

한국근해 해황과 클로로필 *a* 분포의 시공간적 변동 특성

오현주^{1*} · 서영상²

Temporal and Spatial Characteristics of Chlorophyll *a* Distributions Related to the Oceanographic Conditions in the Korean Waters

Hyun-Ju OH^{1*} · Young-Sang SUH²

요 약

1999~2001년 한국근해에서 수온, 클로로필 *a*, 동물플랑크톤 등 현장자료와 해수색 위성원격탐사 자료를 분석하였다. 표면수온은 온대해역의 수온계절변동을 나타내었고, 클로로필 *a*와 동물플랑크톤 현존량은 온대해역의 특징을 보였으며, 춘계와 추계의 대량번식의 크기는 식물플랑크톤의 경우 춘계가, 동물플랑크톤은 추계가 더욱 크게 나타났다. 동서남해 해역에서 전반적으로 식물플랑크톤이 대량번식 후 15일에서 30일 정도의 시간차를 두고 동물플랑크톤의 현존량이 변동하였다. 동서남해의 평균 클로로필 *a*의 연별 변동은 춘계의 경우 해를 거듭 할수록 감소하는 경향을, 추계 연별 변동은 동해를 제외한 남해와 서해에서는 다소 증가하는 경향을 보였다. 한편, 위성자료에서 추정된 클로로필 *a*의 농도는 현장에서 관측된 값보다 낮은 값으로 나타났다.

주요어 : 수온, 클로로필 *a*, 동물플랑크톤, NOAA, SeaWiFS

ABSTRACT

By analyzing the sea surface temperature (SST), chlorophyll *a*, zooplankton and Orview/SeaWiFS satellite data in the Korean Waters from 1999 to 2001, we studied the seasonal and annual variation of chlorophyll *a* concentration and zooplankton biomass. Sea surface temperature was fluctuated with the typical seasonal variation in the waters of temperate zone. Chlorophyll *a* concentration and zooplankton biomass were high in spring and autumn. Year to year fluctuations on annual averaged chlorophyll *a* concentrations in Korean Waters in the spring from 1999 to 2001 were decreased continuously. On the other hand, the estimated chlorophyll *a* concentrations derived from SeaWiFS ocean color data were lower than the measured sea surface chlorophyll *a* in the Korean Waters.

KEYWORDS : Temperature, Chlorophyll *a*, Zooplankton biomass, NOAA, SeaWiFS

2006년 5월 2일 접수 Received on May 2, 2006 / 2006년 7월 25일 심사완료 Accepted on July 25, 2006

1 국립수산물과학원 남해수산연구소 South Sea Fisheries Research Institute, National Fisheries Research and Development Institute

2 국립수산물과학원 동해수산연구소 East Sea Fisheries Research Institute, National Fisheries Research and Development Institute

* 연락저자 E-mail: hjoh@momaf.go.kr

서론

한국근해는 대형의 대륙붕과 심해까지 다양한 지형학적 형태를 기반을 둔 동해, 서해, 남해로 이루어져 있어, 다른 수괴의 혼합으로 매우 복잡한 해양학적 특성을 보여주고 있다.

동해는 동해고유수가 90% 차지하여 폐쇄된 해양특성을 가지는데 반해, 대한해협에서 유입되는 대마난류와 동해연안을 따라 남하하는 북한난류가 그 특성 변동에 영향을 미친다. 특히 대마난류의 지류인 동한난류는 한반도 동해연안을 따라 북상하면서 중, 저층에 분포하는 동해고유수와 북한난류수와 만나 극전선을 이룬다. 서해는 최대수층이 90m 이내의 천해로 대기의 영향을 받는 반폐쇄적인 해양 특성을 보이는데, 동계는 전수층의 혼합으로 균질한 수괴를 이루나 여름철에는 표층의 온도가 상승하고 하층에는 황해저층냉수가 존재하여 큰 온도 구배를 가지는 성층을 이룬다. 특히, 연안역의 경우 조석의 영향으로 조석전선이 나타난다. 남해는 대마난류, 황해난류수, 중국대륙연안수, 황해저층냉수 등 성질이 다른 수괴가 상접하여 다양한 생물자원이 서식하고 있어 수산자원학적으로 매우 중요하다. 또한 남해는 서해 및 동중국해와 인접하고 있어 그 주변 해황이 복잡하며 동계에 강한 북서계절풍으로 인한 전 수층의 혼합으로 균질한 수괴를 형성한다. 그리고 하계에는 양자강 등의 중국 하천수의 유입으로 중국대륙연안수가 형성되어 우리나라로 확장되어 영향을 끼친다(국립수산진흥원, 2001).

생태계에서 기초생산자로서 중요한 역할을 하는 식물플랑크톤은 생태계내의 물리·화학적 환경요인의 변동에 따라 종조성이나 출현량에 있어 뚜렷한 변동을 보인다. 클로로필 a 는 식물플랑크톤 중 가장 높은 비율로

나타나는 색소로서 클로로필 a 농도의 조사로 식물플랑크톤의 양 변동을 모니터링 할 수 있다. 클로로필 a 의 시공간적 변동을 파악하는 것은 생태계 내의 물질순환을 밝히기 위한 기초 자료로서 매우 중요하다(Chen and Go, 1983).

클로로필을 함유한 식물플랑크톤 양의 분포와 변동은 물리적 해황변동 및 동물플랑크톤 현존량 등의 분포양상과 밀접한 관련을 가진다(Suh, 2005).

최근엔 위성원격탐사 기법을 이용하여 한반도 주변의 표면수온분포 양상을 연구하는 것뿐만 아니라, 현장 관측 값과 비교하여 해수색 원격탐사 자료를 이용하여 클로로필 a 의 변화를 정량화하고 있으며 위성자료의 정확도 향상을 위한 검보정 연구도 일부해역에서 진행되고 있다(서 등, 2001; 서 등, 2002; Suh et al., 2002; 서, 2006; 오 등, 2004).

지금까지 연구는 한국근해의 물리적 특징과 연안 해역 또는 일부 특정 해역에 대한 연구에 한정되어 있거나, 동·식물플랑크톤의 종조성과 수괴와의 관계 등 생물학적 특징에 대한 연구는 특정해역과 계절에 대하여 연구되었다. 또한, 해역간 조사시기의 차이점으로 인하여 한반도 주변 해역을 총망라한 기초먹이생물량의 변동 분석은 미비하였다. 그러나, 국립수산과학원은 수산특정연구개발사업을 계기로 한국 연근해역(동서남해)의 기초먹이생물량을 1999~2001년 3년간 관측하였다.

본 연구에서는 한반도 주변 연근해역의 현장 클로로필 a 계절변동과 물리적 해황특성, 동물플랑크톤 현존량의 분포와의 관련성을 중규모적 시공간 변동을 통해 살펴보고자 하였다. 또한, 위성추정 및 현장의 클로로필 a 값 간의 비교를 통해 관련성을 보고자하였다.

연구 방법

해수색 관측위성 통과시 연구조사선을 이용하여 동·서·남해에서(그림 1) 3개년(1999~2001년)간 격월별(2, 4, 6, 8, 10, 12월)로 관측한 클로로필 a , 수온(국립수산과학원 2000~2002), SeaWiFS 위성의 ocean color 및 NOAA 위성의 적외선 추정 수온자료를 이용하였다(국립수산진흥원 1999~2002).

수온은 Sea-Bird CTD (Conductivity, Temperature and Depth)장비로 측정하였으며, 클로로필 a 는 위성자료와 비교분석하기 위하여 표층에서 해수 투명도에 따라 500~1000 mL를 채수하여 glass microfiber filter (GF/F)로 여과하였다. 여과가 끝나기 직전 산화를 방지하기 위하여 1% 탄산마그네슘 용액 1 mL로 고정시킨 다음 냉동 보관하였다. 보관된 여지를 90% 아세톤 10 mL에 담그어 24시간 동안 냉암소에서 방치하여 클로로필 a 를 추출하였다. 추출된 클로로필 a 는 상등액을 취하여 형광광도계(Fluorometer; Turner Designs, Model 10-Au-000)로 분석하였다. 동물플랑크톤현존량은 NORPAC 네트(망구 45cm, 망목 330 μ m)로 저층에서 표면까지 1 m/sec 속도로 연직으로 인망하였으며, 채집 후 5% 중성포르말린을 고정하여 습중량으로 현존량을 구하였다.

또한, 한국연근해역 표면수온의 시·공간적 변동을 파악하고자 열감지 위성인 NOAA 위성에 탑재된 고해상도 열적외선 감지기(AVHRR)의 자료를 분석한 결과를 이용하였고(국립수산진흥원, 1999; 2000; 2001), 해양수색관측 위성 SeaWiFS의 클로로필 a 분포는 SEABAM (SeaWiFS Bio-optical Algorithm Mini-workshop) 알고리즘을 기반으로 전지구 대상 클로로필 추정 알고리즘(OC2)을 이용하여 현장에서 관측된 클로로필 a 농도(μ g/L)와

달리 mg/m^3 농도로 계산하였다(McClain, 1997; O'Reilly et al., 1998).

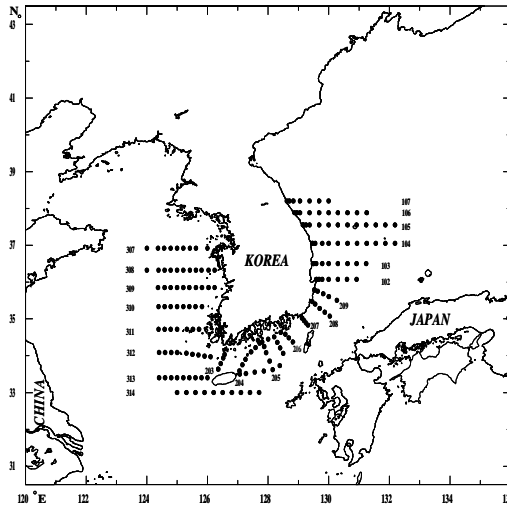


FIGURE 1. Sampling stations located in the Waters around the Korean Peninsula

결과 및 고찰

1. 수온의 분포 특징

1999~2001년 동안 동·서·남해 연근해역에서 관측된 수온의 평균값을 살펴보면(그림 2), 동계인 2월 평균수온은 10.6 $^{\circ}$ C로 가장 낮고, 춘계인 4월과 6월에는 각각 11.8 $^{\circ}$ C, 18.7 $^{\circ}$ C, 하계인 8월에 25.7 $^{\circ}$ C로 가장 수온이 높았으며, 추계인 10월에는 20.4 $^{\circ}$ C로 온대해역의 수온계절 변동 특징을 보였다.

해역별 연별 변동 특징을 살펴보면(그림 3), 그림 2와 같은 온대해역에서 나타나는 계절변동을 보였다. 특이한 점은 서해에서는 8월을 제외한 나머지 조사 월에서 동해와 남해의 수온에 비해 상대적으로 3~6 $^{\circ}$ C 정도 낮은 분포를 보였다.

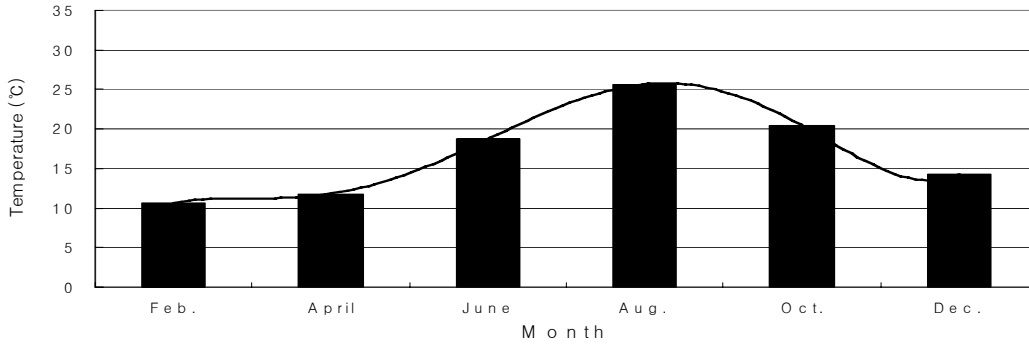


FIGURE 2. Fluctuations of the monthly averaged sea surface temperature (°C) in the Korean Waters from 1999 to 2001

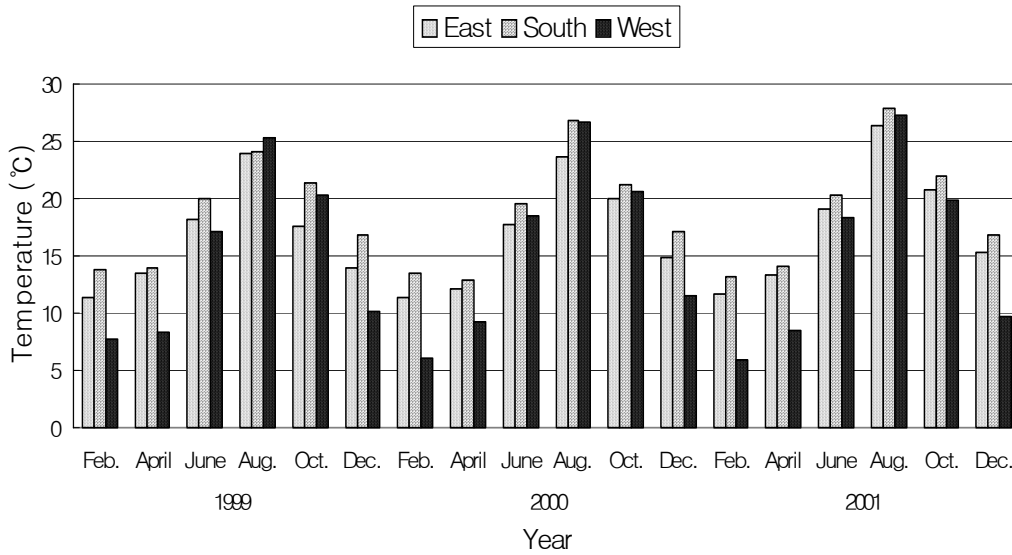


FIGURE 3. Sea surface temperature variations in the eastern, southern and western sea around the Korean Peninsula in every other months from 1999 to 2001

2. 클로로필의 분포 특징

1) 클로로필의 계절 변동

한국근해 표면 클로로필 a의 계절별 평균값의 변동을 살펴보면(그림 4), 춘계인 4월에 0.86 $\mu\text{g/L}$ 로 가장 높았으며, 다음으로 추계인 10월에 0.52 $\mu\text{g/L}$ 로 높게 나타났다. 특히 춘계와 추계는 표준편차가 각각 1.05,

0.99로 해역간 농도차가 크게 나타났다. 이는 온대해역에서 대부분의 식물플랑크톤이 춘계나 추계에 대량 번식이 일어난다고 밝혀진 것과 비슷한 경향을 보였다(Herrera & Margalef, 1961).

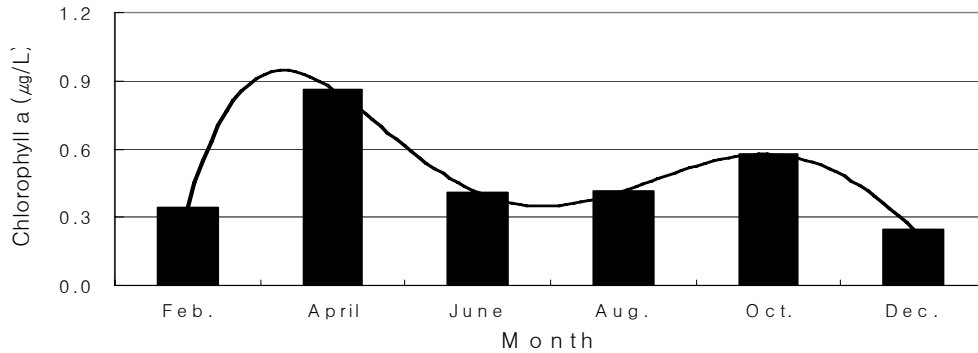


FIGURE 4. Fluctuations of the monthly averaged chlorophyll *a* ($\mu\text{g/L}$) in the Korean Waters from 1999 to 2001

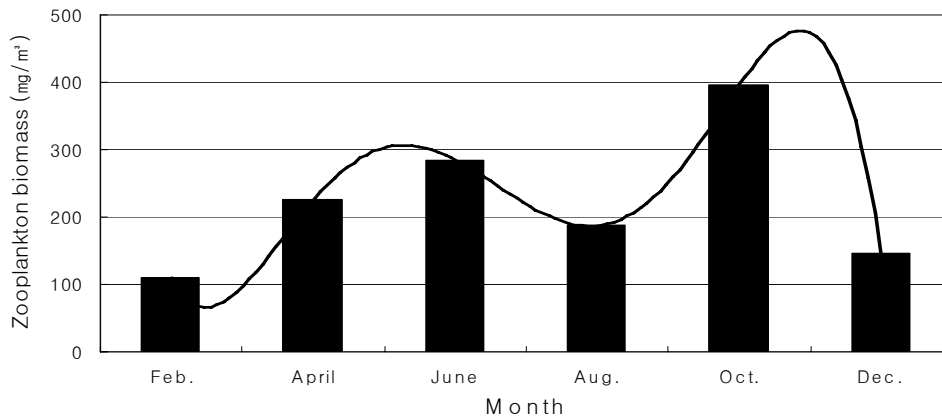


FIGURE 5. Fluctuations of the monthly averaged zooplankton biomass(mg/m^3) in the Korean Waters from 1999 to 2001

3. 동물플랑크톤의 분포 특징

1999~2001년 동안 동서남해 해역에서 관측된 월별 평균동물플랑크톤 현존량을 살펴보면, 온대해역에서의 양상과 비슷하게 춘계와 추계에 높은 농도 분포를 보였으나, 클로로필 *a*의 분포와 달리 춘계보다 추계에 더 높은 현존량 분포를 나타내었다(그림 5).

4. 클로로필과 동물플랑크톤현존량의 관계

클로로필 *a* 분포는 생태계에 있어 일차생산

자인 식물플랑크톤 양의 분포를 나타내는 아주 중요한 역할을 하며(오 등, 1999), 저차 소비자인 동물플랑크톤의 섭식률에 따라 영향을 받게 된다(Tan, 2004). 1999~2001년 동안의 연별 변동을 살펴보면 일반적인 먹이그물에서 나타나는 영양단계로 식물플랑크톤양의 증감에 따라 동물플랑크톤현존량 또한 시간차(time lag)를 가지며 변동하였다(그림 6). 월평균 표면수온은 전형적인 계절변동을 나타내었으나, 동서남해 해역에서 전반적으로 식물플랑크톤이

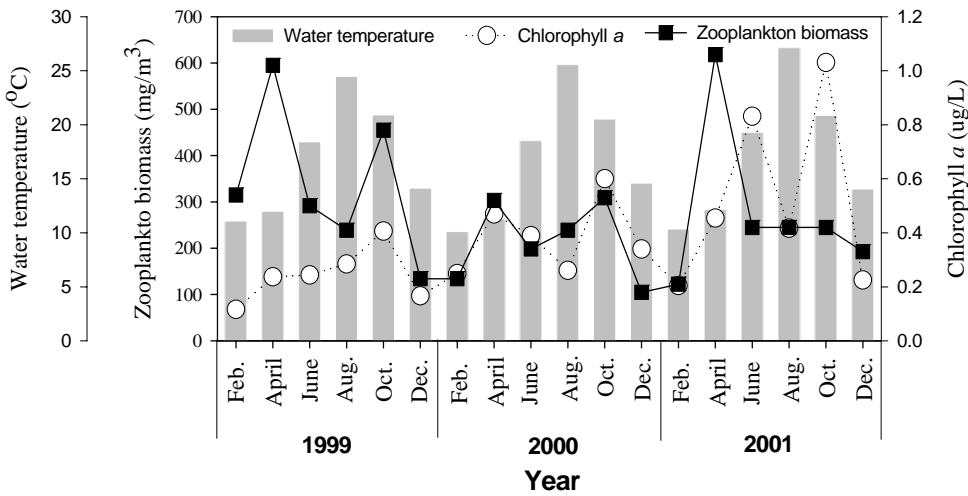


FIGURE 6. Fluctuations of the monthly averaged water temperature (°C), chlorophyll a (µg/L) and zooplankton biomass (mg/m³) in the Korean Waters from 1999 to 2001

대량번식 후 15일에서 30일 정도의 시간차를 두고 동물플랑크톤의 현존량이 변동하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 영국해협에서 식물플랑크톤과 동물플랑크톤의 계절변화와 비슷한 경향을 보였다(Harvey, 1955).

5. 현장과 해수색 위성에서 관측된 클로로필 a 량 분포의 비교

1999년 4월의 경우(그림 7-1) 평균 1.02 µg/L, 0.001~4.05 µg/L범위로 2월과 같이 동해가 평균 1.57 µg/L로 서해, 남해에 비해 높았다. 서해에서는 어청도를 중심으로 한 연안역에서 최대값 3.03 µg/L로 매우 높게 나타났다. 동해의 경우 주문진~방어진간 연안역에서 1.5 µg/L 이상으로 외해역에 비해 높았으며, 남해는 소리도 연안역에서 2 µg/L 이상으로 매우 높게 나타났다. 1999년 4월 30일 12시에 관측된 해수색 위성자료를 정량화한 결과(그림 7-2)로 서해해역은 구름으로 가려 값을 구할 수 없었으나, 대한해협의 경우 0.3 mg/m³ 농도의 분포,

동해 연근해역의 경우 0.3~0.4 mg/m³의 분포를 보였다.

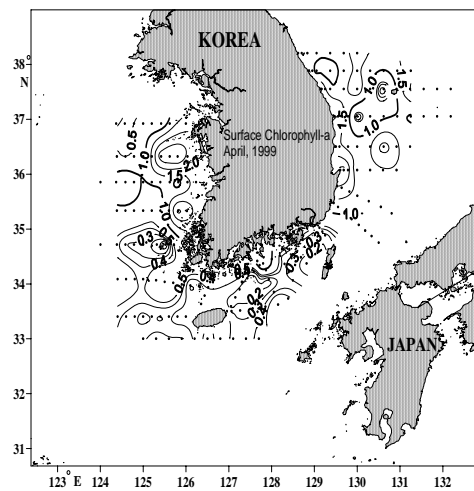


FIGURE 7-1. Measured sea surface chlorophyll a (µg/L) distributions in the Korean waters in the April of 1999

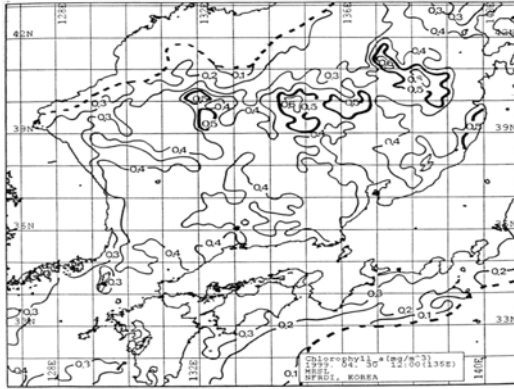


FIGURE 7-2. Estimated chlorophyll *a* (mg/m³) derived from SeaWiFS ocean color data in the Korean waters in the April of 1999

2001년 2월 현장에 관측된 클로로필 *a*의 표층 농도는 평균 0.21 $\mu\text{g/L}$, 0.03~0.75 $\mu\text{g/L}$ 범위로 나타났다. 동해는 평균 0.14 $\mu\text{g/L}$ 로 타 해역 중 가장 낮은 농도분포를 보였으며, 해역 간 차가 크게 나타났다. 서해는 평균 0.16 $\mu\text{g/L}$, 0.04~0.64 $\mu\text{g/L}$ 범위로 군산연안 인접해역에서 0.5 $\mu\text{g/L}$ 이상으로 나타났다. 남해의 경우 평균 0.33 $\mu\text{g/L}$ 이며, 해역 간 차가 작았다(그림 8-1). 2001년 2월 19일 13시 3분에 관측된 해수색 위성자료를 정량화한 결과(그림 8-2), 기초먹이생물량 분포는 동해에서 0.55~0.70 mg/m^3 , 남해에서 0.40~0.55 $\mu\text{g/m}^3$ 의 농도 분포를 보였으며, 서해 해역은 구름으로 덮여 분석할 수 없었다. 이와 같이 현장자료와 해수색 위성자료와 오차가 생기는 것은 에어로졸 같은 대기오염 상태와 현장에서 관측된 클로로필 *a*는 식물플랑크톤의 여러 색소 중 대표 색소로 해수의 색(ocean color)이 식물플랑크톤에 의해 표현되지 않고 탁한 무기물질에 의해 변하게 될 때(case 2 해수의 경우), 위성에서 감지하여 클로로필 *a* 값을 추정함으로 정확도가 낮아지기 때문이다.

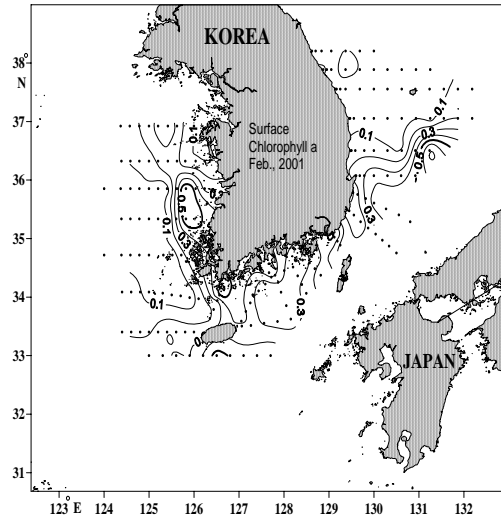


FIGURE 8-1. Measured sea surface chlorophyll *a* ($\mu\text{g/L}$) distributions in the Korean waters in the February of 2001

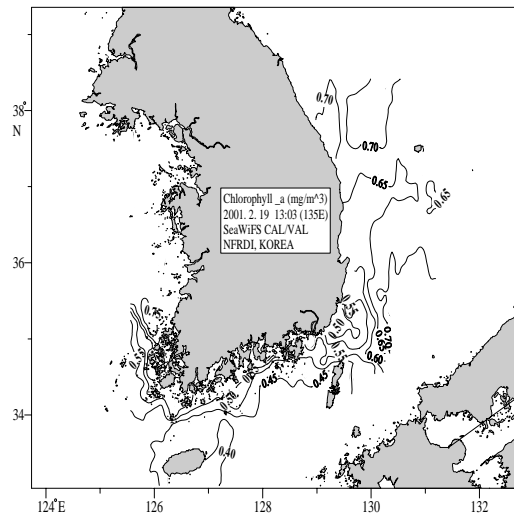


FIGURE 8-2. Estimated chlorophyll *a* derived from SeaWiFS ocean color data in the Korean waters in the February of 2001

한국근해에서 식물플랑크톤이 증가하는 춘계와 추계 대번식 시기인 4월과 10월의 현장(그림 9-1)과 위성(그림 9-2)에서 얻어진

3년간의 표면 클로로필 a 평균값의 변동을 살펴보았다. 현장 클로로필 a의 경우 춘계의 경우 해를 거둬할수록 동해는 감소하였으나 남해와 서해의 경우 3개년 모두 0.5 $\mu\text{g/L}$ 이내의 분포를 보였다. 그리고, 추계는 동해를 제외한 남해와 서해에선 증가하는 경향을 보였다. 그러나 위성자료에서 얻어진 클로로필 a의 변동(그림 9-2)을 보면 춘계의 경우 동서남해 모든 해역에서 춘계 대번식이 해를 거둬할수록 커져갔으나, 추계는 2002년 동해를 제외한 남해와 서해에서 0.5 mg/m^3 내외의 균일한 분포를 보였다.

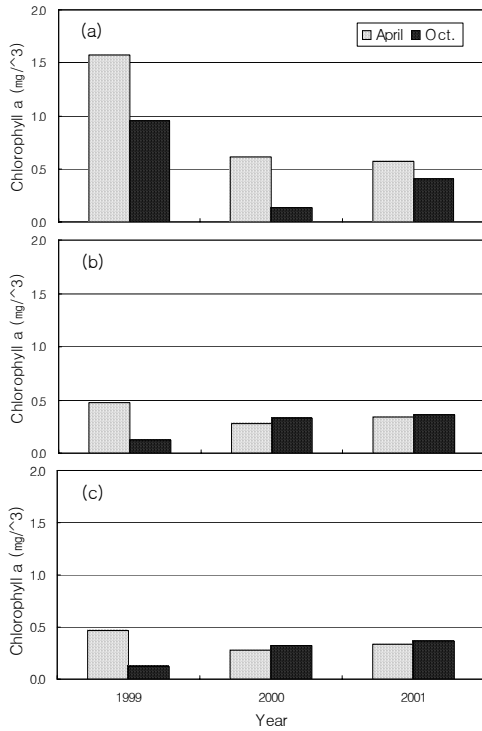


FIGURE 9-1. Year to year fluctuations of annual averaged chlorophyll a concentrations (mg/m^3) in April and October in the (a) eastern sea, (b) southern sea and (c) western sea around the Korean Peninsula from 1999 to 2001

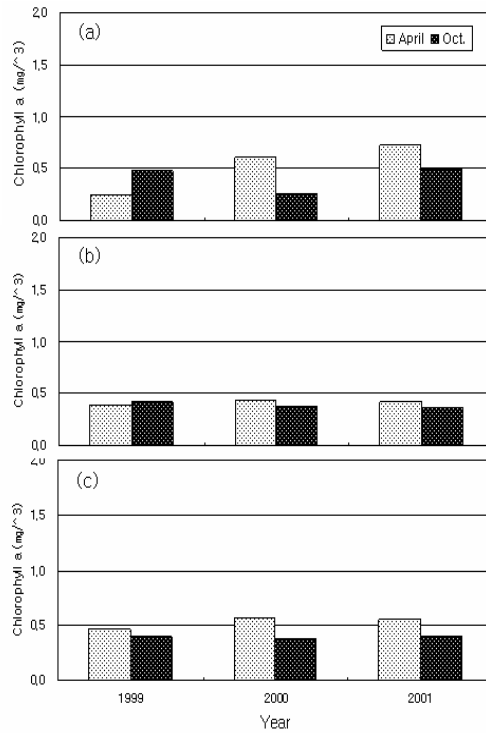


FIGURE 9-2. Averaged chlorophyll a concentrations (mg/m^3) from ocean color satellite in April and October in the (a) eastern sea, (b) southern sea and (c) western sea around the Korean Peninsula from 1999 to 2001

결론

1999~2001년 동안 한반도 연근해역에서 관측된 클로로필 a 값의 계절변동과 년별 변동을 주변의 해양의 물리적 변동 요소와 비교하였으며, 동물플랑크톤의 시계열변동과도 비교하여 그 관계성을 살펴보았다. 또한 현장 관측된 클로로필 a 값과 해수색 위성자료로 분석으로 추정된 클로로필 a 값 간의 차이점을 비교하고 그 이유를 추정하였다.

한반도 연근해역의 표면수온은 전형적인 온대해역의 수온계절변동을 나타내었으며, 서해의 수온이 동해와 남해에 비해 낮은 값을 보였

다. 식물플랑크톤의 농밀도를 간접적으로 파악할 수 있는 클로로필 a 의 계절변동의 경우 온대해역에서 나타나는 춘계와 추계 대량번식 경향을 보였으며, 춘계번식이 추계번식보다 크게 발생하였다. 한편, 동물플랑크톤의 현존량은 춘계 및 추계 공히 높게 나타난 반면, 식물플랑크톤과 달리 춘계보다 추계 현존량이 훨씬 높게 나타났다. 특히, 식물플랑크톤과 동물플랑크톤의 변동 관계는 시간차를 두며 상관성이 높은 계절 및 연별 변동양상을 보였다.

한편, 클로로필 a 의 연별 변동의 경우는 위성과 현장 값의 변동 경향이 다소 불일치하였다. 위성 추정 값과 현장 관측 값 간의 차이점은 현장의 해수색(ocean color)이 식물플랑크톤량의 변화를 직접 반영하지 않고 현탁물질에 의해 변화 될 때 뿐 만아니라, 대기상태가 에어로졸 등에 의해 오염 될 때 크게 변동하는 것으로 추정된다.

감사의 글

국립수산과학원 동서남해 연구소의 해양환경팀 소속 연구원 및 해양조사 선박직원 여러분의 노고에 감사드립니다. 본 연구는 국립수산과학원 동해 및 남해수산연구소의 “해양환경연구” (RP-2006-ME-018)의 일환으로 수행되었습니다. **KAGIS**

참 고 문 헌

국립수산진흥원, 1999. 한국근해 해양정보, 173p.
 국립수산진흥원, 2000. 한국근해 해양정보, 173p.
 국립수산진흥원, 2000. 해양조사연보, 298p.
 국립수산진흥원, 2001. 한국근해 해양정보, 215p.
 국립수산진흥원, 2001. 한국해양편람 제 4판, 436p.
 국립수산진흥원, 2001. 해양조사연보, 327p.
 국립수산진흥원, 2002. 한국근해 해양정보, 232p.
 국립수산진흥원, 2002. 해양조사연보, 327p.

서영상, 2006. 해수색 원격탐사에 의한 동해 연근해역 클로로필 a 이상분포 연구, 한국환경과학회지, 15(1): 59-66.
 서영상, 장이현, 이나경, 김복기, 2002. 한국근해 ocean color 위성자료의 정량화, 한국수산학회지, 35(3): 207-215.
 서영상, B.G. Mitchell, 장이현, 이삼근, 유신재, 2001. 해양수색 위성자료의 검보정, 한국환경과학회지, 10(6): 431-436.
 오현주, 강영실, 박정훈, 1999. 동중국해 북부해역 클로로필 a 의 분포특성과 해양환경 특성, 한국수산학회지, 32(1): 88-97.
 오현주, 서영상, 허승, 2004. 동해 남부연안 냉수대 변동과 관련된 해양환경 및 식물플랑크톤의 변동 특성, 한국지리정보학회지, 7(4): 166-173.
 Chen, D.S. and Y.B. Go, 1983. The distribution of chlorophyll a in the neighbouring waters of Cheju Island. Bull. Mar. Resour. Res. Inst. Cheju Nat. Univ., 7: 23-27.
 Harvey, H.W., 1955. The chemistry and fertility of sea waters. Cambridge Univ. Press, 224p.
 Herrera, J. and R. Margalef. 1961. Hidrografia y fitoplankton de las costas de Castellon, de Julio de 1968 a Junio de 1959. Inv. presq., 20:17-63.
 McClain, C. R., H. Evans, J. W. Brown and M. Darzi, 1997. SeaWiFS quality control masks and flag: initial algorithms and implementation strategy, Vol. 28, Algorithms. Part I, SeaWiFS Technical Report Series. NASA TM 104566.
 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, 937-953.
 Suh Y. S., 2005. Calibration and validation of the estimated chlorophyll a derived from KOMPSAT/OSMI data and fisheries application in the East China Sea, *J. of the Korean Environmental Sciences Society*, 14(10): 911-917.

Suh, Y. S., L. H. Jang, B. G. Mitchell, M. Kahru, K. Prasad, and H. Y. Shin, 2002. Study on the Korean Waters using the CAL/VAL of the OSMI level 2 data. *J. of Korean Society of Remote Sensing*, 18(3): 127-139.

Tan, Y., L. Huang, Q. Chen and X. Huang, 2004. Seasonal variation in zooplankton composition and grazing impact on phytoplankton standing stock in the Pearl River Estuary, China. *Continental shelf research*, 24: 1949-1968. [KAGIS](#)