

원격탐사에 의한 동중국해 중규모 와동류의 시공간적 변동 연구

서영상* · 장이현* · 이나경* · 안유환** · 윤홍주***

국립수산과학원 해양원격탐사실*, 한국해양연구원**, 부경대학교 위성정보과학과***

Temporal and Spatial Variation of the Mesoscale Cold Core Eddy in the East China Sea Using Satellite Remote Sensing

Young-Sang Suh*, Lee-Hyun Jang*, Na-Kyung Lee*, Yu-Hwan Ahn**, and Hong-Joo Yoon***

Marine Remote Sensing Laboratory, National Fisheries Research and Development Institute, KOREA*,

Korean Ocean Research and Development Institute, KOREA**,

Dept. of Satellite Information Sciences, Pukyong National University, KOREA***

Abstract : The mechanism of cold core eddy formation was investigated using boundary conditions between the East China coastal cold water and the Kuroshio Warm Current, wind data related to the monsoon which was measured by QuikSCAT, and the bottom topography of the East China Sea. When winds blow from the southeast at an intensity comparable to that in the winter period in 1999 and 2003, the warm Kuroshio and Tsushima Current became stronger, and temperatures were considerably higher than those of the extended cold water of the coast of the East China. At that time, the cold water was captured by warm water from the Kuroshio and the Tsushima Current. This facilitated the formation of mesoscale cold core eddies with diameter of 150km in the East China Sea in May, 1999 and February, 2003. The cold core eddy which was detected by NOAA, SeaWiFS and QuikSCAT satellites. The East China Sea is considered to be important not only as a good fishing ground but also nursery and spawning area for many kinds of fishes. Therefore, it would be worth studying spatio-temporal variations of the cold core eddy in the environmental conditions of the northwestern East China Sea using systematic remote sensing techniques.

Key Words : Cold Core Eddy, Satellite Remote Sensing, SST, Ocean Color, East China Sea.

요약 : 동계 동중국해의 연안수가 발달하여 쿠로시오 난류의 경계역으로 확장된 후 주변의 북상 난류역에 의해 포획됨으로써, 고립되는 현상이 1999년 및 2003년 NOAA 위성영상에 포착되었다. 1999년의 경우 냉핵 와동류(cold core eddy)는 약 2개월간 존재하였고 (5월초~6월 하순), cold core의 중심 수온은 15~20°C로 주변보다 2~3°C 낮게 나타났다. NOAA 위성수온 영상에 포착된 냉핵 와동류의 주변 가장자리 해역에서 SeaWiFS 위성자료로부터 추정된 클로로필 α 분포는 4.0~6.0 mg/m³으로 냉핵 와동류 중심해역의 농도 1.0~3.0 mg/m³ 보다 2배 정도 높게 나타났다. 2003년 경우 2월

중순에 냉핵 와동류 중심수온은 9~10°C 였다. 와동류의 크기는 직경 150km 정도였으며, 냉핵 와동류의 수평 분포양상은 50m 등수심 분포와 유사하게 나타났다. 이어도(Socotra Rock) 해역을 중심으로 동계~춘계에 발생하는 냉핵 와동류의 형성 메카니즘은 중국대륙 연안수와 쿠로시오 난류가 만나는 경계역에서 수괴간의 힘의 균형, 계절풍 조건 및 해저 지형 분포와 밀접한 관계성이 있는 것으로 나타났다.

1. 서론

동중국해(East China Sea)는 중국 중앙부 연안의 동편에 위치하고 있으며, 면적은 약 752,000 km²이다. 북으로는 황해(Yellow Sea)와 연결되고 양자강과 제주도를 잇는 선으로 황해와 구분되며, 대한해협과 연결되는 동해(East Sea)와 구분된다. 또한 해저 지형상으로 볼 때 중국 대륙쪽에는 수심 200m 이하의 광활한 대륙붕이 펼쳐져 있어 좋은 어장이 형성된다(이석우, 1983).

동중국해는 한국, 중국, 일본 등 연안 국가가 많은 혜택을 받는 해양어족 자원의 보고이며, 중국 대륙 연안수와 쿠로시오(Kuroshio)가 만나 그 경계역에서 해황변동이 심한 해역이다. 대륙붕 경계 해역에서 와동류가 발생됨을 현장관측자료와 최근에는 위성관측 자료를 이용하여 조사 연구 및 기술하고 있다 (Lee *et al.*, 1981; Qiu *et al.*, 1990; Shibata, 1983; Sugimoto *et al.*, 1988; Suh *et al.*, 1999; Suh *et al.*, 2000; Yanagi *et al.*, 1998). 또한 동중국해 해역에서의 해양순환 및 수송 등에 관한 연구가 Pang *et al.* (1997)에 의해 이루어졌으며, 동중국해 부근해역의 수괴의 분포에 관한 연구가 김과 조(1999)에 의해 수행되었다. 특히, 북풍계열의 바람이 우세한 동계 및 춘계에는 대륙 연안수가 중국 연안에서 발달되어 외해역으로 확장되는 현상이 뚜렷이 나타난다. 김(1995)은 외해역으로 확장되는 중국 대륙연안수의 확장 정도와 동중국해의 해양환경 변동을 NOAA 위성 자료의 추정 수온분포로 조사 연구하였는데, 중국 대륙연안수가 동계 및 춘계에는 남동 방향의 외해역으로 최대 확장되는 것으로 나타났다.

Suh(2001)는 중국대륙 연안수가 확장되어 난

류와 만나 이루는 경계역에서 난류에 의해 포획, 고립됨을 1999년 5월 NOAA 위성 자료 SST 분포에서 포착하였는데, 이어도 근해역에서 중규모 냉핵 와동류가 장기간(1999년 5월 초순~6월 중순) 형성됨을 보였다. 그러나 현장 관측자료의 부족으로 정확한 와동류의 존재 및 시공간 변동을 규명하지는 못했다. 본 연구에서는 동계 동중국해 북부해역에서 나타나는 중규모 냉핵 와동류의 존재를 위성자료와 현장 관측자료로 증명하고 이의 시공간적 변동 양상을 분석 연구하고자 하였다.

2. 자료 및 방법

동중국해 북부해역에서의 중규모 냉핵 와동류 발생 현상을 조사 연구하고자 국립수산과학원에서 수신한 14년(1990~2003) 동안의 위성자료 중에서 중규모 냉핵 와동류 출현을 제시할 수 있는 NOAA/AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) 위성영상 자료 및 SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor) 위성자료를 선별 이용하였다 (국립수산진흥원, 1996~1998; 국립수산진흥원, 1999~2002; 국립수산과학원, 2003~2004). 위성자료 처리는 Terascan package S/W (SeaSpace, 1993)를 도구로 사용하였다. 위성수온 추정 방법 (Suh *et al.*, 2000) 및 위성 클로로필 α 추정 방법 (Suh *et al.*, 2002)을 각각 활용하여 처리한 위성 수온 및 클로로필 α 분포 정보로 와동류의 시공간적 변동 특성을 분석하였다.

한편, 와동류가 위성영상에 포착된 2003년 2월 위성 수온영상 및 2003년 2월 12일~17일, 국립수산과학원의 해양조사선 탐구 3호를 이용해 동중국

해 북부해역에서 관측한 현장 수층별(0, 10, 20, 30, 50, 75, 100m) 수온(water temperature), 염분(salinity), 클로로필 α (chlorophyll α), 부유성 고형물질(Suspended Solid, SS) 자료를 이용하여 냉핵 와동류와 그 주변 해역의 특성을 파악하였다. 또한 동중국해에서의 중규모 와동류의 발생 및 변동 원인을 해상풍과 해저지형간의 관계로 파악코자 하였다. 해상풍 자료로는 2003년 2월의 QuikSCAT (NASA's Quick Scatterometer) 위성자료를 사용하였다 (<http://manati.wvwb.noaa.gov/quikscat/>). 등수심선 분포 자료는 Terascan S/W 내에 data base화 되어있는 Central Intelligence Agency (CIA) 해저지형 정보를 활용하였다.

3. 결과 및 고찰

동계 및 춘계에는 대륙 연안수가 중국 연안에서 발달되어 외해역으로 확장되는 현상이 뚜렷이 나타난다. 이어도(32°N, 125°E) 해역을 중심으로 쿠로시오 난류는 제주도를 향해 북상하여 우측으로는 대마난류(Tsushima Current)의 주세력이 되고, 좌측으로는 대만난류(Taiwan Current)로서 중국의 황조만(Hangzhou Bay)과 양자강 연안을 따라서 북상한다. 동중국해 북부에서 중국대륙 연안수가 확장된 후, 주변의 북상 난류역에 의해 포획

된다. 이후 연안 냉수가 고립되는 현상이 1999년 5월 NOAA 위성 수온영상에 포착되었다(Fig. 1).

1999년의 경우 5월 초순에 형성된 냉핵 와동류는 6월 중순까지 약 1.5개월 간(1999. 5. 6~6. 22) 존재하였고, 냉핵(cold core)의 중심 수온은 5월 초순 15°C에서 6월 중순까지 20°C로 상승하였다. 그러나 냉핵 주변의 더운물 온도 또한 17°C에서 23°C로 상승함으로써, 냉핵 와동류의 중심수온과 주변 해역간의 수온차가 2~3°C로 나타났으며, 1.5개월 정도 지속되었다. 냉핵 와동류의 직경은 1단계(1999. 5. 6~5. 11)의 경우 수온 15°C를 중심으로 장축 200km, 단축 100km 정도였다. 2단계(1999. 5. 20~5. 25) 기간의 경우 수온 15°C를 중심으로 장축 모두 100km 정도로 축소, 변형되었으며, 냉핵 와동류의 중심이 동경 124도를 기준으로 우측해역으로 이동되었다. 3단계(1999. 6. 16~6. 22) 기간에서는 수온 20°C를 중심으로 장단축 모두 80km 정도로 축소되어 나타났다(Fig. 1, Fig. 2). 한편, 1999년 5월 7일 획득된 SeaWiFS 위성자료로부터 추정된 클로로필 α 농도분포는 1999년 5월 6일부터 획득된 NOAA 위성수온 영상에 나타난 냉핵 와동류의 주변 가장자리 해역에서 비교적 높게 나타났다(Fig. 3). 즉, 15°C 이하의 냉핵 중심의 클로로필 α 분포 값은 A점(북위 32.0도, 동경 124.0도)에서 1.0 mg/m³ 정도, B점(북위 31.5도, 동경 125.0도)에서 3 mg/m³ 정도로 나타났다. 반면

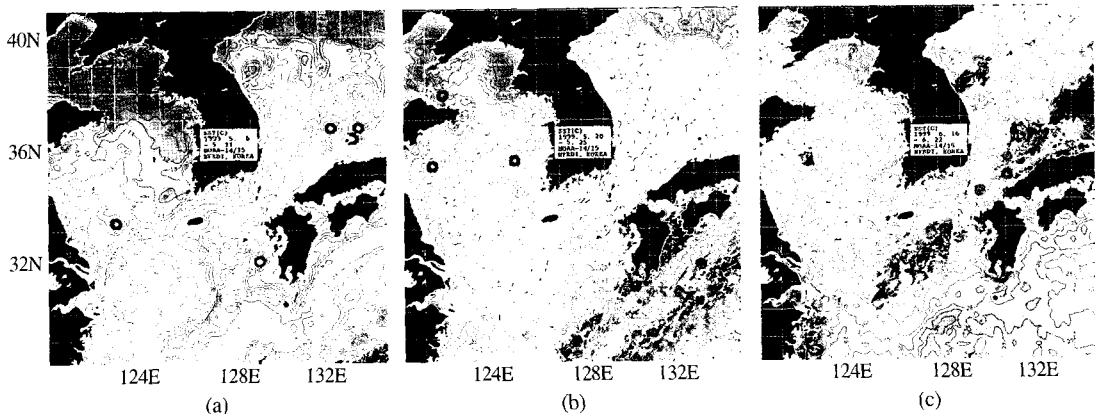


Fig. 1. Formation of cold core eddy was measured around the waters of Scotra Rock using the infrared thermal imageries from NOAA satellite 14 and 15. (a) Step I (May 6-11, 1999), (b) Step II (May 20-25, 1999) and (c) Step III (June 16-22, 1999).

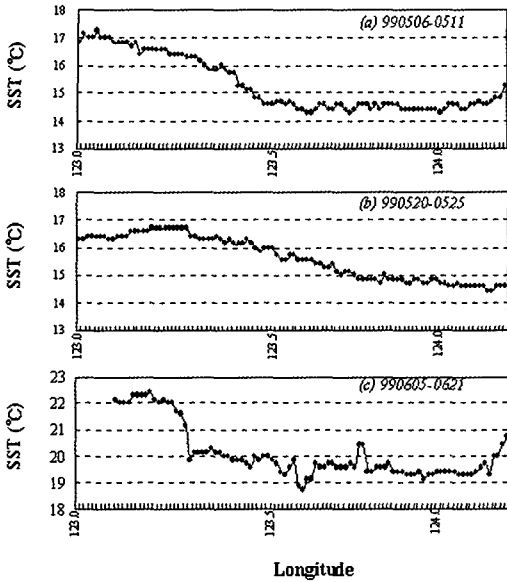


Fig. 2. Horizontal distribution of sea surface temperature ($^{\circ}\text{C}$) acrossing cold core eddy (32N, 123-124.3 E) in (a) May 6-11, (b) May 20-25 and (c) June 5-21, 1999.

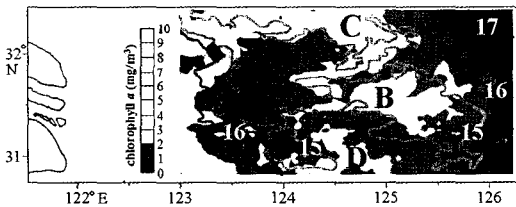


Fig. 3. Map showing the relationship between chlorophyll a on May 7th and SST derived from NOAA on May 6-11, 1999. Isothermal lines ($15\sim 17^{\circ}\text{C}$) were overlaid on the chlorophyll a imagery derived from SeaWiFS.

냉핵 와동류의 가장자리이며, 상대적으로 더운 해역인 C(북위 32.2도, 동경 124.7도), D점(북위 31.0도, 동경 124.7도)에서는 클로로필 α 농도 분포는 $4\sim 6\text{ mg/m}^3$ 으로 다소 높게 나타났다.

2003년 경우 2월 중순에 냉핵 와동류가 형성되는 현상을 위성 영상자료와 현장해양 관측조사 자료에서 포착할 수 있었다. 냉핵 중심의 수온은 $9\sim 10^{\circ}\text{C}$ 정도였으나 주변부 수온은 $11\sim 15^{\circ}\text{C}$ 였다. 냉핵 와동류의 직경은 150km 정도였으며, 냉핵 와동류의 수평분포가 50m 등수심 분포와 유사하게 나타났다(Fig. 4).

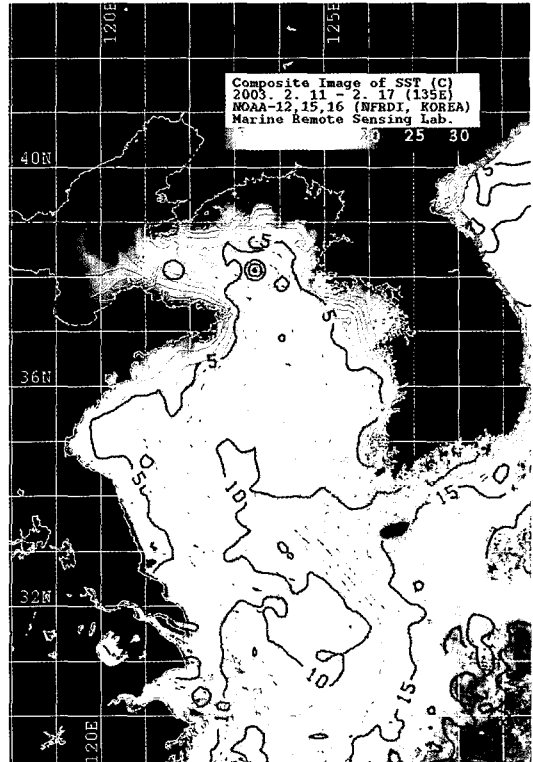


Fig. 4. Relationship between location of cold core eddy from NOAA's infrared imagery and bottom topography in the East China Sea, February 11-17, 2003.

냉핵 와동류 형성시 QuikSCAT위성으로 추정된 해상풍의 세기는 파랑 ($5\sim 15\text{ Knot}$), 연두 ($15\sim 20\text{ Knot}$), 노랑 ($20\sim 25\text{ Knot}$), 빨강 ($25\sim 30\text{ Knot}$)으로 표시된다. 제주도 근해역에서 북풍이 $15\sim 20\text{ Knot}$ 로 우세하게 불고 중국의 황조만 근해역에서 북동풍이 $10\sim 15\text{ Knot}$ 로 부는 반면, 양자강과 제주도간 중간 해역에서는 북북동(NNE)의 바람이 $5\sim 10\text{ Knot}$ 로 상대적으로 약하게 불었다. 이때 에크만 수송(Ekman transport)이 바람 방향의 오른쪽으로 진행되었을 것으로 추정됨으로, 동중국해 북부해역의 전체적인 풍향이 중국대륙 연안에서 확장된 냉수를 북동편과 남서편에서 차단, 포획하여 냉핵 와동류가 형성되도록 북상난류의 가장자리 해수를 수평 이동시켰다(Fig 5). 즉, 2003년 2월 초순의 경우 제주도 북서쪽 근해역에서는 북서풍이 $5\sim 10\text{ Knot}$ 였으며, 제주도 남쪽 150km정도 근

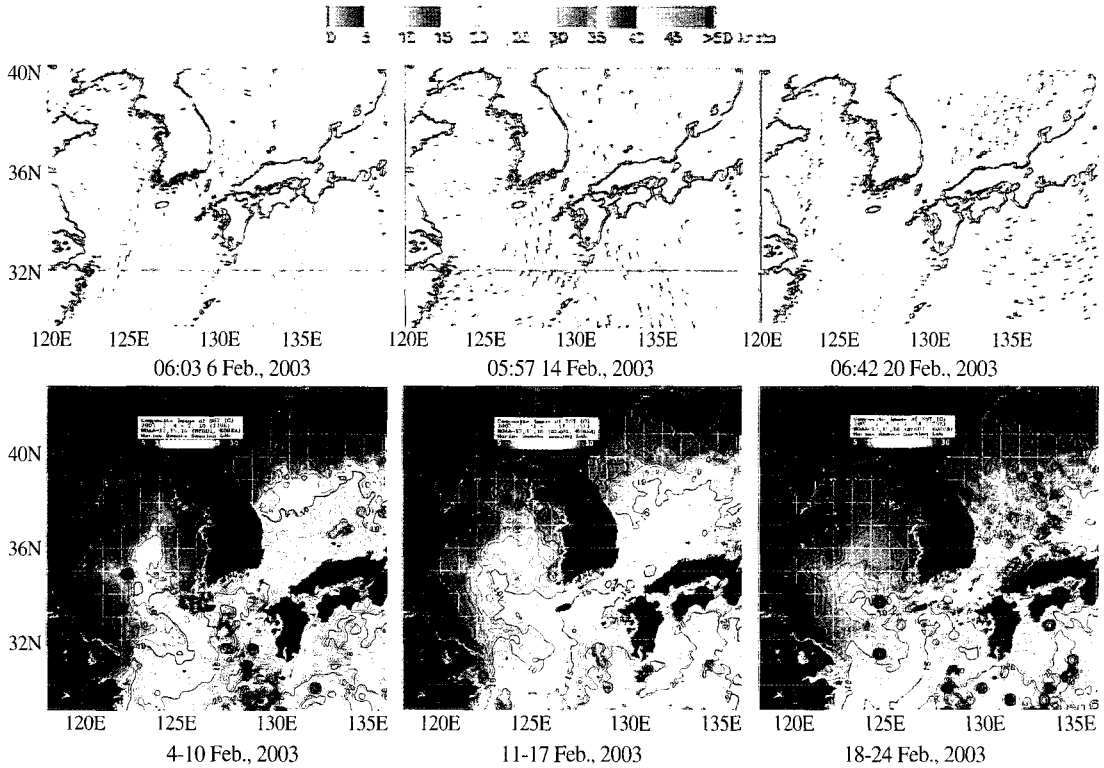


Fig. 5. Formation of cold core eddy related to the sea surface wind direction and force in February 6-20, 2003. (a) Wind direction and force derived from QuikSCAT satellite. (b) SST distribution derived from NOAA/AVHRR satellite.

해역에서는 북풍이 10~15 Knot, 중국의 황조만 근해역에서는 북동 또는 동풍이 5~10 Knot로 불었으나, 제주도-양자강 중간 해역에서는 5 Knot 이하의 북동풍이 불었다. 반면 2003년 2월 하순(18~24일)의 경우 제주도-양자강 근해역에 20~25 Knot의 강한 남동풍이 불어 제주도 근해를 거쳐 황해로 유입되는 난류 주축의 첨단을 북동쪽 해역(한국 서남해역)으로 수송시키는 작용을 한 것으로 나타났다. 이로 인해 환형(ring) 형태로 나타났던 냉핵 와동류의 모양이 흐트러지기 시작했다.

한편, 2003년 2월 12일에서 17일까지 국립수산과학원의 동중국해 북부 특별 해양관측 정점(Fig. 6)에 대한 조사가 탐구 3호로 이루어졌으며, 현장 관측 수온 분포는 위성영상에 나타난 수온 분포와 흡사하게 나타났다. 특히 수온 9°C와 10°C 등온선이 위성수온 분포의 냉핵 와동류의 영역과 매우

일치하였다(Fig. 7a). 염분 32.0 및 33.0의 등염선도 위성 수온 영상에서 나타나는 냉핵 와동류 분포 위치와 일치하는 것으로 나타났다(Fig. 7b). 클로로필 α 수평분포는 냉핵 와동류의 온도 및 염분 분포와 달랐다(Fig. 7c). 부유성 고형물질(SS)의 수평 농도분포는 비슷하였으며, 냉핵 와동류 중심

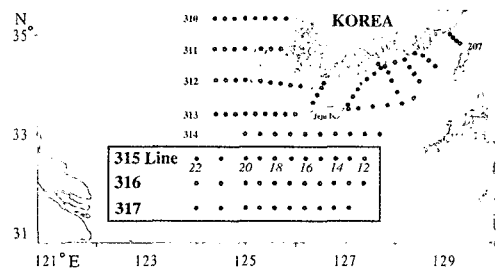


Fig. 6. Map showing oceanographic observing stations. Offshore stations (315-317 lines) for oceanographical monitoring in the northern part of the East China Sea.

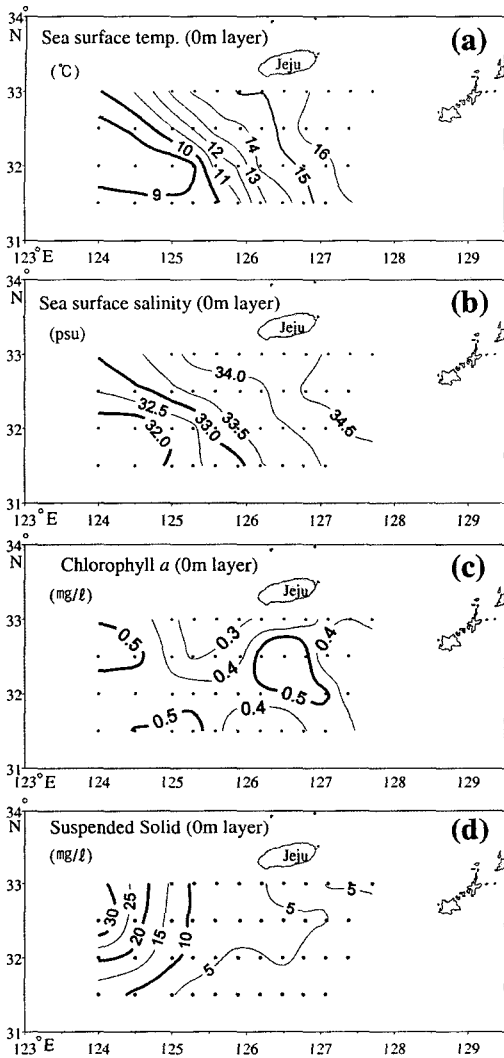


Fig. 7. Distributions of measured (a) sea surface temperature (°C), (b) sea surface salinity (psu), (c) chlorophyll a (mg/l) and (d) suspended solid (mg/l) in February 12-17, 2003.

쪽으로 갈수록 증가하여 20 mg/l 이상으로 높게 나타났다(Fig. 7d).

각 관측 라인의 연직 수온분포를 통해 볼 때, 해표면에서 저층 바닥까지 냉핵 부분 해역이 9~10°C, 가장자리 경계역 전선대가 11~15°C 정도에서 나타났다(Fig. 8a). 각 관측라인의 연직 염분분포를 통해 볼 때, 연직 수온 10°C 위치와 비교해보면 연직 등염선의 33.0과 일치하며, 15°C 등은

선 위치와 34.0 연직 등염선 위치가 해표면에서 저층 바닥까지 일치하였다(Fig. 8b). 클로로필 a 연직분포는 냉핵 중심해역 (9~10°C)에서는 0.3~0.4 mg/l였으나 경계해역 (11~15°C)에서는 약 0.4~0.7 mg/l로 비교적 높게 나타났다(Fig. 8c). 부유성 고형물질(SS)의 연직분포는 각 관측라인(315, 316, 317)의 냉핵 중심해역에서 22~36 mg/l로 상당히 높은 값을 나타내었으나 경계 해역에서의 표층에서는 4~18 mg/l, 저층에서는 14~22 mg/l로 비교적 낮은 값을 보였다(Fig. 8d).

최근 Suh et al. (1999, 2000)은 북한의 원산 남동부 근해역에서 해저 지형과 연계되어 비교적 동일 시공간에서 안정된 변동 양상을 보이는 재발생 와동류(recurring eddy)가 공간적으로 넓게 천이되는 시기, 즉 남하하는 북한한류와 북상하는 동한난류 세력이 어느 해보다 강하게 만나 baroclinic한 양상이 두드러지게 발생할 때 형성되고 변형된 시계 방향의 흐름을 가진 와동류가 외해역으로 이탈되는 현상을 보고하였다. 이와는 달리 동중국해에서 나타나는 냉핵 와동류는 동중국해 북부해역이 천해의 대륙붕으로 되어있어 해저지형과 흡사한 수평분포 양상을 보였을 뿐만 아니라 연직적으로도 동일하게 분포하는 barotropic한 양상을 보였다.

4. 결론

동중국해에는 동계 및 춘계에 중규모의 냉핵 와동류가 형성 발달하는 것으로 나타났다. 이어도를 중심으로 동계 및 춘계에 나타나는 냉핵 와동류의 형성 메커니즘은 중국대륙 연안수와 쿠로시오 난류가 만나는 경계역에서 힘의 균형과 계절풍 조건, 해저 지형 분포와 밀접한 관계성이 있는 것으로 사료된다. 동계 및 춘계의 동중국해 냉핵 와동류의 공간 스케일은 직경이 100~200 km 였고, 시간 스케일은 2개월 정도로, 주변 해역보다 상대적으로 2~3°C 낮은 수온분포를 유지하였다. 냉핵 와동류의 존재는 해양의 표면에서만 나타나는 해

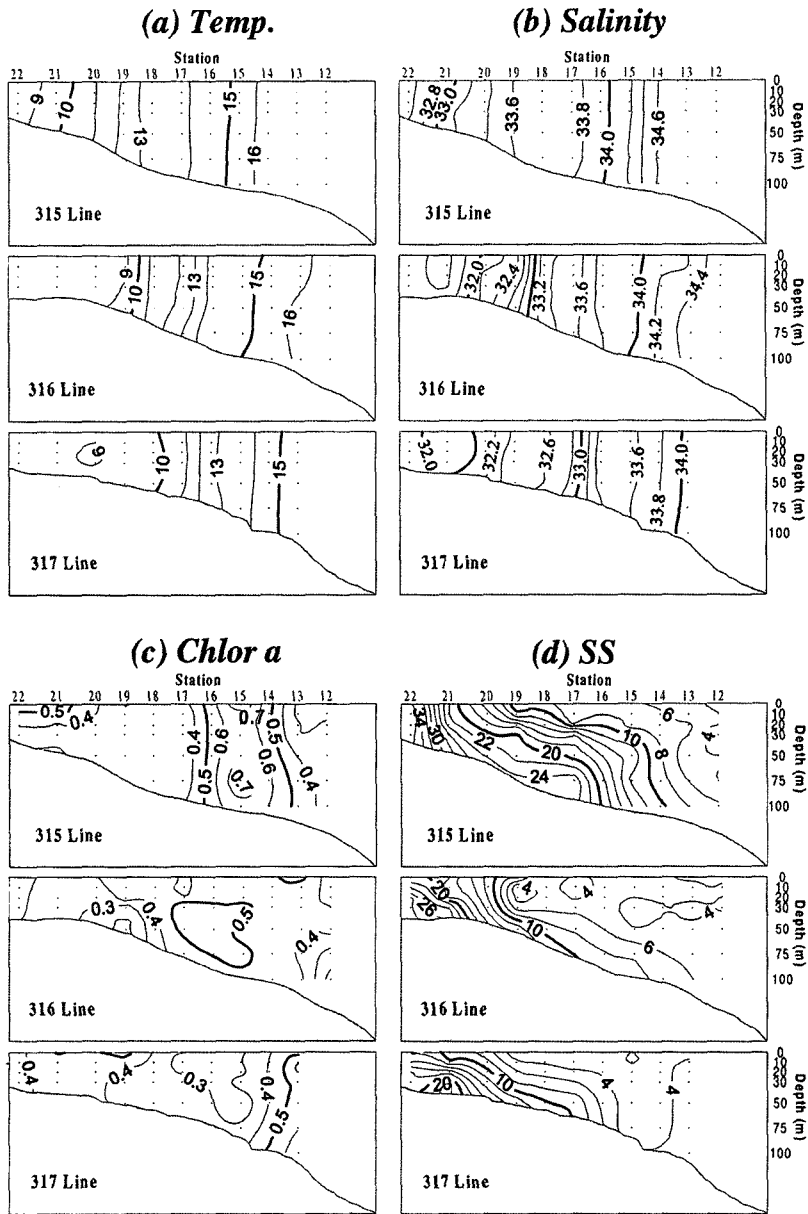


Fig. 8. Vertical distributions of (a) sea water temperature ($^{\circ}\text{C}$), (b) salinity (psu), (c) chlorophyll a (mg/m^3) and (d) suspended solid (mg/l) in station lines from 315 to 317 in February, 2003.

양 이상현상이 아니고 연속적으로도 표면 온도 분포에 따른 수괴의 배치 분포와 3차원적으로 일치한다. 냉핵 와동류의 발생과 시공간적 변동은 동

중국해 어장 형성 및 자원변동에 또 다른 하나의 중요 해양환경 요인으로 간주되며, 어족자원의 구조와 풍도에 큰 영향을 미칠 것으로 생각된다.

사 사

본 연구는 국립수산과학원의 「첨단 위성정보 활용시스템 운영」, 한국항공우주연구원의 지원하에 수행한 「위성자료의 해양수산 활용 연구」 및 한국과학재단 기초과학연구사업 「RS 및 GIS를 활용한 한반도 주변해역의 해양환경 특성에 관한 연구」의 일부수행 결과입니다.

참고문헌

- 국립수산진흥원, 1996~1998. 한국근해 수온분포도 (1991~1997).
- 국립수산진흥원, 1999~2002. 한국근해 해양정보 (1998~2001).
- 국립수산과학원, 2003~2004. 한국근해 해양정보 (2002~2003).
- 김진수, 1995. NOAA/AVHRR 자료를 이용한 황해 남부 및 동중국해의 해표면 수온 분포 변화에 관한 연구, 서울대학교 석사학위논문.
- 김희용, 조규대, 1999. 춘계 동중국해 수괴분포와 저서어류 분포와의 관계, 1999년도 춘계 수산관련학회 공동학술대회 발표요약집.
- 이석우, 1983. 해양물리학통론, 집문당, 서울.
- Lee, T. N., L. P. Atkinson, and R. Legeckis, 1981. Observations of a Gulf Stream frontal eddy on the Georgia continental shelf, April 1977, *Deep-Sea Research*, 28A: 347-378.
- Pang, I. C., K. H. Oh, and H. K. Rho, 1997. Influence of the circulation in the East China Sea on the volume transport in the Korea Strait, *The East China Sea (Proceeding of the 1st international workshop on the Oceanography and Fishery in the East China Sea)*, 1: 26-39.
- Qiu, B., T. Toda, and N. Imasato, 1990. On Kuroshio front fluctuations in the East china Sea using satellite and in situ observational data, *Journal of geophysical research*, 95(C10): 18,191-18,204.
- SeaSpace, 1993. TeraScan Package Manual 2.4.
- Shibata, A., 1983. Meander of the Kuroshio along the edge of continental shelf in the East China Sea, *Umito Sora*, 58: 113-120(in Japanese).
- Sugimoto, T., S. Kimura, and K. Miyaji, 1988. Meaner of the Kuroshio front and current variability in the East China sea, *Journal of Oceanographic Society Japan*, 44: 125-135.
- Suh, Y. S., 2001. *Oceanographic features around the Korean peninsula inferred from satellite remote sensing*, Ph. D. Thesis, Pukyong University. (in Korean).
- Suh, Y. S., B. G. Mitchell, and K. S. Lim, 1999. A recurring eddy off the Korean northeast coast captured on satellite ocean color and sea surface temperature imagery, *J. Kor. Soc. Remote Sensing*, 15(2): 175-181.
- Suh Y. S., J. H. Kim, and H. G. Kim, 2000. Relationship between sea surface temperature derived from NOAA satellites and *Cochlodinium polycrroides* red tide occurrence in Korean coastal waters, *J. the Korean Environmental Sciences Society*, 9(3): 215-221(in Korean).
- Suh, Y. S., L. H. Jang, J. H. Kim, Y. Q. Kang, and K. S. Lim, 2000. Study of a recurring anticyclonic eddy off Wonsan coast in northern Korea using satellite tracking drifter, satellite ocean color and sea surface temperature imagery, *J. Kor. Soc. Remote Sensing*, 16(3): 211-220(in Korean).
- Suh Y. S., L. H. Jang, N. K. Lee, and B. K. Kim, 2002. Development of the regional algorithms to quantify chlorophyll a and suspended solid in the Korean waters using ocean color, *J. Korean Fish Society*, 35(3): 207-215(in Korean).
- Yanagi, T., T. Shimizu, and H. J. Lie, 1998. Detailed structure of the Kuroshio frontal eddy along the shelf edge of the East China Sea, *Continental Shelf Research*, 18: 1039-1056.