

해수색 원격탐사에 의한 동해 연근해역 클로로필 *a* 이상분포 연구

서 영 상
국립수산과학원 동해수산연구소
(2005년 10월 5일 접수; 2006년 1월 10일 채택)

Study on Abnormal Distribution of High Concentration Chlorophyll *a* in the East Sea of Korea in Spring Season using Ocean Color Satellite Remote Sensing

Young-Sang Suh

East Sea Fisheries Research Institute, NFRDI, Gangneung 210-861, Korea
(Manuscript received 5 October, 2005; accepted 10 January, 2006)

High concentration of chlorophyll *a* occurred around the Ullung Warm Eddy off Ullung Island in the East Sea of Korea in spring season. The abnormal distributions of chlorophyll *a* were captured by satellite remote sensing and measured field data. The temporal and spatial scale of the abnormal distributions were around 20 days and 50km diameter off Ullung Island. The anomalies were quantified by estimated chlorophyll *a* derived from OCM and SeaWiFS ocean color data from 2000 to 2004.

The origin of abnormal high concentrations was estimated by this study. It was that suspended material discharged from the Nakdong River and the coastal water located in the southeastern part of Korean Peninsula moved to northeastern coast, and then moved to off Ullung Island. The high chlorophyll *a* concentrations including inorganic materials were accumulated by anticyclonic eddy such as the Ullung Warm Eddy around Ullung Island in the East Sea of Korea in spring season.

Key Words : Satellite Remote Sensing, OCM, SeaWiFS, Ullung Warm Eddy, Abnormal High Concentration of Chlorophyll *a*

1. 서 론

최근 위성원격탐사기법을 이용하여 한반도 연근해역의 해수색(ocean color) 변화를 정량화하고, 현장관측 값과 비교하는 등 해수색 관측 위성자료의 정확도 향상을 위한 검토 연구가 활발히 수행되고 있다¹⁻³⁾.

특히, 서 등¹⁾은 동해와 동중국해 북부해역의 해수 광학적 특성을 비교하여 밝혔다. 외해(Open Sea)에서 맑은 해수(clear waters)는 식물플랑크톤(phytoplankton)의 양이 많아질수록 해수색이 파란색에서 초록색(green)으로 변화가 진행된다. 외해역에서 연안으로 가까이 올수록 높은 농도의 식물플랑크톤

뿐만 아니라, 기원이 육지인 부유입자와 퇴적물과 용해성 유기물질 등이 해수에 대한 광학적 연구를 보다 복잡하게 한다. 미국 UCSD의 Scripps 해양연구소 소속의 Dr. Greg Mitchell이 동해에서 관측한 chlorophyll *a* 농도를 함수로 한 원격 반사도(remote sensing reflectance), R_{rs} 은 1993년 이후 최근까지 캘리포니아 연안 정선 해양조사(CalCOFI)에서 측정된 300개 이상의 data set와 비교해볼 때 아주 유사한 특성분포를 보였다. 그러나, 국립수산과학원이 2000년 2월에 관측한 chlorophyll *a*의 농도를 함수로 한 원격 반사도 R_{rs} 과 Dr. Greg Mitchell의 data set 비교 검토한 결과, 캘리포니아 연안의 해수 반사도와 상이함을 구명할 수 있었다.

동중국해 북부해역의 경우 490 nm와 555 nm 파장대가 수심에 따른 도달 광량은 급격히 감소하는 매우 탁한 해역이다. 외관상의 광감쇄계수(diffuse

Corresponding Author : Young-Sang Suh, East Sea Fisheries Research Institute, NFRDI, Gangneung 210-861, Korea
Phone: +82-33-660-8530
E-mail: yssuh@nfrdi.re.kr

attenuation coefficient for downwelling irradiance) K의 차이로 490 nm와 555 nm 파장대의 수심변화에 따른 Ed와 Lu에는 차이가 있었다 (Fig. 4). 또한 이 해역의 경우 식물플랑크톤의 농도뿐만 아니라 퇴적물의 영향으로 광학특성이 더욱 복잡한 양상을 띠게 되는데 2월의 경우 부유성 퇴적물의 영향으로 강한 광흡수가 발생되며, 5월의 경우 Case I waters와 Case II waters의 중간 수괴 특성을 나타내었다¹⁾. 이러한 검보정 연구수행과 더불어 한국 연근해역의 기초먹이생물 분포량을 위성으로 모니터링하여 적조, 동해남부 냉수대, 태풍 등의 이상해황 발생시 클로로필 *a*의 이상분포를 정량화하는 연구도 진행되고 있다⁴⁻⁶⁾.

본 연구에서는 동해 연안 및 울릉도 근해에서 일시적으로 나타나는 고농도 클로로필 *a*의 이상분포 (abnormal distribution)를 정량화하고, 발생 메커니즘을 다양한 위성자료를 통해 구명하고자 하였다.

2. 자료 및 방법

해수색 관측위성 OCM (Ocean Color Monitor), SeaWiFS (Sea Viewing Wide Field of View Sensor)으로 모니터링된 동해 서부 연근해역의 표층 클로로필 *a* 농도 분포(2000~2004)에 대한 시계열 자료를 분석하였다. OCM 자료는 시간해상도 (temporal resolution), 즉 회귀주기가 2일정도이나, 공간해상도(spatial resolution)는 360m이다. 한편, SeaWiFS 자료는 회귀주기가 1일 1회, 약 1,100 m의 공간 해상도를 가지고 있다. 클로로필 *a* 이상분포 현상 발생시 동일시기의 수온 및 바람과의 관계성을 유추하고자 미국의 NOAA 및 QuikScat 위성자료도 활용하였다. 특히 2004년 춘계시기 중 울릉도와 동류가 발생한 2004년 4월의 8, 20, 24 및 28일 위성자료를 집중분석하였다.

클로로필 *a* 추정은 미국 NASA에서 사용 권고하는 OC2 (ocean color 2) 알고리즘을 사용하였다^{2,7)}. 한국근해 해상풍 자료는 (http://www.ssmi.com/qscat/scatterometer_data_daily.html) QuikSCAT 위성자료를 이용하였다. 화살표는 바람의 방향, 바탕색은 풍속을 나타낸다. 풍속은 붉은색 계통이 상대적으로 강하고, 푸른색 계통은 상대적으로 약함을 나타내었다. 동해 위성수온분포는 NOAA 위성의 AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer)자료를 서등⁸⁾의 분석방법을 이용하여 도출하였다.

3. 결 과

2000~2004년 동안 동해 연근해역에서 나타난 클

로로필 *a* 농도의 이상(abnormal) 분포를 위성원격탐사로 모니터링 하였다. 클로로필 *a* 이상분포현상은 주로 춘계 동해 남부 연안을 따라 복잡하며 발생하였다. 미국 SeaWiFS 위성의 것(1,100×1,100m)보다 3배 이상 높은 공간해상도(360×360m)를 가진 인도의 OCM위성자료를 분석한 결과, 2004년 4월 8일 고농도의 클로로필 *a* 분포가 낙동강 앞바다에서 동해남부의 장기갑 및 동해 중부의 울진연안까지, 또한 울릉도를 중심으로 반경 50 여 km 주변해역에 분포하여 나타남이 포착되었다(Fig. 1(a)). 이후 2004년 4월 20일에는 동해남부 연안 및 영덕주변 연안에서도 클로로필 *a* 이상 고농도 분포 발생 현상이 뚜렷이 나타났고, 울릉도 주변해역에서 Mitchell *et al.*⁹⁾ 과 An *et al.*¹⁰⁾이 최근 연구에서 밝힌 울릉도 난수괴 소용돌이(Ulleung Warm Eddy)의 수온 분포양상 해역과 특히 비슷한 고농도 클로로필 *a* 분포를 보였다(Fig.1(b)). 울릉도 연근해역에서 클로로필 *a* 농도가 최대로 나타난 것은 2004년 4월 24일이었다(Fig. 1(c)). 이후 4월 28일에는 클로로필 *a* 농도가 점차 낮아지기 시작했다(Fig.1 (d)).

한편, 울릉도 연근해역에 나타난 위성 원격탐사로 추정된 이상농도의 클로로필 *a* 분포가 자생적인 것인지 해류 등 물리적인 유동에 의해 연안에서 대량 번식된 식물플랑크톤이 울릉도 근해역 쪽으로 집적되어 높은 농도의 클로로필 *a* 분포가 나타난 것인지에 대한 원인을 파악하기 위해 수온분포로 유추할 수 있는 간접적인 방법으로 미국의 NOAA 위성 적외선 위성자료를 분석하여 가시화 하였다(Fig. 2). 2004년 4월 8일 동해난류(EKWC)가 동해연안을 따라 북상 후 (Fig. 2(a)), 4월 20일 및 4월 24일에는 울릉도 주변 근해를 선회하는 난수 소용돌이 모양이 뚜렷하게 나타났다(Fig. 2 (b)and (c)). 4월 28일 이후에는 울릉난수의 소용돌이 모양이 변형되기 시작했다(Fig. 2.(d)). 각각의 날에 대한 Quikscat 위성자료를 이용한 해상풍 분포 양상을 보면, 4월 8일에는 울릉도를 포함하지 않는 주변해역으로 동풍이 우세하게 불었고(Fig. 3 (a)), 4월 20일에는 정남풍이 (Fig. 3(b)), 4월 24일에는 울릉도 주변해역에서 남남동풍이 우세하게(Fig. 3 (c)), 4월 28일에는 남서풍이 불었다(Fig. 3 (d)).

동해남부 연안과, 특히 울릉도를 중심으로한 반경 약 50km 해역에 나타난 고농도 클로로필 *a* 분포 현상이 사실적인 것인지, 무기부유물질 등 다른 요소에 의해 나타나는 것인지 구명하기위해 육지와 탁수 (turbid water)에 민감하게 반응하는 555nm의 digital number 값을 활용하였다. 2004년 4월 20일 당일의 OCM위성의 555nm 방사 값을 구한 결과 (Fig. 4), 해수표면 방출 복사의 정규화를 거친 555nm

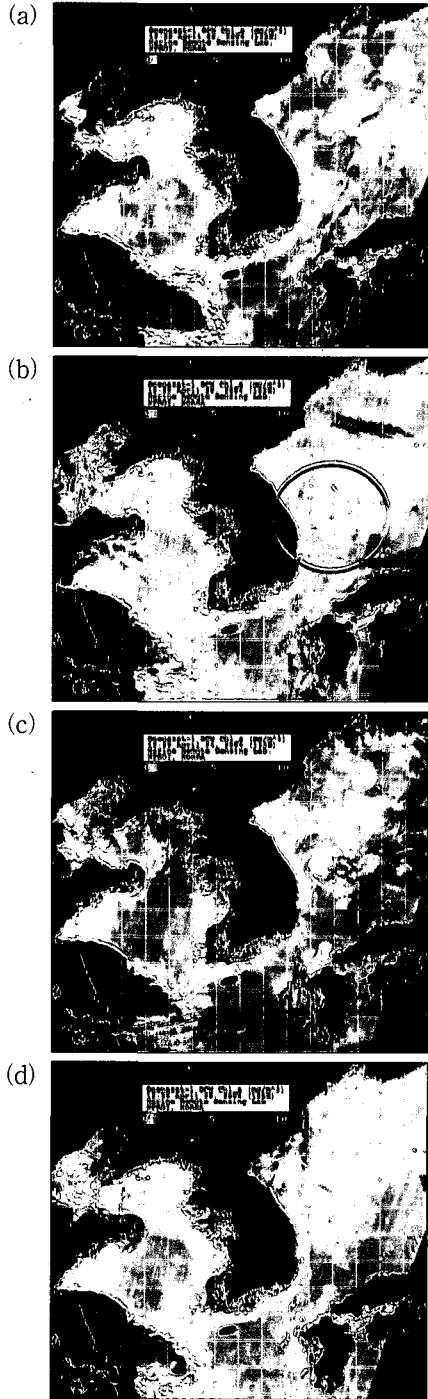


Fig. 1. Chlorophyll a distribution derived from OCM satellite data in the spring of 2004. High concentrations of chlorophyll a occurred around the Ulleung Warm Eddy off the Ulleung Island in the East Sea on (a) April 8, (b) April 20, (c) April 24, and (d) April 28 of 2004.

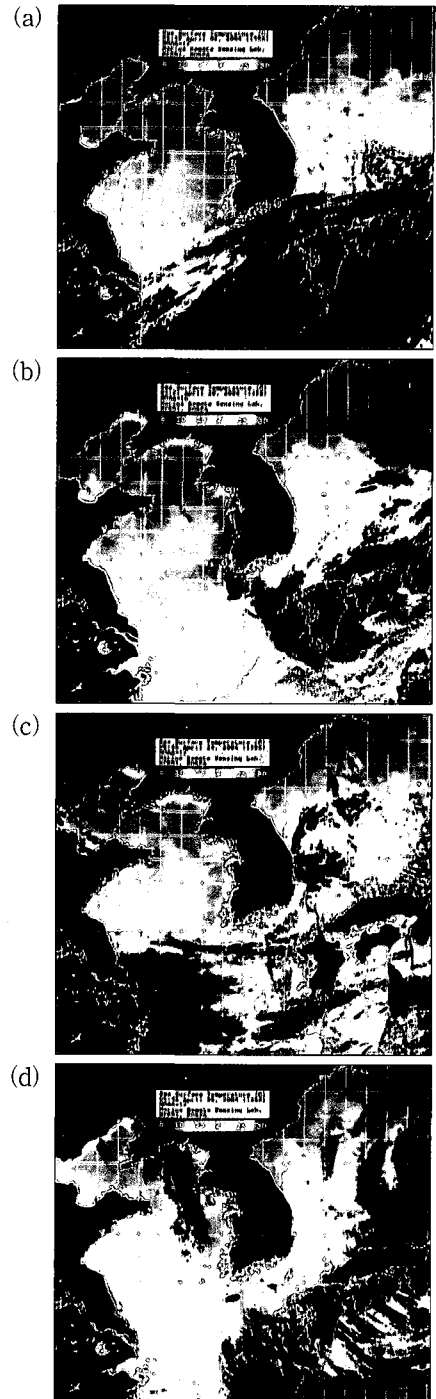


Fig. 2. Sea surface temperature derived from NOAA satellite in spring of 2004. The East Warm Korean Current (EKWC) moved to the northern part of Korea along the eastern coast of the Korean Peninsular on (a) April 8, (b) April 20, (c) April 24, and April 28 of 2004.

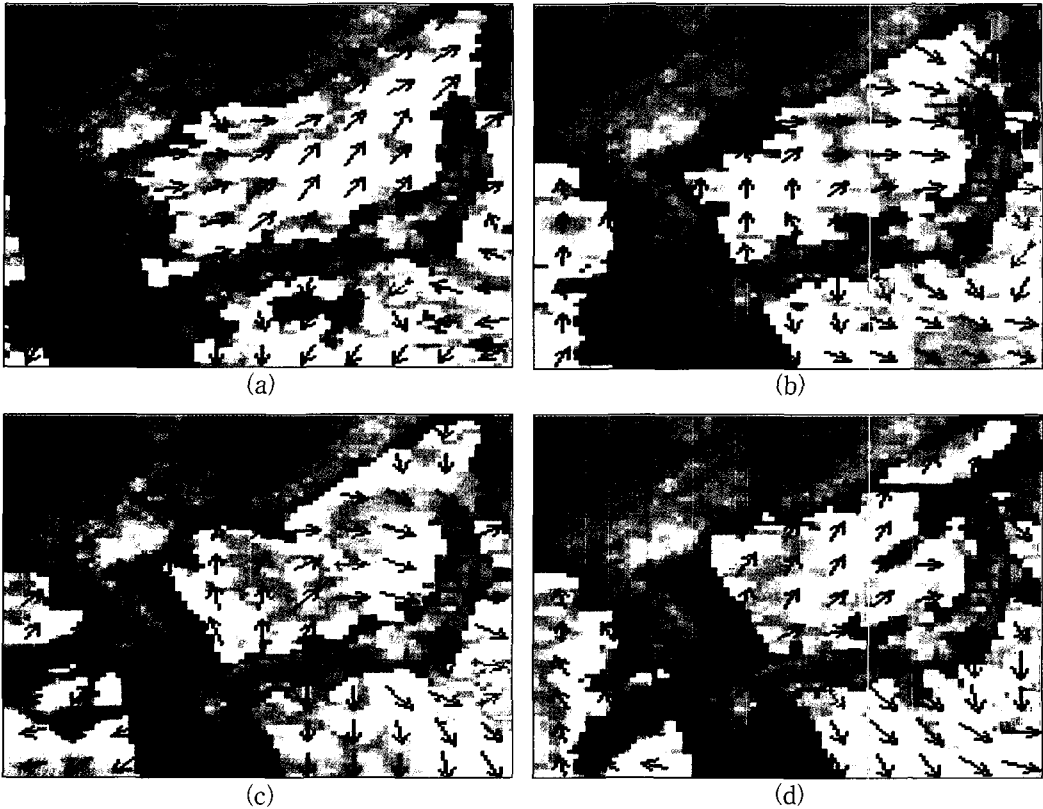


Fig. 3. Sea surface wind derived from Qickscat satellite in April 8-28, 2004.

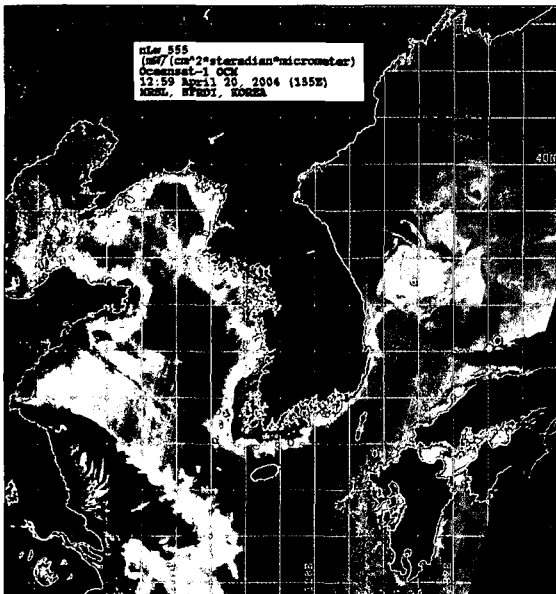


Fig. 4. Normalized water leaving radiance of 555 nm derived from OCM satellite on April 20, 2004.

분포도를 통해 낙동강에서 유출된 부유사가 앞에서 보인 클로로필 a 분포(Fig. 1)와 유사한 양상을 나타내었다. 이러한 결과는 클로로필 a 농도를 위성 관측 값으로 추정할 때, 과대 추정될 수 있는 여지를 보였다.

2004년 4월 20일 OCM 위성자료를 분석하여 추정한 클로로필 a 값을 정량화 하였다(Fig. 5) 낙동강 연근해역 및 동해남부 연안역의 값이 $0.45\text{--}0.55\text{mg}/\text{m}^3$ 으로 나타났으며, 울릉도 연근해역에서는 $0.35\text{--}0.45\text{mg}/\text{m}^3$ 으로 연안에서 보다는 다소 낮게 나타났다. 2004년 4월 국립수산과학원 동해수산연구소에서 관측한 수온분포에서 $12\text{--}14^\circ\text{C}$ 의 등온선이 울릉도를 중심으로 선회하며 와동류 모양으로 나타났다. 클로로필 a 현장 값은 위성에서 추정한 값에 비해 대체로 크게 낮은 값을 보였으나, 농도의 분포양상은 위성추정치와 비슷한 양상을 보였다. 또한, 클로로필 a 농도는 동해남부 연안에서 $0.06\text{--}0.12\text{mg}/\text{m}^3$, 울릉도 연근해역에서 $0.04\text{--}0.06\text{mg}/\text{m}^3$ 로 동해 연근해 주변해역의 $0.02\text{--}0.04\text{mg}/\text{m}^3$ 클로로필 a 농도 보다 상대적으로 높게 나타났으나, 위성의 정량화 값에 비해서는 매우 낮은 현장 농도 값을 보였다(Fig. 6).

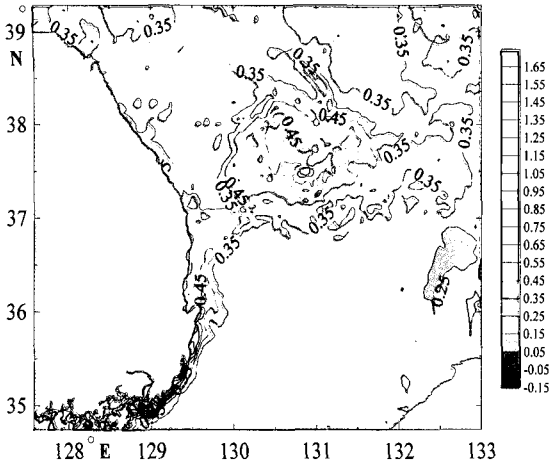


Fig. 5. Quantification of estimated chlorophyll a (mg/m^3) derived from Oceansat-1/OCM satellite on April 20, 2004.

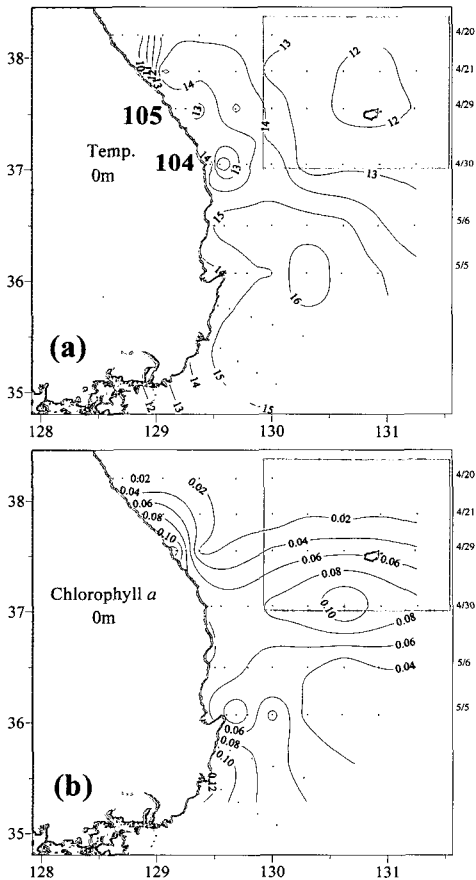


Fig. 6. Distributions of in situ (a) sea surface temperature ($^{\circ}\text{C}$) and (b) chlorophyll a ($\mu\text{g}/\text{l}$) in the eastern waters of Korean Peninsula in April, 2004.

2004년 4월 한반도 남쪽의 낙동강 유출수 등 연안수가 동해연안을 따라 북상하는 과정에서, 주변해역에 비해 상대적으로 높은 농도의 클로로필 a 분포가 형성되는 것으로 보이며, 울릉도를 중심으로 약 60 km 반경을 가진 소용돌이의 가장자리 물흐름을 따라 나타났다. 이후, 소용돌이 중심해역으로 고농도의 클로로필 a 분포가 나타났다. 이러한 현상이 매년발생 하는 것인지 파악하기위해 OCM 위성보다는 장기간 (2000~2004년) 및 매일단위로 수신 분석하여온 미국의 SeaWiFS 위성자료로 클로로필의 이상 고농도 분포 발생현상을 살펴보았다 (Fig. 7). 2000년 4월 6일에도 2004년 4월 8월과 같은 현상이 나타났으며 (Fig. 7 (a)), 2001년 4월 4일에는 북한의 청진연안을 중심으로 식물플랑크톤의 대량번식이 발생하여 해류흐름을 따라 이동 후, 울릉 난수 소용돌이(Ulleung Warm Eddy)를 따라 시계방향으로 휘감기는 양상이 나타나는 것으로 추정된다 (Fig. 7(b)). 2002년 4월 12일에는 울릉도 북쪽 100km 해역에서 고리모양의 반경 50km의 고농도 클로로필 a 분포가 나타났으며 (Fig. 7 (c)), 2004년 4월 28일에는 울릉도 주변해역에 이상 고농도 분포 현상이 나타났다 (Fig. 7(d)). 2004년 4월 이후 이러한 고농도 클로로필분포는 2004년 5월 18일 (Fig. 8(a)), 5월 24일 (Fig. (b)) 및 6월 3일 (Fig. 8(c))까지 지속적으로 발생하였고 점차 소멸하였다.

고농도 클로로필 a 분포는 NOAA/AVHRR 위성의 수온자료와 밀접한 관계를 보였다. 울릉도를 중심으로 한 고농도 클로로필 a의 출현 분포는 약 20일 정도 지속되었다. 또한, 북한의 원산만과 청진연안 등에서 발생된 고농도의 클로로필 a 농도 분포가 원산 연근해역에서 재 발생되는 중규모 와동류에 의해 단시간 내 물리적으로 집적되고, 외해역에서 발생된 강한 흐름을 따라 이동된 후 울릉도를 중심으로 발생된 와동류에 재 집적되는 이상현상도 발생할 수 있음을 알게 되었다 이러한 현상은 서 등⁸⁾이 위성추적 표류부이의 궤적관측결과를 통해 (Fig 9) 북한의 원산앞바다에 반경 50km의 재 발생 와동류가 있음을 NOAA위성의 수온분포정보와 함께 증명하였는데, 이러한 시계방향의 강한 흐름(40cm/sec)이 주변해역의 부유 식물플랑크톤을 물리적으로 집적시킬 수 있음을 추정하였다 (Fig. 10).

4. 결 론

춘계 동해 남부 연안에서 나타난 고농도 클로로필 a 분포가 연안을 벗어나 울릉도를 중심으로 집적되는 고농도 식물플랑크톤의 이상분포를 해수색 탐사위성과 수온관측 위성자료를 이용하여 정량화하였다. 춘계 울릉도를 중심으로 반경 50km 정도의 대

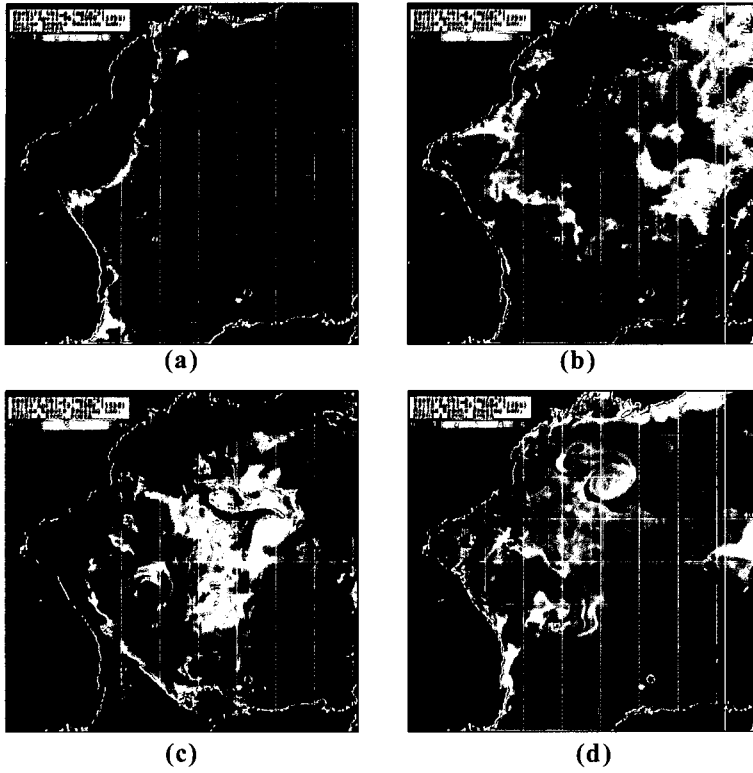


Fig. 7. Chlorophyll a distribution derived from SeaWiFS satellite in April, (a) 2000, (b) 2001, (c) 2002 and (d) 2004.

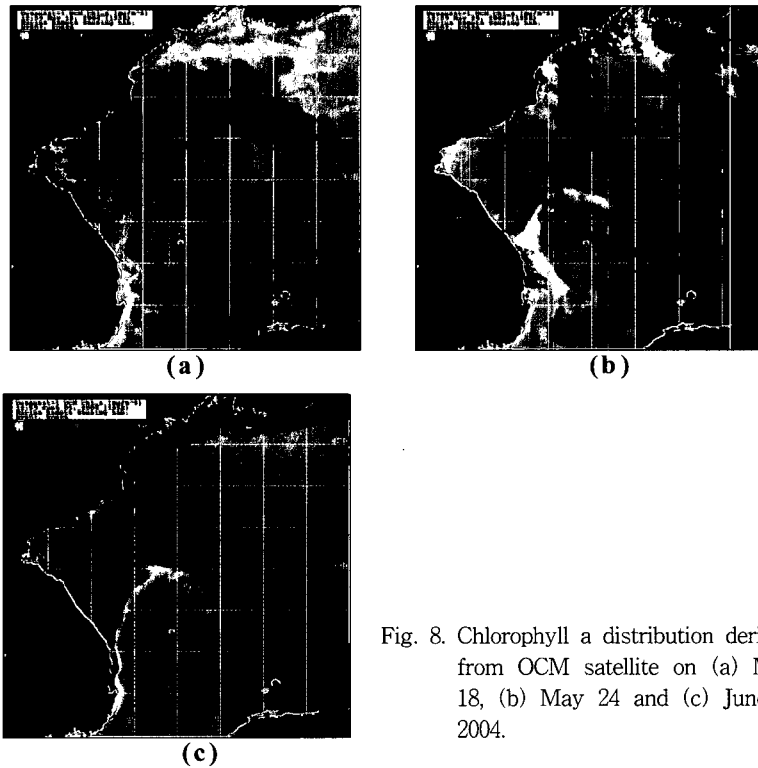


Fig. 8. Chlorophyll a distribution derived from OCM satellite on (a) May 18, (b) May 24 and (c) June 3, 2004.

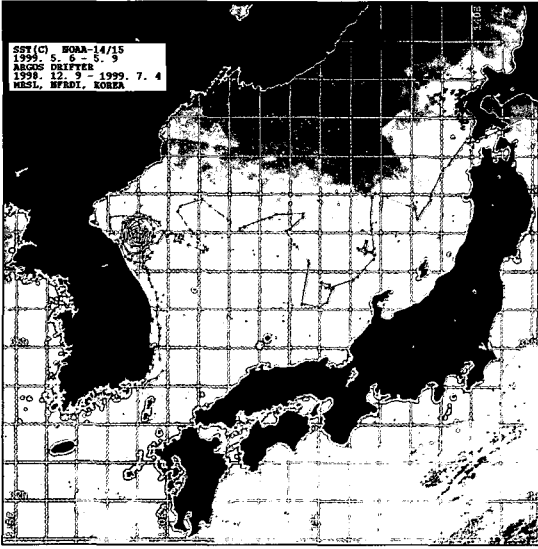


Fig. 9. NOAA-14 and NOAA-15 composite SST during May 6-9 in 1999 in the East Sea. The trajectory of the ARGOS-tracked drift buoy (December 9, 1998 - July 4, 1999) is shown by red track lines (Suh *et al.*, 2000).

규모 이상 고농도 클로로필 *a* 분포가 자생적인 것인지 물 흐름에 의해 식물플랑크톤들이 물리적으로 것인지 파악하기 위해 현장 관측 자료와 위성자료를

상호 비교하여 살펴보았다.

낙동강유출수가 동해 남부 연안을 따라 북상하는 이동경로를 수치모델로써 추정된 황 등¹¹⁾의 연구결과와 같이, 본 연구에서는 낙동강 유역과 연안수 등이 북상하는 과정에서 높은 농도의 부유사와 클로로필 *a* 분포가 나타남을 위성원격탐사 기법을 활용하여 알 수 있었다. 또한, 낙동강의 유출수 경계역이나, 동해남부에 형성된 수온 전선역에서 대량 번식된 기초먹이생물과 부유물질들이 물리적으로 강한 흐름을 동반하는 연안해류와 울릉도 주변해역의 와동류(eddy)에 의해 집적(accumulation)됨으로써 비교적 고농도의 클로로필 분포 양상이 나타남과 그 제반의 과정을 파악 및 추정할 수 있었다. 또한 울릉도 주변해역에 강제 집적되는 부유물질들이 위성탐사 클로로필 *a* 농도 값을 과대추정하게 하는 한 요인이 될 수 있음도 파악할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국립수산과학원 동해수산연구소에서 수행 중인 사업과제 (동해해양환경연구, RP-2006-ME-001) 수행의 일부 결과입니다. 힘든 환경임에도 불구하고 열심히 동해정선해양관측을 수행하시는 분들과 동해수산연구소 해양환경팀원께, 그리고 위성자료 정리에 도움을 준 이나경 연구원에게도 지면을 빌려 감사를 드립니다.

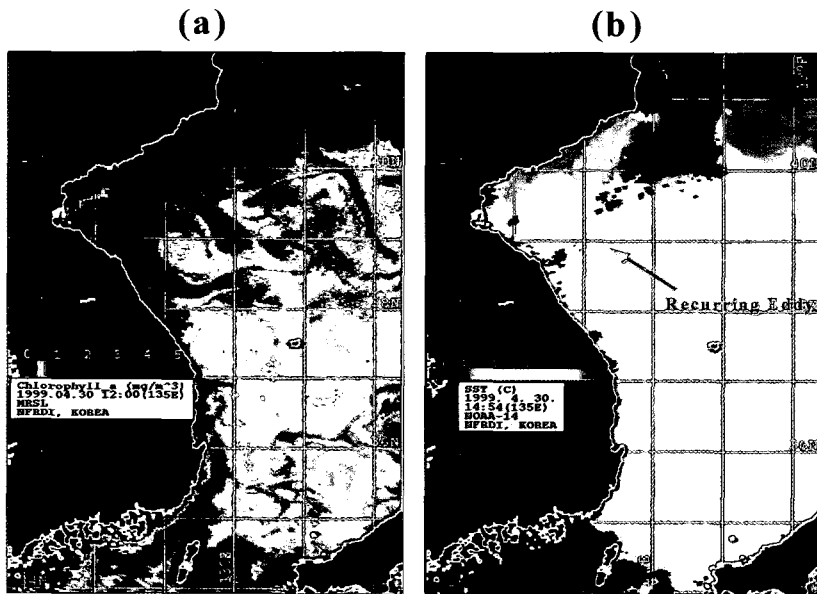


Fig. 10. Distributions of chlorophyll *a* and SST on April 30, 1999(Suh *et al.*, 2000).
 (a) Surface chlorophyll *a* distribution from SeaWiFS sensor.
 (b) NOAA AVHRR SST distribution.

참 고 문 헌

- 1) 서영상, B. G. Mitchell, 장이현, 이삼근, 유신재, 2001, 해수색 위성자료의 검보정, 한국환경과학회지, 10(6), 431-436.
- 2) 서영상, 장이현, 이나경, 김복기, 2002, 한국 근해 ocean color 위성자료의 정량화, 한국수산학회지, 35(3), 207-215.
- 3) Suh, Y. S., L. H. Jang, B. G. Mitchell, M. Kahru, K. Prasad and H. Y. Shin, 2002, Study on the Korean water using the CAL/VAL of the OSMI level2 data, Korean Journal of Remote Sensing, 18(3), 127-139.
- 4) 서영상, 구지영, 황재동, 이나경, 김복기, 장이현, 강용균, 이동인, 2003, 태풍에 의해 발생하는 한국 근해 해황이상 변동, 한국수산학회지, 36(4), 417-429.
- 5) 오현주, 서영상, 허승, 2004, 동해 남부연안 냉수대 변동과 관련된 해양환경 및 식물플랑크톤의 변동 특성, 한국지리정보학회지, 7(4), 166-173.
- 6) Suh, Y. S., L. H. Jang, N. K. Lee and J. Ishizaka, 2004, Feasibility of red tide detection around Korean waters using satellite remote sensing, J. Fish. Sci. Tech., 7(3), 148-162.
- 7) O'Reilly, J. E., S. Maritorena, B. G. Mitchell, D. A. Siegel., K. L. Carder, S. A. Garver, M. Kahru and C. R. McClain, 1998, Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS, J. Geophys. Res., 103, 24,937-24,953.
- 8) 서영상, 장이현, 김정희, 2000, 위성원격탐사를 이용한 동해 원산연안의 재발생 와동류 연구, 16(3), 211-220.
- 9) Mitchell, D. A., D. R. Watts, M. Wimbush, W. J. Teague, K. L. Tracy, J. W. Book, K. I. Chang, M. S. Suk and J. H. Yoon, 2005, Upper circulation patterns in the Ulleung Basin, J. Deep-Sea Research, II(52), 1617-1638.
- 10) An, H. S., K. S. Shim and H. R. Shim, 1994, On the warm eddies in the southwestern part of the East Sea (the Japan Sea), J. of the Oceanological Society of Korea, 29, 152-163.
- 11) 황재동, 강용균, 서영상, 조규대, 박성은, 장이현, 이나경, 2002, 위성영상 및 수치모델을 이용한 낙동강 유출부유토사 확산범위 추정, 한국지리정보학회, 5(2), 25-33.