

만경강 하구역의 유기탄소 거동 및 분포

박준건^{1,†} · 김은수¹ · 김경태¹ · 조성록¹ · 박용철²

¹한국해양연구원 해양환경관리연구사업단

²인하대학교 해양학과

Organic carbon behavior and distribution in the Mankyong River Estuary

Jun Kun Park^{1,†}, Eun Soo Kim¹, Kyung Tae Kim¹, Sung Rok Cho¹ and Yong Chul Park²

¹Marine Environmental Management Research Division, Korea Ocean Research & Development Institute(KORDI)
Ansan P.O. Box 29, Gyeonggi-do 425-600, Korea

²Department of Oceanography, Inha University, Incheon 402-751, Korea

요 약

만경강 하구역의 입자성 부유물질 및 유기탄소 거동에 관한 연구가 2003년 2월, 5월, 7월, 8월에 이루어졌다. 갈수기인 2, 5월과 풍수기인 7, 8월에 만경강을 통한 담수 유입량의 차이는 매우 컸으며, 용존유기탄소의 유입량은 갈수기와 풍수기에 각각 약 $8.16 \times 10^2 \text{tonC month}^{-1}$ 와 $5.77 \times 10^3 \text{tonC month}^{-1}$, 입자성유기탄소의 유입량은 갈수기와 풍수기 각각 약 $9.37 \times 10^2 \text{tonC month}^{-1}$ 와 $3.14 \times 10^4 \text{tonC month}^{-1}$ 로 나타났다. 특히 많은 강우가 집중되었던 풍수기에 방조제 내 북측 수역의 용존유기탄소 농도가 증가하는 경향을 보였다. 조사기간 중 만경강 하구역에서의 용존유기탄소 분포는 염분에 대해 비교적 보존적인 특성을 보이고 있어, 담수와 해수사이의 물리적 희석작용에 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 그러나 입자성유기탄소의 분포는 부유물질의 거동과 유사하게 60-90% 정도가 하구역에 침강, 제거되는 것으로 나타났다. 이러한 결과로 볼 때 새만금 방조제 완공 후 만경강 하구역이 외해와의 물질 교환이 차단 될 경우, 저층에 퇴적된 다량의 유기 탄소가 저층 용존 산소 고갈의 주요 원인이 될 수 있음을 시사하고 있다.

Abstract – Suspended particulate matter and organic carbon were measured in the Mankyong river estuary in February, May, July and August 2003. There was a large variance in river discharge between the dry season of February and May and the wet season of July and August. The influx of dissolved organic carbon into the estuary was $8.16 \times 10^2 \text{tonC month}^{-1}$ in the dry season and $5.77 \times 10^3 \text{tonC month}^{-1}$ in the wet season. The influx of particulate organic carbon was $9.37 \times 10^2 \text{tonC month}^{-1}$ and $3.14 \times 10^4 \text{tonC month}^{-1}$ in the dry and wet seasons, respectively. Especially, dissolved organic carbon in the northern part of the site inside the dike was increased in July when torrential rainfall was high. In the research, the distribution of dissolved organic carbon showed conservative behavior with the salinity gradient in the estuary, suggesting that physical mixing between seawater and freshwater dominates the distribution pattern of the dissolved organic carbon in the system. However 60 to 90% of the particulate organic carbon introduced into the estuary was removed from the surface water at the upper estuarine mixing zone of low salinities, showing non-conservative behavior similar with suspended particulate matter. The completion of the Saemangum Dike is likely to inhibit the exchange of materials between open sea and the Mankyong estuary. This suggests that the oxidation of organic carbon in the bottom of the estuary may exhaust dissolved oxygen in the confined environment.

Keywords: Dissolved organic carbon(용존유기탄소), Particulate organic carbon(입자성유기탄소), Saemangum(새만금), Mankyong river estuary(만경강 하구)

[†]Corresponding author: parkjk@kordi.re.kr

1. 서론

해양에서 유기탄소의 공급은 주로 육상 또는 대기 등과 같은 외부 기원과 해양생물에 의한 자생 기원이 있다(Michaelis, *et al.*[1986]; Wu, *et al.*[2004]). 해양 환경 중 특히 하구역에서의 유기탄소는 주로 하천을 통한 육상기원이 대부분을 차지한다(Cadee[1984]; Cauwet, G.[2002]; Murrell and Hollibaugh[2000]; Klinkhammer, *et al.*[2000]; Zhang *et al.*[1998]). 하천을 통한 유기탄소의 공급은 해양 전체 유기탄소원의 중요한 부분을 차지하고 있지만, 하구역이라는 복잡한 환경 때문에 유기탄소의 거동 기작에 관한 연구는 최근까지도 명확히 밝혀지지 않고 있다(Warnken and Santschi [2004]). 하구역은 육상으로부터 하천을 통하여 유입된 물질이 해양으로 전달되는 경로에 위치해 있으며, 담수와 해수의 영향을 동시에 받는 매우 복잡한 환경을 지니고 있다(윤[2004]; Michaelis, *et al.*[1986]). 또한 육상으로부터 풍부한 유기·무기물을 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 유기·무기 물질의 제거역할을 하는 매우 중요한 지역으로 많이 연구되어오고 있다(Michaelis, *et al.*[1986]; Nienhuis[1981]; Schubel and Kennedy[1984]; Zhang[1999]; Wollast[1991]; 양 등[1999]). 하구역에서 유기·무기물의 제거 기작에는 수괴 혼합에 의한 희석작용, 생물에 의한 흡수 및 분해, 부유입자와 용존 화학종간의 흡착 및 탈착 작용 등을 들 수 있다(Miller[1999]; 양 등[1999]). 따라서 많은 화학종들이 하구역에서 비보존적인 특성을 나타낸다(Morris[1985]; Sharp *et al.*[1993]). 일찍이 Liss[1976]는 하구역에서의 용존 무기 영양염류 연구에서 이러한 분포특성을 보고한 바 있으며, Boyle *et al.*[1974]은 중금속의 분포특성을, Sharp *et al.*[1984]은 Delaware estuary에서 용존 유기·무기물의 adsorption, flocculation, precipitation 등에 의한 생지화학적 제거 기작과 플랑크톤의 uptake에 의한 생물학적 제거기작에 대해 연구한 바 있다.

연구지역으로 유입되는 만경강은 전라북도 완주군 동상면에서 발원하여 전주시, 군산시, 익산시, 김제시, 완주군 등지에서 고산천, 소양천, 전주천, 익산천, 탐천 등의 지천을 거느린 유역 면적 1418.2 km²의 전라북도에서 가장 큰 강이다. 약 200만의 전북도민 가운데 100만이 넘는 인구가 만경강 유역에서 살고 있다. 또한 만경강은 동진강과 더불어 새만금 해역에 유입되는 주요 하천이다. 현재 새만금 해역은 방조제 물막이 공사가 거의 마무리 되고 있어 이에 따른 환경 변화가 예상되는 해역이다. 현재까지 만경강 하구를 비롯한 새만금 지역에 대한 연구로는 새만금 갯벌에 관한 연구가 주종을 이루고 있었으며(유 등[2003]; 김 등[2003]; 황 등[2002]; 김과 유[2001]; 조 등[2001]), 그 외 부유생물의 시·공간 분포(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 하천과 하구, 그리고 외해를 포함

하는 종합적인 연구는 그동안 제대로 보고되지 않았다. 앞서 살펴본 것과 같이 하구역의 물질 제거 기능은 육상 오염물질의 해양 유입 시 완충지대로서 커다란 역할을 한다. 그러나 우리나라 서해안과 같이 인공 구조물이 많은 하구 환경에서 하구역의 물질 제거 기능 및 생지화학적 특성을 연구하기는 매우 힘들다. 이에 비해 만경강 하구역은 상대적으로 인공 구조물이 적어 하구역의 특성을 관찰하기 좋은 환경을 지니고 있다. 본 연구는 현재까지 잘 연구되지 않았던 만경강 하구에서의 부유물질과 유기탄소의 유입 및 거동 분포에 관한 기초 자료를 획득하는 것을 기본 목표로 하였다. 부유물질과 유기탄소는 서두에서 거론되었듯이 하구역에서 화학종의 종 분화 및 생물 생산에 큰 영향을 미치는 중요한 인자이다. 그러므로 이들의 거동 및 분포에 관한 연구는 우리나라 하구역의 기능에 대한 이해에 많은 기여를 할 것으로 판단된다. 한편, 연구 해역인 만경강 하구역이 위치한 새만금 복측 해역은 2003년 6월 제 4호 방조제 완공으로 더 이상 외해역과 물질 교환이 이루어지지 않고 있다. 따라서 본 조사가 실시된 2003년 2~8월은 인위적으로 하구역의 환경이 외부와 차단되기 직전에서 직후까지의 모습을 관찰할 수 있는 매우 좋은 시기였다. 이에 따라 하구역의 일반적인 현상 규명과 더불어 인위적인 환경 변화에 따른 하구역의 입자성 유기·무기물질 및 용존유기물질의 분포와 거동 변화를 함께 고찰해 봄으로써 향후 수질 변화 양상을 본 연구에서 제시해 보았다.

2. 재료 및 방법

시료채취는 2003년 2월, 5월, 7월, 8월 저조기에 맞추어 이루어졌으며, 조사 정점은 Fig. 1과 같다. 동일한 조사 시기에 동진강

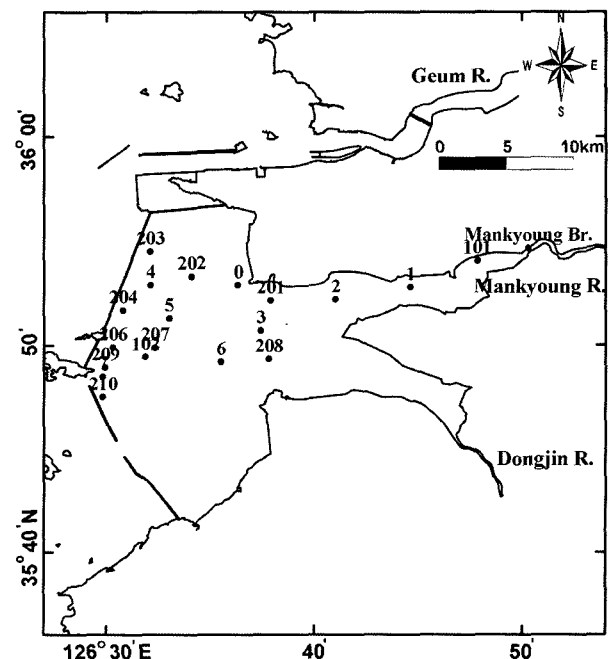


Fig. 1. Study area in the Mankyong estuary, Seamangeum area.

수역을 비롯한 새만금 방조제 내·외측 모든 지역에서 시료의 채취가 이루어졌으나, 본 연구 논문에서는 새만금 내측 해역에 가장 큰 영향을 주고 있는 만경강 수역만을 대상으로 하였다. 또한 만경강의 유입 유량이 계절에 따라 크게 차이를 보여, 2, 5월을 갈수기로, 7, 8월을 풍수기로 나누어 비교하였다.

입자성 부유물질(Suspended particulate matter; SPM)은 500°C에서 5시간 회화시켜 무게를 측정한 GF/F filter paper(Whatman)로 시료를 여과한 후 증류수 소량으로 탈염시킨 후 건조시켜 무게차로서 계산하였다. 또한 이 여과지를 1 N 염산(HCl, Merck ultra pure)으로 처리하여 LECO-SC 444 Carbon and Sulfur Analyzer로 입자성유기탄소(Particulate Organic Carbon; POC)를 측정하였다. 용존유기탄소(Dissolved Organic Carbon; DOC)분석은 SPM 측정을 위해 여과한 여액을 Sugimura and Suzuki[1988] 방법에 따라 HTOCO(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.

3. 결과 및 고찰

3.1 하천 유입 유량 및 염분 분포

만경강과 동진강은 새만금 해역으로 유입되는 대표적인 하천이다(Fig. 1). 만경·동진강을 통해 새만금 방조제 내측 수역으로 유입되는 하천 유량을 조사 일자별로 Table 1에 나타내 보았다(건설교통부[2003]). 새만금 방조제 내측으로 유입되는 하천 유량은 5월을 제외하고는 만경강의 유량이 동진강보다 약 5~8배 많았다. 따라서 유량의 영향만을 본다면 동진강에 비해 만경강이 새만금 방조제 내측 해역에 더 많은 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 조사 시기를 크게 풍수기인 7, 8월과 갈수기인 2, 5월로 나누어 유량 변화를 살펴보면, 만경강의 경우 풍수기가 갈수기 보다 약 12배 정도 많은 유량을 나타냈고, 동진강의 경우는 풍수기가 갈수기

Table 1. River discharge for the Mankyong and Dongjin river in this study ($10^6 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$, Ministry of Construction & Transportation, 2003)

Date (mm.dd)	2. 25~27	5. 29~31	7. 10	8. 19~23
Mankyong	2.91	5.59	81.9	17.0
Dongjin	0.36	4.35	10.5	3.72

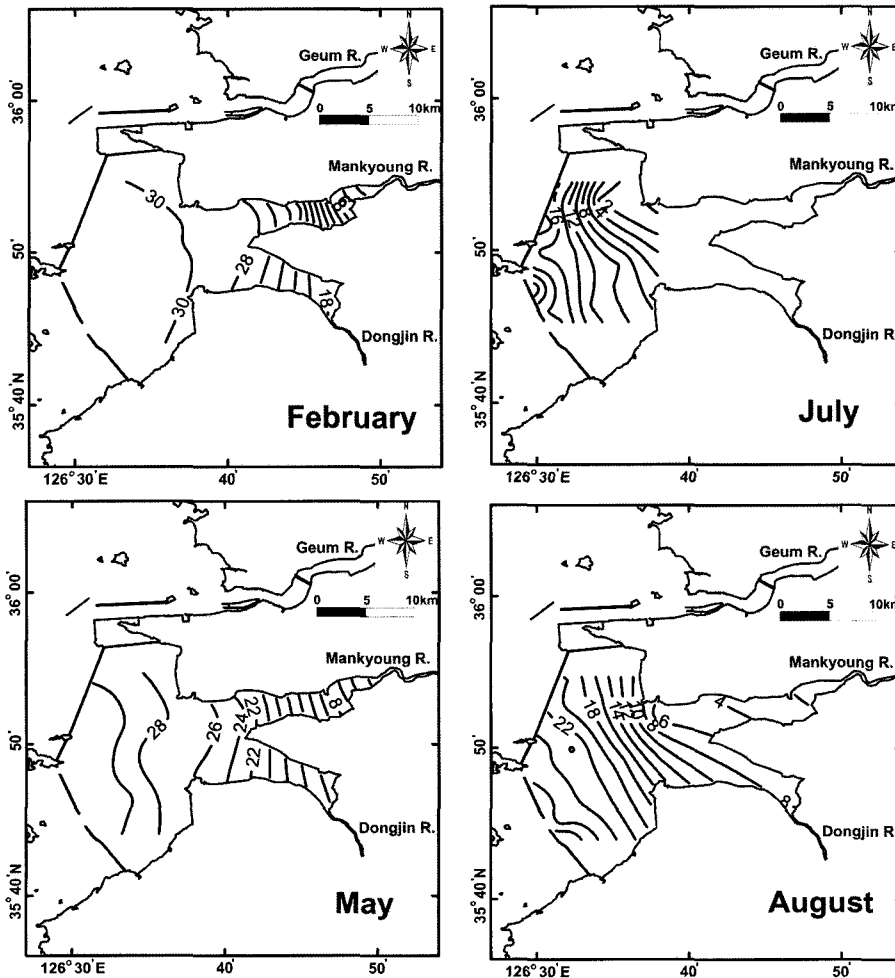


Fig. 2. Horizontal distribution of salinity in the surface water of the Seamangum area (including the Mankyong estuary).

보다 약 3배 많은 유량을 나타냈다. 특히 집중호우가 있었던 7월의 경우 갈수기보다 20배 많은 유입 유량이 만경강에서 관측되었다. 이러한 결과는 강우가 집중되는 여름철에 하천에 의한 육상 기원의 물질들이 만경강 하구역을 비롯한 새만금 전 해역에 일시적으로 많이 유입됨을 시사한다. 여름철 하천 유량의 집중 현상은 풍수기와 갈수기 간의 하구역 염분 분포에도 큰 영향을 미치고 있었다. 갈수기인 2월과 5월에는 정점 2 부근부터 30이상의 염분을 보였으나 풍수기인 7월과 8월에는 외해와 유통되는 일부 지점을 제외하고 염분 5~20의 범위를 나타내고 있어, 풍수기에 새만금 방조제 내측 전역에 하천의 영향이 크게 나타남을 볼 수 있었다(Fig. 2).

3.2 유기탄소 분포

3.2.1 입자성 부유물질 및 입자성 유기탄소 분포

염분 0.1이하 구간으로 담수 유입 부분인 만경대교 부근 정점에서 측정된 입자성 부유물질(SPM)의 농도는 갈수기인 2, 5월에는 약 80~267 mg L⁻¹, 7, 8월의 풍수기에는 약 281~1790 mg L⁻¹의 범위를 나타냈다(Fig. 3). 만경강 하구에서 새만금 방조제 내측 해역에 이르는 염분 5~30사이 구간의 입자성 부유물질의 농도 분포는 갈수기에 약 7~73 mg L⁻¹, 풍수기에는 약 4~934 mg L⁻¹의 분포 범위를 나타내어, 하천의 유량이 많은 풍수기에 약 7~13배

많은 입자성 부유물질의 농도를 나타냈다(Fig. 3). 입자성유기탄소(POC)는 갈수기에 만경대교 부근에서 약 2.4~7.4 mgC L⁻¹, 풍수기에는 약 10.6~21.2 mgC L⁻¹의 분포범위를 나타냈다(Fig. 3). 또한 만경강 하구에서 새만금 방조제에 이르는 해역의 농도 범위는 갈수기에 약 0.4~2.6 mgC L⁻¹, 풍수기에는 0.2~15.1 mgC L⁻¹의 분포범위를 나타냈다(Fig. 3). 이러한 결과는 만경강 하구역의 입자성 유·무기물질의 농도가 주로 하천 유입에 의해 좌우되며, 특히 하천 유량이 많아지는 여름철에 일시적으로 집중됨을 보여준다. 풍수기를 제외한 만경강 하구역의 입자성유기탄소 농도는 하구역에서의 일반적인 농도 범위(0.1~5.0 mgC L⁻¹, Artemyev[1996])와 비교했을 때 크게 높지 않았으며, 권 등[2002]이 연구한 섬진강 하구역에서의 입자성유기탄소 농도 범위(0.2~2.3 mgC L⁻¹)와 비교하여 보아도 염분 5이상의 지역에서는 유사한 농도 범위를 나타내고 있었다(Fig. 3). 한편, 하구역에서의 물질 분포는 염분이 물리적 혼합의 보존적 지표(conservative index)로 작용한다고 알려져 있다(Warner[1972]; Sharp *et al.*[1984]). 수괴가 혼합되는 동안 물질의 거동이 보존적이라면 염분에 대한 각 물질 농도와의 관계가 직선적으로 나타날 것이나, 그 직선식에 대해 위 또는 아래로 편차가 생길 경우 혼합되는 과정에서 유입(source) 또는 제거(sink)를 의미하게 된다(Duinker[1980]; Morris[1985]; Sharp *et al.*[1984]).

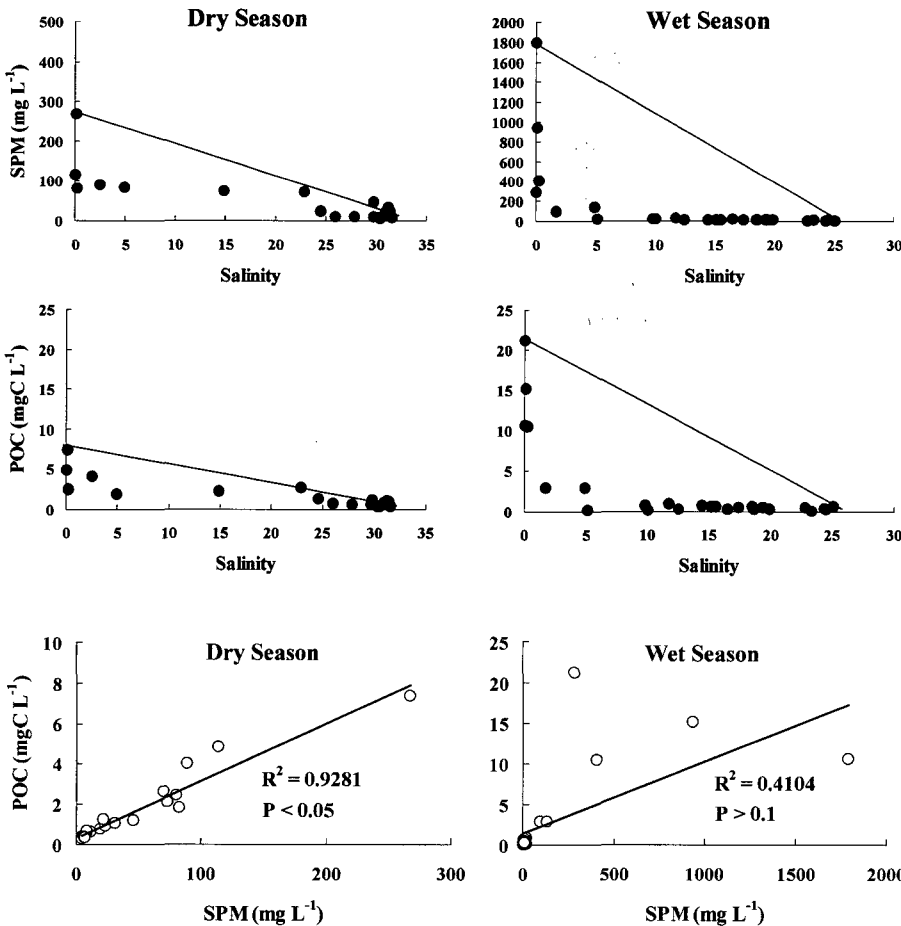


Fig. 3. Distribution of suspended particulate matter (SPM) and particulate organic carbon (POC) along salinity gradient in the surface water of the Mankyong estuary (solid line: theoretical dilution line).

Fig. 4. Relationship of suspended particulate matter (SPM) concentration vs. particulate organic carbon (POC) concentration in the surface water of the Mankyong estuary.

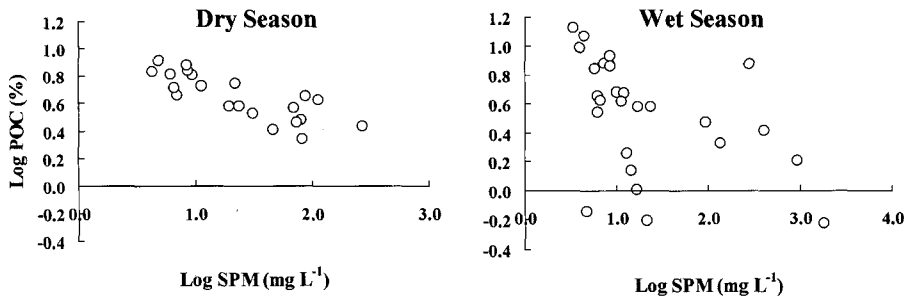


Fig. 5. Variation of log POC(%) vs. log SPM in the Mankyong estuary.

조사 결과 만경강 하구역의 입자성 부유물질 및 입자성유기탄소의 분포는 염분 5이하 지역에서 급격히 감소하는 형태를 보이며 비보존적(non-conservative)인 양상을 나타냈다(Fig. 3). 이러한 결과는 만경강을 통해 유입된 입자성 물질들이 하구역에 상당부분 침전되어 제거된다는 것을 의미한다. Zhang[1999] 또한 입자성 부유물질의 90%정도는 연안에 퇴적된다고 보고한 바 있다. 입자성 부유물질과 입자성유기탄소는 갈수기에는 좋은 상관관계($r^2=0.93$, $p<0.05$)를 나타냈으나, 풍수기에는 다소 분산된 상관관계를 나타냈다($r^2=0.41$, $p>0.1$, Fig. 4). 이는 2003년 7월 집중 호우로 인한 다량의 부유 토사가 한꺼번에 만경강을 통해 유입되면서 나타난 결과로 보인다. 또한 입자성 부유물질 중 유기탄소의 함량(POC%)은 부유물질의 농도가 증가할수록 감소하는 모습을 나타냈다(Fig. 5). 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. 5). 이는 입자성유기물질이 육상으로부터 유입된 단일 기원이 아닌, 강한 하천 흐름에 의한 저층 퇴적물의 재부유 또는 생물생산 등 다른 기원이 하나 더 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]).

3.2.2 용존유기탄소 분포

만경강 하구의 용존유기탄소(DOC) 분포를 살펴보면 담수가 유입되는(염분<0.1) 만경대교 부근 정점의 농도 범위는 갈수기에

3.2~6.4mgC L⁻¹의 분포범위를 나타냈고, 풍수기에는 3.3~3.9 mgC L⁻¹의 분포범위를 나타냈다(Fig. 6). 앞서 살펴본 입자성 유·무기 물질들과는 달리 풍수기의 용존유기탄소 최대값이 갈수기보다 낮게 나타났는데, 이는 하계 집중 호우로 인해 늘어난 하천 유량에 용존유기탄소 농도가 희석되어짐을 나타낸다. 대부분의 용존 유기물질은 다량의 하천 유입 초기에는 그 농도가 높아지나 그기간이 길어질수록 점차 희석되어 낮아지는 경향을 보인다(Cauwet[2002]). 염분 5~30사이의 구간은 갈수기에는 1.3~4.7 mgC L⁻¹, 풍수기에는 1.7~5.3 mgC L⁻¹의 분포범위를 나타내 큰 차이를 보이지 않았다. 또한 입자성 물질들과는 달리 염분 5이하의 구간에서 급격히 감소하는 양상을 보이지 않았다. 갈수기의 경우 염분 변화에 따라 비교적 직선적으로 감소하는 보존적인(conservative) 분포 양상을 보이고 있어(Fig. 6), 물리적인 혼합에 의한 희석이 용존유기탄소의 분포에 많은 영향을 미치고 있었다. 그러나 염분 2이하 구간에서 일부 제거되는 것으로 보이는 기작이 관찰되었는데(Fig. 6), 이를 정확히 규명하기 위해서는 앞으로 염분 5이하 저염분 지역에 대한 세밀한 관측이 필요하다. 갈수기와 달리 하계의 풍수기의 용존유기탄소 분포는 염분 10~20사이 구간에서 증가하는 양상을 보여 새로운 용존유기탄소에 대한 기원을 암시하였다(Fig. 6). 하구역에서 용존유기탄소의 거동은 복잡한 생지화학적 과정을 거쳐 경우에 따라 보존적(Michaelis *et al.*[1986]; Sharp *et al.*[1988], [1993]), 또는 비보존적(Argyrou *et al.*[1997]; Sharp *et al.*[1993])인 양상을 나타내기도 하지만, 만경강 하구역에서 여름철에 이러한 경향을 보인 것은 주목할 만하다. 이는 여름철 관측 이전인 2003년 6월에 만경강 하구역이 위치한 새만금 방조제 북측의 제4호 방조제 물막이 공사가 끝난 직후의 관측 시점이기 때문이다. 방조제 물막이 공사 이후 외해와의 해수 유통이 차단된 상태에서 여름철에 많은 강우로 인해 한꺼번에 하천유입량이 증가한다면 저

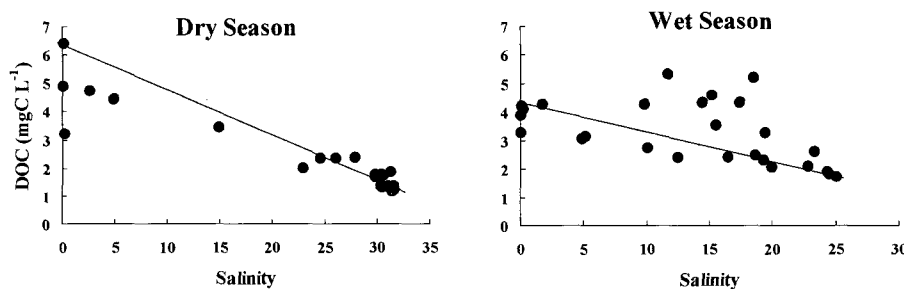


Fig. 6. Distribution of dissolved organic carbon (DOC) along salinity gradient in the surface water of the Mankyong estuary (solid line: theoretical dilution line).

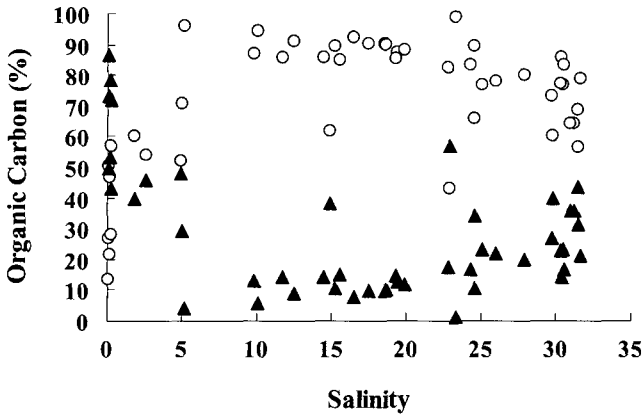


Fig. 7. Plots of salinity vs. DOC(mgC L⁻¹)/TOC(mgC L⁻¹)percentage(%) and POC(mgC L⁻¹)/TOC(mgC L⁻¹)percentage(%) in the Mankyong estuary(circle: DOC/TOC(%), triangle: POC/TOC(%)).

층 퇴적물이 재부유하면서 유기탄소가 다시 용출되어 나올 가능성이 있다. 더불어 생물 생산에 의한 용존 유기물의 공급 또한 예상할 수 있다. 만경강 하구에서 외해를 연결하는 염분 10~20사이의 구간이 이와 같은 변화가 생김으로서 향후 이 지역의 생지화학적 환경이 크게 달라질 것으로 보여, 향후 이에 대해 관심을 가지고 지속적인 관찰을 해야 할 것이다. 한편, 전체 조사 기간을 통해 용존유기탄소가 총유기탄소(TOC)의 대부분을 차지하고 있었다(Fig. 7). 그러나 염분 5이하 지역에서는 입자성유기탄소가 60~90%를 차지하고 있었다. 이는 입자성유기탄소와 용존유기탄소의 염분 변화에 대한 분포(Fig. 3, Fig. 6)에서 알 수 있듯이, 여름철 홍수기에 다량 유입된 입자성유기탄소는 염분 5이하에서 대부분 침전 제거되어지기 때문이다. Hedges *et al.*[1994]와 Atemyev [1996]등의 연구에서는 하구 또는 연안역에서 총 유기물의 40~50% 정도는 입자성 유기물이 차지하며, 외해에서는 대부분이 용존유기탄소로 존재하고 있다고 보고한 바 있다.

Table 2는 만경강 하구역과 타 지역 하구역의 용존유기탄소 농도를 비교한 것이다. 만경강 하구역의 용존유기탄소 농도는 손 [2001]이 보고한 인천연안지역의 농도보다는 다소 높으나 이는 저염분 구간이 제외된 지역이었으며, 다른 하구역들과 비교해 보았을 때 유사한 범위를 나타내고 있었다.

3.3 유기탄소의 유입 및 제거

앞의 입자성 및 용존유기탄소의 분포에서 살펴보았듯이 하구역

에서 유기물의 이동 기작은 그 혼합 정도와 생지화학적 과정에 따라 보존적인(conservative) 것과 비보존적인(non-conservative) 성향으로 구분된다(Miller[1999]). 또한 하구역에서 염분과의 상관관계로써 이동 기작을 설명할 수 있는데, 염분과의 확연한 상관관계는 물리적인 작용이 유기물의 분포에 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Doval *et al.*[1999]). 본 연구에서 염분과 용존유기탄소는 비교적 보존적인 양상을 나타내고 있었다. 본 연구 해역처럼 조류의 영향이 큰 하구역의 경우 용존 유·무기물의 분포는 일반적으로 생물학적 기작보다는 물리적 수괴 혼합작용에 의해 희석되어지는 것으로 알려져 있다(Cauwet[2002]). 만경강 하구역에서 용존유기탄소가 물리적 작용에 의해 희석되어진다는 의미는 아직까지는 조류와 같은 물리적 기작이 우세한 해역임을 말해주고 있다. 그러나 입자성 부유물질 및 입자성유기탄소는 염분변화에 따라 비보존적인 특성을 보여 상당부분 하구역에서 제거됨을 알 수 있었다. 이를 근거로 아래와 같이 입자성 부유물질과 입자성유기탄소의 제거량을 구할 수 있었다. 계절에 따른 강우량의 변화로 만경강의 유입 유량이 연중 일정하지 않아 갈수기인 2, 5월과 풍수기인 7, 8월로 나누어 입자성 부유물질 및 유기탄소의 유입량과 제거량을 계산하였다.

3.3.1 유기탄소의 유입량 및 제거량

2003년 갈수기 동안의 만경강의 평균 유입 유량은 약 1.27×10⁸m³ month⁻¹이고, 부유물질과 입자성유기탄소의 유입량은 각각 3.41×10⁴ton month⁻¹, 9.37×10²tonC month⁻¹였다. 같은 기간 용존유기탄소의 유입량은 약 8.16×10²tonC month⁻¹로 나타났다. 여름철 풍수기 동안의 만경강의 평균유량은 약 14.8×10⁸m³ month⁻¹이고, 부유입자와 입자성유기탄소의 유입량은 각각 2.66×10⁶ton month⁻¹와 3.14×10⁴tonC month⁻¹로 나타났으며, 용존유기탄소의 유입량은 5.77×10³tonC month⁻¹이었다. 염분에 대한 부유입자와 입자성유기탄소와의 상관관계로부터(Fig. 8) Li and Chan[1979]과 Maeda and Windom[1982]에 의해 제시된 식 (1)에 의해 다음과 같이 각각의 제거량(R)을 구하여 Table 3에 나타냈다.

$$R = Qr \times (Cr - I) \tag{1}$$

여기서 Qr은 담수(하천) 유입량, I는 하구역에서 보존적인 특성을 나타내는 직선의 y절편, Cr은 담수 end-member값을 나타낸다. 유입량과 제거량의 비로부터 제거율을 구하면 입자성 부유물질의 경우 갈수기와 풍수기에 각각 64.7%, 95.9%, 입자성유기탄소는 갈수기와 풍수기에 각각 57.9%, 91.8%가 제거되는 것으로 나타났다

Table 2. Comparison of estuarine DOC concentrations of the world area.

Area	Year (yr. month)	DOC (mgC L ⁻¹)	Salinity range	Referance
Tamer river estuary(U.K.)	1991. 4-10	1.32-5.74	0-35	Miller[1999]
Lena river estuary(Siberia)	1989-1991	2.43-7.93	0.06-33.21	Cauwet and Sidorov[1996]
Pearl river estuary(China)	2002	1.0-2.4	0-33	Callahan <i>et al.</i> [2004]
Inchon coastal area(Korea)	1999. 12, 2000. 2	1.59-2.21	17.7-32.6	손 [2001]
Mankyong river estuary	2001. 5, 2002. 8	1.07-8.81	0.0-31.4	하 [2003]
Mankyong river estuary	2003. 2,5,7,8	1.17-6.40	0.06-31.63	This study

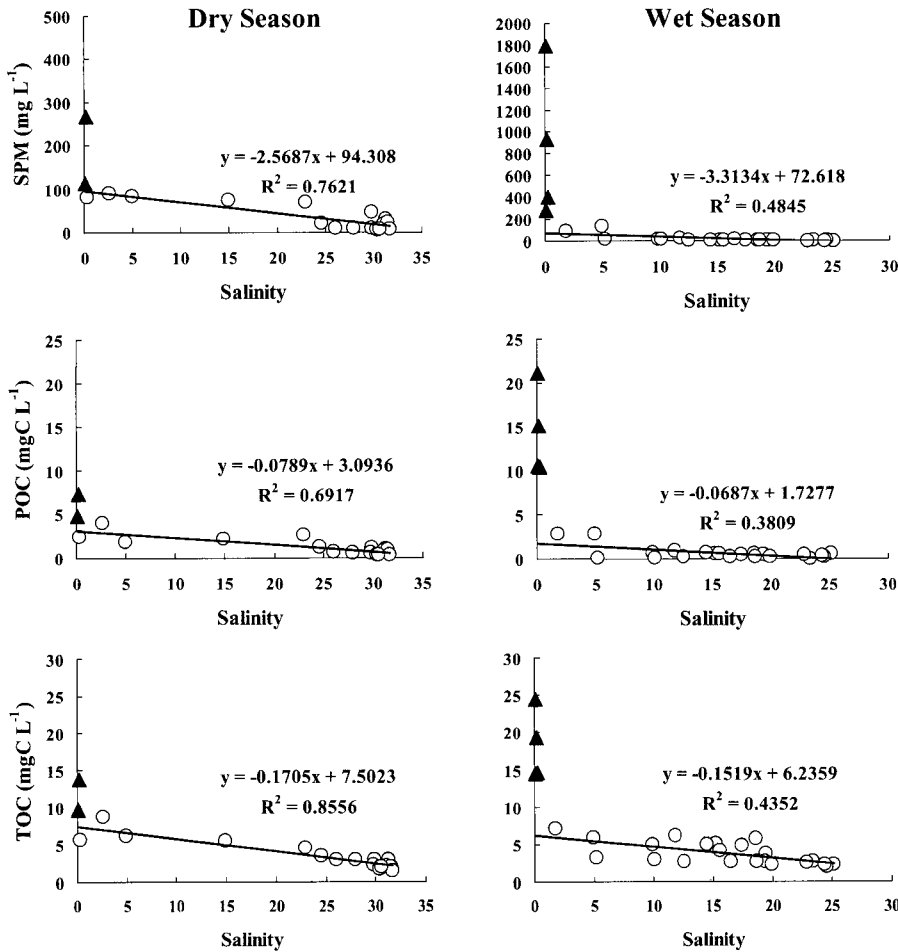


Fig. 8. Plots of SPM, POC and TOC vs. salinity in the surface water of the Mankyong estuary. Regression line applied to only conservative part at the Mankyong estuary (triangle: riverine end-member).

Table 3. Removal rates of SPM, POC and TOC in the Mankyong estuary

	SPM (ton/month)		POC (ton C/month)		TOC (ton C/month)		TOC (ton C/year)
	Dry Season	Wet Season	Dry Season	Wet Season	Dry Season	Wet Season	
Input	3.41×10^4	2.66×10^6	9.37×10^2	3.14×10^4	1.75×10^3	3.63×10^4	3.27×10^4
Removal	2.20×10^4	2.55×10^6	5.42×10^2	2.88×10^4	7.96×10^2	2.70×10^4	2.54×10^4
Removal rate(%)	64.7	95.9	57.9	91.8	45.4	74.5	77.5

(Table 3). 하[2003]의 연구결과에서는 만경강 하구에서 육상기원 난분해성 유기화합물의 92%정도가 제거된다고 보고된 바 있다. 2003년 한 해 동안 만경강 하구역에서 염분에 대한 총 유기탄소의 상관관계(Fig. 9)를 통해 식 (1)을 이용하여 계산된 연평균 총 유기탄소의 유입량은 약 $3.27 \times 10^4 \text{ ton C yr}^{-1}$ 로 추정되었고(만경강 연평균 유입 유량: 약 $1.34 \times 10^9 \text{ m}^3 \text{ yr}^{-1}$ (건설교통부[2003])), 이중 약 78%인 $2.54 \times 10^4 \text{ ton C yr}^{-1}$ 이 염분 5~15구간의 하구역에 대부분 침전, 제거되는 것으로 나타났다(Fig. 9). 이렇게 저층에 퇴적된 다량의 유기탄소는 산화되는 과정에서 용존산소의 소비를 증가시키고 이로 인하여 수괴저층의 용존산소 고갈을 초래하게 된다. 자연수계에 존재하는 유기물의 조성이 Redfield ratio에 따르는 것으로 가정했을 때(Redfield *et al.*[1963]; Baker *et al.*[1999]), 위와 같이 퇴적되는 약 $2.54 \times 10^4 \text{ ton C yr}^{-1}$ 의 유기탄소를 산화, 분해시키기 위해서는

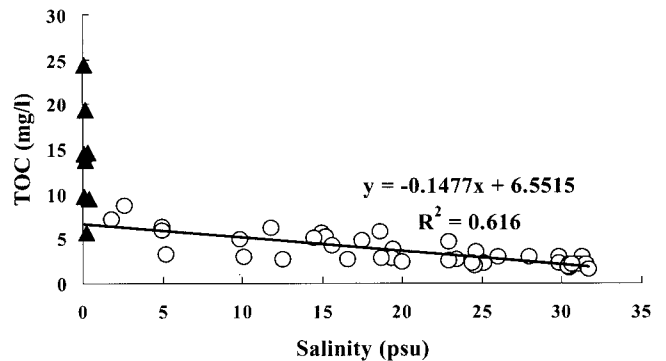


Fig. 9. Plots of TOC vs. salinity in the surface water of the Mankyong estuary. Regression line applied to only conservative part at the Mankyong estuary (triangle: riverine end-member).

연간 약 $8.79 \times 10^4 \text{ tonO}_2$ 의 용존산소를 소비하게 됨을 이론적으로 계산할 수 있다(손[2003]). 아직까지는 물리적 수괴 혼합에 의한 희석작용이 유기탄소 분포에 큰 영향을 미치고 있었지만, 현재와 같은 유기탄소의 유입 및 제거가 이루어지는 환경에서 새만금 방조제 완공 이후 외해와의 교환이 없어진다고 가정할 경우 저층에 퇴적된 유기물을 산화시키기 위해서는 막대한 양의 용존산소가 소비될 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

2003년 2월부터 8월까지의 입자성 및 용존유기탄소 분포 연구 결과 만경강 하구역은 일반적인 하구역의 분포 특성과 크게 다르지 않았다. 만경강 하구의 환경은 여름철 다량의 강우에 의한 담수 유입 시 새만금 방조제 내측 전체가 담수의 영향을 받고 있었으며, 전체 유기탄소의 농도 또한 높아졌다. 입자성 부유물질 및 입자성유기탄소의 경우 염분 5이하의 지역에서 갈수기에는 60% 정도, 풍수기에는 90%이상 침전, 제거되는 것으로 나타났다. 용존유기탄소의 경우 염분 5이상의 해역에서 총유기탄소의 60% 이상을 차지하고 있었으며, 그 분포양상은 갈수기에는 비교적 보존적이었다. 따라서 조석에 의한 물리적 희석의 영향이 많이 나타나고 있었다. 그러나 풍수기의 경우 염분 15~20 지역에서 새로운 입자성유기탄소와 용존유기탄소의 유입이 발견되었다. 이는 풍수기 조사 전 완공된 제 4호 방조제가 기존의 수괴 흐름을 차단함으로써 나타난 현상이라 판단되었으나, 이번 한 번의 조사결과만을 가지고는 정확한 결론을 얻기는 힘들었다. 따라서 이후 만경강 하구역의 유기탄소의 거동에 대한 연구는 지속적으로 이루어져야 할 것이다. 이와 더불어 염분 5이하 저염의 하구 환경에 대한 세밀한 조사의 필요성도 나타났다. 한편, 만경강 하구역으로 연간 유입되는 총유기탄소의 약 78%는 하구에 침전, 제거되는 것으로 나타났다. 따라서 조류의 영향으로 부분적인 수괴의 혼합이 이루어지고 있는 새만금 해역이 방조제 완공 이후 외해와의 수괴 혼합이 차단될 경우 저층에 퇴적되는 다량의 유기 탄소가 용존산소 고갈의 주요 원인 중 하나가 될 수 있음을 시사하고 있었다.

사 사

본 연구는 한국해양연구원에서 수행한 국가연구개발사업(해양수산부 출연사업)인 “새만금 해양환경보전대책을 위한 조사연구”의 일환으로 이루어졌습니다. 본 논문에 좋은 조언을 해 주신 임명익 심사위원분들께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 건설교통부, 2003, 건설교통부 영산강 홍수통제소 실시간 수문 자료, <http://www.hrfco.go.kr/youngsan/index.html>.
- [2] 권기영, 문창호, 강창근, 김영남, 2002, “섬진강 하구역에서 염분경사에 따른 입자성 유기물질의 분포”, 한국수산학회지, 35(1), 86-96.
- [3] 김중구, 김양수, 2002, “새만금 사업지구의 연안해역에서 부영양화관리를 위한 생태계모델의 적용 1. 해역의 수질 특성 및 저질의 용출 부하량 산정”, 한국수산학회지, 35, 348-355.
- [4] 김중구, 유선재, 2001, “새만금지역 하구갯벌의 유기물 분해 능력 평가”, 한국환경과학회지, 10, 315-321.
- [5] 김중구, 유선재, 조은일, 안옥성, 2003, “새만금 갯벌의 중금속 분포 특성”, 한국수산학회지, 36, 55-61.
- [6] 손주원, 2001, “연안 환경에서 유기 화합물에 대한 특성 연구”, 인하대학교 대학원 이학석사학위논문, 81 pp.
- [7] 손주원, 박용철, 이효진, 2003, “한국 연안수에서 총유기탄소 및 화학적 산소요구량 분포 특성”, 한국해양학회지 ‘바다’, 8(3), 317-326.
- [8] 양재삼, 정주영, 허진영, 이상호, 최진용, 1999, “금강하구의 물질수지 1. 영양염의 계절적 분포”, 한국해양학회지 ‘바다’, 4(1), 71-79.
- [9] 유명진, 홍대벽, 조용균, 권은미, 구윤희, 2000, “새만금 유역의 강우시 오염물질 유출특성”, 대한환경공학회지, 22, 1609-1616.
- [10] 유선재, 김중구, 조은일, 2003, “새만금 갯벌의 입도조성과 유기물질 분포특성”, 한국수산학회지, 36, 49-54.
- [11] 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.
- [12] 윤철호, 2004, “금강 하구역에서의 용존 유,무기 화합물의 지화학적 거동 연구”, 인하대학교 대학원 이학박사학위논문, 95pp.
- [13] 이상호, 최현용, 손영태, 권효근, 김영곤, 양재삼, 정해진, 김중구, 2003, “하계 서해안 새만금 연안역 주변 저염수와 순환”, 한국해양학회지, ‘바다’, 8(2), 138-150.
- [14] 정해진, 유영두, 김재성, 2002, “전북 새만금 남쪽 해역의 유해성 적조 발생연구 2. 1999년도 여름-가을 종속영양성 와편모류와 섬모충류의 시간적 변화”, 한국해양학회지, ‘바다’, 7, 140-147.
- [15] 조영길, 류상욱, 구영경, 김주용, 2001, “새만금 조간대 표층 퇴적물의 성분원소 함량과 지화학적 특성”, 한국해양학회지, ‘바다’, 16, 27-34.
- [16] 최병호, 강용덕, 1990, “새만금해역 방조제건설이 조석에 미치는 영향-초기평가”, 한국해양학회지, 2, 34-42.
- [17] 하선중, 2003, “만경강 하구역에서의 용존 유,무기 화합물의 지화학적 거동 연구”, 인하대학교 대학원 이학석사학위 논문, 83 pp.
- [18] 황갑수, 신형선, 김강주, 여성구, 박성민, 임규재, 2002, “새만금지역 갯벌 환경(폐류, 저질)에서의 중금속 분포특성”, 수질보전/한국물환경학회지, 18, 341-354.
- [19] Argyrou, M.E., T.S. Bianchi and C.D. Lambert, 1997, “Transport and fate of dissolved organic carbon in the Lake Pontchartrain estuary, Louisiana, U.S.A”, Biogeochemistry, 38, 207-226.
- [20] Artemyev, V.E., 1996, Geochemistry of organic matter in river-

- sea systems. Kluwer Academic Publishers, 74-88.
- [21] Baker, J.R., M.W. Milke and J.R. Mihelcic, 1999, "Relationship between chemical and theoretical oxygen demand for specific classes of organic chemicals", *Water Research*, 33, 327-334.
- [22] Boyle, E.A., R. Collier, A.T. Dengler, J.M. Edmond, A.C. Ng and R.F. Stallard. 1974, "On the chemical mass-balance in estuaries", *Geochim. Cosmochim. Acta*, 38, 1719-1728.
- [23] 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.
- [24] Callahan, J., M. Dai, R.F. Chen, X. Li, Z. Lu, and W. Huang, 2004, "Distribution of dissolved organic matter in the Pearl River estuary, China", *Marine Chemistry*, 89, 211-224.
- [25] Cauwet, G. 2002, DOM in the coastal zone. In: *Biogeochemistry of marine dissolved organic matter*. edited by Hansell, D.A. and C.A. Carlson. Academic Press, Amsterdam, Boston. 579-609.
- [26] Cauwet, G. and I. Sidorov, 1996, "The biogeochemistry of Lena River: organic carbon and nutrients distribution", *Marine Chemistry*, 53, 211-227.
- [27] Cauwet, G. and F.T. Mackenzie, 1993, "Carbon inputs and distribution in estuaries of turbid rivers: the Yang Tze and Yellow river(China)", *Marine Chemistry*, 43, 235-246.
- [28] Doval, M.D., F.F. Perez and E. Berdalet, 1999, "Dissolved and particulate organic carbon and nitrogen in the Northwestern Mediterranean", *Deep-Sea Research I*, 46, 511-527.
- [29] Duinker, J.C., 1980, Suspended matter in estuaries: adsorption and desorption process, In: *Chemistry and Biogeochemistry of Estuaries*, edited by Olausson, E. and I. Cato. John Wiley & Sons, Chichester, 121-151.
- [30] Hedges, J.I. and R.G. Keil, 1999, "Organic geochemistry perspectives on estuarine process: sorption reactions and consequences", *Marine Chemistry*, 65, 55-65.
- [31] Hedges, J.I., G.L. Cowie, J.E. Richey and P.D. Quay, 1994, "Origins and processing of organic matter in the Amazon River as indicated by carbohydrates and amino acids", *Limnol. Oceanogr.*, 39, 743-761.
- [32] Herman, P.M.J. and C.H.R. Heip, 1999, "Biogeochemistry of the maximum turbidity zone of estuaries(MATURE): some conclusions", *J. of Marine Systems*, 22, 89-104.
- [33] Klinkhammer, G.P., J. McManus, D. Colbert and M.D. Rudnicki, 2000, "Behavior of terrestrial dissolved organic matter at the continent-ocean boundary from high-resolution distributions", *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64, 2765-2774.
- [34] Li, Y.H. and L.H. Chan, 1979, "Desorption of Ba and Ra-226 from river-borne sediments in the Hudson estuary", *Earth. Planet. Sci. Lett.* 43, 343-350.
- [35] Liss, P.S., 1976, Conservative and non-conservative behavior of dissolved constituents during estuarine mixing, In: *Estuarine Chemistry*, edited by Burton, J.D. and P.S. Liss. Academic Press, New York, 93-130.
- [36] Maeda, M. and H.L. Windom. 1982, "Behavior of uranium in two estuaries of the southeastern United States", *Marine Chemistry*, 11, 427-436.
- [37] Michaelis, W., V. Ittekkot and E.T. Degens, 1986, River inputs into oceans, In: *Biogeochemical processes at the land-sea boundary*, edited by Lasserre, P. and J.-M. Martin, Elsevier, Amsterdam, 37-52.
- [38] Miller, A.E.J., 1999, "Seasonal investigation of dissolved organic carbon dynamics in the Tamar Estuary, U.K.", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 49, 891-908.
- [39] Morris, A.W. 1985, Estuarine chemistry and general survey strategy, In: *Practical estuarine chemistry*, edited by Head, P.C., Cambridge university press, London, 1-60.
- [40] Murrell, M.C. and J.T. Hollibaugh, 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.
- [41] Nienhuis, P.H., 1981, Distribution of organic matter in living marine organism. In: *Marine Organic Chemistry*, Duursma, E.K. and R. Dawson, Elsevier. Amsterdam, 31-69.
- [42] Nixon, S.W. and M.E.Q. Pilson, 1984, Estuarine total system metabolism and organic exchange calculated from nutrient ratios: an example from Narragansett Bay, In: *The estuary as a filter*, edited by Kennedy, V.S., Academic Press, Orlando, 261-290.
- [43] Redfield, A.C., B.H. Ketchum and F.A. Richards, 1963, The influence of organisms on the composition of seawater. In: *The sea*, Vol. 2, edited by Hill, M.N., Wiley-Interscience, New York, 26-76.
- [44] Schubel, J.R. and V.S. Kennedy, 1984, The estuary as a filter: An introduction, In: *The estuary as a filter*, edited by Kennedy, V.S., Academic Press, Orlando, 1-11.
- [45] Sharp, J.H., J.R. Pennock, T.M. Church, J.M. Tramontano and L.A. Cifuentes, 1984, The estuarine interaction of nutrients, organics, and metals: A case study in the Delaware estuary, In: *The estuary as a filter*, edited by Kennedy, V.S., Academic Press, Orlando, 241-258.
- [46] Sharp, J.H., Y. Suzuki and W.L. Munday, 1988, "Intercomparison of dissolved organic carbon analysis in estuarine and coastal waters of the North Atlantic Ocean", *EOS, Transactions, American Geophysical Union*, 69, 1134.
- [47] Sharp, J.H., Y. Suzuki and W.L. Munday, 1993, "A comparison of dissolved organic carbon in North Atlantic Ocean nearshore waters by high temperature combustion and wet chemical oxidation", *Marine Chemistry*, 41, 252-259.
- [48] Stumm, W., and J.J. Morgan, 1996, *Aquatic Chemistry*, 3th Edition. John Wiley and Sons, New York. 1022 pp.
- [49] Sugimura, Y. and Y. Suzuki, 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.
- [50] Warner, T.B., 1972, "Mixing model prediction of fluoride distribution in Chesapeake Bay", *Journal of Geophysical Research*,

- 77, 2728-2732.
- [51] Warnken, K.W. and P.H. Santschi, 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. In: R.F.C. Mantoura, J.M. Martin and R. Wollast, *Ocean Margin processes in Global Change*. Wiley, New York, 365-381.
- [53] Wu, Y., J. Zhang, K.W. Cho, G.H. Hong and C.S. Chung, 2004, "Origin and transport of sedimentary organic matter in the Yalujiang estuary, North China", *Estuaries*, 27, 583-592.
- [54] Zhang, J., S.M. Liu, H. Xu, Z.G. Yu, S.Q. Lai, H. Zhang, G.Y. Geng and J.F. Chen, 1998, "Riverine source and estuarine fate of particulate organic carbon from North China in late summer", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 46, 439-448.
- [55] Zhang, J., 1999, "Heavy metal composition of suspended sediments in the Changjiang(Yangtz River) estury: significance of riverine transport to the ocean", *Continental Shelf Research*, 19, 1521-1543.

2006년 2월 15일 원고접수

2006년 5월 27일 수정본 채택