

Study Note

온배수 확산 평가를 위한 열적외선 위성관측 비교

정종철

남서울대학교 GIS공학과

The Comparison of Thermal Infrared Satellite Observation for Plume Assessment of Thermal Discharge

Jong-Chul Jeong

Namseoul Univ. Dep. of GIS

요약 : 해수 표층 수온은 원자력발전소의 온배수 영향을 조사하기 위해서 위성원격탐사에 의해 관측되는 가장 중요한 정보들 중 하나이다. 하지만 Landsat 7 위성과 Landsat 8 위성의 열적외선 센서로부터 추출한 표층수온과 실측치를 비교한 연구는 부족하다. Landsat 8 위성은 표층수온을 추출하기 위해 열적외선 센서에 두 개의 분리된 밴드를 가지고 있지만, Landsat 7은 한 개의 밴드를 사용하고 있다. 그럼에도 불구하고 본 연구에서는 Landsat 7 ETM+센서가 Landsat 8 TIRS 보다 표층수온의 보정에 유용하다는 것을 제시하였다. 본 연구에서는 Landsat 114-36 지역의 15개 위성자료를 가지고 ENVI와 IDL을 이용한 표층수온 알고리즘을 처리하였다. 국립해양조사원으로부터 수집한 표층수온 실측자료와 위성에서 추출한 표층수온을 비교하였고, 위성관측 시계열 자료와 측정지점의 실측자료를 통해 정확도를 비교하였다.

주요어 : Landsat-8 열적외선, Landsat-7 ETM+, 표층수온, 온배수

Abstract : To examine the effect of thermal discharge from nuclear power plants, Sea Surface Temperature (SST) is one of the most important variables measured by satellite remote sensing. However, the study was not much comparison of field data and satellite SST from operational Landsat 8 Thermal Infrared Sensor(TIRS) and Landsat 7 ETM+. The Landsat 8 TIRS have 2 split Thermal Infrared channels but ETM+ uses one channel for extracting of SST. In spite of that this research carried out that Landsat 7 ETM+ have more profitable for correction of SST than Landsat 8 TIRS. The used 15 Landsat 7 and 8 Thermal Infrared data of path/row 114-36 were processed by SST algorithm of ENVI and IDL. The in-situ SST data from KHOA(Korea Hydrographic and Oceanographic Administration) compared with satellite SST and the accuracy of extracted SST were assessed by each field sites in-situ point data with time series satellite SST.

Keywords : Landsat-8 Thermal Infrared Sensor(TIRS), Landsat-7 ETM+, Sea Surface Temperature (SST), Thermal Discharge

I. 서론

대규모 산업공단이나 화력, 원자력발전소에서 배출되는 온배수는 연안 해양생태계의 급격한 환경변화를 초래한다. 그러나 온배수의 확산을 시-공간적으로 평가하기 위한 관측 자료의 수집은 용이하지 않다(Casey and Cornillon, 1999; Mossa M., 2006). 위성관측에 의한 표층수온의 관측은 광역적인 범위에서 온배수에 의한 해양환경영향평가를 위한 관측 도구로 사용되어 왔으나, 관측주기와 관측 정확도에 대한 문제가 제기되어 왔다(NASA, 2003; Ahn *et al.*, 2006; Skokovic *et al.*, 2008).

최근 다양한 열적외선 관측센서를 탑재한 위성자료를 획득할 수 있어서 위성관측에 의한 온배수 확산 범위 평가를 위한 표층 수온의 획득이 가능해졌다. 또한 위성관측에 의한 온배수의 확산 평가는 연안생물자원과 해양생태계의 피해 가능성을 평가하고, 예측하는데 적용되고 있다(Gibbons, 1989; Irons, 2012). 따라서 국가기관과 지자체 등은 온배수 확산의 모니터링을 위해 연안 수온 위성관측기술의 개발과 적용에 많은 관심을 갖고 있다.

그러나 위성관측에 의한 온배수의 확산 범위를 관측하는데 있어서 위성자료의 지속적인 활용이 가능하여야 하지만, Landsat 열적외선 센서의 경우 발사된 위성의 종류에 따라 열적외선 센서의 공간해상력과 분광해상력에 차이가 있다(McMillin, 1975; Barsiet *al.*, 2003; Thomas *et al.*, 2002; Yu *et al.*, 2008). 여러 개의 센서에서 획득된 표층수온 자료를 동일한 관측 자료로 비교 평가하기 위해서 이러한 열적외선 센서의 관측치가 나타내는 특성을 조사 분석하여 문제점을 평가하는 것은 매우 의미 있는 연구가 될 것으로 판단된다.

Landsat 위성은 온배수 확산을 관측하기에 적합한 공간해상력을 가지고 있고, 열적외선 센서의 표층수온 추출을 통해 연안 해수면 온도에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다(Gibbons, 1989; Irons, 2012; Skokovic *et al.*, 2008). 그러나 우리나라 연안에서 Landsat 위성으로부터 추출된 해수 온도와 실측치를 비교한 검증 연구는 육상에서의 지표온도

관측 비교 연구에 비해 매우 부족한 실정이다. 또한 Landsat 위성 열적외선 센서의 연안 관측기술의 적용은 단일 센서의 적용을 제시한 연구가 대부분이며, 최근 발사된 Landsat 8 열적외선 위성영상을 통한 연안 해수 온도의 변화를 장기적으로 모니터링하는 연구는 부족한 실정이다. 특히 국내 온배수 확산을 평가하기 위해 현장관측을 통해서 획득할 수 있는 해수 온도 자료와 Landsat 7호와 8호를 동시에 비교 검증하는 연구는 제시되지 않고 있다.

본 연구에서는 Landsat 7(ETM+; Enhanced Thematic Mapper)와 Landsat 8(TIRS; Thermal Infrared Sensor)의 열적외선 채널을 비교하고, 동일 시간 현장관측 자료와 비교하여 위성관측으로부터 얻어진 표층수온 자료의 정확도를 비교하는데 연구의 목적이 있다. 특히 ETM+와 TIRS 열적외선 센서를 통해 얻어지는 표층 수온 위성영상과 현장조사를 통해 획득된 수온의 시계열적인 비교를 통해 ETM+와 TIRS 열적외선 센서의 추출온도 차이를 분석하여 표층수온 추출의 정확성을 비교하였다.

II. 연구방법

1. 연구대상지역과 현장관측 자료

본 연구에서는 Landsat 위성 7호와 8호의 path/row 114/36 위성자료를 모두 검색하여 고리원자력발전소가 위치한 Fig. 1의 해역으로부터 현장 관측 자료와 위성자료를 비교하였다. 현장관측 자료는 국립해양조사원에서 제공하는 측정망 수온자료를 이용하였다. 현장관측 수온자료는 관측 부이와 관측소에

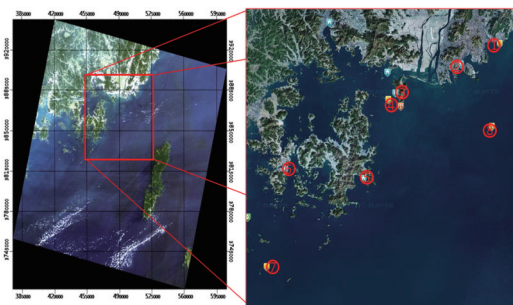


Fig. 1. Study area(path/row; 114-36) and observation sites of in-situ surface temperature

서 직접 측정된 수온 자료이며, 위성관측 시간과 동일한 시간의 실측치 수온 자료를 추출하였고, 이를 알고리즘 검증과 센서 정확도 비교에 사용하였다.

현장관측 자료를 수집한 연구대상지역은 실시간 해양관측부이와 조위관측소이며, 남해 바다 일대로 부산 해운대(해운대 해양관측부이), 부산광역시 중구 남포동(부산 조위관측소), 부산광역시 강서구 찬성동(가덕도 조위관측소), 거가대교(거가대교 해양관측부이), 경상남도 거제시 일운면 구조라리(거제도 조위관측소), 경상남도 통영시 도남동(통영 조위관측소), 경남 거제 국도 육지도 부근(통영남부)의 부이와 조위관측소 자료를 조사하였다(Fig. 1).

2. 위성자료

위성자료는 Landsat path/row(114/36) 지역이며, 수집된 위성영상 중 구름이 10% 미만인 영상을 자료 처리하고, 8개 현장조사 관측지점과 영상을 비교하여 위성자료를 추출 분석하였다. 처리된 위성영상은 구름 영향이 없는 ETM+ 6개의 영상, TIRS 9개의 영상 총 15개의 위성영상을 분석하였다(Table 1).

Landsat 8 TIRS는 기존의 센서보다 분광해상력이 발전된 센서로 TM, ETM+ 센서보다 열적외선 파

장대에서 세분화된 2개의 수온관측 채널을 갖고 있다는 특징이 있다.

3. 영상 처리

Landsat 7 ETM+는 열적외선 밴드가 band 6이며, $10.31\mu\text{m} \sim 12.36\mu\text{m}$ 의 파장대로 60m의 공간해상력을 갖고 있다. 또한, Landsat 8호 TIRS는 band 10($10.60\mu\text{m} \sim 11.19\mu\text{m}$), band 11($11.50\mu\text{m} \sim 12.51\mu\text{m}$)의 파장대로 100m의 공간해상력을 갖고 있다. 영상의 대기보정은 Dark pixel 추출기법에 의한 해수 표층 반사도를 정량화하여 연구지역의 영상을 처리하였고, 실측값은 WGS-84 기하보정 좌표에서 관측지점의 표층수온과 위성 픽셀의 추출값을 비교하였다.

본 연구에서 적용한 열적외선 표층수온추출은 미국항공우주국(NASA, 2003)에서 제시한 온도추출 계산법을 적용하였고, ENVI 영상처리 IDL의 모듈에서 대기보정 온도 변환식을 적용하였다(ITT, 2009). 영상자료의 복사휘도 값은 식(1)을 활용하였다(Deschamps and Phulpin, 1980; NASA, 2003).

$$L_{\lambda} = \left(\frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} \right) * (Q_{cal} - Q_{calmin}) + LMIN_{\lambda} \quad (1)$$

L_{λ} : 분광복사휘도

Q_{cal} : DN단위로 정량화된 복사에너지

Q_{calmax} : DN단위로 정량화된 최소복사에너지

(2004.04.04이전 0, 이후 1)

Q_{calmin} : DN단위로 정량화된 최대복사에너지

$LMIN_{\lambda}$: Q_{calmin} 에서 분광복사 에너지

$LMAX_{\lambda}$: Q_{calmax} 에서 분광복사 에너지

복사휘도를 이용한 온도 추출 계산은 식(2)를 활용하였으며, 여기서 사용된 Landsat 7과 8호의 보정상수를 사용하였다. 전술된 수식을 바탕으로 추출된 열적외 온도에 대한 절대온도(K)는 식(3)을 이용하여 섭씨온도(°C)로 환산하였다(Thomas, 2002).

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{\lambda}} + 1\right)} \quad (2)$$

$$T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273.15 \quad (3)$$

Table 1. Satellite observation time and cloud coverage list of Landsat data used in this study

No	Date	Satellites	Sensor	Time	Cloud
1	2013.05.13	Landsat 8	OLI & TIRS	Am 11:01	3%
2	2013.05.21	Landsat 7	ETM+	Am 10:55	0%
3	2013.08.17	Landsat 8	OLI & TIRS	Am 11:01	10%
4	2013.09.02	Landsat 8	OLI & TIRS	Am 11:01	21%
5	2013.09.18	Landsat 8	OLI & TIRS	Am 11:01	1%
6	2013.10.04	Landsat 8	OLI & TIRS	Am 11:01	3%
7	2013.10.12	Landsat 7	ETM+	Am 10:55	0%
8	2013.11.21	Landsat 8	OLI & TIRS	Am 11:01	1%
9	2013.12.07	Landsat 8	OLI & TIRS	Am 11:01	3%
10	2013.12.23	Landsat 8	OLI & TIRS	Am 11:00	18%
11	2013.12.31	Landsat 7	ETM+	Am 10:55	19%
12	2014.01.16	Landsat 7	ETM+	Am 10:56	0%
13	2014.03.05	Landsat 7	ETM+	Am 10:56	1%
14	2014.04.06	Landsat 7	ETM+	Am 10:56	10%
15	2014.04.14	Landsat 8	OLI & TIRS	Am 10:59	0%

IV. 연구결과 및 고찰

Fig. 2부터 Fig. 8은 해수면의 위성영상 추출 수온을 위성관측 시간과 동일한 10시 50분에서 11시에 현장조사의 표층 온도 자료와 비교하였다. 그림은 Landsat 7 ETM+ 해수면 온도 추출값을 위성관측 날짜별로 제시한 것이며, 해당 해양관측 부이의 온도 시간별 관측값을 위성 통과시간과 일치하는 값으로

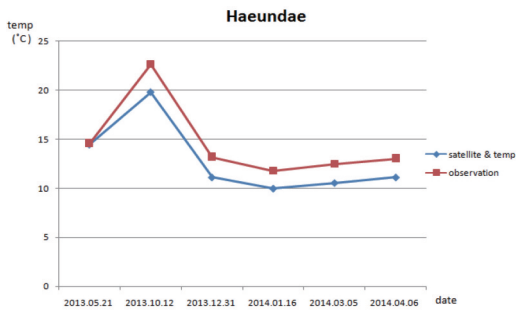


Fig. 2. Comparison of temperatures calculated using Landsat 7 data and measured on sea surface in Haeundae

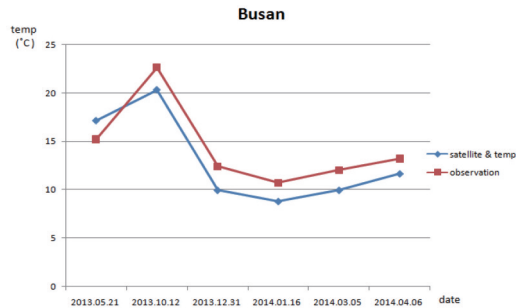


Fig. 3. Comparison of temperatures calculated using Landsat 7 data and measured on sea surface in Busan

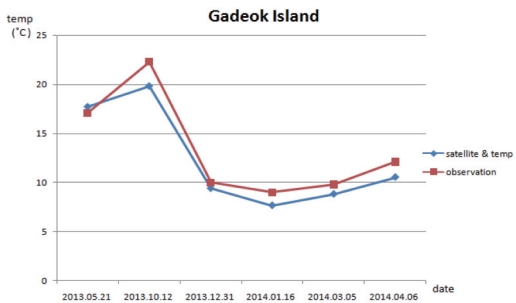


Fig. 4. Comparison of temperatures calculated using Landsat 7 data and measured on sea surface in Gadeokdo Island

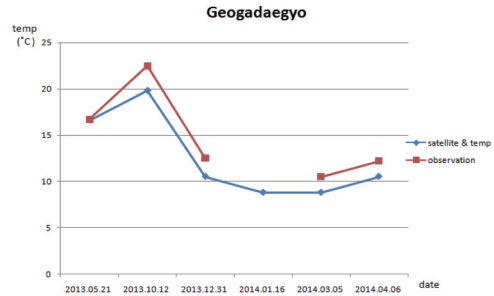


Fig. 5. Comparison of temperatures calculated using Landsat 7 data and measured on sea surface in Geogadae-gyo

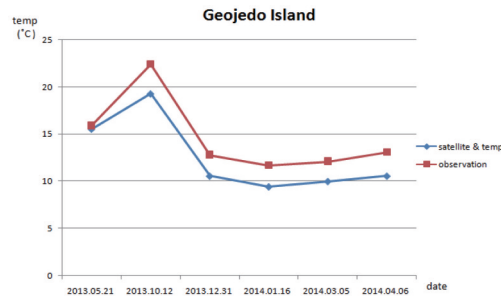


Fig. 6. Comparison of temperatures calculated using Landsat 7 data and measured on sea surface in Geojedo Island

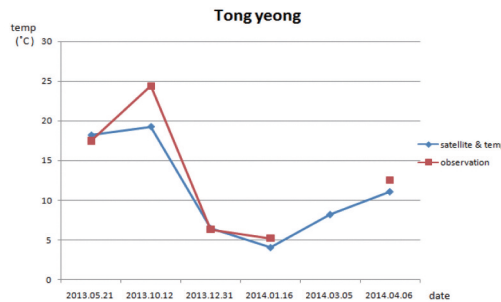


Fig. 7. Comparison of temperatures calculated using Landsat 7 data and measured on sea surface in Tongyeong

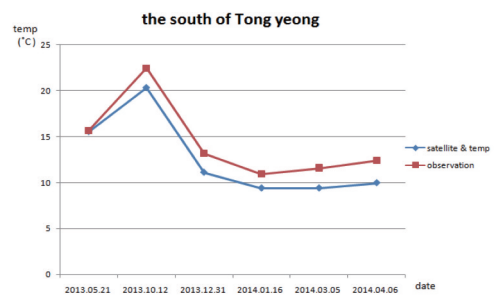


Fig. 8. Comparison of temperatures calculated using Landsat 7 data and measured on sea surface in the south Tongyeong

추출한 후 위성관측 날짜별로 비교하였고, 실측치가 없는 날은 위성에서 추출된 온도만을 비교하였다.

Skokovic *et al.*(2008)은 Landsat 8위성영상을 이용하여 지표면의 온도 추출과 검-보정과정을 제시하여 위성관측의 정확도를 평가하였으나, 표층수온은 지표면 온도 추출보다 실측 수온자료의 획득이 어려워 관측 정밀도를 평가하기 어렵다. 또한 ETM+는 공간해상력이 TIRS보다 우수하지만, 단일밴드로 온도를 추출하는 알고리즘을 적용하고 있어서, 서로 다른 분광센서를 이용한 온배수 관측을 위해서는 본 연구에서 Fig. 9와 Fig. 18에서 제시한 바와 같이 현장 측정 자료와 위성센서에서 추출된 표층수온의 세부적인 비교가 반드시 필요하다.

ETM+센서에서 관측된 측정값은 해당 지역의 실

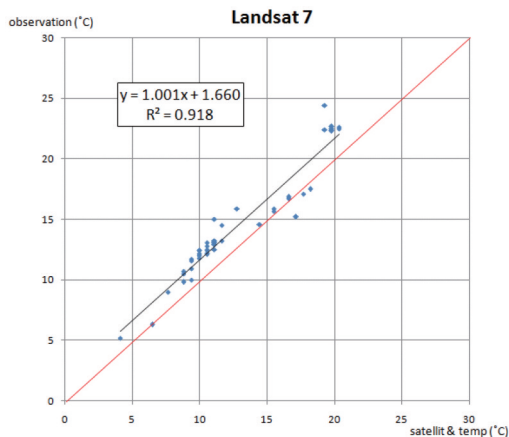


Fig. 9. Correlation between ETM+ sensor temperature and in-situ observation surface temperature

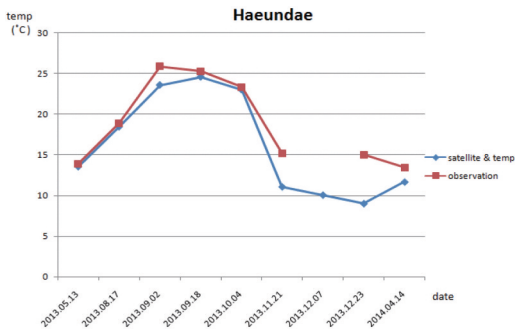


Fig. 10. Comparison of temperatures calculated using Landsat 8 data and measured on sea surface in Haeundae

측 표층수온 보다 해운대(평균 -1.83°C), 부산(평균 -1.37°C), 가덕도(평균 -1.07°C), 거가대교(평균 -1.62°C), 거제도(평균 -2.13°C), 통영(평균 -1.35°C), 통영 남부(평균 -1.76°C)로 낮은 관측 값을 나타내었다.

Fig. 9는 8개의 현장관측 자료와 ETM+의 온도 상관관계를 보여주는 것으로 X축은 ETM+센서를 통해 얻어진 Landsat 7 온도 값이며, Y축은 실측 표층수온으로 ETM+센서를 통해 추출한 표층수온 데이터 값이 실측 표층수온 데이터 보다 평균 $1^{\circ}\text{C}-2^{\circ}\text{C}$ 낮게 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 온도 차이는 에어로졸, 대기조건, 기상상태 등 다양한 원인에 의한 결과로 보고되고 있으며(Deschamps and Phulpin, 1980; Yu *et al.*, 2008), 본 연구에서는 구름과 대기 조건이 온도 추출에 영향이 없는 영상을 선정하였다.

위성과 실측온도의 차이를 줄이고 온배수의 확산을 관측하는 방법은 Fig. 2부터 Fig. 8과 같이 각 시기별 영상의 온도를 실측치와 비교한 결과를 바탕으로 실측 표층수온과 온도 추출식에서 $y=1.001x+1.66$ 의 보정상수를 적용하면 ETM+ 위성관측 표층수온의 정확도를 향상할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 10부터 Fig. 16은 TIRS의 추출 온도 데이터와 실측치를 비교한 것이다. ETM+의 해당 오차는 Fig. 9와 같이 실측 표층수온 데이터와 일정한 경향을 나타내는 것에 비해 TIRS 센서에서 추출된 값은 Fig. 19과 같이 실측치와 다른 경향을 나타낸다. 특히 조사 지점에 따라 오차의 범위가 해운대(평균 -1.99°C), 부산(평균 $+1.09^{\circ}\text{C}$), 가덕도(평균 -1.70°C), 거가대

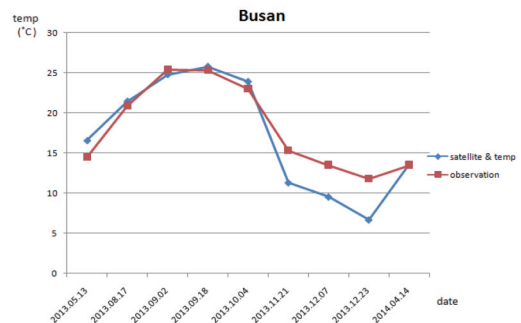


Fig. 11. Comparison of temperatures calculated using Landsat 8 data and measured on sea surface in Busan

교(평균 -2.20°C), 거제도(평균 -1.99°C), 통영(평균 -2.22°C), 통영남부(평균 -1.90°C), KOGA(평균 -3.01°C)로 관측 지점에 따라 차이를 나타내었다.

Fig. 18은 TIRS의 온도 상관관계를 설명해주고 있는 그래프이며, Fig. 9의 ETM+ 결과와 차이를 나타내고 있다. TIRS의 겨울 관측치는 여름 관측결과

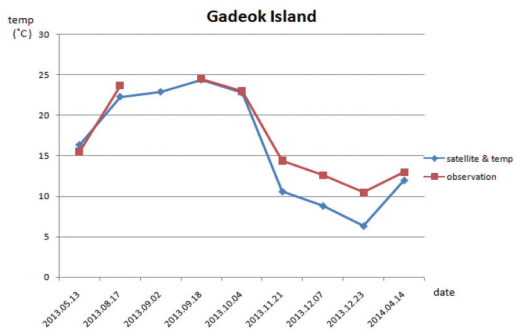


Fig. 12. Comparison of temperatures calculated using Landsat 8 data and measured on sea surface in Gadeokdo Island

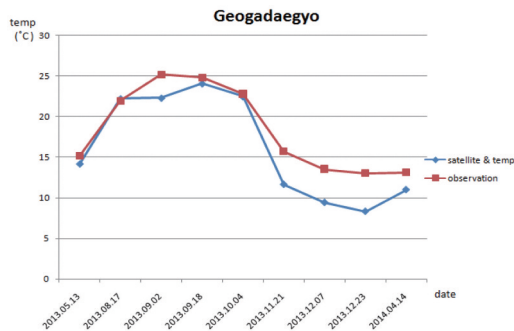


Fig. 13. Comparison of temperatures calculated using Landsat 8 data and measured on sea surface in Geogadaeogyo

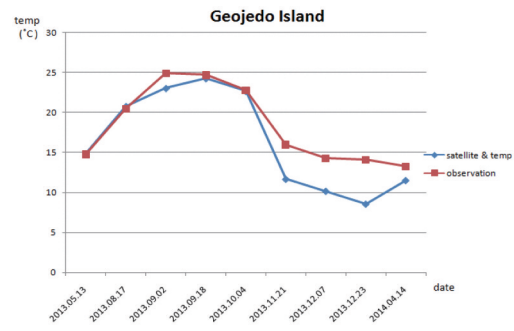


Fig. 14. Comparison of temperatures calculated using Landsat 8 data and measured on sea surface in Geojedo Island

표층수온에 비해 오차 값의 범위가 2°C ~ 5°C 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 우리나라 연안의 겨울은 해풍, 파도 등의 영향으로 표층수온의 추출 경향이 ETM+ 보다 상대적으로 TIRS에서 민감하게 나타나

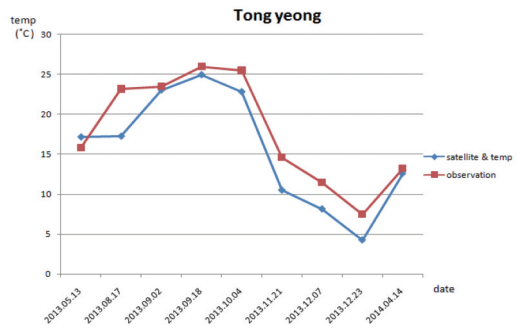


Fig. 15. Comparison of temperatures calculated using Landsat 8 data and measured on sea surface in Tongyeong

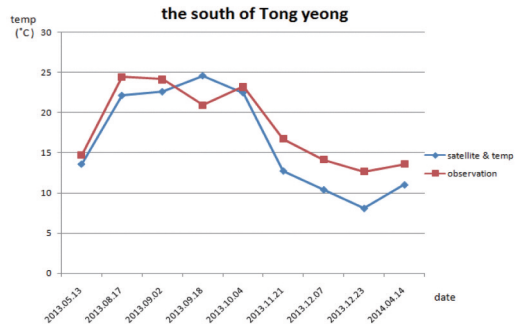


Fig. 16. Comparison of temperatures calculated using Landsat 8 data and measured on sea surface in the south Tongyeong

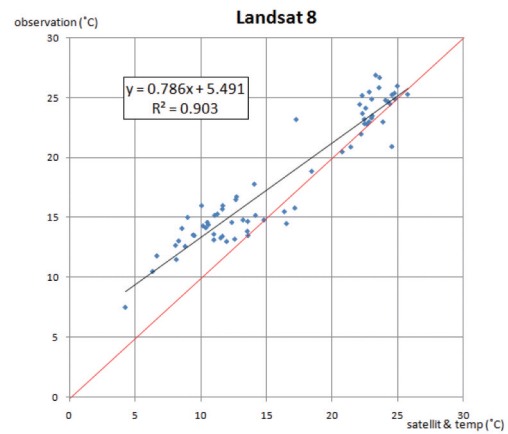


Fig. 17. Correlation between TIRS sensor temperature and in-situ observation surface temperature

는 것으로 판단된다.

Fig. 18는 두 개의 위성에서 관측된 결과와 실측치를 비교한 것으로 ETM+ 보다 상대적으로 TIRS에서 실측값에 대한 오차가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. TIRS는 두 개 채널의 열적외선을 가지고 있어서 온도 추출에서 보다 높은 정확도를 나타낼 것으로 예상하였으나, ETM+가 여름과 겨울 표층수온 분포를 파악하는데 적절함을 알 수 있었다. 원자력발전소 온배수의 확산은 배출되는 온배수의 온도가 주변 연안 해수 온도와의 차이에 의해 확산의 범위가 달라지고, 계절적인 연안 조석 주기에 의한 영향으로 확산되는 범위에 차이가 나타난다. 특히 여름과 겨울의 경우 해수온도와 발전소 온배수의 온도 차이에 대한 영향이 다르므로 위성관측에서 추출된 표층 수온의 오차 범위가 발전소 온배수 확산범위를 평가하는데 중요한 공간범위 오차의 요소로 제시될 수 있다.

본 연구를 통해 다음과 같은 향후 연구개선 방안을 도출할 수 있었다. ETM+와 TIRS에 의한 온배수 확산 범위를 관측하는 연구는 추출된 위성관측 온도의 오차 범위를 최소화하는 보정식의 개선이 필요하다. 연안에서 위성관측에 의한 겨울철 온도 차이의 원인을 Yokoyama and Konda(1996)는 연안 해양표층의 유동성 등에 대한 오차로 제시한 바와 같이 영상 취득시기 해양기상자료의 활용과 조석 주기를 반영

하는 알고리즘의 개선을 통해 위성 관측오차를 최소화하는 방안이 요구된다.

사 사

본 연구는 2015년 남서울대학교 연구년 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Ahn YH, Shanmugam P, Lee JH, Kang YQ. 2006. Application of satellite infrared data for mapping of thermal plume contamination in coastal ecosystem of Korea, *Marine environmental research*, 61, 186-201.
- Barsi JA, Schott JR, Palluconi FD, Heider D L, Hook SJ, Markham BL. 2003. LANDSAT TM and ETM+ thermal band calibration, *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29(2), 141-153.
- Casey KS, Cornillon P. 1999. A comparison of satellite and in situ based sea surface temperature climatologies. *Journal of Climate*, 12, 1848-1863.
- Deschamps P, Phulpin T. 1980. Atmospheric Correction of Infrared Measurements of Sea Surface Temperature Using Channels at 3.7, 11 and 12 Mm. *Bound. Layer Meteorol.* 18, 131-143.
- Gibbons D, Wukelic G, Leighton J, Doyle M. 1989. Application of Landsat Thematic Mapper data for coastal thermal plume analysis at Diablo Canyon. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 55, 903-909.
- Irons JR, Dwyer JL, Barsi JA. 2012. The Next Landsat Satellite: The Landsat Data Continuity Mission. *Remote Sens. Environ.* 122, 11-21.

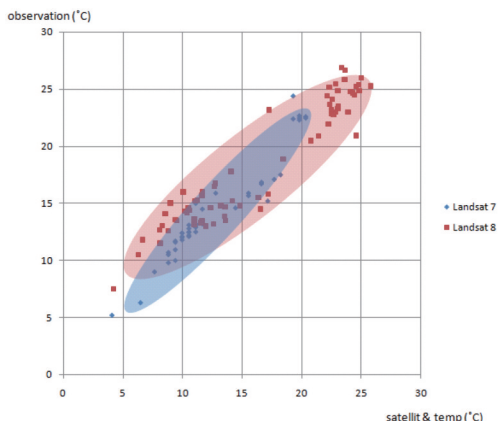


Fig. 18. The error distribution of in-site sea surface temperature and thermal infra-red sea surface temperature with Landsat 7 and Landsat 8

- ITT Visual Information Solutions. 2009. ENVI Environment for Visualizing Images, Version 4.7, Boulder, USA.
- Mossa M. 2006. Field measurements and monitoring of wastewater discharge in sea water. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 68, 509-514.
- McMillin LM. 1975. Estimation of Sea Surface Temperatures from Two Infrared Window Measurements with Different Absorption. *J. Geophys. Res.*, 80, 5113-5117.
- NASA, Landsat Project Science Office. 2003. Landsat 7 Science Data Users Handbook. NASA(http://www.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_toc.html).
- Skokovic D, Sobrino JA, Jimenez-Munoz JC, Soria G, Julien Y, Mattar C and Jordi Cristobal, 2014, Calibration and Validation of Land Surface Temperature for Landsat 8 TIRS Sensor, Land product Validation and Evolution, ESA/ESRIN Frascati (Italy), 28-30.
- Thomas A, Byrne D, Weatherbee R. 2002. Coastal sea surface temperature variability from Landsat infrared data. *Remote Sensing of Environment*, 81, 262-272.
- Yu Y, Privette JL, Pinheiro AC. 2008. Evaluation of Split-Window Land Surface Temperature Algorithms for Generating Climate Data Records. *Geosci. IEEE Trans Remote Sens.*, 46, 179-192.
- Yokoyama R, Konda M. 1996. Sea surface effects on the sea surface temperature estimation by remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 17, 1293-1302.