

## 방조제 건설에 따른 새만금 표층 유기탄소 분포 특성

박준건<sup>1,†</sup> · 김은수<sup>1</sup> · 김경태<sup>1</sup> · 조성록<sup>1</sup> · 송태윤<sup>2</sup> · 유정규<sup>2</sup> · 김성수<sup>3</sup> · 박용철<sup>4</sup>

<sup>1</sup>한국해양연구원 해양환경방제연구본부

<sup>2</sup>(주)에코션

<sup>3</sup>국립수산과학원 환경관리과

<sup>4</sup>인하대학교 해양과학과

## Characteristics in Organic Carbon Distribution in the Seamangeum Area During the Construction of Artificial Sea Dike, Korea

Jun Kun Park<sup>1,†</sup>, Eun Soo Kim<sup>1</sup>, Kyung Tae Kim<sup>1</sup>, Sung Rok Cho<sup>1</sup>, Tae Yoon Song<sup>2</sup>, Jeong Kyu Yoo<sup>2</sup>,  
Seong Soo Kim<sup>3</sup> and Yong Chul Park<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Marine Environment & Pollution Prevention Research Department, KORDI, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

<sup>2</sup>Ecocean Co., Ltd. Industrial Technology R&D Center, Incheon 406-840, Korea

<sup>3</sup>Environment Management Division, NFRDI, Busan 619-902, Korea

<sup>4</sup>Department of Oceanography, Inha University, Incheon 402-751, Korea

### 요 약

2003년부터 2006년 사이의 새만금 방조제 내측 표층 해역에서 입자성 부유물질(suspended particulate matter), 입자성 유기탄소(particulate organic carbon) 그리고 용존 유기탄소(dissolved organic carbon)의 분포 변화를 조사하였다. 하천을 통해 새만금 방조제 내측으로 유입되는 입자성 물질과 유기탄소는 대부분 풍수기인 여름철에 집중되었고, 이는 2006년 4월 최종 물막이 공사 완료 후 폐쇄 환경이 된 새만금 내측 해역에 많은 양의 유기물 부하가 단기간에 집중될 수 있음을 시사하였다. 한편, 2003년 이후 제4호 방조제 완공으로 막혀진 만경강 하구역에서 새만금 방조제에 이르는 해역에서 입자성 물질과 유기탄소의 표층 농도가 증가하는 것이 관찰되었다. 특히 부영양화(eutrophication)로 인한 식물 플랑크톤의 증가로 입자성유기탄소를 비롯, 생물기원의 유기탄소가 증가하였다. 이러한 표층의 과도한 입자성 유기탄소의 증가는 향후 저층 퇴적 환경으로 침전되었을 경우 용존 산소 고갈에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다.

**Abstract** – In order to understand the impacts of the construction of artificial sea dikes on carbon cycle in Saemangeum area being a closed environment after April, 2006, we had measured suspended particulate matters, particulate and dissolved organic carbon in the surface water of inner Saemangeum dike from 2003 to 2006. The significant inputs of suspended particulate matter and organic carbon were mainly occurred during the wet season which suggests that most organic matter loading is concentrated within a short period of time inside the dike. The concentrations of particulate matter and organic carbon have gradually increasing every year inside of dike from the Mangyeong river estuary to Saemangeum dike, which has been closed since 2003 after the construction of the 4th dike. The particulate organic carbon increased due to the phytoplankton blooms by eutrophication. If the large portion of particulate organic matter produced in the surface water sink to the bottom sediment, this will cause the anoxic condition in this closed environment.

**Keywords:** Saemangeum Dike(새만금 방조제), Dissolved organic carbon(용존유기탄소), Particulate organic carbon(입자성유기탄소), Eutrophication(부영양화)

<sup>†</sup>Corresponding author: pj3416@naver.com

## 1. 서 론

서해 중부에 위치한 새만금 연안 해역은 서쪽으로 수심이 완만하게 깊어지고 대조차가 6.5 m에 달하며(이 등[2003]; 김 등[2008]), 금강, 만경강, 동진강으로 부터 담수의 유입이 이루어지고 있다. 특히 이곳은 비응도와 고군산군도 그리고 변산반도를 잇는 새만금 방조제 공사가 진행되는 곳이어서 해안선 및 해저지형이 변화됨에 따라 복잡한 수리 역학적 과정이 진행되고 있다(이 등[2003]; 이 등[2006]). 총 길이 33 km의 새만금 방조제는 1992년 공사가 시작되어 2003년 6월에는 고군산군도와 비응도를 연결하는 새만금 제 4호 방조제가 완공되어 고군산군도 북측 해역과 새만금 방조제 내측 하구역 사이의 해수 유출이 단절되었으며, 2006년 4월에는 최종 물막이 공사가 완료되었다. 방조제 건설로 인해 외해수와 새만금 연안 해역은 그 유통이 차단됨에 따라 가장 먼저 해수순환에 변화가 생겼다. 새만금 방조제 건설 당시 이미 새만금 주변 해역의 조류 변화를 예상한 연구가 있었으며(최와 강[1990]), 이 등[2003]은 방조제 건설로 인하여 금강, 만경강, 동진강으로부터 연안 해역에 유입되는 담수의 유출 경로가 바뀌게 되어 주변 해역의 염분 구조 및 조류 방향에 많은 변화를 초래하게 된다고 보고하였다. 또한 물막이 공사로 인해 담수 유출이 제한됨에 따라 여름철에 방조제 내측에서 염분 차에 의한 성층이 관찰되기도 하였다(김 등[2006]). 이렇듯 새만금 방조제 공사가 진행되는 곳은 만경강과 동진강이 유입되는 하구가 위치한 지역이다. 하구역은 육상으로부터 하천을 통하여 유입된 물질이 해양으로 전달되는 경로에 위치해 있으며, 담수와 해수의 영향을 동시에 받는 매우 복잡한 환경을 지니고 있다(Michaelis *et al.*[1986]). 또한 육상으로부터 풍부한 유기물을 공급받아 높은 일차생산력을 나타내고, 부유입자와 용존 화학종간의 흡착·탈착 작용으로 높은 침전율을 보인다(Nixson and Pilson[1984]; Stumm and Morgan[1996]). 이러한 이유로 하구역은 육상기원 유기물 물질의 제거역할을 하는 매우 중요한 지역으로 많이 연구되어오고 있다(Nienhuis[1981]; Schubel and Kennedy[1984]; Michaelis *et al.*[1986]; Wollast[1991]; 양 등[1999]; Zhang[1999]).

새만금 연안 해역은 하천을 통한 담수의 유입과 조류의 유입으로 염분의 변화가 크며, 특히 새만금 방조제 건설이라는 인위적인 요인이 첨가되어 환경의 변화가 매우 빠른 지역이다. 현재까지 만경강 하구를 비롯한 새만금 지역에 대한 연구로는 새만금 갯벌에 관한 연구가 주종을 이루고 있었으며(김과 유[2001]; 조 등[2001]; 황 등[2002]; 김 등[2003]; 유 등[2003]), 그 외 부유생물의 시공간분포(유 등[2002]; 정 등[2002]), 해수 순환 및 조석 변화(최와 강[1990]; 이 등[2003]) 등이 있었다. 그 외에 생태계 모델에 관한 연구(김과 김[2002]) 및 강우에 따른 물질 유입(유 등[2000])에 대한 연구 등이 이루어졌다. 그러나 생태 및 수질 환경에 많은 영향을 미치는 유기물에 관한 연구는 많이 부족하였다. 유기물 중 가장 대표적인 유기탄소는 미생물의 먹이원이자 탄소 순환의 저장고로서의 중요한 위치에 있다(Chen and Bada[1992]; Hedges[2002]). 해양에서

의 유기탄소의 공급은 크게 육상 또는 대기 등과 같은 외부 기원과 해양생물에 의한 자생 기원으로 나눌 수 있으며(Michaelis *et al.*[1986]; Wu *et al.*[2004]), 특히 하구역에서의 유기탄소는 주로 하천을 통한 육상기원이 대부분을 차지한다고 알려져 있다(Cadee [1984]; Zhang *et al.*[1998]; Klinkhammer *et al.*[2000]; Murrell and Hollibaugh[2000]; Cauwet[2002]). 하천을 통한 유기탄소의 공급은 해양 전체 유기 탄소원의 중요한 부분을 차지하고 있지만, 하구역이라는 복잡한 환경 때문에 유기 탄소의 거동 기작에 관한 연구는 최근까지도 명확히 밝혀지지 않고 있다(Warnken and Santschi[2004]). 본 연구를 통해 이루어진 새만금 연안 해역의 유기탄소 분포에 대한 연구는 육상과 해양의 중간 통로인 하구 및 연안역의 유기탄소 분포 특성에 관해 중요한 정보를 줄 것으로 판단된다. 또한, 2004년 이후 만경강 하구역이 외해와 차단됨으로서 발생하는 유기탄소의 분포 및 거동 변화는 인위적 요인에 의한 환경 변화의 사례로서 중요한 연구 자료가 될 것으로 판단되며, 아울러 이러한 변화 요인을 규명하여 향후 수질 변화 양상을 제시해 보고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

시료는 2003년 5월에서 2006년 7월까지 저조기에 맞추어 표층 시료를 채취하였으며, 하천을 포함한 조사 정점은 Fig. 1과 같다. 현장 조사 자료는 계절에 따른 하천 유입 유량의 차이에 따라 5월을 갈수기로 7, 8월을 풍수기로 나누어 비교하였다.

입자성 부유물질(Suspended particulate matter; SPM)은 500 °C에서 5시간 회화시켜 무게를 측정된 GF/F filter paper(Whatman)로

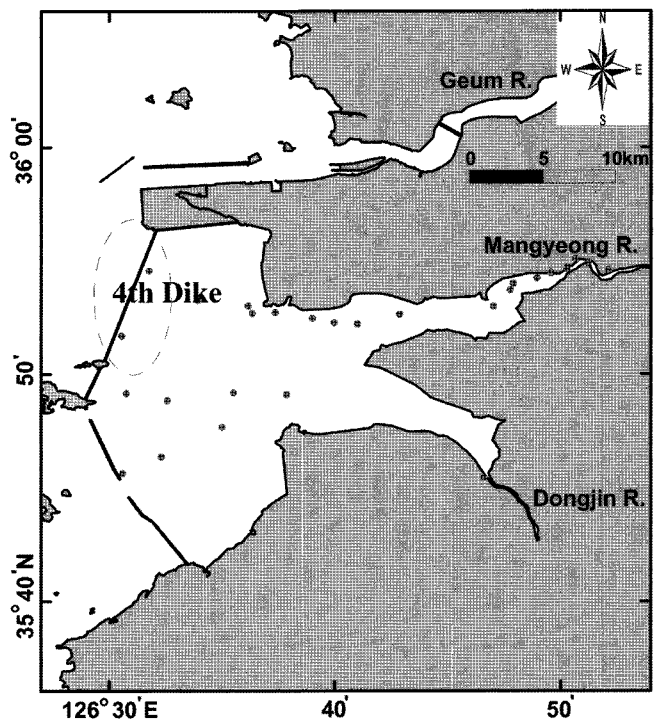


Fig. 1. Map showing sampling stations in the study area.

시료를 여과한 후 증류수 소량으로 탈염시킨 후 건조시켜 무게차로서 계산하였다. 입자성유기탄소(Particulate Organic Carbon; POC)는 입자성 부유물질 측정 후 여과지를 1 N 염산(HCl, Merck ultra pure)으로 처리하여 LECO-SC 444 Carbon and Sulfur Analyzer로 입자성유기탄소를 측정하였다. 용존유기탄소(Dissolved Organic Carbon; DOC)는 입자성 부유물질 측정을 위해 여과한 여액을 Sugimura and Suzuki[1988] 방법에 따라 HTCO(high-temperature catalytic oxidation)/NDIR(non-dispersive infrared gas analysis)방법으로 TOC-5000A(SHIMADZU)로 측정하였으며, Milli-Q reagent water를 자외선 산화법으로 처리한 후 분석용 blank로 사용하였다. 본 연구 결과에서의 총유기탄소(Total Organic Carbon, TOC)는 입자성유기탄소(POC)와 용존유기탄소(DOC)를 더한 값으로 사용하였다. 용존 유기화합물의 형광 특성을 알아보기 위한 실험으로 시료의 고유 형광 강도 측정을 spectrofluorophotometer (Shimadzu, RF-5310PC)를 이용하여 측정하였다. 분석 시 용존 유기화합물의 형광 특성에 따라 생물기원유기물질(Biogenic O.M.)과 육상기원유기물질(Terrigenous O.M.)로 구분하여 각각의 파장 Ex 280 nm/Em330 nm, Ex 330 nm/Em430 nm에서 형광강도를 측정하였다. 표준 형광 강도 계산은 생거대유기물질의 경우 Ex 280 nm/Em330 nm에서 tryptophan(Sigma T-0254) 1 ppb 형광강도를 1 TU로 계산하였으며, 지구거대유기물질은 Ex 330 nm/Em430 nm에서 0.01 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, quinine sulfate(Fluka, 22640) 1 ppb 형광강도를 1 QSU로 계산하였다(박 등[1995]). 클로로필-*a*는 현장에서 GF/F filter paper(Whatman)로 시료를 여과하여 알루미늄 호일로 싸서 냉동 보관 후 실험실에서 UV-VIS Spectrophotometer(Shimadzu, UV2450)로 측정하였다(Parsons *et al.*[1984]).

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 하천을 통한 유기탄소의 유입

만경강과 동진강은 새만금 방조제 내측 연안 해역으로 유입되는 대표적인 하천이다(Fig. 1). 조사 기간 동안 만경동진강으로부터 새만금 방조제 내측으로 유입되는 하천 유량을 Table 1에 나타냈다(건설교통부[2003, 2004, 2005, 2006]). 일부 봄철을 제외하고는 만경강이 동진강보다 유입 유량이 2~6배 정도 많았으며 특히 풍수기인 여름철에 집중되었다(Table 1). 이는 우리나라의 계절적 특성으로서 풍수기동안 육상으로부터 하천을 통해 많은 양의 유, 무기물질들이 유입될 수 있음을 시사한다. 한편, 2003년부터 2006년까지의 기간 중 갈수기인 봄철과 풍수기인 여름철로 나누어 조사한 날의 만경강과 동진강 유입 유량에 하천 유입부(조사 정점에서 염분=0 인 지점(end-point))의 입자성부유물질(SPM)과 총유기탄소(TOC)의 농도로부터 유입량을 구하여 Table 2에 나타냈다. 2003년과 2006년에 입자성부유물질과 총유기탄소의 유입량이 다른 해 보다 많았으며, 2005년을 제외하고 하천 유량 변화와 유사하게 풍수기인 여름철에 많은 양이 집중되었다. 2005년의 경우 하천 유입 유량은 여름철이 높으나 입자성 부유물질의 유입량은 오

**Table 1.** River discharge for the Mangyeong and Dongjin River in this study(10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> day<sup>-1</sup>, Ministry of Construction & Transportation [2003, 2004, 2005, 2006])

	Date	Mangyeong	Dongjin
2003	5/29~31	5.59	4.33
	8/19~23	17.0	3.72
2004	5/4~5	6.92	1.16
	7/20	15.9	2.93
2005	5/9~11	0.95	1.22
	7/19~22	4.49	1.62
2006	5/11~12	0.62	0.78
	7/11~13	19.0	4.99

**Table 2.** The influx of SPM and TOC into the Seamangeum area (ton day<sup>-1</sup>)

		Mankyong River		Dongjin River	
		SPM	TOC	SPM	TOC
2003	May	1494.4	56.5	3077.5	60.02
	Aug.	4797.6	416.7	2218.9	101.3
2004	May	308.0	93.9	-*	-*
	July	1323.8	142.8	-*	-*
2005	May	1348.7	43.4	-*	-*
	July	1161.7	42.6	-*	-*
2006	May	17.88	5.40	51.3	5.72
	July	12374.7	258.4	2488.2	47.0

(\*: 하천 end-point 자료 부족)

히려 봄철이 높게 나타났다. 이는 염분이 0에 가까운 end-point 지점이 수심이 얇은 하천이기 때문에 유량이 적을 경우 수심이 더욱 낮아져 저층 퇴적물의 영향을 받았을 가능성이 있으며, 이로 인해 부유물질의 농도가 높게 측정되어 하천 유량과 일치하지 않은 것으로 보여진다. 총유기탄소 또한 end-point의 입자성 부유물질 중 입자성 유기탄소의 농도가 여름철 보다 봄철에 더 높게 측정되어 유입량이 높게 산출되었다.

#### 3.2 입자성부유물질(SPM)과 입자성유기탄소(POC)의 분포 및 거동

갈수기인 5월과 7, 8월의 풍수기를 비교하여 보면 2003년 갈수기의 입자성부유물질(SPM)의 방조제 내측 농도 분포는 약 4~711 mg L<sup>-1</sup>, 여름철 풍수기에는 약 3~596 mg L<sup>-1</sup>의 범위를 나타냈다(Fig. 2). 2004년 갈수기에는 방조제 내측에서 약 11~158 mg L<sup>-1</sup>, 풍수기에는 약 13~112 mg L<sup>-1</sup>의 범위를 나타냈다(Fig. 2). 2005년에는 방조제 내측에서 갈수기에 약 17~1419 mg L<sup>-1</sup>, 풍수기에는 약 13~768 mg L<sup>-1</sup>를 나타냈으며(Fig. 2), 2006년에는 갈수기에 약 3~66 mg L<sup>-1</sup>, 풍수기에는 약 5~651 mg L<sup>-1</sup>의 농도 범위를 나타냈다(Fig. 2). 2006년을 제외하고 입자성부유물질의 농도 범위가 갈수기가 풍수기보다 큰 것은 풍수기에는 집중적인 강우로 인해 단위 면적당 입자 농도가 희석되기 때문으로 판단된다. 입자성유기탄소(POC)의 경우도 갈수기와 풍수기로 나누어 방조제 내측 해역의 농도 분포를 살펴보면 2003년 갈수기에 약 0.3~12.0 mg L<sup>-1</sup>, 풍수

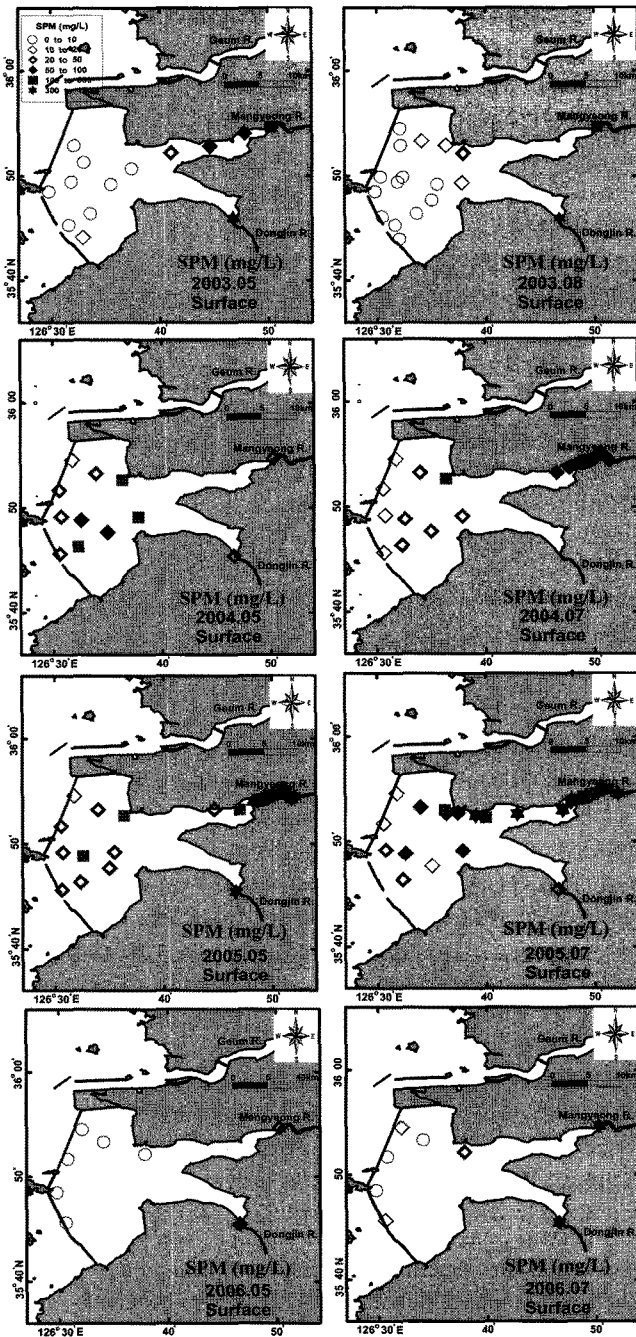


Fig. 2. Horizontal distribution of suspended particulate matter (SPM) in the surface water of the study area.

기에 약 0.1~21.2 mg L<sup>-1</sup>의 분포를 나타냈으며, 2004년 갈수기에 약 0.7~2.3 mg L<sup>-1</sup>, 풍수기에 약 0.9~2.8 mg L<sup>-1</sup>의 농도 분포를 나타냈다(Fig. 3). 2005년의 경우 갈수기에 약 0.8~38.0 mg L<sup>-1</sup>, 풍수기에 약 0.8~9.3 mg L<sup>-1</sup>의 농도분포를 나타냈으며(Fig. 3), 2006년의 경우 갈수기에 약 0.7~2.3 mg L<sup>-1</sup>, 풍수기에 약 1.2~9.8 mg L<sup>-1</sup>의 농도분포를 나타냈다(Fig. 3). 방조제 내측해역에서 입자성유기탄소의 농도는 하구역에서의 일반적인 농도범위(약 0.1~5 mg L<sup>-1</sup>, Artemyev[1996])와 유사하게 나타났으나(Fig. 3), 권 등[2002]이 연구한 섬진강 하구의 농도범위(약 0.2~1.0 mg L<sup>-1</sup>)보다는 다소

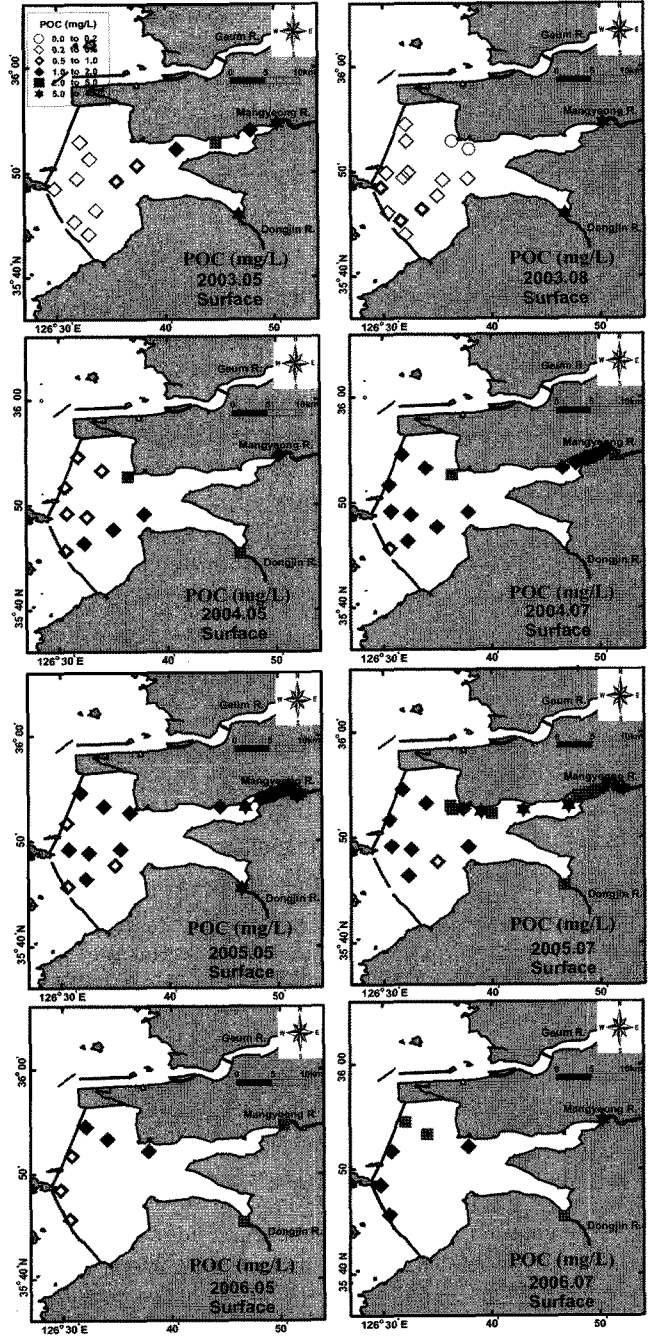


Fig. 3. Horizontal distribution of particulate organic carbon (POC) in the surface water of the study area.

높은 농도범위를 나타내고 있었다. 입자성부유물질과 입자성유기탄소의 표층에서 수평분포 변화를 살펴보면 2004년부터 만경강 하구에서 제4호 방조제에 이르는 내측 해역의 북측 구간(Fig. 1)에서 농도가 높아짐을 알 수 있다(Fig. 2, 3). 2003년 6월에 제4호 방조제가 완공이 되었으므로, 이 구간에서 외해와 체결 된 후 하천을 통해 육상에서 유입된 입자성 유무기물질들이 외해로 원활히 빠져나가지 못하고 있음을 나타낸다. 한편, 표층해역의 클로로필-*a*의 농도 또한 2004-2005년 크게 증가됨이 관찰되었고(Fig. 4), 입자성유기탄소와 유의한 상관관계를

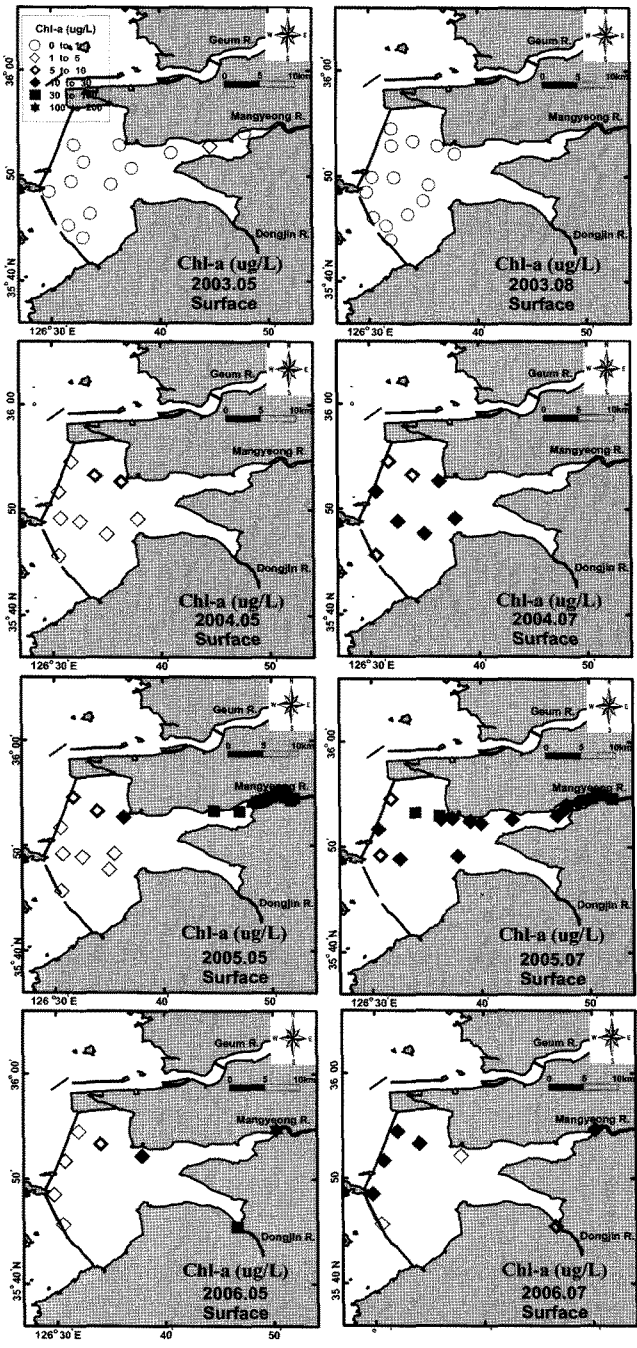


Fig. 4. Horizontal distribution of Chlorophyll a(Chl-a) in the surface water of the study area.

나타냈다(Fig. 5). 특히 2004년 이후 상당부분의 정점에서 여름철을 중심으로 Marchetti[1984]가 제시한 과영양 해역 기준  $10 \mu\text{g L}^{-1}$ 을 초과하는 범위를 나타내고 있었다(Fig. 4). 제4호 방조제 완공 이후 육상에서 공급되는 다량의 무기영양염류가 표층의 일차생산력을 증가시켜 높은 식물플랑크톤 현존량과 함께 유기물질의 양이 높아진 연구결과가 유 등[2006]에 의해 이미 보고된 바 있다. 따라서 입자성부유물질과 입자성유기탄소 농도 증가에는 하천을 통해 유입된 입자성 유기물질이 외해로 빠져나가지 못함과 동시에

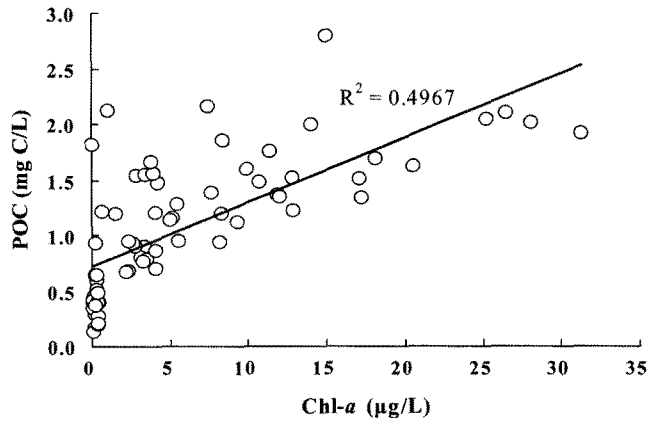


Fig. 5. Plots of Chl-a vs. POC in the surface water of the Sae-mangeum coastal area(2003~2006).

부영양화로 인해 표층수역에서 공급되는 생물기원의 유기물질이 많은 기여를 하는 것으로 나타났다. 그러나 2006년에는 2004년 이후 높아졌던 입자성부유물질의 농도가 다소 완화되는 양상을 보이고 있다(Fig. 2). 이 시기는 2006년 4월 새만금 방조제 물막이 공사가 완전히 완료된 이후의 시점으로 방조제 내부의 조류가 약해지며 표층의 부유물질이 저층으로 침강되어 나타난 현상으로 판단된다. 입자성유기탄소와 클로로필-a의 농도분포 또한 2004년과 2005년에 비해 2006년에 다소 낮아진 현상을 나타내지만, 여전히 방조제 북측 수역을 중심으로 높은 농도를 유지하고 있었다(Fig. 3, 4). 유기물질을 포함한 표층 부유물질의 저층으로의 침강은 유기물 분해에 따른 저층 용존산소 감소와 같은 영향을 미치게 된다. 저층 퇴적환경의 변화는 표층 수질변화보다 더 장기간 수질 환경에 영향을 미치게 되므로 이에 대한 연구와 고찰도 향후 지속적으로 필요하다고 판단된다.

연구기간 중 입자성부유물질 중 포함된 유기탄소의 함량(POC %)은 부유물질의 농도가 증가할수록 감소하는 모습을 나타냈다(Fig. 6). 이것은 하구에서 높은 부유물질 농도는 주로 조립한 입자 또는 퇴적물의 재부유에 의한 영향이 크게 작용하고, 낮은 부유물질의 농도에는 주로 생물학적인 생산물 또는 유기물의 영향이 크기 때문이다(Herman and Heip[1999]; Hedges and Keil[1999]; Warnken and Santschi[2004]). 특히 여름철 풍수기의 경우, 입자성 부유물질 중 유기탄소가 서로 다른 기원(source)인 것으로 보이는 두 그룹이 관찰되었다(Fig. 6). 이는 입자성유기물질이 육상으로부터 유입된 단일 기원이 아닌, 강한 하천 흐름에 의한 저층 퇴적물의 재부유 또는 생물생산 등 다른 기원이 있음을 시사한다. 여름철에 중국의 황하나 양쯔강 하구의 연구결과에서는 저염분 해역은 하천을 통한 육상 유입 기원의 입자성유기물이, 고염분 해역은 생물생산 기원의 입자성유기물이 입자성유기탄소의 기원으로 밝혀지기도 했다(Cautwet and Mackenzie[1993]). 본 연구해역의 경우 상대적으로 낮은 부유입자 농도를 나타내는 구간에는 높은 유기탄소 함량(POC %)을 나타냈고(Fig. 6의 A), 상대적으로 높은 부유입자 농도를 나타내는 구간에는 낮은 유기탄소 함량(POC %)을



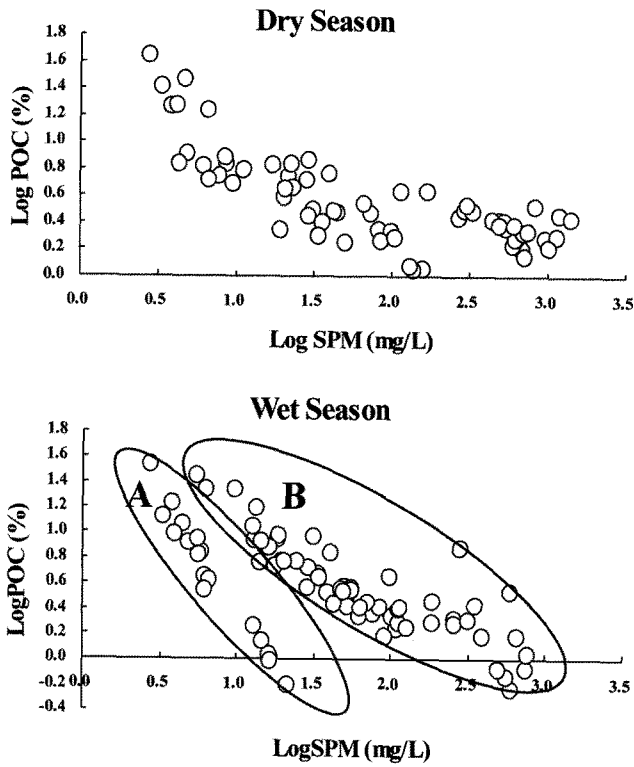


Fig. 6. Variation of log POC(%) vs. log SPM in the Saemangeum coastal area(2003-2006).

나타내었다(Fig. 6의 B). 조사 해역에서 낮은 부유입자 농도를 나타내는 구간은 방조제와 가까운 지역이며, 높은 부유입자 농도를 나타내는 구간은 하천이 유입되는 지역이다(Fig. 2). 따라서 연구 해역의 입자성 물질상대적으로 낮은 유기물 함량의 육상기원의 조립한 부유물질이 하천을 통해 유입되는 한편, 생물 활동에 의한 높은 유기물 함량의 세립한 부유물질이 방조제 부근 및 내측 표층 해역에 공급됨을 알 수 있다. 특히 폐쇄 환경에서 육상으로부터 공급되는 영양염류의 의한 생물 생산력 증가는 생물기원의 유기물 공급량을 증가시켜 향후 수질변화에 큰 영향을 미칠 요인으로 작용할 것으로 보인다.

3.3 용존유기탄소(DOC)의 분포 및 용존 유기화합물 거동 특성

하천을 제외한 새만금 방조제 내측 표층 해역의 용존유기탄소(DOC)를 갈수기와 풍수기로 나누어 살펴보면 2003년 갈수기에 약 1.3~10.1 mg L<sup>-1</sup>, 풍수기에 약 1.4~3.9 mg L<sup>-1</sup>의 농도 분포를 나타냈으며, 2004년 갈수기에 약 1.0~12.2 mg L<sup>-1</sup>, 풍수기에 약 2.3~7.8 mg L<sup>-1</sup>의 농도 분포를 나타냈다(Fig. 7). 2005년의 경우 갈수기에 약 2.7~7.7 mg L<sup>-1</sup>, 풍수기에 약 2.6~8.4 mg L<sup>-1</sup>의 농도 분포를 나타냈고(Fig. 7), 2006년의 경우 갈수기에 약 2.4~6.6 mg L<sup>-1</sup>, 풍수기에 약 2.5~5.3 mg L<sup>-1</sup>의 농도분포를 나타냈다(Fig. 7). 용존 유기탄소 또한 입자성부유물질과 입자성유기탄소와 유사하게 2004년과 2005년에 방조제 내 북측 해역에서 증가됨이 관찰되었다. 용존유기탄소의 주 공급원이 하천을 통한 유입과 저층 퇴적물의 용

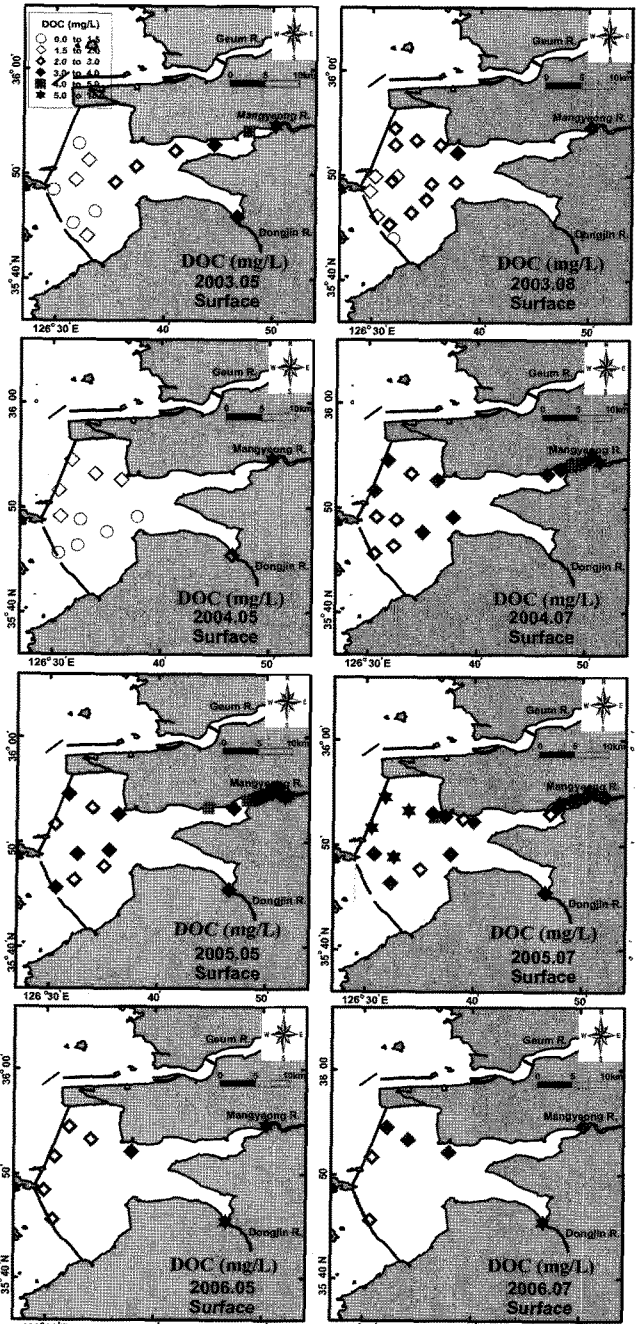


Fig. 7. Horizontal distribution of dissolved organic carbon(DOC) in the surface water of the study area.

출에 의한 것으로 미루어(Cauwet[2002]), 제4호 방조제로 외해와 단절된 이후 하천에서 유입된 용존유기탄소와 더불어 유입된 담수의 흐름이 방조제 벽에 막힘으로 인하여 유발되는 마찰 저항에 의한 저층 퇴적물의 재부유가 용존유기탄소 증가의 주된 원인으로 판단된다. 이와 더불어 입자성유기탄소의 분포 변화에서 살펴본 바와 같이 생물생산력의 증가 또한 용존유기탄소의 분포에 큰 영향을 끼쳤을 것으로 판단된다.

용존유기화합물의 형광 분석을 통해 조사 해역의 육상 기원과

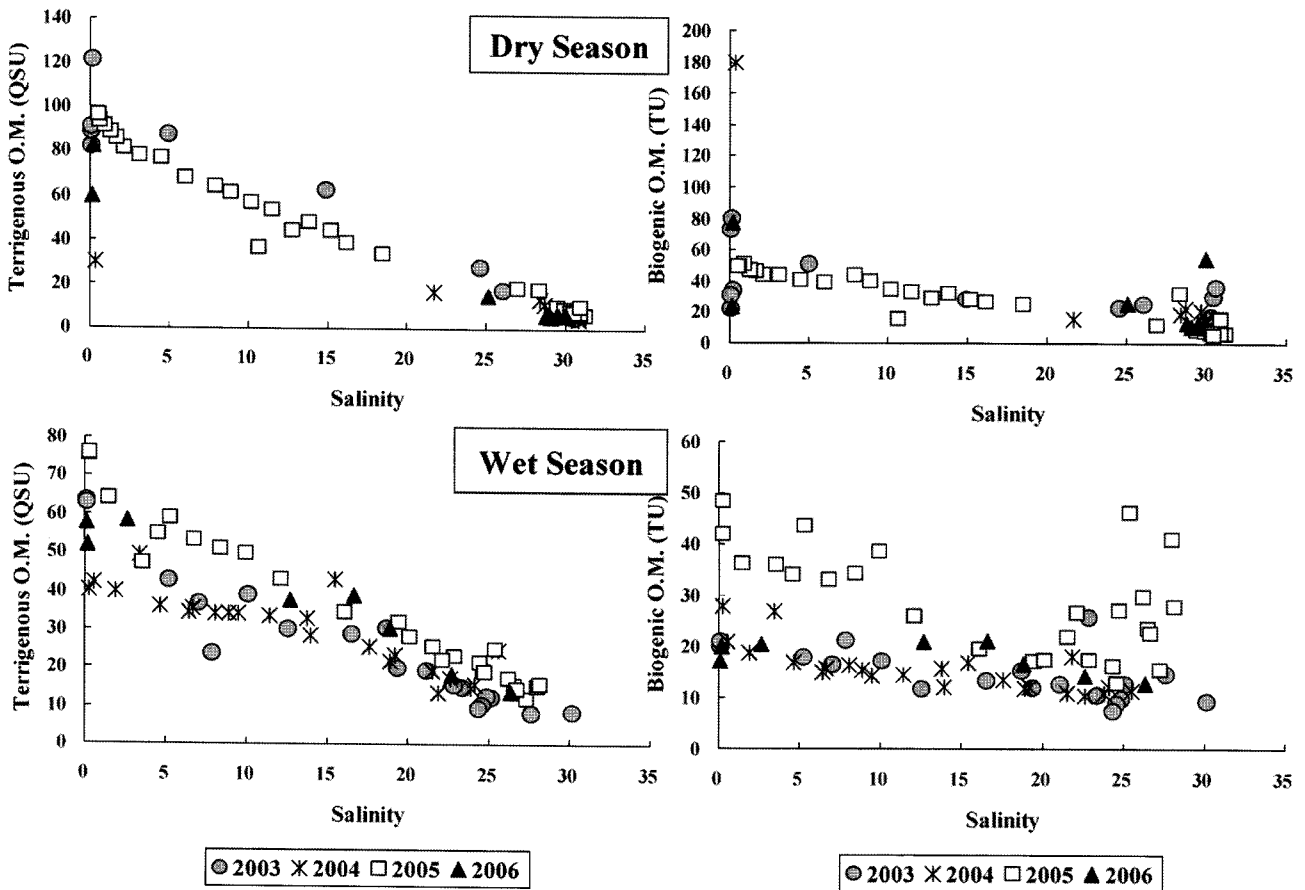


Fig. 8. Distribution of terrigenous and biogenic organic matters along salinity gradient in the surface water of the study area.

생물 기원 유기화합물의 분포 변화를 좀 더 자세히 살펴보았다 (Fig. 8). 해양의 용존 유기물들은 그 형광특성에 따라 육상기원의 humic-like substance와 생물기원의 protein-like substance의 두 가지 형태의 고유 형광소(fluorophore)를 가지고 있으며, 형광 분석을 통해 쉽게 관찰할 수 있다(박 등[1995]; Determann *et al.*[1994]). 새만금 방조제 내측 해역에서 육상기원의 유기물질은 염분에 따라 비교적 보존적인 감소 양상을 나타냈다(Fig. 8). 이는 물리적 희석과 광산화 등에 의한 감소를 나타낸다. 그러나 생물기원의 유기물질은 육상기원 유기물질에 비해 상대적으로 고염분 구역에서도 일정한 농도를 유지하고 있으며, 특히 여름철의 경우 2005년에 크게 증가한 것을 볼 수 있다(Fig. 8). 따라서 조사해역의 용존 유기화합물은 육상기원과 생물기원의 유기물질이 동시에 공존하고 있으며, 하천이 직접 유입되는 저염분 구간에서는 육상기원 유기물질이, 그리고 고염분 구간에서는 상대적으로 생물기원 유기물질이 우세하게 나타나고 있음을 알 수 있었다. 용존유기탄소의 분포는 이러한 용존유기화합물의 분포 특성에 따르는 것으로, 2005년에 용존유기탄소의 농도 분포가 가장 높았던 이유 또한 생물기원 유기물질의 공급이 다른 해에 비해 상대적으로 높았기 때문으로 판단되며, 2006년에 유기탄소의 농도 분포가 다소 낮아지는 원인 또한 생물기원의 유기물이 2005년에 비해 줄어들었기 때문으로 판단된다(Fig. 8).

이상과 같이 2003년부터 2006년까지 입자성부유물질과 입자성 유기탄소, 그리고 용존유기탄소의 수평분포 변화와 용존유기화합물의 염분에 따른 분포 변화를 살펴보면, 2003년 6월 새만금 북측 해역의 제4호 방조제 공사 완공 이후, 북측 해역을 중심으로 2004년과 2005년 표층해역에서 이들의 농도가 증가됨을 알 수 있었고 특히 풍수기인 여름철에 두드러지게 나타났다. 흔히 하구 및 연안에서의 입자성 물질 및 유기물질의 분포는 하천을 통한 육상으로부터의 유입과 해양생물에 의한 자체 생산에 의한 것으로 나누어진다(Argyrou *et al.*[1997]; Michaelis *et al.*[1986]; Sharp *et al.*[1993]). 조사해역인 새만금 방조제 내측 수역은 이 두 가지 요소가 혼재해 있으며, 방조제 건설이라는 인위적 요소가 가미되어 매우 복잡한 생지화학적 현상이 나타나고 있는 곳이다(박 등[2006]). 특히 표층 해역의 클로로필-*a*의 급격한 증가는 2004, 2005년 표층의 입자성 부유물질과 유기탄소의 증가에 밀접한 관련이 있는 것으로 판단되며(해양수산부[2004, 2005, 2006]; 박[2008]; 유 등[2006]), 이러한 표층의 생물량 급증은 향후 유기물의 저층 퇴적 환경으로의 침강으로 이어져 저층 환경 변화에 큰 변화를 초래할 것으로 생각된다. 과거 시화호의 연구 결과에서 나타난 것처럼 저층에 퇴적되는 유기물은 용존 산소를 소모하여 저층의 수질 및 퇴적 환경을 바꾸게 되는 잠재적인 원인이 된다(박 등[1997]; 한국해양연구원[1999]; 해양수산부[2002]).

#### 4. 결 론

2003년부터 2006년까지 새만금 방조제 내측 해역을 갈수기와 풍수기로 나누어 입자성 및 용존유기탄소의 분포 특성을 연구하였다. 연구 결과 만경강 하구역이 위치한 방조제 내측 북측 해역을 중심으로 큰 변화를 보였다. 만경강과 동진강은 새만금 방조제 내측 해역의 주된 담수 공급원이자 육상 기원의 물질이 유입되는 주된 통로 역할을 하고 있었으며, 이를 통해 대부분의 입자성부유물질과 유기탄소가 유입되고 있었다. 가장 먼저 외해와 단절된 제4호 방조제 내측 해역인 만경강 하구 및 연안 해역에서 입자성 부유물질 및 유기탄소의 분포에 복잡한 변화를 가져왔다. 육상으로부터 하천을 통해 대량 유입되는 입자성 부유물질 및 유기탄소는 외해역으로 원활히 빠져 나가지 못하고 표층 해역에서 그 농도가 증가되었으며, 표층 부영양화에 의한 생물 기원의 유기물질 공급은 표층 유기탄소의 새로운 공급원이 되었다. 2004년과 2005년 표층에서 크게 증가한 입자성 물질과 유기물질은 2006년 방조제 물막이 공사 완료 시점에서 수층 안정화로 저층으로 침강, 퇴적된 것으로 보인다. 한편, 표층 부영양화는 곧 저층 퇴적물로 유기입자를 공급하여 저층 환경을 변화시키게 된다. 폐쇄된 환경에서 저층 퇴적 환경으로의 유기물 공급은 용존산소를 소모하여 빈산소 내지 무산소 환경을 유발할 수 있다. 이는 곧 저서 생물의 대량 폐사를 가져와 폐쇄 환경에 엄청난 오염을 가져오는 것이 시화호의 사례에서 이미 보고된 바 있다. 따라서 향후 새만금 방조제 내측의 표층 해역으로 유입되는 육상기원의 유기물과 부영양화에 의한 해양기원의 유기물은 폐쇄된 새만금 연안 해역에서 잠재적인 수질 오염 요인으로 작용할 것으로 판단된다.

#### 사 사

본 연구는 해양수산부가 시행하는 “새만금해양환경보전대책을 위한 조사연구(PM43701, PM51002)” 및 “하구역의 관리 및 기능회복 기술 개발(PE98102)” 사업의 일환으로 수행되었습니다. 본 논문을 심사해주신 심사자와 편집위원의 노고에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] 건설교통부, 2003, 한국수문조사연보(유량편), 505p.
- [2] 건설교통부, 2004, 한국수문조사연보(유량편), 345p.
- [3] 건설교통부, 2005, 한국수문조사연보(유량편), 415p.
- [4] 건설교통부, 2006, 한국수문조사연보(유량편).
- [5] 권기영, 문창호, 강창근, 김영남, 2002, 섬진강 하구역에서 염분경사에 따른 입자성 유기물질의 분포, 한국수산학회지, 35, 86-96.
- [6] 김중구, 김양수, 2002, “새만금 사업지구의 연안해역에서 부영양화관리를 위한 생태계모델의 적용 1. 해역의 수질 특성 및 저질의 용출 부하량 선정”, 한국수산학회지, 35, 348-355.
- [7] 김중구, 유선재, 2001, “새만금지역 하구갯벌의 유기물 분해

- 능력 평가”, 한국환경과학회지, 10, 315-321.
- [8] 김중구, 유선재, 조은일, 안옥성, 2003, “새만금 갯벌의 중금속 분포 특성”, 한국수산학회지, 36, 55-61.
- [9] 김창수, 이상호, 손영태, 권효근, 이광희, 최병주, 2008, “새만금 연안역에서 HF radar에 의해 관측된 조하주기 표층해류의 변화”, 한국해양학회지, ‘바다’, 13, 56-66.
- [10] 박용철, 손승규, 정경호, 김기현, 1995, “동해의 용존유기물 형광특성 및 아미노산 조성에 관한 연구”, 한국해양학회지, 30, 341-354.
- [11] 박용철, 박준건, 한명우, 손승규, 김문구, 허성희, 1997, “시화호 산화-환원 환경하의 용존 유, 무기 화합물의 생지화학적 연구”, 한국해양학회지, ‘바다’, 2, 53-68.
- [12] 박준건, 김은수, 김경태, 조성록, 박용철, 2006, “만경강 하구역의 유기탄소 거동 및 분포”, 한국해양환경공학회지, 9, 131-140.
- [13] 박준건, 2008, 새만금 연안 환경의 유, 무기 화합물 분포 및 생지화학적 특성 연구. 이학박사 학위논문, 인하대학교, 115 p.
- [14] 박태인, 이형래, 장경일, 2006, “새만금해역에서 밀도성층의 계절 변동”, Ocean and Polar Research, 28, 339-352.
- [15] 양재삼, 정주영, 허진영, 이상호, 최진용, 1999, “금강하구의 물질수지 1. 영양염의 계절적 분포”, 한국해양학회지 ‘바다’, 4, 71-79.
- [16] 유명진, 홍대벽, 조용균, 권은미, 구윤희, 2000, “새만금 유역의 강우 시 오염물질 유출특성”, 대한환경공학회지, 22, 1609-1616.
- [17] 유선재, 김중구, 조은일, 2003, “새만금 갯벌의 입도조성과 유기물질 분포특성. 한국수산학회지”, 36, 49-54.
- [18] 유영두, 정해진, 심재형, 박재연, 이경재, 이원호, 권효근, 배세진, 박종규, 2002, “전북 새만금 남쪽 해역의 유해성 적조 발생연구 1. 1999년도 여름-가을 식물플랑크톤의 시공간적 변화”, 한국해양학회지 ‘바다’, 17, 129-139.
- [19] 유정규, 정경호, 남은정, 정경미, 이순우, 명철수, 2006, “새만금 수질 환경과 동물플랑크톤 군집 분포: 방조제 건설에 따른 군집 변화”, Ocean and Polar Research, 28, 305-315.
- [20] 이상호, 최현용, 손영태, 권효근, 김영곤, 양재삼, 정해진, 김중구, 2003, “하계 서해안 새만금 연안역 주변 저염수와 순환”, 한국해양학회지, ‘바다’, 8, 138-150.
- [21] 이희준, 조형래, 김민지, 2006, “새만금방조제 축조에 따른 지형 및 입도특성의 변화”, Ocean and polar research, 28, 293-303.
- [22] 정해진, 유영두, 김재성, 2002, “전북 새만금 남쪽 해역의 유해성 적조 발생연구 2. 1999년도 여름-가을 중속영양성 외편모류와 섬모충류의 시간적 변화”, 한국해양학회지, ‘바다’, 7, 140-147.
- [23] 조영길, 류상욱, 구영경, 김주용, 2001, “새만금 조간대 표층 퇴적물의 성분원소 함량과 지화학적 특성”, 한국해양학회지, ‘바다’, 16, 27-34.
- [24] 최병호, 강용덕, 1990, “새만금 방조제건설이 조석에 미치는 영향-조기평가”, 한국연안해양공학회지, 2, 34-42.
- [25] 한국해양연구원, 1999, 시화호의 환경변화조사 및 보전대책 수립에 관한 연구(3차년도), BSPE 98705-01-34, 363 p.
- [26] 해양수산부, 2002, 해양오염 원적 감시체계 구축연구, 한국해



- 양연구원, BSPM 170-00-1481-3, 548 p.
- [27] 해양수산부, 2004, 새만금 해양환경보전대책을 위한 조사연구 (2차년도), 한국해양연구원, BSPM 195-04-1581-4, 293 p.
- [28] 해양수산부, 2005, 새만금 해양환경보전대책을 위한 조사연구 (3차년도), 한국해양연구원, BSPM 26003-1686-4, 360 p.
- [29] 해양수산부, 2006, 새만금 해양환경보전대책을 위한 조사연구 (4차년도), 한국해양연구원, BSPM 32001-1760-4, 320 p.
- [30] 황갑수, 신형선, 김강주, 여성구, 박성민, 임규재, 2002, "새만금지역 갯벌 환경(폐류, 저질)에서의 중금속 분포특성", 수질보전/한국물환경학회지, 18, 341-354.
- [31] Argyrou, M. E., Bianchi, T. S. and Lambert, C. D., 1997, "Transport and fate of dissolved organic carbon in the Lake Pontchartrain estuary, Louisiana, U.S.A", *Biogeochemistry*, 38, 207-226.
- [32] Cadee, G. C., 1984, "Particulate and dissolved organic carbon and chlorophyll a in the Zaire River, estuary and plume", *Neth. J. Sea Res.*, 17, 426-440.
- [33] Cauwet, G., 2002, DOM in the coastal zone, p. 579-609, In: *Biogeochemistry of marine dissolved organic matter*, ed. by D.A. Hansell and C.A. Carlson. Academic Press, Amsterdam, Boston.
- [34] Cauwet, G. and Mackenzie, F. T., 1993, "Carbon inputs and distribution in estuaries of turbid rivers: the Yang Tze and Yellow river(China)", *Marine Chemistry*, 43, 235-246.
- [35] Chen, R. F. and Bada, J. F., 1992, "The fluorescence of dissolved organic matter in seawater", *Marine Chemistry*, 37, 191-221.
- [36] Determann, S., Reuter, R., Wagner, P. and Willkomm, R., 1994, "Fluorescent matter in the eastern Atlantic Ocean, Part I: method of measurement and near-surface distribution", *Deep Sea Research*, 41, 659-675.
- [37] Hedges, J. I. and Keil, R. G., 1999, "Organic geochemistry perspectives on estuarine process: sorption reactions and consequences", *Marine Chemistry*, 65, 55-65.
- [38] Hedges, J. I., 2002, Why dissolved organic matter, p. 1-33, In: *Biogeochemistry of marine dissolved organic matter*, ed. by D. A. Hansell and C. A. Carlson, Academic Press, Amsterdam.
- [39] Herman, P. M. J. and Heip, C. H. R., 1999, "Biogeochemistry of the maximum turbidity zone of estuaries(MATURE): some conclusions", *J. of Marine Systems*, 22, 89-104.
- [40] Klinkhammer, G. P., McManus, J., Colbert, D. and Rudnicki, M. D., 2000, "Behavior of terrestrial dissolved organic matter at the continent-ocean boundary from high-resolution distributions", *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64, 2765-2774.
- [41] Marchetti, R., 1984, Quadro analitico complessivo dei risultati delle indagini condotto negli acque costiere dell'Emilia Romagna: situazione e ipotesi di intervento, Regione Emilia Romagna, 310 p.
- [42] Michaelis, W., Ittekkot, V. and Degens, E. T., 1986, River inputs into oceans, p. 37-52, In: *Biogeochemical processes at the land-sea boundary*, ed. by P. Lasserre and J.-M. Martin, Elsevier, Amsterdam.
- [43] Murrell, M. C. and Hollibaugh, J. T., 2000, "Distribution and composition of dissolved and particulate organic carbon in Northern San Francisco Bay during low flow conditions", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 51, 75-90.
- [44] Nienhuis, P. H., 1981, Distribution of organic matter in living marine organism, p. 31-69, In: *Marine Organic Chemistry*, ed. by E. K. Duursma and R. Dawson, Elsevier, Amsterdam.
- [45] Nixon, S. W. and Pilson, M. E. Q., 1984, Estuarine total system metabolism and organic exchange calculated from nutrient ratios: an example from Narragansett Bay, p. 261-290, In: *The estuary as a filter*, ed. by V.S. Kennedy. Academic Press, Orlando.
- [46] Parsons, T. R., Maita, Y. and Lalli, C. M., 1984, "A manual of chemical and biological methods for seawater analysis", Pergamon Press, Oxford, U.K., 173 p.
- [47] Schubel, J. R. and Kennedy, V. S., 1984, The estuary as a filter: An introduction, p. 1-11, In: *The estuary as a filter*, ed. by V.S. Kennedy. Academic Press, Orlando.
- [48] Sharp, J. H., Suzuki, Y. and Munday, W. L., 1993, "A comparison of dissolved organic carbon in North Atlantic Ocean near shore waters by high temperature combustion and wet chemical oxidation", *Marine Chemistry*, 41, 252-259.
- [49] Stumm, W. and Morgan, J. J., 1996, *Aquatic Chemistry*, 3th Edition. John Wiley and Sons, New York, 1022 p.
- [50] Sugimura, Y. and Suzuki, Y., 1988, "A high-temperature catalytic oxidation method for the determination of non-volatile dissolved organic carbon in seawater by direct injection of a liquid sample", *Marine Chemistry*, 24, 105-131.
- [51] Warnken, K. W. and Santschi, P. H., 2004, "Biogeochemical behavior of organic carbon in the Trinity River downstream of a large reservoir lake in Texas, USA", *Science of the Total environment*, 329, 131-144.
- [52] Wollast, R., 1991, The coastal organic carbon cycle: fluxes, sources and sinks, p. 365-381, In: *Ocean Margin processes in Global Change*, ed. by R. F. C. Mantoura, J. M. Martin and R. Wollast, Wiley, New York.
- [53] Wu, Y., Zhang, J., Cho, K. W., Hong, G. H. and Chung, C. S., 2004, "Origin and transport of sedimentary organic matter in the Yalujiang estuary, North China", *Estuaries*, 27, 583-592.
- [54] Zhang, J., 1999, "Heavy metal composition of suspended sediments in the Changjiang(Yangtze River) estuary: significance of riverine transport to the ocean", *Continental Shelf Research*, 19, 1521-1543.
- [55] Zhang, J., Liu, S. M., Xu, H., Yu, Z. G., Lai, S. Q., Zhang, H., Geng, G. Y. and Chen, J. F., 1998, "Riverine source and estuarine fate of particulate organic carbon from North China in late summer", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 46, 439-448.

2009년 4월 13일 원고접수

2009년 5월 8일 심사완료

2009년 5월 12일 수정본 채택