, AMSR-E/Aqua, MODIS/Aqua, Terra, TMI/TRMM, SEVIRI/MSG, GOES, MTSAT-2, In situ	2D VAR
AVHRR	AVHRR/NOAA, AVHRR/MetOp, In situ	OI
FNMOC-S	AVHRR/NOAA, AVHRR/MetOp, GOES, SSM/I and SSMIS, In situ	OI

8) 해양기상관측부이

한반도는 3면이 바다이고, 편서풍대에 있어 해양기상자료가 매우 중요하다. 따라서 기상청 (Korea Meteorological Administration ; KMA)은 1996년 덕적도와 칠발도를 시작으로 현재 한반도 주변 연안에 11개를 설치하여 운영하고 있다. 기상청에서 관리하는 해양기상관측부이는 해수면에서 해양기상현상을 각종 관측 장비로 1시간 간격으로 측정하고, 측정한 값을 일정한 물리량으로 변환·처리한 후에 사용 가능한 통신장비를 이용하여 관측 자료를 전송하는 장비이다 (해양기상관측지침, 2013). 이러한 해양기상관측부이는 가장 이상적인 해양기상 종합 관측 장비이며 자료의 정확도가 우수하다. 특히 해수면온도는 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 이내의 높은 정확도를 가지며 실제의 해수면온도 값을 대변한다. 또, 관측수심, 악기상등의 주변 환경에 지장을 받지 않는 장점이 있다. 반면에, 해양기상관측부이는 선박에 의한 사고가 빈번하며, 장비의 부식과 계류선의 마모로 인해 유실 될 우려가 있다. 해양기상관측부이에서 관측되는 요소는 풍향, 풍속, 기압, 기온, 습도, 파고, 파주기, 파향, 수온이 있다. 수온은 해양표층온도를 의미하며, 15~20cm의 수온을 측정한다.

2.2 분석방법

본 연구는 한반도 연안에 대한 해수면온도 자료의 비교 검증과 변동 특성을 조사하기 위해 2011년부터 2013년까지 3년 동안 다양한 해수면온도 자료를 수집했다. 수집된 해수면온도 자료는 크게 위성 관측 기반으로 한 일일 위성 합성 해수면온도 자료, 해양 수치모델을 기반으로 한 수치모델 재분석 해수면온도 자료가 있다. 한반도 동해, 서해, 남해의 연안 9개 지점에 대한 기상청 해양기상부 이와 이어도 기지의 일 평균 해수면온도 자료 (Table 3, Fig. 4)를 수집하여 해수면온도 자료를 통계적인 지수 (Eq. 2.1-3)로 검증했다. 이러한 다양한 해수면온도자료들은 측정하는 깊이가 상이하다. 모델 해수면온도 재분석자료는 평균된 Bulk온도이며, 위성으로 측정된 해수면온도는 표층온도 (Skin temperature; 수 μm)이고 현장 관측 자료는 20cm이내의 수온을 측정한다. 이렇게 관측 깊이가 상이한 자료들을 비교할 때 차이가 발생 할 수 있다. 그러나 현장 관측 자료를 기준으로 모델과 위성 해수면온도 자료를 각각 평가하였고 사용자가 해수면온도 자료 마다 특성을 인식하고 상황에 따라 사용할 수 있기 때문에 관측 깊이가 서로 다르지만 세 해수면온도 자료를 비교하여 평가했다.

일 변동 분석을 위해 하루 중 최대값과 최소값의 차이를 계산했으며, 하루 중 자료가 없는 시간은 분석에서 제외했다. 또한 기상청의 Automated Surface Observing System (ASOS)의 일사량자료, 운량자료와 국립 해양 조사원의 조석관측 자료를 사용했다. 특정 시점에 대해서 극궤도 위성 센서 MTSAT-2 Infrared Imager의 해수면온도 자료, TRMM Microwave Imager 해수면온도 자료, 국립 해양 조사원의 국가 해양 관측 정보와 국립 수산 과학원의 정선 해양 관측자료를 합성한 현장 관측 자료를 사용하여 해수면온도의 공간 분포를 비교했다.

1) 일치점 자료

현장 관측 자료의 해수면온도는 지점 (Point)자료이며, 고해상도 해수면온도 자료는 격자 (Grid)자료 이다. 따라서 서로 다른 형태의 자료를 비교하기 위해서 위치를 정확히 일치시켜야 하며 격자 자료인 고해상도 해수면온도 자료를 이중선형 보간 (Bilinear Interpolation)법으로 내삽하여 현장 관측 자료의 지점과 비교했다. 이전 연구에서 해수면온도 자료와 현장 관측 자료를 비교한 방법을 살펴보면 Chassugnet et al., 2007, Stark et al., 2007, Miyazawa et al., 2003, Reynolds et al., 2007, Martin et al., 2012은 전구 영역에 대해 해수면온도 자료와 많은 현장 관측 자료와 비교하기 위해 해당 해수면온도 자료의 공간해상도 안에 있는 현장 관측 자료와 비교했다. 이 비교 방법은 비교 개수가 많을 때 사용하는 방법으로 내삽법을 이용한 방법보다 계산 소요시간이 적다. 그러나 Xie et al, 2008은 동중국해와 남중국해에 대한 위성 기반의 해수면온도 자료에 대한 평가기 때문에 전구 영역에 비해 비교 영역이 작고 비교 되는 현장 관측 자료 수도 적어 위성 기반의 해수면온도 자료를 현장 관측 자료지점에 대해 이중선형내삽하여 평가했다. **Fig. 3**처럼 현장 관측 지점인 빨간 점은 가운데 격자 안에 있고 평균된 가운데 격자의 격자 값 (빨간 점과 가장 가까운 격자 값)을 사용하여 비교하면 주변의 해수면온도 값의 영향을 고려할 수 없게 된다. 따라서 관측점 (빨간 점)주변에 있는 4개의 격자 값을 사용해서 이중선형내삽을 하여 비교했다. 현장 관측 자료에서 결측 된 기간은 제외 시켰다.

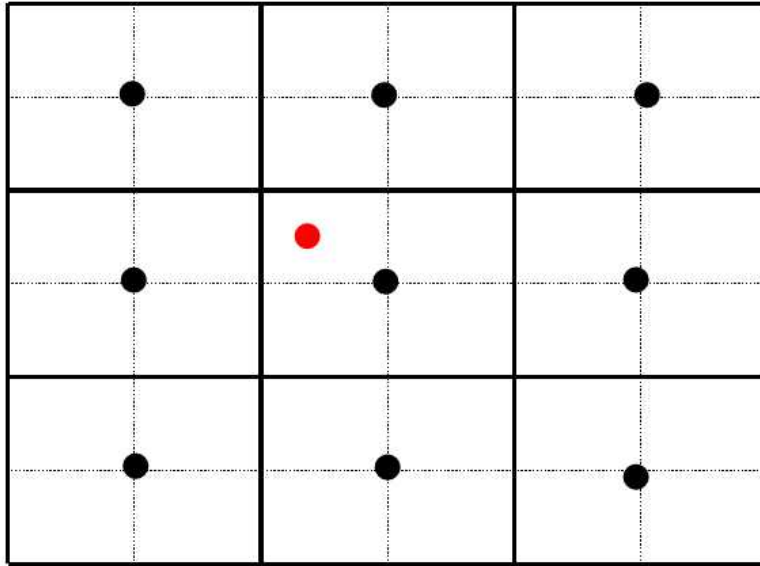


Fig. 3. Bilinear interpolation scheme (Red point : in situ, black point : grid point).

2) 비교 검증

일일 위성 합성 해수면온도와 수치 모델 해수면온도 재분석자료에 대한 각각 다음의 통계적인 지수로 월 별, 지점 별, 시간 별로 분석했다. 통계적인 지수는 평균 제곱근 편차 (Root Mean Square Error; RMSE), Bias, 상관도 (Correlation; R)이다. RMSE는 위성 또는 모델에서 추정된 해수면온도 값이 실제 관측한 해수면온도 값과 차이를 다룰 때 사용하며, 평균 적인 절대 오차를 나타낸다. Bias는 추정된 해수면온도 값이 관측한 해수면온도 값에 비해 편향된 정도를 나타낸다. 상관도는 해수면온도 값끼리의 상관성을 지수로 나타낸 것이며, 1에 가까울수록 두 해수면온도의 경향과 분포의 유사함을 나타낸다.

$$* RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (SST_i - insitu_i)^2}{n}} \quad (\text{Eq. 2.1})$$

$$* Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (SST_i - insitu_i)}{n} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

$$* R = \frac{\sum_{i=1}^n (SST_i - \overline{SST})(insitu_i - \overline{insitu})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (SST_i - \overline{SST})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (insitu_i - \overline{insitu})^2}} \quad (\text{Eq. 2.3})$$

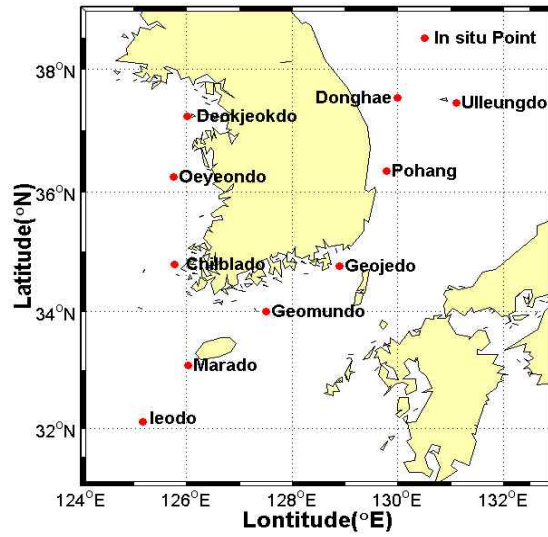


Fig. 4. Location of ocean buoys around the Korean peninsular.

Table 3. Specification of different Buoy station.

Name	Buoy number	Latitude (° N)	Longitude (° E)	local depth (m)	Period of data Available
Deckjeck-do	22101	37.2361	126.0188	30	1996.07.01. ~ Present
Oeyeon-do	22108	36.2500	125.7500	51	2009.10.21. ~ Present
Chilbal-do	22102	34.7933	125.7769	33	1996.07.01. ~ Present
DongHae	22105	37.5442	130.0000	1518	2001.04.01. ~ Present
Ulleung-do	21229	37.4554	131.1144	2169	2011.12.28. ~ Present
Pohang	22106	36.3500	129.7833	320	2008.11.15. ~ Present
Geojeo-do	22104	34.7667	128.9000	84	1998.05.01. ~ Present
Geomun-do	22103	34.0014	127.5014	80	1997.05.01. ~ Present
Mara-do	22107	33.0833	126.0333	110	2008.11.15. ~ Present
Jeo-do	-	32.1200	125.1700	56	2004.12.01. ~ Present

3. 결 과

3.1 부이 관측 자료와의 비교

Fig. 5-6은 일일 위성 합성 해수면온도 자료, 수치모델 재분석 해수면온도 자료와 현장 관측 자료의 지점 별 시계열이다. 해수면온도 자료들은 전체적으로 관측 자료와 유사한 패턴을 볼 수 있다. 하지만 칠발도, 덕적도, 포항 등에서 현장 관측 자료와 고해상도 해수면온도 자료간의 차이가 있음을 보여준다. 마라도, 이어도의 2011년과 2012년 7월에서 10월 사이를 보면 급격하게 해수면온도가 하강 한 것을 볼 수 있다. 이는 태풍으로 인해 해수면온도가 급격하게 낮아진 경우이다. 2013년 7월부터 9월 사이의 포항, 동해 등지에서 급격한 해수면온도 변화가 있으며, 이는 동해안 용승으로 인한 급격한 해수면온도 변화이다. 이러한 급격하게 온도가 변화할 때 고해상도 해수면온도 자료들은 잘 모의 하지 못함을 나타내며, 이에 대한 자세한 분석은 3.2절에서 다루기로 한다.

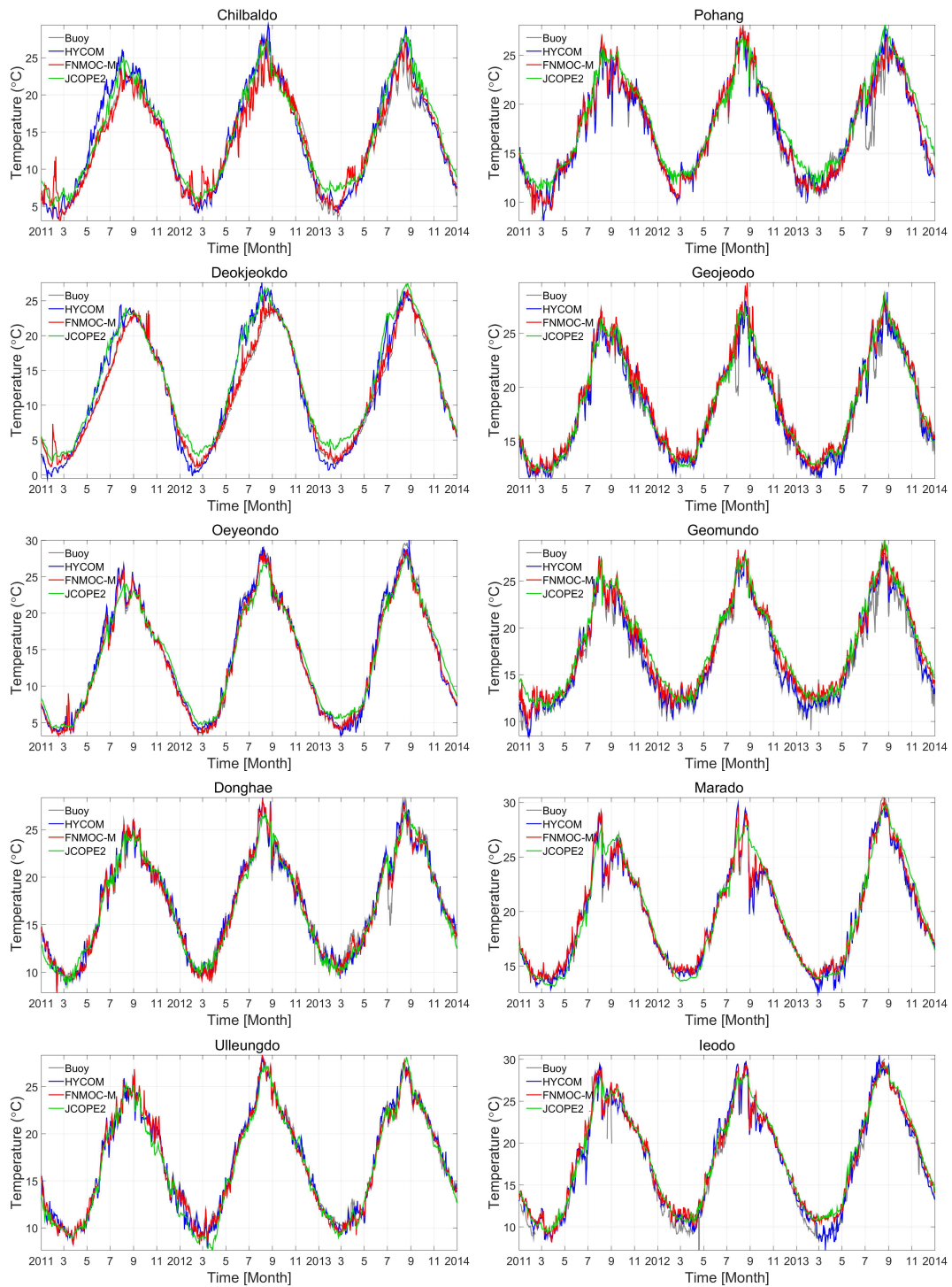


Fig. 5. Comparisons between model and buoy SST from January 2011 to December 2013.

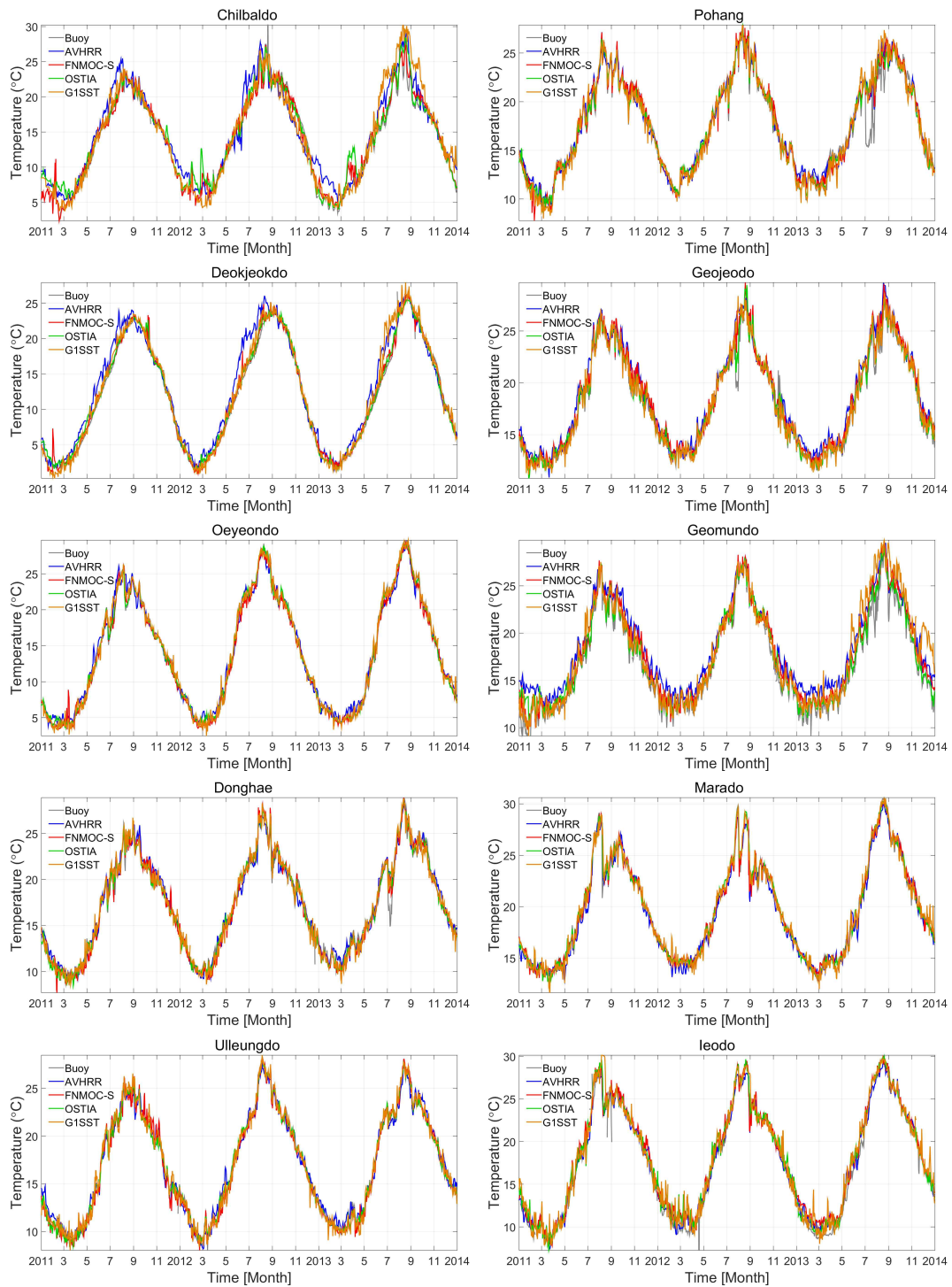


Fig. 6. Comparisons between the satellite and buoy SST from January 2011 to December 2013.

먼저 각 고해상도 해수면온도 자료의 통계 값을 보기 위해 2011년부터 2013년 동안 10개 지점의 부이 관측 온도 값과 비교하여 해수면온도자료들을 검증 했다 (Fig. 7). 결과로 FNMOC-M (Fig. 7(a))는 0.4146, 1.0585로 모델 재분석 자료 중에서 가장 낮은 Bias와 RMSE를 보였으며, HYCOM (Fig. 7(b))은 FNMOC-M과 비슷한 Bias를 보였지만, FNMOC-M보다 좋지 못한 결과였다. JCOPE2 (Fig. 7(c))에서는 Bias, RMSE, 상관도 모두 0.7468, 1.6870, 0.9693으로 모델 재분석 자료뿐 만 아니라 전체에서 가장 안 좋은 결과를 나타냈다. 일일 위성 합성 자료 들 중에서 FNMOC-S (Fig. 7(d))은 FNMOC-M (Fig. 7(a))과 비교해서 더 좋은 결과를 나타냈고, AVHRR (Fig. 7(e))은 일일 위성 합성 자료들 중에서 가장 좋지 못한 통계 값을 보였다. OSTIA (Fig. 7(f))는 FNMOC-S (Fig. 7(d))와 비슷한 결과를 보였고 +0.3227으로 가장 낮은 양의 Bias를 나타내었으며, Xie et al. (2008) 분석 (+0.21)보다 높은 Bias를 보였다. Xie et al. (2008)의 분석은 40m이전의 모든 현장 관측 자료와 비교한 통계 값으로 오직 표층온도만 비교한 본 연구와 차이가 발생할 수 있다. 1km의 해상도와 가장 많은 입력 자료를 합성한 G1SST (Fig. 7(g))는 +0.4884, 1.4232의 Bias와 RMSE로 기대에 미치지 못했다. 이렇듯이 입력 자료의 양으로 해수면온도 자료의 품질을 평가하기에는 어렵다. 또한, 모든 해수면온도 자료들은 양의 Bias를 보여주었으며, JCOPE2 (Fig. 7(c)), AVHRR (Fig. 7(e)), OSTIA (Fig. 7(f))들은 10℃ 이하의 낮은 온도에서 부이 관측 값보다 높게 관측 했다. 이는 해수면온도가 낮아질 때의 현장 관측 자료와 고해상도 해수면온도 자료의 차이를 보여준다. 이에 따라 장기간의 모든 지점에 대한 분석 보다는 각 자료들의 특성과 한반도 주변 연안에 대한 정확한 검증을 위해 상세한 시·공간에 대한 분석이 필요하다.

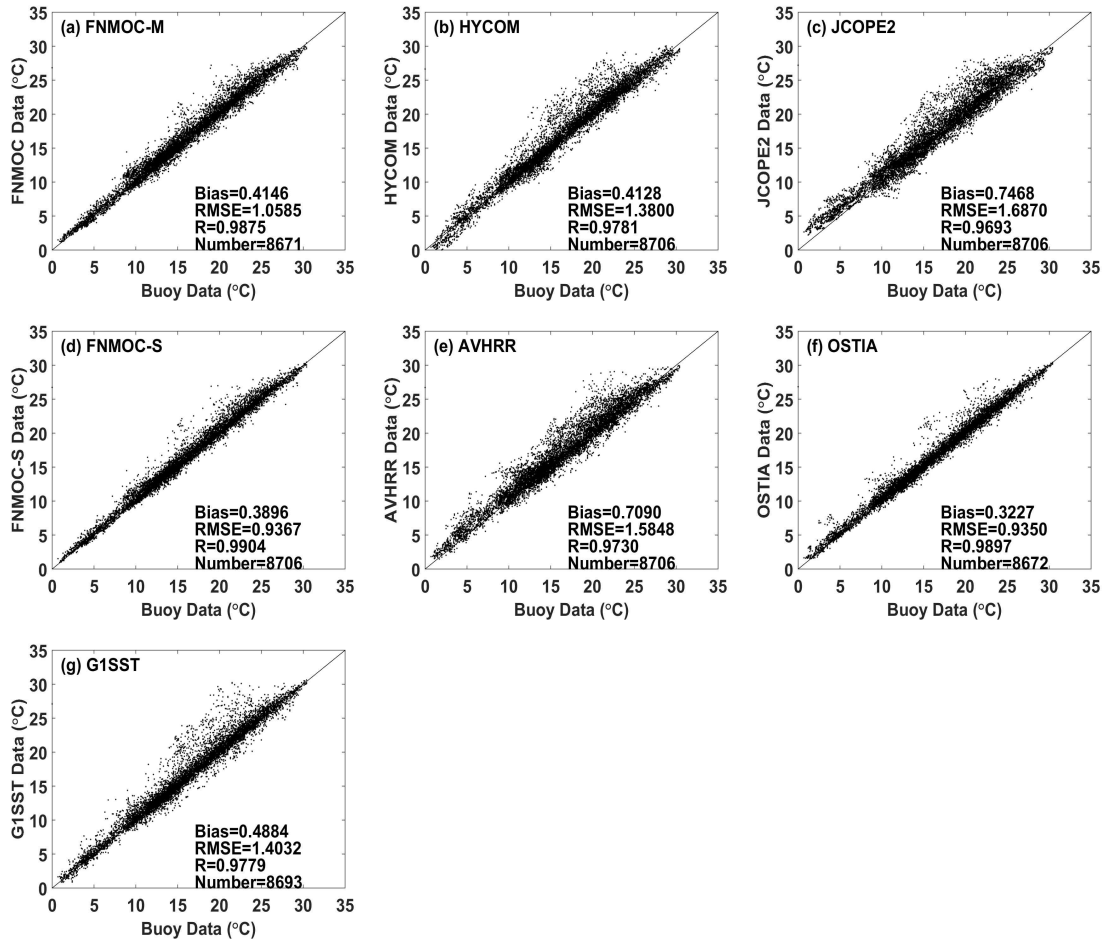


Fig. 7. Scatter plots of satellite/model observed SST data versus in situ SST data in the period of January 2011 to December 2013. (a) FNMOc-M, (b) HYCOM, (c) JCOPE2, (d) FNMOc-S, (e) AVHRR, (f) OSTIA and (g) G1SST. Also shown are the correlation coefficients R, Bias and RMSE from linear regression analysis.

1) 지점 별 해수면온도 차이

지점 별 해수면온도 자료들의 각각의 특징을 비교하기 위한 해수면온도 자료의 Bias (Fig. 8(a))와 RMSE (Fig. 8(b))를 보면 칠발도, 덕적도, 거문도 등에서 높은 양의 Bias와 RMSE를 보였다. 특히 앞서 나온 결과와 같이 모든 지점에서 AVHRR과 JCOPE2는 높은 Bias와 RMSE 값을 보였고, OSTIA, FNMOC-M, FNMOC-S, HYCOM 자료는 전체적으로 낮은 Bias와 RMSE를 보였으며, 그중 FNMOC-S가 가장 낮은 값을 보였다 (Table. 4). Xie. et al., (2008)에서 보여준 결과와 유사하게 포항 (320m)를 제외한 상대적으로 수심이 깊은 동해 (1518m), 마라도 (110m), 울릉도 (2169m)는 0.25 이하의 낮은 Bias를 보였으며, 상대적으로 수심이 낮은 외연도 (51m)에서도 낮은 Bias 값을 보였다. 또한 외연도, 울릉도, 마라도에서 FNMOC-M, FNMOC-S등은 음의 Bias의 결과를 나타냈다.

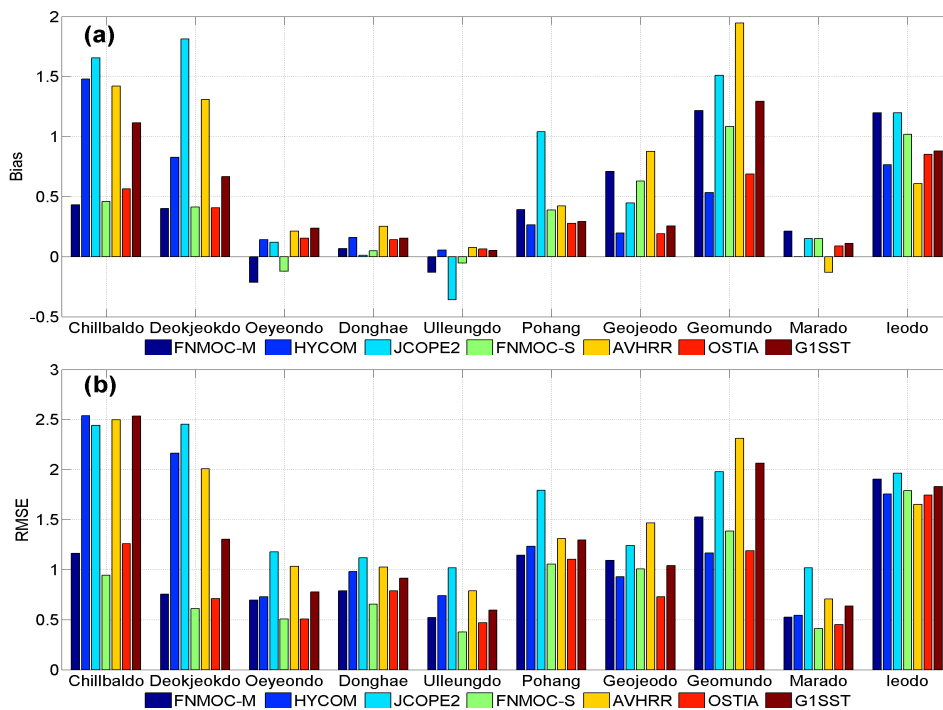


Fig. 8. SST (a) bias and (b) RMSE of data set at each station.

Table 4. Statistical analysis of different buoy station. The bold fonts shows the negative bias.

Statistical Analysis		FNMOc-M	HYCOM	JCOPE2	FNMOc-S	AVHRR	OSTIA	G1SST
Chilbal do	RMSE	1.1630	2.5388	2.4424	0.9425	2.4965	1.2600	2.5339
	Bias	0.4326	1.4782	1.6540	0.4608	1.4198	0.5652	1.1161
	R	0.9859	0.9579	0.9616	0.9918	0.9488	0.9846	0.9471
Deokjeok do	RMSE	0.7538	2.1633	2.4528	0.6087	2.0078	0.7119	1.3043
	Bias	0.4003	0.8262	1.8137	0.4128	1.3094	0.4072	0.6658
	R	0.9962	0.9752	0.9768	0.9981	0.9792	0.9968	0.9897
Oeyeon do	RMSE	0.6951	0.7298	1.1772	0.5046	1.0331	0.5050	0.7784
	Bias	-0.2134	0.1405	0.1181	-0.1211	0.2130	0.1527	0.2358
	R	0.9965	0.9956	0.9917	0.9980	0.9917	0.9981	0.9953
Donghae	RMSE	0.7870	0.9827	1.1196	0.6530	1.0237	0.7896	0.9130
	Bias	0.067	0.1612	0.0114	0.0475	0.2516	0.1419	0.1524
	R	0.9892	0.9833	0.9771	0.9927	0.9813	0.9888	0.9858
Ulleung do	RMSE	0.5198	0.7387	1.0161	0.3777	0.7880	0.4674	0.5952
	Bias	-0.1300	0.0543	-0.3581	-0.0534	0.0755	0.0629	0.0521
	R	0.9961	0.9917	0.9880	0.9979	0.9892	0.9963	0.9945
Pohang	RMSE	1.1435	1.2332	1.7946	1.0542	1.3116	1.1033	1.2947
	Bias	0.3901	0.2657	1.0397	0.3872	0.4215	0.2776	0.2931
	R	0.9741	0.9663	0.9483	0.9779	0.9632	0.9728	0.9654
Geojeo do	RMSE	1.0905	0.9280	1.2394	1.0061	1.4657	0.7298	1.0388
	Bias	0.7088	0.1965	0.4480	0.6288	0.8753	0.1907	0.2542
	R	0.9839	0.9800	0.9677	0.9858	0.9681	0.9878	0.9771
Geomun do	RMSE	1.5242	1.1665	1.9767	1.3844	2.3120	1.1875	2.0640
	Bias	1.2175	0.5341	1.5098	1.0852	1.9465	0.6885	1.2948
	R	0.9815	0.9782	0.9643	0.9837	0.9639	0.9784	0.9521
Marado	RMSE	0.5261	0.5422	1.0176	0.4111	0.7061	0.4499	0.6354
	Bias	0.2120	-0.0006	0.1517	0.1518	-0.1305	0.0884	0.1090
	R	0.9947	0.9932	0.9787	0.9966	0.9889	0.9956	0.9913
Jeodo	RMSE	1.9039	1.7542	1.9630	1.7908	1.6516	1.7448	1.8308
	Bias	1.1973	0.7650	1.1985	1.0174	0.6080	0.8527	0.8796
	R	0.9748	0.9695	0.9731	0.9739	0.9717	0.9717	0.9684

2) 월 별 해수면온도 차이

Fig. 9은 2011년부터 2013년 까지 해수면온도 자료들의 평균 월 별 Bias(Fig. 9(a))와 RMSE(Fig. 9(b))와 상관도(Fig. 9(c))이다. 분석결과 5-9월 까지 모든 자료에서 Bias와 RMSE값이 증가했으며 특히, 7월 달에 가장 높아졌다. 이러한 여름철에 Bias와 RMSE값이 증가하는 일 평균 해수면온도 산출시 입력되는 위성자료에서 발생하는 오차와 여름철에 한반도 주변에서 해수면온도의 오차를 발생시키는 해양현상에 의해 발생할 수 있다. 또한, FNMOC-M과 FNMOC-S, OSTIA는 다른 자료와 비교해서 낮은 Bias와 RMSE를 보였다. 이 자료들은 여름철에 다른 자료와 차이가 더욱 커졌다. 이는 입력 자료로 사용되는 위성자료에 따라 해수면온도 자료간의 차이가 있다는 것을 확인할 수 있다. AVHRR자료는 구름을 투과할 수 있는 마이크로웨이브 위성 자료를 사용하지 않기 때문에 위성 기반 해수면온도 자료들간의 차이는 더욱 커졌으며, G1SST 경우 가용할 수 있는 모든 위성자료를 사용했지만, 큰 오차를 보였다. FNMOC-M과 FNMOC-S, OSTIA 자료 중에 모델 자료인 FNMOC-M은 FNMOC-S를 포함하기 때문에 Bias와 RMSE, R의 분석을 보면 유사한 패턴을 나타냈다. 또한, 모델 해수면온도 자료의 차이는 해당 모델간의 성능의 차이이며, 특히 JCOPE2는 모든 자료들 중에서 가장 좋지 못했다. 상관도 (Fig. 9(c))를 보면 모든 자료에서 5월부터 낮아져 9월에 가장 낮았으며, 이후 다시 좋아져 1월부터 4월 까지 가장 좋은 패턴을 보였다. 이는 5월과 9월은 성층이 변화하는 시기이며 이 시기에는 해수면온도가 더욱 따뜻해지거나 차가워짐으로 해수면온도 자료가 이를 정확히 모의하지 못한 것으로 사료된다.

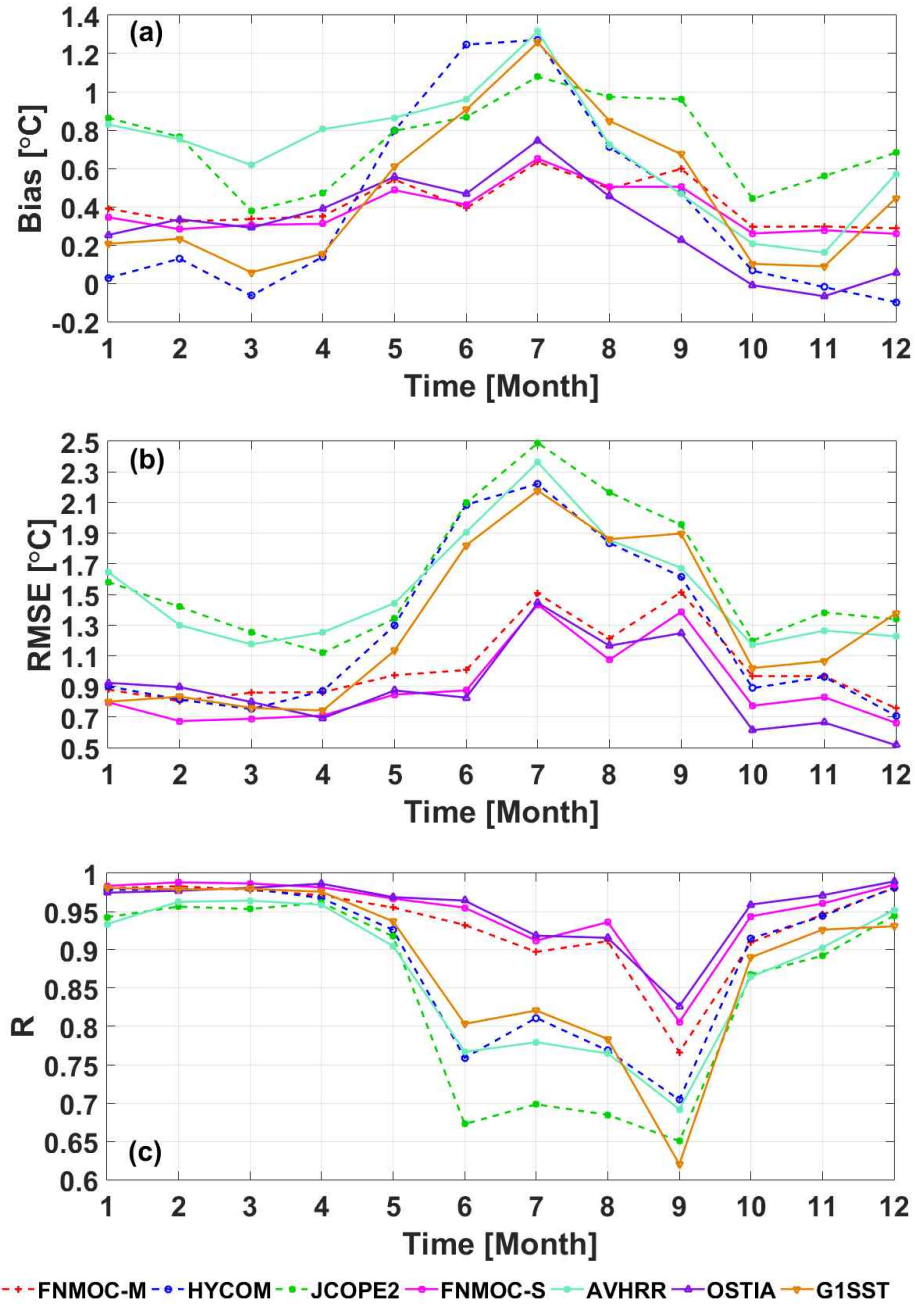


Fig. 9. Time series of monthly mean (a)Bias, (b)RMSE and (c) Correlation coefficient of FNMOC–M, HYCOM, JCOPE2, FNMOC–S, AVHRR, OSTIA and G1SST.

3.2 자료의 정확도

앞선 분석에서 보듯이 여름철인 5월부터 9월 사이에 해수면온도의 차이가 증가하며, 서해와 남해에서 차이가 증가했다. 이를 볼 때 이 시기는 태풍, 조석과 같은 해수면온도를 변화시킬 수 있는 자연현상이 존재하며 이로 인해 현장 관측 자료와 일일 위성 합성 해수면온도 및 모델 해수면온도 재분석자료간의 차이가 발생할 수 있다. 또한 위성에서 해수면온도를 측정할 때 여름철의 두껍고 많은 구름으로 인해 차이를 발생시킬 수 있다. 이에 따라 해수면온도를 변화시킬 수 있는 자연현상에 대해 자세히 살펴 볼 필요가 있다.

1) 조석 영향

조석은 지형적인 영향이 중요하며, 한반도의 서해는 해안선이 복잡하고 삼면이 육지로 둘러싸여있어 서해의 고유진동주기 (약 10시간)와 조석주기 (12.42시간)가 비슷하다. 이로 인해 서해의 조석현상은 다른 해역보다 증폭되어 나타난다 (John 1997). 이에 따라 수심이 얇은 서해에서 조석현상으로 인해 물기둥이 이동함에 따라 하층의 에크만 층이 표층으로 올라오게 되어 해수가 혼합된다. 이러한 조석혼합으로 인해 하층의 냉수가 올라와 해수면의 온도가 낮아진다 (Fig. 10). Fig. 8(a), Fig. 8(b)를 보면 조석이 강한 지역 (서해, 남해)에서 Bias와 RMSE의 높은 값을 확인 할 수 있다. Fig. 11은 조석이 강한 지역인 칠발도에서의 현장 관측 자료와 해수면온도 자료간의 비교 시계열이다. Fig. 11를 보면 조석의 영향으로 복잡한 해수면온도 시계열을 볼 수 있다. 모든 해수면온도 자료들이 이러한 조석현상을 모의 하지 못하였고 현장 관측 자료와 5°C 이상 차이가 나타났다. 일일 위성 합성 해수면자료에서는 OSTIA와 FNMOC-S가 상대적으로 현장 관측 자료와 비슷한 경향을 보였으며, AVHRR는 다소 떨어지는 경향을 보였다. G1SST는 다른 자료보다도 현장 관측 자료와 차이가 많이 나타났다. 또한, 모델 해수면 재분석자료에서는 FNMOC-M이 가장 조석 현상을 잘 모의 했으며, HYCOM과 JCOPE2자료는 조석이 강할 때는 8°C 이상 차이가 나는 것을 확인할 수 있다.

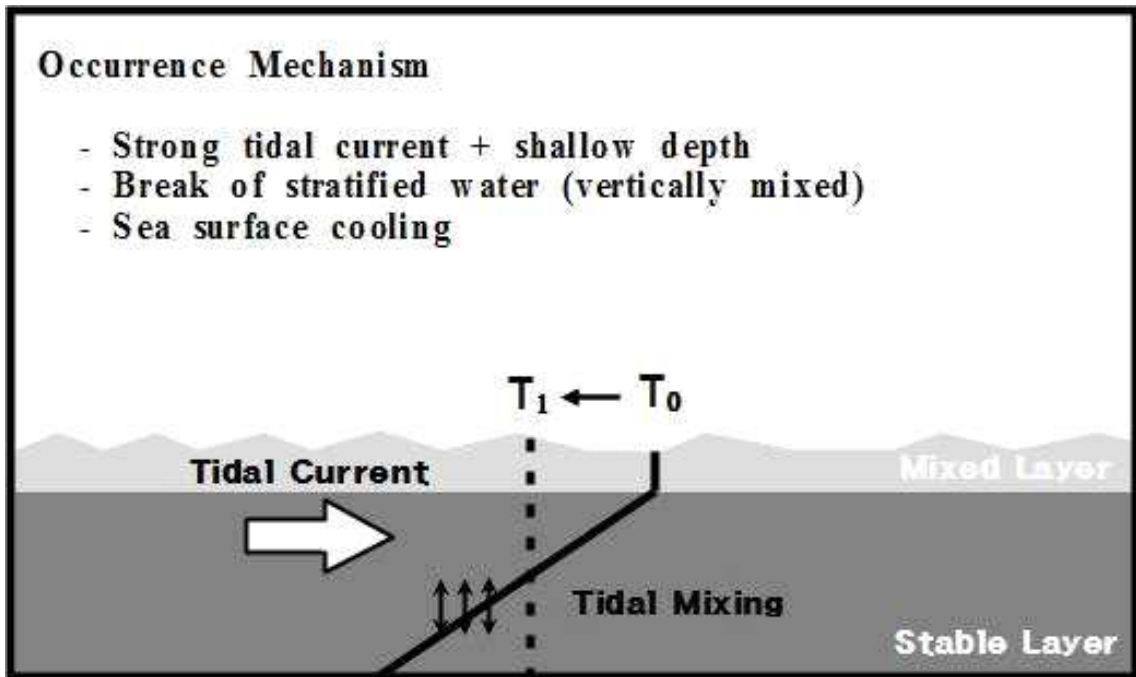


Fig. 10. Occurrence mechanism of the SST cooling induce by the tidal mixing.

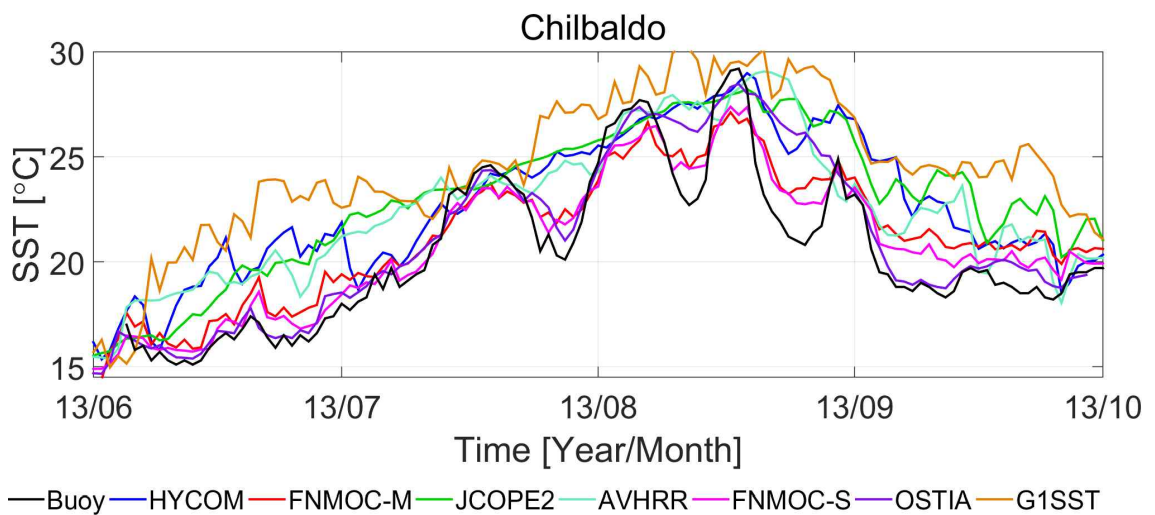


Fig. 11. Time series of SST during the period of rapid water temperature changes which were induced by tidal mixing at Chilbal-do.

Fig. 12은 해상도 해수면온도 자료간의 차이를 더 확연하게 보기 위해 조석 현상이 심한 2013년 7월 26일의 자료별 공간 분포를 나타냈다. 조석 유무를 보다 정확하게 보기 위하여 우리나라와 일본 상공에 있는 같은 날짜의 정지궤도 위성인 MTSAT-2의 적외선 이미지 (MTSAT-2의 적외선 이미지는 30분마다 제공) Fig. 12(h), 국립 해양 조사원 (KHOA : Korea Hydro-graphic and Oceanographic Administration)자료와 국립 수산 과학원 (KODC : Korea Oceanographic Data Center)의 2013년 7월부터 9월 까지 조위관측소와 해상 부이 자료, 정선 자료를 합한 Fig. 12(i)를 보면 칠발도와 남해 주변에 조석혼합으로 인해 해수면온도의 급격한 하강 현상이 나타나며, Fig. 12(a) FNMOC-M, Fig. 12(d) FNMOC-S, Fig. 12(f) OSTIA는 비슷하게 남해와 칠발도 부근에서 온도가 하강하는 공간 분포를 보인다. Fig. 12(g) G1SST의 공간분포는 Fig. 12(h) MTSAT-2, Fig. 12(i) *in situ*자료와 비교하면 칠발도 부근에서의 조석혼합으로 인한 온도 하강 현상을 전혀 나타내지 못했다. 이는 보정 과정에서 조석혼합으로 인한 해수면온도 값이 기후 값과 비교하여 현저히 떨어져 이를 구름 또는 오류로 인식하여 제거 한 것으로 판단된다.

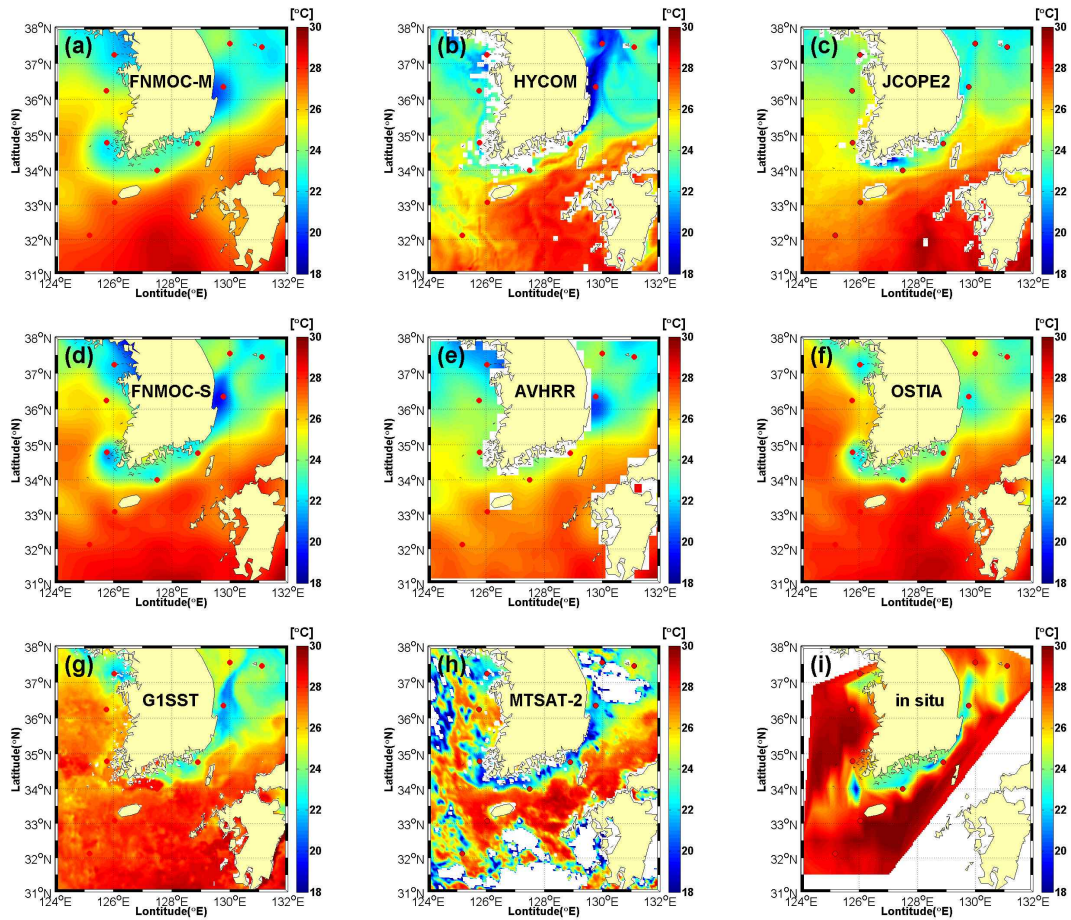


Fig. 12. Distribution of (a) FNMOC–M, (b) HYCOM, (c) JCOPE2, (d) FNMOC–S, (e) AVHRR, (f) OSTIA, (g) G1SST, (h) MTSAT–2 (MTSAT2 satellite infrared image) at the July 26, 2013, and (i) in situ (Blended of Korea Hydrographic and Oceanographic Administration data and Korea Oceanographic Data Center data in the period July 2013 to September 2013) during the rapid water temperature changes which were induced by tidal mixing.

2) 태풍 영향

태풍의 강한 바람으로 인해 상층 해양의 혼합과 용승으로 인해 해수면온도는 급격하게 하강하고 (Jeong et al., 2013), 태풍이 통과한 후에도 해양의 관성운동에 의한 지속적인 용승으로 온도 하강 현상이 지속된다. (Shay et al., 1992; Lin et al., 2003; Shang et al., 2008). 2012년 8월 태풍 DAMREY (1210), TEMBIN (1214), BOLAVEN (1215), SANBA (1216) 영향 (Fig. 13)으로 해수면온도가 약 6°C 이상으로 급격하게 낮아 졌다. Fig. 14의 2012년 마라도의 시계열을 보면 이를 확인 할 수 있다. 첫 번째 해수면온도의 하강은 DAMREY (1210)의 영향이며, 두 번째 해수면온도의 하강은 TEMBIN (1214), BOLAVEN (1215) 영향, 마지막으로 세 번째 해수면 온도의 하강은 SANBA (1216)로 인한 하강이다. 대부분의 일일 위성 합성 해수면온도 자료는 현장 관측 자료와 비교적 잘 일치 하고 그 중 FNMOC-S가 가장 유사하게 태풍으로 인한 해수면온도 하강 현상을 잘 감지했다. 모델 재분석 자료에서는 HYCOM와 FNMOC-M이 비슷한 분포를 나타냈지만, JCOPE2는 해수면온도 하강 현상을 감지하지 못했다. 이는 Fig. 15의 2010년 9월 1일 공간 분포를 보면 잘 나타나고 Fig. 15(h)는 같은 일자의 TMI (TRMM Microwave Imager)이다. TMI는 TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) 위성의 마이크로웨이브 센서이며, 적외 이미지와 달리 구름을 투과해 구름으로 인한 결측 현상을 해소시킨다. 다만, 극궤도 위성으로 인하여 관심 지역에 하루에 두 번 밖에 관측하지 못한다. Fig. 15(i)는 같은 해의 7월부터 9월 까지 국립 해양 조사원 자료와 국립 수산 과학원의 조위관측소와 해상 부이 자료, 정선 자료를 합한 공간 분포 이다. 이 TMI와 *in situ*의 공간 분포를 보면 태풍으로 인한 온도의 하강 현상을 확인 할 수 있고, 고해상도 해수면온도 자료의 공간 분포를 비교하여 확연하게 차이를 볼 수 있다. Fig. 15(c) JCOPE2, Fig. 15(g) G1SST를 제외한 전체 자료들은 마라도와 이어도 사이의 태풍으로 인한 해수면온도의 하강 현상을 감지했으나, 특히 Fig. 15(g) G1SST는 다른 고해상도 해수면온도의 공간분포와 달리 전혀 상이한 분포를 보였다. G1SST는 타 해수면온도 자료와 달리 많은 위성으로 측정된 해수면온도 자료를 사용하기 때문에 다소 엄격한 품질 보정이

필요하다. 즉 다른 위성기반 해수면온도 자료들은 5°C이내의 기후 값과 대조하는 반면에 G1SST는 3°C의 기준 값을 가지고 있으며, 위성 관측 시간에 대한 보정도 포함된다. 따라서 앞서 조석시기의 오류와 마찬가지로 태풍으로 인한 급격한 해수면온도 변화를 오류 값으로 인식하여 전혀 상이한 값을 산출한 것으로 판단된다.

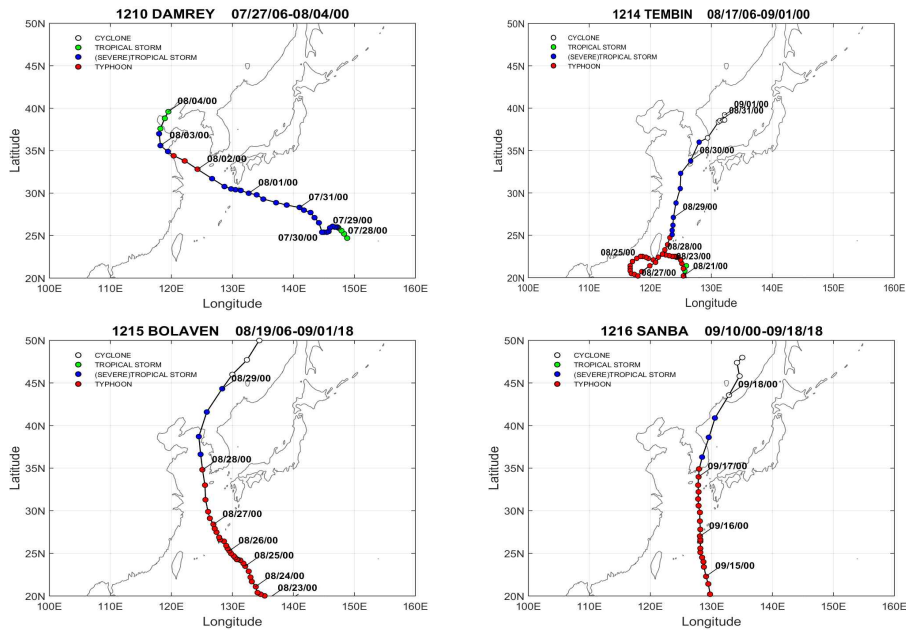


Fig. 13. Typhoons and typhoon tracks that caused SST change. (a) DAMREY, (b) TEMBIN, (c) BOLAVEN, (d) SANBA.

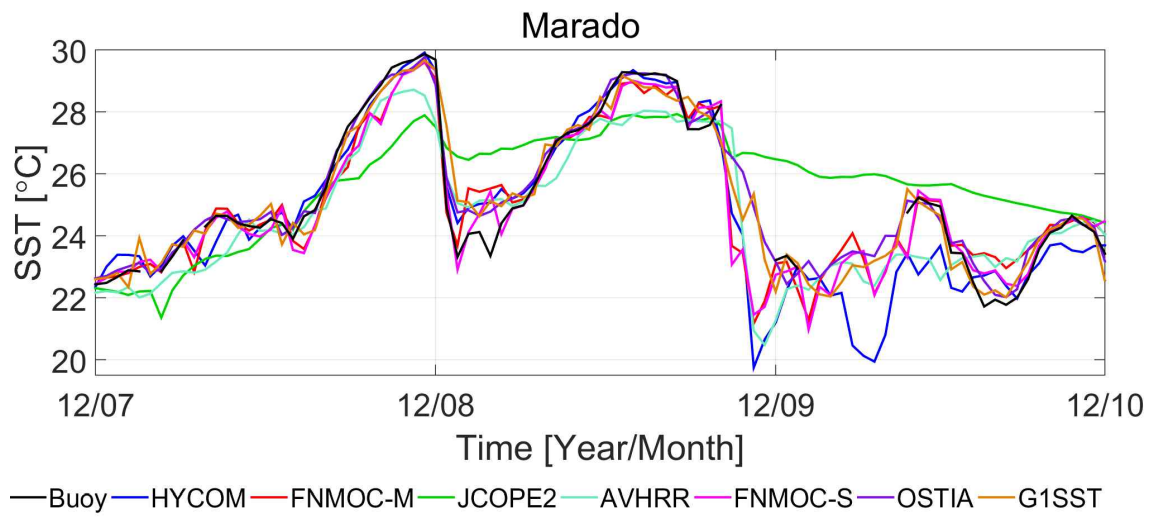


Fig. 14. Time series of SST during the period of rapid water temperature changes which were induced by typhoon at Mara-do.

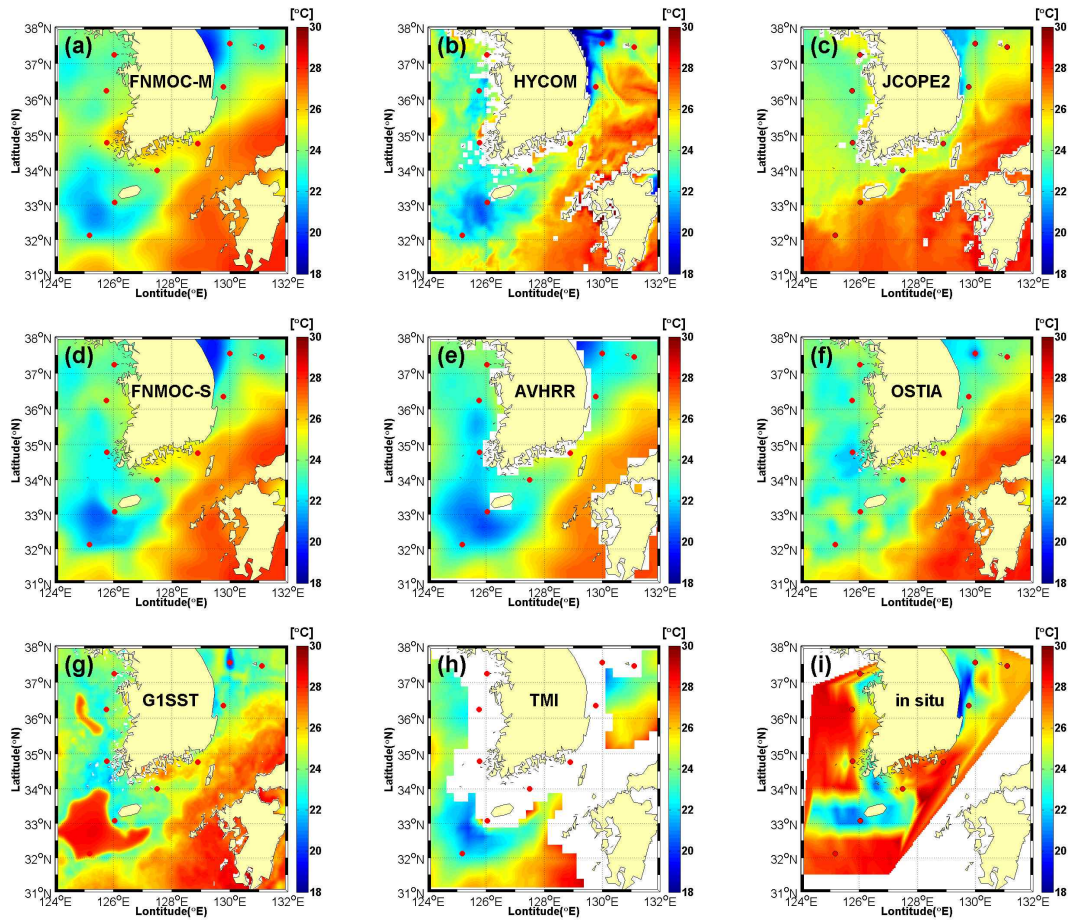


Fig. 15. Distribution of (a) FNMOC–M, (b) HYCOM, (c) JCOPE2, (d) FNMOC–S, (e) AVHRR, (f) OSTIA, (g) G1SST, (h) TMI (TRMM Microwave Imager) at the September 1, 2012, and (i) in situ (Blend of Korea Hydrographic and Oceanographic Administration data and Korea Oceanographic Data Center data in the period July 2012 to September 2012) during the rapid water temperature changes which were induced by typhoon.

3) 용승 영향

한반도 동해안은 수심이 깊으며 여름철에 남풍이 지속적으로 강하게 불면 에크만 수송 효과로 하층의 차가운 해수가 상층 해양으로 올라와 해수면온도가 지속적으로 낮아진다 (Fig. 16). 이에 따라 2013년 7월부터 남풍이 불기 시작하면서 (Fig. 18) 동해안에 강한 용승이 일어나 해수면온도가 10℃이상 낮아졌고, 경북 영덕에는 냉수대 경보를 발령했다 (해양자료속보,제4330호). Fig. 17의 부이 관측 시계열을 보면 7월 동안 지속적으로 해수면온도가 낮은 것을 확인 할 수 있으며, Fig. 19의 KODC자료에서도 해수면온도가 호미곶의 2013년 7월 1일부터 7월 8일까지 10℃이상 변화가 일어난 것을 볼 수 있다.

Fig. 17에서 일일 위성 합성 자료들은 모두 이러한 급격한 온도 변화를 감지하지 못하고 7월 초 강한 용승 시기 때 모델 자료를 보면 일일 위성 합성 자료보다 비교적 잘 따라 가는 것을 볼 수 있다. 특히 HYCOM 해수면온도 재분석 자료가 다른 모델 해수면온도 재분석 자료보다 좋은 경향을 보였다.

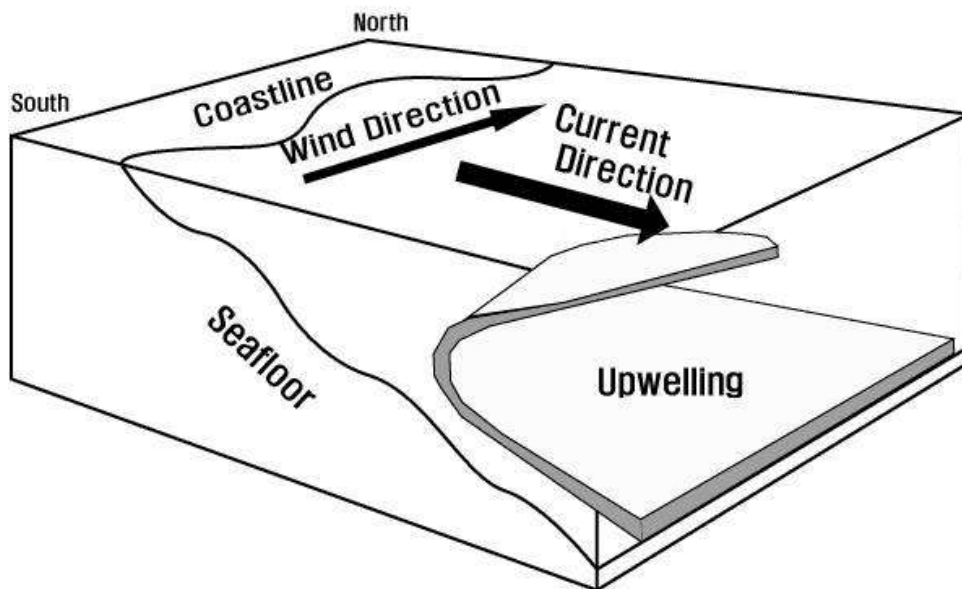


Fig. 16. Occurrence mechanism of the SST cooling induce by the upwelling.

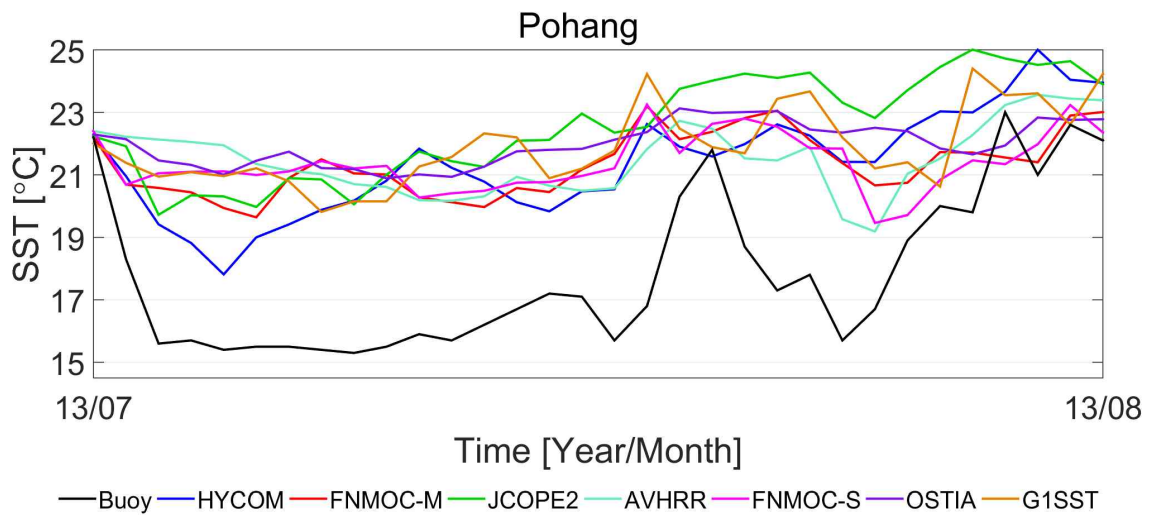


Fig. 17. Time series of SST during the period of rapid water temperature changes which were induced by upwelling at Pohang.

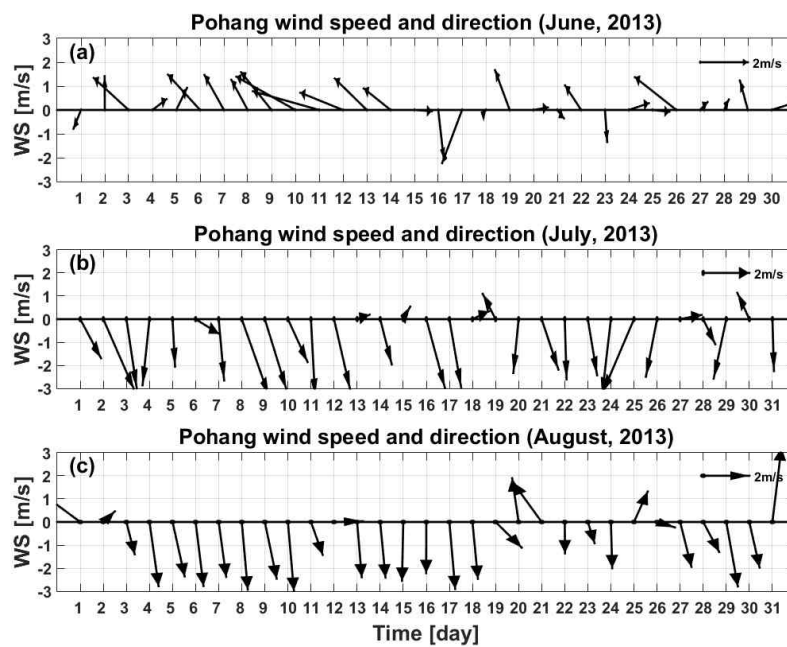


Fig. 18. Time series of the wind speed and wind direction during (a) June, (b) July, (c) August, 2013 at Pohang.

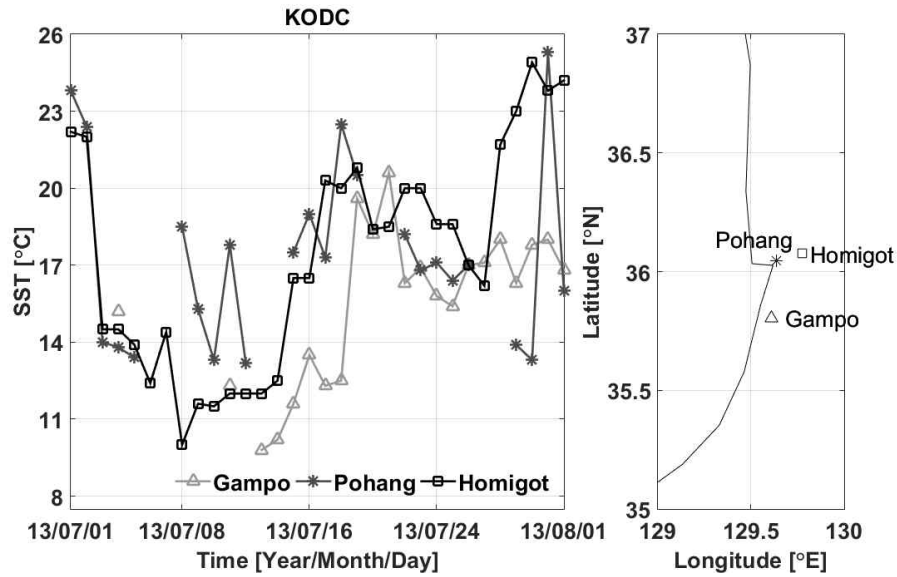


Fig. 19. Time series of Korea Oceanographic Data Center (KODC) SST during upwelling at Gampo, Pohang and Homigot.

Fig. 20는 용승 시기 때의 2013년 7월 15일 고해상도 해수면온도자료들의 공간 분포를 보여 주며 모든 해수면온도 자료가 용승에 대해 서로 간에 차이는 있지만 같은 일자의 MTSAT-2 적외선 자료 (Fig. 20(h))와 같은 해의 7월부터 9월까지 국립 해양 조사원과 국립 수산 과학원의 조위관측소와 해상 부이, 정선자료를 합한 자료 (Fig. 20(i) *in situ*)와 전체적으로 비슷한 공간분포를 보인다. 하지만 해수면온도 자료들은 어느 정도의 해수면온도 하강은 감지하였으나 실제 관측 값과 그 차이가 2~4°C 정도 차이가 나 정확하게 감지하지 못했다. 이는 조석과 태풍 현상으로 인한 해수면온도 하강과 달리 모든 고해상도 해수면온도 자료에서 현장 관측 값과 차이가 많이 발생했다.

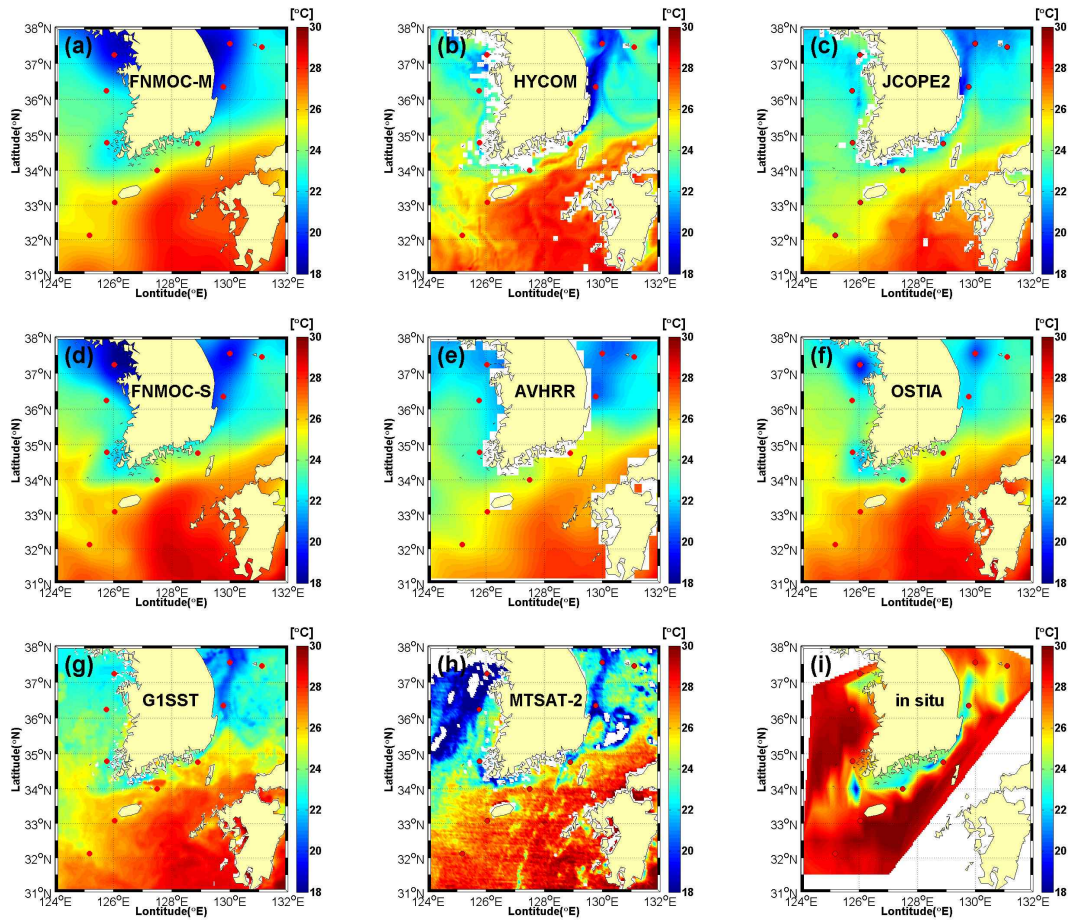


Fig. 20. Distribution of (a) FNMOC–M, (b) HYCOM, (c) JCOPE2, (d) FNMOC–S, (e) AVHRR, (f) OSTIA, (g) G1SST, (h) MTSAT–2 (MTSAT2 satellite infrared image) at the July 15, 2013, and (i) in situ (Blend of Korea Hydrographic and Oceanographic Administration data and Korea Oceanographic Data Center data in the period July 2013 to September 2013) during the rapid water temperature changes which were induced by upwelling.

3.3 해수면온도의 일일 변동성

해수면온도 자료는 시공간적인 변동성이 크지 않은 해양의 특성을 고려하여 일반적으로 일평균 자료가 널리 사용된다. 그러나 해역에 따라 일변화가 매우 큰 지역에 대해서는 일평균 자료를 사용할 경우 해역의 상세한 변동 특성을 고려할 수 없게 된다. 특히, 수심이 얇고 조석의 강도가 강한 서해에서 해수면온도의 일변화는 매우 크다. Fig. 21의 2011-2013년 동안 각 기상 부이 위치에 대한 최대 일 변화 (|최대값-최소값|)을 보면 각 연도별로 덕적도 (Fig. 21(a))에서 4°C, 2.8°C, 3.9°C, 울릉도 (Fig. 21(b))에서 3.4°C, 2.8°C, 3.9°C, 외연도 (Fig. 21(c))에서 3.1°C, 5.2°C, 6.1°C, 포항 (Fig. 21(d))에서 4.5°C, 6.6°C, 7.7°C, 칠발도 (Fig. 21(e))에서 6.7°C, 6°C, 8.1°C, 동해 (Fig. 21(f))에서 4°C, 4.5°C, 5.4°C, 거제도 (Fig. 21(g))에서 4°C, 6.2°C, 5.8°C, 마라도 (Fig. 21(h))에서 4.7°C, 3°C, 3°C 그리고 거문도 (Fig. 21(i))에서 4.7°C, 5°C, 8.9°C로 나타났다. 이를 볼 때, 9개 부이 중에서 칠발도, 거제도, 포항에서 평균적으로 가장 크게 나타났다. 그 외 2013년 거문도에서 약 9°C의 큰 일 변화를 보였다. 동해, 마라도, 외연도, 울릉도 등은 5°C 이내의 다소 작은 일 변화를 보였다. Fig. 22, 은 월 별, 시간 별로 세밀하게 분석한 결과이며 Table. 5은 최대, 최소가 나타나는 일 변동 월과 최대 일 변동 월의 폭을 나타냈다. 모든 지점에서 5, 6, 7, 8월에 높은 일 변동 폭을 보였으며, 11, 12, 1, 2월에 가장 낮은 변동 폭을 보였다. 가장 높은 폭을 나타내는 지점은 칠발도로 6월에 1.4289°C였다. 시간 별로 보면 15시 전 후로 가장 높은 변동 값을 보였고, 6시 전 후로 가장 낮은 변동 값을 보였다. 또한, 서해, 남해 지역인 덕적도 (Fig. 22(a)), 외연도 (Fig. 22(c)), 거문도 (Fig. 22(i))에서 큰 변동 폭과 변동 값을 보였으며, 동해 지역인 포항 (Fig. 22(d)), 동해 (Fig. 22(f))에서도 큰 변화 폭을 나타냈다.

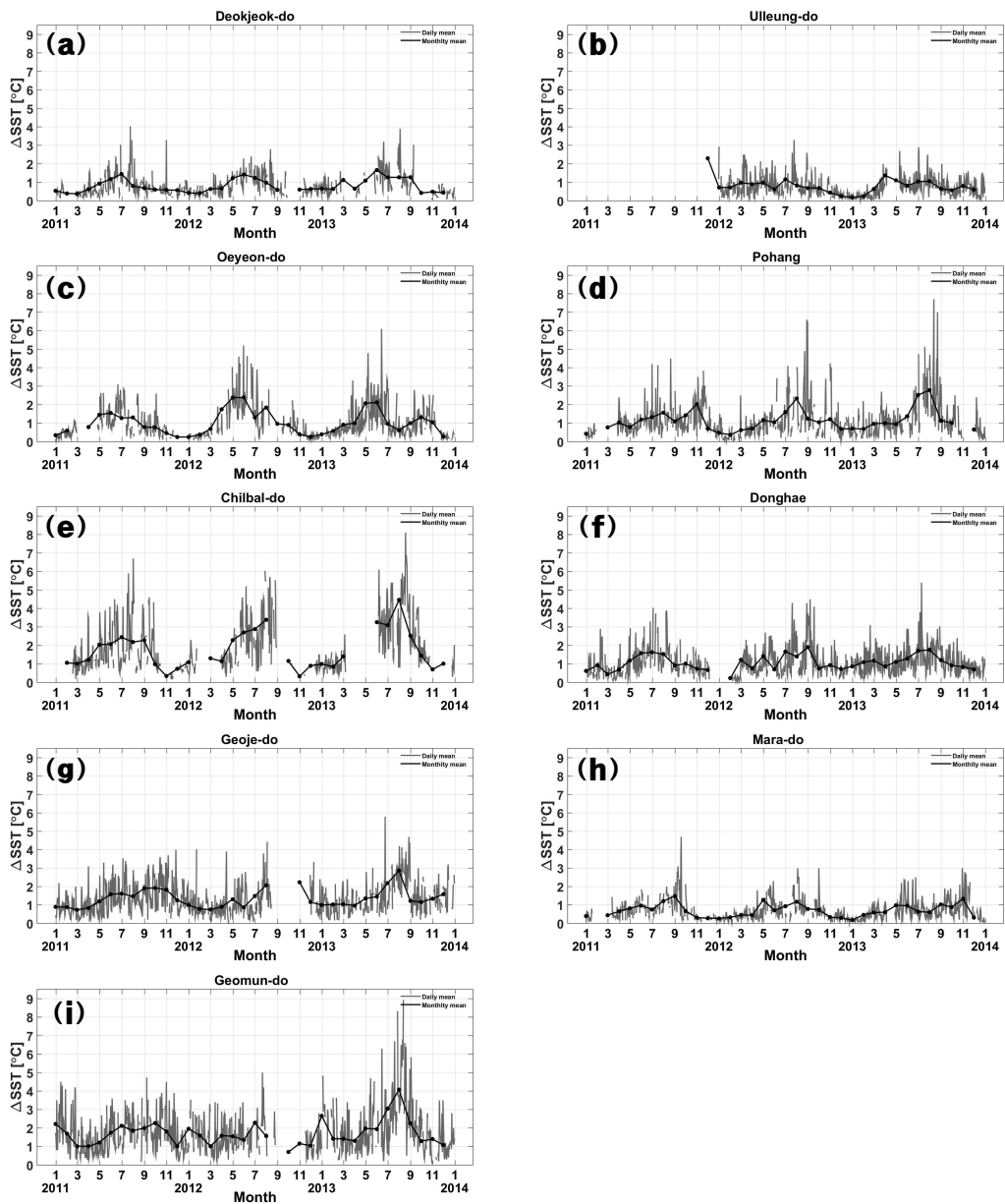


Fig. 21. Time series of the daily mean difference (Gray line) and monthly mean difference (Black line) at (a) Deokjeokdo, (b) Ulleungdo, (c) Oeyeondo, (d) Pohang, (e) Chillbaldo, (f) Donghae, (g) Geoje-do, (h) Marado, and (i) Geomundo during 2011–2013 years.

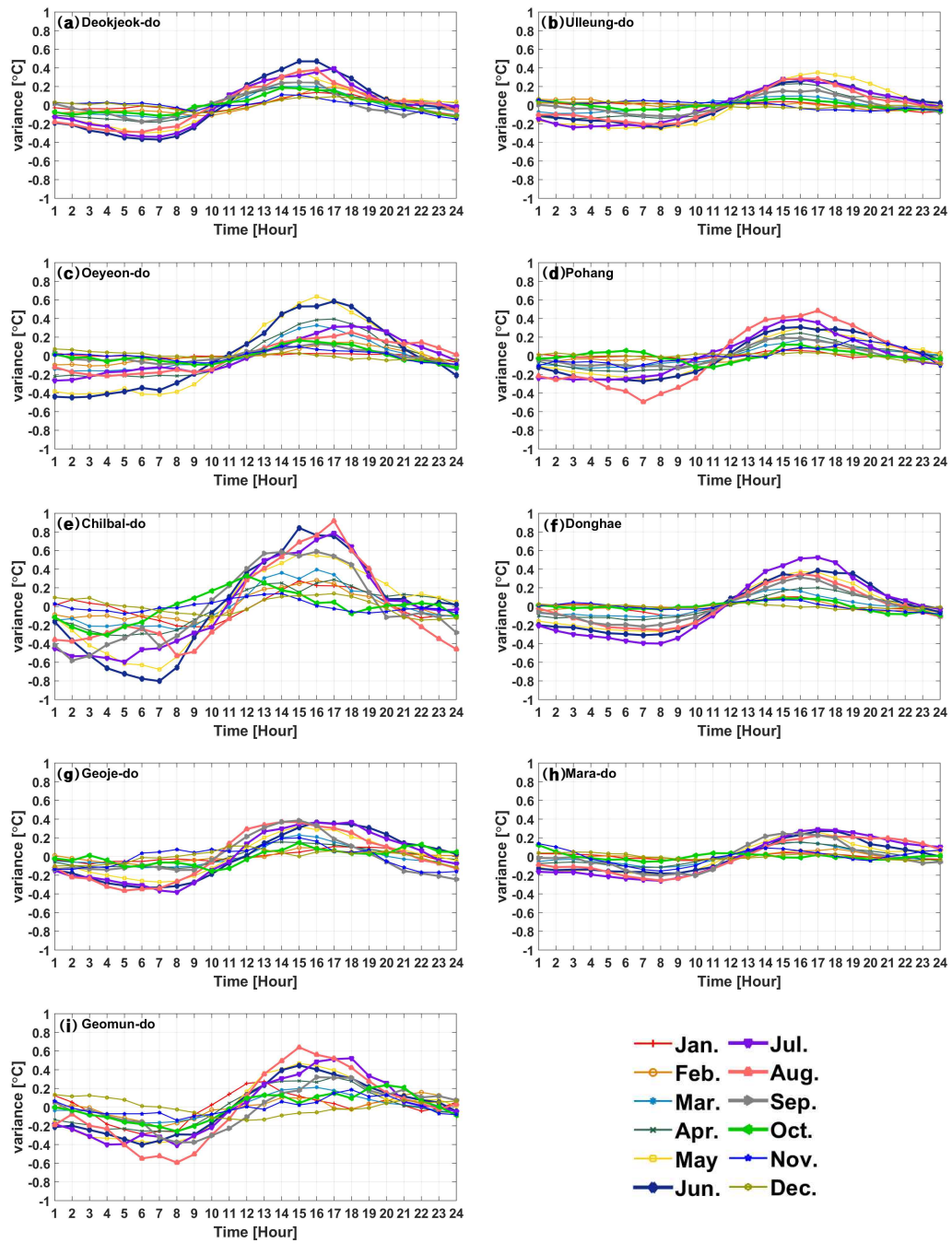


Fig. 22. Time series of diurnal variation at (a) Deokjeokdo, (b) Ulleungdo, (c) Oeyeondo, (d) Pohang, (e) Chillbaldo, (f) Donghae, (g) Geojedo, (h) Marado, and (i) Geomundo during 2011–2013 years.

Table 5. Month of maximum and minimum diurnal variation of SST, amplitude of maximum variation.

Buoy location	Month of maximum variation	Month of minimum variation	Amplitude of maximum variation
Deokjeok-do	Jun.	Dec.	0.6293
Ulleung-do	May	Dec.	0.5306
Oeyeon-do	May	Jan.	0.9564
Pohang	Aug.	Jan.	0.8776
Chilbal-do	Jun.	Nov.	1.4289
Donghae	Jul.	Dec.	0.8529
Geoje-do	Jul.	Feb.	0.5635
Mara-do	Jul.	Jan.	0.4667
Geomun-do	Aug.	Jan.	0.9586

조석으로 인한 일 변화의 특성을 자세히 알아보려고 칠발도의 해수면온도 자료와 칠발도와 가까운 흑산도의 조위, 일사량, 전운량 자료를 분석했다. **Fig. 23(a)**의 조류타원도를 보면 칠발도 부근 (**Fig. 23(a)**의 원)에는 조류타원이 길쭉하게 늘어있는 것을 확인할 수 있다. 이는 조류의 이동이 앞뒤로 움직이며, 그 세기가 빠르다는 것을 의미한다. **Fig. 24-25**와 **Fig. 28-29**은 각각 2011년 8월, 2012년 8월, 2012년 7월, 2013년 7월의 칠발도 해수면온도와 흑산도 조위를 나타낸다. 한 달간의 조석 주기에서 대조기에 해수면 온도의 일 변화가 커지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 조석 현상에 의한 해수면온도 일 변화 영향을 자세히 보기 위해 **Fig. 26-27**과 **Fig. 30-31**에 나타냈다. 조석에 의해 해수면 온도의 일 변화에 영향을 주는 요인은 두 가지로 설명할 수 있다.

첫 번째는 조석혼합 (Tidal mixing)이다. 대조에서 소조로 갈 때의 썰물, 소조에서 대조로 갈 때의 밀물시기 때 해수의 이동으로 성층화된 해수가 혼합되어 해수면온도가 변화하고 해수면온도 일 변화에 영향을 준다 (Fig. 10). 이러한 과정은 성층화가 잘 발달 된 여름 철 혹은 태양 일사가 강한 맑은 2~3시경에 더욱 두드러지게 나타난다. Fig. 26는 칠발도 부근의 2011년 8월 2일 조석 혼합으로 인한 일 변화의 영향을 보여준다. 이 시기는 전운량이 40% (Fig. 26(b)), 일사량이 $25MJ/m^2$ (Fig. 26(c))로 맑은 날 이었으며, 기온의 일 변화는 $6.7^{\circ}C$ 였다. 해수면온도의 일 변화는 약 $7^{\circ}C$ 를 나타냈다. Fig. 26(a)를 보면, 밀물과 썰물시기에 해수의 이동 (화살표)에 따라 해수면온도가 하강 (Fig. 26(a)의 원)하는 것을 볼 수 있다. 또 Fig. 27에서 2012년 8월 7-8일 칠발도 부근에서 조석혼합에 의해 해수면온도의 변화 (Fig. 27(a)의 원)를 보여준다. 따라서 조석혼합에 의해 해수면온도의 일 변화에 영향을 줄 수 있다. 이러한 두 가지 경우 외에도 Fig. 24-25, Fig. 28-29에서 조류의 이동 간에 해수면온도가 하강하는 것을 잘 보여주며, 또한 조류의 이동이 멈췄을 때 (대조와 소조)해수면온도가 하강하기도 한다. 이렇게 대조-소조, 소조-대조 사이와 대조, 소조 때 상황에 따라 해수면온도가 하강하는 지점이 변화는 것은 성층이 강화 정도와 조류의 세기 정도에 따라 달라지는 것을 보여주는 결과이다.

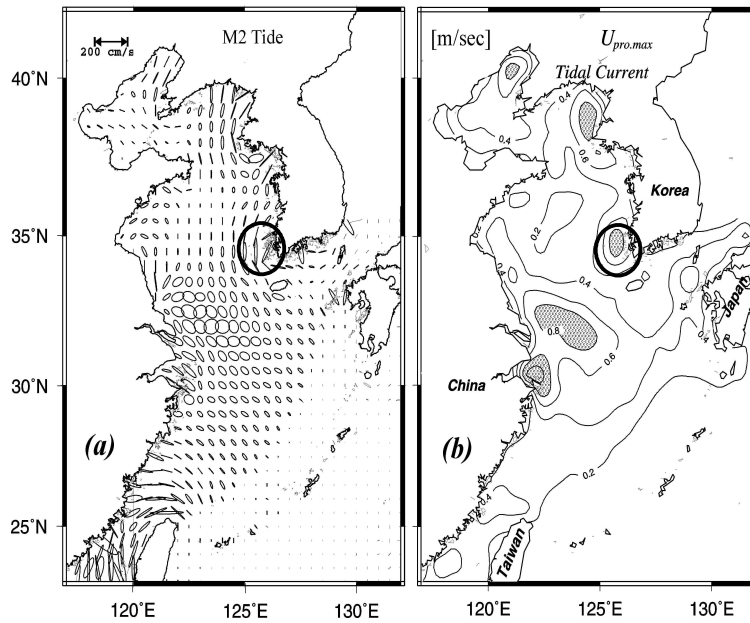


Fig. 23. Spatial distribution of (a) Tidal ellipses for M2 tide and (b) tidal cycle at the Yellow sea. Circle is display Chilbal-do around (ref. Moon 2005, Fig. 2).

두 번째로 조석에 의한 물의 수평이동으로 인하여 일 변화에 영향을 줄 수 있다. **Fig. 23(b)**의 조석전선 분포와 **Fig. 12**을 보면 칠발도 부근(**Fig. 23(b)**의 원)에 조석전선이 분포하고 주변에는 따뜻한 물이 존재한다. 이러한 조석전선이 조류에 따라 이동하게 될 때 관측지점인 칠발도 부근에 지나가면서 해수면온도의 상승 및 하강을 일으키는 요인이 된다. **Fig. 30**은 2012년 7월 29-30일의 조류에 따라 해수의 수평이동으로 인한 일 변화의 특성을 보여준다. 이 시기는 전운량이 40% (**Fig. 30(b)**), 일사량이 $28MJ/m^2$ (**Fig. 30(c)**)로 맑은 날이었으며 기온의 일교차는 $7.7^{\circ}C$ 를 나타냈다. 해수면온도의 일 변화는 약 $6^{\circ}C$ 를 나타냈다. **Fig. 30(a)**를 보면 29일 16시부터 23시까지 하루 중 대조기로써 소조에서 대조로 해수의 이동을 나타내고 이에 따라 조석혼합으로 인하여 17시에 비해 20시에서 약 $3^{\circ}C$ 이상의 해수면온도의 하강을 보였다. 이후 대조기까지 약 $4^{\circ}C$ 의 해수면온도의 급격한 상승이 일어났다. 이는 조석전선 주변에 있던 따뜻한 해수가 조류에 의해서 관측지점을 지나가서 생긴 현상으로 사료된다. **Fig.**

32(a)는 2011년 7월 29일 21시의 FNMOC-S의 해수면온도 분포이다. 이를 보면 칠발도 부근에 낮은 온도가 등근 원 형태로 분포하고 상대적으로 따뜻한 해수가 주변에 있다. 따라서 조류의 이동에 따라 상대적으로 따뜻한 해수가 충분히 관측지점인 칠발도 부근에 이동하여 해수면온도의 일 변화에 영향을 줄 수 있다. 또한, 해수면온도의 변화는 일사량과 운량에 의해 지배적이며, 이는 Fig. 26-27(b-c), Fig. 30-31(b-c)에 나타나있다. 해수면온도의 일 변화와 일사량은 일치하는 분포를 보이며, 전운량은 반대의 분포를 나타낸다. 이를 볼 때 해수면온도의 변화는 일사량이 강할수록 변화의 폭은 커지며, 구름이 많을수록 변화의 폭이 줄어드는 것을 의미한다. 따라서 단 시간에 해수면온도가 4℃ 가까이 상승한 것을 볼 때 일사량이 없고 구름이 적었던 29일 20시부터 23시에는 일사량에 의한 해수면온도의 상승이 아니라 조류에 의해 해수의 수평이동에 의한 변화를 나타낸다. Fig. 31에서도 마찬가지로 칠발도 부근에서 2013년 7월 11일-12일에 비슷한 사례가 나타났다. 11일 20시에 조석혼합으로 인하여 해수면온도가 크게 하강한 상태이고 이후 20시부터 24시까지 4℃의 해수면온도 상승을 보였다. 이후 12일 0시부터 4시까지 조석혼합과 일사량의 영향을 받지 않음으로 해수면온도가 상승하지 못하고 하강하였고 4시부터 일사량으로 인해 해수면온도가 복귀됨을 보였다. Fig. 32(b)의 2013년 7월 11일 21시 FNMOC-S에서 칠발도 부근에 20℃의 해수면온도 값을 보이고 그 주변에 25℃의 상대적으로 따뜻한 해수면온도 분포를 보인다. 따라서 조류의 이동에 따라 따뜻한 해수면온도가 관측지점인 칠발도 부근에 영향을 미쳐 해수면온도가 상승할 수 있다.

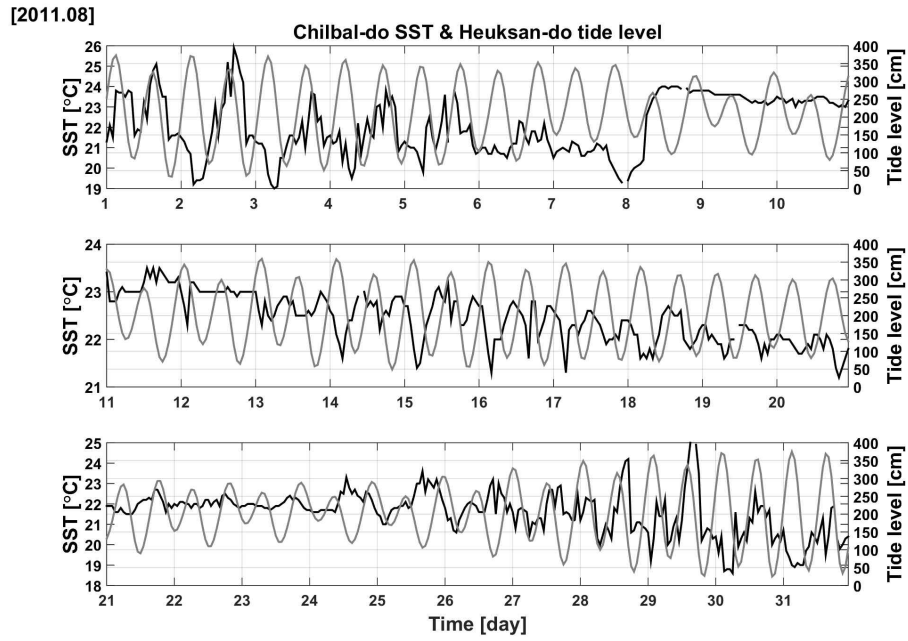


Fig. 24. Time series of Chilbal-do SST and Heuksan-do tide level during August 2011.

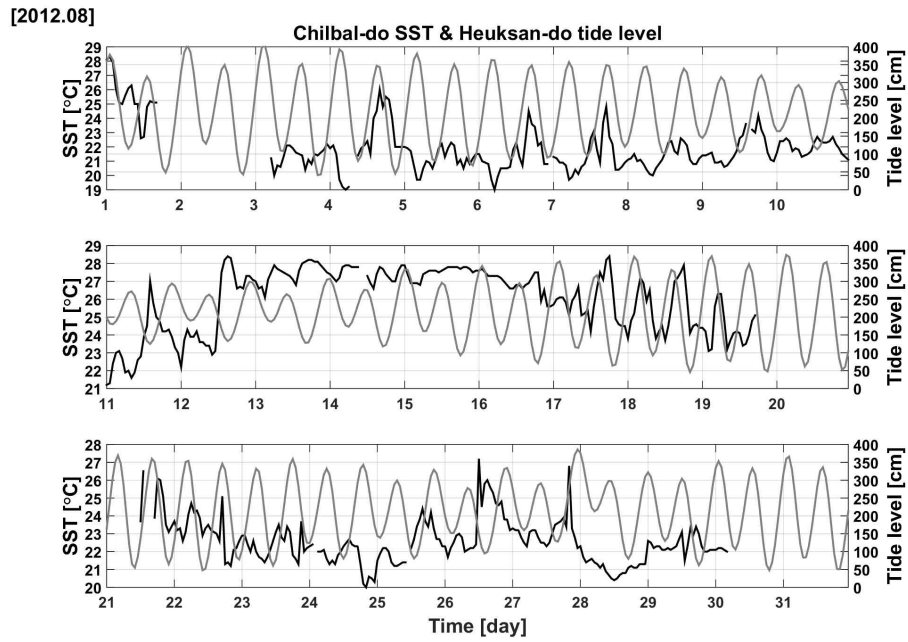


Fig. 25. Same as in Fig. 24, but during August 2012.

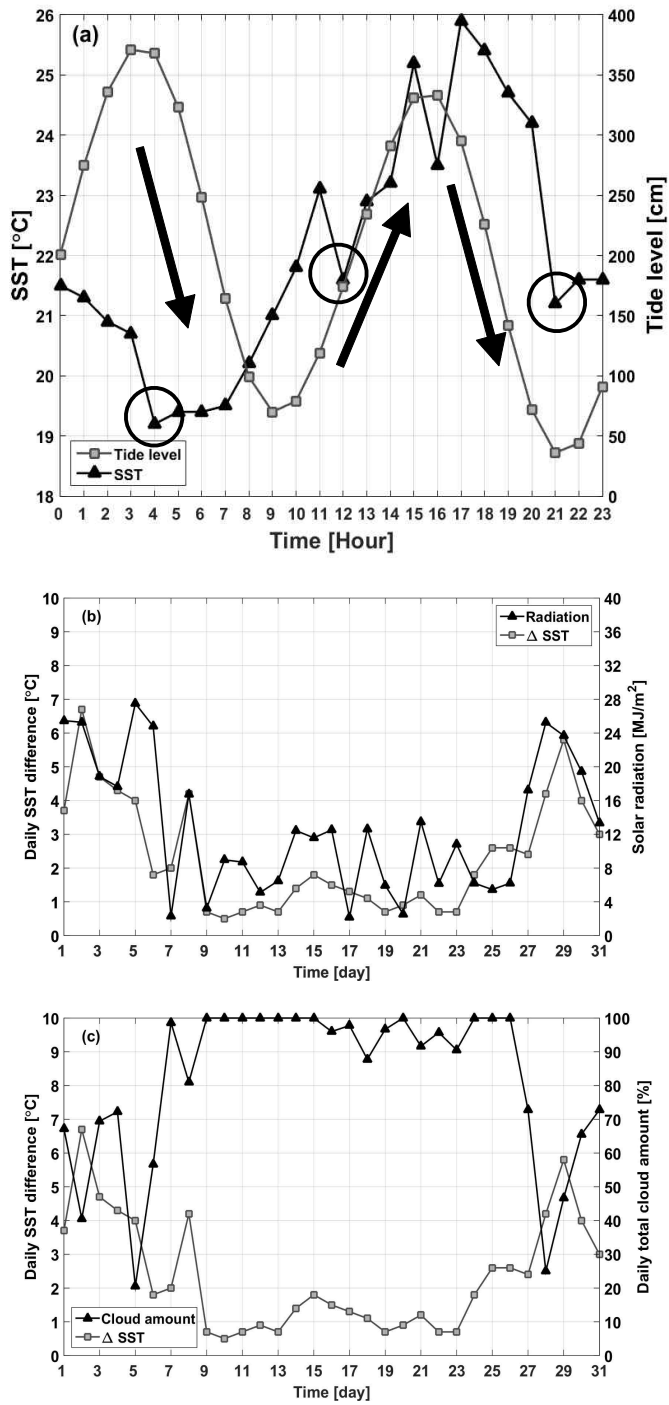


Fig. 26. Time series of (a) SST and Tide level (Circle is SST cooling induced by tide mixing, Arrow is movement of the sea) during August 2, 2011, (b) daily mean solar radiation and (c) daily total cloud amount during August 2011.

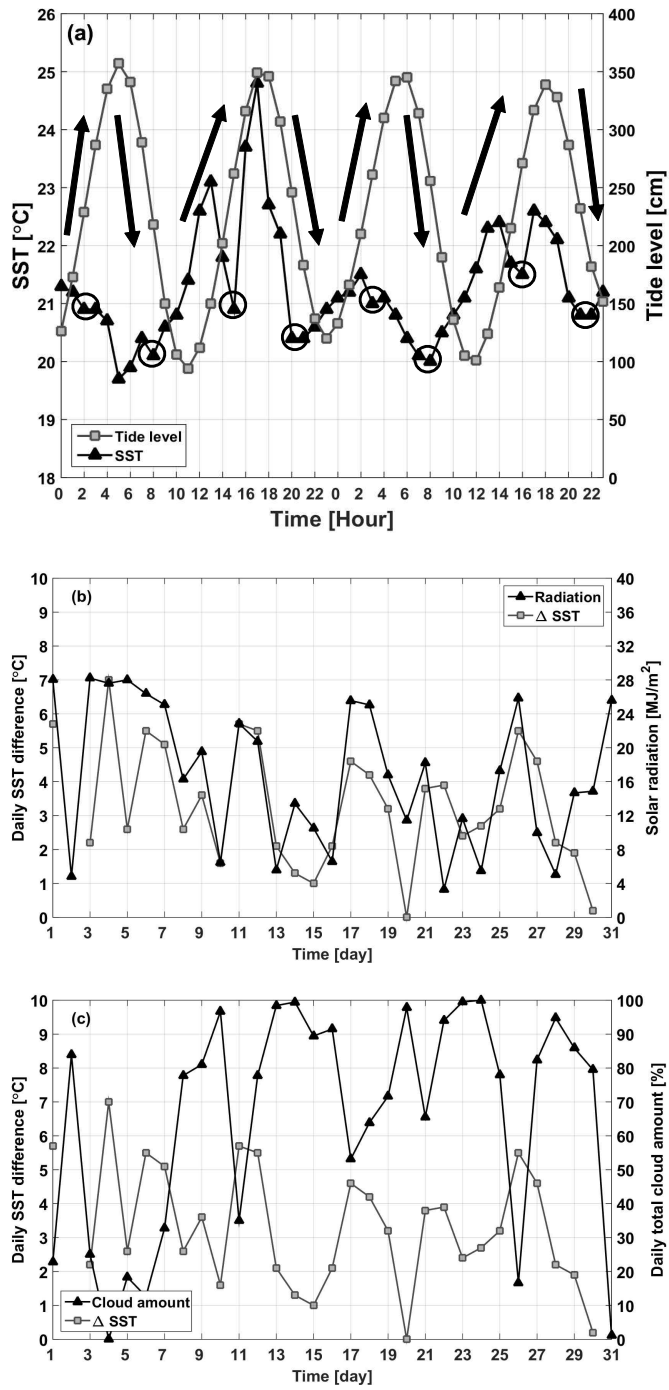


Fig. 27. Time series of (a) SST and Tide level (Circle is SST cooling induced by tide mixing, Arrow is movement of the sea) during August 7–8, 2012, (b) daily mean solar radiation and (c) daily total cloud amount during August 2012.

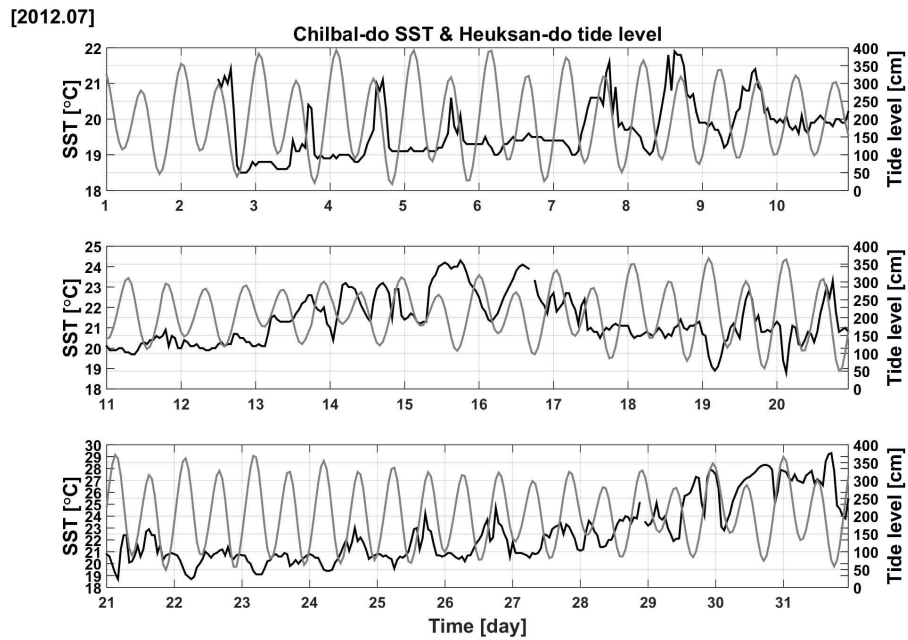


Fig. 28. Time series of Chilbal-do SST and Heuksan-do tide level during July 2012.

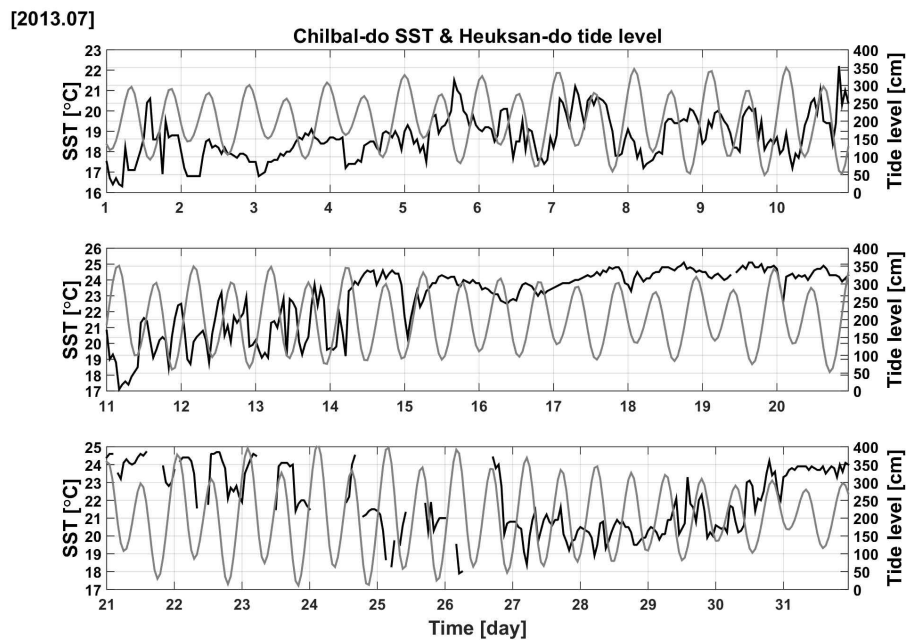


Fig. 29. Same as in Fig. 28, but during July 2013.

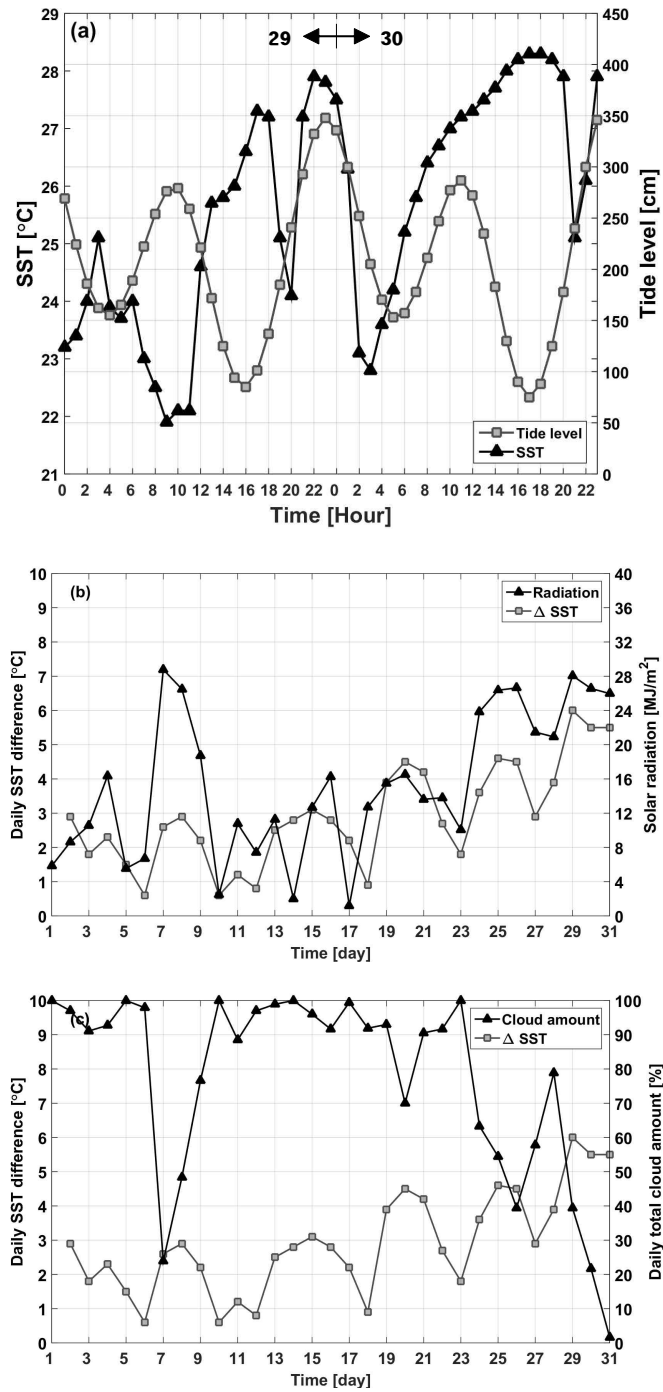


Fig. 30. Time series of (a) SST and Tide level during July 29–30, 2012, (b) daily mean solar radiation and (c) daily total cloud amount during July 2012.

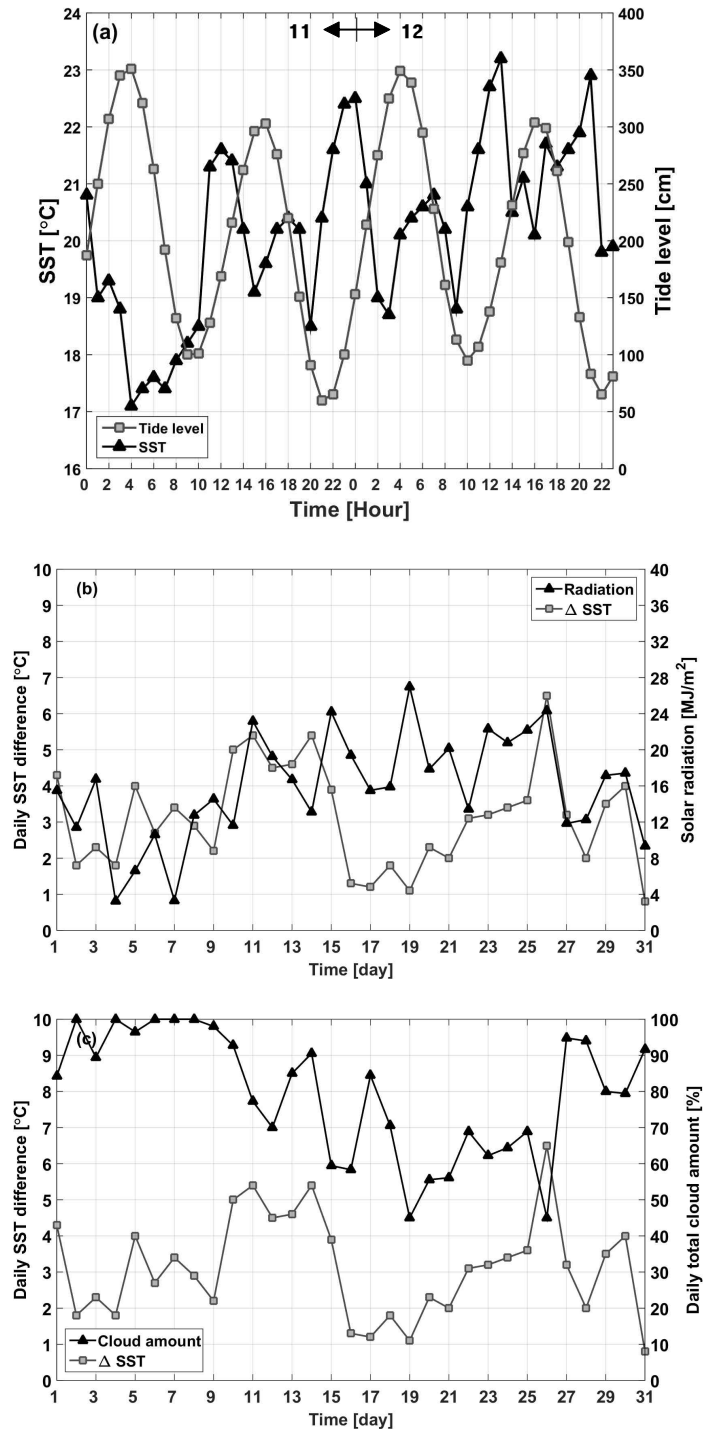


Fig. 31. Time series of (a) SST and Tide level during July 11–12, 2013, (b) daily mean solar radiation and (c) daily total cloud amount during July 2013.

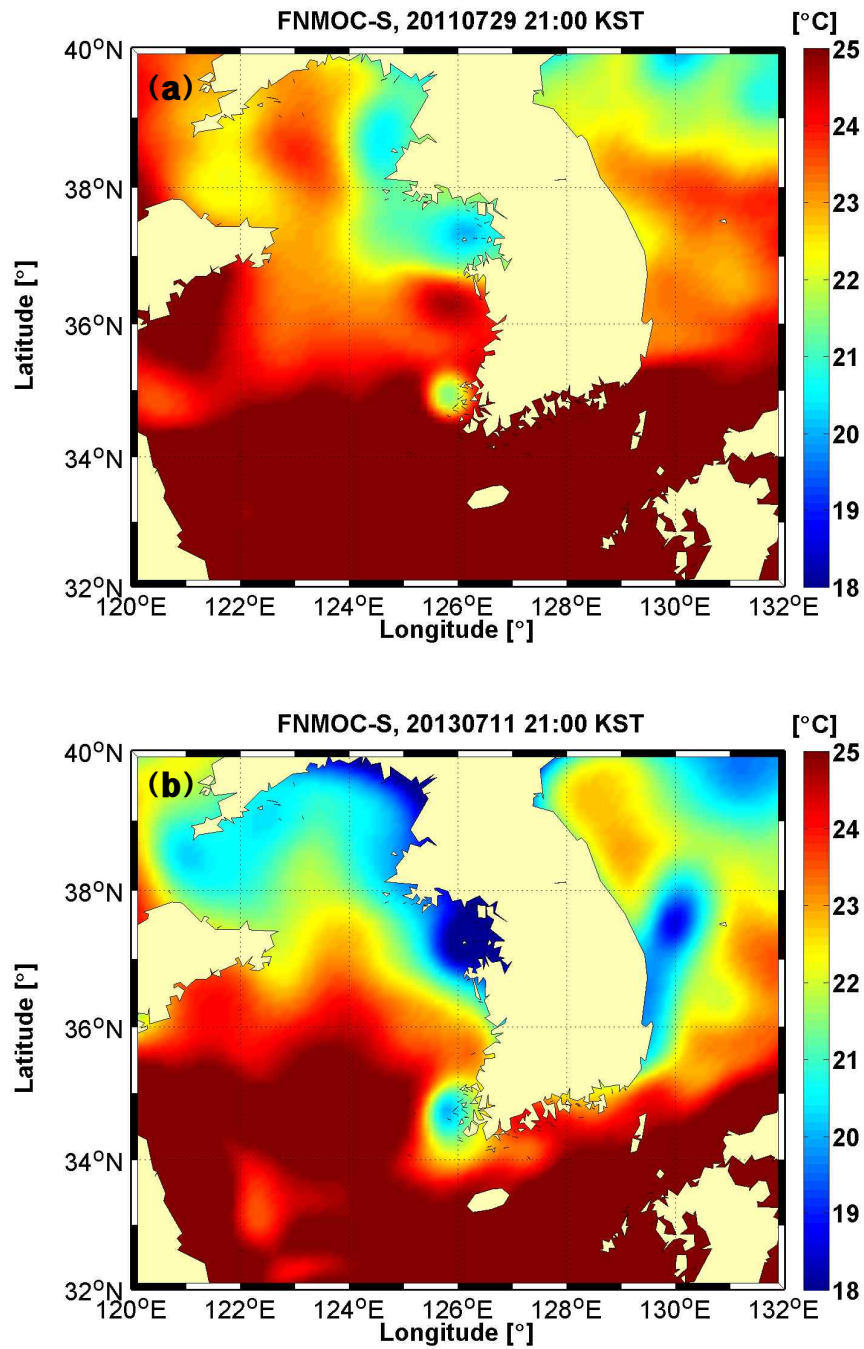


Fig. 32. Distribution of FNMOC-S from (a) July 29, 2011, 21:00 KST and (b) July 11, 2013, 21:00 KST.

4. 결 론

본 연구에서는 널리 사용되는 한반도 근해의 위성합성 및 모델재분석 해수면 온도 자료의 정확도를 2011년에서 2013년까지 관측된 연안 부이 및 과학기지 자료를 이용하여 조사하였다. 사용한 위성(일일 합성) 해수면온도 자료는 NOAA에서 산출하는 0,25° 해상도의 AVHRR, 미해군수치대기해양센터(FNMOC)에서 제공하는 10km 해상도의 FNMOC-S, 미국 NASA/JPL에서 생산하는 1km의 해상도의 G1SST, 그리고 영국기상청의 ~5km 해상도의 OSTIA 자료이다. 사용된 수치모델 재분석자료(자료동화된 일평균 자료)는 미해군연구소(NRL)에서 제공하는 ~8km 해상도의 HYCOM, 미해군수치대기해양센터에서 생산하는 12-16km 해상도의 FNMOC-M, 일본 해양지구과학기술기관(JAMSTEC)에서 쿠로시오 해류의 정확한 추적 및 관측 목적을 가지고 ~10km 해상도로 산출하는 JCOPE2 자료이다. 검증에 사용된 현장 관측 자료는 기상청에서 제공하는 덕적도, 외연도, 칠발도, 동해, 울릉도, 포항, 거제도, 거문도, 마라도 기상관측부이 그리고 해양수산부의 이어도과학기지 자료이다. 현장 관측 자료와 위성/수치모델 자료의 비교는 이중선형내삽법을 사용하여 두 자료의 위치를 일치시킨 후에 이루어졌으며, 정확도 평가는 평균제곱오차(RMSE), 편차(Bias), 상관도(R)의 세 가지 항목에 대해 이루어졌다.

분석결과, 위성자료 중에서는 OSTIA가 가장 낮은 Bias(0.33°C)와 RMSE(0.94°C)를 보였고, 상관도에서는 FNMOC-S가 가장 높은 값(R=0.99)을 보였다(RMSE는 0.94°C로 OSTIA와 유사). 반면, G1SST, JCOPE2, AVHRR은 상대적으로 큰 RMSE(각각 1.40°C, 1.69°C, 1.59°C)를 보였다. 특히, G1SST는 가장 공간해상도(1km)가 높았음도 불구하고 그 보다 낮은 해상도의 OSTIA와 FNMOC-S 보다 정확도가 낮았다. 이는 공간해상도가 위성 해수면온도 자료의 정확도를 결정하는 요소가 아니라는 것을 보여준 결과이다. 지역별로 비교해보면, 수심이 낮고 조석이 강한 서해지역 부이(칠발도, 덕적도 등)에

서 평균적으로 Bias와 RMSE값이 가장 크게 나타났고, 반면 수심이 깊은 동해 및 외해 지역에서(동해, 울릉도, 마라도 등)는 대부분 오차가 상대적으로 낮았다. 모델 재분석자료는 FNMOC-M의 정확도가 가장 높았고(RMSE=1.06°C, R=0.987), HYCOM이 그 다음으로 높았다(RMSE=1.38°C, R=0.978). JCOPE2는 가장 많은 북서태평양의 현장 관측 자료를 자료동화에 사용하였기 때문에 한반도 근해에서 높은 성능을 예상하였지만 세 모델 중에서 가장 낮은 정확도를 보였다(RMSE=1.68°C, R=0.969). 계절별로 보면 모든 자료들이 봄부터 여름철(5월~9월)에 가장 오차가 크게 나타났다.

한반도 근해에서 해수면온도의 큰 오차를 발생시키는 원인을 조사해 본 결과, 큰 수온변동을 발생시키는 조석, 태풍, 용승이 주요한 원인으로 분석되었다. 조석은 성층이 강한 봄과 여름철에 수심이 얇고 조류가 강한 지역의 해수를 수직으로 혼합시켜 냉수대를 발생시키는 요인으로 알려져 있다. 특히, 조석이 강한 칠발도 부이에서는 대부분의 해수면온도 자료에서 큰 오차가 발생하였다. OSTIA, FNMOC-S, FNMOC-M은 다른 자료에 비해 상대적으로 오차가 작았다. 태풍 통과 시기에는 강한 바람으로 수직혼합으로 급격하게 해수면온도가 낮아진다. 마라도 부이에서 관측된 2012년 태풍 볼라벤과 덴빈 통과 시기의 해수면온도 자료를 보면 JCOPE2를 제외한 대부분의 자료들은 최대 8°C의 급격한 수온변동을 잘 잘 모의하였다. 그러나 태풍 시기의 공간적인 분포를 비교해 보면 G1SST가 해수면온도의 하강 현상을 오류로 인식하여 주변 보다 더 높은 기후값으로 대체하여 비현실적인 분포를 나타낸 것을 알 수 있다. 2013년 7월에 용승현상으로 최대 9°C의 수온하강이 발생한 포항 부이에서는 대부분의 위성 및 모델 자료에서 급격한 해수면온도의 하강으로 재현하지 못하였다. 오차는 컸지만 모든 자료 중에 용승에 의한 수온하강 경향을 제일 유사하게 재현한 자료는 HYCOM이었다.

현장 관측 자료와 일일 위성 합성 및 모델 재분석 해수면온도 자료의 차이를 발생시키는 근본적인 원인은 정확도 높은 위성자료가 한반도 연안에서 충분하지 않기 때문으로 사료된다(위성자료의 한계임). 즉 위성 합성장을 생산할 때 연안에 부족한 자료를 기후 값 등으로 대체하면서 오차가 커지게 되고 결과적으로 이 자료를 자료동화에 적용하는 수치모델의 결과도 오차가 커지는 것으로 분

석된다. 이러한 문제점은 시·공간적으로 큰 수온변화가 발생하는 태풍, 용승, 조석 시기에 더욱 커지는 것으로 사료된다.

검증에 사용된 부이 및 과학기지 자료는 1시간 간격으로 관측되었기 때문에 한반도 연안에서 해수면온도의 일 변동(diurnal variation) 특성을 조사하는 데 사용될 수 있다. 본 연구에서는 2011년부터 2013년까지 기상부이를 이용하여 한반도 연안의 일변화 (|최대값-최소값|)의 크기를 지역 및 계절별로 분석하였다. 또한 일변화를 발생시킨 원인을 분석하기 위하여 기상청 유인관측소(ASOS)에서 관측된 총 운량과 일사량 그리고 국립해양조사원의 조위 관측 자료를 사용하였다. 분석 결과, 해수면온도의 일 변동 폭은 거문도에서 9°C, 칠발도에서 8°C, 포항에서 7.8°C의 최대값을 보였다. 일 변동은 평균적으로 아침 7-9시에 최저 그리고 오후 2-5시 최대 온도를 보였다. 이것은 해수면온도의 일 변동의 주된 원인은 일사량과 구름 량에 의해 결정됨을 시사한다. 실제로 구름 량과 일사량의 시계열은 수온의 일 변동 변화와 높은 상관관계를 보였다. 태양복사 외에 한반도 근해에서는 (특히 서·남해에서는) 조석혼합에 의한 수온하강 및 조류에 의한 수평적인 수온변동이 일 변동을 유발하는 또 다른 원인으로 나타났다. 시계열 분석결과, 조석의 효과는 성층이 강화되는 여름철과 조류가 강한 대조기에 더욱 크게 나타났다. 또한 조석혼합으로 인한 수온변화는 주로 성층이 강화되는 낮 시간에 그리고 조류에 의한 수온변화는 주로 밤 시간에 특징적으로 나타났다.

본 연구 결과는 한반도 근해에서 일일 위성 합성 및 모델 재분석 해수면온도 자료를 사용할 때에는 지역 및 상황에 따라 그 오차가 매우 클 수 있음을 인지하고 사용되어야 하고, 나아가 지역 및 계절별로 하루의 일 변동 변화 폭이 큰 경우에는 보고자 하는 현상에 따라 시간 단위의 해수면온도 자료를 사용함을 시사한다.

참고문헌

- 국가기상위성센터, 2014. 해수면온도 (SST: Sea Surface Temperature) 알고리즘 기술 분석서 (SST-v1.0).
- 국가기상위성센터, 2014. 위성자료의 수치모델 활용지원 기술개발-합성 해수면온도 산출 체계 개선.
- 윤용훈, 홍성길, 홍윤, 이지연, 2007. Buoy 자료를 이용한 해양기상특성조사, 한국기상학회 1997년도 정기총회. 초청강연 및 가을학술발표회 행사일정 및 초록, 236-237.
- Alan J. Wallcraft, E. Joseph Metzger, A. Birol Kara, 2003. Tuning and Validating HYCOM' s KPP Mixed-Layer, 2003 Layered Ocean Model Users' Workshop.
- Chassignet, E.P., Hurlburt, H.E., Smedstad, O.M., Halliwell, G.R., Hogan, P.J., Wallcraft, A.J., Baraille, R., Bleck, R., 2007. The HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model) data assimilative system. *J. Mar. Syst.* 65, 60-83.
- Cummings, J.A., 2005. Operational multivariate ocean data assimilation. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 131, 3583-3604.
- Cummings, J.A., 2011. Ocean data quality control. In: Schiller, A., Brassington, G. (Eds.), *Operational Oceanography in the 21st Century*. Springer, pp.91-122.
- Dash, P., et al. Group for High Resolution SST Analysis Fields Inter-comparisons. Part 2: The Level 4 SST Quality Monitor (L4-SQUAM). *Deep-Sea Res. II*, this issue [10.1016/j.dsr2.2012.04.002].
- Donlon, C.J., Minnett, P.J., Gentemann, C.L., Nightingale, T.J., Barton, I.J., Ward, B., Murray, M.J., 2002. Toward improved validation of satellite sea surface skin temperature measurements for climate research. *Journal of Climate* 15, 353-369.
- Gentemann, C.L., Wentz, F.J., Mears, C.A., Smith, D.K., 2004. In situ validation of tropical rainfall measuring mission microwave sea surface temperatures. *Journal of Geophysical Research* 109, C04021.
- Jeong, J.I., Park, R.J., 2013. A Study of the Effects of SST Deviations on Heavy Snowfall Over the Yellow Sea. *Atmosphere*, **23**, 161-169
- Jeong, Y.Y., Moon, I.J., Kim, S.H., 2013. A Study on Upper Ocean Response to Typhoon Ewiniar (0603) and Its Impact. *Atmosphere*, **23**, 205-220

- John, A.K., 1997. Introduction to physical oceanography Second Edition. Prentice-Hall.
- Lee, H.-W., Y.-M. Cha, S.-H. Lee, and D.-H. Kim, 2010. Impact of High-Resolution Sea Surface Temperatures on the Simulated Wind Resources in the Southeastern Coast of the Korean Peninsula. *J. Environ. Sci. Int.*, **19**, 171-184.
- Lin, I. I., W. T. Liu, C. C. Wu, G. T. F. Wong, C. Hu, Z. Chen, W. D. Liang, Y. Yang, and K. K. Liu, 2003: New evidence for enhanced ocean primary production triggered by tropical cyclone. *Geophys. Res. Lett.*, 30 (1718), doi:10.1029/2003GL017141.
- Martin, M., Dash, P., Ignatov, A., Autret, E., Banzon, V., Beggs, H., rasnett, B., Cayula, J. F., Chao, Y., Cummings, J., Donlon, C., Gentemann, C., Grumbine, R., Ishizaki, S., Maturi, E., McKenzie, B., Reynolds, R., Roberts-Jones, J., 2011: Group for High Resolution SST (GHRSSST) Analysis Fields Inter-Comparisons: Part 1. A GHRSSST Multi-Product Ensemble (GMPE). *Deep Sea Res. II*
- Miyazawa, Y. and T., Yamagata, 2003: The JCOPE ocean forecast system, First Argo Science workshop, Tokyo, Japan, November 12-14 2003.
- Moon, I. J., 2005. Impact of a coupled ocean wave-tide-circulation system on coastal modeling. *Ocean Modelling* 8 (2005) 203-236.
- OISST.NOAA; Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (OISST), OISST.NOAA Webpage, Retrieved November 3, 2015, from <https://www.ncdc.noaa.gov/oisst>.
- Rayner, N.A., Parker, D.E., Horton, E.B., Folland, C.K., Alexander, L.V., Rowell, D.P., Kent, E.C., Kaplan, A., 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J. Geophys. Res.* 108 (D14), 4407, <http://dx.doi.org/10.1029/2002JD002670>.
- Reynolds, R.W., Zhang, H.M., Smith, T.M., Gentemann, C.L., Wentz, F., 2005. Impacts of in situ and additional satellite data on the accuracy of a sea-surface temperature analysis for climate. *International Journal of Climatology* 25, 857-864.
- Reynolds, R. W., T. M. Smith, C. Liu, D. B. Chelton, K. S. Casey, and M. G. Schlax, 2007: Daily high-resolution blended analyses for sea surface temperature. *J. Climate*, 20, 5473-5496.
- Reynolds, R. W., 2009; What's New in Version 2. OISST Webpage. http://www.ncdc.noaa.gov/sites/default/files/attachments/Reynolds2009_oisst_daily_v02r00_version2-features.pdf.

- Shang, S. L., Li, F. Sun, J. Wu, C. Hu, D. Chen, X. Ning, Y. Qiu, C. Zhang, and S. Shang, 2008: Changes of temperature and bio-optical properties in the South China Sea in response to typhoon Lingling, 2001. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L10602, doi:10.1029/2008GL033502.
- Shay, L. K., P. G. Black, A. J. Mariano, J. D. Hawkins, and R. L. Elsberry, 1992: Upper ocean response to Hurricane Gilbert. *J. Geophys. Res.*, 97, 20227–20248.
- Stark, J.D., Donlon, C.J., Martin, M.J., McCulloch, M.E., 2007. OSTIA: an operational, high resolution, real time, global sea surface temperature analysis system. *OCEANS 2007-EUROPE*, 10.1109/OCEANSE.2007.4302251.
- You, S. H., Seo, J.-W., Chang, Y.-S., Park, S. W., Youn, Y.-H., 2006. Comparison of Wave Model with KMA Buoy Observation Results in the 2002 -2005 year. *Atmosphere*, **16(4)**, 279–301.
- Xie, J., J. Zhu, and Y. Li, 2008. Assessment and inter-comparison of five high-resolution sea surface temperature products in the shelf and coastal seas around China. *Cont. shelf Res.*, **28**, 1286–1293.

부 록

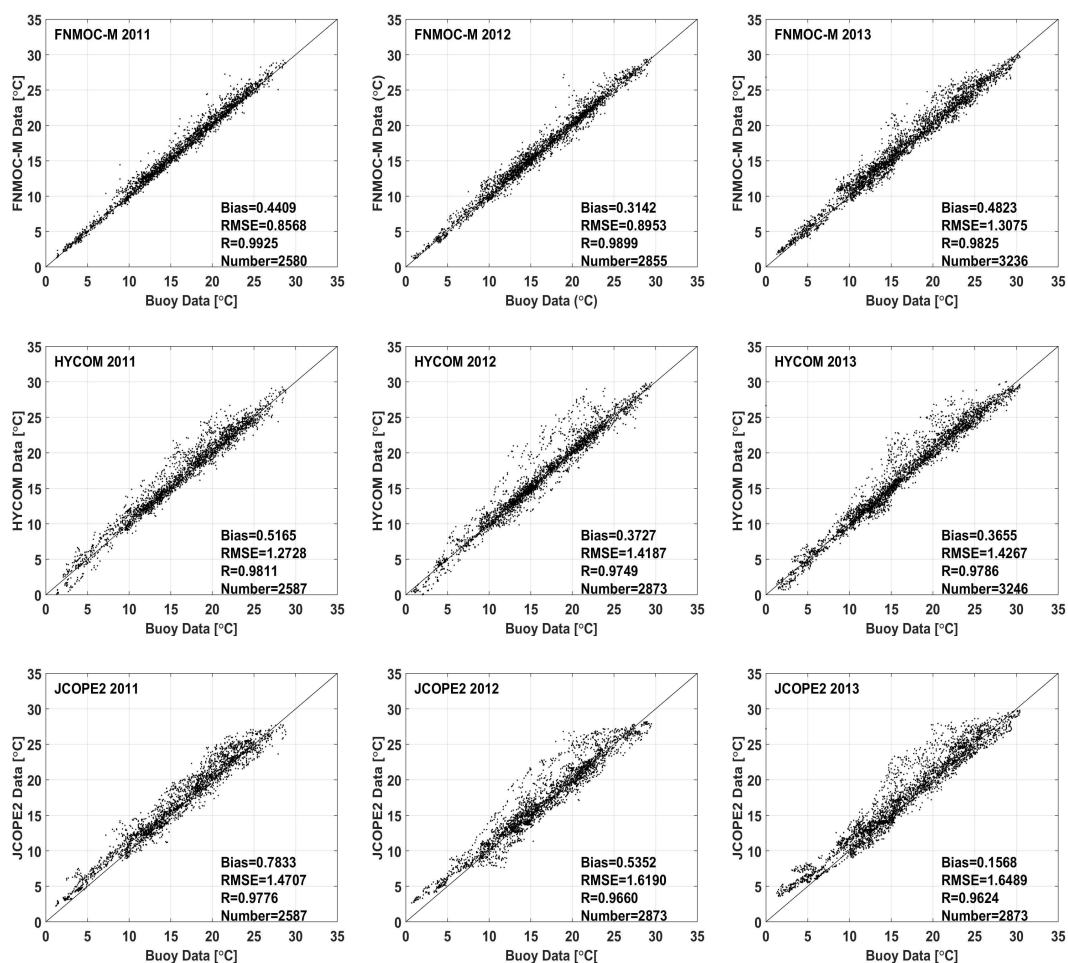


Fig. A. 1. Scatter plots of with *in situ* SST data and satellite-observed SST (FNMOC-S, AVHRR, OSTIA, G1SST) during 2011–2013.

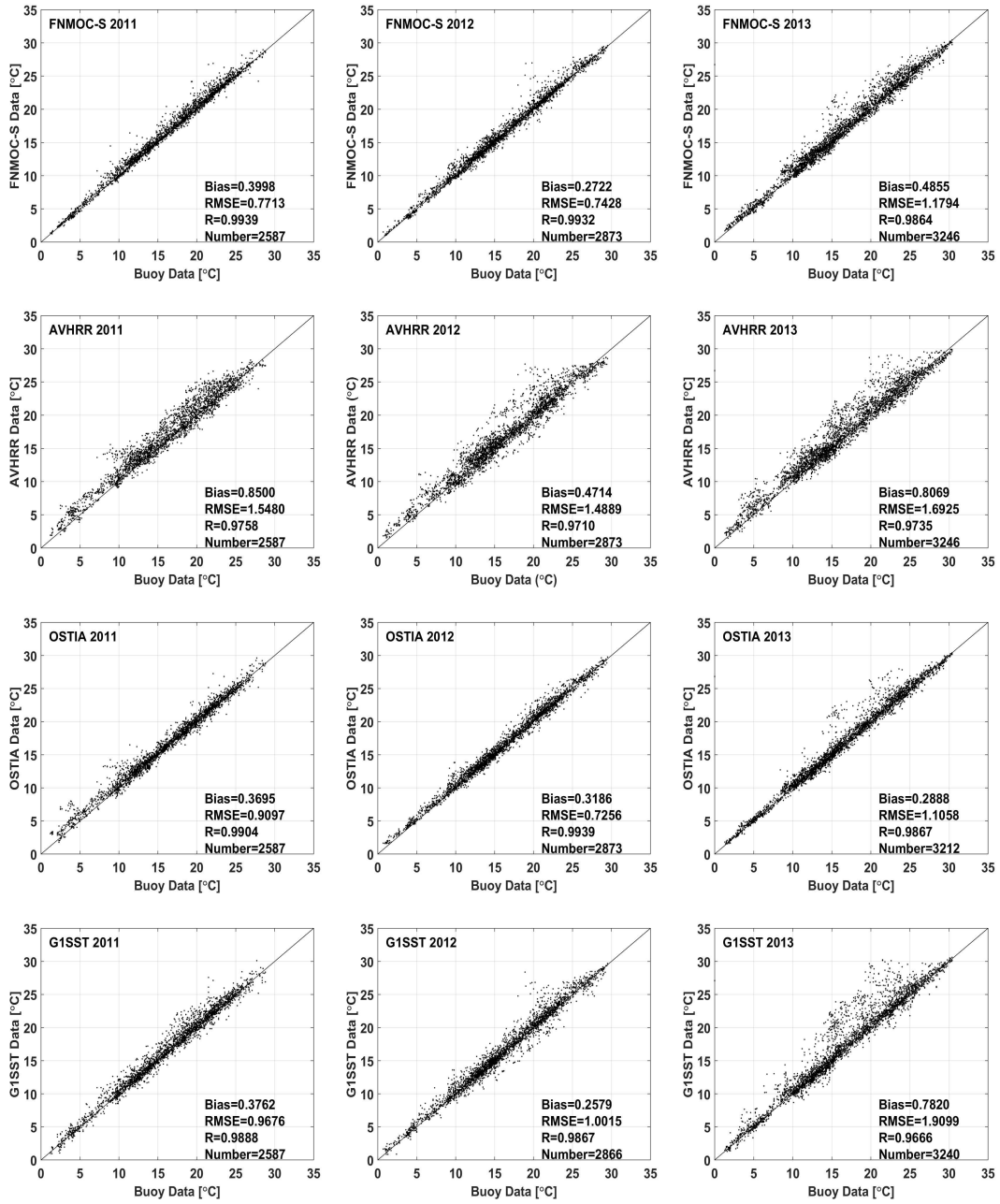


Fig. A. 2. Scatter plots of with *in situ* SST data and Model-calculated SST (FNMOC-S, AVHRR, OSTIA, G1SST) during 2011–2013.

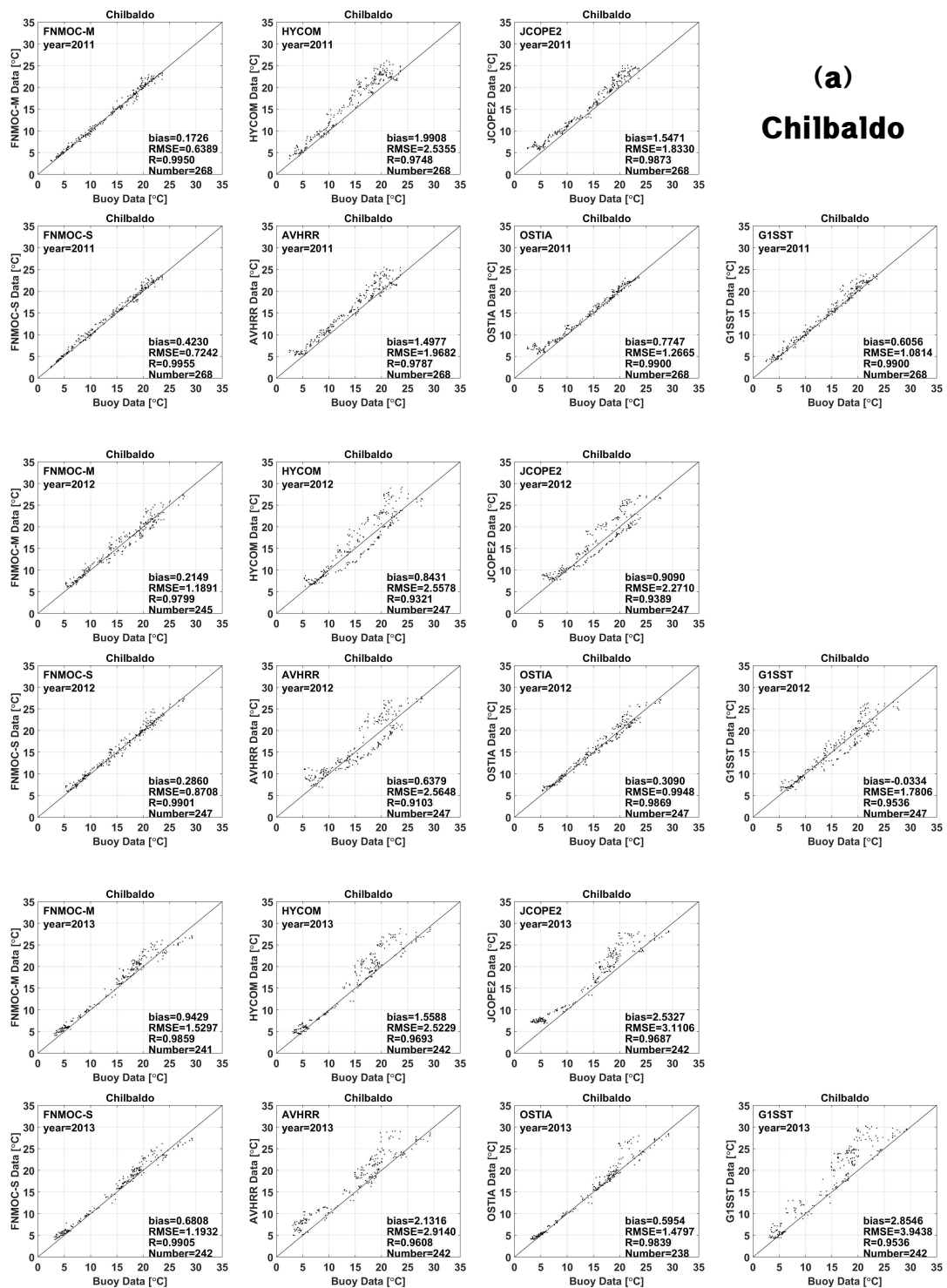


Fig. A. 3. Compare with in situ SST data and satellite-observed/model-calculated SST data at (a) Chilbaldo, (b) Deokjeok-do, (c) Oeyeon-do, (d) Donghae, (e) Ulleung-do, (f) Pohang, (g) Geoje-do, (h) Geomun-do, (i) Mara-do and (j) Ieo-do.

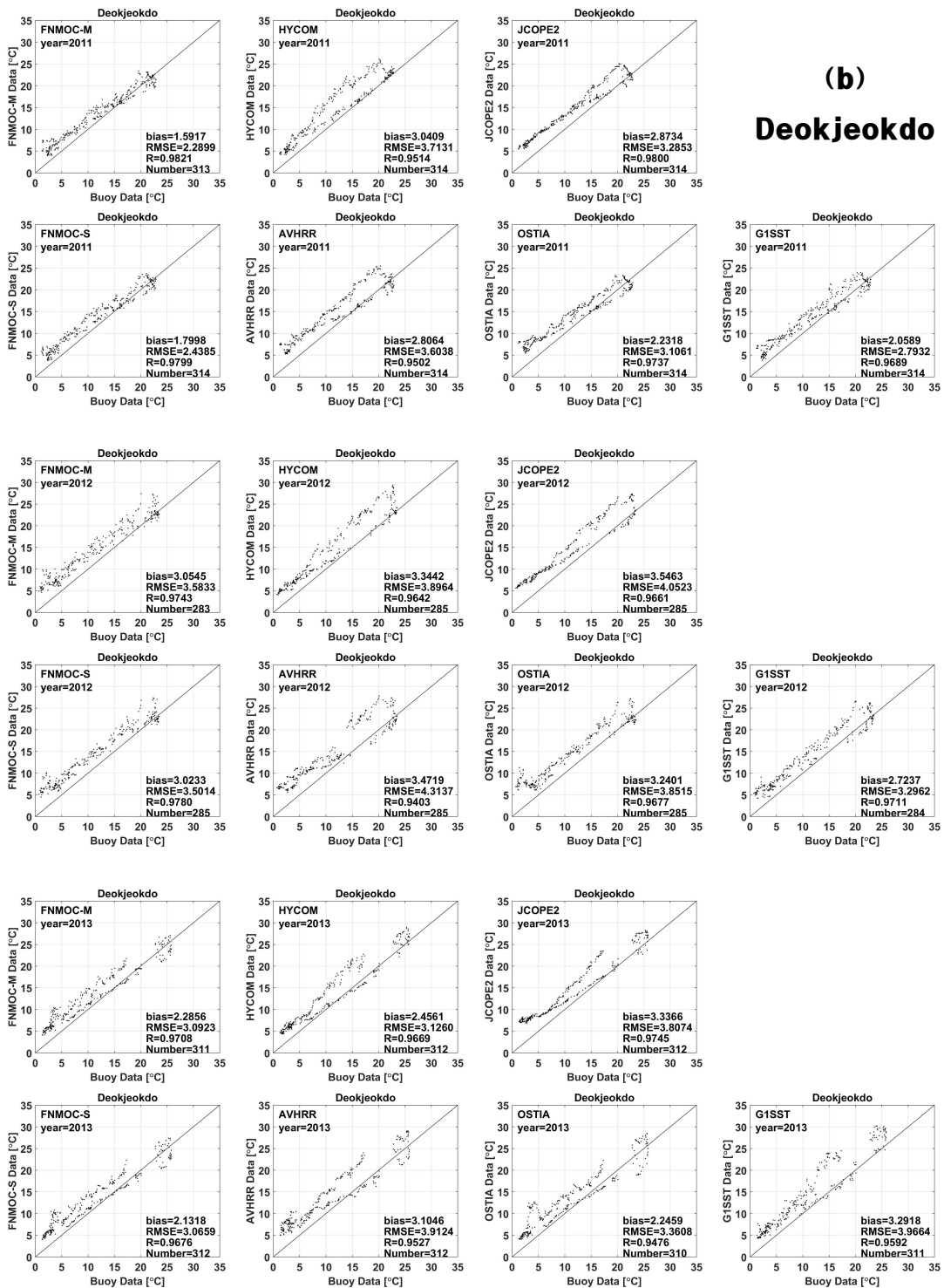


Fig. A. 3. Continued.

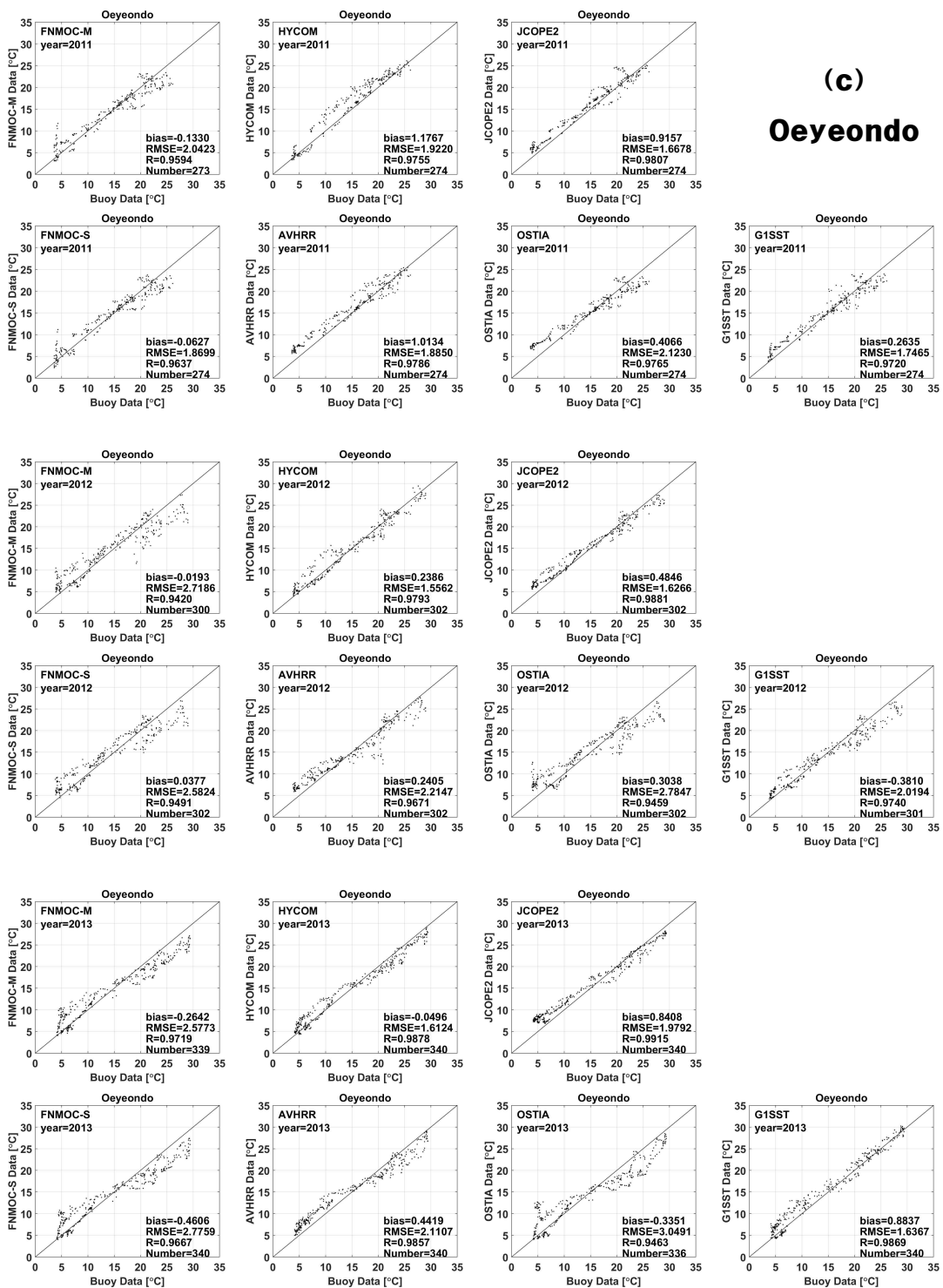


Fig. A. 3. Continued.

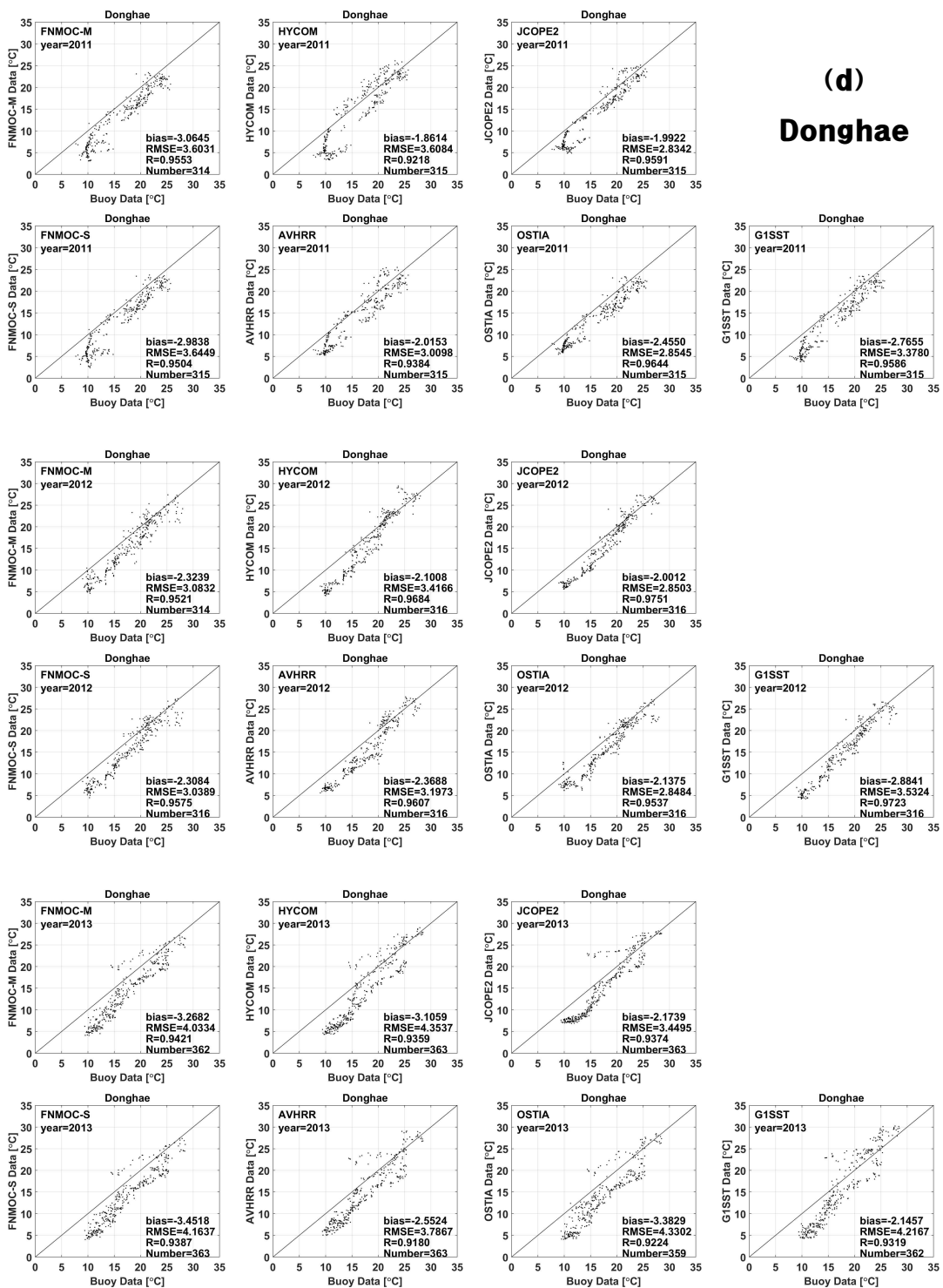


Fig. A. 3. Continued.

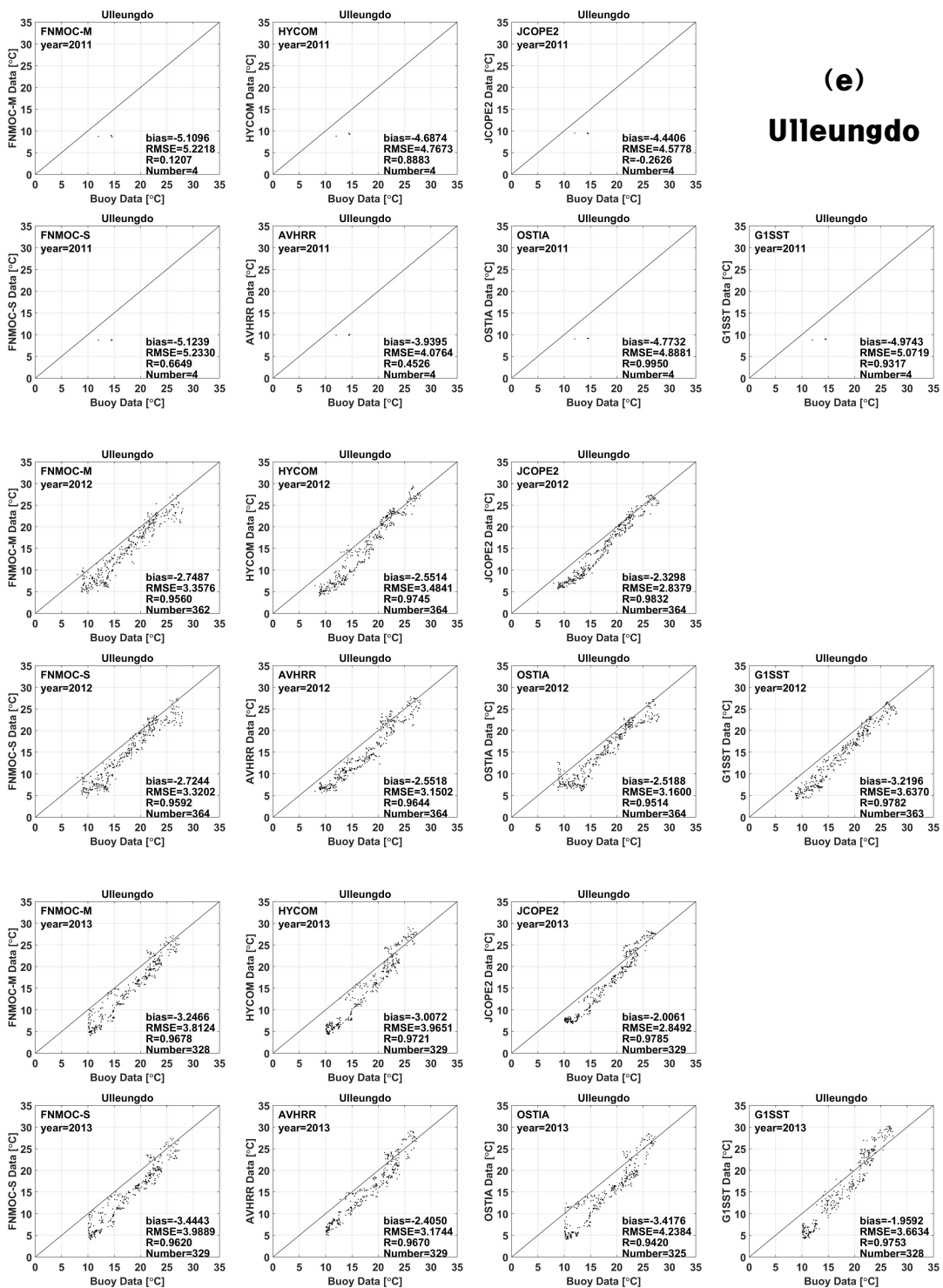


Fig. A. 3. Continued.

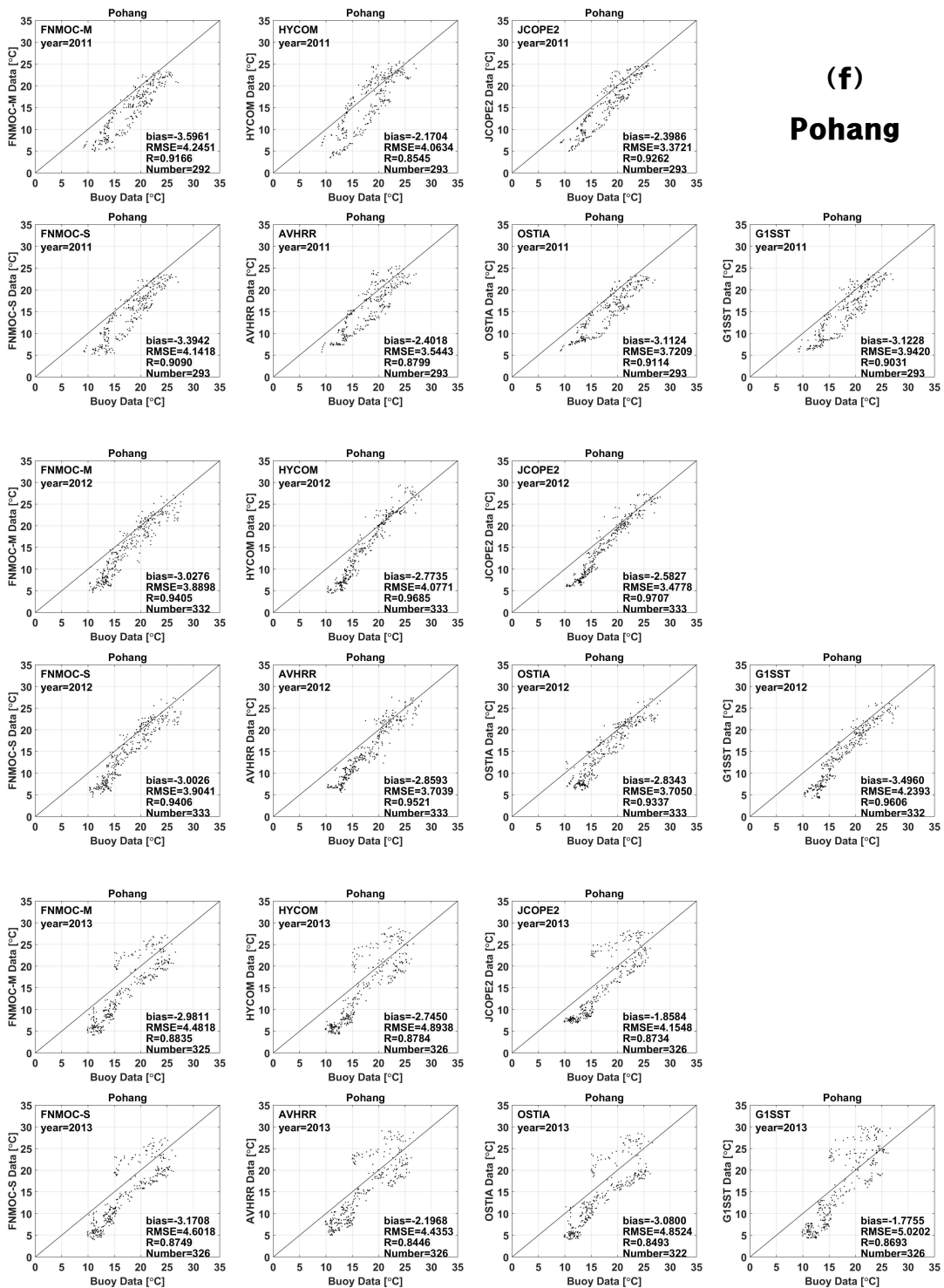


Fig. A. 3. Continued.

(g)
Geojeodo

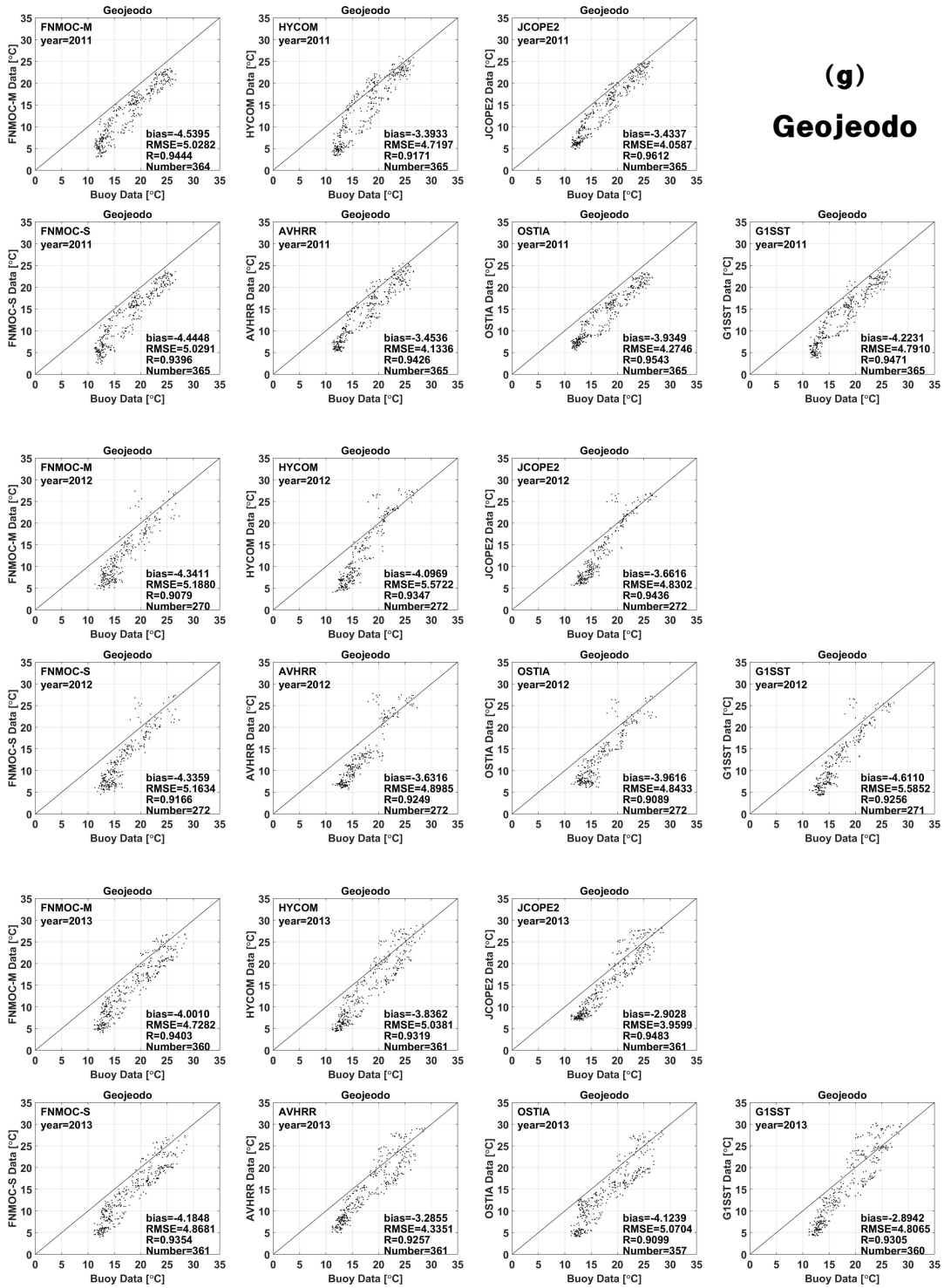


Fig. A. 3. Continued.

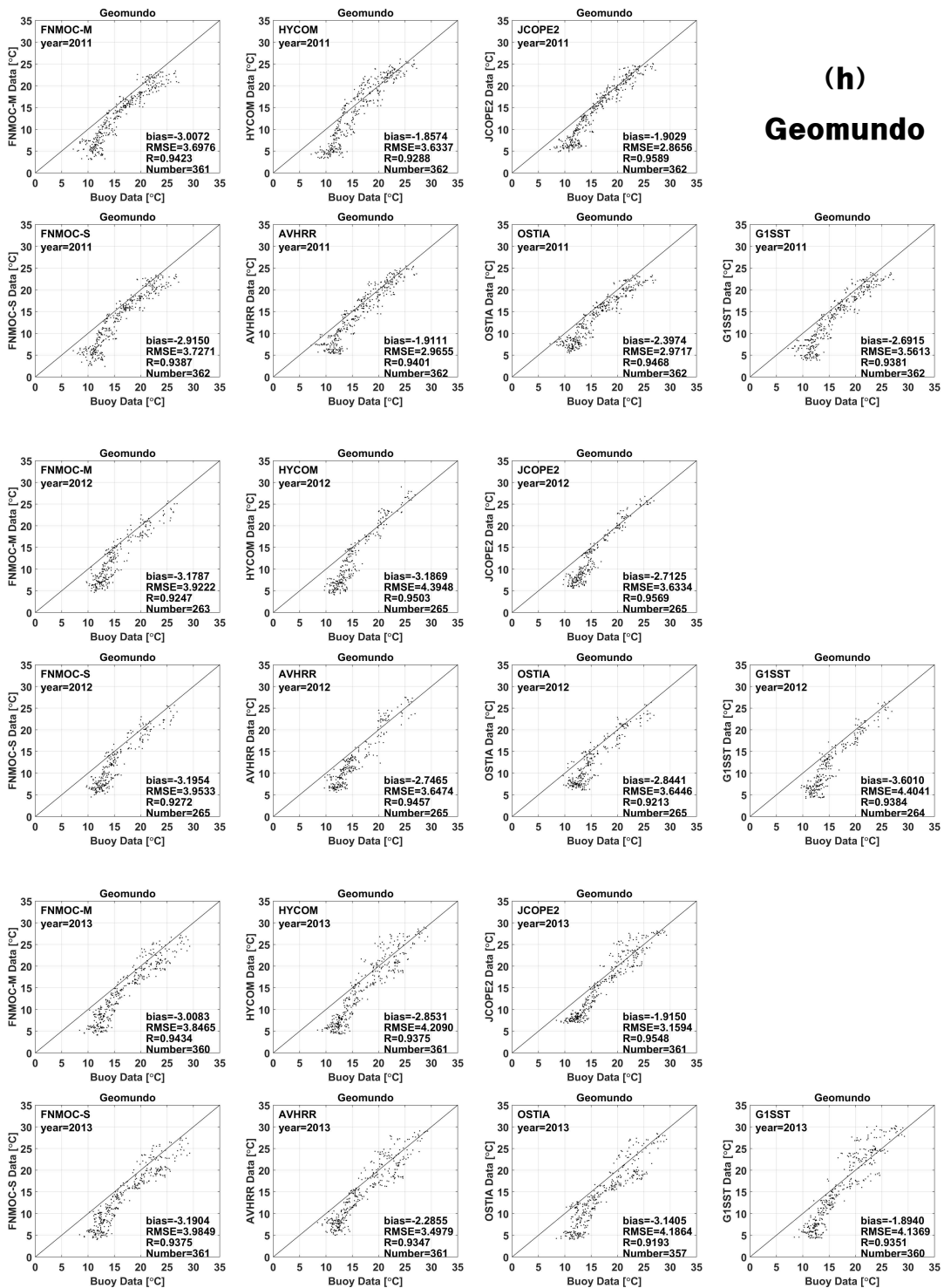


Fig. A. 3. Continued.

(i)
Marado

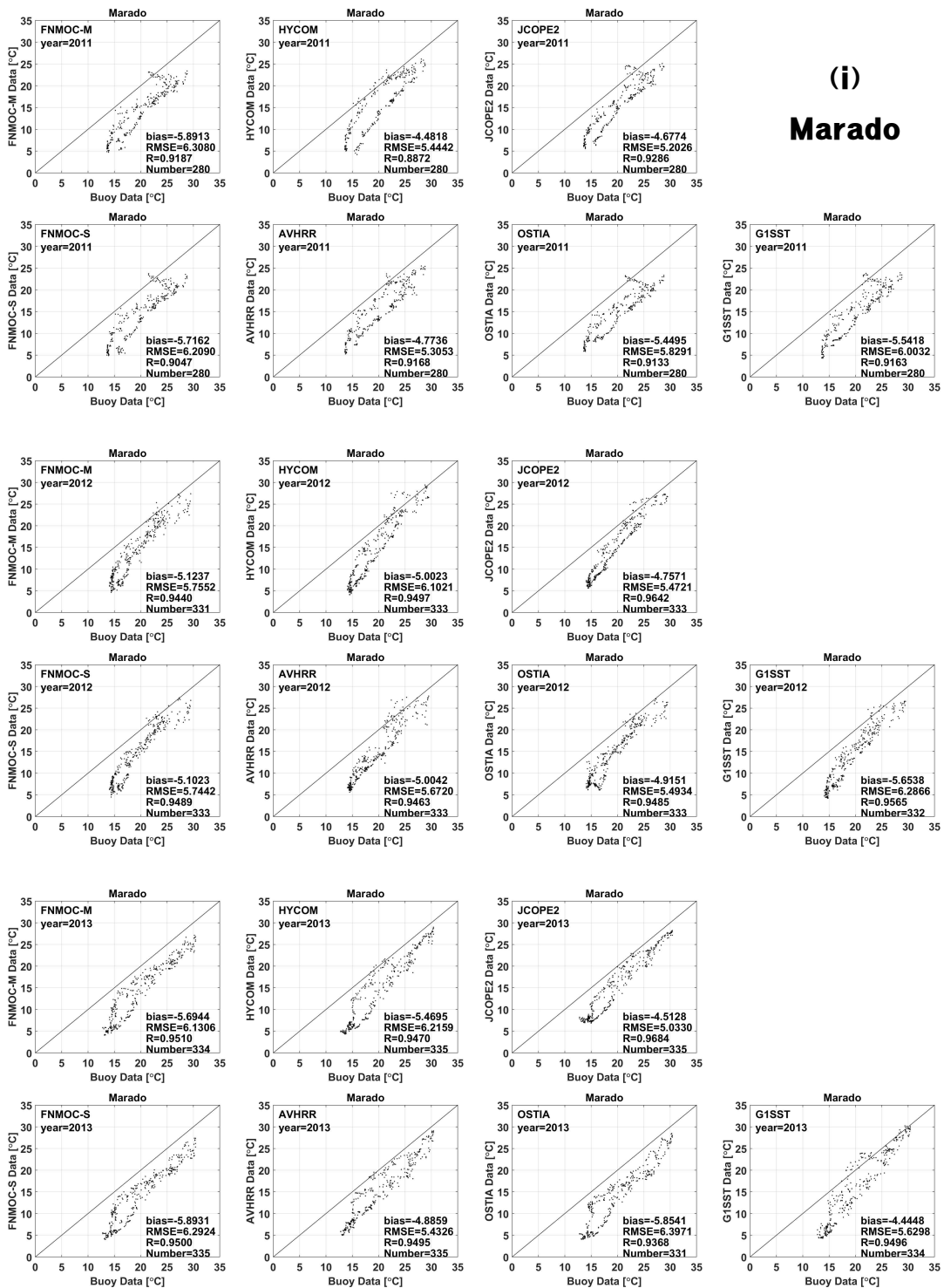


Fig. A. 3. Continued.

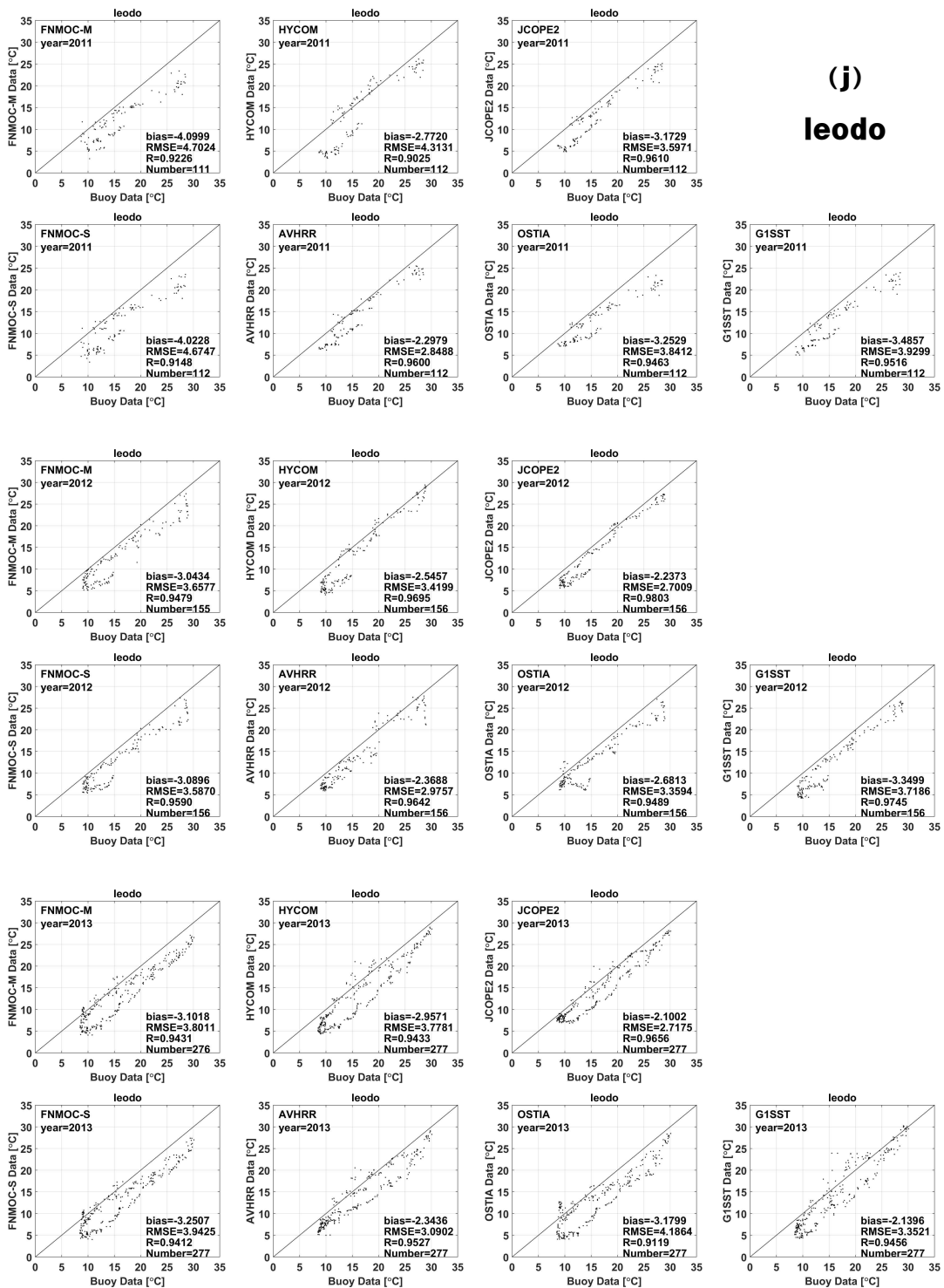


Fig. A. 3. Continued.

감사의 글

두려움과 설렘을 안고 석사과정에 들어온 지 어느덧 2년 반이라는 시간이 지나 논문을 제출하게 되었습니다. 지난 시간 동안 감사한 분들이 많습니다.

먼저, 바쁘신 와중에도 열정을 가지고 꼼꼼하게 지도해주신 강기룡 박사님, 날카로운 코멘트와 따뜻한 조언 해주신 문재홍 교수님, 언제나 좋은 말씀 해주신 방익찬 교수님, 누구보다도 세심하게 지도해주고 인생에 있어서도 많은 도움을 주신 문일주 교수님께 큰 감사드립니다. 교수님의 지도로 연구가 무엇인지 부족한 점이 무엇인지 알게 되었습니다.

제주대로 학위 한다면 큰 도움과 조언을 아끼지 않으셨던, 강릉대 권태영 교수님과 정명재 교수님께도 감사의 말을 드립니다.

타지에서 와서 지금까지 잘 할 수 있었던 건 우리 해양기상학연구실 분들의 많은 도움이 있었기 때문입니다. 문현이 형, 민영이 형, 성훈이 형, 우정이 누나, 철민이 형, 영운이 누나, 명순이 누나, 유선이 누나, 태운이 형, 희주, 승용이, 유정이, 지희, 은별이, 세원이 에게도 감사를 드립니다.

그리고 졸업동기인 인채 형, 항상 지치고 힘들 때 언제나 곁에서 힘이 되어 주었던 혜지한테도 고맙다는 말 전합니다.

저의 인생에서 오래 전부터 힘이 되어준 인환, 대은, 정환, 준민, 찬호 형, LEPUS분들 언제나 하는 일 잘 되길 바라며, 살아가면서 항상 같이 있으면 합니다.

언제나 챙겨주시던 작은 할아버지들, 부모님 이상으로 챙겨주신 할머니, 작은 아버지, 작은 엄마, 막내 삼촌, 막내 숙모, 고모들과 고모부들, 내 동생 석현이, 시현이 에게도 감사의 말을 전합니다.

이러한 많은 분들이 있었기에 제가 어긋나지 않고 바른 인생을 살 수 있었습니다. 항상 감사하고 더욱 열심히 살아가며 부족하지만 최선을 다한 이 논문을 바칩니다.

2015년 12월

백 유 현