

금강하구의 물질수지 1. 영양염의 계절적 분포

양재삼 · 정주영 · 허진영 · 이상호 · 최진용
군산대학교 해양학과

Chemical Mass Balance of Materials in the Keum River Estuary 1. Seasonal Distribution of Nutrients

JAE SAM YANG, JU YOUNG JEONG, JIN-YOUNG HEO, SANGHO LEE AND JIN-YONG CHOI
Department of Oceanography, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea

금강에서 외해역으로 전달되는 물질의 수지를 이해하기 위한 연구의 일환으로 금강하구의 영양염의 계절적인 분포를 조사하였다. 1997년에서 1998년간 금강하구의 6개 정점에서 13~24시간동안 연속관측을 통하여 영양염, 부유현탁물질(SPM; Suspended Particulate Matter), 엽록소와 염분을 분석하였으며, 조석자료, 기상자료와 금강 하구언의 담수 방출량 자료도 보조자료로서 사용하였다. 이 연구를 통하여 하구내 영양염의 계절적인 분포의 차이와 이런 현상을 주도하는 요인을 밝히는데 주목적이 있고, 부차적으로 금강하구언 조성 이전과 이후 영양염 분포의 차이를 조사하였다. 금강 배출수내 영양염들의 농도는 계절에 따라 확연히 구별된다. 인산염과 암모니움염은 갈수기에 농도가 높게 나타나는 반면, 풍수기에는 규산염이 높게 나타났고 이때 SPM의 농도도 높게 출현하였다. 그러나 질산염은 연중 일정한 농도를 유지하였다. 이러한 계절적인 차이를 결정하는 주원인은 일차적으로 담수의 유입량이다. 경우에 의한 담수의 희석효과가 이러한 영양염과 SPM의 계절적인 변화를 야기하는 것으로 생각된다. 이러한 과정을 통하여 증가하는 SPM의 농도가 2차적으로 영양염의 분포에 영향을 주는 것으로 생각된다. 조사된 모든 영양염의 주 공급원은 금강에서 유입하는 담수이며 조사된 영양염의 기본적인 분포는 이들이 보존적임을 보인다. 조사를 총괄하여 보면 질산염, 아질산염 그리고 규산염은 계절에 상관없이 거의 보존적인 성격을 나타냈다. 그러나 다른 영양염(인산염, 암모니움염)과 SPM은 계절에 따른 차이가 나타났다. 인산염과 암모니움염은 6월과 10월의 갈수기 동안에는 거의 보존적인 성향을 보인 반면, 풍수기와 5월의 조사에서 첨가현상을 보였다. 이러한 첨가현상에 영향을 주는 주 요인은 봄철 대량 번식된 담수성 플랑크톤이 해수와 접촉함에 따라 사멸하고, 이와 동시에 유입된 유기물의 분해와 SPM에 흡착되어있던 인산염이 용출되는 것으로 생각되며, 저층 플럭스(benthic flux)도 기여하는 것으로 보인다. 하구언 조성 이전과의 비교에서 SPM의 농도가 감소함에 따라 SPM이 하구내 영양염의 재생과정에 미치는 중요성은 현저히 약화되었다. 또한 하구내 영양염의 분포를 결정하는 염분의 분포가 갈수기에는 하구언에서 1~2 km 정도로 근접한 곳에서 염분의 구성이 5~15 psu로 나타나 영양염의 첨가현상등 화학적 변화가 이곳에 집중되고, 풍수기 동안에는 하구 전역에서 이러한 염분분포가 나타난다. 따라서 하구언 조성 이후에 갈수기 동안 하구언에 근접한 일부만이 진정한 하구의 역할을 하고 나머지는 만과 같은 특성을 보이고 있다. 하구언 갑문 폐쇄 이전과 이후의 비교 결과 조석의 차단으로 인한 조류속도의 감소로 인하여 부유현탁물질의 농도가 감소하였으며 영양염류의 농도가 증가하였고, 따라서 식물플랑크톤의 대량번식이 발생할 가능성이 있다.

As part of an on-going project investigating flux of materials in the Keum River Estuary, we have monitored seasonal variations of nutrients, suspended particulate matter (SPM), chlorophyll, and salinity since 1997. Meteorological data and freshwater discharge from the Keum River Dike were also used. Our goal was to answers for (1) what is the main factor for the seasonal fluctuation of nutrients in the Keum River Estuary? and (2) are there any differences in nutrient distributions before and after the Keum River Dike construction? Nitrate concentrations in the Keum River water were kept constant through the year. Whereas other nutrients varied with evident seasonality: high phosphate and ammonium concentrations during the dry season and enhanced silicate contents during the rainy season. SPM was found similar trend with silicate. During the rainy season, the freshwater discharged from the Keum River Dike seemed to dilute the phosphate and ammonium, but to elevate SPM concentration in the Keum Estuary. In addition, the corresponding variations of SPM contents in the estuarine water affected the seasonal fluctuations of nutrients in the Estuary. The most important source of the nutrients in the estuarine water is the fluvial water. Therefore, the distribution patterns of nutrients in the Estuary

are conservative against salinity. Nitrate, nitrite and silicate are conservative through the year. The distribution of phosphate and ammonium on the other hand, display two distinct seasonal patterns: conservative behavior during the dry season and some additive processes during the rainy days. Mass destruction of freshwater phytoplankton in the riverine water is believed to be a major additive source of phosphate in the upper Estuary. Desorption processes of phosphate and ammonium from SPM and organic matter probably contribute extra source of addition. Benthic flux of phosphate and ammonium from the sediment into overlying estuarine water can not be excluded as another source. After the Keum River Dike construction, the concentrations of SPM decreased markedly and their role in controlling of nutrient concentrations in the Estuary has probably diminished. We found low salinity (5~15 psu) within 1 km away from the Dike during the dry season. Therefore we conclude that the only limited area of inner estuary function as a real estuary and the rest part rather be like a bay during the dry season. However, during the rainy season, the entire estuary as the mixing place of freshwater and seawater. Compared to the environmental conditions of the Estuary before the Dike construction, tidal current velocity and turbidity are decreased, but nutrient concentrations and chance of massive algal bloom such as red tide outbreak markedly increased.

서 론

하구는 육지에서 공급된 물질이 해양으로 전달되는 경로로서 흔히 육상기원 물질의 여과장 역할을 한다고 알려져 있다. 이러한 여과작용에는 물리적인 회석작용, 생물에 의한 흡수, 무기물질과의 흡착 및 탈착현상이 관여한다. 하구내에서 이러한 반응의 결과로 육지로부터 기원한 물질이 해양으로 유입하는 양은 하구로 유입한 양의 일부만이 전달되기도 한다. 또한 하구에서 일어나는 반응은 계절의 영향이나 강우량, 혹은 도시하수의 유입 등 인간활동에 의하여 영향을 받게 된다.

육지에서 공급되는 물질 중 해양생태계와 밀접한 연관을 가지는 것이 영양염이다. 하구내 영양염의 분포를 결정하는 가장 중요한 유입원으로는 담수의 유입이고, 제거 요인으로는 식물플랑크톤에 의한 소모가 있다. 질소계 영양염의 공급 및 제거과정은 질산화작용과 탈질산화작용 등을 들 수 있으며, 인산염은 이러한 조건 이외에 인위적인 공급이 중요할 때도 있다. SPM에 흡착되었던 인산염이 탈착되거나(Edmond *et al.*, 1985; Chester, 1990), 철과 결합하여 침전하기도 한다. 규산염의 경우 대부분의 연구에서 보존적인 성향을 보인다고 알려져 있다(Edmond *et al.*, 1985).

현재까지 금강 하구역에서 하구환경에 대해 연구되어진 내용을 보면 Shim and Yang(1982)이 식물플랑크톤의 분포와 군집구조에 관한 연구 이후, 염록소의 분포(기와 김, 1987), 질산화작용(김과 기, 1987), SPM에 결합된 금속의 퇴적작용(Lee, 1985), 저서 구조류에 관한 연구(이, 1988)가 있었다. 이러한 연구들은 하구언 갑문 작동 이전의 연구로서, 그 당시 하구역은 담수 방출량에 비하여 조석의 영향이 상대적으로 우세한 완전혼합형 하구였다(Chung and Bhang, 1984). 그러나 1994년 9월 금강 하구언 수문이 폐쇄됨에 따라 하구역과 금강 상류가 완전 차단되어 하구에 대한 금강 담수의 영향이 감소했다. 특히, 금강 상류로 전파되던 조석이 차단되었고, 갈수기에는 담수의 유입이 미미하고, 풍수기에는 저장된 담수가 일시적으로 방출되는 비주기적 담수 유입으로 인하여 새로운 환경특성을 가지게 되었다(최 등, 1995). 이러한 변화의 하나로 금강하구에서 봄철에 적조가 발생하는 등(Yih *et al.*, 1997) 하구 환경의 변화가 감지되었고, 이러한 현상을

이해하기 위하여 영양염 조사 등 하구 환경에 대한 모니터링이 1995년 이후 1200일 이상 계속되고 있다(이와 양, 1997).

이러한 연구를 통하여 하구환경의 계절적, 연간 변화를 알 수 있고 이를 바탕으로 하여 인간의 영향을 받은 하구의 지화학적 변화, 영양염의 순환, 하구의 생태를 이해할 수 있게 되며, 나아가 황해 생태계의 일부로서 하구환경 변화를 연구하는 모델이 될 수 있다. 우리는 이 연구를 통하여 하구내 영양염의 계절적인 분포의 차이와 이런 현상을 주도하는 요인을 밝히는데 주목적이 있고, 부차적으로 금강하구언 조성이전과 이후의 영양염 분포의 차이를 밝히는데 주력하였다.

지역개괄

한반도 서해 중부역에 위치한 금강 수계는 국내 4대강의 하나로서 발원지인 전라북도 진안에서 군산 하구까지 총연장이 약 400 km에 달하며, 집수면적은 약 9880 km²이다(임과 최, 1996). 금강 하구에는 1988년 군산과 장항을 연결하는 총 1,841 m 길이의 금강 하구언이 건설되었으며, 군산 하구언의 축조로 인해 매년 빈발하는 가뭄과 홍수의 피해를 조절하고 약 143×10⁶ m³ 규모의 농업 및 공업용수를 안정적으로 확보하게 되었다(최 등, 1995). 하구언 갑문 작동 이전에 금강 하구로부터 방출되는 담수는 동계에는 감소하고 하계에는 증가하여 7월부터 9월까지의 방출량이 연간 유량의 60% 이상에 달하며(김과 기, 1987), 연평균 담수 방출량은 156 m³/s(Schubel *et al.*, 1984) 정도이나 하계의 강수량 차이에 따라 년별 방출량이 변화되었다(나, 1993). 이러한 금강 담수 방출량의 계절 변동은 하구의 순환형태를 변경할 뿐만 아니라 부유사의 퇴적과 이동에 영향을 미치며 생화학적 환경 특성요인의 변화를 가져온다.

재료 및 방법

시료 채취

시료의 채수지점은 금강 하구언으로부터 약 4 km 하류지역인 군산검조소에서 매일 얻는 자료를 기본으로 하고(Fig. 1의 정점

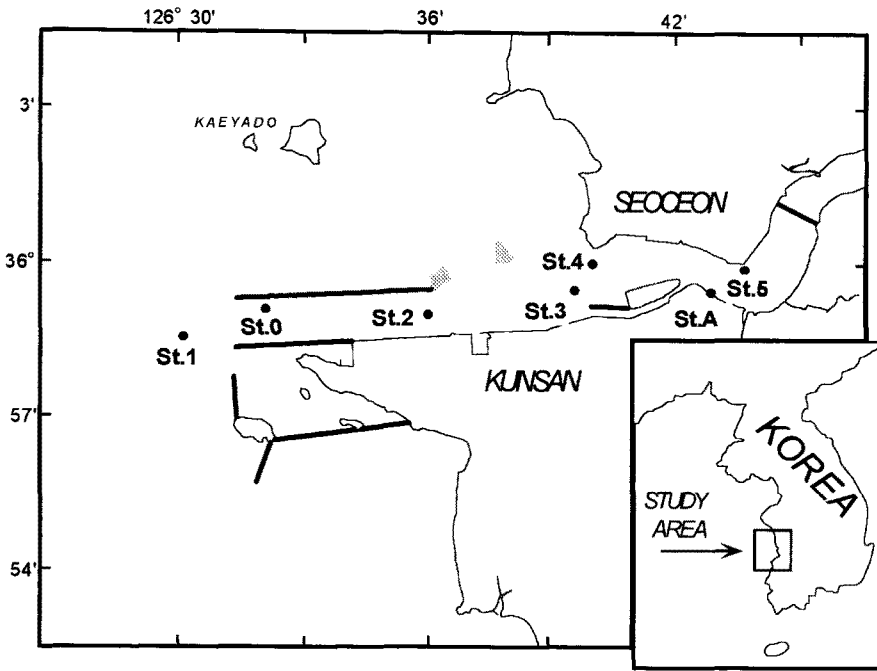


Fig. 1. Sampling locations in the Keum River Estuary.

A), 군산 하구의 외측에서 내측으로 6개의 정점을 선정하였다. 영양염류(암모니움염, 아질산염, 질산염, 인산염, 규산염)와 부유현탁물질, 염분, 수온을 측정하였으며, 보조자료로서 군산 외항 검조소의 조석 자료, 농어촌진흥공사 금강사업단의 금강하구언 담수 방출량 자료를 사용하였다.

분석항목 및 방법

수온과 염분은 CTD(SBE 19)를 이용하여 현장에서 측정하였다. 부유현탁물질은 시료 500 ml를 GF/C 여과지로 여과 후 건조기로 103°C에서 1시간 30분 건조 후 함량을 측정하였다. 인산염은 몰리브덴산 암모늄(ammonium molybdate) 용액, 황산, 아스코르빈산(ascorbic acid), 타르타르산 안티모닐 칼륨(potassium antimonytartrate) 용액의 혼합 시약으로 반응시킨 후 885 nm에서 정량 측정하였다(Parsons et al., 1984). 암모니움염은 페놀로 고정 후 니트로프루시드 나트륨(sodium nitroprusside) 용액, 알칼리 용액, 차아염소산 나트륨(sodium hypochlorite) 용액, 산화제로 반응시킨 후 640 nm에서 정량 측정하였다(Solorzano, 1969). 아질산염은 술페닐 아미드(sulfanilamide) 용액과 나프틸에틸렌디아민염산염(naphthylene diamine dihydrochloride) 용액으로 반응시킨 후 543 nm에서, 질산염은 Cd-Cu 환원 칼럼을 통하여 아질산염으로 환원시킨 후 아질산염과 동일한 방법으로 정량 측정하였고(Parsons et al., 1984), 규산염은 몰리브덴산 암모늄(ammonium molybdate) 용액, 메톨(metol-sulfite) 용액, 옥살산(oxalic acid) 용액, 황산을 이용하여 810 nm에서 정량 측정하였다(Parsons et al., 1984). 엽록소는 여과 후 여과지를 90% 아세톤과 1%의 탄산마그네슘 용액에서 냉장 보관하여 24시간 후에 원심분리기로 분리하여 630, 647, 664, 750 nm에서 정량 측정하였다. 분광광도계(UV-160A, SHIMADZU)를 사용하였다.

조석 주기에 따른 시간별 연속 관측

한 조석 주기동안 조사항목들의 시간적 변화를 이해하기 위하여 4차에 걸쳐 조사를 수행하였다. 1차는 1997년 갈수기인 6월 7일 만조인 11시부터 8일 만조인 12시까지 1시간 간격으로 25시간 동안, 2차는 풍수기인 7월 22일 만조인 10시부터 23일 만조인 11시까지 23시간 동안, 3차는 다시 갈수기인 10월 4일부터 5일까지, 4차 조사는 1998년 5월 23일 만조인 08시부터 21시까지, 표층과 저층에서 채수를 하여 냉동보관 후 10일 이내에 실험실에서 분석하였다.

결 과

금강배출수의 계절적인 변동

조사기간동안 금강하구의 환경에 영향을 주도하는 조차와 금강배출수량이 Table 1에 제시되어 있다. 조사기간은 갈수기인 1997년 6월과 10월, 풍수기인 7월 그리고 그 중간에 해당하는

Table 1. Monthly variation of freshwater discharges and tidal range in the Keum River Estuary from 1997 to 1998

Month	Discharge (ton)		Tidal Range (cm)	
	1997	1998	1997	1998
JAN	90,112,000	142,654,000	497	489
FEB	89,000,000	138,478,000	507	479
MAR	157,757,000	183,859,000	506	502
APR	169,772,000	764,170,000	501	496
MAY	579,914,000	514,934,000	489	485
JUN	598,698,000	710,661,000	493	475
JUL	2,340,890,000	1,516,095,000	490	471
AUG	1,374,209,000	2,684,585,000	491	481
SEP	137,415,000	447,178,000	505	504
OCT	64,990,000		500	491
NOV	234,924,000		485	
DEC			484	

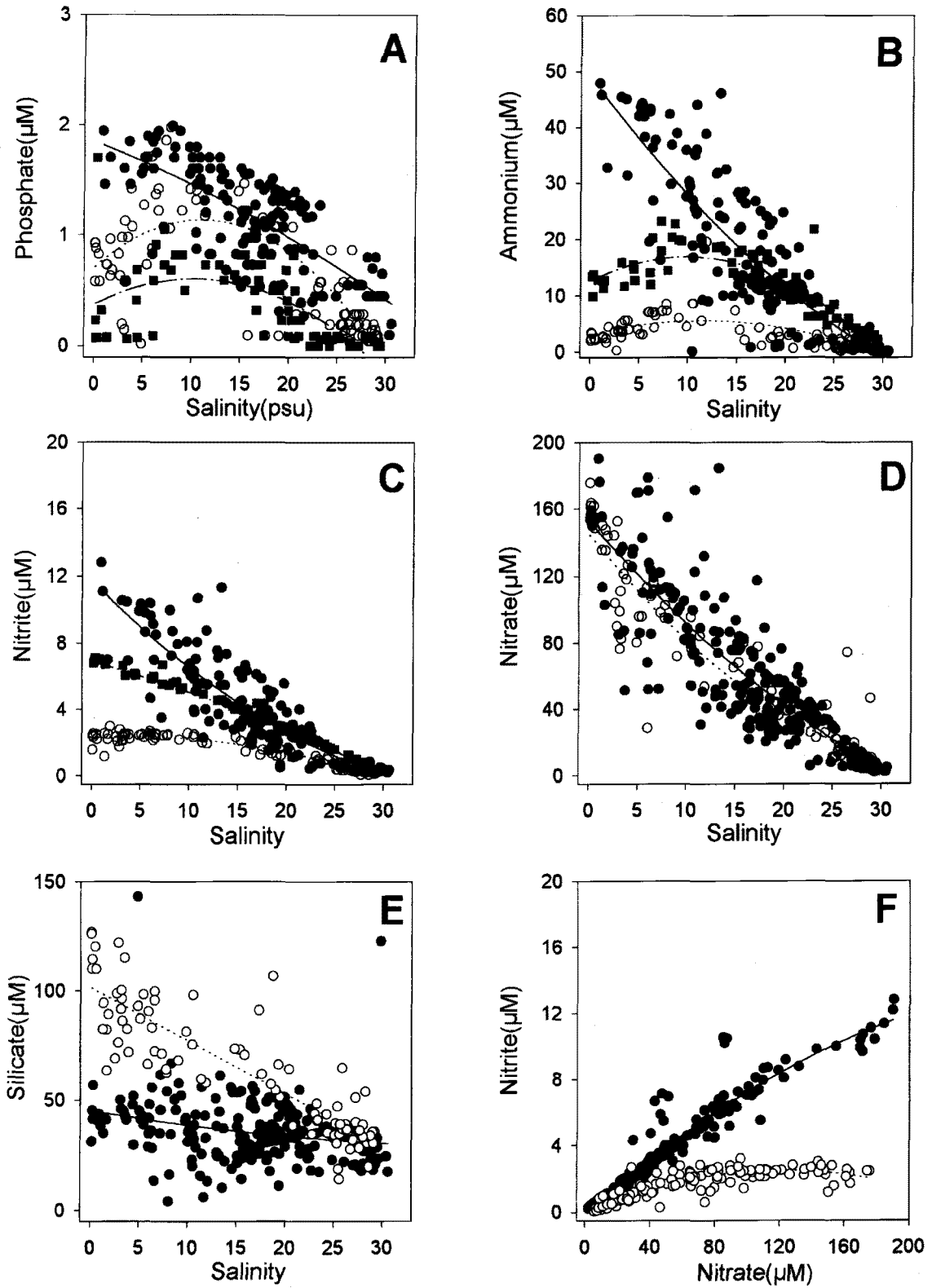


Fig. 2. Comparison of dry(June, October, 1997; May, 1998) and rainy season (July, 1997). A. phosphate vs. salinity, B. ammonium vs. salinity, C. nitrite vs. salinity, D. nitrate vs. salinity, E. silicate vs. salinity, F. nitrite vs. nitrate. ●: June and October, —: Best fitting (June and October), ○: July, ---: Best fitting (July), ■: May, - · - : Best fitting (May).

1998년 5월로 구분하였다. 조사기간동안 조차는 560 cm에서 661 cm에 이르는 대조기이었다.

금강하구내 담수의 flushing time

갈수기와 풍수기에 따른 금강하구내 담수의 flushing time은

갈수기 동안은 21.5일이며 풍수기에는 3.3일에 불과했다. 따라서 금강하구내로 금강에서 배출된 담수는 갈수기가 풍수기에 비하여 약 7배정도 오랜 기간동안 금강하구내에서 체류한다. 또한 갈수기에는 금강배출수의 수량이 적기때문에 화학적인 응결 등의 반응이 주로 생성되는 염분 5~15 psu에 해당하는 수역이 금강배출수에서 1~2 km 내에 위치하는 반면, 풍수기에는 이러한 지역이 전체 하구 40 km에 걸쳐 광범위하게 형성된다.

금강배출수의 계절적인 농도변화

갈수기와 풍수기에 따라 농도의 변화가 없는 영양염은 질산염이다(Fig. 2-D). 이에 반하여 금강 배출수내 영양염들의 농도는 계절에 따라 확연히 구별된다. 갈수기에 농도가 높게 나타나는 영양염은 인산염, 암모니움염, 아질산염이며(Fig. 2-A, B, C), 풍수기에 농도가 높은 것은 규산염과 SPM이다(Fig. 2-E). 5월의 조사시간은 갈수기와 풍수기의 중간정도에 해당하였다.

영양염과 염분의 상관관계

조사기간동안 발견된 영양염과 염분의 상관관계에 대한 그림이 Fig. 2에 있다. 흔히, 하구에서 염분의 농도는 담수와의 단순한 희석의 효과에 의하여 결정되므로 염분과 영양염들과의 상관관계를 나타내면, 각 영양염들의 하구내에서의 농도변화가 단순한 희석작용이 주도하는지, 혹은 하구내에서 첨가, 또는 제거되는가를 나타내는데 유용하다. 1997년~1998년 2년간의 조사를 총괄하여 보면 질산염, 아질산염 그리고 규산염은 계절에 상관없이 거의 보존적인 성격을 나타냈다. 그러나 다른 영양염(인산염, 암모니움염)과 SPM은 계절에 따른 차이가 나타났다. 인산염과 암모니움염은 6월과 10월의 갈수기 동안에는 거의 보존적인 성향을 보인 반면, 풍수기인 7월과 5월의 조사에서는 첨가현상을 보였다(Fig. 2-A, B).

토 의

금강하구내 영양염의 공급원

금강하구 내항의 정점 A에서 800일 이상 연속 관측한 결과에 의하면 영양염류의 농도는, 하구의 담수 방출량과 반비례의 관계를 나타내며, 금강배출수가 주요 공급원이다(이와 양, 1997).

하구내에서 영양염의 첨가 및 제거에 영향을 주는 기작들

하구내에서 질소계 영양염의 농도를 변화시킬 수 있는 여러 제반과정 중에 가장 기본적인 것은 금강배출수에 비하여 농도가 낮은 해수와 희석으로 볼 수 있다. 이러한 물리적인 과정 이외에 생화학적 제거기작은 하구내에서 식물플랑크톤에 의한 소모(Nixon & Pilson, 1983)와, 이러한 과정을 통하여 생성된 식물플랑크톤의 생물량(biomass) 즉, 유기물이 퇴적물로 침전 제거되는 과정이 주요 경로로 간주된다. 규모는 비록 작지만 퇴적물 표면에서 질산염이 미생물에 의하여 아질산염과 아산화질소, 질소가스로 전환되는 탈질산화과정(Hattori, 1983)등을 들 수 있다. 하구내 질소계 영양염의 농도를 증가시키는 첨가기작으로는 담수에 함유되었던 담수성 식물플랑크톤이 해수와 접촉함으로써 사멸하고, 담수기원 유기물이 하구내에서 산화하여

질소계 영양염의 pool로 공급되는 질산화과정(Kaplan, 1983)과, 퇴적물 공급수에 함유되었던 질산염과 암모니움염의 용출을 들 수 있다. 이외에도 인위적으로 도시하수에서 유입된 질소원도 첨가원이 될 수 있다(Wollast, 1983).

하구내에서 인산염의 농도를 증가시키는 첨가과정에는 퇴적물로부터 복잡한 일련의 과정이 포함되어 있다. 여기에는 퇴적물로부터의 용출과 SPM로부터의 탈착이 있다. 이 중 하구에서 해수와 담수가 접촉시 SPM에 흡착되었던 인산염이 탈착하는 것이 가장 중요한 기작이다(Edmond *et al.*, 1985; Chester, 1990). 하구로 유입하는 담수에 포함된 인산염의 대부분은 입자와 결합되어 있으며 이러한 입자가 해수와 접촉하여 하구에서 침전할 때 인산염이 탈착하는 것으로 알려져 있다. 강물에 의하여 유입되는 인산염의 경우도 ½이 입자상과 결합된 상태로 이동한 후 하구 상부에서 해수와 접촉하면 탈착되어 하구내의 인산염의 푸울로 공급된다(Chester, 1990). 질산염과 마찬가지로 인산염의 하구내 공급원으로 가정하수의 유입을 제외할 수 없다. 하구내에서 인산염을 제거하는 기작으로는 식물플랑크톤에 의한 소모가 있다. 이러한 과정을 통하여 생성된 해수성 식물플랑크톤이 하구내 저질로 침전하여 제거되는 과정이 중요하며, 이렇게 생성된 유기물과의 흡착(Callander & Hammond, 1982)에 의한 침전 제거과정도 있다.

강물과 하구내에서 규산염의 주 공급원은 결국 암석과 토양의 풍화산물이다. 규산염은 대규모의 강 예를 들면, 양자강의 하구에서 보존적인 성향을 보인다는 보고(Edmond *et al.*, 1985)가 있다. 규산염의 특징은 질소계 영양염과 인산염이 도시하수의 영향에 민감한 반면, 규산염은 강우량등 자연적인 요인에만 영향을 받고, 소규모 하천은 하천마다 특징을 가지고 있다(Smith *et al.*, 1985). Chester(1990)에 의하면 대부분의 강에서 강물에 의하여 유입된 규산염의 ½이 즉각적으로 식물플랑크톤에 의하여 소모된다고 보고하였다.

첨가 및 제거에 영향을 주는 계절적인 조건 변화

갈수기와 풍수기 사이에 가장 확실하게 나타나는 차이는 금강배출수량의 차이이며, 이로 인한 일차적인 희석작용이 풍수기가 갈수기보다 크게 나타날 것이다. 이러한 배출량의 차이로 인하여, 갈수기때 담수가 하구내에서 21.5일에 해당할 정도로 장기간 체류하는데 반하여 풍수기에는 체류시간이 단지 3.3일에 불과하여 장시간을 요하는 화학반응, 즉 질소계 유기물이 산화하여 영양염의 푸울로 유입되는 질산화반응이 일어나기 위하여 갈수기가 더 높은 조건으로 생각된다(양 등, 1998).

풍수기의 증가된 배출량으로 자연히 배출수중 SPM의 농도는 풍수기가 높게 나타나고 갈수기에는 비교적 낮게 나타나며, 특히 염분이 5~15 psu가 나타나는 해역, 소위 말하면 최대탁지역(turbidity maximum zone)에서 가장 높게 나타난다(Fig. 3-E). 이러한 SPM의 농도증가는 풍수기에는 SPM의 농도가 평균 98 mg/l (2~764 mg/l)로 상승하지만 갈수기에는 평균 37 mg/l(1~436 mg/l)로 감소한다. 따라서 SPM이 영양염의 농도에 증가요인으로 작용하는 경우 풍수기때 더욱 큰 영향을 주리라고 생각된다.

식물플랑크톤이 하구내 영양염의 조성에 영향을 주는 것은 담수성 식물플랑크톤이 해수와 접촉에 의하여 사멸하여 수중으

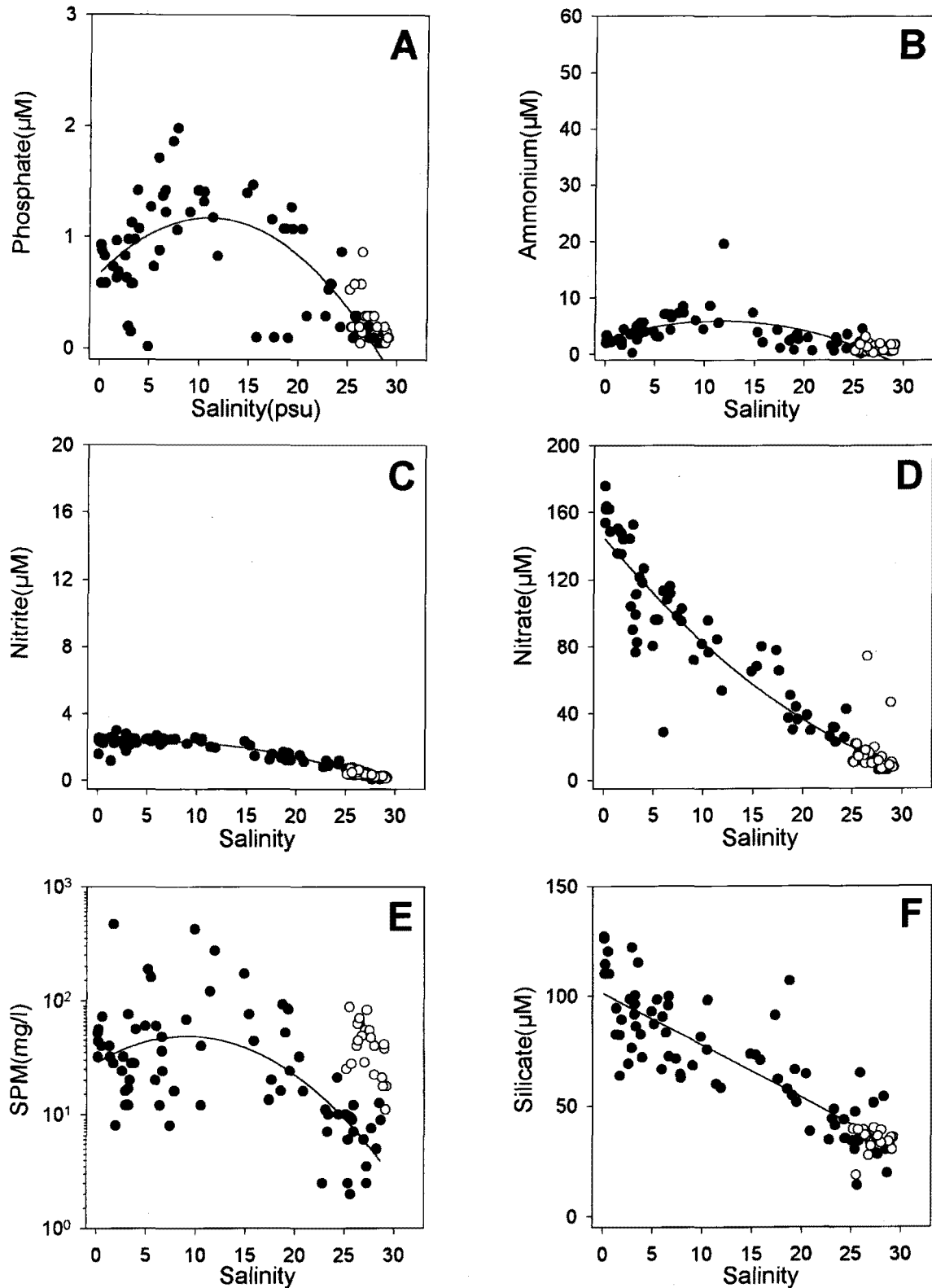


Fig. 3. Correlations of nutrients vs. salinity and suspended particulate matter vs. salinity during the rainy season. A. phosphate vs. salinity, B. ammonium vs. salinity, C. nitrite vs. salinity, D. nitrate vs. salinity, E. suspended particulate matter vs. salinity, F. silicate vs. salinity. ●: Surface, —: Best fitting(surface), ○: Bottom.

로 인산염을 공급하게 되고 저층으로 공급된 유기물에 함유되었던 인산염이 용출되는 기작이 인산염의 농도를 증가시키며,

인산염의 용출과 함께 유기물이 일차적으로 산화되면 암모니움염이 생성된다.

갈수기와 풍수기의 비교

전반적으로 갈수기와 풍수기에 유입하천수의 농도 차이가 없는 것은 질산염이고 암모니움염과 아질산염은 갈수기에 농도가 높고, 규산염은 풍수기에 농도가 높으며, 5월 조사기간은 갈수기로는 비교적 담수배출량이 풍부하여 갈수기와 풍수기의 점이적인 성향을 보인다(Fig. 2). 이것은 갈수기에는 담수의 하구내 체류시간이 길고 SPM의 농도는 낮다는 점과, 풍수기에는 담수의 하구내 체류시간은 짧지만 SPM의 농도는 현저하게 높아진다는 점을 감안하면 전체적으로 이해가 가능하다. 금강하구로 유입하는 하천수 또한 하구언의 조성으로 갈수기에는 강물의 유속은 느려지고, 체류시간이 길어지므로 금강호수 내에서 일어나는 유기물 산화 등의 반응에 의해 인산염, 암모니움염, 아질산염의 농도가 증가하는 것으로 생각된다. 그러나 풍수기 동안 강물의 이동속도가 증가하고 따라서 강의 저층에서 부유한 SPM의 농도가 증가하는 것이 규산염의 증가와 일치하는 것은 규산염의 공급원이 SPM임을 시사한다.

갈수기: 1997년 6월과 10월에서 모든 영양염이 보존적인 성향을 보인다. 그러나 갈수기와 풍수기의 중간에 해당하는 1998년 5월의 조사결과는, 질산염, 아질산염 그리고 규산염은 염분과의 상관관계에서 보존적인 성격을 보이고, 인산염은 명백하게 첨가적인 반응이 하구내에 존재함을 보이며 암모니움염은 약한 첨가현상을 보인다. 이는 양 등(1998)이 하구내에서 인산염과 암모니움염의 상당량의 추가적인 공급이 존재함을 보인 것과 일치하고 있다. 이러한 첨가기작은 주로 염분이 5~15 psu에 해당하는 곳에서 주로 발생하는 것으로 보인다. 첨가기작은 1998년 5월의 조사(Fig. 4)에 나타난 엽록소가 염분이 매우 낮은 곳에서 급격하게 감소하는 현상으로 설명이 가능하다. 이것은 담수성 식물플랑크톤이 해수와 접촉에 의하여 사멸하고 이로 인하여 공급된 유기물에 함유되었던 인산염이 용출된 것으로 보인다. 이때 공급된 인산염의 양을 Perry(1976)의 P:Chl-a의 비로서 추산하면 하구수의 인산염 농도는 0.48 μM 정도를 증가시킬 수 있다.

이러한 기작으로 저층수의 암모니움염의 농도 상승도 설명이 가능하다. 그러나, 이러한 현상은 유기물의 산화가 진행함에 따라 암모니움염은 다소간 상승하지만 아질산염이나 질산염의 상승까지는 진행하지 못하는 것으로 생각된다. 이는 김과 기(1987)에 의하면 금강하구에서 갈수기때 암모니움염의 농도가 하구 상부에서 확연하게 증가하고 이어서 질산화작용에 의하여 아질산염과 질산염도 다소 증가한 내용과는 차이가 난다. 그들의 조사는 하구언이 조성되기 전에 조사한 것으로, 그들은 질산화작용을 진행하기 위하여 SPM의 중요성을 지적하였다. 하구언 조성 이전에는 금강하구 입구에서 50 km 떨어진 강경에 이르는 부분까지 강한 조류에 의하여 SPM의 농도가 평균 150 mg/l였다. 그러나 하구언 조성이후 본 조사의 경우 대부분 갈수기때 평균 37 mg/l, 풍수기때 평균 98 mg/l 이하로 급격하게 감소한 점을 감안하면 이러한 SPM의 영향이 감소하였음을 알 수 있다. 따라서 하구언 조성 이후 질산화과정이 전보다 진행속도가 느린 것으로 보인다. 이것은 본 조사에서도 갈수기 동안 질산염과 아질산염은 양의 상관관계를 가지지만 풍수기에는 상관관계가 소멸되는 것으로도 알 수 있다(Fig. 2-F).

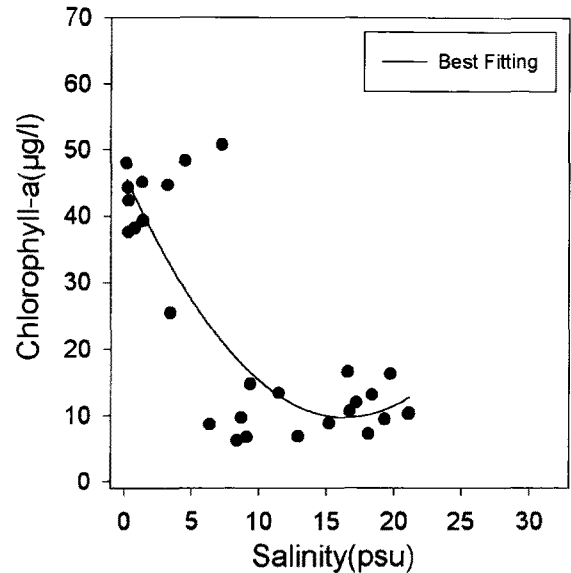


Fig. 4. Correlation of chlorophyll-a vs. salinity during the dry season (St. 5).

질소의 제거기작에서 나타난 것과 같이 하구언의 담수 배출구에 인접한 곳인 정점 5에서 매우 높은 엽록소 농도를 나타내고, 이들 대부분은 담수성 플랑크톤에 의한 것으로써 정점 5로부터 염분이 증가함에 따라 급격히 사멸한다(Fig. 4). 질산염과 아질산염의 상관관계가 매우 높은 것은 일견 당연하게 보인다. Fig. 2-F에서 만약 탈질산화과정이 활발하다면, 아질산염의 추가공급으로 인한 첨가현상이 나타날 것으로 생각된다. 이것은 질소계 영양염의 순환중 흔히 거론되는 탈질산화과정이 수온이 높고 체류시간이 비교적 긴 갈수기에도 중요한 질소 제거기작으로 작동하지 않고 있음을 보인다. 이는 탈질산화과정이 주로 온도가 높고 산소의 농도가 낮은 여건에서 왕성하다는 것을 감안하면 금강하구가 하구언 조성후 유기물의 농도가 증가하고 해수의 유동이 현저하게 감소하였음에도 불구하고 아직까지 저층에서 산화상태가 잘 유지되고 있음을 보인다.

이상을 정리하면 갈수기에 공통적으로 나타난 영양염의 분포는 보존적이다. 그러나 풍수기와 갈수기의 점이시기인 5월의 조사에서는 인산염과 암모니움염의 첨가현상이 다소 나타났고, 이것은 SPM에 부착되었던 인산염의 용출과 유기물과 생물사체에 포함되었던 유기질소성분들의 산화에 의한 공급으로 볼 수 있다.

풍수기: 1997년 7월의 자료에서 역시 질산염과 규산염은 농도의 변화 없이 보존적인 성향을 보이는 반면 하구내 해수 자체의 영양염 농도가 급격히 감소한다. 이러한 현상은 유입 하구수의 암모니움염과 아질산염 농도가 급격하게 감소하기 때문이다(Fig. 3-B, C, D, F). 이는 공급량은 일정하지만 충분한 강우량에 의하여 희석되어 농도가 낮아지게 된다는 것을 의미한다. 인산염은 여전히 염분이 5~15 psu에 해당하는 곳에서 약한 첨가현상을 나타낸다(Fig. 3-A). 풍수기때 암모니움염은 유입하는 금강담수의 농도가 낮기 때문에 염분이 낮은 하구의 상부와 염분이 높은 하구의 하부간에 암모니움염 농도 차이는 별로 없다. 따라서 갈수기와 풍수기 사이에 이러한 영양염의 공급량 변화가 없

다 하더라도 막대한 양의 담수유입으로 희석효과가 나타나는 것으로 생각된다. 이러한 차이로 인하여 갈수기때 담수가 하구 내에서 21.5일 동안 장기간 체류하는데 반하여 풍수기에는 체류시간이 단지 3.3일에 불과하여, 이러한 반응이 일어나기에는 하구내에서 체류시간이 충분하지 않은 것도 영향을 줄 것이다.

이러한 제반과정을 정성적으로 비교하면, 갈수기에 비하여 풍수기때 담수의 공급량이 증가하므로 질산염을 제외한 영양염의 농도는 감소한다. 또한 하구내에서도 담수의 체류시간이 짧으므로 상기한 모든 화학적인 반응이 일어나더라도 희석될 것으로 생각된다. 따라서 첨가각도 미약하게 나타난다. 그러나 이러한 첨가각도에 중요한 영향을 주는 SPM의 농도 자체는 풍수기때는 염분의 농도가 낮은(5~15 psu) 지점에서 최대 혼탁도를 보이는 반면(Fig. 3-E), 갈수기에는 염분의 농도가 다소 높은 10~25 psu에서 최대 혼탁도를 보인다. 이 또한 갈수기에도 하구연으로부터 담수의 방출시 SPM의 농도가 증가하지만, 담수 방출량이 적기때문에 하구의 기본적인 배경 염분의 농도가 풍수기에 비하여 높다. 따라서 이러한 SPM은 하구 자체의 것이라기 보다는 금강호의 저층 퇴적물이 담수 방출시 배출된 것으로 생각된다.

하구연 갑문 폐쇄 이전과 이후의 비교

갑문 폐쇄 이전의 조사(김과 기, 1987)와 영양염 농도를 비교하면, 이전의 암모니움염 농도는 2~17 $\mu\text{g/l}$, 아질산염은 1~2 $\mu\text{g/l}$, 질산염은 20~100 $\mu\text{g/l}$ 에 비하여, 폐쇄 이후 암모니움염 농도는 15~30 $\mu\text{g/l}$, 아질산염은 2~4 $\mu\text{g/l}$, 질산염은 60~120 $\mu\text{g/l}$ 을 나타낸다. 따라서 영양염류는 2~7배 증가하였다.

염록소 농도에 있어서 갑문 폐쇄 이전의 갈수기인 4월에 관측된 평균농도는 1.4 $\mu\text{g/l}$, 풍수기인 7월에 관측된 평균농도는 6.8 $\mu\text{g/l}$ 로 나타났으며(기와 김, 1987), 갑문 폐쇄 이후 4월의 농도는 20~30 $\mu\text{g/l}$ 이고 7월의 농도는 5~10 $\mu\text{g/l}$ 로서 하구연 갑문의 폐쇄 이후 염록소의 농도가 약 20 배 증가하였다(이와 양, 1997). 그러므로 일차생산에 필요한 SPM의 감소로 인한 일사량의 확보, 높아진 영양염 농도, 안정된 수층의 형성등 식물플랑크톤이 대량으로 증식하는 데 필요한 조건을 갖추게 되었다.

사 사

본 연구는 1996년 교육부와 1998년 환경부 G-7 과제 연구비 지원에 의하여 수행된 것입니다. 본 연구의 조석 자료에 협조해 주신 장항수로국과 금강하구연 담수방출량 자료에 협조해 주신 농어촌진흥공사 금강사업단에 감사드립니다. 본 연구과정 중의 토론 등 많은 도움을 준 군산대학교 해양학과 최현용 교수, 정해진 교수와 화학실험실의 김병훈군 외 모든 분들께 감사드립니다.

참고문헌

김경렬, 기준학, 1987. 금강 하구에서의 화학적, 생물학적 제과정에 관한 연구. 1. 질소계 화합물의 순환: 전반적 고찰. 한국해양학회지, 22: 191~206.

- 기준학, 김경렬, 1987. 금강 하구에서의 화학적, 생물학적 제과정에 관한 연구. 1. Chlorophyll-*a* 분포결정 요인에 관하여. 한국해양학회지, 22: 207~215.
- 나태경, 1993. 금강 및 금강 염하구에서 부유퇴적물의 이동과 미량금속원소들의 변화성. 석사학위논문, 서울대학교, 서울, 89 pp.
- 이원호, 1988. 서해 조간대와 조하대의 식물플랑크톤 군집구조의 비교연구. 한국과학재단. 873-0505-0006-1, 153 pp.
- 이용혁, 양재삼, 1997. 금강 하구역에서 영양염류, 염록소, 부유물질과 염분변화에 대한 500일간의 연속관측. 바다, 2: 1~7.
- 임철호, 최문술, 1996. 금강수계의 이화학적 수질 특성에 관한 연구. 군산대학교 해양개발연구, 8: 1~24.
- 최진용, 최현용, 서만석, 1995. 하구연 갑문폐쇄 후 금강하구의 물리, 퇴적학적 특성변화. 한국해양학회지, 30: 262~270.
- Callender, E. and D.E. Hammond, 1982. Nutrient exchange across the sediment-water interface in the Potomac River Estuary. *Estuarine, Coast. Shelf. Sci.*, 14: 101~116.
- Chester, R., 1990. Marine Geochemistry. Unwin Hyman, London, 689 pp.
- Chung, J.Y. and I.K. Bhang, 1984. Circulation dynamics of the Keum River Estuary II. Fluid dynamic characteristics. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 19: 141~151.
- Edmond J.M., A. Spivack, B.C. Grant, H. Ming-Hui, C. Zexiam, C. Sung, and Z. Xiushau, 1985. Chemical dynamics of the Changjiang estuary. *Continental Shelf Res.*, 4: 17~36.
- Hattori, A., 1983. Denitrification and dissimilatory nitrate reduction. In: Nitrogen In Marine Environment, edited by Carpenter E.J. and D.C. Capone, Academic Press, New York, pp. 191~232.
- Kaplan, W.A., 1983. Nitrification. In: Nitrogen In Marine Environment, edited by Carpenter E.J. and D.C. Capone, Academic Press, New York, pp. 139~190.
- Lee, C.B., 1985. Sedimentary processes of fine sediments and the behavior of associated metals in the Keum Estuary, Korea. In: Marine and Estuarine Geochemistry, edited by Sigleo, A.C. and A. Hattori, Lewis Publishers Inc., Michigan, pp. 209~225.
- Nixon, S.W. and M.E. Pilson, 1983. Nitrogen in Estuaries and Coastal Marine System. In: Nitrogen In Marine Environment, edited by Carpenter E.J. and D.C. Capone, Academic Press, New York, pp. 565~638.
- Parsons, T.R., Y. Maita and C.M. Lalli, 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press, New York, 173 pp.
- Perry, M.J., 1976. Phosphate utilization by an oceanic diatom in phosphorus-limited chemostat culture and in the oligotrophic waters of the central North Pacific. *Limnol. Oceanogr.*, 21: 88~107.
- Schubel, J.R., H.T. Shen and M.J. Park, 1984. A comparison of some characteristic sedimentation processes of estuaries entering the Yellow Sea. In: Proc. Korea-U.S. Seminar and Workshop on Marine Geology and Physical Processes of the Yellow Sea, edited by Bark, Y.A., O.H. Pilkay and S.W.

- Kim, pp. 286–308.
- Shim J.H. and J.S. Yang, 1982. The community structure and distribution of phytoplankton of the Kum River Estuary. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **17**: 1–11.
- Smith, R.E., D.H. Peterson, S.W. Hager, L.E. Schemel and R.E. Herndon, 1985. Seasonal and Interannual nutrient variability in northern San Francisco Bay. In: *Marine and Estuarine Geochemistry* edited by Sigleo, A.C. and A. Hattori, Lewis Publishers, Inc., Michigan, pp. 137–159.
- Solorzano, L., 1969. Determination of ammonia in natural waters by the phenylhypochlorite method. *Limnol. Oceanogr.*, **14**: 799–801.
- Wollast, R. 1983, Interaction in Estuaries and Coastal Waters. In: *The Major Biochemical Cycle and their Interactions*, edited by Bolin, B. and R.B. Cook, John Wiley & Sons, Chichester, pp. 385–410.
- Yih, W.H., J.S. Yang, H.J. Jeong and J.H. Shim, 1997. Recent red tides in Kunsan inner harbor-'The Kunsan Type Red Tide', North Pacific Marine Science Organization (PICES), pp. 1–2.

1998년 8월 10일 원고 접수

1998년 12월 24일 수정본 채택