

위성영상을 이용한 고리원자력발전소 온배수 확산의 계절변동*

안지숙¹ · 김상우^{2*} · 박명희¹ · 황재동¹ · 임진욱²

Seasonal Variation of Thermal Effluents Dispersion from Kori Nuclear Power Plant Derived from Satellite Data*

Ji-Suk AHN¹ · Sang-Woo KIM^{2*} · Myung-Hee PARK¹
Jae-Dong HWANG¹ · Jin-Wook LIM²

요 약

지난 10년(2000-2010)간 촬영된 Landsat-7 ETM+ 영상을 이용하여 동해남부에 위치한 고리원자력발전소 주변해역의 해표면 온도와 온배수의 계절 변동을 조사하였다. 그리고 조류와 조석 자료를 분석하여 온배수의 확산범위를 살펴보았다. 먼저 Landsat-7 ETM+ DN값과 NOAA AVHRR 해표면 수온을 이용한 1차 선형회귀분석을 통해 산출된 해표면 수온을 관측 수온과 비교·검증하였다. 그 결과 결정계수는 약 0.97 이상으로 높게 나타났으며, 평균제곱근 오차는 약 1.05~1.24℃로 나타났다. 선형회귀분석식을 통해 산출된 Landsat-7 영상의 해표면 수온은 겨울철 12~13℃, 봄철에는 13~19℃, 여름과 가을철에는 24~29℃, 16~24℃의 분포를 나타내었다. 방류 초기 온배수와 주변 해역과의 해표면 온도 차는 여름철을 제외하고는 6~8℃의 차이를 보였으며, 여름철 8월에는 최대 2℃정도 차이를 나타내었다. 온배수의 확산범위는 해표면 수온 1℃ 이상의 상승 범위는 동서로 최대 7.56km, 남북으로는 8.43km로 나타났다. 확산면적은 최대 11.65km²로 나타났다. 본 연구의 결과는 원자력 발전소 주변지역의 해양환경 모니터링을 위한 기초 자료로 활용할 수 있을 것이다.

주요어 : Landsat-7 ETM+, 해표면 온도, 온배수, 고리원자력발전소

ABSTRACT

In this study, we investigated the seasonal variation of SST(Sea Surface Temperature)

2013년 10월 24일 접수 Received on October 24, 2013 / 2014년 10월 8일 수정 Revised on October 8, 2014 / 2014년 11월 12일 심사완료 Accepted on November 12, 2014

* 본 연구는 국립수산물품질관리원 첨단 해양탐사 시스템 활용 한반도 주변 해양변동 조사 및 운영(RP-2013-ME-089) 사업의 지원으로 수행되었음.

1 국립수산물품질관리원 수산해양종합정보과 Fishery and Ocean Information Division, National Fisheries Research & Development Institute

2 국립수산물품질관리원 동해수산연구소 East Sea Fisheries Research Institute, National Fisheries Research & Development Institute

* Corresponding Author E-mail : ksangw@korea.kr

and thermal effluents estimated by using Landsat-7 ETM+ around the Kori Nuclear Power Plant for 10 years(2000~2010). Also, we analyzed the direction and range of thermal effluents dispersion by the tidal current and tide. The results are as follows, First, we figured out the algorithm to estimate SST through the linear regression analysis of Landsat DN(Digital Number) and NOAA SST. And then, the SST was verified by compared with the in situ measurement and NOAA SST. The determination coefficient is 0.97 and root mean square error is 1.05~1.24°C. Second, the SST distribution of Landsat-7 estimated by linear regression equation showed 12~13°C in winter, 13~19°C in spring, and 24~29°C and 16~24°C in summer and fall. The difference of between SST and thermal effluents temperature is 6~8°C except for the summer season. The difference of SST is up to 2°C in August. There is hardly any dispersion of thermal effluents in August. When it comes to the spread range of thermal effluents, the rise range of more than 1°C in the sea surface temperature showed up to 7.56km from east to west and 8.43km from north to south. The maximum spread area was 11.65km². It is expected that the findings of this study will be used as the foundational data for marine environment monitoring on the area around the nuclear power plant.

KEYWORDS : *Landsat-7 ETM+, Sea Surface Temperature, Thermal Effluents, The Kori Nuclear Power Plant*

서론

최근에 우리사회의 생활수준 향상과 함께 산업의 가속화로 인해 많은 양의 전기에너지가 사용되고 있다. 현재 에너지의 주종을 이루고 있는 석유나 석탄과 같은 화석에너지원은 전 세계적으로 멀지 않은 장래에 고갈될 것으로 예상됨에 따라 많은 선진국들이 태양열, 풍력, 조력과 같은 대체 에너지원의 개발에 힘쓰고 있지만, 현재까지 개발된 대체에너지원은 주로 원자력발전이다. 화석연료 및 원자력발전을 이용한 에너지 생산의 증가는 발전소 가동으로 인한 온배수 배출로 해양환경에 직·간접적인 영향을 미친다(Lardicci *et al.*, 1999).

우리나라의 원자력발전은 1978년 고리 원자력 발전소 1호기 가동을 최초로 현재 총 23호기가 가동되고 있으며, 2012년 한 해 약 150,327 GWh의 전력을 생산하고 있다. 이러한 원자력발전은 열효율이 33% 정도로 다량의 냉각수가 소

요된다(Glasstone and Jordan, 1980). 취수된 냉각용수는 발전소 제반 응축기 등을 통과하여 온배수 상태로 다시 바다로 배출되면서 해양환경 문제가 발생하게 된다. 온배수는 자연에서 취수한 물에 인위적으로 열에너지가 첨가되어 자연해수보다 수온이 높은 상태로 배출되는 물을 말한다. 일반적으로 온대 해역에서는 발전소 냉각기 가동에 따른 주변 해역의 수온상승은 8~12°C로 보고되고 있으며(Bamber and Seaby, 2004), 이는 주변해역에 분포하는 해양생태계에 직·간접적으로 영향을 미치게 된다(Chou *et al.*, 1981; Wolff, 1990; Melton and Serviss, 2000).

우리나라 동해남부해역에 위치한 고리 주변 해역은 동한난류가 유입되는 해역으로 동계에 도 고온, 고염의 수괴 특성으로 다른 해역에 비하여 많은 어종들이 출현한다(Huh *et al.*, 2010). 또한, 하계에는 남풍계열의 바람에 의한 연안용승으로 표층 아래의 풍부한 영양염이 표층에 공급되어 기초생물 생산력도 높다(Kim

et al., 2010).

외국의 경우 위성영상을 이용한 발전소 주변 연안해역의 해수면 온도에 대한 연구가 많이 진행되고 있으나(Mustard *et al.*, 1999; Tang *et al.*, 2003; Fisher *et al.*, 2004), 국내에서는 온배수에 따른 해양생태계의 영향에 관한 연구, 온배수 확산에 관한 수치모델 및 온배수 영향에 대한 해양물리 및 수산자원, 학적 연구가 진행되어 왔으나, 아직은 기초적인 단계에 머물러 있다고 할 수 있다.(Shim *et al.*, 1991; Jung *et al.*, 1998; Ahn *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2009; Huh *et al.*, 2010). 특히 온배수는 원자력 발전소 등이 위치한 해역에서 국지적으로 발생하며, 이러한 해역에서 현장관측을 통한 해양 자료의 획득은 한계가 있으므로 광범위한 해역을 동시에 관측 가능한 위성영상을 활용할 수 있다.

일반적으로 근해 해표면 수온 분포를 파악하기 위해서 공간해상도가 약 1km인 열적외선 센서를 이용한 많은 연구가 수행되고 있다(Emery *et al.*, 2001; Kilpatrick *et al.*, 2001). 그러나 이러한 공간해상력으로는 온배수 주변해역과 같이 국지적으로 해양환경 변화가 급격하게 발생하는 해역의 관측은 어렵다. 이러한 해역은 Landsat 등과 같은 중고해상도를 가지는 위성영상으로 분석할 필요가 있다. Landsat 위성은 대부분 육상의 지표온도를 추정하는데 많이 이용되어 왔지만, 최근에는 호수지역 및 강의 표층수온 추출과 연안에서의 해표면 수온의 시공간적인 변화 분석에 많이 이용되고 있다(Jeong and Yoo, 1999; Jeremy *et al.*, 2004; Xing *et al.*, 2006; Choi *et al.*, 2007; Yoon *et al.*, 2009). 따라서 NOAA와 Landsat 위성영상의 장점을 이용하면 소규모지역에 대하여 보다 정확한 수온을 산출할 수 있을 것이며, 이를 원자력 발전소의 온배수의 분포를 파악하는데 적용한다면 보다 정확하게 분석할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 동해남부 고리원자력발전소 주변해역에서 10년(2000-2010년)간 촬영된

Landsat-7 ETM+(Enhanced Thematic Mapper Plus)와 NOAA AVHRR(The Advanced Very High Resolution Radiometer) 영상을 이용한 1차 선형회귀식으로부터 산출된 Landsat-7 영상의 해표면 수온(Sea Surface Temperature)의 계절변동을 조사하였다. 그리고 국립해양조사원에서 제공한 수치조류도의 조석과 조류 자료를 이용하여 온배수의 확산범위를 분석하고자 한다.

자료 및 방법

본 연구에서는 고리원자력발전소 주변해역(그림 1)의 2000년부터 2010년까지 10시 50분 전후로 촬영된 영상 중 구름의 영향을 받지 않은 20개의 Landsat-7 영상을 USGS(U. S. Geological Survey)에서 수집하였다. 우리나라의 해양은 계절마다의 특성이 달라 계절 특성을 고려한 해양환경 분석이 이루어져야 한다(Yoon and Choi, 2011). 해양의 해표면 수온은 계절별 뚜렷한 변동을 보이지만, 연안이나 해양에서의 계절은 일반적으로 육상에 비해 한 달 정도 온도 변화가 늦게 나타난다(George and William, 1982). 따라서 Landsat-7 영상을 이용한 계절별 시공간적 분포변화는 1월에서 3월을 겨울철, 4월에서 6월을 봄철, 7월에서 9월을 여름철 그리고 10월에서 12월까지를 가을철로 구분하여 분석하였다.

연안에서의 해표면 수온 산출 알고리즘을 구하기 위해 Landsat-7 위성이 촬영하는 시기와 비교적 동일한 시기의 국립수산과학원에서 수신된 NOAA 영상을 사용하였다. 구름의 영향으로 영상이 없는 경우는 해수의 수온 변화가 급격하지 않다는 가정하에 두 위성의 촬영시간이 비교적 가까운 시간대의 영상을 선정하였다.

표 1은 Landsat-7과 NOAA 위성의 분광밴드 영역과 공간해상도, 표 2에는 본 연구에 사용된 영상의 날짜와 촬영시간을 제시하였다. 또한 NOAA와 Landsat-7 영상으로부터 산출된 해표면 수온을 검증하기 위하여 국립수산과학원 한국해양자료센터(<http://kodc.nfrdi.re.kr>)

TABLE 1. Sensors characteristics of Landsat-7 ETM+ and NOAA AVHRR

Landsat-7 ETM+				NOAA			
Band	Spectral resolution (μm)	Spatial resolution (m)	Temporal resolution (day)	Band	Spectral resolution (μm)	Spatial resolution (km)	Temporal resolution (day)
1	0.45-0.51	30	16	1	0.58-0.68	1.1	1
2	0.525-0.605	30	16	2	0.725-1.1	1.1	1
3	0.63-0.69	30	16	3a	1.58-1.64	1.1	1
4	0.75-0.90	30	16	3b	3.55-3.93	1.1	1
5	1.55-1.75	30	16	4	10.3-11.3	1.1	1
6	10.4-12.5	60	16	5	11.5-12.05	1.1	1
7	2.09-2.35	30	16				
Pan-chromatic	0.52-0.90	15	16				

TABLE 2. Satellite image used in this study

Satellite	Season	Date	Acquisition Time	Satellite	Date	Acquisition Time	
L A N D S A T I 7 E T M +	Winter	Jan. 31, 2002	10:48:16	N O A A / A V H R R	Jan. 31, 2002	07:26	
		Jan. 16, 2008	10:49:51		Jan. 16, 2008	11:30	
		Feb. 27, 2000	10:52:07		Feb. 27, 2000	06:25	
		Feb. 03, 2003	10:48:04		Feb. 03, 2003	10:17	
		Mar. 20, 2002	10:48:14		Mar. 20, 2002	06:39	
		Mar. 26, 2010	10:51:40		Mar. 26, 2010	10:06	
	Spring	Apr. 13, 2005	10:49:04		Apr. 13, 2005	11:10	
		Apr. 03, 2007	10:50:01		Apr. 03, 2007	10:42	
		May 10, 2009	10:49:54		May 10, 2009	10:59	
		Jun. 11, 2009	10:49:55		Jun. 11, 2009	10:14	
		Summer	Aug. 21, 2000		10:50:30	Aug. 21, 2000	06:04
			Aug. 06, 2006		10:49:10	Aug. 06, 2006	11:08
Aug. 25, 2007	10:49:27		Aug. 25, 2007	10:19			
Sep. 23, 2006	10:48:58		Sep. 23, 2006	11:04			
Sep. 18, 2010	10:51:46		Sep. 18, 2010	11:04			
Autumn	Oct. 25, 2006		10:49:07	Oct. 25, 2006	10:28		
	Oct. 14, 2008	10:48:24	Oct. 14, 2008	11:30			
	Nov. 07, 2005	10:48:54	Nov. 07, 2005	10:12			
	Dec. 01, 2002	10:47:44	Dec. 01, 2002	10:52			
	Dec. 06, 2004	10:48:38	Dec. 06, 2004	11:32			

에서 제공하는 기장과 울기 정점의 연안정지해 양관측자료를 이용하였다(그림 1). 마지막으로 국립해양조사원(<http://www.khoa.go.kr>)에서 제공하는 수치조류도의 35.31°, 129.29° 정점의 조류와 부산지역 조위관측소에서 관측한 조석자료를 이용하여 온배수의 확산 범위를 살펴보았다.

위성영상 처리와 해표면 수온 산출 회귀식의 생성 과정을 그림 2에 나타내었다.

Landsat-7 ETM+ 해표면 수온은 적외선 밴드 6의 High gain 값을 사용하여 NASA에서 제공하는 식 (1)과 (2)를 적용하여 산출하였다. Landsat-7 ETM+의 열적외선 영상에 기록된 Digital Number (DN) 값은 식 (1)에 의해 방사휘도(Radiance) 값으로 변환된다 (Chander *et al.*, 2003). 여기서 LMAX와 LMIN은 분광과장의 에너지의 크기, QCAL은 계산될 영상의 DN값, QCALMIN은 DN의 최소

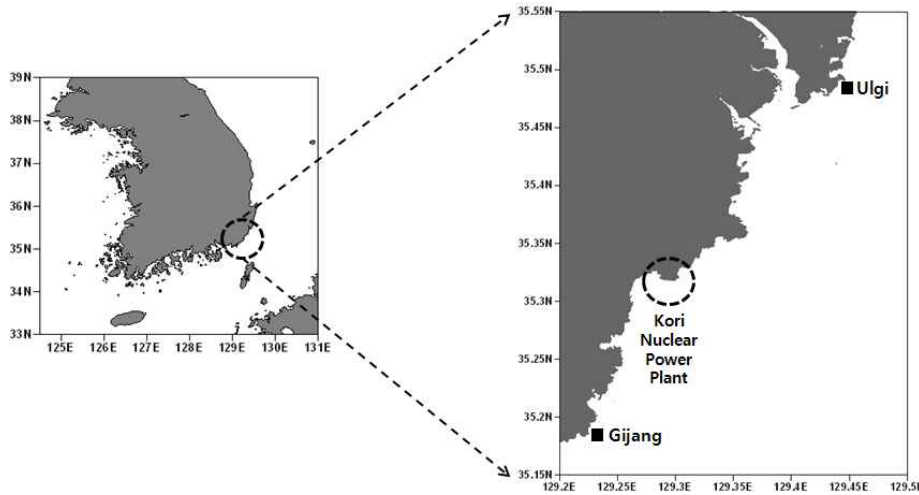


FIGURE 1. Study area

값으로 0이나 1, QCALMAX는 DN의 최대값으로 255를 사용하였다. 각 파라미터의 개별 상수 값은 표 3과 같다.

$$L_{\lambda} = \frac{(LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda})}{(QCALMAX - QCALMIN)} * (QCAL - QCALMIN) + LMIN_{\lambda} \quad (1)$$

Landsat 위성영상에서 해표면 수온 산출은 방사휘도값을 기초로 지구와 대기 사이의 방사가 일정하다는 가정 하에 위성의 보정상수를 이용하여 NASA에서 제공하는 경험식을 통해 산출하였다. 식 (2)에서 T는 절대온도(Kelvin),

L_{λ} 는 밴드 6번의 방사휘도, K_1 과 K_2 는 보정상수로 표 4에 나타내었다. 위성에서 계산되어진 온도 값은 절대온도로 일반적인 온도 단위인 섭씨온도로 변환하여 계산하였다(Chander and Markham, 2003; Ahn *et al.*, 2012).

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

NOAA 위성영상을 이용한 해표면 수온 산출은 밴드 4번과 5번을 사용하는 split-window MCSST(Multi Channal Sea Surface Temperature) 알고리즘을 사용하였다. 이 방법은 NASA에서 제공하는 실측자료와 위성자

TABLE 3. Landsat-7 ETM+ Spectral Radiance Range

Landsat-7 ETM+ Spectral Radiance Range watts/(meter squared*ster* μ m)								
Band Number	Before July 1, 2000				After July 1, 2000			
	Low Gain		High Gain		Low Gain		High Gain	
	LMIN	LMAX	LMIN	LMAX	LMIN	LMAX	LMIN	LMAX
6	0.0	17.04	3.2	12.65	0.0	17.04	3.2	12.65

TABLE 4. Thermal band calibration constants

Constant	K_1 ($w/m^2*sr*\mu$ m)	K_2 (Kelvin)
Landsat-7 ETM+	666.09	1282.71

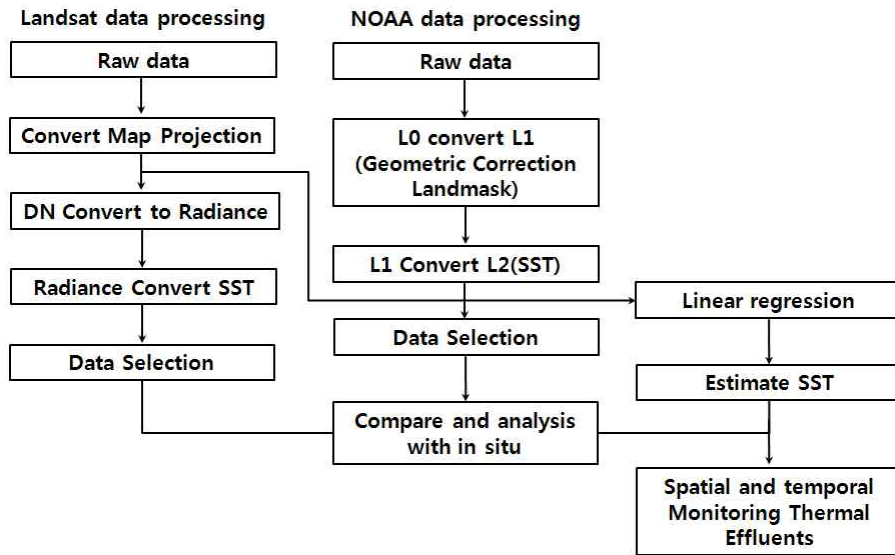


FIGURE 2. Research process flow chart in this study

료와의 상관관계를 산출하여 계산된 A, B, C, D의 고정계수를 사용하는 linear 알고리즘이다 (Yoon *et al.*, 2009).

$$MCSST = A \times T_4 + B \times (T_4 - T_5) + C \times (T_4 - T_5) \times \sec \theta - D \quad (3)$$

식 (3)의 T4는 11 μ m 부근 밴드 4의 휘도온도 값이고, T5는 12 μ m 부근 밴드 5의 휘도온도 값이다. 또한 A, B, C, D는 NASA에서 산출한 고정계수를 사용하였고, $\sec \theta$ 는 위성의 천정각(Zenith angle, θ)이다.

연안에서의 해표면 수온을 산출하는 알고리즘은 공간해상도가 60m인 Landsat-7 영상을 1.1km의 NOAA 영상 해상도로 변환하여 북위 34.7~35.3°, 동경 129.5~129.9° 지역 각각 영상의 2,074개 자료를 추출하여 구하였다. 재배열(Resampling) 및 내삽(Interpolation)에 있어서는 원래의 화소 값의 손실을 최소화하면서 처리 속도가 빠르며 화소값의 변화가 가장 적은 최근린내삽법으로 재배열하였다(Jo, 2005).

국립해양조사원에서 제공하는 조석 자료를

이용하여 조시별(창조, 고조, 낙조, 최강낙조, 저조) 온배수 확산 방향을 구분하였고, 10분 간격으로 예측한 수치조류도를 이용하여 해수의 이동속도에 따른 온배수의 확산 범위를 파악하였다.

연구결과

1. 위성자료의 검증과 해표면 수온 추정

NOAA와 Landsat-7 위성영상으로부터 산출된 해표면 수온을 국립수산과학원에서 운영하는 연안정지관측자료 중 연구대상지역과 인접해 있는 울기와 기장정점의 자료를 이용하여 비교·검증하였다. 그리고 보다 정확한 해표면 수온 산출을 위해 NOAA 영상의 해표면 수온과 Landsat-7 영상 DN 값의 1차 선형회귀분석식을 구하였다.

그림 3에서 NOAA 위성에서 산출된 해표면 수온과 관측 수온의 결정계수(Correlation Determination, R^2)는 기장과 울기에서 각각 0.972와 0.986로 매우 높은 상관성을 보였으며, 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)는 1.08 $^{\circ}$ C와 0.69 $^{\circ}$ C로 나타났다.

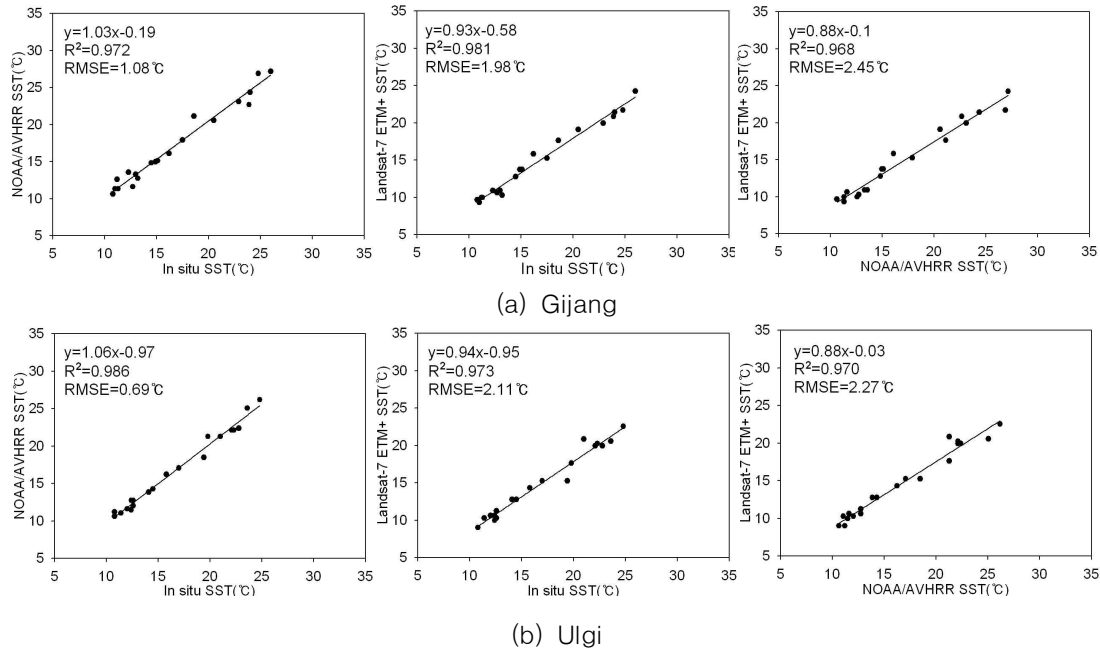


FIGURE 3. Relationship between in situ((a) Gijang, (b) Ulgi) SST(°C) and satellite SST(°C)

Landsat-7 ETM+ 위성영상으로부터 산출된 해표면 수온은 현장관측 수온에 비해 다소 낮게 산출 되었으며, 두 관측 정점에서 결정계수는 각각 0.981과 0.973, 평균제곱근오차는 1.98°C, 2.11°C로 나타났다. 또한 Landsat-7 과 NOAA 영상에서 산출된 해표면 수온의 결정계수는 각각의 정점에서 약 0.968과 0.970로 높은 상관성을 나타냈지만, 평균제곱근오차는 2.45°C와 2.27°C로 나타났다. NOAA가 Landsat-7에 비해 높은 정밀도를 나타내는 원인은 NOAA 위성의 AVHRR 센서가 해표면 수온 산출을 위해 개발되었으며, 또한 NOAA 영상으로부터 산출된 해표면 수온은 대기보정 알고리즘의 검·보정 연구로 정밀도가 높아진 결과로 판단된다. 따라서 Landsat 등의 육상위성 열외선 밴드를 이용하여 해표면 수온을 산출할 경우 보다 정확한 알고리즘 개발이 요구된다.

그림 4에 Landsat-7 DN값과 NOAA 해표면 수온의 관계를 이용하여 보다 정확한 해표면 수온을 산출하기 위해 20개 각각의 영상에서 동해

연안 2074개의 값들을 추출하여 1차 선형회귀 방정식 식 (4)를 구하였으며, 이 두 값의 결정계수는 0.954로 높은 상관성을 나타내었다.

$$\text{NOAA SST} = \text{Landsat DN} * 0.370 - 29.4 \quad (4)$$

식 (4)를 이용하여 산출된 Landsat-7 해표면 수온을 기장과 울기정점 관측치 및 NOAA 해표면 수온과 비교·검증하였다(그림 4). 각 정점에서의 결정계수는 기장의 경우 각각 0.969, 0.983, 울기는 0.970, 0.972로 높은 상관성을 나타내었다. 평균제곱근오차는 약 1.1~1.2°C 내외로 기존의 NASA의 해표면 수온 산출식에 비하여 보다 정량적인 값을 나타내었다.

향후 더 많은 위성자료와 관측 자료를 이용하여 계절별로 산출한다면 더욱 정확한 해표면 온도를 산출 할 수 있을 것이다.

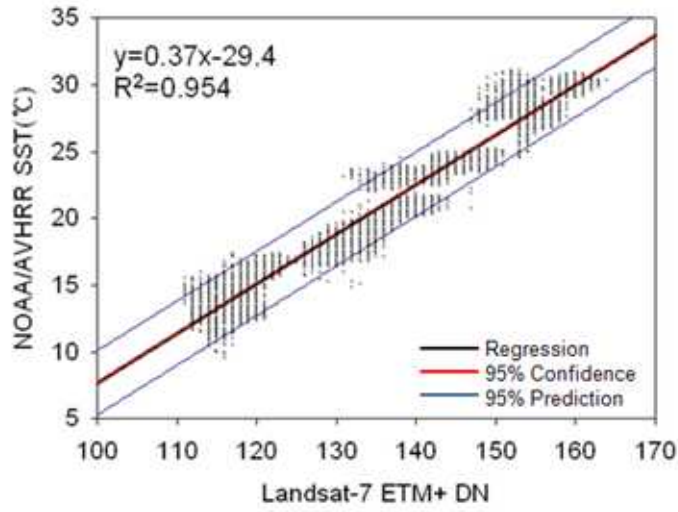


FIGURE 4. Correlation analysis and linear regression equation between Landsat-7 DN and NOAA SST(°C)

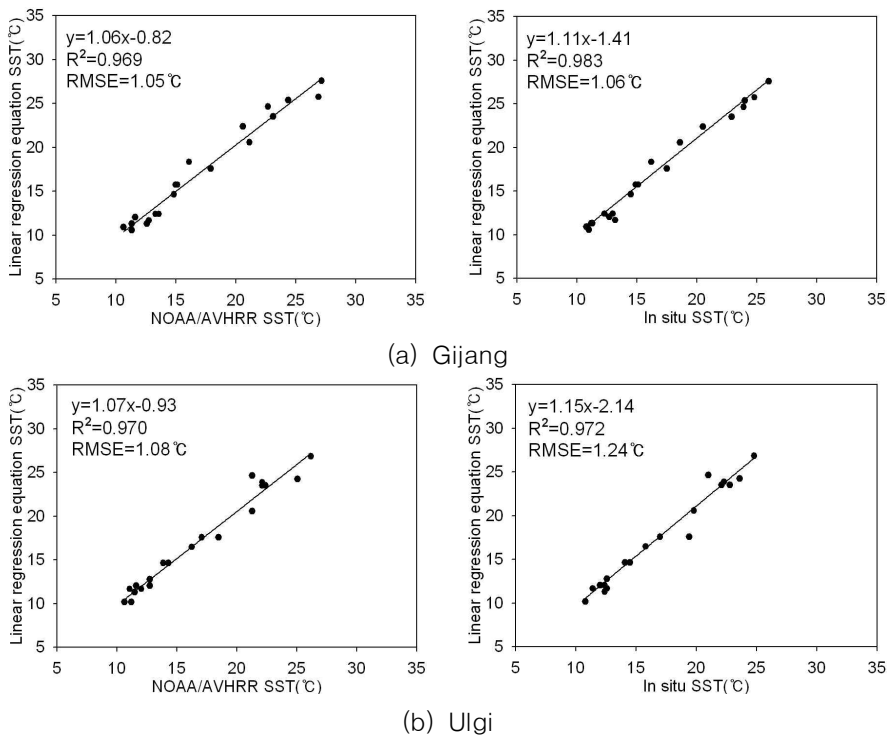


FIGURE 5. Relationship between linear regression equation SST(°C) and in situ((a) Gijang, (b) Ulgi), NOAA SST(°C)

2. 해표면 수온의 계절별 시·공간적 분포변화

발전소 주변의 해표면 수온 분포는 온배수를 포함하여 태양열, 외해수의 유입, 냉수대, 육지 열원 등 다양한 외부열원의 영향으로 복잡하게 나타난다. 발전소에서 배출되는 온배수의 수온은 주변해역의 수온과 발전량에 따라 변화됨으로 계절과 전력 수요에 따라 상대적으로 바뀔 수 있다. 또한 해표면 수온은 연도별로 우리나라 주변은 물론 전 지구적 기상변화에 따라 달라질 수 있기 때문에 온배수의 수온범위와 확산을 분석하기 위해서는 다년간의 발전소 주변해역의 해표면 수온의 분석이 필요하다. 따라서 식 (4)를 사용하여 2000년부터 2010년까지 Landsat-7 영상의 각 계절별 해표면 수온을 산출하여 그림 5~8에 나타내었다.

겨울철(그림 5)의 해표면 수온 분포는 12~14°C로 가장 낮은 분포를 보였으며, 각 월별로 크게 차이가 없었다. 이는 국립수산과학의 정선 해양관측 자료 중 고리 주변해역 관측 정점의 1961년부터 2004년까지 2월 표층수온이 11.5~14.0°C로 관측 것과 유사한 결과이다. 발전소로부터 방류된 초기 온배수 수온은 약 18~20°C

로 주변해역의 해표면 수온에 비해 약 6°C정도 높게 나타났다.

그림 6에 4~6월의 봄철 해표면 수온을 나타내었다. 4월 해표면 수온은 12~14°C로 겨울철과 비슷한 분포를 나타냈다. 5월과 6월의 해표면 수온은 기온의 상승과 일조량의 증가에 따라 각각 16~17°C, 19~20°C로 나타나, 겨울철에 비해 점점 상승하여 월별 수온의 변화를 뚜렷하게 파악할 수 있었다. 방류 초기 온배수와 주변해역의 해표면 수온과의 차는 4월에는 6~7°C로 나타났으며, 5월과 6월은 8°C 정도의 차이를 보였다.

여름철은 구름의 영향으로 인해 7월의 영상은 획득할 수 없었으며, 8월과 9월의 5개의 영상을 분석하여 그림 7에 나타내었다. 여름철은 태양복사열로 인하여 표층 수온이 크게 상승하여 수온의 공간적인 구배가 다른 계절에 비해 작게 나타났다. 8월의 해표면 수온이 26~28°C로 가장 높은 분포를 보였으며, 9월에는 23~26°C로 전월에 비해 비교적 낮은 분포를 보였다. 연도별로 살펴보면 8월의 경우 2000년과 2006년이 2007년에 비해 2°C정도 낮은 해표

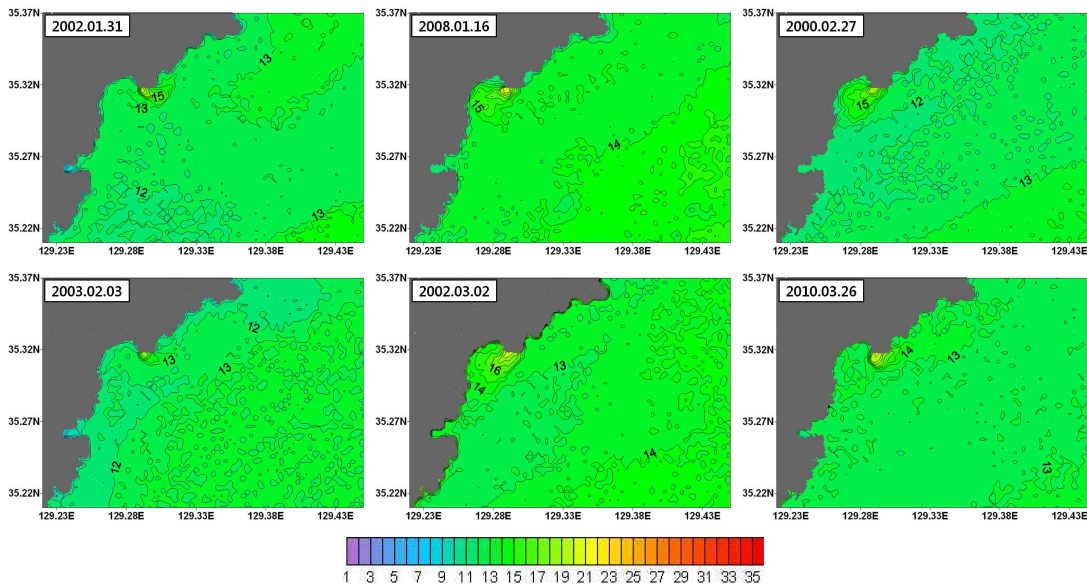


FIGURE 6. Distribution of sea surface temperature(°C) from Landsat-7 in winter

면 수온 분포를 보였는데, 이는 국립수산과학원 해양수산속보에서 발표한 바와 같이 기장과 일 광연안에 걸쳐 발생한 냉수대의 영향으로 판단

된다. 여름철에는 발전소 주변 해표면 수온이 상대적으로 높아 8월에는 다른 계절에 비해 온 배수의 확산이 뚜렷하게 나타나지 않았으며, 주

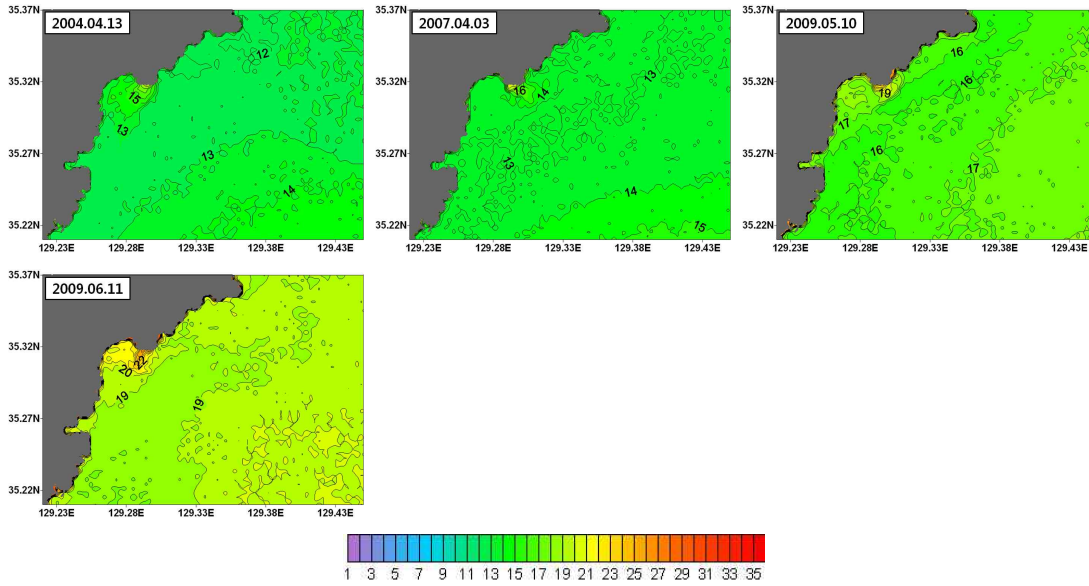


FIGURE 7. Distribution of sea surface temperature(°C) from Landsat-7 in spring

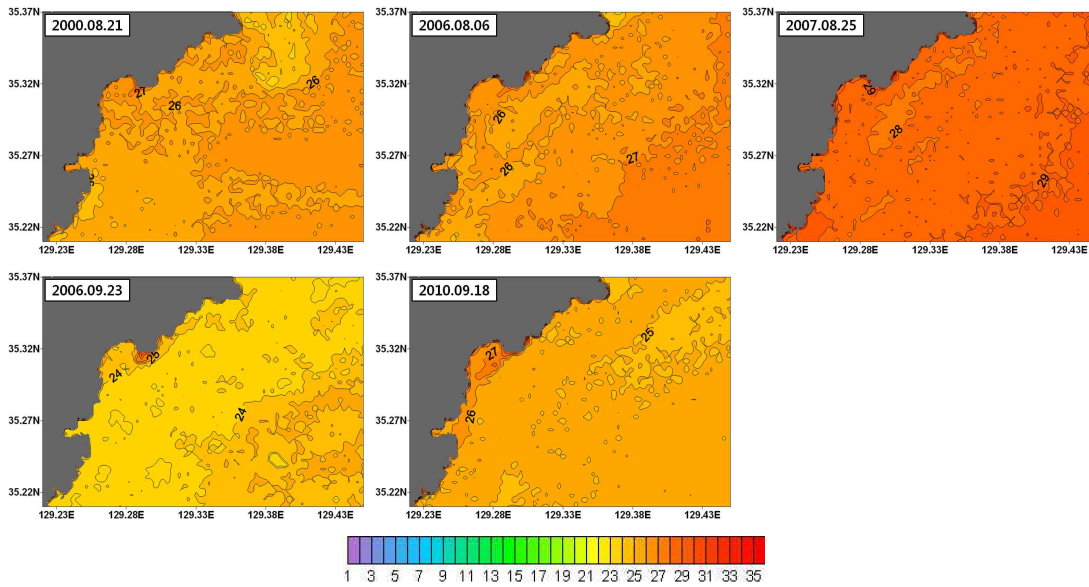


FIGURE 8. Distribution of sea surface temperature(°C) from Landsat-7 in summer

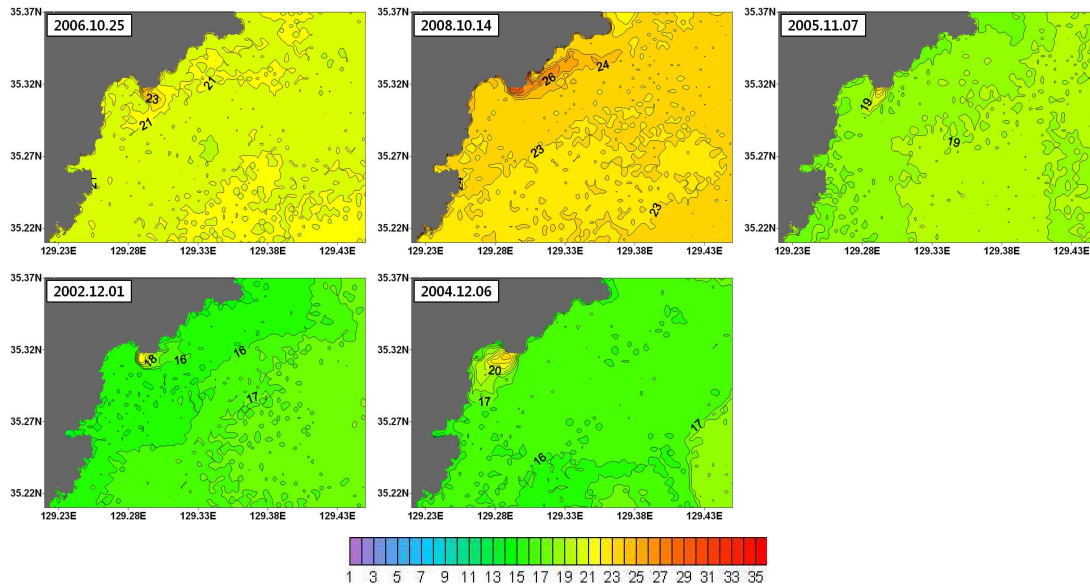


FIGURE 9. Distribution of sea surface temperature(°C) from Landsat-7 in autumn

변 해표면 수온과 최대 2°C 정도로 낮은 수온차를 보였다. 그에 비해 9월에는 방류초기 온배수가 주변 해역의 해표면 수온 보다 4~7°C 높게 나타나, 주변 해역의 해표면 수온이 하강함에 따라 온배수의 배출을 파악할 수 있었다.

가을철 10월의 해표면 수온은 연안역에서 20~23°C로 여름철에 비해 낮은 분포를 보였으며, 11월과 12월에는 각각 18~19°C, 15~16°C로 월별 수온이 점점 낮아지고 있음을 알 수 있다. 해역의 해표면 수온이 낮아지면서 발전소에서 배출된 온배수와 수온 차이가 여름에 비해 확연히 커졌다. 10월과 11월에는 주변의 해표면 수온과 방류 초기의 온배수의 차이가 6°C 정도로 나타났으나, 12월에는 7°C로 주변 수온이 낮아짐에 따라 그 차이가 점점 커짐을 확인 할 수 있었다.

3. 계절별 조석과 조류에 따른 온배수의 확산

온배수는 해양으로 배출되어 표층해류를 따라 확산되는 동시에 주변 해수와 희석되어 자연수온으로 돌아간다. 표층으로 방출된 온배수는 방출량, 조류, 해류, 바람 등의 영향에 따라

희석 및 확산 정도가 결정되며, 특히 조석류의 방향에 따라 확산 방향이 주기적으로 변한다. 이와 같이 온배수가 주변 해수와 희석 혼합되는 과정에서 일정 범위 내의 해수온을 상승시키게 되는데 온배수로 인한 영향을 온배수 확산범위라 한다.

배출구에서 유출되는 온배수의 양이 확산에 영향을 준다는 판단 하에 전력사용 형태가 비슷한 계절별로 분석하였으며, 표 5에 계절별 조석과 조류에 따라 발전소 주변 해표면 온도보다 1°C 이상 상승된 온배수의 온도, 확산 거리 및 면적을 산출하여 나타내었다. 확산거리는 동서의 경우 가로로 확산되는 직선거리를 남북은 세로로 확산되는 직선거리를 측정하였다.

겨울철의 경우 유속은 4.21~14.64cm/s로 나타났으며, 온배수의 확산거리는 동서로 2.52~3.95km, 남북으로는 1.72~4.35km이며, 확산 면적은 2.21~9.34km²이다. 조석별로 살펴보면 창조류인 2008년 1월과 2000년 2월의 경우 유속은 6.94cm/s, 4.21cm/s로 나타났으며, 확산 거리와 면적이 유사한 분포를 보였다. 2002년 1월, 2003년 2월과 2010년 3월의 경

우 낙조류로 유속은 12.8~16.32cm/s로 창조시 비해 빠르게 나타났으나, 확산 면적은 2.21~4.16km²로 좁게 나타났다. 이는 낙조시 조류가 온배수의 배출 방향과 반대쪽으로 움직여 창조시에 비해 유속은 빠르지만 그에 비해 확산은 작게 일어나는 것이라 판단된다. 2002년 3월은 해면이 가장 높아진 고조로 유속이 0.89cm/s로 조류의 흐름이 거의 정지한 것과 같은 정조의 상태이며, 이때 온배수는 동서방향으로 3.95km, 남북방향으로 4.35km 그리고 확산면적은 9.34km²로 넓게 확산되는 것을 알 수 있었다.

봄철에 유속은 8.3~26.0cm/s로 나타났다. 온배수의 최대 확산거리는 동서 방향으로 약 2.72~4.7km, 남북 방향으로 2.13~5.57km이며, 확산면적은 3.82~11.65km²로 나타났다. 고조인 2005년 4월과 2009년 6월에는 유속이 약 8.3~9.6cm/s로 나타났으며, 확산면적은 11.5km²와 7.26km²로 확산되었다. 낙조류인 2007년 4월과 2009년 5월 경우는 유속이 25.9cm/s, 20.8cm/s로 비교적 빠르게 나타났

지만, 확산거리와 면적은 다소 작게 나타났다.

여름철에는 유속이 0.39~36.01cm/s로 나타났으며, 확산거리는 동서로 약 1.15~7.56km, 남북으로 0.78~8.43km의 범위이며, 면적은 0.29~9.7km²로 나타났다. 2000년 8월은 창조로 유속이 15.3cm/s로, 확산 거리는 동서로 약 1.28cm/s, 남북으로 1.58cm/s로 확산 면적은 0.5km²로 확산이 거의 일어 나타났다. 2006년 8월과 2010년 9월은 저조기로 해면이 가장 낮은 시기이며, 유속 또한 0.87, 0.39cm/s로 현저히 느렸지만, 확산 면적의 경우 두 시기에는 큰 차이를 나타냈다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 여름철 일사에 의해 자연의 해표면 수온이 상승함에 따라 온배수가 주변 해수에 혼합되어 영향이 크게 나타나지 않는 것으로 판단된다. 낙조기인 2007년 8월과 2006년 9월은 유속에서 각각 7.18cm/s와 30.03cm/s로 큰 차이를 보였다. 이는 낙조의 시기에 따른 차이로 인한 결과라 판단된다. 온배수의 확산 면적은 앞의 경우와 유사하게 2007년 8월에는 확

TABLE 5. Thermal effluents dispersion according to tide and tidal current

Date	Tide Condition	Current Speed (cm/s)	SST Increased by over 1 °C			
			SST(°C)	East-west(km)	South-North(km)	Area(km ²)
Jan. 31, 2002	ebb	14.640	13-18	3.2550	2.840	4.163
Jan. 16, 2008	flood	6.940	14-20	3.480	3.210	6.297
Feb. 27, 2000	flood	4.210	13-19	3.115	3.390	6.423
Feb. 03, 2003	ebb	16.320	13-18	2.515	1.718	2.208
Mar. 20, 2002	high	0.890	14-19	3.945	4.350	9.344
Mar. 26, 2010	ebb	12.800	14-20	3.022	2.108	3.605
Apr. 13, 2005	high	8.270	13-18	4.069	5.566	11.653
Apr. 03, 200	ebb	25.910	14-20	2.716	2.130	3.815
May 10, 2009	ebb	20.810	17-24	4.696	4.118	10.422
Jun. 11, 2009	high	9.590	20-27	4.000	3.023	7.256
Aug. 21, 2000	flood	15.330	27-28	1.280	1.058	0.496
Aug. 06, 2006	low	0.870	27-28	1.146	0.780	0.286
Aug. 25, 2007	ebb	7.180	29-30	1.566	1.020	0.630
Sep. 23, 2006	ebb	30.030	24-30	5.193	4.028	7.639
Sep. 18, 2010	low	0.390	26-29	4.821	8.431	9.698
Oct. 25, 2006	ebb	15.870	21-26	3.570	3.638	6.135
Oct. 14, 2008	ebb	36.010	24-29	7.559	3.90	8.362
Nov. 07, 2005	flood	11.080	19-24	2.205	2.716	2.364
Dec. 01, 2002	ebb	18.180	16-22	4.018	2.385	4.676
Dec. 06, 2004	flood	6.630	17-23	3.204	4.845	10.208

산이 거의 일어나지 않았으며, 2006년 9월에는 7.64km²로 나타났다.

가을철에는 유속이 6.63~36.01cm/s로 나타났다으며, 확산거리는 동서로 약 2.21~7.56km, 남북으로 2.39~4.85km의 범위이며, 면적은 2.36~10.21km²로 나타났다. 낙조기인 2006년과 2002년 12월의 유속은 15.9~18.18cm/s로, 확산면적은 6.14km²와 4.68km²로 약간의 차이를 보였다. 이는 조석의 시점 차이에 따라 발생한 현상이라 판단된다. 유속이 가장 빨랐던 2008년 10월의 경우 온배수의 확산은 동서방향으로는 약 7.56km, 남북방향으로 3.9km로 동서방향으로의 확산이 우세하였으며, 확산면적은 8.36km²로 나타났다. 2005년 11월과 2004년 12월은 창조기로 유속이 약 11.1cm/s, 6.63cm/s로 나타났으며, 동서방향은 2.21km, 3.20km, 남북방향은 2.72km, 4.85km로 그리고 확산면적은 2.36km², 10.21km²로 큰 차이를 보였다. 이는 앞의 그림 8에서 봤을 때 2005년 11월의 경우 해안쪽에 차가운 수괴가 형성되어 온배수가 서쪽으로 확산되지 못하여 발생한 결과라 판단된다.

결론

본 연구에서는 동해남부 고리원자력발전소 주변해역에서 10년(2000-2010년)간 촬영된 Landsat-7과 NOAA 위성영상을 이용한 1차 선형 회귀식으로부터 산출된 Landsat-7 위성영상의 해표면 수온의 계절변동을 조사하였다. 그리고 국립해양조사원에서 제공한 수치조류도의 조석과 조류 자료를 이용하여 온배수의 확산범위를 살펴보았다.

Landsat-7과 NOAA 위성영상으로부터 산출된 해표면 수온을 울기와 기장 정점의 관측치와 비교·검증하였다. NOAA 위성의 해표면 수온과 관측 수온의 결정계수는 기장과 울기에서 각각 0.972와 0.986으로 매우 높은 상관성을 보였으며, 평균제곱근오차는 1.08℃와 0.69℃로 낮게 나타났다. Landsat-7 위성영상의 해표면 수온과 관측 수온의 결정계수는 기장과

울기 정점에서 상관계수는 각각 0.981과 0.973, 평균제곱근오차는 1.98℃, 2.11℃로 NOAA 해표면 수온에 비해 크게 나타났다. 또한 Landsat-7과 NOAA 위성영상에서 산출된 해표면 수온의 결정계수는 각각의 정점에서 약 0.97로 높은 상관성을 나타냈지만, 평균제곱근오차는 2.45℃와 2.27℃로 나타났다. Landsat-7 위성의 DN과 NOAA 위성의 해표면 수온과의 1차 선형회귀분석을 통해 산출된 해표면 수온은 NOAA 해표면 수온과 관측치의 결정계수가 각각의 정점에서 약 0.969~0.983으로 높게 나타났다. 평균제곱근오차도 약 1.05~1.24℃로 기존의 NASA의 수온 산출식에 비해 비교적 정확한 해표면 수온을 나타내었다. 향후 더 많은 위성자료를 사용하여 각 계절별로 적용한다면 더욱 정확한 해표면 온도를 산출할 수 있을 것이라 생각된다.

2000년부터 2010년까지 발전소 주변의 계절별 해표면 수온과 온배수 수온을 분석하였다. 해표면 수온은 겨울철 1월말과 2월에 12℃로 가장 낮은 분포를 보였으며, 봄철에는 12~19℃, 여름철 8월에는 26~28℃로 가장 높게 나타났으며, 가을철에는 15~23℃의 분포를 보였다. 방류 초기 온배수와 발전소 주변 해역의 수온차는 여름철 2~7℃로, 특히 해표면 수온이 가장 높은 8월에는 수온차가 2℃로 가장 낮은 차이를 보였다. 반면 겨울, 봄, 겨울철은 해표면 수온과 온배수와가 6~7℃ 내외의 수온차를 보였다.

온배수의 확산범위는 해표면 수온 1℃ 이상의 상승 범위는 동서로 최대 7.56km, 남북으로는 8.43km로 나타났다. 확산면적은 최대 11.65km²로 나타났다. 이때 조석은 고조였으며, 유속은 8.27cm/s로 나타났다. 또한 여름철을 제외한 창조기에는 최대 확산 면적이 10.21km², 낙조기에서는 10.42km² 분포를 보였다. 저조기인 2010년 9월에는 유속이 0.39cm/s로 조류의 움직임이 거의 없는 상태에서 9.7km²로 확산이 크게 나타났다. 확산의 특성은 낙조류를 따라 북동쪽으로 확산되고 창조류를 따라 남쪽으로 확산된다는 기본적인 사실을 고려할 때, 배

출구에서 일정한 수온으로 유출되는 온배수는 낙조시 유출되는 온배수의 방향과 반대로 배수구로 유입되는 찬 해수에 의해 역류되면서 온배수의 확산 면적이 좁게 나타날 수 있는 반면에 창조시에는 조류의 방향과 온배수의 방향이 같기 때문에 상대적으로 확산 면적이 넓게 나타났다. 또한 낙조시 북동쪽 해역은 연안쪽 해역에 비해 수심이 깊어 찬 수괴의 자연해수량이 많아져 자연해수와 온배수의 희석이 빠른 반면, 창조시 남서쪽 해역은 해안선과 인접하여 수심이 얕아 열손실이 상대적으로 적을 것으로 판단된다.

현재 기후변화로 인해 많은 전력이 에너지가 소비되는 만큼 대용량 발전소의 제반 환경영향 저감대책을 적극적으로 강구하여 개발과 보전을 균형적으로 이루어 나가야 할 것이며, 온배수를 이용하여 수산물을 양식하는 것과 같이 환경영향을 생산적으로 이용하는 데 투자하는 것을 긍정적으로 검토하여 시행하여야 할 것이다.

향후 보다 많은 영상간의 검증과 현장관측 자료와의 비교를 통해 보다 나은 결과가 도출될 것으로 생각되며, 현재의 연구결과로도 중·고해상도 위성영상과 NOAA 수온 영상과의 상관관계로부터 연안해역의 좋은 지표면 수온 자료를 얻을 수 있을 것으로 생각된다. 본 연구의 온배수 조사가 발전소 주변지역의 해양환경 모니터링을 위한 기초자료로 활용될 것으로 기대한다. 현재 우리나라에서는 발전소 가동과 관련한 연구가 기초단계에 있는 실정이며, 이로 인해 발생할 수 있는 해양환경의 변화는 장기간에 걸쳐 누적되어 나타날 가능성이 있으므로 향후에도 지속적인 연구가 이루어져야 할 것으로 본다. **KAGIS**

REFERENCES

- Ahn, J.S., J.D. Hwang, M.H. Park and Y.S. Suh. 2012. Estimation of urban heat island potential based on land cover type in Busan using landsat-7 ETM+ and AWS data. *Journal of the Korea association of geographic information studies* 15(4):65-77 (안지숙, 황재동, 박명희, 서영상. 2012. Landsat-7 ETM+ 영상과 AWS 자료를 이용한 부산의 토지피복에 따른 여름철 도시열섬포텐셜 산출. *한국지리정보학회지* 15(4):65-77).
- Ahn, Y.H., P. Shanmugam, J.H. Lee and Y.Q. Kang. 2006. Application of satellite infrared data for mapping of thermal plume contamination in coastal ecosystem of Korea. *Marine Environmental Research* 61(2):186-201.
- Bamber R.N. and R.M.H. Seaby. 2004. The effects of power station entrainment passage on three species of marine planktonic crustacean, *Acartia tonsa*(Copepoda), *Crangon crangon* (Decapoda) and *Homarus gammarus* (Decapoda). *Marine Environmental Research* 57(4):281-294.
- Chander, G. and B.L. Markham. 2003. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedure and post-calibration dynamic range. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing* 41(11): 2674-6277.
- Choi, S.P., W.S. Yook, S.C. Hong and Y.S. Song. 2007. Analysis of sea surface temperature distribution around Uijin nuclear power station using time series landsat satellite images. *Journal of the Korea Society for Geospatial Information System* 15(3):51-57 (최승필, 육운수, 홍성창, 송영선. 2007. 시계열 Landsat 위성 영상을 활용한 울진 원자력발전소 주변 해수 온도 분포분석. *한국지형공간정보학회지* 15(3):51-57).
- Chou, W., I.P. Murarka and R.W. Brocksen.

1981. Entrainment and impingement in power plant cooling systems. *Journal of the Water Pollution Control Federation* 53(6):965-973.
- Emery, W.J., S. Castro, G.A. Wick, P. Schuessel and C. Donlon. 2001. Estimating sea surface temperature from infrared satellite and in situ temperature data. *Bulletin of the American Meteorological Society* 82: 2773-2785.
- Fisher J.I. and J.F. Mustard. 2004. High spatial resolution sea surface climatology from Landsat thermal infrared data. *Remote Sensing of Environment* 90(3): 293-307.
- Glasstone, S. and W.H. Jordan. 1980. Nuclear power and its environmental effects. American Nuclear Society. 395pp.
- Huh, S.H., J.M. Park, D.S. Jeong and G.W. Baeck. 2010. Seasonal and interannual variation in species composition and abundance of decapod assemblages collected using pots in the coastal waters off Gori, Korea. *Journal of Korea Fisheries and Aquatic Sciences* 43(5):503-509 (허성희, 박주면, 정달상, 백근욱. 2010. 고리 주변해역 통발에서 채집된 십각류 종조성의 계절변동과 연간변동. *한국수산과학회지* 43(5):503-509).
- Jeong, J.C. and S.J. Yoo. 1999. The analysis of surface water temperature using landsat TM. *Korea Journal of Remote Sensing* 15(1):1-8 (정종철, 유신재. 1999. Landsat TM 영상을 이용한 표층수온 분석 오차. *대한원격탐사학회지* 15(1):1-8).
- Jo. M.H. 2005. Analyzing the spectral characteristic and detecting the change of tidal flat area Seo han bay, North Korea using satellite images and GIS. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 8(2):44-54 (조명희. 2005. 위성영상과 GIS를 이용한 북한 서한만 지역의 간석지 분광특성 및 변화 탐지. *한국지리정보학회지* 8(2):44-54).
- Jung, T.S., S.I. Kim and S.W. Kang. 1998. Three-dimensional numerical modelling of water circulation and thermal diffusion. *Journal of the Korea Society for Marine Environmental Engineering* 1(1):93-101 (정태성, 김상익, 강시환. 1998. 해수순환과 온배수 확산에 관한 3차원 수치모델링. *한국해양환경공학회지* 1(1): 93-101).
- Kilpatrick K.A., G.P. Podesta and R. Evans. 2001. Overview of the NOAA/NASA advanced very high resolution pathfinder algorithm for sea surface temperature and associate matchup database. *Journal of Geophysical Research* 106:9179-9183.
- Kim, S.W., W.J. Go, S.S. Kim, H.D. Jeong and K. Yamada. 2010. Characteristics of ocean environment before and after Coastal Upwelling in the Southeastern part of Korean peninsula using anin-situ and multi-satellite data. *Journal of the Korea society of marine environment & safety* 16(4):345-352 (김상우, 고우진, 김성수, 정희동, 야마다게이코. 2010. 다중위성 및 현장관측을 이용한 동해남부 연안용승 발생 전후의 해양환경 특성. *해양환경안전학회지* 16(4):345-352).
- Kim, Y.H., J.K. Ahn, H.D. Yoon and M.A.

- Jang, 2007. Effects of heated effluents on the intertidal macroalgal community near Gori nuclear power plant. *Algae* 22(4):97-304 (김영환, 안중관, 윤희동, 장만아. 2007. 고리원전의 온배수 방출이 주변 해조군집에 미치는 영향. *한국조류학회지* 22(4):297-304).
- Lardicci C., F. Rossi and F. Maltagliati. 1999. Detection of thermal pollution: variability of benthic communities at two different spatial scales in an area influenced by a coastal power station. *Marine Pollution Bulletin* 38(4):269-303.
- Lee, J. H., Y.J. Ro and Y.K. Cho. 2007. Standard guide to physical oceanographic survey of the effect of thermal discharge from a nuclear power plant. *The Sea Journal of the Korea Society of Oceanography* 12(1):43-49 (이재학, 노영재, 조양기. 2007. 원자력발전소 온배수 영향 해양물리분야 조사의 표준지침. *한국해양학회지* 12(1):43-49).
- Li, X., W. Pichel, P. Clemente-Colon, V. Krasnoplsky and J. Sapper. 2001. Validation of coastal sea and lake surface temperature measurements derived from NOAA/AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing* 22(7):1285-1303.
- Melton, B.R. and G.M. Serviss. 2000. Florida Power Corporation-Anclote Power Plant entrainment survival of zooplankton. *Environmental Science & Policy* 3(1):233-248.
- Mustard, J.F., M.A. Carney and A. Sen. 1999. The use of satellite data to quantify thermal effluent impacts. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 49(4):509-524.
- Pickard, G.L. and W.J. Emery. 1982. *Descriptive physical oceanography, An Introduction* Pergamon, Tarrytown, New York.
- Shim, J.H., H.G. Yeo and Y.K. Shin. 1991. Ecological effect of thermal effluent in the Korean coastal waters I, Significance of autotrophic nano and picoplankton in the adjacent waters of Kori nuclear power plant, *The Journal of the Oceanological Society of Korea* 26(1):77-82 (심재형, 여환구, 신윤근. 1991. 한국 연안해역에 있어서 온배수 배출의 생태학적 영향 I, 고리 원자력 발전소 주변해역에서 미소 및 초미소 자가영양 플랑크톤의 중요성. *한국해양학회지* 26(1):77-82).
- Tang, D., D.R. Kester, Z. Wang, J. Lian and H. Kawamura. 2003. AVHRR satellite remote sensing and shipboard measurements of the thermal plume from the Daya bay, nuclear power station, China. *Remote Sensing of Environment* 84(4):506-515.
- Wolff, W.J. 1990. Anthropogenic influences and management of estuaries. *Limnology and Oceanography* 20(1):153-156.
- Xing, Q., C. Chen and P. Shi. 2006. Method of integrating Landsat-5 and Landsat-7 data to retrieve sea surface temperature in coastal waters on the basis of local empirical algorithm. *Ocean Science Journal* 41(2):97-104.
- Yoon, D.Y. and H.Y. Choi. 2011. A comparison of spatio-temporal variation patten of sea surface temperature according to the regional scale in the south sea of Korea. *Journal of the*

- Korean Association of Geographic Information Studies 14(4):182-193 (윤동영, 최현우. 2011. 지역 규모에 따른 한국 남부해역 표층수온의 시·공간적 변동 패턴 비교. 한국지리정보학회지 14(4):182-193).
- Yoon, S., J.H. Ryu, J.E. Min, Y.H. Ahn, S. Lee and J.S. Won. 2009. Monitoring of the sea surface temperature in the Saemangeum sea area using the thermal infrared satellite data. Korea Journal of Remote Sensing 25(4):339-357 (윤석, 유주형, 민지은, 안유환, 이석, 원중선. 2009. 열적외 위성자료를 이용한 새만금 해역 해수면온도 모니터링. 대한원격탐사학회지 25(4):339-357).
- Zhang, C.I., S.I. Lee and J.H. Lee. 2009. A quantitative model for estimating fishery production damages as a result of thermal effluents from nuclear power plants. Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 42(5):494-502 (장창익, 이성일, 이종희. 2009. 원자력발전소의 온배수 배출량을 고려한 어업생산감소율 추정 모델. 한국수산과학회지 42(5):494-502). [KAGIS](#)