

동중국해에서 위성에서 추정된 10년 동안의 표층 입자성 유기 탄소의 시/공간적 변화

손영백*,*****† · 이태희** · 최동림** · 장성태*** · 김철호**** ·
안유환* · 유주형* · 김문구** · 정섬규**** · Joji Ishizaka*****

*한국해양연구원 해양위성센터, **한국해양연구원 남해특성연구부, ***한국해양연구원 기후·연안재해연구부

****한국해양연구원 해양특성연구단, *****HyARC 나고야대학교

Spatial and Temporal Variations of Satellite-derived 10-year Surface Particulate Organic Carbon (POC) in the East China Sea

Young Baek Son*,*****†, Taehee Lee**, Dong-Lim Choi**, Sung-Tae Jang***, Cheol-Ho Kim***,
Yu Hwan Ahn*, Joo Hyung Ryu*, Moonkoo Kim**, Seom-Kyu Jung****, and Joji Ishizaka*****

*Korea Ocean Satellite Center, KORDI

**South Sea Environment Research Department, KORDI

***Climate Change & Coastal Disaster Research Department, KORDI

****Naval Technology Research Group, KORDI

*****Hydrospheric Atmospheric Research Center (HyARC), Nagoya University

Abstract : Surface particulate organic carbon (POC) concentration estimated from Maximum Normalized Difference Carbon Index (MNDCI) algorithm using SeaWiFS data is used to determine spatial and temporal variations of the Changjiang Diluted Water (CDW) in the East China Sea. 10-year monthly POC concentrations (1997-2007) show clearly seasonal variations. Inter-annual variation of POC in whole and three different areas separated by standard deviation is not linearly correlated with the Changjiang River discharge that has decreased after 1998.

To determine more detailed spatial and temporal POC variations, we used empirical orthogonal function (EOF) analysis in summer (Jun.-Sep.) from 2000 to 2007. First mode is spatially and temporally correlated with the area influenced by the Changjiang River discharge. Second mode is temporally less sensitive with the Changjiang River discharge but spatially correlated with north-south patterns. Relatively higher POC variations during 2000 and 2003 were shown in the southern East China Sea. These patterns during 2004 and 2007 moved to the northern East China Sea. This phenomenon is better related to spatial variations of wind-direction than the amount of Changjiang River discharge, which is verified from in-situ measurement.

Key Words : Particulate organic carbon (POC), SeaWiFS, QuickSCAT, Changjiang Diluted Water (CDW), Maximum Normalized Difference Carbon Index (MNDCI), the East China Sea.

요약 : SeaWiFS자료를 Maximum Normalized Difference Carbon Index(MNDCI) 알고리즘을 이용하여 추정된 particulate organic carbon(POC)는 장강에서 유입된 담수의 영향을 받는 동중국해에서 시/공간적 해양환경 변화를 조사하는데 사용했다. 10년 평균한 POC 농도는 (1997년-2007년) 뚜렷한 계절적 변화를 보인다. POC 경년 변화는 전체 지역 평균값과 표준편차를 이용하여 세 개의 지역으로 나누어 평균한 결과에서 1998년 이후 꾸준한 감소를 보이는 장강과는 달리 감소되는 경향이 관측되지 않았다.

자세한 POC 시/공간적인 변화를 관측하기 위하여, 2000년부터 2007년까지 여름철 (6월-9월) 자료를 선정하여 empirical orthogonal function(EOF) 분석을 실시하였다. 첫 번째 성분은 장강으로부터 유입되는 담수의 영향으로 공간적인 변화가 이루어졌다. 두 번째 성분은 장강의 유출량과는 약한 상관관계를 보이고, 공간적으로 남-북 방향의 변화가 관측되었다. 2000년부터 2003년까지 상대적으로 높은 POC 분포는 연구지역 남쪽 부분에서 나타난다. 2004년부터 2007년까지 이런 변화는 연구지역 북쪽 부분에서 관측되었다. 장기적인 변화는 방류량의 감소에 의한 영향보다는 공간적인 변화에 기인한 것으로 사료되며, 이는 현장 관측자료에서 유사한 결과를 보였다.

1. 서론

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 지역으로 알려져 있다(Chen *et al.*, 2001; Delcroix and Murtugudde, 2002; Chai *et al.*, 2006; Lu *et al.*, 2006; Isobe and Matsuno, 2008; Yan *et al.*, 2008; Zhou *et al.*, 2008). 특히 여름철 장강에서 유입된 담수는 장강 희석수(Changjiang Diluted Water: CDW)를 형성하여(Beardsley *et al.*, 1985; Guan, 1994; Hu, 1994) 연구지역 동쪽인 제주도 및 대마난류의 영향권까지 발달된다(Lie *et al.*, 2003). 여름철 저염수의 확산은 장강 방류량(Guan, 1994) 및 바람에 의한 영향을 받는 것으로 알려져 있지만(Hu, 1994), 다양한 모델 결과에서 장강 희석수의 확산 및 분포는 바람과 조류에 의한 복합적인 영향을 받는 것으로 보고 되었다(Oh and Park, 2004).

최근 10년 동안 많은 연구들 중에서 장강 지류에 건설된 산샤댐(Three-Gorges Dam)때문에 동중국해는 인위적 수량 통제로 담수의 유입이 감소하고 이로 인해 연구지역 및 주변해역에서 해류 순환시스템의 변화(Chen, 2000) 및 생지화학적 원소들의 거동 및 분포 변화로 해양생태계에 심각한 변화를 초래 할 것이라고 보고하였다(Gong *et al.*, 2006; Jiao *et al.*, 2007). 최근 발표된 세 편의 논문은 산샤댐 건설에 의한 해양환경 변화에 대한

흥미로운 주장을 서술하고 있다. Gong *et al.*(2006)은 산샤댐 공사 이전인 1998년 자료와 비교하여 2003년 6월에 산샤댐의 일차 물막이 공사 후에 줄어든 방류량으로 인해 장강에 인접한 동중국해에서 영양염의 유입이 제한되면서 공사 전에 비해 일차생산력이 86% 가량 감소하였을 뿐만 아니라, 생물 군집에서도 미세조류가 우점하게 되었다고 보고 하였다(Jiao *et al.*, 2007; Dai *et al.*, 2008). 이는 산샤댐의 건설로 인하여 연구지역에서 담수 유입이 감소되어 쿠로시오 증층의 용승이 약해지고 이로 인해 영양염 공급 감소로 생산성이 줄어들 것으로 예견한 Chen (2000)의 결과와 유사하다.

Gong *et al.*(2006)의 결과와 달리, Yuan *et al.*(2007)은 위성으로 추정된 클로로필 자료에서 2003년 일차 물막이 공사 전후로 뚜렷한 감소 경향이 관측되지 않았으며, 현장자료를 이용한 관측에서도 큰 변화가 없었다고 보고하였다(Kim *et al.* 2006 and 2009a; 김 외, 2007; Yan *et al.*, 2008). 그리고 시간적으로 제한된 해양관측은 계절적 변화 및 장기간의 변화를 관측하는데 문제가 될 수 있기 때문에 조심성 있는 접근이 필요하다고 강조하였다.

Gong *et al.*(2007) 연구는 위성에서 추정된 클로로필의 결과는 CDOM (Colored Dissolved Organic Matter)의 영향으로 실제 값보다 높게 나타나고, 대부분 연안 역은 대기보정의 문제 때문에 이것을 이용한 장기적인 변화 연구는 적합하지 않다는 의견을 제시하며 Yuan *et al.*(2007)의 결과에 반박하였다.

이처럼 최근 연구에서 산샤댐 건설로 인한 해양환경

변화에 대해서 다양한 논의가 이루어지고 있다. 산사댐 건설로 인하여 방류량 및 부유물질이 상대적으로 감소하는 경향을 보이지만(Dai *et al.*, 2008; Yamaguchi *et al.*, submitted), 이로 인해 물리적 및 생지화학적 환경 변화로 생태계에 영향을 미치고 있는지에 대해서는 많은 연구가 필요 할 것으로 사료된다. 최근 장강 하구 역에서는 부영양화로 인하여 적조 발생이 증가하고 있는 것으로 보고 되었다(Chai *et al.*, 2006; Zhou *et al.*, 2008). Kim *et al.* (2006 and 2009a)과 김 외(2007)은 동중국해에서 영양염 및 지화학적 원소들의 뚜렷한 경년 변화를 보이지 않는다고 보고하였다. 그래서 이러한 변화가 단순한 계절적인 변화에서 기인한 것인지, 아니면 산사댐의 건설로 인하여 연구지역에 영향을 주고 있는지에 대한 세밀한 조사가 필요하다(해양연구원, 2006).

본 연구는 위성으로 추정된 입자성 유기탄소 (Particulate Organic Carbon: POC)를 이용하여 장강에서 유입되는 담수의 영향을 받는 동중국해 및 남해안에서 계절 및 장기적인 변화를 조사하였다. 10년 동안의 POC 변화뿐만 아니라, 하계에 장강 방류량과 관련된 장기적인 변화를 분석하였다. 그 결과를 검증하기 위해 현장 및 위성 자료를 비교 분석을 하였다.

2. 재료 및 방법

1) 현장관측 자료

장강 희석수의 영향을 받는 동중국해 및 남해안을 포함하는 대륙붕 지역에서 해양환경 변화를 관측하는 두 개의 조사에서 얻어진 자료 및 국립수산과학원 자료를 이용하였다. 첫 번째 현장관측 자료는 2003년부터 2007년까지 한국해양연구원 연구선 이어도 및 일본 나가사키 대학의 조사선 나가사키마루호를 이용하여 획득되었다(Fig. 1a). 두 번째 국립수산과학원에서 매년 격월로 한반도 주변 해역에 대한 정기적인 해양관측을 수행하여 얻은 자료들 중에서 황해, 동중국해, 남해안 해역의 염분 현장관측 자료를 사용하였다(<http://kodc.nfrdi.re.kr/>). 국립수산과학원 자료는 한국해양연구원 및 나가사키 대학의 염분 자료와 병합하였다(Fig. 1a). 기본적인 염분 자료는 CTD(Conductivity, Temperature and Depth)를 이용하여 관측되었다. 그리고 장강의 월

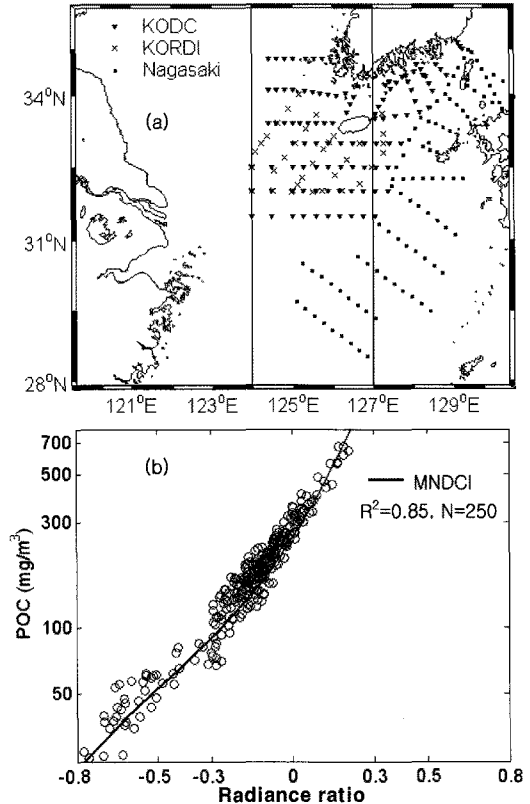


Fig. 1. (a) Study area and sampling station in the East China Sea and South Sea of Korea. CTD salinities are collected from Korea Ocean Data Center (KODC), Korea Ocean Research & Development Institute (KORDI), and Nagasaki University. The Straight lines indicate the vertical section at 124° E and 127° E. (b) Least-square regression between in-situ POC and MNDCI.

별 평균 방류량은 다둥(Datong) 관측소에서 관측한 자료로 1995년 1월부터 2008년 12월까지의 자료를 이용하였다(Lee Tae Hee, personal communicated).

2) 위성자료

해색 위성센서인 SeaWiFS(Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor)의 정규 수출복사량(Normalized Water-leaving Radiance, nLw)는 NASA Ocean Biology Processing Group (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>)의 자료를 이용하였다. 동중국해 및 남해안을 포함하는 GAC(Global Area Coverage) 자료는 1998년 9월부터 2007년 12월까지 일별 자료를 연구지역에 맞도록 SeaDAS(SeaWiFS Data Analysis System)를 이용하여 4km 해상도를 가지는 SMI

(Standard Mapped Image) 자료로 처리 되었다 (McClain *et al.*, 2004). nLw는 관측기간 동안에 POC 농도를 추정하는데 사용하였고, 기존의 MNDCI (Maximum Normalized Difference Carbon Index) 알고리즘(Son *et al.*, 2009)을 이용하여 월별 평균 POC 자료(124개월)로 계산되었다. 위성에서 추정된 POC 값에 대한 검증으로, 현장에서 관측된 POC와 MNDCI 알고리즘으로 추정된 값을 도식하였고 좋은 상관관계를 가지는 것을 보여준다(Fig. 1b).

첫 번째 POC의 계절적 변화는 월별 10년 전체 평균 값을 이용하여 계산하였다. 두 번째 POC의 장기적인 변화를 조사하기 위하여 연구지역 전체를 월별 평균하고, 동시에 지역적 변화를 조사하기 위하여 10년 전체 자료의 표준편차를 구하고 이것을 이용하여 세 개 지역으로 나누어 각각의 지역에서 월별 평균 값을 계산하였다. 지역 구분은 최대(표준편차 >70), 중간(30 < 표준편차 ≤70), 최소(표준편차 ≤30)인 지역으로 나누었다. 세 번째 장기적인 여름철(6월-9월) POC 변화를 조사하기 위해서 1998년부터 2007년까지 자료를(총 40개월) 위와 동일한 방법으로 전체 및 표준편차를 이용하여 세 개 지역에 나누어서 월별 평균을 하였다. 네 번째 POC 평균값 조사와는 달리 여름철 POC의 시/공간적인 변화를 관측하기 위하여 2000년부터 2007년 여름철(6월-9월, 총 32개월) 자료는 EOF(Empirical Orthogonal Function) 분석을 실시하였다(Son, 2006).

해수면 표층바람은 Quick Scatterometer (QuickSCAT)을 이용해 관측된 자료로 PO.DAAC (<http://podaac.jpl.nasa.gov/index.html>)에서 수집된 level 3 자료를 이용하여 연구지역에 맞도록 기본적인 보정을 통하여 25km의 해상도를 가지는 자료로 처리하였다(Wentz, 1997).

3. 결과 및 토의

1) POC의 계절적 변화

Fig. 2는 10년 월별 평균한 POC 농도의 계절적 변화를 보여준다. POC 농도는 연구지역의 서쪽 해역인 장강 하구 역에서 연중 높은 값을 보이고, 쿠로시오 및 대

마난류의 영향을 받는 남동쪽해역에서 상대적으로 낮은 값을 보이고 있다. POC의 계절적 변화는 봄에 최대를 보이고, 여름에 접어들면서 감소되었다가 가을과 겨울로 가면서 다시 증가하는 양상을 보인다(Fig. 2m).

봄철(3월-5월) 100-300 mg/m³ POC 분포는 1월-2월과는 달리 쿠로시오 해류의 영향을 받는 지역까지 확장되고, 5월로 가면서 점차 그 분포영역이 감소된다(Figs. 2c-2e). 여름철(6월-8월) 장강 하구에서 발달된 300 mg/m³ 이상의 POC 분포는 봄에 비하여 감소되고, 황해중부 지역에서는 100 mg/m³ 이하로 감소된다(Figs. 2f-2h). 그러나 100-300 mg/m³의 POC 분포는 장강 하구 및 한국 남해안 사이에서 발견된다. 이는 대부분의 부유물질들이 연안에 퇴적되어 외해로의 이동이 감소하고, 여름철 광도 증가 및 담수에 포함된 풍부한 영양염으로 인하여 생산성이 증가되는 것으로 보고되었다(Isobe and Matsuno, 2008; Yuan *et al.*, 2008). 여름철 증가된 생산성은 위성에서 추정된 클로로필 관측에서도 보여진다(Yamaguchi *et al.*, submitted).

가을(9월-11월)(Figs. 2i-2k)과 겨울(12월-2월)(Figs. 2l, 2a, 2b) 접어들면서 POC 농도는 다시 증가하고, 300 mg/m³ 이상의 POC농도는 공간적으로 장강 하구에서 남동쪽 방향으로 혀 모양(tong-shaped)의 발달되어 있으며 봄철까지 지속된다. 이는 한반도에 영향을 미치는 계절풍으로 인해 장강 하구에 퇴적되어 있던 퇴적물의 재부유에 의한 영향으로 실제 값보다 높게 나타나고 있으며, 장강 하구역 및 주변 해역에서 잘 나타나는 것으로 보고되었다(Kiyomoto *et al.*, 2001; Yamaguchi *et al.*, submitted).

2) 장기적인 POC 변화

Fig. 3a는 POC 10년 전체 자료의 표준편차를 이용하여 구분된 세 개의 지역을 보여준다. 지역 1(표준편차 ≤30)은 쿠로시오 해류 및 대마난류의 영향을 받고 있는 지역이고, 지역 2(30 < 표준편차 ≤70)는 중국대륙과 한반도 사이에 위치하고, 지역 3(표준편차 >70)은 연구지역의 서쪽인 중국대륙의 동쪽 연안, 한반도 연안 및 일본 큐슈 연안을 나타내고 있다.

Fig. 3b는 전체 연구지역을 월별, 3개월 및 1년 평균한 그래프를 보여준다. POC의 계절적 변화와 마찬가지로

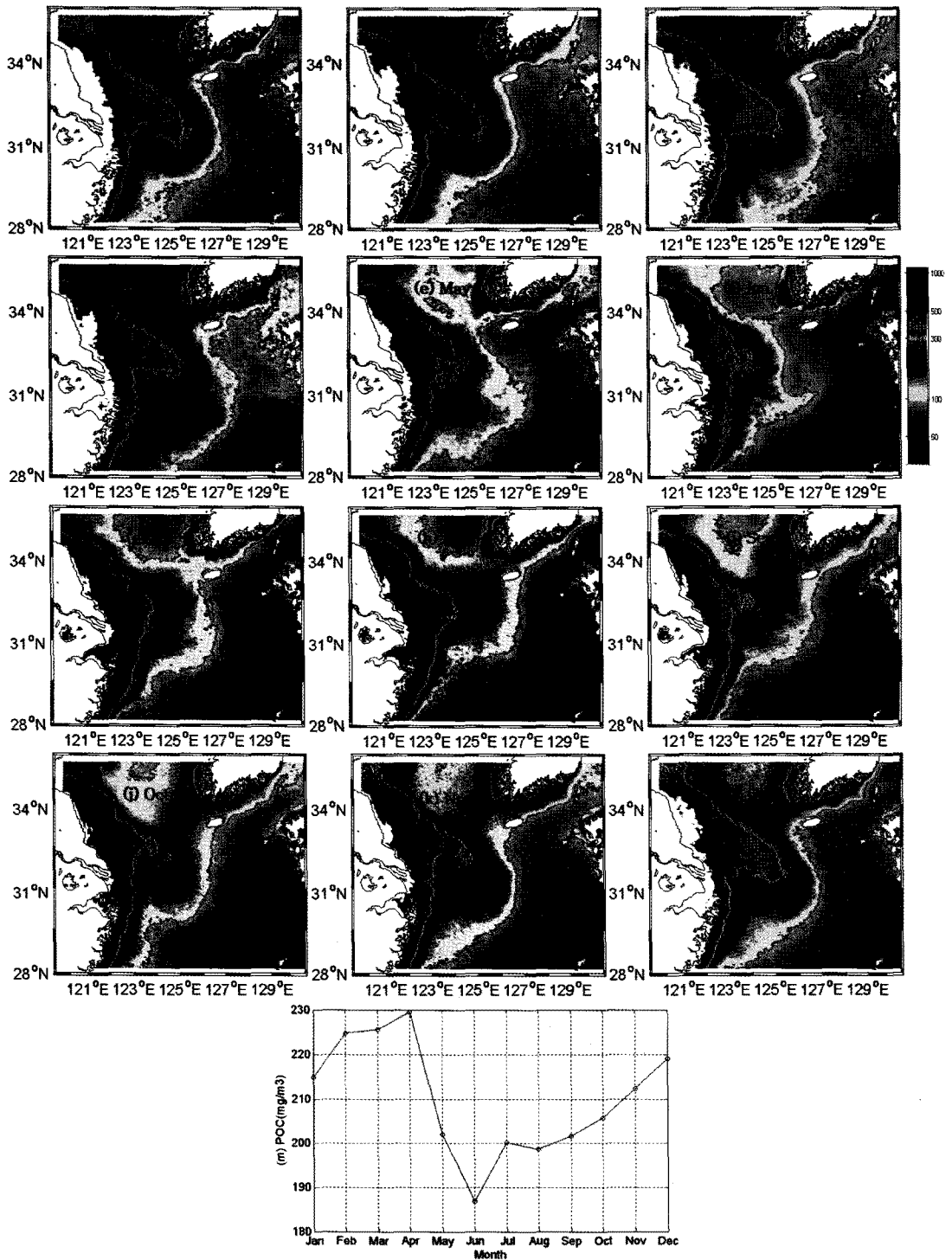


Fig. 2. (a)-(l) Distribution of 10-year monthly average of particulate organic carbon (mg/m^3) and (m) plot of particulate organic carbon concentration averaged from Fig. a-l.

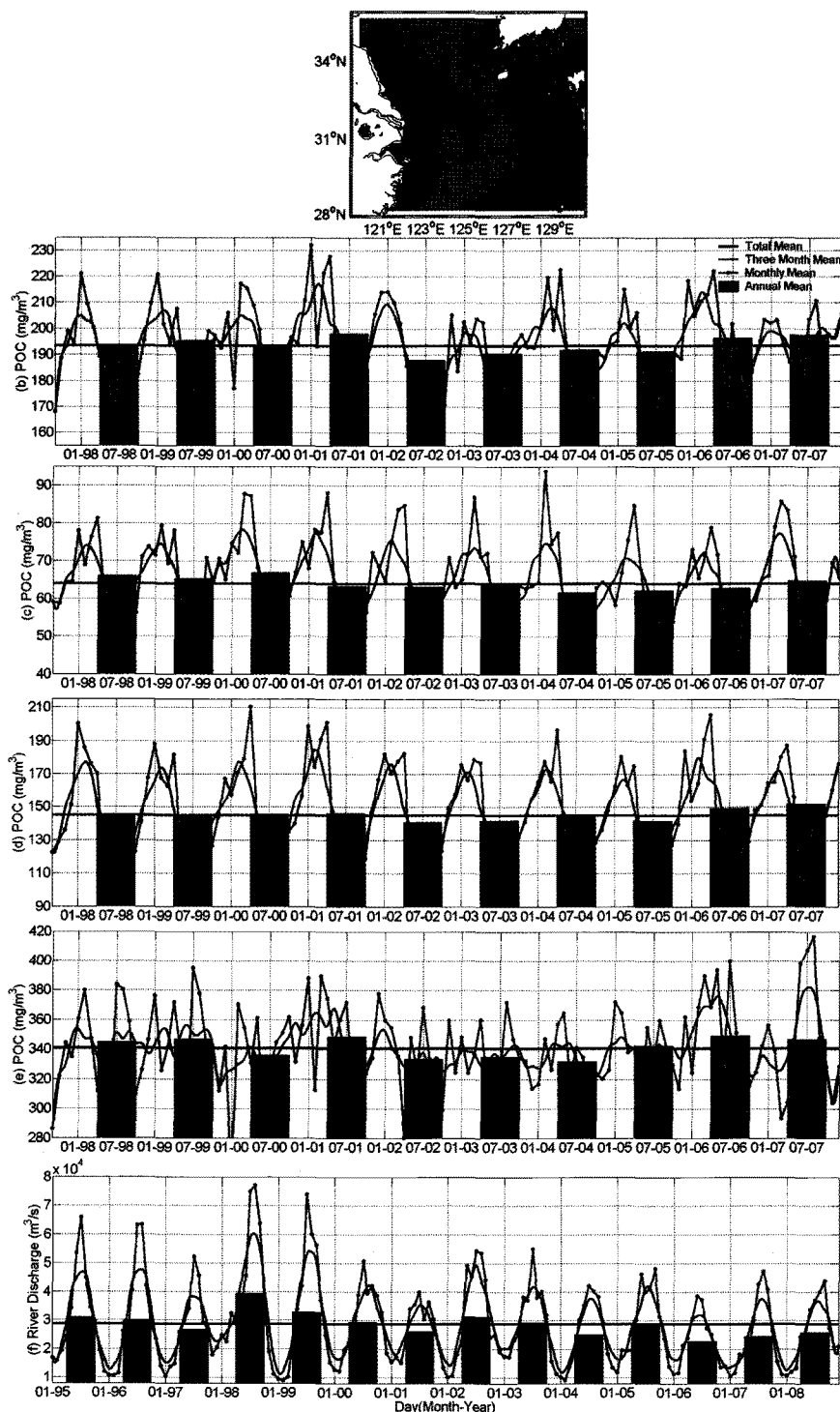


Fig. 3. (a) Three different areas based on standard deviation of 10-year particulate organic carbon time-series data in the East China Sea. Time-series of particulate organic carbon concentration at (b) whole area, (c) region 1 (standard deviation ≤ 30), (d) region 2 ($30 < \text{standard deviation} \leq 70$) and (e) region 3 (standard deviation > 70) from Sep. 1997 to Dec. 2007, and (f) that of Changjiang River discharge at Datong station from Jan. 1995 to Dec. 2008. Bold black line indicated 10-year mean value, red line three-month running mean value, green line monthly mean value, and blue bar one-year mean value.

로(Fig. 2m), 겨울 및 봄에 최고를 보이고, 여름철에 감소하는 경향을 보인다. POC는 1998년부터 2001년까지 상대적으로 농도(연평균 $>190 \text{ mg/m}^3$)가 높고, 2002년과 2003년에 연평균 약 190 mg/m^3 로 감소되고, 이후에 증가하는 경향을 보인다. 일차 물막이 공사가 있었던 2003년 전후로 변화가 예견된 연구(Chen, 2000; Gong et al., 2006)와는 달리 전체 10년 동안 POC의 변화는 감소하였다가 다시 증가하는 경향을 보였다.

지역 1은(Fig. 3a) 상대적으로 POC의 장기적인 변화가 적은 지역이다. Fig. 3c에서 POC는 뚜렷한 계절적 변화를 보이고 겨울철보다 봄철에 높은 값을 가지고, 여름철에 감소된다. 1998년부터 2000년까지는 증가되어(연평균 $>65 \text{ mg/m}^3$) 있지만, 그 이후부터 2004년까지는 점차적으로 감소하여 2004년에는 연평균 61.7 mg/m^3 의 값을 보인다. 그러나 2005년부터 2007년까지 점차적으로 증가되어 2003년 이전의 평균값과 유사하다.

지역 2는(Fig. 3a) 위의 두 지역과 유사한 계절적 변화를 보여준다. Fig. 3d에서 POC 농도는 1998년부터 2001년까지 POC의 연평균은 $\sim 145 \text{ mg/m}^3$ 으로 일정한 평균값을 나타내고, 2002년과 2003년에는 감소하여 연평균 $\sim 141 \text{ mg/m}^3$ 를 나타낸다. 2006년과 2007년에는 연평균 $\sim 150 \text{ mg/m}^3$ 으로 1997년과 1998년에 비해 증가하였다.

지역 3은(Fig. 3a) POC 농도 변화가 많았던 지역으로 장강 하구, 한국 남해/황해, 및 일본 류큐지방에서 발견된다. 지역 3의 평균값 계산에서는 장강 하구의 변화를 관찰하기 위해 한국 연안 및 일본 연안에서 높은 표준편차를 보이는 지역을 제외시켰다. Fig. 3e에서 지역 3은 앞의 세 개의 결과에서 나타나는 계절적 변화를 보여주지는 않지만, 여름 및 겨울에 상대적으로 높은 변화를 보인다. POC 평균값은 1998년, 1999년, 그리고 2001년에 상대적으로 증가하였고(연평균 $>345 \text{ mg/m}^3$), 2002년에서 2004년까지는 감소되었고(연평균 $\sim 330 \text{ mg/m}^3$), 2005년 이후 다시 증가되는 경향(연평균 $>340 \text{ mg/m}^3$)을 보여준다.

본 연구에서 POC 전체자료를 이용한 지역구분은 계절 및 장기적인 분포에서 다른 변화를 보일 수 있기 때문에, 전체 지역의 표준편차를 이용한 계산 방법에 한계가 있을 수 있다. 그래서 전체의 표준편차보다는 월별 표준

편차를 이용하여 위와 같은 방법으로 세 개의 지역에 대하여 재계산을 하였다. 계절별 표준편차를 이용하여 계산된 POC의 변화는 앞에서 계산된 결과와 유사한 경향을 보여주었다. 그러나 지역 3(표준편차)70)에서는 겨울과 여름에 증가되고 봄에 감소되는 뚜렷한 계절적 변화를 보였다(본 연구에서 이 결과는 나타나지 않았음).

두 개의 다른 방법으로 계산된 POC 장기적인 변화는 Gong et al.(2006)의 결과와는 다른 결과를 보여주고 있다. 1998년보다 2003년, 2004년에 감소된 것처럼 보이지만, 장기적인 변화에서는 감소되는 뚜렷한 경향을 보이지 않았다. 그래서 POC의 분포에 직접적 영향을 주는 장강 방류량의 변화를 알아보기 위해 1995년부터 2008년까지 중국 다둥 관측소에서 관측된 장강 방류량을 조사하였다. Fig. 3f에서 방류량은 여름에 최고를 보이고, 겨울로 가면서 감소하는 계절적 변화를 나타내고 있다. ENSO 현상과 관련하여 1997년에 강우량이 줄어들었고(Lau and Wu, 1999), 1998년과 1999년에 대홍수가 있었던 시기로 상대적 높은 방류량을 나타내고 있으며(Bell et al., 1999), 그 이후 점차 감소하여 2003년에 일차 물막이 공사 후의 방류량은 1997년 건기보다 상당 부분 감소되었다(Delcroix and Murtugudde, 2002). 그러나 2006년 이후 방류량은 매년 조금씩 증가하는 경향을 보여준다. 이는 2006년이 다른 해에 비하여 심한 가뭄이 있었던 시기로 최근 관측된 값 중에서 가장 낮은 값을 기록했다. 이런 현상은 가뭄의 영향뿐만 아니라, 산사태의 건설로 인한 방류량의 감소도 영향을 받은 것으로 보고되었다(Dai et al., 2008).

3) 여름철 POC 변화

절대적인 방류량은 1998년 이후 감소하여 2003년 산사태 일차 물막이 공사 이후로 2006년까지 점차적으로 감소된 것으로 보이지만(Fig. 3f), POC의 절대적인 농도 변화에는 반영되지 않은 것으로 사료된다(Figs. 3b-3e). 이런 현상은 Kiyomoto et al.(2001)의 연구에서 언급한 겨울철 강한 부유물의 영향으로 위성에서 관측된 값이 현장관측 값보다 높게 나타날 수 있기 때문에 POC 분포 및 농도가 계절적 차이에 영향을 줄 수 있다. 그래서 장강으로부터 유입되는 담수의 영향은 증가되지만, 부유물에 의한 영향은 감소되고, 공간적으로 한국 연안에 많은 영향을 미치는 POC 자료 중에서 6월부터

9월까지의 자료를 선택하여 1998년부터 2007년까지 총 40개월의 자료를 재계산하였다.

계산 방법은 앞에서 사용하였던 방법과 동일하게 전체 지역 평균값과 여름(6월-9월) 전체 자료의 표준편차를 이용하여 세 개의 지역으로 나누어서 계산하였다 (Fig. 4a). POC 변화는 10년 전체 자료에서 보여준 결과(Figs. 3b-3e)와 유사한 경향을 보여준다(Figs. 4b-4e). POC 농도는 1998년과 1999년에 비하여 2003년과 2004년은 감소된 것으로 나타나지만, 그 이후 증가하여 1998년 1999년의 값과 유사하거나 높은 농도를 나타낸다. 특히 장강의 직접적인 영향을 받는 지역 3의(Fig. 4e) 장기적인 변화는 1998년에서 2004년까지 점차적 감소되지만, 그 이후 다시 증가된다. 일차 물막이 공사가 있었던 2003년과 장강 방류량이 급격하게 감소한 2006년의 POC농도는 2004년보다 증가되어 나타난다 (Figs. 3f and 4e). 이것은 연구지역에서 POC의 변화가 줄어든 방류량의 영향뿐만 아니라 다른 요인에 의해서도 조절되는 것으로 판단된다.

구체적인 POC의 시/공간적 변화를 조사하기 위해서, 2000년부터 2007년까지 8년 간의 POC 자료 중에서 6월부터 9월까지의 여름철 POC 자료에 대해서 EOF 분석을 실시하였다. 1998년과 1999년은 증가된 방류량으로(Bell *et al.*, 1999) 인하여 POC 변화가 다른 시기보다 높을 것으로 사료되어(손, Gardner, 2010) 조사 대상에서 1998년과 1999년의 자료는 제외하고, 장강 방류량의 변화가 어느 정도 안정된 시기인 2000년부터 2007년까지 여름철 자료를 분석하였다(Fig. 5).

여름철 POC 자료를 이용한 EOF 분석에서 첫 번째 주성분은 전체의 35%를 설명한다(Figs. 5a-5b). Fig. 5a는 첫 번째 주성분의 공간적인 변화를 보여준다. 연구지역에서 양의 값을 가지는 곳은 장강 하구역에서 제주도 남부 지역이고, 그 이외의 지역은 음의 값을 보인다. 첫 번째 주성분의 시간적 변화는 장강 방류량의 변화와 잘 일치한다(Fig. 5b). 여름철 장강 방류량은 위성으로 추정된 클로로필의 공간적 분포와 좋은 상관관계를 보이며, 지역별로 0-2개월의 시간적인 차이를 가지는 것으로 보고되었다(Kim *et al.*, 2009b; Yamaguchi *et al.*, submitted). 첫 번째 POC 자료의 주성분은 방류량의 변화에 의한 장강 희석수의 공간적 변화에 영향을 받는 지역과 받지 않는 지역으로 대표될 수 있다.

두 번째 주성분은 전체의 16%를 설명하며(Figs. 5c-5d), 공간적으로 남-북 방향의 상반된 분포를 보인다 (Fig. 5c). 양의 값을 가지는 부분은 서해 및 제주도 남쪽 지역에서 시작하여 한국 남해안 연안으로 이어져 발달되어있다. 음의 값을 가지는 부분은 장강 하구역에서 동중국해 남쪽 지역으로 조사되었다. Fig. 5d에서 POC의 시간적 변화는 장강 방류량 변화와는 다른 경향을 보여준다. 2000년부터 2003년까지는 음의 값을 보이다가 2004년부터 2007년까지는 전반적으로 양의 값을 보이고 있다. 이는 POC의 공간적 분포가 2003년 이전에는 연구지역 북쪽인 제주도 남쪽 및 한국 남해안 연안에서의 영향이 상대적으로 작았던 반면, 연구지역 남쪽 지역에서 그 영향이 증가되었다. 2003년 이후에는 POC의 공간적 분포는 반대의 경향을 보여준다. 그 이외의 주성분은 10% 미만으로 대부분 동중국해 중앙 해역에서 시간에 따른 공간적인 변화를 보여주고 있다(본 연구에서 이 결과는 나타내지 않았음).

두 개의 주성분 결과에서 여름철 POC의 변화는 장강 하구역에서 제주도 남부 해역에서 높았고, 직접적으로 장강 방류량에 의한 영향을 받고 있는 것으로 판단된다. 그러나 공간적 분포에서는 장강 방류량의 절대적인 변화와는 다른 분포 변화로, 제주도에서 남해안에 이르는 지역에서 다른 공간적 변화를 발견하였다. 이것은 매우 흥미로운 결과로, 이런 변화를 조사하기 위하여 2000년부터 2007년까지 여름철(6월-9월) POC 자료를 이용하여 두 개의 라인(Fig. 1)에서 POC 농도 및 anomaly 변화를 조사하였다(Fig. 6).

Fig. 6a는 124°E 라인에서 2000년부터 2007년까지의 여름철 POC 분포로 높은 농도의 POC는 32°N 부근에서 관측된다. Fig. 6b는 Fig. 6a의 anomaly 값으로 2000년부터 2003년까지는 32°N 이하에서 상대적으로 높게 나타나고, 그 이후에는 전체지역에서 높은 변화를 보여주고 있다. Fig. 6c는 127°E 라인에서 여름철 POC 분포로 농도는 남쪽 지역으로 갈수록 감소되지만, 2003년 이후에는 남쪽에서 상대적으로 높은 값을 보인다. 127°E 라인의 anomaly 값은 32°N 이남 지역에서는 2003년을 이후로 감소하는 경향을 보이고, 32°N 이북 지역에서는 증가되어 나타났다. 결과적으로 124°E 라인에서는 2000년부터 2007년까지 연구지역 전역에 고른 변화가 일어났지만, 127°E 라인에서는 2003년 이후 높

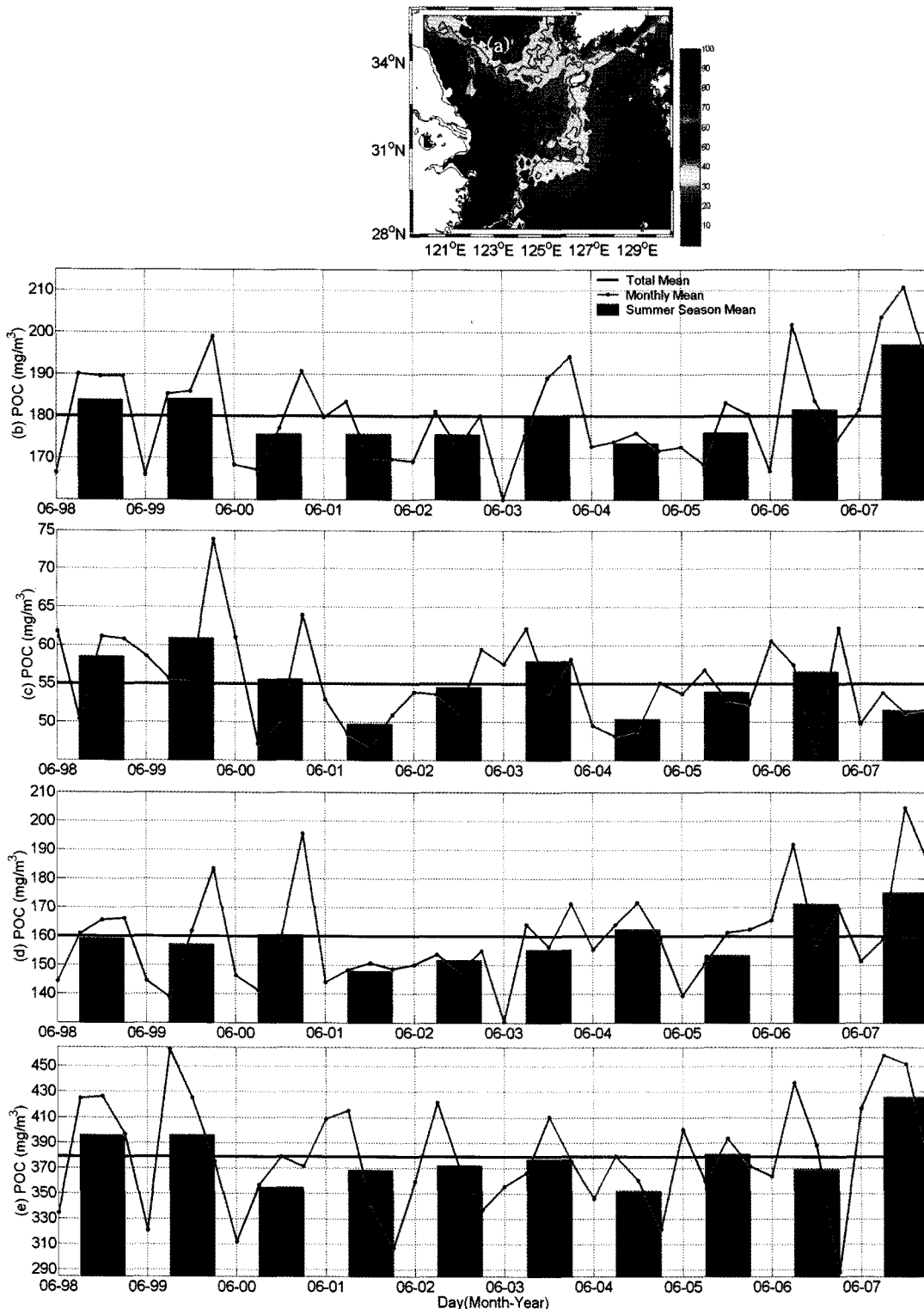


Fig. 4. (a) Standard deviation of 10-year summer (Jun.-Sep.) particulate organic carbon time-series data from 1998 to 2007 with (b) whole area, (c) region 1 (standard deviation<30), (d) region 2 (30<standard deviation >70), and (e) region 3 (standard deviation<70). Bold black line indicated 10-year summer mean value, green line monthly mean value, and blue bar one-year summer mean value.

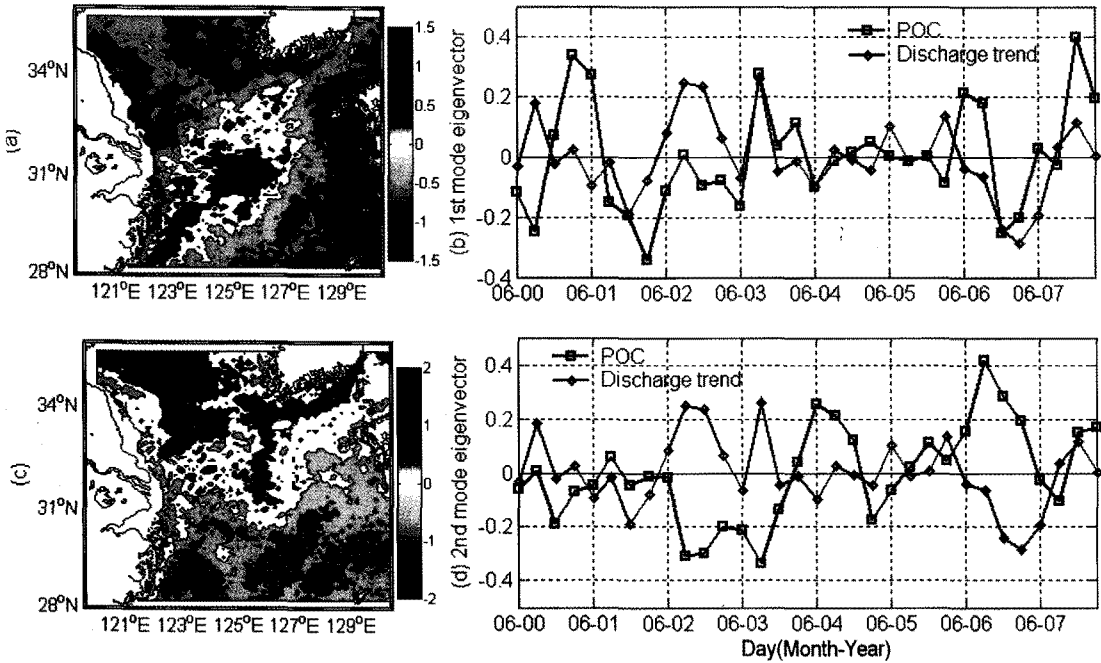


Fig. 5. Temporal mode of particulate organic carbon for EOF (left) and their time series (right) in the East China. (a)-(b) indicated first mode and (c)-(d) second mode.

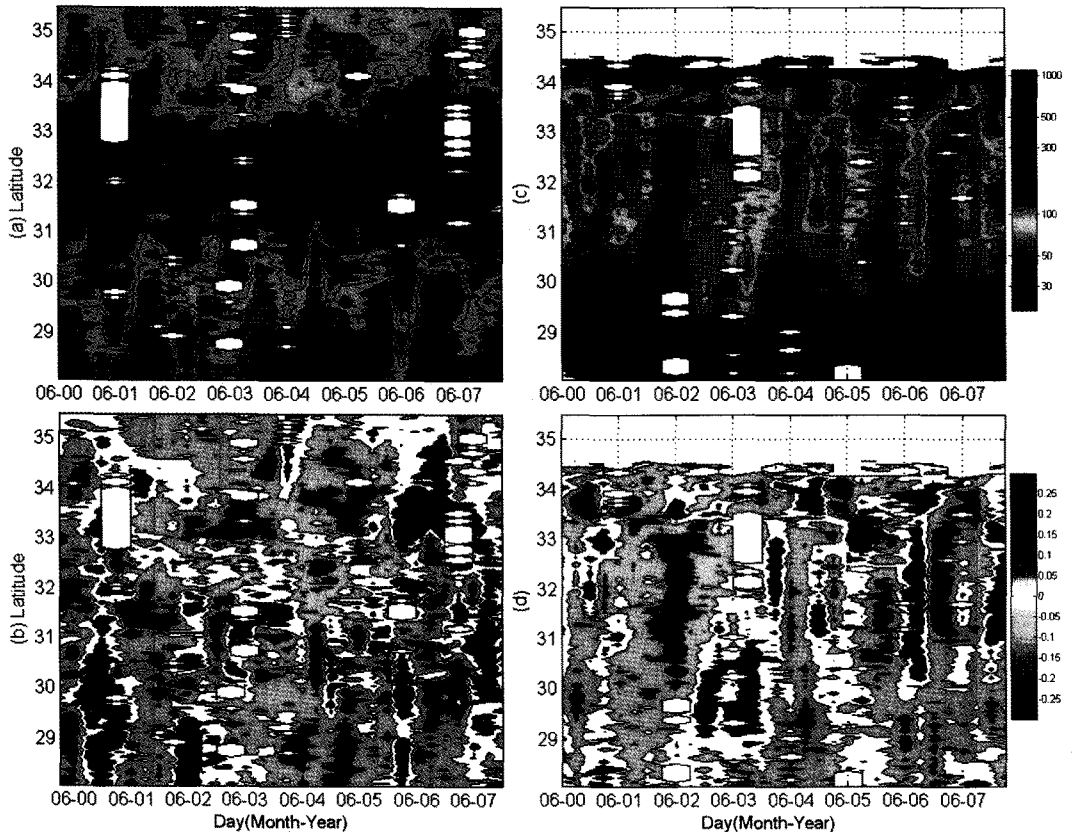


Fig. 6. Surface particulate organic carbon concentration (mg/m³) ((a) and (c)) and particulate organic carbon anomaly ((b) and (d)) for summer season (Jun.-Sep.) from 2000 to 2007 along 124° E ((a)-(b)) and 127° E ((c)-(d)) (Fig. 1).

은 농도의 POC 분포가 남쪽보다는 북쪽으로 이동하여 분포하고 있다(Kim *et al.*, 2009b). 이는 앞의 EOF 분석에서 두 번째 주성분에서 관측되었던 남-북 방향의 변화를 지지하는 것으로 판단된다.

4) 위성 및 현장 자료를 이용한 POC의 시/공간적 변화

EOF 분석 결과 및 두 개의 남-북 라인에 대한 분석 결과에서 2000년부터 2007년까지 POC 농도는 시/공간적으로 다른 변화가 조사되었다. 대표적인 변화를 표시하기 위해 2000년, 2003년, 2006년 6월에서 8월까지의 POC anomaly 및 현장관측 염분을 비교해 보았다(Fig. 7).

2000년 6월의 POC anomaly는 장강 하구 역에서 음의 값을 보이고, 쿠로시오 영향을 받는 지역에서는 뚜렷한 변화가 보이지 않는다(Fig. 7a). 7월의 경우 대부분의 연구지역은 평균 이하의 값을 나타내고(Fig. 7b), 8월에 접어들면서 연구지역의 서쪽 부분에서 평균 이상을 값을 보이지만 대부분 평균 이하를 나타낸다(Fig. 7c). 2000년 6월의 염분은(Fig. 7j) 제주도 동쪽 및 남해안 연안에는 높은 값을 보이고, 연구지역의 남서쪽 부근에서 낮은 값을 보인다. 8월의 염분에서는 제주도 남서쪽 해역에서 장강 희석수가 발견되었지만 제주도 동쪽 해역 및 남해안까지는 상대적으로 약한 영향을 보인다(Fig. 7k).

2003년 6월의 POC anomaly는 장강 하구에서 평균 이상을 보이고 나머지 지역에서는 평균 또는 그 이하의 값을 가진다(Fig. 7d). 7월과 8월의 POC anomaly는 32°N 이하에서 평균보다 높은 값을 나타내고, 연구지역 동쪽에서의 변화는 상대적으로 작았다(Figs. 7e and 7f). 2003년 6월의 염분은 2000년 6월 보다 증가되어 나타난다(Fig. 7l). 2003년 7월의 나가사키 대학의 현장 관측에서 장강 희석수가 쿠로시오 해류의 영향을 받는 지역까지 발달 되어 있는 것을 관측하였고, POC anomaly와 비슷한 분포를 가진다(Figs. 7e and 7m). Yuan and Qiao(2005)는 2002년 7월에 중국의 남동쪽 해안에서 대륙사면을 가로지르는 몇 개의 저염수 확장을 보고 하였다. 이는 본 연구결과에서 보여지듯 북쪽보다는 남쪽으로 확장된 분포를 잘 설명하고 있다(Fig. 7e). 8월에 장강 희석수는 제주도 서쪽까지 발달되었고, 한국 남해안 연안으로의 유입은 2000년보다는 상대적

으로 증가되었다(Fig. 7n).

2006년 6월은 평균보다 높은 지역이 연구지역 서쪽에 이미 발달되어 있고, 나머지 지역은 평균 또는 그 보다 낮은 값을 보여준다(Fig. 7g). 7월로 접어들면서 평균보다 높은 값을 가지는 POC 분포는 연구지역 서쪽에서 유입되어 제주도 북쪽까지 이어지고, 제주도 남쪽에서 남해안 연안까지 증가되었다(Fig. 7h). 8월은 평균보다 높은 값을 가지는 POC 분포는 여전히 황해 남부 및 제주도 북쪽까지 이어져 있다(Fig. 7i). 2006년 6월 장강 희석수는 2000년 및 2003년보다 이른 시기에 제주도 서쪽까지 발달되어 있다(Fig. 7o). 7월에 장강 희석수는 제주도 서쪽 해역까지 확장되었고(Fig. 7p), 8월에 장강 희석수는 제주도 서쪽에서 이어져 대마도까지 확장된 것을 보여주며 지금까지 조사된 염분 분포 중에서 가장 낮은 값을 보였다(Fig. 7q, 장 외, 2007).

Moon *et al.*(2010)의 모델 결과는 장강 및 주변해역에서 기원한 것으로 추정된 여름철 해파리의 이동 경로를 추적하는 연구에서 많은 부분이 제주도를 통하여 남해안 및 동해로 이동하는 경로를 보여주었고, 이는 2006년 결과와 유사하였다. Kim *et al.*(2009b)이 위성으로 추정된 클로로필-a를 이용하여 장강 희석수의 영향권을 분석한 결과와도 공간적인 유사함을 보여준다. 표층의 장강 희석수는 바람 및 조류에 의한 복합적인 영향을 받고 있는 것으로(Oh and Park, 2004), 본 연구에서는 바람의 영향을 살펴보기 위해서 연구지역 전체에서 관측된 자료를 월별 평균하였다(Fig. 8). 2000년 6월 및 7월 평균 바람의 방향은 남남동풍이 우세하며, 이런 경향은 세기 및 방향은 조금씩 변화는 있지만 대체적으로 7월까지 유지된다(Figs. 8a and 8b). 8월에 접어들면서 바람의 방향은 남동풍으로 전환되었다(Fig. 8c). 2003년은 2000년의 경우와 달리 6월과 7월에는 남남서풍이 우세하다가, 8월에 동풍과 남남동풍으로 변화되었다(Figs. 8d-8f). 2006년 6월은 남남서풍이 우세하게 불고, 7월에 접어들면서 남풍으로, 8월에 동풍으로 변화되면서 다른 해에 비하여 차이를 보였다(Figs. 8g-8i).

바람의 영향을 염분 및 POC anomaly의 분포와 연결시켜보면(Figs 7 and 8), 2000년 7월과 8월의 경우 남남동풍의 바람은 장강 희석수를 동쪽으로 이동을 시키고, 8월의 남동풍은 저염수를 북동쪽으로 이동된 것으로 사료된다. 2003년 7월은 남남서풍이 우세하면서

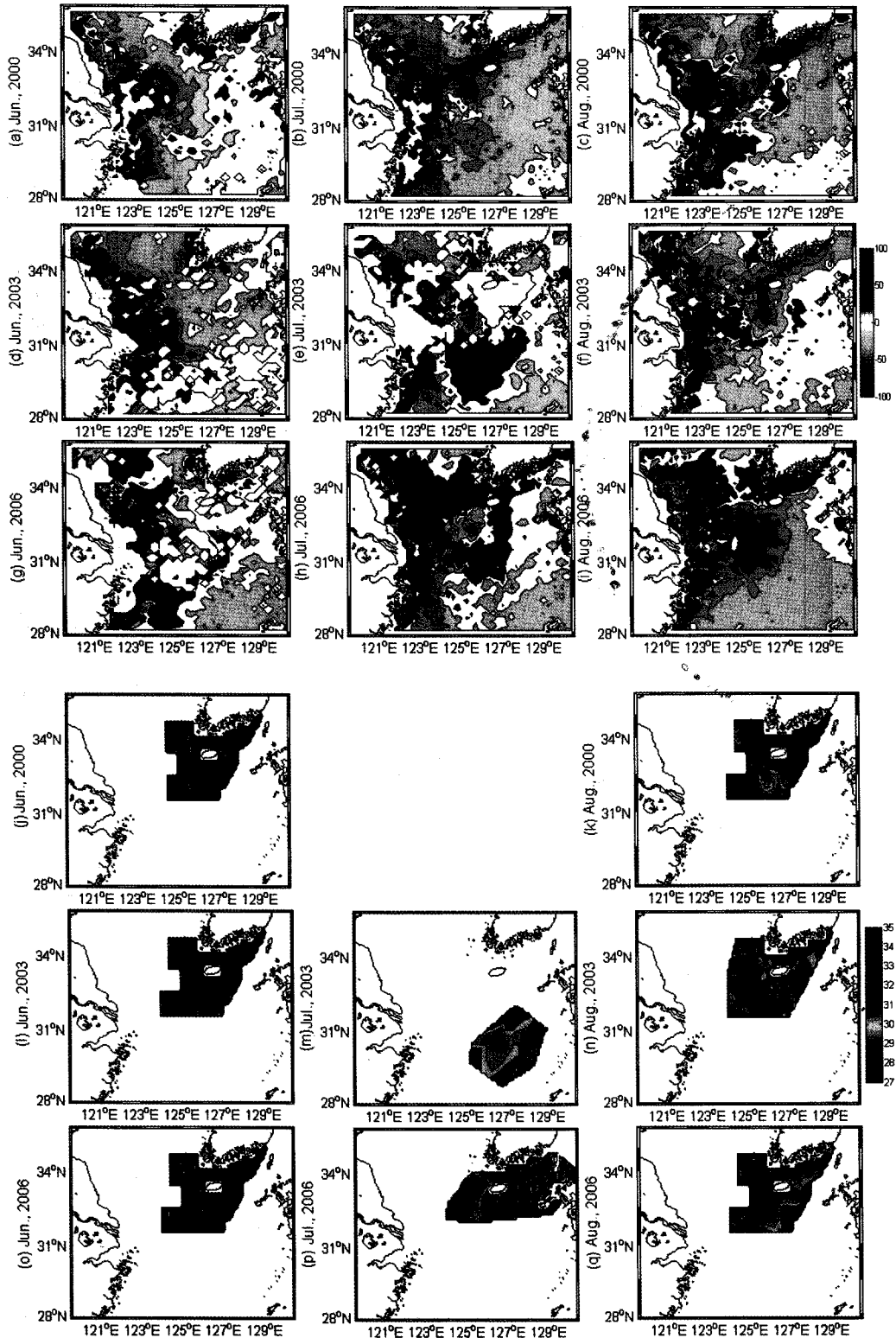


Fig. 7. Surface particulate organic carbon anomaly for (a)-(c) 2000, (d)-(f) 2003, and (g)-(i) 2006. The spatial distribution of *in-situ* surface salinity averaged over each KODC, KORDI, and Nagasaki University cruises for (j)-(k) 2000, (l)-(n) 2003, and (o)-(q) 2006.

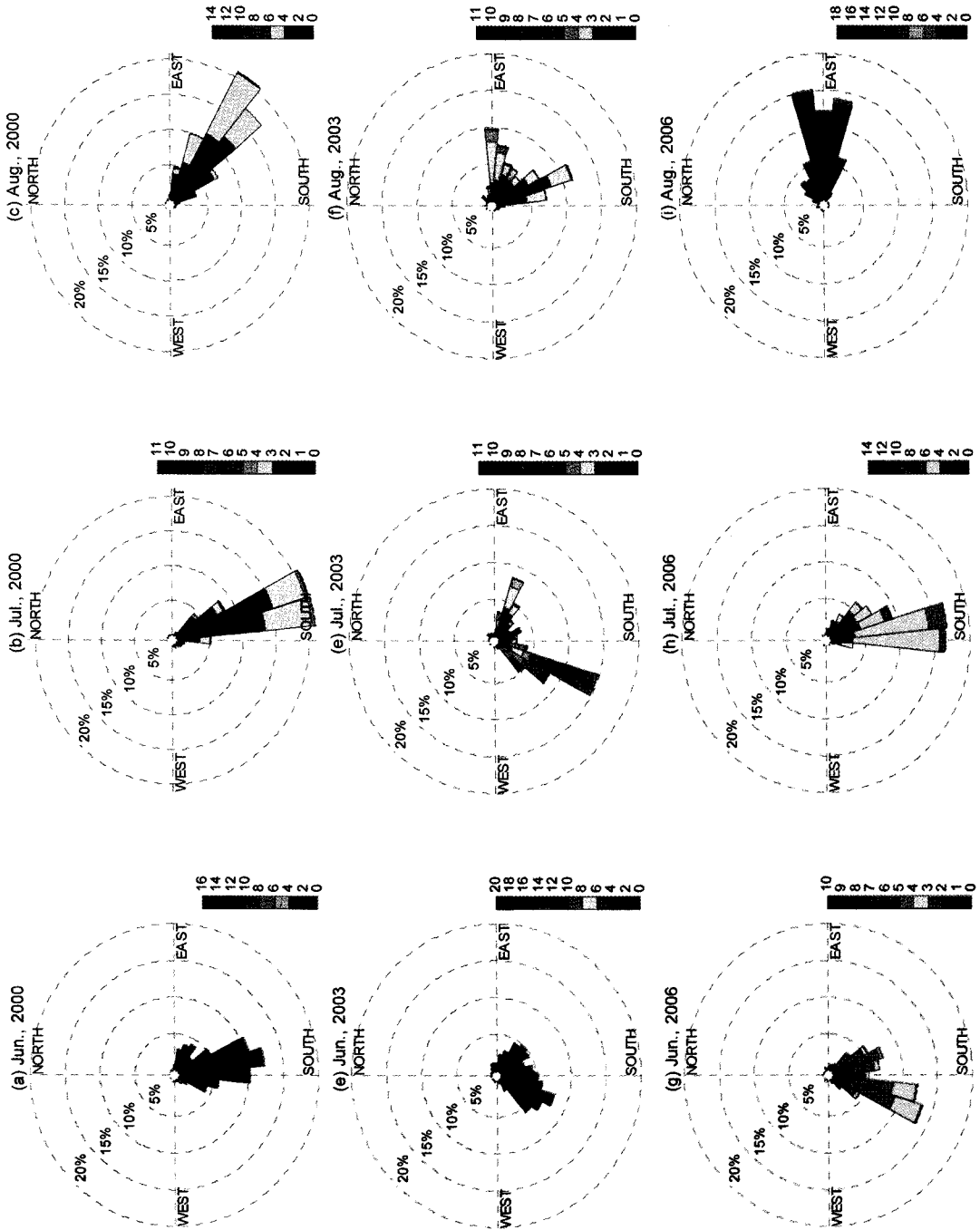


Fig. 8. Wind speed, direction and percent frequency for summer season (Jun.-Aug.) on (a)-(c) 2000, (d)-(f) 2003, and (g)-(i) 2006.

장강 희석수가 동쪽으로 이동보다는 남동쪽으로 이동이 우세한 것으로 보이며, 이는 POC anomaly 및 염분 관측 결과(Figs. 7e and 7m)와 유사한 경향을 보인다. 2003년 8월은 동풍과 남남동풍이 우세하여 저염수를 동쪽 및 북쪽으로 이동시킨 것으로 판단된다. 2006년 6월과 7월은 우세한 남남서풍 및 남풍으로 장강 희석수를 동쪽으로 이동시키고, 8월이 되면서 동풍으로 전환되면서 저염수는 북쪽으로 이동되면서 제주도 및 남해안 연안에 많은 영향을 준 것으로 판단된다.

단순한 바람의 방향과 세기만으로 POC 및 장강 희석수의 공간적 분포를 설명하기에는 부족하며, 조류 및 바람에 의한 복합적 영향을 고려해야 될 것으로 판단된다. 그러나 선행된 연구 결과를 보면 여름 동안 장강 희석수의 남-남동쪽 확산은 조류에 의한 수직적 혼합에 영향을 받았고, 동쪽 확산은 남풍의 영향을 받는 것으로 나타났다(Oh and Park, 2004). 그러나 본 연구에서 나타난 2006년은 방류량이 최저를 보이는 시기에도 POC의 변화 및 이와 관계를 가지는 저염수 확장이 강하게 제주도 및 남해안 연안에 영향을 주고 있으며, 2000년과 2003년과는 다른 공간적 분포를 나타내고 있으며, 이런 요인에 대해서는 자세한 후속 연구가 필요 할 것으로 사료된다.

4. 결론

장강에서 유출된 담수의 영향을 받는 동중국해 및 남해안에서 위성에서 추정된 POC를 이용하여 계절 및 장기적인 변화를 살펴보고, 장강 방류량이 최대이고 동중국해, 제주도 주변 해역 및 한국 남해안에 영향을 미치는 시기인 하계에 POC 변화를 현장 자료와 비교 분석을 하였다. POC 농도는 봄철에 증가하고 여름에 감소하는 계절적 변화를 보였다. POC의 장기 변화는 전체 지역 및 세계 지역으로 구분하여 분석한 결과 및 여름철 자료만을 이용하여 분석한 결과에서, 1998년과 1999년에는 증가된 장강 방류량의 영향으로 상대적으로 증가되고, 2003년까지 점차적으로 감소하다가 2003년 이후에는 다시 증가하였다. 이는 2003년 산사댐의 일차 물막이 공사가 마무리 되면서 장강으로부터 담수 유입이 감소되어 동중국해 및 주변 해역의 영양염 감소로 이

어지면서 생산성이 현저하게 줄어든 것으로 보고한 Gong *et al.*(2006)의 연구와는 다른 결과를 보여주었다. 본 연구에서도 POC 농도는 2003년과 2004년에 감소하였지만, 이는 1998년 및 1999년에 증가된 장강 방류량의 영향으로 2003년과 2004년이 상대적으로 감소된 농도 변화로 사료된다.

본 연구에서는 1998년 및 1999년 증가된 방류량 및 POC의 영향을 줄이기 위해 2000년부터 2007년까지의 여름철 자료에 대하여 EOF 분석, POC anomaly, 현장 관측을 통한 염분 및 위성 바람의 자료를 비교/분석 하였다. 2000년부터 2007년까지의 POC의 분포는 장강 방류량의 변화에 의한 영향을 받았지만, 장강 방류량 감소에 의한 영향과는 다른 시/공간적 분포를 보였다. 2003년 이전에는 제주도 남쪽 해역에서 영향이 강하게 나타났으나, 2003년 이후에는 제주도 주변해역을 포함하여 한국 남해안으로 영향이 강하게 나타나고 있었다. 이는 현장관측 염분에서 확인되었고, 바람의 시/공간적 변화에 의해서 영향을 받은 것으로 추정된다. 그러나 이러한 공간적 분포에 대해서는 더욱 면밀한 연구가 필요 하지만, 본 연구의 결과만으로 살펴 본 바로는 일차적으로는 방류량의 변화에 영향을 받고 있지만, 이차적으로는 산사댐 건설로 인한 감소된 장강 방류량의 영향은 POC 분포와는 공간적으로 다른 경향을 보이고 있으며, 제주도 주변 해역 및 한국 남해안 연안에 과거보다 증가된 영향을 미치고 있는 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 국토해양부(MLTM)의 기후변화와 산사댐 건설에 따른 동중국해 해양환경 영향 연구(PM55580), 기후변화가 남해권역 해양생태계에 미치는 영향 및 기능 평가 기술개발 (PM55980) 및 정지궤도 해양위성 활용연구지원 사업 (PM55660)으로 수행하였습니다. 연구에 도움을 주신 많은 연구원 및 한국해양연구원의 R/V 이어도호 및 나가사키 대학의 T/V 나가사키마루호 승조원 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- 김동선, 김경희, 심정희, 유신재, 2007. 동중국해 북부해역에서 여름동안 영양염, 염류소, 부유물질의 분포 특성 및 연간 변화, *Ocean Polar Research*, 29(3): 193-204.
- 손영백, W.D. Gardner, 2010. 현장관측 및 원격탐사 자료를 이용한 북동 멕시코 만에서 El Niño와 La Niña 기간 동안 표층 입자성 유기탄소의 시/공간적 변화 연구, "The Sea" *Journal of the Korean Society of Oceanography*, 15(2): 51-61.
- 장성태, 이재학, 홍창수, 2007. 하계 동중국해 북부 해역에서의 해수 혼합, "The Sea" *Journal of the Korean Society of Oceanography*, 12(4): 390-399.
- 한국해양연구원, 2006. 산사댐 건설로 인한 남해(동중국해)의 해양환경 영향연구. 한국해양연구원, BSPM40900-1849-7 (1단계 최종보고서), 547 p.
- Beardsley, R., R. Limeburner, H. Yu, and G.A. Cannon, 1985. Discharge of the Changjiang (Yangtze River) into the East China Sea, *Continental Shelf Research*, 4: 57-76.
- Bell, G. D., M. S. Halpert, V. E. Kousky, M. E. Gelman, C. F. Ropelewski, A. V. Douglas, and R. C. Schnell, 1999. Climate assessment for 1998, *Bulletin America Meteorology Society*, 80: 1040.
- Chai, C., Z. Yu, X. Song, and X. Cao, 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.-T.A., 2000. The Three Gorges Dam: reducing the upwelling and thus productivity in the East China Sea, *Geophysical Research Letter*, 27(3): 381-383.
- Chen, X., X. Wang, and J. Guo, 2006. Seasonal variability of the sea surface salinity in the East China Sea during 1990-2002, *Journal of Geophysical Research*, 111: doi:10.1029/2005JC003078.
- Chen Y.-L., H.-Y. Chen, W.-H. Lee, C.-C. Hung, G. T. F. Wong, and J. Kanda, 2001. New production in the East China Sea, comparison between well-mixed winter and stratified summer conditions, *Continental Shelf Research*, 21: 751-764.
- Dai, Z., J. Du, J. Li, W. Li, and J. Chen, 2008. Runoff characteristics of the Changjiang River during 2006: Effect of extreme drought and the impounding of the Three Gorges Dam, *Geophysical Research Letter*, 35: doi:10.1029/2008GL033456.
- Delcroix, T. and R. Murtugudde, 2002. Sea surface salinity changes in the East China Sea during 1997-2002: Influence of the Yangtze River, *Journal of Geophysical Research*, 107(C12): doi:10.1029/2001JC000893.
- Gong, G.-C., J. Chang, K. P. Chiang, T. M. Hsiung, C. C. Hung, S. W. Duan, and L. A. Codispoti, 2006. Reduction of primary production and changing of nutrient ratio in the East China Sea: effect of the three Gorges dam?, *Geophysical Research Letter*, 33: doi:10.1029/2006GL025800.
- Gong, G.-C., C.-C. Hung, and J. Chang, 2007. Reply to comment by Jinchun Yuan *et al.* on ". Reduction of primary production and changing of nutrient ratio in the East China Sea: effect of the three Gorges dam?," *Geophysical Research Letter*, 34: doi:10.1029/2007GL029633.
- Guan, B., 1994. Patterns and structures of the currents in Bohai, Huanghai, and East China Sea. In: *Oceanology of China Seas*. Vol. 1. edited by D. Zhou, Y. B. Liang and C. K. Zeng, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, pp. 17-26.
- Hu, D., 1994. Some striking features of circulation in

- Huanghai Sea and East China Sea. In: Oceanology of China Seas. Vol. 1. edited by D. Zhou, Y. B. Liang and C. K. Zeng, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, pp. 27-38.
- Isobe, A. and T. Matsuno, 2008. Long-distance nutrient-transport process in the Changjiang river plume on the East China Sea shelf in summer, *Journal of Geophysical Research*, 113: doi:10.1029/2007JC004248.
- Jiao, N., Y. Zhang, Y. Zeng, W. D. Gardner, A. Mishonov, M. J. Richardson, N. Hong, D. Pan, X. H. Yan, Y. H. Jo, C. T. A. Chen, P. Wang, Y. Chen, H. Hong, Y. Bai, X. Chen, B. Huang, H. Deng, Y. Shi, and D. Yang, 2007. Ecological anomalies in the East China Sea: Impacts of the Three Gorges Dam?, *Water Research*, 41: 1287-1293.
- Kim, D. S., J. H. Shim, and S. J. Yoo, 2006. Seasonal variations in nutrients and chlorophyll-a concentrations in the Northern East China Sea, *Ocean Science Journal*, 41(3): 125-137.
- Kim, D. S., S. H. Choi, K. H. Kim, J. H. Shim, S. J. Yoo, and C. H. Kim, 2009a. Spatial and temporal variations in nutrient and chlorophyll-a concentrations in the northern East China Sea surrounding Cheju Island, *Continental Shelf Research*, 29: 1426-1436.
- Kim, H.-C., H. Yamaguchi, S. J. Yoo, J. Zhu, K. Okamura, Y. Kiyomoto, K. Tanaka, S.-W. Kim, T. W. Park, I. S. Oh, and J. Ishizaka, 2009b. Distribution of Changjiang diluted water detected by satellite chlorophyll-a and its interannual variation during 1998-2007, *Journal of Oceanography*, 65: 129-135.
- Kiyomoto, Y., K. Iseki, and K. Okamura, 2001. Ocean color satellite imagery and shipboard measurements of chlorophyll a and suspended particulate matter distribution in the East China Sea, *Journal of Oceanography*, 57: 37-45.
- Lau, K. M. and H. T. Wu, 1999. Assessment of the impacts of the 1997-1998 El Niño on the Asian-Australia monsoon, *Geophysical Research Letter*, 26: 1747-1750.
- Lie, H. J., C. H. Cho, J. H. Lee, and S. Lee, 2003. Structure and eastward extension of the Changjiang River plume in the East China Sea, *Journal of Geophysical Research*, 108: doi:10.1029/2001JC001194.
- Lu, X., F. Qiao, C. Xia, J. Zhu, and Y. Yuan, 2006. Upwelling off Yangtze River estuary in summer, *Journal of Geophysical Research*, 111: doi:10.1029/2005JC003250.
- McClain, C. R., G. C. Feldman, and S. B. Hooker, 2004. An overview of the SeaWiFS project and strategies for producing a climate research quality global ocean bio-optical time series, *Deep-Sea Research II*, 51: 5-42.
- Moon, J.-H., I.-C. Pang, J.-Y. Yang, and W. D. Yoon, 2010. Behavior of the giant jellyfish *Nemopilema nomurai* in the East China Sea and East/Japan Sea during the summer of 2005: A numerical model approach using a particle-tracking experiment, *Journal of Marine System*, 80: 101-114.
- Oh, I. S. and T. W. Park, 2004. A numerical study on the dispersion of the Yangtze River water in the Yellow and East China Sea, *The Journal of Korean Society of Oceanography*, 39(2): 119-135.
- Son, Y. B., 2006. POC algorithms based on spectral remote sensing data and its temporal and spatial variability in the Gulf of Mexico, Ph.D. thesis, 200 pp., Texas A&M University.
- Son, Y. B., W. D. Gardner, A. V. Mishonov, and M. J. Richardson, 2009. Multispectral remote-sensing algorithms for particulate organic carbon (POC): The Gulf of Mexico, *Remote Sensing of Environment*, 113: 50-61.
- Wentz, F. J., 1997. A well-calibrated ocean

- algorithms for SSM/I, *Journal of Geophysical Research*, 102(C4): 8703-8718.
- Yamaguchi, H., H. C. Kim, Y. B. Son, S. W. Kim, K. Okamura, Y. Kiyomoto, and J. Ishizaka, Seasonal and interannual variation of the SeaWiFS chlorophyll a in the East China Sea, *Progressive Oceanography*, submitted.
- Yan, X.-H., Y.-H. Jo, L. Jiang, Z. Wan, W. T. Liu, Y. Li, J. Zhan, and T. Du, 2008. Impact of the Three Gorges Dam water storage on the Yangtze River outflow into the East China Sea, *Geophysical Research Letter*, 35: doi: 10.1029/2007GL032908.
- Yuan, D. and F. Qiao, 2005. Cross-shelf penetrating fronts off the southeast coast of China observed by MODIS, *Geophysical Research Letter*, 32: doi:10.1029/2005GL023815.
- Yuan, D., J. Zhu, C. Li, and D. Hu, 2008. Cross-shelf circulation in the Yellow and East China Seas indicated by MODIS satellite observations, *Journal of Marine System*, 70: 134-149.
- Yuan, J., L. Hayden, and M. Dagg, 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.*, *Geophysical Research Letter*, 34: doi:10.1029/2006GL029036.
- Zhou, M.-J., Z.-L. Shen, and R.-C. Yu, 2008. Response of a coastal phytoplankton community to increased nutrient input from the Changjiang (Yangtze) River, *Continental Shelf Research*, 28: 1483-1489.