Article

남해와 동중국해에서 위성으로 추정된 표층수온 및 클로로필의 장기 변화

손영백¹ · 유주형^{1*} · 노재훈² · 주세종³ · 김상현⁴

¹한국해양과학기술원 해양위성센터

²한국해양과학기술원 해양생태계연구부

³한국해양과학기술원 심해저자원연구부

(425-600) 경기도 안산시 상록구 해안로 787

⁴한성대학교 공과대학 기계시스템공학과

(136-792) 서울시 성북구 삼선동 3가 389

Climatological Variability of Satellite-derived Sea Surface Temperature and Chlorophyll in the South Sea of Korea and East China Sea

Young Baek Son¹, Joo Hyung Ryu^{1*}, Jae Hoon Noh², Se Jong Ju³, and Sang-Hyun Kim⁴

¹Korea Ocean Satellite Center, KIOST

²Marine Ecosystem Research Division, KIOST

³Deep-sea and Seabed Resources Research Division, KIOST

Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

⁴Mechanical Systems Engineering, College of Engineering, Hansung University
Seoul 136-792, Korea

Abstract : The purpose of this study is to investigate climatological variations from the sea surface temperature (SST), chlorophyll-a concentration (Chl-a), and phytoplankton size class (PSC), using NOAA AVHRR, SeaWiFS, and MODIS data in the South Sea of Korea (SSK) and East China Sea (ECS). 26-year monthly SST and 13-year monthly Chl-a and PSC data, separated by whole and nine-different areas, were used to understand seasonal and inter-annual variations. SST and Chl-a clearly showed seasonal variations: higher SST and Chl-a were observed during the summer and spring, and lower values occurred during the winter and summer. The annual and monthly SST over 26 years increased by 0.2~1.0°C. The annual and monthly Chl-a concentration over 13 years decreased by 0.2~1.1 mg/m³. To determine more detailed spatial and temporal variations, we used the combined data with monthly SST, Chl-a, and PSC. Between 1998 and 2010, the inter-annual trend of Chl-a decreased, with decreasing micro- and nano-size plankton, and increasing pico-size plankton. In regional analysis, the west region of the study area was spatially and temporally correlated with the area dominated by decreasing micro-size plankton; while the east region was less sensitive to coastal and land effects, and was dominated by increasing pico-size plankton. This phenomenon is better related to one or more forcing factors: the increased stratification of ocean driven by changes occurring in spatial variations of the SST caused limited contributions of nutrients and changed marine ecosystems in the study area.

Key words : climatological variation, SST, chlorophyll-a, phytoplankton size class, East China Sea

*Corresponding author. E-mail : jhryu@kordi.re.kr

1. 서 론

동중국해는 북쪽 경계인 제주도에서 남쪽으로 대만의 북쪽 해안에 위치하고 있으며, 중국 대륙에서 유입되는 장강(Changjiang River)의 영향 및 연안 용승으로 인하여 상대적으로 높은 생산성을 나타내는 지역과 고온/고염의 쿠로시오 본류와 대만난류 지역의 빈영양 해양환경으로 구분된다(정 등 2000; Chen et al. 2001; Chai et al. 2006; Isobe and Matsuno 2008). 동중국해의 주요 영양염 공급원은 대륙붕단을 따라 대륙붕역으로 용승하는 쿠로시오 중층수와 중국대륙 연안수로 나누어진다(Wong et al. 1991; 정 등 2000; Zhang et al. 2007). 그리고 동중국해는 광학적으로 탁한 해수의 특성을 보이는 중국 연안과, 맑은 해수의 특성을 보이는 일본 서쪽 해역, 그리고 맑은 해수와 탁한 해수가 합쳐진 혼합적 특성을 보이는 동중국해의 중심 해역인 제주도 주변 해역으로 구분된다(서 등 2001). 특히 여름철 장강에서 유입된 담수는 장강 희석수(Changjiang Diluted Water: CDW)를 형성하여 연구지역 동쪽인 제주도 및 대마도를 거쳐 동해까지 이동하면서 주변 해역의 생산성 변화를 초래한다(Beardsley et al. 1985; Guan 1994; Hu 1994; Lie et al. 2003).

동중국해는 시/공간적인 변화가 커서 제한적인 현장조사를 통해서만 장기적인 변화를 관측하기 힘들기 때문에, 최근 다양한 위성을 활용한 장기적인 해양환경 변화를 추적하는 연구가 진행되고 있으며, 특히 기후변화에 관련된 연구가 활발히 진행 중이다(Tseng et al. 2000; Folland et al. 2002; Tang et al. 2004; 김 등 2008; Kim et al. 2009; 민 등 2010; 손 등 2010). Kim et al. (2009)는 위성으로 추정된 클로로필을 이용하여 여름철 장강 희석수의 공간적 분포 및 영향을 받는 지역을 규명하고, Yamaguchi et al. (2012)은 장강하구에서 대한민국 남해안까지 장강 희석수가 이동 지역에 따라 0-2개월의 시간적 차이를 보이고 있음을 밝혔다. 손 등 (2010)은 위성에서 추정된 입자성 유기탄소를 이용하여 동중국해 및 남해에서 계절 및 장기적인 변화를 관측하고, 특히 여름에 장강에서 유입되는 담수의 공간적인 변화는 장강 방류량 및 바람의 방향에 의해 영향을 받는 것으로 보고했다. 이런 연구들은 장기적인 시/공간 변화를 고려했지만, 기후변화와 같은 요인보다는 지역 및 물리적 특성에 관한 연구들이었다.

최근 기후변화에 따른 수온 상승이 전지구적 변화뿐만 아니라 지역적으로도 진행되고 있는 것으로 보고되고 있다. 전지구적으로 수온은 1980년 대 이후 급격하게 상승했으며, 이에 따른 결과로 해양의 생산성 변화 또한 예견되고 있다(Crowley 2000; Walther et al. 2002; Edwards and Richardson 2004; Behrenfeld et al. 2006; Hansen et al. 2006). 전지구적 변화양상과 유사하게 한반도 주변해

역에서도 수온이 뚜렷하게 상승함을 현장관측과 위성자료 분석을 통한 연구에서 확인되고 있다(Kang and Choi 1985; Kang 2000; Crowley 2000; Hansen et al. 2006; 민과 김 2006; 민 등 2010). 특히 일차생산성 변화에 영향을 주는 중요한 요인 중에 하나인 수온은 하구역과 같이 영양염의 재생이 빠른 곳에서는 클로로필의 계절변동에 큰 영향을 주거나 적조 발생에도 기여하는 것으로 보고했다(Eppley 1972; 서 등 2000; Bricaud et al. 2002; Wang and Tang 2010). 그러나 본 연구지역인 동중국해는 중국 대륙, 한반도(제주도), 일본 쿠수섬과 인접해 있으며 남쪽으로는 북서태양과 직접 연결되어 있어서, 육지뿐만 아니라 외해의 영향도 크게 받고 있는 복잡한 해양환경을 가지고 있다. 이런 복잡한 해역에서의 장기적인 수온 및 클로로필 변화에 대한 연구는 아직 초보단계라 할 수 있다.

본 연구는 동중국해 지역에서 장기적인 변화를 이해하고 기후변화와 같은 장기 변화 연구를 위한 기초 자료로 제공하기 위해 위성으로 추정된 표층수온, 클로로필 자료와 클로로필을 이용하여 식물 플랑크톤 종조성(phytoplankton functional type 또는 phytoplankton size class)의 계절 및 연/월 변화를 분석하고, 전체 변화뿐만 아니라 지역을 구분하여 시/공간적인 변화 및 특성을 조사하였다.

2. 재료 및 방법

남해안을 포함하는 동중국해에서 표층 수온의 장기 변화를 관측하기 위하여, NOAA AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer) 표층수온 자료는 1985년부터 2010년까지 NASA JPL(Jet Propulsion Laboratory) Pathfinder 5.0 BSST(best sea surface temperature) 4 km 공간해상도를 가지는 월별 합성 자료를 이용했다(<http://podaac.jpl.nasa.gov/index.html>). Level 3 월평균(312개월) 표층수온 자료는 연구지역에 맞도록 SMI(Standard Mapped Image) 처리되어 계절, 연, 그리고 월변화 계산에 사용했다.

해색 위성센서인 SeaWiFS(Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor)과 MODIS(MODerate resolution Imaging Spectroradiometer)의 표준 산출물인 클로로필-a 농도는(O'Reilly et al. 2000) NASA Ocean Biology Processing Group(<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>)의 자료를 사용했다. 1998년 1월부터 2004년 12월까지의 클로로필 자료는 SeaWiFS 일별 자료를 그리고 2003년 1월부터 2010년 12월까지의 클로로필은 MODIS 일별 자료를 이용하여 연구지역에 맞도록 SeaDAS(SeaWiFS Data Analysis System)를 이용하여 1 km 해상도를 가지는 SMI 자료로 처리 후 총 156개의 월별 자료로 합성했다(McClain et al. 2004).

기존의 식물 플랑크톤 종조성 방법(Hirata et al. 2008; Brewin et al. 2011) 지역해보다는 전지구적 규모에서 적용된 방법으로 연구지역과 같은 복잡한 해양환경에서는 좋은 상관관계를 나타내지 않았다(Noh Jae Hoon, personal communicated). 그래서 위성으로 추정된 식물 플랑크톤 종조성 자료는 동중국해 현장관측에서 얻어진 클로로필 자료와 식물 플랑크톤의 크기별 클로로필 농도와 상관관계식으로부터 추정하여 계산했다(Noh Jae Hoon, personal communicated). 이것은 클로로필 농도를 알 경우 크기별 식물 플랑크톤의 클로로필 농도 또는 퍼센트를 계산할 수 있다. 본 연구에서는 월별 식물 플랑크톤 종조성 자료는 SeaWiFS와 MODIS 해색위성의 클로로필 자료를 입력자료로 이용했다. 식물 플랑크톤은 크게 microplankton ($>20\ \mu\text{m}$), nanoplankton ($2\text{--}20\ \mu\text{m}$), 그리고 picoplankton ($<2\ \mu\text{m}$)으로 구분하고, 그 결과는 1998년부터 2010년까지

지(156개월) 월별 퍼센트로 나타냈다.

위성으로 추정된 월별 표층수온, 클로로필 및 식물 플랑크톤 종조성의 자료는 계절, 연, 그리고 월 평균을 계산했고, 지역적/공간적 변화를 관측하기 위해 연구지역 전체 평균값과 9개 지역으로 구분하여 평균값 및 경향을 계산했다(Fig. 1). Area 1, area 2, area 3은 연구지역 북쪽으로 황해남부, 대한민국 서쪽해안 및 남해안으로 구분했다. Area 4, area 5, area 6은 연구지역의 중간지역으로 장강의 영향을 받는 중국 서쪽 연안, 제주도 남부, 그리고 대마난류의 영향을 받는 일본 큐슈 연안을 포함하는 지역이다. Area 7, area 8, area 9은 연구지역의 남쪽지역은 중국 연안과 쿠로시오 영향을 받는 남동쪽 지역으로 구분했다. 위성으로 추정된 표층수온과 클로로필의 계절적 변화는 26년과 13년간의 전체 월별 평균 값으로, 연도별 평균값으로 연도별 변화를 살펴보았다. 그리고 표층수온, 클로로필 및 식

Fig. 1. Study area in the East China Sea and South Sea of Korea. The cross lines indicate nine-different areas based on the vertical section at 124°E and 127.5°E and the horizontal section at 33°N and 30°N

물 플랑크톤 종조성의 상관관계를 보기 위해 1998년부터 2010년까지 13년간 월별 퍼센트 자료를 만들었다. 각각의 자료는 시간에 따른 선형 변화 경향(linear trend) 분석에 의해서 기울기와 절편을 계산하였고, 월별 자료는 anomaly에서 구한 기울기와 절편도 같이 계산했다(Table 1).

3. 결 과

위성으로 추정된 표층수온 및 클로로필의 계절적 변화

월별 26년과 13년 자료를 평균한 표층수온과 클로로필 농도의 계절적 변화를 Fig. 2에 나타냈으며, Fig. 3은

Fig. 2. Seasonal variations of (a) sea surface temperature (°C) and (b) chlorophyll-a concentration (mg/m³) averaged over 26-year and 13-year monthly data

Fig. 3. Seasonal variations of (a) sea surface temperature and (b) chlorophyll-a concentration averaged from Fig. 2. Each area shown in Fig. 1

Fig. 2에서 계산된 계절별 전체 평균값과 9개 지역의 계절 변화를 도식화했다. 1985년부터 2010년까지 월별 평균 표층수온은 북서-남동방향의 기울기를 가지고 지역적으로 5.0~30.0°C 변화를 나타냈다. 표층수온은 지역적 차이는 있지만, 겨울철에 높은 편차를 보이고, 여름으로 접어들면서 편차가 줄어들었다(Figs. 2a, 3a). 표층수온의 이러한 계절적 변화는 연안의 현장 관측 자료에서도 유사한 경향을 보였다(민과 김 2006). 클로로필 농도는 연구지역 서쪽 해역인 장강 하구역 부근에서 연중 높고, 쿠로시오 및 대만난류의 영향을 받는 남동쪽해역에서 상대적으로 낮게 나타났다(Fig. 2b). 클로로필의 계절적 변화는 지역적 차이를 보이지만(0.1~10.0 mg/m³), 전체 평균값에서 클로로필의 농도는 봄에 가장 높고, 여름에 접어들면서 감소되었다가 가을과 겨울로 가면서 다시 증가했다(Figs. 2b, 3b).

봄(3월-5월)의 표층수온은 7.0~24.0°C의 변화를 보이고, 북서쪽이 남동쪽보다 낮았다(Fig. 3a). 클로로필은 지역에 따라 0.1~8.0 mg/m³의 차이를 보였다(Fig. 3b). 4월 동안

클로로필의 높은 농도는 황해남부와 쿠로시오 해류의 영향을 받는 지역까지 확장되면서 전체 평균에서 가장 높았고, 5월로 가면서 증가되었던 지역들이 점차 감소했다(Fig. 2b). 여름의(6월-8월) 표층수온은 평균 19.0~28.0°C로, 수온의 편차는 계절 및 지역 구분한 모든 자료에서 줄어들고 공간적으로 유사한 수온분포를 나타냈다. 클로로필의 변화는 0.1~10.0 mg/m³으로 장강 하구의 높은 농도를 제외하고는 외해로 가면서 점차 감소했다. 손 등 (2010)의 연구에서 따르면 하계 높은 농도의 유기탄소는 장강 하구에서 출현하여 동쪽으로 확장되고, 클로로필 농도 변화도 이와 비슷한 경향을 나타낸다(Kim et al. 2009; Yamaguchi et al. 2012). 가을의(9월-11월) 표층수온은 16.0~28.0°C의 변화를 보이고, 10월과 11월로 가면서 공간적으로 북서-남동방향의 기울기를 가지고 큰 편차를 나타냈다(Figs. 2a, 3a). 클로로필은 0.1~5.0 mg/m³의 변화를 보였고, 여름에 동쪽으로 확장되었던 높은 농도의 클로로필 분포가 남동쪽 방향으로 혀 모양(tongue-shaped) 구조를 나타내고 봄까지 지속되었다(Figs. 2b, 3b). 겨울(12월~2월)의 표층

수온은 7.0~23.0°C의 변화를 보였다. 클로로필은 0.2~6.0 mg/m³으로 중국연안에서 높게, 외해에 가면서 낮아졌다 (Figs. 2, 3).

전체 및 지역별로 구분한 계절별 변화에서(Fig. 3), 표층수온은 지역에 상관없이 8월에 가장 높고, 클로로필은 지역에 따라 다른 계절적 변화를 보였다. 표층수온은 쿠로시오 및 대만난류의 영향을 받는 area 6, 8, 9에서 상대적으로 계절별 변화(8.0~10.0°C)의 폭이 작고, 중국 연안 및 황해중부 지역인 area 1, 2, 4에서 수온의 편차(15.0~19.0°C)가 크게 나타났다(Fig. 3a). 클로로필의 농도는 쿠로시오의 영향을 받는 area 6, 8, 9에서 늦겨울이나 초봄(2월~4월)에 증가되었지만, 나머지 계절에는 감소(0.2~0.9 mg/m³)했다. 황해중부 및 제주도 남부 지역인 area 1, 2, 5는 봄철 식물 플랑크톤 대번식(phytoplankton spring bloom)과 연관되어 봄에 클로로필 농도가 증가했고(Son et al. 2006), 1.3~1.6 mg/m³의 편차를 나타냈다. 중국 연안 및 강의 영향을 받는 area 3, 4, 7의 클로로필 농도는 봄과 여름에 증가하는 경향을 나타냈다(1.7~5.6 mg/m³ 편차).

위성으로 추정된 표층수온 및 클로로필의 연평균 변화

Fig. 4는 1985년~2010년(26년)과 1998년~2010년(13년)

동안 표층수온과 클로로필 농도의 전체 및 지역별 연평균과 경향이다. 표층수온과 클로로필 연평균 자료의 선형 변화 및 경향은 Table 1에 나타났다.

전체지역 연평균 표층수온은 관측을 시작한 1985년부터 꾸준히 상승하여 1998년에 가장 높았고 이후 감소했지만, 연평균 20.3°C 보다는 높았다(Fig. 4a). 지역별 연평균 표층수온 변화는 area 7에서 2001년에 가장 높았고, 그 이외의 지역에서는 전체 평균한 자료에서 동일하게 1998년에 가장 높았다(Figs. 4a-4d). 연평균 표층수온은 26년 동안 1998년에 가장 높았기 때문에 해색위성으로 추정된 클로로필 자료를 이용하는 시기인 1998년부터 2010년까지 변화는 전체 평균과 지역구분 연평균 모든 자료에서 모두 감소하는 경향을 나타냈다(Table 1).

Table 1의 선형변화 회귀식을 이용하여 계산된 연평균 표층수온은 매년 0.025°C 증가하여 26년간 ~0.7°C 증가한 것으로 나타났다. 표층수온은 중국 연안 및 제주도 남부 지역(area 1, 4, 5)에서 0.8~0.9°C 증가했고, 쿠로시오 및 대만난류 영향을 받는 지역(area 3, 6, 9)에서 상대적으로 낮은 0.2~0.4°C의 증가를 보였다. 이런 결과는 민 등 (2010)의 위성으로 추정된 표층수온을 이용한 연구와 연안관측 정점을 이용한 Kang (2000)과 민과 김 (2006)의 결과와 유사하다. 위성으로 추정된 표층수온을 이용한 연

Fig. 4. Inter-annual variations and trends of annual mean value for sea surface temperature (a-d) and chlorophyll-a concentration (e-h) with whole and nine-different areas. Red line (a and e) indicate 26-year mean value of sea surface temperature (20.3°C) and 13-year mean value of chlorophyll-a (1.55 mg/m³)

구는 동중국해 북부와 남부가 각각 평균 $0.029^{\circ}\text{C}/\text{년}$ 과 $0.026^{\circ}\text{C}/\text{년}$ 상승을 보였고(민 등 2010). 1936년부터 1995년까지 연안 정점 자료를 이용한 Kang (2000)의 연구에서 연평균 표층수온은 매년 0.024°C 증가했고, 겨울이 여름보다 큰 폭으로 상승되었다고 보고했다. 민과 김 (2006)의 연구에서도 지역에 따라 다르지만 표층수온은 증가했고(지역에 따라 $0.01\sim0.06^{\circ}\text{C}/\text{년}$ 상승), 남해안 지역이 동해보다 상대적으로 낮게 증가되는 것으로 보고했다.

전체지역 연평균 클로로필 농도는 1.6 mg/m^3 이고, 1998년이 상대적으로 높았기 때문에 이후 감소하는 경향을 나타냈다(Fig. 4e). 전체 및 지역구분한 평균값을 비교하면,

클로로필 농도는 전체평균값과 유사한 경향을 보이지 않고 각 지역에 따라 다른 증/감의 경향을 보였다(Figs. 4e-4h). 13년 동안 클로로필의 선형 변화 경향은 Area 1, 2, 4에서 상대적으로 증가했지만, 이 지역을 제외한 나머지 지역에서는 감소하는 경향을 나타냈다. 전체 평균한 결과에서 클로로필은 매년 0.02 mg/m^3 감소하여 13년동안 $\sim0.3\text{ mg/m}^3$ 감소한 것으로 나타났다. 중국 연안지역인 area 1, 4의 클로로필은 상대적으로 높은 증가($0.5\sim1.0\text{ mg/m}^3$)를 보인 반면 연구지역 북동쪽 지역인 area 3은 상대적으로 높은 감소($0.9\sim1.0\text{ mg/m}^3$)를 나타냈다. 쿠로시오 영향을 받는 area 6, 9의 클로로필은 $0.1\sim0.4\text{ mg/m}^3$ 으로 상대적

Fig. 5. Inter-annual variations and trends of monthly mean value for sea surface temperature (a-e) and chlorophyll-a concentration (f-j) with whole area and nine-different area. WA indicates whole area and each number is the area from Area 1 to Area 9. Red lines (a-e) indicate the trend during 13 years (1998-2010)

으로 낮은 감소 경향을 나타냈다.

위성으로 추정된 표층수온 및 클로로필-a의 월평균 변화

Figs. 5a-5e는 26년 동안(1985년~2010년) 표층수온의 전체 및 지역별 월평균이고(총 312개), Figs. 5f-5j는 13년 동안(1985년~2010년) 클로로필 농도의 전체 및 지역별 월평균(총 156개) 경향이다(Table 1).

뚜렷한 계절적 변화를 보이는 월평균 표층수온은 전체 및 지역구분한 모든 자료에서 증가했다. 표층수온은 매월 0.0033°C 증가하여 26년간 $\sim 1.0^{\circ}\text{C}$ 증가했다(anomaly: 매월 0.002°C 증가하여 26년간 $\sim 0.6^{\circ}\text{C}$ 증가). 중국 연안 및 제주도 남부 지역(area 1, 2, 4, 5, 7)은 $1.0\sim 1.4^{\circ}\text{C}$ 로 상대적으로 높게 증가했고(anomaly: $0.6\sim 0.9^{\circ}\text{C}$ 증가), 쿠로시오 및 대만난류 영향을 받는 지역(area 3, 6, 8, 9)은 $0.6\sim 0.9^{\circ}\text{C}$ 증가를 보였다(anomaly 자료 결과: $0.2\sim 0.6^{\circ}\text{C}$ 증가). 26년간 연평균 표층수온은 1998년 최고 높았기 때문에 1998년부터 2010년까지는 표층수온이 낮아지는 경향을 보였지만(Fig. 4), 1998년부터 2010년까지 월평균 표층수온은 area 6, 7, 9를 제외하고는 모두 지역에서 증가했다. 그러나 anomaly를 이용한 1998년부터 2010년까지의 월평균 표층수온은 연평균 변화처럼 전체 및 지역구분한 결과 모두에서 감소했다(Table 1). 전체 26년간 자료에서 월평균 수온은 연평균 수온의 변화와는 차이를 보이지만, 연평균과 월평균 모든 자료에서 황해남부 및 중국 연안 지역이 쿠로시오/대만난류의 영향을 받는 외해보다 상대적으로 높은 수온 상승을 나타냈다(Figs. 4, 5, Table 1).

뚜렷한 계절적 변화를 보여주는 표층수온과는 달리 클로로필 월평균 변화는 연평균 변화처럼 지역에 따른 변화를 나타냈다(Fig. 5). 전체지역 월평균 클로로필 농도는 연평균 변화처럼 월 0.0019 mg/m^3 감소하여 13년 동안 $\sim 0.3\text{ mg/m}^3$ 감소했다(anomaly: 월 0.0014 mg/m^3 감소하여 13년 동안 평균 0.2 mg/m^3 감소, Fig. 5f, Table 1). 황해중부 지역인 area 1, 2는 전체평균 자료와는 달리 증가하는 경향을 보였고, Area 1(0.55 mg/m^3 증가, anomaly: 0.54 mg/m^3 증가)이 area 2(0.05 mg/m^3 증가, anomaly: 0.01 mg/m^3 증가)보다 높게 증가했다. Area 3, 4, 5, 7의 클로로필 농도는 전체평균보다 상대적으로 높은 감소를 보여주었으며($0.36\sim 1.1\text{ mg/m}^3$ 감소, anomaly: $0.4\sim 1.1\text{ mg/m}^3$ 감소), 연구지역 북동쪽(area 3)과 중국 연안(area 4, 7)에서 특히 높게 감소했다. 쿠로시오 영향을 받는(area 8, 9) 지역의 클로로필 농도는 감소했지만 상대적으로 편차는 작았다($0.1\sim 0.2\text{ mg/m}^3$).

시계열 전체지역 월평균 클로로필의 농도(Fig. 5f)는 봄과 여름(또는 가을)에 높아지지만, 1998년~2000년은 봄보다 여름에 높게 나타나고, 2001년부터는 반대로 봄의 클로로필 농도가 여름보다 높아졌다. 지역을 구분한 자료에

서 area 1, 2의 클로로필 변화는 해마다 변하지만 일반적으로 봄에 증가했다(Figs. 5f, 5g). Area 3의 클로로필 농도는 봄보다는 여름에 높았다(Fig. 5g). 연구지역의 중간 지역인 area 4, 5의 클로로필은 봄과 여름에 증가했고, area 4는 여름에 가장 높은 농도를 보였고, area 5는 여름보다는 봄에 높은 농도를 나타냈다(Fig. 5h). 그러나 장강 하구인 area 4의 클로로필의 농도는 여름에 높아졌고, 제주도 남부해역인 area 5는 봄과 여름에 상대적으로 증가되었지만, 2008년 이후 두 지역 모두에서 여름보다는 봄에 농도가 높게 나타났다. Area 6의 클로로필은 초봄과 가을에 높았다가 여름으로 가면서 감소했다(Fig. 5i). 연구지역 남서쪽에 위치한 area 7의 클로로필은 봄과 초여름에 높았지만, area 4, 5의 경우처럼 2007년을 전후로 이전에는 5월과 6월에 증가되었고, 2007년 이후는 4월에 증가되어 나타났다(Figs. 5f-5j). Area 8의 클로로필은 3월과 4월에 높은 농도를 보였고, area 9는 겨울과 초봄에 증가되고 여름으로 가면서 감소했다(Fig. 5j).

위성으로 추정된 식물성플랑크톤 종조성의 월평균 변화

Fig. 6은 클로로필, micro-, nano-, 그리고 pico-plankton의 전체지역 월평균과 경향을 도식화 하였다. Fig. 7과 Table 2는 micro-, nano-, 그리고 pico-plankton의 전체 및 지역구분에 얻어진 자료를 도식화하고 경향을 나타냈다. Fig. 6에서 클로로필, micro- 그리고 nano-size plankton은 전반적으로 감소했고, pico-size plankton은 증가하는 경향을 보였다(anomaly 결과와 동일). Microplankton은 봄에 증가되고 여름으로 가면서 감소했다. Nanoplankton은 상대적으로 복잡한 경향을 보였고, 2월에서 5월에 증가되고 여름으로 가면서 감소했다. Picoplankton은 여름에 증가되었고 겨울로 가면서 감소했다.

지역별 특성을 살펴보면, area 1의 선형 변화 경향은 시간에 따른 월별 자료와 anomaly 결과에서 nano-size는 감소되었고, pico-size는 증가했다(Fig. 7, Table 2, 3). 그러나 증감되는 경향은 전체 평균한 자료의 기율기보다는 상대적으로 작았다. Area 2에서 micro-size는 감소했고, nano-와 pico-size는 상대적으로 증가하는 경향을 나타냈다. Micro-size의 증가 경향은 전체 평균한 기율기 변화보다 컸고, nano-와 pico-size는 전체 기율기보다 작았다. Area 3에서 micro-와 nano-size는 감소했고, 그리고 pico-size는 증가하는 경향을 나타냈다. Micro-와 pico-size의 증감 경향은 전체 평균한 기율기보다 높았고, nano-size는 상대적으로 작았다. Area 4에서 micro-size는 감소했고, nano-와 pico-size는 상대적으로 증가했다. 모든 종조성에서 증감 경향은 전체 평균의 기율기보다는 같거나 작았다. Area 5에서 micro-size는 감소했고, nano-와 pico-size는 상대적으로 증가했다. Micro-size의 감소 경향은 전체 평균한 기

Fig. 6. Inter-annual variations and trends of monthly mean value for (a) chlorophyll-a concentration (mg/m^3), (b) microplankton (%), (c) nanoplankton (%), and (d) picoplankton (%) with whole area

Table 2. Regression of phytoplankton size class (micro-, nano-, and pico-plankton) determined from monthly satellite-derived chlorophyll-a concentration is calculated with whole and nine-different area

	Phytoplankton Size Class (PSC)								
	Microplankton (%)			Nanoplankton (%)			Picoplankton (%)		
	Slope	Intercept	R ²	Slope	Intercept	R ²	Slope	Intercept	R ²
Whole Area	-0.0379	31.84	0.07	-0.0305	36.61	0.23	0.0684	31.55	0.16
Area 1	-0.0044	53.88	0.0002	-0.0073	30.35	0.002	0.0116	15.77	0.01
Area 2	-0.0431	43.51	0.03	0.0078	37.10	0.004	0.0353	19.40	0.06
Area 3	-0.0533	27.67	0.07	-0.0194	44.33	0.04	0.0728	28.00	0.13
Area 4	-0.0292	77.77	0.15	0.0126	15.34	0.07	0.0166	6.89	0.24
Area 5	-0.0529	38.08	0.04	0.0053	39.37	0.002	0.0476	22.55	0.09
Area 6	-0.0243	8.24	0.08	-0.0931	47.08	0.17	0.1173	44.68	0.16
Area 7	-0.0456	53.38	0.07	0.0079	29.24	0.01	0.0378	17.38	0.09
Area 8	-0.0182	10.61	0.01	-0.0719	44.76	0.14	0.0901	44.63	0.10
Area 9	-0.0085	3.96	0.12	-0.1055	30.46	0.15	0.114	65.58	0.16

울기보다 크게 나타났고, pico-size는 상대적으로 작았다. Area 6에서 micro-와 nano-size는 감소했고, pico-size는 증가했다. Micro-size의 감소 경향은 전체 평균한 기율기보다 작았고, nano-와 pico-size는 상대적으로 높았다. Area 7에서 micro-size는 감소했고, nano-와 pico-size는 상대적으로 증가했다. Micro-size는 전체 평균한 자료의

기율기보다 상대적으로 높았고, 나머지 두 종은 상대적으로 낮은 기율기를 보였다. Area 8, 9에서 micro-와 nano-size는 감소했고, pico-size는 증가했다. Area 6에서처럼 micro-size의 감소 되는 경향은 전체 평균한 기율기보다 작지만, nano-와 pico-size는 전체 평균 자료보다 높은 증가 경향을 보였다(nano-size 감소; pico-size 증가).

Fig. 7. Inter-annual variations and trends of monthly mean value for (a)-(e) microplankton (%), (f)-(j) nanoplankton (%), and (k)-(o) picoplankton (%) with whole area and nine-different area. WA indicates whole area and each number is the area from Area 1 to Area 9

4. 토 의

남해안을 포함하는 동중국해 지역에서 위성자료를 이용한 장기 해양환경 변화를 관측하기 위해서, 표층수온, 클로로필과 식물 플랑크톤 종조성의 계절, 연 그리고 월 변화를 분석했고, 지역적 변화를 이해하기 위해서 전체 지역 이외에 9개 지역을 구분하여 변화를 살펴보았다.

첫째, 수온과 클로로필의 계절적 변화를 분석하면, 표층수온의 계절 변화는 전체 및 지역구분한 자료에서 위상 변화는 나타나지 않고 편차만 관측되었다. 그러나 클로로필은 지역에 따라 위상 및 편차가 다르게 나타났다(Figs. 2, 3). 표층수온의 편차는 중국연안(연구지역 북서쪽) 지역이 쿠로시오/대만난류(연구지역 남쪽 또는 남동쪽)의 영향을 받는 지역보다 크게 나타났다. Kang (2000)과 민 등 (2010)의 연구에서도 연구지역 남쪽이 북쪽보다 연진폭값이 낮고, 연위상도 상대적으로 빠른 것으로 보고했다. 이런 결과는 연구지역에서 표층수온이 여름에 높아지고 겨울에 작아지는 전형적인 계절 변화를 나타내지만, 연평균 수온, 연진폭값, 그리고 연위상 등은 지역적 차이를 보이기 때문이다.

전체지역을 평균한 클로로필은 계절적으로 봄에 증가하고 여름에 감소되고 가을에 증가하는 경향을 보였지만, 지역을 구분한 결과에서는 다르게 나타났다(Figs. 2, 3). 동일한 연구지역에서 표준편차를 이용한 손 등 (2010)의 연구에서도 지역에 따라 계절적 변화가 다른 것으로 나타났다. 지역 구분 자료에서(Figs. 2, 3), 클로로필은 쿠로시오 및 대만난류의 영향을 받는 연구지역 남동쪽(area 6, 8, 9)에서 늦겨울이나 초봄에(2월~4월) 증가되었고, 여름으로 가면서 감소했다. 황해중부 및 제주도 남쪽(area 1, 2, 5)의 클로로필은 봄철 식물성플랑크톤 대번식이 일어나는 시기와 비슷하게 봄에 증가했고(Son et al. 2006) 여름으로 가면서 감소했다가 가을에 다시 증가하는 경향을 나타냈다. 그러나 강의 영향을 직/간접으로 받는 중국연안과 연구지역 북동쪽(area 3, 4, 7)의 클로로필은 봄보다 여름에 농도가 높고 연중 편차가 크게 나타났다. 본 연구결과에서는 나타내지는 않았지만 area 3, 4, 7에서 수온과 클로로필은 정의 상관관계를 나타냈고, 이것은 봄철 증가된 수온으로 식물 플랑크톤 대번식이 일어나 한번의 피크를 보이고, 여름에 증가된 강의 방류량에 의한 직/간접적 영향 및 연안 용승으로 공급된 영양염으로 인하여 다시 증

가된 것으로 사료된다(Chen et al. 2001; Chai et al. 2006; Lu et al. 2006; Isobe and Matsuno 2008; 손 등 2010). 그러나 황해중부 지역 및 쿠로시오 영향을 받는 지역에서 수온과 클로로필은 역의 상관관계를 나타냈다. 이것은 하계 증가된 표층수온은 해양의 성층화를 가속시켜 아표층으로부터 영양염 공급을 제한하여 봄을 제외한 나머지 계절에서는 클로로필 농도는 감소했다. 계절적으로 겨울에 증가하는 클로로필 농도는 계절풍의 영향으로 연안 및 대륙붕에 퇴적되어 있던 퇴적물의 재부유에 의해서 실제 값보다 과대 평가되는 것으로 보고되었다(Kiyomoto et al. 2001; Yamaguchi et al. 2012).

둘째, 연구지역에서 연평균과 월평균 표층수온과 클로로필의 변화를 조사했다. 26년 동안 연평균 및 월평균 모두에서 표층수온은 꾸준히 상승했고, 전체 및 지역구분 자료에서도 동일하게 증가하는 경향을 관측했다. 26년간의 월평균 자료에서 표층수온은 지역에 따라 차이는 있지만 대략 0.2~1.0°C 상승했다. 그리고 연안 정선관측 자료에서 얻어진 표층수온도 0.6~1.0°C의 수온 상승을 보고했다(Kang and Choi 1985; Kang 2000; 민과 김 2006). 민과 김 (2006) 연구에서 연안관측 정점에서 표층수온 변화는 1970년대에 꾸준히 상승하다가 1979년부터 1980년에 하강했다. 하지만 이후 1980년대 중반까지 점차적으로 증가하고, 1980년대 후반부터 급격하게 상승하여 현재까지 유지되고 있는 것으로 보고했다. 전세계 기온 및 표층수온 변화도 1980년에서 1990년에 급격한 변화가 있었음을 보고했고(Kaplan et al. 1998; Crowley 2000; Hansen et al. 2006), 이와 유사한 경향이 연구지역에서도 나타났다.

13년(1998년-2010년)동안 월평균 클로로필의 농도는 전체 및 지역을 구분한 자료에서 area 1, 2를 제외하고 모두 감소했다(Fig. 5). 클로로필의 편차는 강의 직/간접적 영향을 받는 area 3, 4, 7이 쿠로시오의 영향을 받는 area 8, 9보다 크게 나타났다. 대부분 지역에서 1998년부터 2010년까지 월평균 표층수온과 클로로필은 음의 상관관계로 온도가 증가하면서 클로로필 농도는 감소하는 경향을 나타냈다. 그러나 강의 영향을 받는 area 3, 4, 7는 양의 관계로 온도가 증가하면서 클로로필 농도도 증가하는 경향을 나타냈다. 이 지역의 클로로필 농도는 하계 증가된 방류량으로 인하여 육지에서 공급되는 유기물/무기물 및 용존물질을 포함하는 담수가 외해로 확산되면서 강하구 및 주변 해역에서 생산성 변화를 초래하는 것으로 보고했다(Kim et al. 2009; 손 등 2010). 그리고 장강 하구는 산사댐 건설로 인해 부유물질들이 연안에 퇴적되면서 외해로의 이동이 감소했고, 광도의 증가 및 담수에 포함된 풍부한 영양염 공급으로 증가된 생산성을 나타냈다(Isobe and Matsuno, 2008; Yuan et al. 2008). 그러나 전체지역 클로로필 월평

균 자료는 1998년부터 2001년까지는 여름에 높은 농도를 나타냈고, 그 이후에는 여름보다는 봄에 높아지는 현상을 보였다(Fig. 5, Table 1). 그래서 장강에 인접한 area 4, 7에서 월평균 변화는(Fig. 5) 2006년 이후 봄이 여름보다 높은 농도를 나타냈다. 이런 결과는 일차 물막이 공사가 있었던 2003년 전후로 변화가 예견되었고(Chen 2000), 특히 장강 하구역은 일차 물막이 공사로 줄어든 방류량과 함께 영양염 공급의 감소로 장강 하구에서의 일차생산량이 1998년에 비해 2003년에 83% 감소하였다고 보고했다(Gong et al. 2006). 그리고 손 등 (2010)은 연구지역에서 하계에 강의 유입에 영향을 받는 지역에서 유기탄소의 시/공간적 변화는 일차적으로 강의 방류량과 연관되어 있는 것으로 보고했다. 강하구의 특성상 강의 방류량에 지배적인 영향을 받지만, 최근 전세계 해양의 생산성 감소는 표층수온의 증가로 해양의 성층화가 강해지면서 아표층으로부터 영양염 공급 제한과 관련이 있는 것으로 보고했다(Behrenfeld et al. 2006). 위와 같은 결과를 연구지역에서 관찰하기 위해서 시간변화에 따른 표층수온과 클로로필의 공간적 변화를 살펴보았다. Fig. 8과 9a-9b는 표층수온의 연평균 20.3°C 등온선과, 클로로필의 1.6과 0.6 mg/m³ 등농도선을 연도별로 도식화했다. 표층수온의 등온선은 북서-남동방향으로 변화했고, 특히 1985년부터 1989년까지 평균 등온선은 제주도 및 대마도 남쪽에 위치했지만, 점점 북상하여 연평균 표층수온이 가장 높았던 1998년의 경우 제주도 남동쪽 및 대마도 북쪽까지 북상했다. 표층수온 등온선의 변화는 연구지역 서쪽보다는 동쪽으로 가면서 증가 폭이 커졌다(Fig. 8). 연평균 클로로필의 1.6 mg/m³ 등농도선은 연안 지역에서 형성되고, 연구지역 남쪽보다는 북쪽에서 연도별 변화가 크게 나타났다(Fig. 9a). 연구지역 북쪽인 황해 중부는 1998년에서 2002년까지보다 2006년에서 2010년에 들어서 1.6 mg/m³ 등농도선이 외해로 확장되었다. 연평균 클로로필의 0.6 mg/m³ 등농도선은 수심이 상대적으로 깊고 대만난류의 영향을 받는 지역에서 형성되었고, 연구지역 남서쪽보다는 제주도 및 대한해협 부근에서 연도별 변화가 크게 나타났다(Fig. 9b). 1998년부터 2006년까지 0.6 mg/m³ 등농도선은 제주도 남동쪽에 위치하지만, 2010년에는 등농도선은 제주도 북쪽으로 확장 또는 이동되었다. 그리고 월별자료에서 계절적으로 변화가 적었던 겨울철 변화 중에서 12월의 표층수온과 클로로필의 등온선(18°C)과 등농도선(0.6 mg/m³)은 과거에 비해서 현저하게 북쪽으로 이동했다(Figs. 9c-9d). 정확한 요인에 대한 연구가 필요하지만, 공간적으로 표층수온의 변화는 클로로필 변화와 밀접한 관계를 보이고, 이는 Behrenfeld et al. (2006)의 연구에서 언급한 표층수온 상승으로 인하여 해양의 성층화가 강해지면서 아표층에서 영양염 공급이 제한되면서 표층에서 생산성의 감소되는

Fig. 8. An isothermal line of sea surface temperature (20.3°C) for (a) 1985, 1985, 2005, and 2009, (b) 1985~1989, (c) 1990~1994, (d) 1995~1999, (e) 2000~2004, and (f) 2005~2009

현상이 연구지역에서도 일어나고 있는 것으로 사료된다 (Figs. 8, 9).

셋째, 연구지역 연안 및 외해에서는 뚜렷한 표층수온의 증가와 클로로필 농도의 감소가 관측되었다. 그리고 클로로필 변화에 따른 식물 플랑크톤 종조성 변화를 예견할 수 있었다(Figs. 4, 5, 8, 9, Table 1, 3). 식물 플랑크톤 종조성에서 micropankton은 전체 평균값이나 지역을 구분한 결과 모두에서 감소했고, nano-plankton은 전체 월평균 자료에서는 감소 경향을 나타냈지만 지역에 따라 다른 변화

를 보였다. Pico-plankton은 전체 평균값이나 지역을 구분한 결과 모두에서 증가하는 경향을 나타냈다.

구체적인 변화를 요약해 보면 지역 구분한 자료에서 황해남부이면서 중국 연안의 영향을 받는 area 1에서 표층수온 및 클로로필은 상대적으로 증가하는 경향을 보였고, 그리고 micro-size는 nano-size 플랑크톤보다 상대적으로 높게 감소했다(Table 3). 황해남부이면서 대한민국 남해안을 포함하는 area 2는 area 1에서처럼 표층수온 및 클로로필은 증가했지만, micro-size은 상대적으로 높게 감소했고

Fig. 9. An iso-chlorophyll-a concentration line of 1.6 mg/m^3 (a) and 0.6 mg/m^3 (b) for annual mean of 1998, 2002, 2006, and 2010. (c) An isothermal SST line (18.0°C) and (d) iso-chlorophyll-a concentration line (0.6 mg/m^3) for December mean with the different year

nano-와 pico-size의 플랑크톤은 증가했다. 연구지역 중앙으로 장강의 담수의 영향을 받는 area 4, 5는 상대적으로 표층수온이 급격히 증가했고, 반면 클로로필 농도는 급격히 감소했다. 특히 외해인 area 5는 micro-size가 두드러지게 감소하는 경향을 보였다. 장강의 남서쪽에 위치한 area 7은 전체 26년간 월평균한 표층수온은 증가 경향을 보였고, 클로로필 관측기간인 1998년부터 2010년까지의 월평균 자료에서는 표층수온 및 클로로필 모두 상대적으로 높게 감소했다. 이것은 중국 장강의 영향을 받는 지역에서는 방류량 및 수온의 변화가 클로로필 및 종조성의 변화와 밀접한 관련이 있음을 시사한다(Bell et al. 1999; Chen 2000; Delcroix and Murtugudde 2002; Gong et al. 2006; 손 등 2010). 쿠로시오의 영향을 받는 area 8, 9는 표층수온 및 클로로필 변화는 상대적으로 크지 않지만, area 9에서 1998년부터 2010년까지 월평균 표층수온은 낮은 감소 경향을 보였다. 그리고 클로로필은 감소 경향을 보였지만, nano-size 플랑크톤은 급격하게 감소되고 pico-size 플랑크톤은 상대적으로 높은 증가의 경향을 보였다. 대만난류의 영향을 받는 area 3, 6은 클로로필 농도는 상대적 높게 감

소되었다. Area 3의 경우 micro-size가 높은 감소 경향을 보였고, area 6에서는 nano-size가 높은 감소 경향을 나타냈다.

이런 결과는 연구지역에서 표층수온의 상승은 해양의 성층화를 가속시켜 영양염 공급의 제한으로 클로로필 농도는 감소되고 해양 생태계 내에서 봄과 여름에 식물 플랑크톤 종조성에 있어서 큰 사이즈(micro-와 nano-plankton)의 플랑크톤이 감소되고 작은 사이즈(picoplankton)의 플랑크톤이 우세하게 증가하는 환경으로 변화되고 있는 것으로 조사되었다(Walther et al. 2002; Behrenfeld et al. 2006).

5. 결 론

본 연구는 황해남부 및 남해안을 포함하는 동중국해에서 위성으로 추정된 표층수온, 클로로필, 그리고 식물 플랑크톤 종조성 자료를 이용하여 연구지역 전체 및 9개 지역으로 구분하여 구체적인 시/공간적 변화를 알아보았다. 표층수온은 여름에 높고 겨울로 가면서 감소하는 전형적

Table 3. The comparisons among the whole and each nine-different area based on the trend and slope of monthly time-series data using sea surface temperature, chlorophyll-a concentration, and phytoplankton functional type (All correlation statistics are in Table 1 and 2)

		Whole Area	
		1985-2010	1998-2010
SST		↑	↑
Chl-a			↓
Micro-			↓
Nano-			↓
Pico-			↑

Area 1		Area 2		Area 3	
1985-2010	1998-2010	1985-2010	1998-2010	1985-2010	1998-2010
SST	↑*	↑*	↑*	SST	↑
Chl-a	↑*			Chl-a	↓*
Micro-	↓		↓*	Micro-	↓*
Nano-	↓		↑	Nano-	↓
Pico-	↑		↑	Pico-	↑*

Area 4		Area 5		Area 6	
1985-2010	1998-2010	1985-2010	1998-2010	1985-2010	1998-2010
SST	↑*	↑*	↑*	SST	↑
Chl-a	↓*		↓*	Chl-a	↓*
Micro-	↓		↓*	Micro-	↓
Nano-	↑		↑	Nano-	↓*
Pico-	↑		↑	Pico-	↑*

Area 7		Area 8		Area 9	
1985-2010	1998-2010	1985-2010	1998-2010	1985-2010	1998-2010
SST	↑*	↑	↑	SST	↑
Chl-a	↓*		↓	Chl-a	↓
Micro-	↓*		↓	Micro-	↓
Nano-	↑		↓*	Nano-	↓*
Pico-	↑		↑*	Pico-	↑*

*indicates that the value of the slope in monthly data of whole area was relatively larger than in each area

인 계절적 변화를 보였고, 연안 지역이 외해지역보다 상대적으로 큰 편차를 나타냈다. 클로로필 농도는 봄철에 증가하고 여름에 감소하는 계절적 변화를 보였지만, 지역에 따라 계절적 차이를 나타냈다.

관측기간 동안(26년) 연평균 표층수온은 전체 및 지역구분한 자료 모두에서 점진적으로 증가했고, 지역구분한 결과에서 서쪽지역인 중국 연안지역이 전체 평균한 자료의 증가 기울기보다 상대적으로 높았고, 연구지역 동쪽은 상대적으로 낮은 증가를 보였다. 연평균 클로로필은 1998년에 가장 높게 나타났기 때문에 전체 및 대부분의 지역에서 감소하는 경향을 보였다.

월평균 표층수온은 26년간 0.2~1.0°C 상승했고, 1998년부터 2010년까지 조사된 자료에서도 area 6, 7, 9를 제외

하고 모든 지역에서 증가했다. 클로로필은 1998년부터 2010년까지 13년 동안 0.2~1.1 mg/m³ 감소했다. 월평균 클로로필의 지역적 차이는 황해남부(area 1, 2) 지역을 제외하고 모든 지역에서 감소했다. 식물 플랑크톤 종조성 자료에서 전체 및 9개 지역 모두에서 microplankton은 감소했고, nanoplankton은 전체 월평균 자료에서는 감소했지만 지역에 따라 다른 변화를 보였다. Picoplankton은 전체 및 지역구분한 자료 모두에서 증가했고, 특히 쿠로시오나 대만난류의 영향을 받는 지역에서 전체 평균한 자료의 기울기보다 상대적으로 높게 증가했다.

이런 결과들은 단순히 수온 변화에 따른 한가지 요인만으로 추정하기는 연안 및 육상의 많은 요인들에 의해서 영향을 받기 때문에 면밀한 연구가 필요하지만, 표층수온

은 26년 동안 상승했고 클로로필은 13년 동안 감소하는 경향을 나타냈다. 식물 플랑크톤 종조성은 연안에서 micro-size가 급격히 감소되고 nano-나 pico-size의 플랑크톤이 증가하였다. 외해에서 nano-size는 급격히 감소하고, pico-size의 플랑크톤이 증가하는 시/공간적 변화가 관측되었다. 표층수온과 클로로필의 20.3°C 등온선과 0.6 mg/m³ 등농도선을 이용한 공간적 변화에서 과거에 비해 복잡되어 나타났고, 이것은 표층수온 상승에 의해서 해양의 성층화가 강화되고 아표층으로부터 영양염 공급의 제한으로 클로로필 농도 변화 및 식물 플랑크톤 종조성의 변화를 초래한 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 국토해양부 소관 연구개발사업인 기후변화가 남해권역 해양생태계에 미치는 영향 및 기능 평가 기술개발 및 정지궤도 해양위성(GOCI) 활용연구지원의 연구비 지원에 의해 수행되었고, 한국해양연구원 일반사업인 PE98781와 한성대학교 교내연구비 지원에 의해서 수행되었습니다. 본 연구를 위해서 자료 처리를 도와주신 민승환 연구원께 감사 드립니다.

참고문헌

- 김상우, 임진욱, 장이현 (2008) 해석영상을 이용한 동중국해 북부해역 하계 클로로필의 시공간 분포. 한국환경과학회지 **17**(1):85-95
- 민승환, 김대현, 윤홍주 (2010) NOAA/AVHRR 자료에 의한 동북아시아해역 표층수온의 시공간분석. 한국해양정보통신학회지 **14**(12):2818-2826
- 민홍식, 김철호 (2006) 한국 연안 표층수온의 경년변동과 장기변화. Ocean and Polar Res **28**(4):415-423
- 서영상, 김정희, 김학균 (2000) NOAA 위성자료에 의한 해수 표면 수온분포와 *Cochlodinium polykrikoides* 적조 발생의 상관성. 한국환경과학회지 **9**(3):215-221
- 서영상, Mitchell BG, 장이현, 이삼근, 유신재 (2001) 해양수색 위성자료의 검토. 한국환경과학회지 **10**(6):431-436
- 손영백, Gardner WD (2010) 현장관측 및 원격탐사를 이용한 북동 멕시코 만에서 El Nino와 La Nina 기간 동안 표층 입자성 유기탄소의 시/공간적 변화 연구. 한국해양학회지 「바다」 **15**(2):51-61
- 손영백, 이태희, 최동립, 장성태, 김철호, 안유환, 유주형, 김문구, 정섬규, Ishizaka J (2010) 동중국해에서 위성에서 추정된 10년 동안의 표층 입자성 유기탄소의 시/공간적 변화. 원격탐사학회지 **26**(4):421-437
- 정창수, 홍기훈, 김석현, 김영일, 문덕수, 박준건, 박용철, 이재학, 이홍재 (2000) 동중국해 외대륙붕 저층수의 영양염 기원. 한국해양환경공학회지 **3**(3):13-23
- Beardsley R, Limeburner R, Yu H, Cannon GA (1985) Discharge of the Changjiang (Yangtze River) into the East China Sea. Cont Shelf Res **4**:57-76
- Behrenfeld MJ, O'Malley RT, Siegel DA, McClain CR, Sarmiento JL, Feldman GC, Milligan AJ, Falkowski PG, Letelier RM, Boss ES (2006) Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. Nature **444**:752-755
- Bell GD, Halpert MS, Kousky VE, Gelman ME, Ropelewski CF, Douglas AV, Schnell RC (1999) Climate assessment for 1998. Bull Am Meteorol Soc **80**:1040
- Brewin RJW, Hardman-Mountford NJ, Lavender SJ, Raitsos DE, Hirata T, Uitz J, Devred E, Bricaud A, Ciotti Aurea, Gentili B (2011) An intercomparison of bio-optical techniques for detecting dominant phytoplankton size class from satellite remote sensing. Remote Sens Environ **115**:325-339
- Bricaud A, Boss E, Antoine D (2002) Algal biomass and sea surface temperature in the Mediterranean Basin Intercomparison of data from various satellite sensors, and implications for primary production estimates. Remote Sens Environ **81**:163-178
- Chai C, Yu Z, Song X, Cao X (2006) The status and characteristics of eutrophication in the Yangtze River (Changjiang) Estuary and the adjacent East China Sea, China. Hydrobiologia **563**:313-328
- Chen C-TA (2000) The Three Gorges Dam: Reducing the upwelling and thus productivity in the East China Sea. Geophys Res Lett **27**(3):381-383
- Chen Y-L, Chen H-Y, Lee W-H, Hung C-C, Wong GTF, Kanda J (2001) New production in the East China Sea, comparison between well-mixed winter and stratified summer conditions. Cont Shelf Res **21**:751-764
- Crowley TJ (2000) Causes of climate change over the past 1000 years. Science **289**:270-277
- Dai Z, Du J, Li J, Li W, Chen J (2008) Runoff characteristics of the Changjiang River during 2006: Effect of extreme drought and the impounding of the Three Gorges Dam. Geophys Res Lett **35**. doi:10.1029/2008GL033456
- Delcroix T, Murtugudde R (2002) Sea surface salinity changes in the East China Sea during 1997-2002: Influence of the Yangtze River. J Geophys Res **107**(C12). doi:10.1029/2001JC000893
- Edwards M, Richardson AJ (2004) Impact of climate change on marine pelagic phenology and trophic mismatch. Nature **430**:881-884
- Eppley RW (1972) Temperature and phytoplankton growth in the sea. Fish B-NOAA **70**(4):1063-1085
- Folland CK, Karl TR, Salinger MJ (2002) Observed climate

- variability and change. *Weather* **57**:269-278
- Gong G-C, Chang J, Chiang KP, Hsiung TM, Hung CC, Duan SW, Codispoti LA (2006) Reduction of primary production and changing of nutrient ratio in the East China Sea: Effect of the three Gorges dam? *Geophys Res Lett* **33**. doi:10.1029/2006GL025800
- Guan B (1994) Patterns and structures of the currents in Bohai, Huanghai, and East China Sea. In: Zhou D, Liang YB, Zeng CK (eds) *Oceanology of China Seas*. vol 1. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, pp 17-26
- Hansen J, Sato M, Ruedy R, Lo K, Lea DW, Medina-Elizade M (2006) Global temperature change. *PNAS* **103**(39):14288-14293
- Hirata T, Aiken J, Hardman-mountford N, Smyth TJ, Barlow RG (2008) An absorption model to determine phytoplankton size classes from satellite ocean colour. *Remote Sens Environ* **112**:3153-3159
- Hu D (1994) Some striking features of circulation in Huanghai Sea and East China Sea. In: Zhou D, Liang YB, Zeng CK (eds) *Oceanology of China Seas*. vol 1. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, pp 27-38
- Isobe A, Matsuno T (2008) Long-distance nutrient-transport process in the Changjiang river plume on the East China Sea shelf in summer. *J Geophys Res* **113**. doi:10.1029/2007JC004248
- Kang YQ, Choi SW (1985) Annual and interannual fluctuations of coastal water temperatures in the Tsushima Current and the Kuroshio regions. *Bull Korean Fish Soc* **18**(6): 497-505
- Kang YQ (2000) Warming trend of coastal waters Korea during recent 60 years (1936-1995). *J Fish Sci Tech* **3**:173-179
- Kaplan A, Cane MA, Kushnir Y, Clement AC, Blumenthal MB, Rajagopalan B (1998) Analyses of global sea surface temperature 1865-1991. *J Geophys Res* **103**(C9):18567-18589
- Kim DS, Shim JH, Yoo SJ (2006) Seasonal variations in nutrients and chlorophyll-a concentrations in the Northern East China Sea. *Ocean Sci J* **41**(3):125-137
- Kim H-C, Yamaguchi H, Yoo SJ, Zhu J, Okamura K, Kiyomoto Y, Tanaka K, Kim S-W, Park TW, Oh IS, Ishizaka J (2009) Distribution of Changjiang diluted water detected by satellite chlorophyll-a and its interannual variation during 1998-2007. *J Oceanogr* **65**:129-135
- Kiyomoto Y, Iseki K, Okamura K (2001) Ocean color satellite imagery and shipboard measurements of chlorophyll a and suspended particulate matter distribution in the East China Sea. *J Oceanogr* **57**:37-45
- Lie HJ, Cho CH, Lee JH, Lee S (2003) Structure and eastward extension of the Changjiang River plume in the East China Sea. *J Geophys Res* **108**. doi:10.1029/2001JC001194
- Lu X, Qiao F, Xia C, Zhu J, Yuan Y (2006). Upwelling off Yangtze River estuary in summer. *J Geophys Res* **111**. C11S08. doi:10.1029/2005JC003250
- McClain CR, Feldman GC, Hooker SB (2004) An overview of the SeaWiFS project and strategies for producing a climate research quality global ocean bio-optical time series. *Deep-Sea Res II* **51**:5-42
- O'Reilly JE, Maritorena S, Siegel DA, O'Brien MC, Toole D, Mitchell BG, Kahru M, Chavez FP, Strutton P, Cota GF, Hooker SB, McClain CR, Carder KL, Muller-Karger F, Harding L, Magnuson A, Phinney D, Moore GF, Aiken J, Arrigo KR, Letelier R, Culver M (2000) Ocean Color chlorophyll *a* algorithms for SeaWiFS, OC2 and OC4: Version 4. In: Hooker SB, Firestone ER (eds) *SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analysis*, Part 3, *SeaWiFS Postlaunch Tech. Rep. Ser.*, vol 11, NASA/TM-2000-206892, NASA, Greenbelt, MD, pp 9-27
- Son SH, You SJ, Noh JH (2006) Spring phytoplankton bloom in the fronts of the East China Sea. *Ocean Sci J* **41**(3):181-189
- Tang DL, Ni I-H, Muller-Karger FE, Oh IS (2004) Monthly variation of pigment concentrations and seasonal winds Chin's marginal seas. *Hydrobiologia* **511**:1-15
- Tseng C, Lin C, Chen S, Shyu C (2000) Temporal and spatial variations of sea surface temperature in the East China Sea. *Cont Shelf Res* **20**:373-387
- Walther GR, Post E, Convey P, Menzel A, Parmesan C, Beebee TJC, Fromentin JM, Hoegh-Guldberg O, Bairlein F (2002) Ecological responses to recent climate change. *Nature* **416**:389-395
- Wang S, Tang D (2010) Remote sensing of day/night sea surface temperature difference related to phytoplankton blooms. *Int J Remote Sens* **31**(17):4569-4578
- Wong TFG, Pai SC, Liu KK, Liu CT, Chen CTA (1991) Variability of the chemical hydrography at the frontal region between the East China Sea and the Kuroshio north-east of Taiwan. *Estuar Coast Shelf Sci* **33**:105-120
- Yamaguchi H, Kim HC, Son YB, Kim SW, Okamura K, Kiyomoto Y, Ishizaka J (2012) Seasonal and summer interannual variations of the SeaWiFS chlorophyll *a* in the Yellow Sea and East China Sea. *Prog Oceanogr*. doi:10.1016/j.pocean.2012.04.004
- Yan X-H, Jo Y-H, Jiang L, Wan Z, Liu WT, Li Y, Zhan J, Du T (2008) Impact of the Three Gorges Dam water

- storage on the Yangtze River outflow into the East China Sea. *Geophys Res Lett* **35**. doi:10.1029/2007GL032908
- Yuan D, Zhu J, Li C, Hu D (2008) Cross-shelf circulation in the Yellow and East China Seas indicated by MODIS satellite observations. *J Marine Syst* **70**:134-149
- Yuan J, Hayden L, Dagg M (2007) Comment on "Reduction of primary production and changing of nutrient ratio in the East China Sea: effect of the three Gorges dam?" by Gwo-Ching Gong et al. *Geophys Res Lett* **34**:L14609. doi:10.1029/2006GL029036
- Zhang L, Liu Z, Zhang J, Hong GH, Park Y, Zhang HF (2007) Reevaluation of mixing among multiple water masses in the shelf: An example from the East China Sea. *Cont Shelf Res* **27**:1969-1979
- Zhou M-J, Shen Z-L, Yu R-C (2008) Response of a coastal phytoplankton community to increased nutrient input from the Changjiang (Yangtze) River. *Cont Shelf Res* **28**:1483-1489
-
- Received Apr. 13, 2012*
Revised May. 21, 2012
Accepted May. 23, 2012