

## 다중위성 및 현장관측을 이용한 동해남부 연안용승 발생 전후의 해양환경 특성

김상우\* · 고우진\*\*\* · 김성수\*\*\*\* · 정희동\*\* · 야마다게이코\*\*\*\*\*

\*, \*\* 국립수산물품질관리원 동해수산물연구소 자원환경과, \*\*\* 국립수산물품질관리원 연구기획과,  
\*\*\*\* 해양환경관리공단 해양보전부, \*\*\*\*\* 계명대학교 환경대학

## Characteristics of Ocean Environment Before and After Coastal Upwelling in the Southeastern Part of Korean Peninsula Using an In-situ and Multi-Satellite Data

Sang-Woo Kim\* · Woo-Jin Go\*\*\* · Seong-Soo Kim\*\*\*\* · Hee-Dong Jeong\*\* · Keiko Yamada\*\*\*\*\*

\*, \*\* Fisheries Resources and Environment Division, East Sea Fisheries Research Institute, Gangwon-Do, 210-861, Korea

\*\*\* Research and Development Planning Division, National Fisheries Research & Development Institute, Busan, 619-705, Korea

\*\*\*\* Department of Marine Preservation, Korea Marine Environment Management Corporation, Seoul, 135-670, Korea

\*\*\*\*\* College of Environment, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

**요 약** : 본 연구에서는 하계 냉수대 발생과 관련하여 2007년 6월과 8월의 현장 및 위성에서 관측한 NOAA 해양표면수온과 SeaWiFS 해석 영상 및 QuikScat 자료를 이용하여 동해 남부해역의 수온과 클로로필 a 농도의 단기 변동과 바람을 살펴보았다. 특히, 동한난류 해역의 수온과 Chl-a의 공간적인 분포에 주목하였다. 현장관측 자료의 분석 결과, 울산 부근의 연안용승이 발생 이전인 6월의 클로로필 a 농도의 피크는 전체 조사 정점에서 50 m 층에 보였고, 8월의 그 피크는 육지에 근접한 정점 4와 5에서는 10 m 그리고 그 외 정점은 30 m 층에 나타났지만 정점 5를 제외하고 그 농도는 6월보다 낮게 나타났다. 결과적으로, 클로로필 a 농도의 피크는 농도 차이는 있지만 8월이 6월보다 20-40 m 얇은 층에 형성되었고, 이것은 남풍계열의 바람에 의한 연안용승으로 하부층의 영양염 공급 등과 관계하는 것 같다. 위성관측 수온과 클로로필 a 농도는 음의 상관관계를 보였고, 냉수가 발생한 곳에서 클로로필 a 농도는 고농도를 나타내었다. 또한, 남풍계열의 바람에 의한 영향과 동한난류의 이안은 연안에서 발생한 냉수와 Chl-a 등을 외해로 이동시키는 역할을 하였다.

**핵심용어** : 동해, 연안용승, 냉수, 클로로필 a, 위성관측

**Abstract** : The objective of this paper is to explore the short-term variability of water temperature and chlorophyll a (Chl-a) derived from in-situ and satellite data (NOAA, SeaWiFS and QuikScat) in the upwelling region of the southeastern part of Korean Peninsula in June and August, 2007. Particularly we focused on the spatial variability of sea surface temperature(SST) and Chl-a in the East Korean Warm Current region. In the results of the in-situ data, the peaks of Chl-a in June was shown at a depth of 50 m. The peaks of Chl-a in August was shown at a depth of 10 m at the stations 4 and 5 near the land, and a depth of 30 m at the other stations. The Chl-a concentrations in August were also lower than those in June except for station 5. As a result, the peaks of Chl-a in August occurred at a depth of 20-40 m shallower than those of Chl-a in June. This indicates that the nutrient-rich water within the mixed layer depth may be immediately supplied by the coastal upwelling, which is due to the southerly component of wind. The relationship between SST and Chl-a showed a negative correlation, and the high concentration of Chl-a occurred in the cold water area. The southerly wind and the East Korean Warm Current influenced a remarkable offshore movement of the cold water and Chl-a near the coastal area.

**Key Words** : East Sea, Coastal Upwelling, Cold Water, Chlorophyll a, Satellite Observation

## 1. 서론

동해는 한국, 일본 그리고 아시아 대륙에 둘러싸인 해역으로 그 상층부는 극전선을 경계로 남부의 대마난류수역과 북부의 한류수역으로 구분된다. 대마난류는 대한해협을 통하여 고온·고염의 해수를 동해로 수송하고 전선이나 와동류 등의 형성에 기여한다. 대마난류의 구조는 많은 해양학자들에 의해 연구되어졌으며, 그 분지는 일본열도를 따라 흐르는 연안분기류와 한국의 연안을 따라 흐르는 동한난류로 크게 구분할 수 있다 (Fig. 1) (Suda and Hidaka, 1932; Kawabe, 1982; Katoh, 1994).

한국 동쪽 연안의 대륙사면을 따라 북쪽으로 흐르는 동한난류는 남쪽으로 흐르는 북한한류수와 북위 약 37-41°N 부근에서 만나서 극전선을 형성한다. 동한난류의 폭과 위치 등은 시간에 따라 변하지만 전 계절에 걸쳐 존재하고, 동계보다 하계에 더욱 강하게 나타난다. 동한난류의 주된 흐름에 위치한 한국의 남동부해역은 하계에 남풍계열의 바람과 함께 자주 발생하는 연안용승 지역으로서 잘 알려져 있다 (Lee, 1983; Lee et al., 1998; Suh et al., 2001; Lee et al., 2003). 특히 매년 하계에 발생하는 연안냉수는 울산-감포 해역에서 집중적으로 출현하는 것으로 알려져 있다 (An, 1974; Lee, 1978; Lee, 1983). 이러한 연안용승은 남풍계열의 바람에 의한 Ekman 수송으로 표층의 해수를 외해로 이동시킴과 동시에 영양염이 풍부한 찬 저층수를 표층으로 끌어 올린다. 바람에 의한 연안용승의 발생 기작은 남풍계열의 바람이 3m/sec로 7일간 지속되거나 4m/sec의 바람이 3일 이상 지속될 때 나타나는 것으로 보고되고 있다 (Seung, 1974; Lee, 1983). 또한, 울산-감포 해역의 연안용승은 동한난류로 인한 상·하층 해류간의 변동에 의한 등온선의 Baroclinic tilting과 연안 주변해역의 지형적 특징 및 포텐셜 와도 보존에 의한 동한난류의 해안으로부터 이류현상 등이 관계하고 있다 (Lee and Na, 1985; Lee et al., 1998).

해양표면에서 연안냉수나 수온전선과 같은 해양물리학적 현상은 NOAA AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) 열적외선 영상이 유용하게 활용된다. 한국 동해 남동부해역에서 NOAA AVHRR 영상을 이용한 해양표면의 연안냉수대 및 수온전선에 관한 연구는 일부 행해졌으며, 이러한 현상에 대한 모니터링을 위한 도구로서 열적외선 영상이 유용하다는 것은 잘 알려져 있다 (Lee et al., 1998; Suh et al., 2001; Kim et al., 2002; Lee et al., 2003). 한편, 해색영상은 위성에 탑재된 해색 측정용 센서로 해수를 통과한 가시영역대의 빛의 성분 변화를 감지하여 식물플랑크톤 색소농도나 부유물질 등을 추정한다. 특히 해색영상에서 추정되는 식물플랑크톤 현존량의 지표인 클로로필 a 농도는 연안용승과 관련된 저차생물생산 과정을 이해하기 위한 기초 자료로서 중요하다 (Kim et al., 2010).

본 연구에서는 하계 냉수대 발생과 관련하여 2007년 6월과 8월의 현장 및 위성에서 관측한 자료를 이용하여 연안용승이 거의 매년 발생하는 곳인 울산 주변 해역의 해양환경 특성을 살펴 보았다. 특히 본 연구에서는 하계 연안용승 발생 시기에 주목을

하여 동해 남부해역에서 수온과 클로로필 a 농도와의 관계를 규명하였다.

## 2. 자료 및 방법

본 연구에서는 2007년 6월과 8월의 경도 128-132°E와 위도 35-38°N을 대상해역으로 하여 NOAA 위성에서 추정된 해양표면수온(SST)과 SeaWiFS 해색센서에서 추정된 클로로필 a, QuikScat 마이크로파 위성에서 관측한 바람 자료와 현장관측 자료를 이용하였다 (Fig. 1). 현장관측 정점은 외해쪽 정점 1에서 연안쪽 정점 5까지 5마일 간격으로 조사하였다. 또한, 동해 연안을 따른 연안정지관측 표면수온은 국립수산과학원에서 매일 오전 10시에 각 측정소에서 관측한 6월과 8월 자료를 이용하였다.

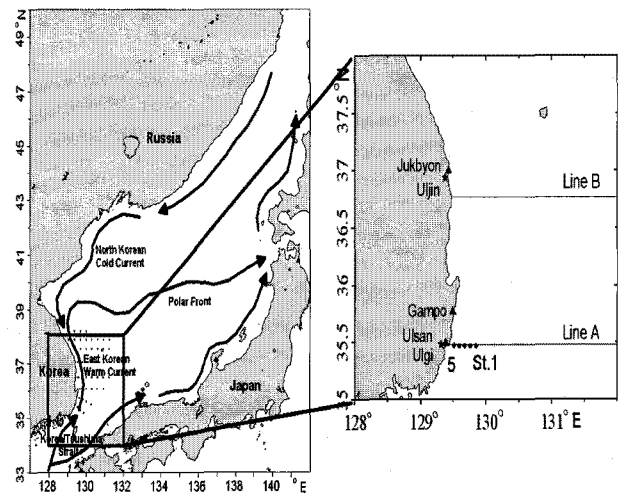


Fig. 1. Study area in the southeastern part of Korea. The symbols of triangle and asterisk indicate locations of observation sites for sea surface temperature at Ulgi, Gampo and Jukbyon, and wind data at Ulsan and Uljin.

본 연구해역에서 현장 관측은 하계 냉수대 발생 전후와 관련하여 하계 냉수대의 발생이 없던 시기인 2007년 6월 19일과 냉수대가 가장 강하게 발생한 시기 주변인 8월 17일에 울산 연안 해역에서 각각 CTD 관측 및 채수를 하였다. 채수는 클로로필 a (Chl-a), 입자성 부유물질(SPM), 용존무기질소(DIN), 인산염(PO<sub>4</sub>), 규산염(Si), 용존산소(DO)를 Fig. 1에 나타낸 5개 정점에서 6월에는 Chl-a를 제외한 SPM과 DIN은 시료의 문제로 표면, 10, 20, 30, 50 m의 자료만 이용하였다. 8월은 표면, 10, 20, 30, 50, 100 m 수심에서 각 요소들에 대하여 채수한 자료를 이용하였다.

해양물리학적 요소인 수온과 염분은 CTD(Seabird SBE 19-plus)로 연속 관측하였으며, DO는 Winkler-Azide 방법으로 측정하였다. 영양염류 중 질산질소(NO<sub>3</sub>-N)는 Cu-Cd 칼럼을 이용한 아질산 환원법, 아질산질소(NO<sub>2</sub>-N)는 NED 제 2 염산 염법으로 측정하였고, 질산질소와 아질산질소를 합하여 용존무

기질소(DIN)로 나타내었다. PO<sub>4</sub>와 Si는 몰리브덴 청범으로 발색하여 측정하였다. SPM은 현장에서 채취한 해수 1L를 실험실로 옮겨 무게를 알고 있는 45mm GF/C 여과지로 여과한 후 건조기에서 105 °C로 2시간 동안 건조한 다음 데시케이터에서 30분간 방냉하여 무게를 측정 후 여과 전과 후의 무게차로 계산되었다. Chl-a는 해수 시료 1L를 45mm GF/F 여과지(공극 0.45 μm)로 여과한 후 90% acetone 10 ml를 가하여 냉암소에서 24시간 동안 색소를 추출하였다. 클로로필 a 농도는 형광광도계(Fluorometer, Turner Design Model 10-AU)를 사용해 시료에 5% 염산액 1~2 방울을 첨가한 후 첨가전과 후의 형광 값을 측정하고 형광광도법으로 정량적인 농도 값을 산출하였다.

동해 남동부해역 연안 냉수대의 공간분포를 파악하기 위하여 현장관측 시기와 거의 일치하는 NOAA AVHRR 영상의 일 평균 해양 표면수온과 SeaWiFS 해색센서에서 추출한 Chl-a 자료를 이용하였다. 또한, 하루 2회(오전과 오후) 관측되는 QuikScat 위성의 바람 자료를 매일 평균하여 울산과 울진 부근의 연근해역에 대한 바람 성분을 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 연안정지관측 표면수온과 위성관측 바람

냉수대 발생 이전인 2007년 6월의 울기, 감포 및 죽변에서 매일 오전 10시에 조사한 연안정지관측 표면수온과 울산 및 울진의 바람 벡터의 시계열 변동을 Fig. 2와 Fig. 3에 각각 나타내었다. 연안정지관측 6월의 평균 수온은 6월 초순에서 말로 갈수록 수온이 증가하는 경향을 보였으나, 6월 21-26일 사이의 평균 수온은 상대적인 감소를 나타내었다. 세 지역에 대한 평균 표면수온과 지역별 수온과의 관계를 보면, 울기는 6월 전체 기간 동안 평균수온보다 0.5-1.5 °C 낮았으며, 감포는 6월 10-13일 사이에 평균수온보다 약 0.4-1.3 °C 낮은 것을 제외하고 0.5-2.4 °C 높은 경향을 보였다. 죽변은 10-12일 사이에 평균수온보다 약 1.5 °C 높은 것을 제외하고 거의 평균수온과 유사하였다.

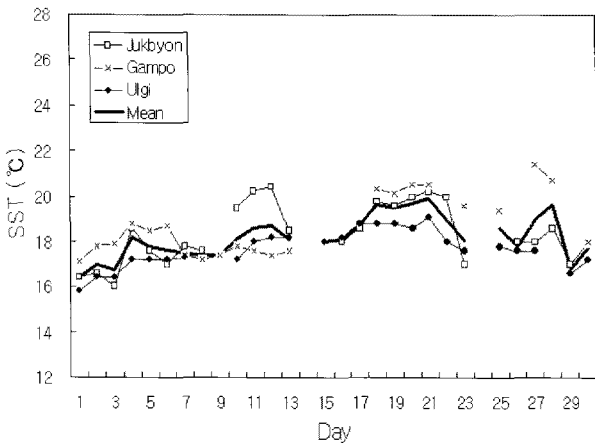


Fig. 2. Daily SST plot diagram at Ulgi, Gampo and Jukbyon during the period 1~30 in June, 2007.

동해 남부 및 중부 연안역의 울산과 울진의 바람성분을 보면, 6월 초순에는 남풍과 북풍계열이 3.5-7m/s로서 남풍이 좀 더 많았고, 6월 중순에는 바람이 혼재되어 4-7.5m/s 세기를 보였으나 북풍계열의 바람이 다소 우세했다. 6월 말경에는 두 지역에서 공히 남풍계열이 지배적이었으나, 바람의 세기는 2.5-7m/s로 6월 초순과 중순에 비해 상대적으로 조금 약하게 나타났다.

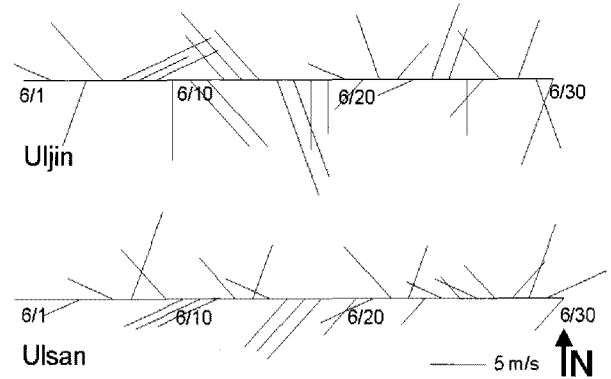


Fig. 3. Daily wind vector diagram at Uljin and Ulsan derived from QuikScat satellite data during the period 1~30 in June, 2007.

냉수대 발생 시기인 8월의 울기, 감포 및 죽변에서 매일 오전 10시에 조사한 연안정지관측 표면수온과 울산 및 울진의 바람 벡터의 시계열 변동을 Fig. 4와 Fig. 5에 각각 나타내었다. 8월의 평균 표면수온은 8월 3일부터 급격히 감소하기 시작하여 15일에 최저 수온(17.8 °C)을 보였고, 그 이후 증가하는 경향을 나타내었다. 평균 표면수온이 20 °C 이하인 저수온은 9-20일까지 지속되었으며, 이때의 수온은 외해역의 일반적인 8월의 하계 표면수온 범위인 26-30 °C 보다 5-10 °C 낮은 냉수가 해양표면에 발생한 것을 알 수 있다. 각 지역에 대한 수온변동을 보면, 울기를 제외한 감포와 죽변은 5일부터 급격한 수온의 감소를 보였고, 죽변의 경우는 15-17일에 최저 수온인 14 °C 이하를 나타내었다. 최대 수온 감소는 죽변에서 14-15일 사이에 4.8 °C/day를

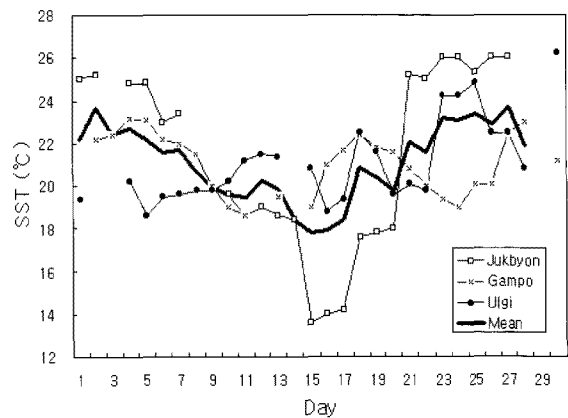


Fig. 4. Daily SST plot diagram at Ulgi, Gampo and Jukbyon during the period 1~30 in August, 2007.

나타내었다. 각 지역의 최저수온을 보면, 울기와 갑포는 11일과 16일에 각각 18.6 °C, 죽변은 15일에 13.6 °C를 보였다. 수온증가의 편차를 보면, 죽변은 17-18일과 20-21일 사이에 3.4 °C/day와 7.2 °C/day를 각각 나타내었다. 울기는 22-23일에 4.4 °C/day, 갑포는 15-16일에 3.0 °C/day의 수온증가 편차를 각각 나타내었다.

울산과 울진의 8월 바람 성분은 전 기간에 걸쳐서 8월 말과 일부 날짜를 제외하고 대체로 남풍계열이 지배적이었으며, 바람의 세기는 두 지역에서 약 3.5-9.5 m/s 범위이었다.

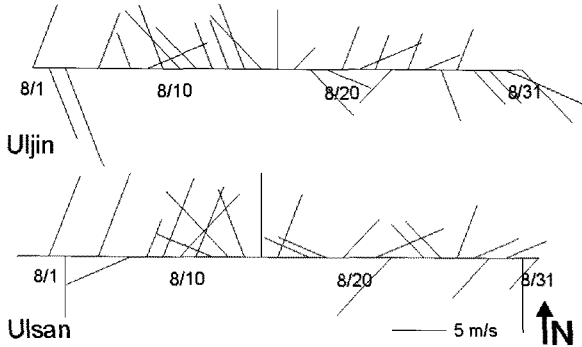


Fig. 5. Daily wind vector diagram at Uljin and Ulsan derived from QuikScat satellite data during the period 1~30 in August, 2007.

### 3.2. 냉수대 발생 전 연근해 해양환경 요소의 변동

하계 연안용승에 의한 냉수대가 발생하기 전인 6월 19일의 울산 부근 연안해역에서 현장 관측한 외해쪽 정점 1에서 연안쪽 정점 5까지 5개 정점에 대한 현장관측 수온, Chl-a, SPM 및 DIN의 연직 프로파일을 살펴보았다(Fig. 6). 해양표면에서 수온과 Chl-a의 분포 범위는 20-21 °C와 0.1-0.2 mg/m<sup>3</sup>을 각각 나타내었다. 각 정점에 대한 수온약층은 육지에 가까운 정점 5 (10-20 m)를 제외하고 수심 20-30 m 사이에 형성되었으며, 외해 정점 1-2에서는 수심에 따른 수온의 변화가 크게 나타나지 않았다. Chl-a 농도는 전 정점에서 최대 농도(0.6-0.9 mg/m<sup>3</sup>)가 수심 50 m 층에 나타났고, 육지에 가까운 정점 4와 5에서 상대적으로 높은 농도(0.8-0.9 mg/m<sup>3</sup>)를 보였다. SPM은 표면에서 1.4-2.2 mg/L 범위이며, 외해 1-2 정점보다 연안의 3-5 정점에서 농도가 높게 나타났다. DIN 농도는 표면에서 1.8-3.7 μM 범위이며, 육지에 가까운 정점 5는 수심 30 m에서 22.5 μM로서 농도가 가장 높고, 그 외 정점은 수심 50 m에서 9-21 μM 범위로서 표면보다 4-10배 높게 나타났다.

현장 관측한 연근해의 수온과 Chl-a의 공간적인 분포를 살펴보기 위하여 위성에서 관측한 영상을 이용하였다. 현장 관측 시기와 같은 일자의 위성 영상은 구름의 영향 등으로 없어서 현장 관측 시기와 1일 정도 차이가 나지만 2007년 6월 20일의 위성 영상에서 추출한 동서간 SST와 Chl-a의 수평 프로파일을 분석하였다(Fig. 7과 Fig. 8).

Chl-a 영상은 동해 남부 연안해역을 제외하고 구름에 의한

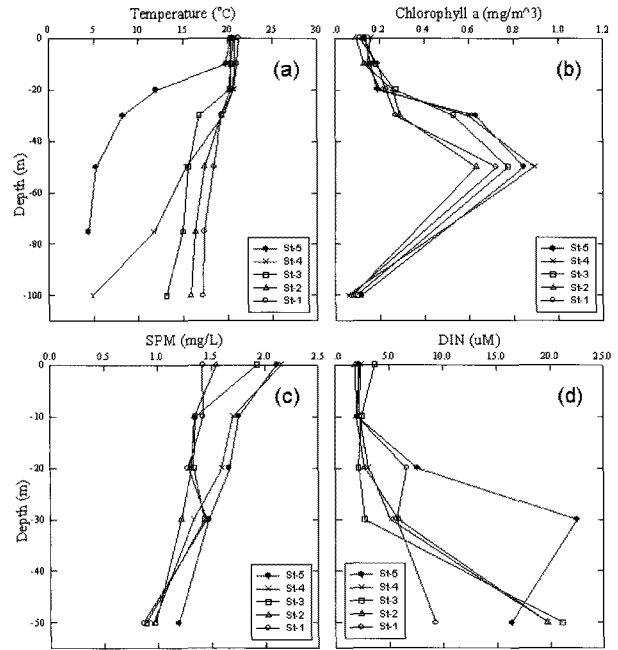


Fig. 6. Vertical profiles of water temperature (°C, a), chlorophyll a (mg/m<sup>3</sup>, b), suspended particle matter (mg/L, c) and dissolved inorganic nitrogen (μM, d) at the five stations along the 35.5°N in Ulsan on June 19, 2007.

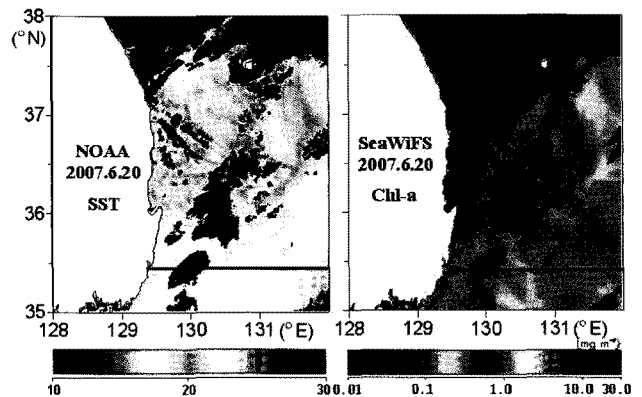


Fig. 7. SST and Chl-a derived from NOAA and SeaWiFS on June 20, 2007.

영향으로 뚜렷한 공간적인 분포 특성을 볼 수 없었으며, 구름의 영향이 적게 나타난 SST 영상에서는 포항 이북의 동해 중부 연안해역 가까이에서 낮은 수온이 관측되었다(Fig. 7). SST와 Chl-a에 대한 동서간 Line A(Fig. 1)의 수평단면도를 보면, SST가 높은(낮은) 곳에는 Chl-a 농도가 낮은(높은) 음의 상관 관계를 보였다(Fig. 8). 특히, 육지에서 연안 5km 이내의 SST가 상대적으로 낮은(21 °C) 곳에서 Chl-a 농도는 약 0.6 mg/m<sup>3</sup>으로 동한난류가 위치하고 있는 외해역(0.3 mg/m<sup>3</sup>)보다 2배 정도 높은 농도를 보였다. Chl-a의 농도는 연안해역에서 외해역으로 갈수록 농도의 차가 거의 없지만, SST는 131°E에서 동쪽으로

다중위성 및 현장관측을 이용한 동해남부 연안용승 발생 이후의 해양환경 특성

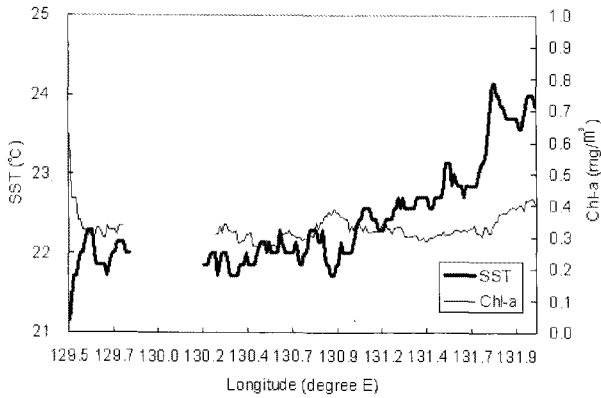


Fig. 8. A profile lines for SST(thin solid line) and Chl-a(thick solid line) at Line A on June 20, 2007 as shown in Fig. 6.

갈수록 수온이 증가하여 132°E 부근 해역에서는 약 24 °C로서 연안보다 3 °C 높게 나타났다.

동해 전 해역의 근해에서 춘계 색소농도(Chl-a)의 증식은 거의 4월에 극전선을 중심으로 남부해역에서 발생하고, 5-6월에는 그 이북해역에서 발생한다(Kim et al., 2000). 한편, 연안의 경우는 육상에서 공급되는 영양염류에 의해 지역에 따른 차이는 있지만 Chl-a의 농도가 연중 높게 나타난다. 울산 연안의 경우는 수온의 연직 분포로 보았을 때, 육지에 가까운 곳에서는 성층이 잘 발달되어 있으나 외해는 성층의 발달이 미약하며, 표면의 Chl-a 농도 역시 육지에 인접한 곳에서 상대적으로 약간 높았으나 그 농도의 차이는 크게 나타나지 않았다. 표면의 Chl-a 농도의 저하는 영양염(DIN)의 농도와 잘 일치하였으며, 위성에서 관측한 해양표면의 Chl-a 농도도 역시 육지에 접한 연안을 제외하고는 거의 낮은 농도를 외해까지 유지하였다(Fig. 8). 표면 부근의 Chl-a 농도의 저하는 춘계에 식물플랑크톤의 영양염 이용에 따른 증식 이후 영양염 고갈과 함께 본 연구에서는 조사를 수행하지 않았지만 동물플랑크톤의 포식 등에 의한 요인으로 Chl-a가 감소된 것으로 생각할 수 있다(Lee et al., 2004). 그러나 연안용승에 의한 영양염 등이 표층에 공급되더라도 그 지속시간이 너무 짧을 경우는 저층에서 올라온 영양염이 주변의 빈영양 해역과 빠르게 섞여 연안역의 식물플랑크톤이 증가하지 않을 수도 있다(Furuya et al., 1896).

위성관측 해양표면과 달리 현장에서 관측한 연안해역의 수심에 따른 Chl-a 농도는 Fig. 6에 나타난 바와 같이 영양염 농도가 급격하게 증가하기 시작하는 수심 30 m에서 그 농도가 증가하기 시작하여 수심 50 m에서 각 정점에서 공히 최대치를 나타내었다. 이 시기는 일사량의 증가로 표면 하부층까지 광이 도달하여 임계심도가 깊게 되고, 동계의 활발한 연직혼합에 의한 충분한 영양염류와 함께 일사량과 수온의 증가가 식물플랑크톤이 증식할 수 있는 조건을 이루어 수심 30-50 m 층에 고농도가 나타난 것으로 생각된다.

3.3. 냉수대 발생 시 연근해 해양환경 요소의 변동

하계 연안용승에 의한 냉수가 발생한 8월 17일에 울산 부근 해역의 5개 정점에 대하여 현장 관측한 해양표면의 수온 분포 범위는 21-28 °C 이었으며, 연안 정점 3-5와 외해 정점 1-2 사이의 수온 차이는 약 5 °C 이상을 보였다(Fig. 9). 6월의 현장 관측 결과와 달리 8월의 연안 정점 3-5는 표층 혼합층이 거의 사라진 것이 특징적이다. 일반적으로 하계는 강한 일사량의 영향으로 수온 약층이 강하게 형성되고 표층 혼합층도 얇아지는 시기이며, Kim and Isoda(1998)는 동해 근해의 하계 혼합층 깊이가 8월에 약 10 m 이내인 것으로 제시한 바 있다. 본 연구에서도 표층 혼합층의 깊이는 전 정점에서 10 m 이내에 형성되었으며, 상대적으로 강한 수온약층은 연안의 정점 1과 2에서는 수심 10-20 m, 외해인 정점 4는 10-30 m, 정점 5는 수심 30-50 m 사이에서 형성되었다.

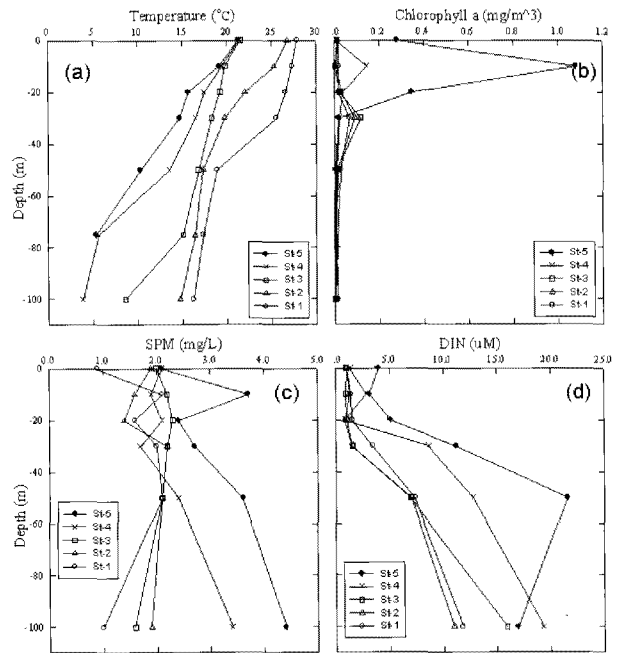


Fig. 9. Vertical profiles of water temperature (°C, a), chlorophyll a (mg/m<sup>3</sup>, b), suspended particle matter (mg/L, c) and dissolved inorganic nitrogen (µM, d) at the five stations along the 35.5°N in Ulsan on August 17, 2007.

또한, 연안 정점 3-5는 표면과 10 m 사이에서 2°C 수온차를 보였고, 표면과 20 m 사이에서는 3-6°C의 수온차를 나타내었다. 특히 육지에서 인접한 정점 5는 저층에서 표면까지 수온의 경사가 급격하게 나타났다. 반면에 외해 정점 1과 2는 표면에서 20 m와 30 m에서 각각 2°C 수온차를 보였다. Chl-a 농도는 연안 정점 4와 5를 제외하고 표면에서 저층까지 0.2 mg/m<sup>3</sup> 이하의 낮은 농도를 나타내었으나, 연안 정점 5는 수심 10 m에서 다른 정점에 비해 상당히 높은 농도(1.1 mg/m<sup>3</sup>)를 나타내었다. SPM은 표면에서 약 1-2 mg/L 범위이며, 수심이 깊어질수록

연안 정점 4와 5는 외해 정점 1-3 보다 높게 나타났다. DIN 농도는 표면에서 약 1-4  $\mu\text{M}$  범위이며, 수심 30m보다 깊어질수록 그 농도는 증가하였다. 연안 정점 4와 5는 수심 10m 부근에서 농도가 3 mg/L로 저층의 농도보다 상대적으로 낮지만 외해 정점 1-3보다 약 3배 정도 높게 나타났다.

하계 연안용승에 의한 냉수 발생 전인 6월 관측에서는 Chl-a 고농도의 피크가 수심 50m에 형성되었으나, 냉수 발생이 진행 중인 8월 관측에서는 연안과 외해 정점의 피크가 10m와 30m로 알려졌다. 이것은 수온의 변동과 직접적인 관계가 있으며, 6월 관측에서는 혼합층이 정점 5에서 10m, 그 외 정점에서는 20m에서 형성된 것이 8월 관측에서는 정점의 차이는 있지만 혼합층의 깊이도 알려졌다, 정점 3과 4를 중심으로 연안과 외해로 구분되어 수온의 차이는 5  $^{\circ}\text{C}$  이상을 나타내었다. Kim et al.(2003)이 동해 외해역에서 조사한 일반적인 Chl-a 농도의 피크는 춘계에 30m, 하계에 50m로 춘계보다 하계에 그 피크가 나타나는 수심이 깊게 형성되었다. 그러나 본 연구해역에서는 춘계보다 하계에 Chl-a 농도의 피크가 육지에 근접한 정점 4-5에서 10m, 외해 정점에서 30m로서 Kim et al.(2003)이 동해에서 조사한 일반적인 근해의 Chl-a 농도의 피크 수심과 차이는 있지만 20-40m 더 깊게 나타났다. 이와 같은 Chl-a 농도의 피크 수심의 차이는 연안 용승에 의한 영양염류 등의 증가 요인 등이 Chl-a 농도 변화에 직접적인 변화를 준 것으로 생각된다. Lee et al.(2004)에 의하면 용승해역에서 식물플랑크톤의 변화는 용승 발생 약 3일 후에 발생한다고 하였으며, 현장조사 시기는 연안정지관측 자료에서 본 바와 같이 본 조사 시기 3일 이전부터 연안용승이 지속되었기 때문에 남풍계열의 바람 등을 고려할 때 영양염 증가로 인해 Chl-a가 충분히 증가하였을 것으로 생각할 수 있다.

위성 영상의 장점은 거의 표면에 가까운 자료이지만, 해류의 흐름에 따른 수온 및 Chl-a의 공간적인 분포 양상을 잘 볼 수

있는 장점이 있다. 따라서 하계 연안용승 발생에 따른 해양표면 냉수대의 공간적인 분포 양상을 조사하기 위하여 NOAA SST 영상에서 추출한 북위 36.5 $^{\circ}\text{N}$  기준의 동경 129-132 $^{\circ}\text{E}$  선상의 수온을 분석하였다(Fig. 10).

하계 냉수대의 시공간 분포를 보기위하여 수평분포 단면의 기준을 어디에 두느냐에 따라서 수온의 확장과 축소에 대한 차이는 있지만, 본 연구에서는 SST 영상을 기준으로 대체로 36.5 $^{\circ}\text{N}$ 을 경계로 동서 확장을 잘 볼 수 있기 때문에 선택하여 살펴보았다. NOAA SST 영상에서 추출한 수온의 공간적 분포를 보면, 11-14일까지는 동경 130.5 $^{\circ}\text{E}$  부근에 25  $^{\circ}\text{C}$  이하의 수온이 분포하였으나 15-17일 사이는 131.5 $^{\circ}\text{E}$  부근까지 이 수온대가 확장된 것을 알 수 있다. 그 이후에는 25  $^{\circ}\text{C}$  이하의 수온이 약화되었으나, 22-23일에 다시 약한 냉수가 발생한 후 소멸되는 양상을 보였다. 본 연구에서 현장 관측한 시기는 위성 영상에서 분석한 자료에 의하면 강한 냉수가 발생한 시기는 아니지만, 냉수의 발생이 진행 중인 시기인 것을 알았다.

SST 영상에서 관측한 냉수대와 Chl-a와의 관계를 살펴보기 위하여 두 영상이 동시에 비슷한 시기에 존재한 2007년 8월 18일의 SST와 Chl-a의 영상과 이들 영상에서 추출한 Line A와 Line B의 수평 프로파일을 분석하였다(Fig. 11, Fig. 12).

위성관측 SST와 Chl-a의 공간적 분포를 보면, 둘 사이의 관계는 6월과 유사하게 음의 상관관계를 보였으며, 특히 북위 36-37 $^{\circ}\text{N}$ 에서 동서 방향으로 낚시 바늘 형태로 분포한 저수온의 SST 분포 형태는 Chl-a의 고농도 분포와 잘 일치하였다(Fig. 10). 이것은 Fig. 5에 제시된 바와 같이 지속적인 남풍계열 바람의 영향에 의한 표층 해류의 흐름 방향과 대응한다. SST의 분포는 육지에 가까운 연안 부근과 외해쪽 낚시 바늘 모양의 머리 부분에서 19-25  $^{\circ}\text{C}$  로 낮았으며, 그 외 동한난류해역에 해당되는 외해역은 27-30  $^{\circ}\text{C}$ 의 높은 수온분포를 나타내었다. Chl-a 농도는 수온분포와 유사하게 수온이 낮은 연안 부근과 표면 냉수대가 분포하는 곳에서 높은 농도를 나타내었다. 특히, 낙동강에서 연계된 연안을 따른 Chl-a의 고농도가 띠 형

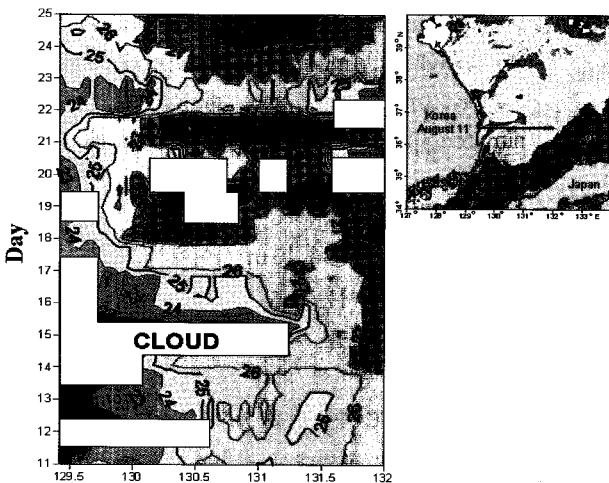


Fig. 10. Daily SST images along the Line B during the period 11~25 August, 2007. White blank indicate the cloud datas.

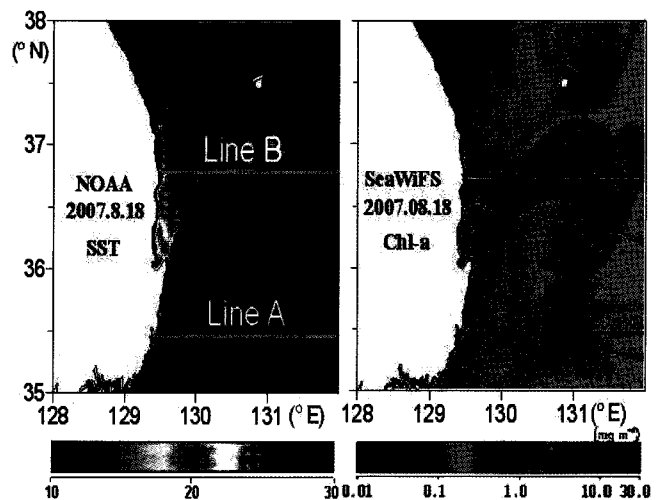


Fig. 11. SST and Chl-a derived from NOAA and SeaWiFS on August 18, 2007.

## 다중위성 및 현장관측을 이용한 동해남부 연안용승 발생 전후의 해양환경 특성

태로 저수온과 고수온 사이에 형성되어 있으며, 이 고농도는 동경 131°E 외해쪽에서 5 mg/m<sup>3</sup> 이상의 높은 농도로 분포하였다.

위성 영상에서 제시된 수온과 Chl-a의 공간분포를 좀 더 자세히 살펴보기 위하여 Line A와 Line B의 수평 단면도를 조사하였다. SST와 Chl-a 영상에서 추출한 Line A의 수온은 26-30°C 범위이며, Chl-a는 수온이 27°C 이하의 육지에 근접한 연안해역에서 1.0 mg/m<sup>3</sup> 이상의 고농도를 보였다(Fig. 12). 연안해역을 제외한 해역은 0.3-0.5 mg/m<sup>3</sup>의 범위로서 저농도를 나타내었다. 반면에 강한 연안 냉수대가 동한난류의 흐름에 의해 외해쪽으로 확장되어 있는 곳인 북위 36.8°N에 위치한 Line B는 수온이 18-28°C 범위로서 울산 부근 해역보다 낮은 수온분포를 나타내었고, Chl-a 농도 분포는 연안해역에서 동쪽으로 다소 떨어진 곳(130.0-130.2°E와 131.2-131.5°E)의 수온이 상대적으로 낮은 해역에서 약 1.5-4.0 mg/m<sup>3</sup>의 농도를 보였다.

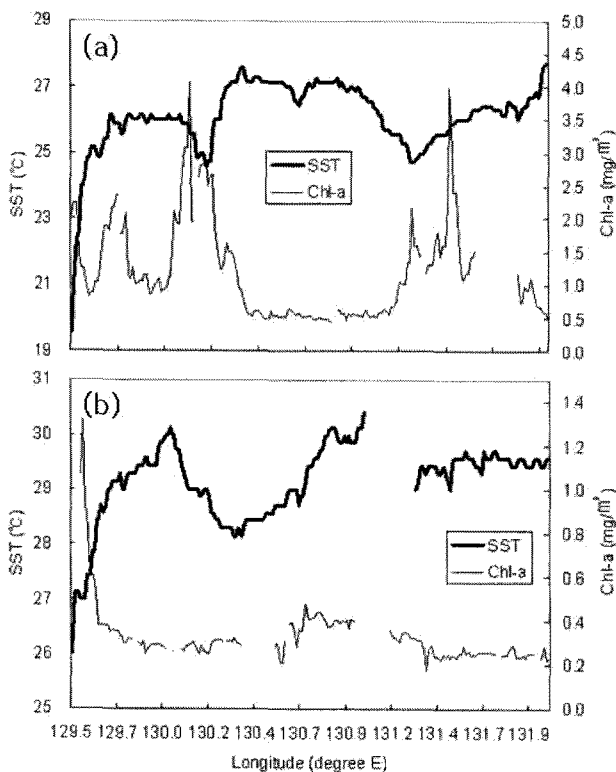


Fig. 12. A Profile lines for SST(°C, thick solid line) and Chl-a(mg/m<sup>3</sup>, thin solid line) at Line B (a) and Line A (b) on August 18, 2007 as shown in Fig. 10.

연안용승에 의해 형성된 표면의 냉수가 표층 해류의 흐름을 따라 떠 형태로 동쪽으로 이동하면서 그 수온은 점차 혼합에 의해 낮아졌지만, 이것이 연안에서 형성된 것임을 단적으로 지지하는 것이 Chl-a의 공간적인 분포이다. 즉, 연안용승에 의해 형성된 냉수가 외해역으로 이동하면서 수온이 낮은 부분에 Chl-a의 농도가 높은 것은 그 수괴가 계속 유지되고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 수온이 낮은(높은) 곳에서는 수괴의 안정도가 낮아(높아) 영양염 이용이 증가(감소)하기 때문에 높은

Chl-a의 고농도(저농도)가 나타난다는 Ishizaka et al.(1992)의 결과와 Kim et al.(2002)이 동한난류 주변 해역에서 분석한 색소농도의 분포와 잘 일치한다. 또한, 위성관측 수온과 Chl-a의 공간분포는 Lee(1983)와 Lee et al.(2003)에서 밝힌 바와 같이 Fig. 4의 지속적인 남풍계열 바람의 영향에 의한 표층 해류의 흐름 방향과도 부합하였다.

연안정지관측 수온은 육지에 가까운 곳에서 측정하기 때문에 Fig.10과 Fig. 11에 제시된 위성관측 수온과 공간 해상도의 차이는 있지만 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다. Fig. 4에 제시된 연안정지관측 수온은 위성관측 시기인 8월 18일에 울기에서 수온의 증가를 보였으나, 그 북쪽 동해 연안인 죽변에서는 15-20일까지 강한 연안 용승에 의한 냉수가 발생하고 있다. 이것은 본 연구에서 위성관측 영상을 제시하지는 않았지만, 울기 부근 해역은 8월 17일 SST 영상에서 21°C 이하로 Fig. 4의 연안정지관측 수온과 일치하였다. 그리고 본 연구에서 제시한 그 다음 날(8월 18일)의 영상에서는 울기 부근(Line A)의 저수온은 사라지고 포항 부근에서 울기까지 20-23°C 이하로 외해역에 존재하는 28°C 이상의 수온보다 5°C 이상 낮은 냉수 발생해역과 연안정지관측 자료와 잘 대응하는 것을 알았다. 같은 남풍계열의 바람에 울기와 죽변에서의 수온 차이는 Lee et al.(1998)이 제시한 바와 같이 해저지형의 영향으로서 대한해협부터 등수심선을 따라 흐르는 동한난류의 포텐셜 와도 보존에 의해 해류가 북상하면서 죽변 연안에서 외해로 이루어지는 동한난류의 형태 때문인 것으로 생각된다.

## 4. 결론

하계 동해남부 주변해역의 냉수 분포는 이전의 연구에서 밝혀진 바와 같이 남풍계열의 바람에 의한 연안용승과 관계가 있으며, 이 냉수는 해류의 흐름을 따라 연안에서 외해 약 300km까지 분포하는 것을 위성관측에서 알 수 있었다. 본 연구에서 조사한 위성관측 수온과 Chl-a 영상을 분석한 결과, 남풍계열의 바람에 의한 영향과 동한난류의 흐름이 연안에서 발생한 냉수와 Chl-a 등을 외해로 이동시키는 역할을 하고 있는 것도 알았다. 위성영상은 해양표면에서의 해양물리 및 해양생물의 시공간적인 분포를 조사하는 데 유용하게 활용된다. 그러나 Case-I 해역과 같은 맑은 해역에서는 위성자료의 정도가 높지만, Case-II와 같은 탁한 해역과 연안에서는 현장관측 자료에 의한 자료의 검·보정이 좀 더 이루어져야 할 것으로 생각된다.

연안용승에 의한 냉수는 자원의 변동에도 영향을 미친다. 동해 연안에는 부어류와 오징어 등 상업적으로 중요한 어류 등이 많이 회유하고 있으며, 이러한 것들은 일차적으로 수온에 영향을 많이 받기 때문에 해황 변동을 파악하는 것이 어황예측에 있어서 대단히 중요하다. 향후 연안용승에 의한 냉수 발생과 자원의 변동을 파악하기 위하여 한 번의 조사 결과로 판단을 내리기 보다는 집중적으로 연속 해양 관측을 실시하여 냉수의 발생과 소멸에 대한 기작을 먼저 파악하고, 그 영향 범위를 예측

할 수 있는 해양 물리-생태계 모델을 결합한 3차원 수치모델에 의한 접근법이 필요할 것으로 생각된다.

### 감사의 글

본 논문은 국립수산물과학원 동해수산연구소 “동해 기후변화 거점 모니터링 시스템 구축(RP-2010-ME047)” 연구 과제의 일환으로 수행되었습니다.

### 참고 문헌

- [1] An, H. S.(1974), On the cold water mass around the southeast coast of Korean Peninsula. J. Oceanogr. Soc. Korea, Vol. 9, pp. 10-18.
- [2] Furuya, K., Takahashi, and Nemoto. T.(1986), Summer phytoplankton community structure and growth in a regional upwelling area off Hachijo Island, Japan. J. Exp. Mar. Biol. Ecol., Vol. 96, pp. 43-55.
- [3] Ishizaka, J., H. Fukushima, M. Kishino, T. Saino, and M. Takahashi(1992), Phytoplankton pigment distributions in regional upwelling around the Izu Peninsula detected by coastal zone color scanner on May 1982. J. Oceanogr., Vol. 48, pp. 305-327.
- [4] Katoh, O.(1994), Structure of the Tsushima Current in the southwestern Japan Sea. J. Oceanogr., Vol. 50, pp. 317-338.
- [5] Kawabe, M.(1982), Branching of the Tsushima current in the Japan Sea. I. Data analysis. J. Oceanogr., Vol. 38, pp. 95-107.
- [6] Kim, S. W. and Y. Isoda(1998), Interannual variations of the surface mixed layer in the Tsushima Current region. Umi to Sora. Soc., Vol. 74, pp. 11-12.
- [7] Kim, S. W., Y. Isoda, and T. Azumaya(2003), Seasonal variation of phytoplankton in the East Sea using a surface mixed layer ecosystem model. J. Korean Fish. Soc., Vol. 36, pp. 178-186.
- [8] Kim, S. W., S. Saitoh and D. S. Kim(2002), Spatial distribution of pigment concentration around the East Korean Warm Current region derived from satellite data. J. Korean Fish. Soc., Vol. 35, pp. 265-272.
- [9] Kim, S. W., S. Saitoh, J. Ishizaka, Y. Isoda and M. Kishino(2000), Temporal and spatial variability of phytoplankton pigment concentrations in the Japan Sea derived from CZCS images. J. Oceanogr., Vol. 56, pp. 527-538.
- [10] Kim, T. R., J. J. Park and S. W. Kim(2010), Spatial distribution of pigment concentration around the East Korean Warm Current region derived from satellite data. Korean J. Remote Sensing, Vol. 26, pp. 109-114.
- [11] Lee, C. R., C. Park and C. H. Moon(2004), Appearance of cold water and distribution of zooplankton off Ulsan-Gampo area, eastern coastal area of Korea. J. Korean Fish. Soc., Vol. 9, pp. 51-63.
- [12] Lee, D. K., J. I. Kwon and S. B. Hahn(1998), The wind effect on the cold water formation near Gampo-Ulgi coast. J. Korean Fish. Soc., Vol. 31, pp. 359-371.
- [13] Lee, J. C. and J. Y. Na(1985), Structure of upwelling off the southeast coast of Korea. J. Oceanogr. Soc. Korea, Vol. 20, pp. 6-19.
- [14] Lee, J. C.(1983), Variation of sea level and sea surface temperature associated with wind-induced upwelling in the southeast coast of Korea in summer. J. Oceanogr. Soc. Korea, Vol. 18, pp. 149-160.
- [15] Lee, J. C., D. H. Kim and J. C. Kim(2003), Observations of coastal upwelling at Ulsan in summer 1997. J. Oceanogr. Soc. Korea, Vol. 38, pp. 122-134.
- [16] Lee, K. B.(1978), Study on the coastal cold water near Ulsan. J. Oceanol., Soc. Korea, Vol. 13, pp. 5-10.
- [17] Seung, Y. H.(1974), A dynamic consideration on the temperature distribution in the east coast of Korea in August. J. Oceanogr. Soc. Korea, Vol. 9, pp. 52-58.
- [18] Suda, K. and K. Hidaka(1932), The results of simultaneous oceanographical investigation in the Japan Sea in summer, 1929, J. Oceanogr., Vol. 3, pp. 291-375.
- [19] Suh, Y. S., L. H. Jang and J. D. Hwang(2001), Temporal and spatial variations of the cold waters occurring in the eastern coast of the Korean Peninsula in summer season. J. Korean Fish. Soc., Vol. 34, pp. 435-444.

원고접수일 : 2010년 10월 18일

원고수정일 : 2010년 11월 08일

게재확정일 : 2010년 12월 23일