

## 위성원격탐사에 의한 동한난류 주변 해역의 색소농도 공간적 분포

- 1980년 5월 관측을 중심으로 -

김상우<sup>+</sup> · 齊藤誠一\* · 김동선\*\*

부경대학교 위성정보과학연구소, \*북해도대학 수산학부

\*\*부경대학교 해양산업개발연구소

## Spatial Distribution of Pigment Concentration Around the East Korean Warm Current Region Derived from Satellite Data

- Satellite Observation in May 1980 -

Sang-Woo KIM<sup>+</sup>, Sei-ich SAITOH\* and Dong-Sun KIM\*\*

*Institute of Satellite Information Science, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea*

*\*Dept. of Fisheries and Marine Sciences, Hokkaido University, Hakodate 041, Japan*

*\*\*Research center for ocean industrial development, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea*

Spatial distribution of Phytoplankton Pigment Concentration (PPC) and Sea Surface Temperature (SST) around the East Korean Warm Current (EKWC) was described, using both Coastal Zone Color Scanner (CZCS) images and Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) images in May, 1980. Water mass in this region can be classified into five categories in the horizontal profile of PPC and SST, nLw (normalized water-leaving radiance) images: (1) coastal cold water region associated with concentrations of dissolved organic material or yellow colored substances and suspended sediments, (2) cold water region of thermal frontal occurred by a combination of phytoplankton absorption and suspended materials, (3) warm water overlay region by the phytoplankton absorption than the suspended materials; (4) warm water region occurred by the low phytoplankton absorption, and (5) offshore region occurred by the high phytoplankton absorption. In particular, the highest PPC ( $>2.0 \text{ mg/m}^3$ ) area appeared in the CZCS and AVHRR images with a band shaped distribution of the thermal front and ocean color front region, which is located the coastal cold waters along western thermal front of the warm streamer of the EKWC. In this region, the highest PPC occurred by a combination of the high absorption of the phytoplankton (443 nm) and highest reflectance of suspended materials (550 nm). Another high PPC ( $\approx 1.6 \text{ mg/m}^3$ ) appeared in the warm water overlay region inside warm streamer. High phytoplankton pigment concentration of this region was corresponding to the short wavelength of 443 nm, which represented phytoplankton absorption of the CZCS image.

**Key words:** Phytoplankton pigment concentration, Normalized water-leaving radiance, Thermal front, Ocean color front, East Korean Warm Current

### 서 론

동해의 가장 일반적인 해류 분포 특성은 대한해협으로 유입된 대마난류의 분기를 통해 설명된다. 즉, 대마난류의 일부는 일본 혼슈를 따라서 북상 (연안분기류)하고, 나머지 일부는 한국 동해안을 따라 북상하여 북위 38~41도 부근에서 동서로 존재하는 극전선이라고 부르는 수온전선 (thermal front)을 형성하면서 쓰가루 해협과 소야 해협을 통하여 북태평양과 오호츠크해로 유출된다 (Fig. 1). 특히, 한국 동해 연안해역은 울릉도와 속초 근방에서 난수성 소용돌이가 항상 존재하며 (Ahn et al., 1994), 이 해역은 기초생산뿐만 아니라 어장의 형성에도 중요한 역할을 한다.

동해는 정어리의 산란·재생산과 동중국해를 산란장으로 하고 있는 오징어, 고등어, 꽁치 등의 회유어의 먹이 공급로 역할을 하고 있는 중요한 해역이다. 이들 어류는 계절에 따라 동해 극전선을 경계로 남북방향으로 큰 색이 회유를 한다 (森, 1974; 江波, 1974;

川畠, 1991). 이것은 동물플랑크톤을 통해 어류의 생활사에 큰 영향을 미치는 식물플랑크톤의 시공간적 변동과 관련되어 있을 것으로 생각된다. 따라서, 동해의 식물플랑크톤 현존량을 파악하는 것은 저차생물 생산과정 및 그 생산량을 이해하기 위한 기초로서, 또 먹이환경을 통하여 유용어류의 회유시 생산·성장에 미치는 영향을 평가·예측하는 데에도 중요한 문제로 사료된다.

동해안의 동한난류 해역과 같은 중규모 해역을 선박 관측을 통하여 그 시공간적 변동 특성을 구명하기는 어렵다. 최근 인공위성 원격탐사기술의 발달과 함께 해양 표층의 광범위한 해역에 대한 수온과 식물플랑크톤 색소농도의 동시 측정이 가능하게 되었다. 인공위성 적외선 영상으로 흐름과 수온의 변동 양상을 관측할 수 있으며, 해색 (ocean color) 영상을 이용하여 수온뿐만 아니라 식물플랑크톤의 색소농도도 동시에 관측할 수 있어 해양 원격탐사는 생물해양학 및 물리해양학적 측면에서도 매우 중요한 도구로 그 위치를 자리잡고 있다. 인공위성 적외선 영상을 이용한 동한난류 변동 조사는 여러 연구자들에 의한 연구 (Toba et al., 1984; Isoda and Saitoh, 1988, 1993; Isoda et al., 1991)에서 잘 설명되어 있다.

<sup>+</sup> Corresponding author: swkim@mail1.pknu.ac.kr

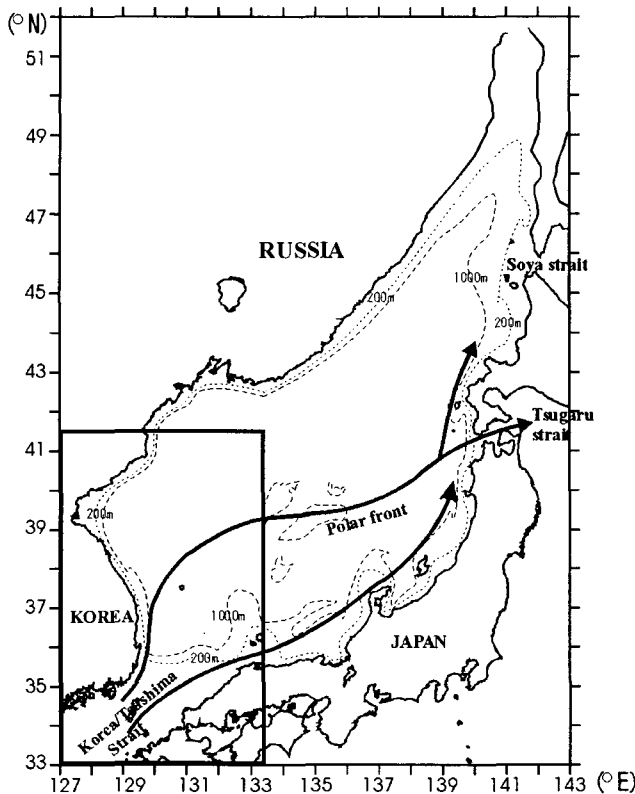


Fig. 1. Schematic map of the surface circulation in the southern regions of the East/Japan Sea. The black line box indicates the study area in the East/Japan Sea between 33°N and 41.5°N in latitude and 127°E and 133.5°E in longitude.

특히, 이들 연구에서는 적외선 영상이 극전선의 수평적인 수온구조 조사와 중규모 난수 소용돌이의 수평분포 및 일부 난수 소용돌이에 있는 소용돌이 필라멘트의 확장을 파악하는데 유용하다는 것을 밝혔다.

해색 원격탐사 (ocean color remote sensing)는 해수 중에 포함된 다양한 물질의 양과 종류를 위성이나 항공기 등에 탑재된 센서로 측정된 가시광선 영역의 water-leaving radiance 자료로부터 추출하는 것으로, 수중으로 입사한 태양광이 해수 밖으로 반사되어 나오는 복사휘도 (radiance) 스펙트럼 즉 해색이 변하는 원리를 이용한 것이다. 해색 위성의 가장 큰 장점은 넓은 해역의 색소농도 변동을 동시에 파악할 수 있다는 것이다. 1978년 11월부터 1986년 6월까지 운용된 최초의 해색 위성인 Nimbus-7에 탑재된 CZCS (coastal zone color scanner)는 해양표면 근처 색소농도의 후방산란 복사휘도 스펙트럼과 1 km 공간규모의 해색 분포 종관 구조를 제공해 주었다 (e.g., Gordon et al., 1983). 또한 해색 위성은 많은 연구자들에 의해 전지구 규모나 지역 규모에 대한 해양표면에서의 식물플랑크톤 증식 (bloom)을 연구하는데 중요하다는 것이 증명되었다 (Yentsch and Phinney, 1985; Arnone and Violette, 1986; Matsumura and Fukushima, 1988; Eslinger et al., 1989; Ishizaka et al., 1992; Fukushima and Ishizaka, 1993; Obata

et al., 1996; Kim et al., 2000). Yoder et al. (1993)과 Banse and English (1994)는 CZCS 영상을 이용하여 전지구 규모의 색소농도의 계절변화를 연구한 바 있으며, 최근에 Kim et al. (2000)은 동해 전체 해역의 식물플랑크톤 색소농도의 시·공간변동을 EOF (empirical orthogonal function)해석과 임계심도 (critical depth) 이론을 사용하여 춘·추계 식물플랑크톤 증식의 발생시기에 대하여 밝힌바 있다. Matsumura and Fukushima (1988)는 해양전선과 수괴를 식별하는데 CZCS에 관측한 식물플랑크톤 색소농도와 표면수온 자료를 이용하여 이온이수괴 (異溫異水塊), 수렴성 (收束性)전선, 용승성 (湧昇性)전선, 동온이수괴 (同溫異水塊), 태양복사에 의한 표면 수온상승, 난수의 중첩에 대한 6개 모델을 제시하여 해양표면에서의 물리·생물학적인 과정을 이해하는데 해색 위성의 효율성을 보여주었다. 그러나 해색 위성 자료의 유용성에도 불구하고, 한국 동해 연안해역에서 물리·생물학적인 해석에 이러한 자료를 이용한 사례는 부족한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 1980년 5월에 관측된 CZCS와 AVHRR (advanced very high resolution radiometer) 위성자료를 이용하여 동한난류 주변 해역의 해색전선 (ocean color front)과 수온전선 (thermal front)에 따른 광학적 환경 특성에 의한 식물플랑크톤 색소농도의 공간적 분포를 이해하고자 한다.

## 자료 및 방법

동한난류 해역의 해색전선과 수온전선의 공간적인 특성을 조사하기 위하여 1980년 5월 17일의 CZCS와 AVHRR 영상을 수집했다. 먼저, 식물플랑크톤 색소농도 분포를 파악하기 위하여 NASA Goddard Space Flight Center에서 제공된 1980년 5월의 level 1b CZCS 자료를 Gordon et al. (1983)의 알고리즘을 적용하여 대기 보정 하였으며, 식물플랑크톤 색소농도 (클로로필-a + phaeophytin) 영상은 Fukushima and Ishizaka (1993)에 의해 개발된 JO-CIPS 소프트웨어를 이용하여 작성하였다. 해양에서 식물플랑크톤 현존량 (biomass)의 지표 (Sathyendranath et al., 1991)로서 이용되는 클로로필-a와 phaeophytin의 존재는 알려져 있으며, 그 분광적 특징은 거의 비슷하다. 특히, CZCS와 같이 적은 파장대수를 가진 분광 측정에서는 양자를 분리하는 것이 어려워 클로로필-a와 phaeophytin의 합을 식물플랑크톤 색소농도 또는 간단히 색소농도로서 취급하고 있다. 따라서 본 논문에서도 CZCS에서 관측한 식물플랑크톤 색소농도를 색소농도로 간단히 기술하였다.

CZCS 영상의 각 파장대에서의 식물플랑크톤 흡수와 투과깊이의 특징적인 차이에 의한 색소농도의 공간적인 분포를 이해하기 위하여 1 km의 수평 해상도로 한 CZCS의 해양표면 복사휘도를 나타내는 nLw 443 nm와 nLw 550 nm 영상을 사용했다. 여기서 nLw (normalized water-leaving radiance)는 대기권 밖의 평균 태양 복사조도 (irradiance)가 대기의 영향 없이 직접 해수면에 수직으로 입사되었다고 가정할 때 수직으로 되돌아 나오는 복사휘도 값을 말한다. CZCS는 색소농도의 추정을 목적으로 하는 청색 (blue, 443 nm), 청녹색 (blue-green, 520 nm), 녹색 (green, 550 nm) 및

대기효과 평가를 위한 적색 (red, 670 nm), 육지부분과 해양부분을 식별하기 위한 근적외 (near infrared, 750 nm)의 분광대역을 가지고 있다. Morel and Prieur (1977)는 해수중 물질의 흡수계수와 후방산란계수로부터 해수의 특성을 광학적으로 분류하고 있다. 식물플랑크톤의 후방산란계수는 비교적 작기 때문에 보통 해석은 식물플랑크톤의 흡수 및 무기 현탁 물질의 후방산란계수에 의해 나타나게 된다. 여기서 식물플랑크톤의 색소가 주로 광학적 성질을 결정하고 있는 해수를 case-I 해수라고 하고, 무기 현탁 물질로 된 해수를 case-II 해수라고 한다. 대부분의 외양수는 case-I에 가깝고, 연안수는 case-II에 속한다. CZCS에서는 해역을 2가지로 나누어 외양수 (클로로필 색소농도 약 5  $\mu\text{g/L}$  이하)를 case-I 해수로서 443 nm와 550 nm 파장대의 값을 이용하여 색소농도를 구하고, 고농도와 동시에 각종 성분이 혼합되어 있는 연안수의 case-II 해수에서는 443 nm의 파장대역을 피하여 520 nm 파장대를 사용하고 있다. 본 연구에서는 case-I 해수의 알고리즘을 자료 해석에 이용하여 색소농도와 파장대간의 상호관계를 조사하였다.

수온의 수평분포를 파악하기 위해서는 일본 기상청에서 수신한 해상도 약 1 km인 1980년 5월의 NOAA-6 위성의 HRPT (high resolution picture transmission) 자료를 이용하였다. 표면수온 (SST, sea surface temperature) 영상은 Saitoh (1995)에 의한 영상자료 처리 수법을 이용하여 AVHRR channel-4 자료로부터 작성하였으며, CZCS 영상과 AVHRR 영상은 일반적인 횡메르카토르 도법으로 다시 작성하여 해안선을 중첩시켰다. CZCS 영상에서는 SST와 색소농도의 동시 측정이 가능하지만 적외선 channel-6에서 측정된 SST의 경우는 그 해상도의 정밀도가 떨어지기 때문에 NOAA의 AVHRR자료를 이용하였다.

동한난류해역에서 CZCS와 AVHRR 영상에서 관측된 해석전선과 수온전선 부근의 공간적인 분포를 파악하기 위하여 북위 33°N~41°50'N, 동경 127°E~133°50'E의 한국 동해안을 중심으로 자료를 정리하였다 (Fig. 1). 특히, 동한난류 주변 해역 수괴의 공간적인 수평구조를 파악하기 위하여 북위 37도선을 동서로 횡단하는 선을 선택하여 수평 단면도를 작성하여 nLw 영상, SST 및 색소농도 영상으로부터 각 파장에 따른 부유물질에 의한 반사와 식물플랑크톤의 흡수에 의한 해역별 특성을 조사했다.

결과 및 고찰

동해안의 수온과 식물플랑크톤 색소농도의 공간적 분포를 살펴보기 위하여, 1980년 5월 17일에 관측된 CZCS와 AVHRR의 영상을 Fig. 2에 나타내었다. AVHRR의 SST 영상에서는 동한난류로 인식되는 동해 연안에 인접하여 남북으로 띠모양으로 뻗어 있는 난수 streamer를 볼 수 있다. 이 난수 streamer는 거의 북위 39도 근처에서 급격하게 동쪽으로 방향을 전환하고 있다 (Fig. 2a). CZCS 영상에서는 동해안을 따른 10°C 이상의 동한난류의 SST 공간분포에 따라 색소농도의 공간분포가 변하는 것을 알 수 있다 (Fig. 2b). 색소농도의 분포는 SST 분포와 거의 일치하고 있으며, 10°C 이하의 수온이 낮은 연안 해역에서는 1.5  $\text{mg/m}^3$  이상의 고농

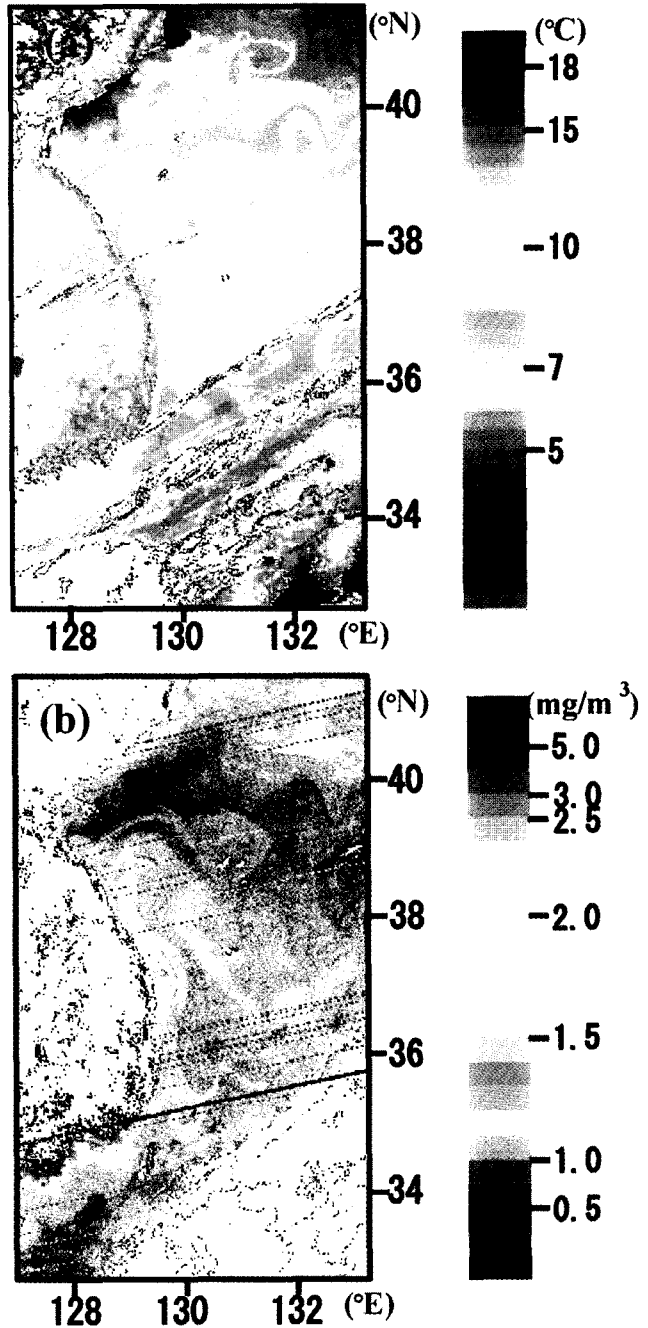


Fig. 2. Daily images on 17 May 1980. The upper panel is AVHRR image and lower panel is CZCS image. The color bar of (a) AVHRR image goes from blue for low temperatures, to red for high temperatures and that of (b) CZCS image goes from violet for low concentrations, to red for high concentrations.

도가 존재하고, 10°C 이상의 난수해역 내부에는 1.2  $\text{mg/m}^3$  이하의 저농도가 나타났다. 또한, 높은 색소농도는 표면 수온이 낮은 연안의 냉수해역과, 동해 연안과 난수 streamer의 가장 동쪽 경계 외해에서 상대적으로 높게 나타났다. 특히, 색소농도가 가장 높은 곳은 난수 streamer의 서쪽 경계인 수온전선해역과 한국 연안해역

을 따라 남쪽과 동쪽해역의 육지 부근에서 나타났다.

동한난류해역에 있는 해색전선과 수온전선의 상세한 구조를 보기 위하여 두 전선을 중첩하여 Fig. 3에 나타내었다. 난수 streamer의 서쪽 수온전선 (— 실선부분)은 고농도의 색소농도 경계해역과 일치하는 두 개의 해색전선 (-- 점선부분) 사이를 나란히 달리는 형상을 하고 있다. 한편, 난수 streamer의 동쪽 수온전선은 해색전선의 동쪽부분과 거의 일치했다. SST와 색소농도의 비교에서 고농도 색소농도는 연안의 냉수해역, 연안의 냉수와 난수 streamer의 서쪽 경계사이에 있는 전선해역 및 난수 streamer 내부에서 나타났다. 특히, 난수 streamer 내부의 서쪽 부분에서 색소농도가 높게 나타나는 해역을 여기서는 난수중첩해역이라 정의한다. 가장 높은 색소농도는 Fig. 2b에 나타낸 바와 같이 동한난류의 난수 streamer의 서쪽 수온전선을 따른 연안수의 밴드 형태 분포와 함께 수온전선해역에 나타났다.

수온과 색소농도의 수평분포 특성을 파악하기 위하여 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 북위 37°N선을 따른 단면도를 나타내었다 (Fig. 4). 색소농도 (2.0 mg/m<sup>3</sup> 이상)가 가장 높은 곳은 난수 streamer와 연안냉수해역의 경계에 있는 수온전선의 냉수해역 (약 9°C 부근)에서 나타났다. 그 다음 색소농도가 높은 곳은 (약 1.6 mg/m<sup>3</sup>) 난수 streamer내에서 수온이 상대적으로 낮은 (10.5°C) 난수중첩해역이었다. 색소농도가 가장 낮은 (평균 약 1.0 mg/m<sup>3</sup>) 곳은 수온이 가장 높은 (11°C 부근) 난수해역에서 보였다. 외해에서 수온 (9°C

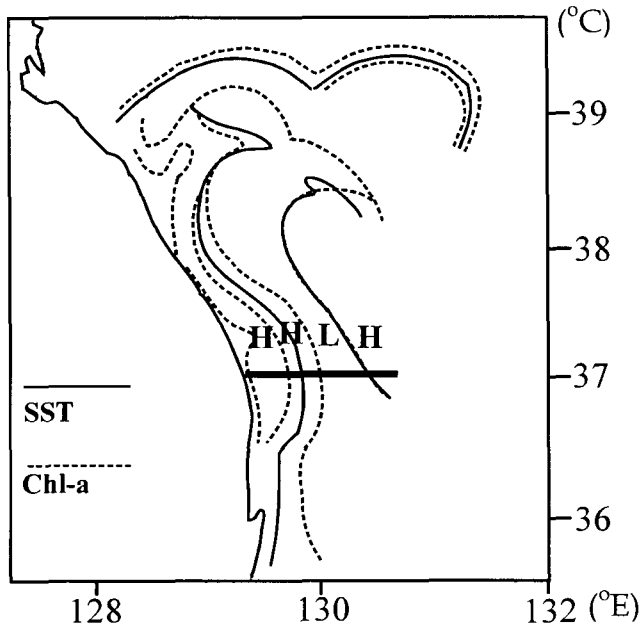


Fig. 3. Schematic of ocean color fronts and thermal fronts in the East Korean Warm Current region which are interpreted from CZCS and AVHRR images. The dotted line and solid line indicate color fronts and thermal fronts, respectively. Thick solid line at 37°N indicates a horizontal profiles line for the pigment concentration, SST, 443 nm, and 550 nm images. H, L denote high (>1.5 mg/m<sup>3</sup>) and low (<1.5 mg/m<sup>3</sup>) pigment concentrations, respectively.

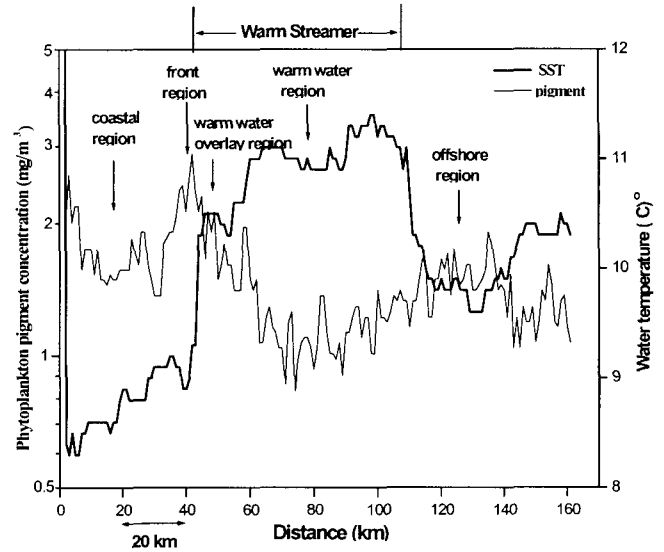


Fig. 4. A profiles line for the pigment concentration and SST images at 37°N as shown in Fig. 3. Thin solid line is pigment concentration of CZCS image and thick solid line is SST of AVHRR image. The total line length is 160 km from land to offshore.

이상)은 연안해역 (9°C 이하)보다 상대적으로 높지만 연안해역과 난수중첩해역의 색소농도 (약 1.6 mg/m<sup>3</sup>)와 비슷한 높은 (약 1.5 mg/m<sup>3</sup>) 색소농도 분포를 나타내고 있다. 표층 저수온 지역과 일치하는 동해 연안을 따른 색소농도는 동한난류 주류의 난수쪽보다 높게 나타나며, 동해 연안의 높은 색소농도는 동한난류의 북쪽 흐름의 영향에 의해 일부가 분리되어 동한난류 주류에 이끌려 가는 것처럼 보인다. 동한난류 주변 해역의 전체적인 수온과 색소농도 사이의 음의 상관은 일반적인 영양염 이용의 차이에 의한 것으로 사료된다. 따라서 동한난류 주변 해역의 색소농도의 공간적인 특성은, 수온이 낮은 곳에서는 수괴의 안정도가 낮아 영양염 이용이 증가하기 때문에 높은 색소농도가 나타나고, 수온이 높은 곳에서는 수괴의 안정도가 증가하여 영양염 이용이 감소하고 낮은 색소농도가 나타난다는 Ishizaka (1992)의 결과와 일치한다.

각 해역의 색소농도의 분포에 따른 파장대별 특성을 살펴보기 위하여, 1980년 5월 17일의 nLw 443 nm와 550 nm, SST, 색소농도 (CZCS-Chl)의 영상을 Fig. 5에 나타내었다. 파장대에 따른 분포를 Hovis et al. (1980)은 식물플랑크톤의 대표적인 색소인 클로로필-a의 경우 443 nm 파장 근방에 최대의 흡수대를, 550 nm 근방에 최소 흡수대인 최대 반사대를 가진다고 하였다. 따라서, 최대 반사를 나타내는 nLw 550 nm 영상은 부유물질이나 용존유기물질 등에 의한 높은 반사가 흰색 영상으로 나타나고, 낮은 반사는 검은색으로 나타난다 (Fig. 5a). 또한 이 파장대는 거의 표층 근처 부유물질 등에 의한 위쪽에서의 복사회도 변화에 관계하기 때문에 식물플랑크톤의 흡수가 약하고, 식물플랑크톤의 흡수를 반영하는 단파장대에 있는 443 nm에 비해 광학적 수심이 낮게 나타난다. 광학적 수심이 깊은 nLw 443 nm 영상은 식물플랑크톤에 의한 높은 흡수 (낮은 반사)가 영상에서 검은색으로 나타나고 낮은 흡수

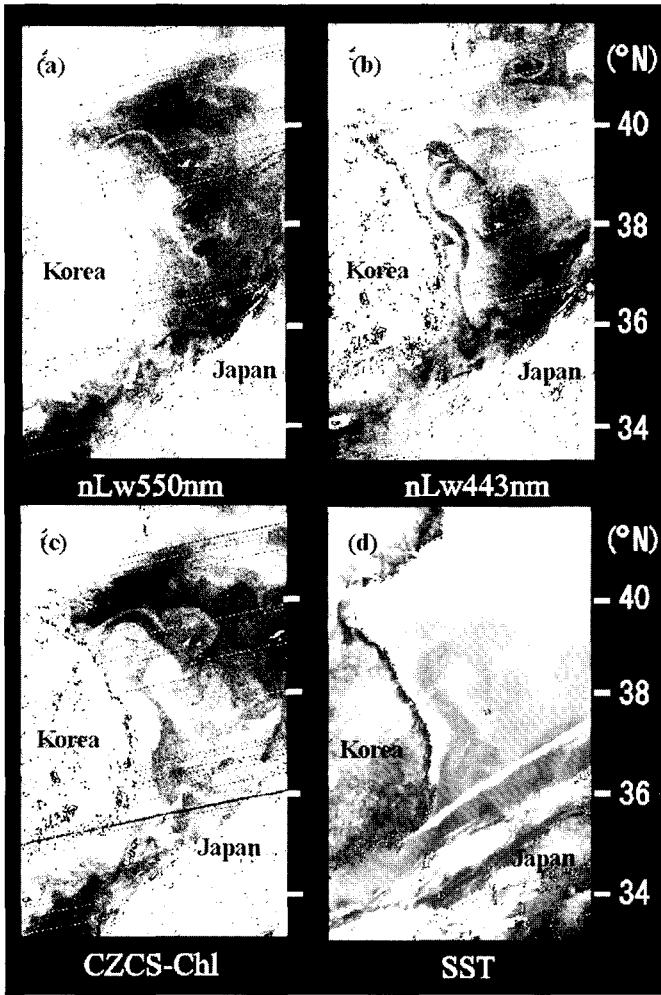


Fig. 5. Normalized water-leaving radiances images at nLw 550 nm (a) and nLw 443 nm (b), daily images of phytoplankton pigment concentration (CZCS-Chl) (c), and SST (d) on May 17, 1980. In the nLw 550 nm and nLw 443 nm, white (black) color indicate high (low) reflectance. In the CZCS-Chl images, white (black) color indicates high (low) concentration. In the SST, black color indicates high temperature.

(높은 반사)가 흰색으로 나타난다 (Fig. 5b). Hovis et al. (1980)이 나타낸 클로로필 색소농도에 따른 해표면 분광특성의 분포를 보면, 클로로필 농도가 낮은 청정한 해수에서는 단파장측, 즉 청색 부근에 곡선의 피크가 있고, 농도가 높아질수록 피크가 장파장측, 즉 녹색에서 적색쪽으로 이동하고 한다. 해표면의 분광특성으로부터 클로로필 농도의 도출은 실제로 몇 가지의 파장을 조합해서 클로로필 농도와와의 상관식을 얻고 있지만, 가장 단순하고 알기 쉬운 조합은 Lw 443과 Lw 550의 비를 취하여 계산하는 방법이다. 이 방법은 클로로필의 최대 흡수대를 이용하기 때문에 어느 정도 클로로필 농도가 높으면, Lw 443은 0에 가깝게 되고 농도 변화를 검출할 수가 없게 된다. 그러나, 본 연구해역에서는 nLw 443에서 0에 가깝게 클로로필 농도가 높게 나타나는 곳은 발견할 수 없었다.

nLw 550 nm 영상에서, 흰색의 높은 반사는 동해안의 연안해역

과 난수 streamer 동쪽 경계 밖의 외해수에서 나타나고, 검은색의 낮은 반사는 난수 내부에서 나타난다 (Fig. 5a). 광학적 수심이 얇은 곳에 위치한 nLw 550 nm 영상 패턴은 SST (Fig. 5d) 영상의 공간 형태와 유사하게 나타난다. nLw 443 nm 영상에서, 식물플랑크톤의 흡수가 낮은 (반사가 높은) 흰색 부분은 연안해역과 난수 내부에서 나타나고, 식물플랑크톤의 흡수가 높은 (반사가 낮은) 검은색 부분은 SST 영상의 난수 streamer의 서쪽 경계 내부와 동쪽 외해에서 나타난다 (Fig. 5b). 따라서 이러한 공간적 분포 특성으로 추측할 수 있는 것은 연안해역과 난수 내부는 순수한 식물플랑크톤의 영향보다는 부유물질과 용존유기물질 등에 의한 영향이 지배적인 것을 알 수 있고, 수온전선역과 난수 streamer 동쪽 외해에는 식물플랑크톤에 의한 영향이 지배적인 것으로 추측할 수 있다. 한 예로서, CZCS-Chl (Fig. 5c) 영상에서 북위 35도에서 37도 사이의 일본 외해에서 고농도의 분포가 나타나는데 이들 고농도는 nLw 443 nm 영상에서 식물플랑크톤의 높은 흡수 (검은색 부분)와 일치하며, nLw 550 nm 영상에서도 낮은 반사 (흰색 부분)를 나타내는 것과 일치하는 것을 볼 수 있다. 이들 해역은 부유물질과 용존물질에 의한 영향보다는 식물플랑크톤의 영향에 의한 것이 지배적인 것을 알 수 있다.

동해 난수 streamer 주변해역의 광학적 환경의 상세한 분포를 살펴보기 위하여 Fig. 3에 나타난 북위 37°N선을 따른 nLw 443, nLw 550, SST 영상의 수평 단면도를 Fig. 6에 나타내었다. 연안해역에서 수온전선이 위치하고 있는 수온 약 9°C 이하의 해역에서, nLw 550 nm에서는 0.5 mW/cm<sup>2</sup>/μm/sr 이상으로 높은 반사를 나타내고, nLw 443 nm에서도 약 0.9 mW/cm<sup>2</sup>/μm/sr의 높은 반사를 나타낸다. 수온전선의 냉수해역에서 nLw 550 nm는 약 0.9 mW/cm<sup>2</sup>/μm/sr로 가장 높은 반사를 나타내고, nLw 443 nm에서는 0.7 mW/cm<sup>2</sup>/μm/sr로 약간 낮은 반사를 나타낸다. 난수 streamer의 서쪽 부분의 수온 약 10°C 근방에서는 nLw 550 nm는 약 0.3 mW/cm<sup>2</sup>/μm/sr

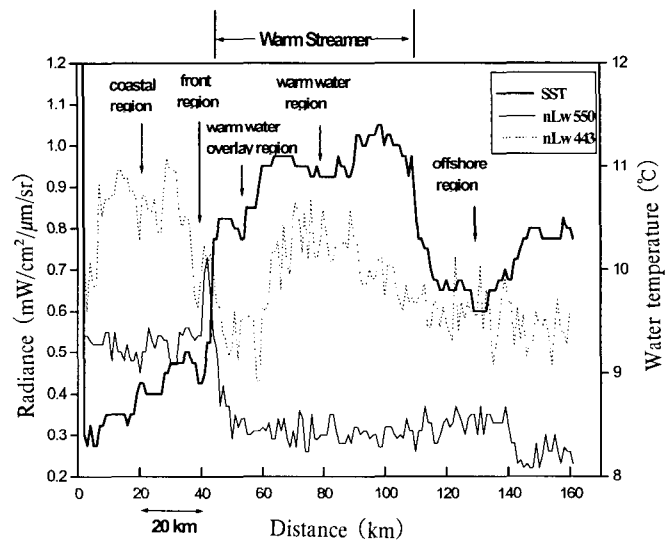


Fig. 6. A profiles line for the 443 nm (dotted line), 550 nm (thin solid line), and SST (thick solid line) images at 37°N as shown in Fig. 3.

sr로 낮은 반사를 나타내고, nLw 443 nm에서는 0.6 mW/cm<sup>2</sup>/μm/sr 이하로 가장 낮은 반사를 나타낸다. 난수 streamer의 중심부 (수온 11°C 이상)에서는 nLw 550 nm는 약 0.3 mW/cm<sup>2</sup>/μm/sr로 낮은 반사를 나타내고, nLw 443 nm에서는 0.8 mW/cm<sup>2</sup>/μm/sr 전후로 높은 반사를 나타낸다. 난수 streamer의 중심에서 외해쪽으로 갈수록 nLw 550 nm는 약 0.3 mW/cm<sup>2</sup>/μm/sr의 낮은 반사로 거의 변화가 없지만, nLw 443 nm는 0.6 mW/cm<sup>2</sup>/μm/sr 전후로 낮은 반사를 나타낸다. 특히, 전해역에서 nLw 443 nm의 반사가 낮다는 것은 식물플랑크톤에 의한 흡수가 높다는 것으로 해석할 수 있다.

동한난류 주변의 해색전선과 수온전선역의 특징을 북위 37°N선 (Fig. 3)을 동서로 횡단하는 육지에서 외해까지 160 km의 수평적인 거리에 있는 선을 동해를 대표하는 해역으로 선택하여 모식도로 살펴보았다 (Fig. 7). 육지에서 6 km 떨어진 곳에서 해색전선의 서쪽에 해당하는 연안 경계 해역 (직경 29 km)의 특징은, Arnone and Violette (1986)가 나타낸 연안냉수해역에서 550 nm의 높은 반사는 식물플랑크톤의 흡수보다는 황색물질이나 용존유기물질과 같은 부유물질에 의해 반사된 것이라는 결과처럼 nLw 550과 443에서 높은 반사를 나타내고 있는 것으로 보아 순수한 식물플랑크톤의 흡수보다는 연안의 부유물질이나 용존유기물질에 의해 반사도가 높은 것을 추측할 수 있다. 가장 높은 색소농도가 나타난 육지에서 6 km 내의 해역과 해색전선의 서쪽과 수온전선의 냉수해역에 접한 곳 (직경 8 km)은 가장 높은 부유물질 등에 의한 반사와 비교적 높은 식물플랑크톤 흡수 (Figs. 5 and 6)와 일치하며, 이 해역은 일반적으로 육지와 가장 가까운 연안지역의 연안수와 같이 식물플랑크톤 단독으로 나타나는 것이 아니라 부유물질과 혼합된 특성이 나타났다. 특히 이 해역은 Matsumura and Fukushima (1988)가 구분한 수렴성전선 (Fig. 8a)의 형태처럼 표층해

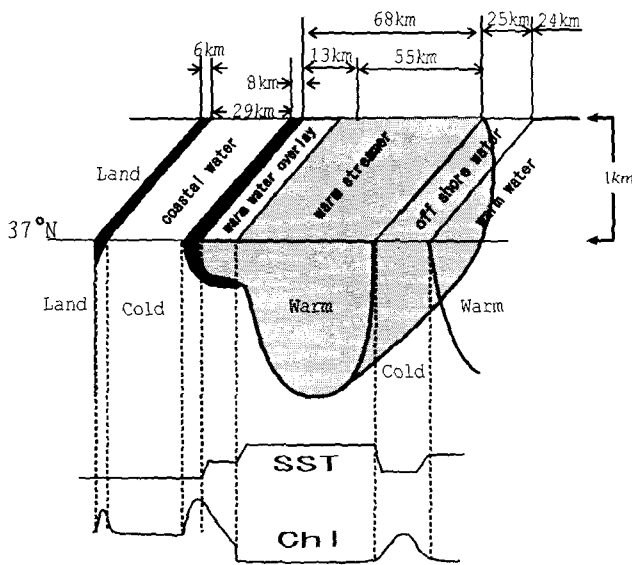


Fig. 7. Three dimensional schematic features of water mass around the East Korean Warm Current region along 37°N and horizontal profiles of the SST and pigment concentrations.

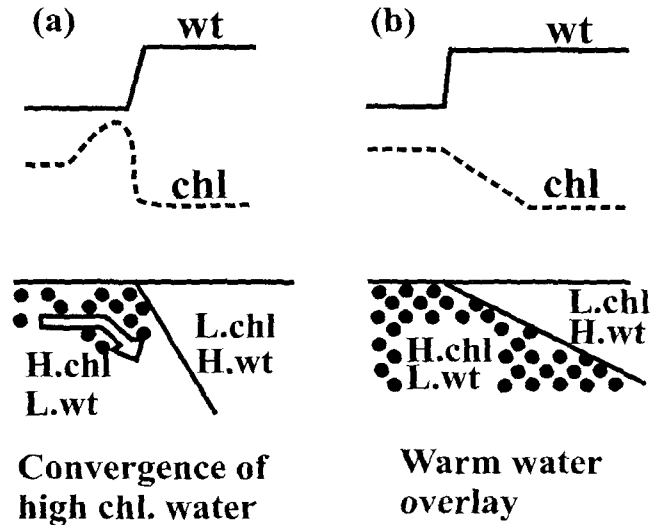


Fig. 8. Convergence of high pigment concentrations (chl) water (a) and warm water (wt) overlay (b) by the classification of front with water temperature and pigment concentrations (after Matsumura and Fukushima, 1988). H (L) is high (low).

수가 전선에 수렴함으로 부유성 현탁물은 전선 부근에 모이게 되고 냉수와 난수가 부딪히는 곳의 플랑크톤이 풍부한 냉수가 하부에 잠입하는 형태로 되어 색소농도 극대가 전선의 냉수해역에 나타나는 것으로 사료된다. 그리고 난수 streamer 내부의 색소농도가 높은 난수중첩해역 (직경 13 km)은 nLw 550의 반사도가 낮기 때문에 연안의 부유물질에 의한 영향보다는 외해수의 특성과 유사한 순수한 식물플랑크톤의 영향에 의해 나타나는 것을 알 수 있으며 (Figs. 5 and 6), 이것은 Matsumura와 Fukushima (1988)의 난수 중첩 (Fig. 8b) 형태처럼 클로로필이 적고 비교적 투명도가 높은 난수가 클로로필이 높은 냉수 위를 덮어씌운 것과 같이 펼쳐져 냉·난수과의 경계면에 있는 경사 부분의 클로로필 농도를 적분한 형태가 해표면 정보로 나타나기 때문이라 사료된다. 난수 streamer의 중심 (직경 55 km)에서 외해쪽 (직경 25 km)과 난수 streamer의 확장 (본 연구의 직경 160 km 거리에 한정된 곳)이 있는 곳에서는 nLw 550의 반사도가 거의 변화가 없이 낮기 때문에 이들 해역에서는 식물플랑크톤의 흡수에 의해 지배를 받고 있으나, 난수의 중심부는 식물플랑크톤에 의한 흡수가 적게 나타나고 외해쪽으로 갈수록 그 흡수가 증가하는 것을 알 수 있다. 외해수의 경우, Hoavis et al. (1980)과 Gordon et al. (1983)이 제시한 해수 표면 바로 아래에서 해수의 수괴로부터 반사되어 올라오는 광에서 색소농도 흡수의 영향은 443 nm에서 가장 현저하다고 한 결과와 잘 일치한다.

요 약

동한난류 주변 해역의 해색전선과 수온전선의 공간적 분포 특성을 CZCS와 AVHRR 위성자료를 이용하여 살펴보았다. 동한난류 주류의 난수 streamer 주변 해역의 색소농도와 SST의 공간적

분포를 살펴본 결과, 식물플랑크톤의 흡수보다는 황색물질이나 용존유기물질과 같은 부유물질에 의해 높은 색소농도를 나타낸 연안냉수해역, 연안의 부유물질에 의한 영향과 식물플랑크톤에 의한 영향이 혼합된 특성이 나타난 색소농도가 높은 수온전선의 냉수해역, 외해수의 특성과 유사한 순수한 식물플랑크톤의 영향에 의해 색소농도가 높은 난수중첩해역, 식물플랑크톤의 흡수에 의해 지배를 받고 있으나 색소농도가 적은 난수해역, 식물플랑크톤의 흡수에 의한 영향으로 색소농도가 높은 외해역의 5개 범주로 구분할 수 있었다.

동해안을 따른 연안냉수해역의 높은 색소농도의 확장은 동한난류의 흐름에 크게 영향을 받고 있으며, 동한난류의 난수 내부에 있는 낮은 색소농도와 분리된다. 또한, 동한난류해역 주변의 색소농도와 SST 사이의 관계는 전체적으로, 색소농도가 높은 곳은 수온이 낮은 곳에 나타나고 있으며, 색소농도가 낮은 곳은 수온이 높은 곳에서 나타났다. 색소농도가 가장 높게 나타난 것은 수온전선해역 냉수쪽에서 가장 높은 550 nm 반사와 비교적 낮은 443 nm 흡수와 일치하는 일반적인 연안수와 같이 식물플랑크톤 단독으로 나타나는 것이 아니라 부유물질과 동시에 나타났다. 그리고, 또 다른 색소농도의 높은 농도가 외해수에서 나타난 것과 유사하게 난수 streamer 내부에서 나타났으며, 이것은 연안의 부유물질의 영향은 거의 받지 않은 식물플랑크톤에 의해 색소농도가 높은 것을 알았다.

동한난류 해역과 같이 색소농도가 높은 해역에서 SST와 색소농도 영상만으로 복잡한 물리·생물학적인 현상에 기인한 모든 현상을 이해하기는 어렵지만, 광범위한 해역에서 이러한 현상을 이해하는데 위성자료는 효과적인 수단으로 판단된다. 또한, 현재 운용 중인 NASA의 SeaStar에 탑재된 SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor)에 의한 보다 정확한 식물플랑크톤 색소농도 자료는 현장에서 측정된 관측자료와 더불어 동한난류 해역의 물리·생물학적인 시공간변동을 이해하는데 많은 도움을 줄 것이라 사료된다.

참 고 문 헌

An, H.S., K.S. Shim and H.R. Shin. 1994. On the warm eddies in the southwestern part of the East Sea (the Japan Sea). *J. Oceanol. Soc. Korea*, 29, 152~163.  
 Arnone, R.A. and P.E. La Violette. 1986. Satellite definition of the bio-optical and thermal variation of coastal eddies associated with the African current. *J. Geophys. Res.*, 91, 2351~2364.  
 Banse, K. and D.C. English. 1994. Seasonality of coastal zone color scanner phytoplankton pigment in the offshore oceans. *J. Geophys. Res.*, 99, 7323~7345.  
 Eslinger, D.L., J.J. OBrien, R.L. Iverson. 1989. Empirical orthogonal function analysis of cloud-containing coastal zone color scanner images of northeastern North American coastal waters. *J. Geophys. Res.*, 94, 10884~10890.  
 Fukushima, H. and J. Ishizaka. 1993. Special features and applications of CZCS data in Asian waters. In *Ocean Colour: Theory and Applications in a Decade of CZCS Experience*, eds. V.

Barale and P.M. Schlittenharadt, Kluwer Academic, pp. 213~236.  
 Gordon, H.R., D.K. Clark, J.W. Brown, O.B. brown, R.H. Evans and W.W. Broenkow. 1983. Phytoplankton pigment concentration in the Middle Atlantic Bight: Comparison of ship determinations and CZCS estimates. *Appl. Opt.*, 22, 20~36.  
 Hovis, W.A., D.K. Clark, F. Anderson, R.W. Austin, W.H. Wilson, E. T. Baker, D. Ball, H.R. Gordon, J.L. Mueller, S.Y. El Sayed, B. Sturm, R.C. Wrigley and C.S. Yentsch. 1980. Nimbus-7 coastal zone color scanner: System description and initial imagery. *Science*, 210, 60~63.  
 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.*, 48, 305~327.  
 Isoda, Y. and S. Saitoh. 1988. Variability of the sea surface temperature obtained by the statistical analysis of AVHRR imagery - A case study of the south Japan Sea -. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 11, 52~59.  
 Isoda, Y., S. Saitoh and M. Mihara. 1991. SST structure of the polar front in the Japan Sea. In *Oceanography of Asian Marginal Seas*, Vol. 54. ed. K. Takano, Elsevier, Amsterdam, pp. 103~112.  
 Isoda, Y. and S. Saitoh. 1993. The northward intruding eddy along the east coast of Korea. *J. Oceanogr.*, 49, 443~458.  
 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.*, 56, 527~538.  
 Matsumura, S. and H. Fukushima. 1988. Water mass analysis using ocean color map and sea surface temperature map obtained by NIMBUS-7/CZCS. *Sora to Umi*, 10, 27~39 (in Japanese with English abstract).  
 Morel, A. and L. Prieur. 1977. Analysis of variations in ocean color. *Limnol. Oceanogr.*, 22, 709~722.  
 Obata, A., J. Ishizaka, M. Endoh. 1996. Global verification of critical depth theory for phytoplankton bloom with climatological in situ temperature and satellite ocean color data. *J. Geophys. Res.*, 101, 20657~20667.  
 Saitoh, S. 1995. AVHRR on NOAA. In *Oceanographic Applications of Remote Sensing*, eds. M. Ikeda and F. W. Dobson, CRC Press, Boca Raton, pp. 407~417.  
 Sathyendranath, S., T. Platt, E.P.W. Horne, W.G. Harrison, O. Ulloa, R. Outerbridge and N. Hoepffner. 1991. Estimation of new production in the ocean by compound remote sensing. *Nature*, 353, 129~133.  
 Toba, Y., H. Kawamura, F. Yamashita and K. Hanawa. 1984. Structure of horizontal turbulence in the Japan Sea. In *Ocean Hydrodynamics of the Japan and East China Seas*, Vol. 39, ed. T. Ichiye, Elsevier Amsterdam, pp. 317~332.  
 Yentsch, C.S. and D.A. Phinney. 1985. Rotary motions and convection as a means of regulating primary production in warm streamer rings. *J. Geophys. Res.*, 90, 3237~3248.  
 Yoder, J.A., C.R. McClain, G.C. Feldman and W.E. Esaias. 1993. Annual cycles of phytoplankton chlorophyll concentrations in the global ocean: A satellite view. *Global Biogeochem. Cycles*, 7, 181~193.  
 江波澄雄. 1974. 對馬緩流の浮魚資源. 對馬緩流, 水産學シリーズ 5, 日

- 本水産學會編, pp. 69~88.  
川合英夫. 1991. 對馬緩流系での總觀スケールの構造と水産生物に及ぼす影響. 流れと生物と, 川合英夫著, pp. 35~48.  
森勇. 1974. 西日本海々域の生物學的特性. 對馬緩流, 水産學シリーズ 5,

日本水産學會編, pp. 56~68.

---

2002년 2월 27일 접수  
2002년 5월 7일 수리