

## 섬진강 하구역에서 영양염의 하구내 거동과 플럭스

권기영<sup>1</sup> · 문창호<sup>2</sup> · 이재성<sup>3</sup> · 양성렬<sup>4</sup> · 박미옥<sup>2</sup> · 이필용<sup>1</sup>

<sup>1</sup>국립수산과학원 남해수산연구소, <sup>2</sup>부경대학교 해양학과  
<sup>3</sup>국립수산과학원 연구기획팀, <sup>4</sup>광주대학교 토목환경공학부

## Estuarine Behavior and Flux of Nutrients in the Seomjin River Estuary

KWON KEE-YOUNG<sup>1\*</sup>, CHANG-HO MOON<sup>2</sup>, JAE SEONG LEE<sup>3</sup>, SUNG RYULL YANG<sup>4</sup>,  
MI-OK PARK<sup>2</sup> AND PIL-YONG LEE<sup>1</sup>

<sup>1</sup>South Sea Fisheries Research Institute, NFRDI, Yeosu 556-823, Korea

<sup>2</sup>Department of Oceanography, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

<sup>3</sup>National Fisheries Research & Development Institute, Busan 619-902, Korea

<sup>4</sup>Division of Civil and Environmental Engineering, Kwangju University, Gwangju 503-703, Korea

섬진강 하구역에서 담수와 해수의 혼합 시 영양염의 하구반응을 파악하고 섬진강을 통해 남해연안으로 배출되는 영양염의 플럭스를 추정하기 위하여 1999년 3월부터 2001년 4월까지 섬진강 하구에서 염분경사에 따른 영양염 분포를 조사하였다. 질산염과 규산염은 섬진강으로부터 공급되었고, 인산염은 광양만에서 하구역으로 공급되고 있었다. 섬진강을 통해 광양만으로 배출되는 영양염의 연평균 플럭스는 용존무기질소의 경우  $10.9 \text{ moles} \cdot \text{sec}^{-1}$  ( $4,820 \text{ tonnes} \cdot \text{yr}^{-1}$ ), 인산염은  $0.07 \text{ moles} \cdot \text{sec}^{-1}$  ( $68 \text{ tonnes} \cdot \text{yr}^{-1}$ ), 그리고 규산염은  $13.3 \text{ moles} \cdot \text{sec}^{-1}$  ( $11,747 \text{ tonnes} \cdot \text{yr}^{-1}$ )였다. 봄과 가을철의 갈수기에 중간염분역에서 식물플랑크톤에 의한 활발한 영양염 흡수는 인산염, 규산염 및 암모늄염을 제거시킨 원인으로 판단된다. 이로 인해 광양만에서의 영양염 배출량도 낮게 유지되었다. 이와 대조적으로 하계 풍수기에 영양염은 보존적 또는 공급형태를 보였고, 섬진강을 통해 광양만으로 배출되는 영양염의 플럭스는 높았다. 갈수기에는 중간염분역에서 엽록소 *a* 농도가 높고, 영양염의 분포가 뚜렷하게 제거되는 경향을 보여 섬진강 하구역에서 영양염 분포는 주로 생물학적 과정에 의해 조절되며, 하구역의 기초생산이 광양만으로 배출되는 영양염의 플럭스를 상당히 변화시킬 수 있음을 시사한다.

In order to estimate the nutrient flux of the Seomjin River into the coastal waters of South Sea, and to understand the estuarine reactions during mixing between river water and seawater, we collected surface water along the salinity gradient in the Seomjin River estuary from Mar. 1999 to Apr. 2001. We found that nitrate and silicate were delivered by fluvial input, while phosphate was supplied from disposed wastes in the Gwangyang Bay. Mean annual flux of dissolved inorganic nitrogen (DIN), phosphate and silicate into the Gwangyang Bay was estimated  $10.9 \text{ moles} \cdot \text{sec}^{-1}$  ( $4,820 \text{ tonnes} \cdot \text{yr}^{-1}$ ),  $0.07 \text{ moles} \cdot \text{sec}^{-1}$  ( $68 \text{ tonnes} \cdot \text{yr}^{-1}$ ),  $13.3 \text{ moles} \cdot \text{sec}^{-1}$  ( $11,747 \text{ tonnes} \cdot \text{yr}^{-1}$ ), respectively. An evident removal of phosphate, silicate and ammonium at the mid-salinity zone during the dry season was attributed to the active uptake of phytoplankton, and consequently nutrient flux into the Gwangyang Bay was low. Whereas, during the flood season in summer, conservative or additional distribution of the nutrients was observed in the estuary. As a result nutrient flux into the Gwangyang Bay was maintained high. High concentrations of chlorophyll *a* and the active removal of nutrient during the dry season at the mid-salinity zone suggest that nutrient distribution in the Seomjin River estuary was mainly controlled by biological processes and nutrient fluxes into the Gwangyang Bay might be significantly modified of by the primary production.

**Key words:** Nutrient Behavior, Nutrient Flux, Seomjin River Estuary, Gwangyang Bay

\*Corresponding author: kwonky@momaf.go.kr

## 서 론

일반적으로, 연안의 영양상태는 육상에서 공급되는 영양염에 의해 많은 영향을 받는다. 영양염의 과잉 공급은 부영양화를 초래하여 남해안의 적조발생과 같은 식물플랑크톤 또는 독성을 함유한 조류(algae)의 비정상적인 대규모 성장을 불러온다(Sanders *et al.*, 1997; 김 등, 2001). 또한 영양염의 비균형적인 공급은 식물플랑크톤의 종조성 변화와 함께 연안 먹이사슬의 변화를 일으킨다(Officer and Ryther, 1980; Rendell *et al.*, 1997). 따라서 연안환경을 효과적으로 관리하기 위해서는 육지에서 해양으로 유입되는 영양염에 대한 정확한 정보를 필요로 한다. 더욱이 영양염은 대부분 강을 통해 하구역을 거쳐 육지에서 해양으로 공급되므로, 하구역에서 영양염 거동과 flux에 대한 연구는 중요하다.

하구는 담수의 유입과 조석 등에 의해 유동성이 큰 동적계를 유지하고 있는 지역으로, 강물을 통해 해양으로 공급되는 영양염의 농도는 해수와 혼합되는 정도에 따라 달라진다. 그리고 하구역내에서 하구의 순환 등 복잡한 물리적 요인들이 영양염의 공급, 제거 및 재순환 등의 생지화학적 과정들에 관여하면서(Moon and Dunstan, 1990) 육상에서 유입된 영양염이 해양에 공급되는 정도는 쉽게 변동된다(Kaul and Froelich, 1984). 예를 들어, 인산염은 하구내에서 부유입자와의 흡착 및 탈착에 의해서 지화학적으로 제거 또는 공급되며, 기초생산 등 생물학적 과정에 의해서 제거 또는 재순환된다(Lebo and Sharp, 1992). 특히, 저산소 환경에서는 Fe(III)이 Fe(II)로 환원되면서 인산염을 방출하기도 하며(Webb and D'Elia, 1980; Zwolsman, 1994), 탁도가 높은 하구역내에서는 입자와 결합되어 있던 인산-염이 해수이온과의 경쟁으로 탈착되어 수중으로 공급된다(Sharp *et al.*, 1982; Froelich, 1988). 용존무기질소는 주로 기초생산자가 섭취해서 제거되고, 유기물질의 재무기질화(remineralization)에 따라 수중으로 재공급된다(Billen *et al.*, 1985). 또한 질소는 암모니아화, 질산화 및 탈질화작용을 포함하는 다양한 미생물 과정을 거쳐 순환된다(Balls, 1992). 이에 더하여 하구역으로 직접 배출되는 생활하수와 산업 배출수는 하구내 영양염 농도를 쉽게 변동시킨다(Sanders *et al.*, 1997). 이와 같은 이유로 하구 내에서 영양염의 flux를 추정하거나 특정 하구역의 flux를 다른 하구역의 flux에 적용하기에는 많은 어려움이 따르며, 하구역에서 영양염에 대한 정량적인 정보를 얻기가 매우 힘들다(Ball, 1992).

그럼에도 불구하고, 하구역을 통해 연안역으로 유입되는 영양염은 궁극적으로 해양의 생산성을 조절하기 때문에 이를 정량화하기 위한 연구는 전 지구적 해양생산성 조절을 이해하기 위해 계속되어 왔다(Kaul and Froelich, 1984). 그러나 우리나라의 비교적 큰 하구역에는 담수 이용을 목적으로 하구둑이 건설되어 있고, 하구역과 연안 내만에 집중되어 발달된 대도시와 공업단지에서 직접 배출되는 오폐수의 영향으로 인해 강물을 통해 연안역으로 배출되는 영양염의 flux를 추정하는데 어려움이 많았으며, 이와 관련된 연구도 매우 부진한 편이다.

하구 입구에서 초저염분해역까지 영양염의 거동을 파악하고 flux를 추정한 연구는 섬진강 하구에서 풍수기의 라뎁 동위원소의 흡·탈착 거동과 영양염 flux에 대해 조사한 Kim(1992)과 섬진강 하구에서 영양염의 순환과정과 flux에 대해 조사한 Lee *et al.*(2003)

의 연구뿐이며, 이들 연구도 풍수기 또는 갈수기에 대한 단기간의 연구결과만을 제시하고 있다. 한반도 하구역에서 영양염의 분포에 대한 연구는 대부분 하구둑으로 인해 염분이 높아진 하구 입구 및 근접한 내만에서 계절변화에 따른 영양염 분포변화를 비교하는데 국한되어 있다. 금강(김과 기, 1987; 양과 김, 1990; 양 등, 1999), 낙동강(문과 최, 1991)의 하구역에서 조사된 연구들도 주로 하구둑과 관련하여 하구둑 건설 전과 후의 환경특성 변화에 중점을 두었거나, 하구역 주변의 대도시와 공업단지에 의한 환경오염과 관련된 연구이다. 섬진강 하구역에서도 주로 섬진강 하구와 연결된 광양만(심 등, 1984; Kim *et al.*, 1988; 이 등, 2001)과 여수해만(Moon, 1990; 임 등, 2003)의 영양염 분포에 대해 조사가 되어있을 뿐이다.

영양염을 비롯한 화학물질들이 하구역을 통해 육지에서 해양으로 유출되는 과정에서 발생하는 flux를 추정하는 방법은 물질농도와 염분의 상관관계를 이용한 방법(property-salinity: Sharp *et al.*, 1982; Billen *et al.*, 1985; Rendell *et al.* and many others), 평균 플럭스를 이용한 방법(mean fluxes: Lebo and Sharp, 1992), 물질수지 방정식을 이용한 방법(chemical mass balances: Lebo and Sharp, 1992; Sanders *et al.*, 1997)으로 발전되어 왔다. 이 중, 염분이 하구에서 보존적 혼합을 한다는 가정 하에 염분에 대한 물질의 농도를 도시하는 방법(property-salinity)은 수괴의 복잡한 유동(hydrodynamics)과 담수 및 해수 단성분(endmember) 농도의 급격한 변화 때문에 주의 깊은 조사와 해석이 요구되는 단점이 있음에도 불구하고(Boyle *et al.*, 1974; Kaul and Froelich, 1984), 물질의 거동을 쉽게 판단할 수 있고, flux를 용이하게 추정할 수 있는 장점 때문에 널리 쓰이고 있다(Sharp *et al.*, 1982, Lebo *et al.*, 1994).

본 연구에서는 2년 동안 10회에 걸쳐 섬진강 하구 입구에서 담수와 해수가 처음 만나는 초저염분역까지 염분 경사에 따른 영양염의 분포양상을 분석하여 섬진강 하구내에서 영양염의 시·공간적 분포특성을 파악하였으며 영양염 농도와 염분의 상관관계 방법을 이용하여 섬진강 하구역을 거쳐 광양만으로 공급되는 영양염의 양을 추정하였다. 또한 영양염과 엽록소 *a* 분포양상을 비교하여 영양염의 거동에 대한 기초생산자의 조절을 이해하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 연구지역

섬진강(34°40'26"~35°50'00"N, 126°51'50"~127°53'05"E)은 전라북도 진안군에서 발원하여 한반도 남해안의 광양만으로 흘러들며, 총 유역 면적은 4900 km<sup>2</sup>이고, 본류의 유로연장이 212 km이다. 섬진강 하구 입구의 조석은 반일주조로 평균대조차는 260 cm이며, 최강 조석류 유속은 광양만 중앙부에서 50~80 cm/s이다. 섬진강을 통하여 광양만으로 유입되는 담수의 유출량은 최근 6개년 연평균 약 73 m<sup>3</sup>/s로, 연간 배출되는 담수의 양은 11~40×10<sup>8</sup> tonnes에 이른다(건설부, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000). 섬진강 하구 입구에는 sandy mud성의 삼각주가 발달해 있으며, 하구 입구에 위치한 태인도 아래 약 21 km<sup>2</sup> 면적의 조간대가 광양제철소(POSCO) 부지로 1980년대부터 매립되었다(Kang *et al.*, 2001).

광양만은 면적이 약 230 km<sup>2</sup>인 반폐쇄된 만으로, 광양시와 하동군 그리고 여수반도와 남해도로 둘러싸여 있으며, 만내에는 중

양에 위치한 묘도를 비롯하여 이십 여개의 섬들이 산재해 있고, 외해인 남해와는 남쪽의 여수해협을 통하여, 그리고 만 동북부의 노량해협을 통하여 진주만과 연결된다.

섬진강 하구역과 광양만 사이에는 하구둑이 건조되어 있지 않아 섬진강 하류일대와 광양만이 하나의 광활한 기수역을 형성하고 있으며, 섬진강 본류에는 대도시와 공업단지가 인접해 있지 않고, 지리산이 인접해 있어 수질이 비교적 양호한 것으로 알려져 있다. 그러나 하구역에 인접한 대단위 산업단지(POSCO, 여천화학단지, 하동화력발전소, 광양 컨테이너 터미널 등)와 도시(광양시, 여천시)에서는 공장폐수와 생활하수가 다량 배출되며(이 등, 2001), 하구입구의 POSCO 매립은 섬진강 하구의 지형 변화와 조류 흐름의 변화를 초래하였다(정 등, 1997). 특히, 섬진강 하류역에서는 대규모 모래채취로 인한 수심 하강과 댐과 취수장의 증가로 인한 유량 감소로 인해 해수의 역류범위가 증가하여 염수피해가 늘고 있다.

**현장조사 및 시료분석**

본 연구는 광양만과 섬진강 하류에서 1999년 3월, 7월, 9월, 11월, 2000년 3월, 4월, 8월, 10월, 2001년 2월 및 4월 총 10회에 걸쳐 조사하였다. 시료는 섬진강 하구 남동쪽에 위치한 난초도에서 담수와 해수가 처음 만나는 지점까지 섬진강 본류를 따라 올라가면서 채취하였으며(Fig. 1), 조사시작은 밀물시간에 맞추어서 실시하였다. 조사정점은 위치보다는 각 조사시마다 염분을 현장에서 측정하여, 약 5 이하의 염분간격으로 결정하였다.

수온 및 염분은 휴대용 수질분석기(Horiba U-10, ORION 135)를 이용하여 현장에서 측정하였으며, 염분에 대해서는 현장에서 해수시료를 따로 채수하여 실험실에서 salinometer(Tsurumi Seiki

Model T.S.E-2) 측정을 병행하였다. 5 이상의 염분역에서는 수질 분석기 염분값을 이용하였으며, 5 이하의 염분역에서는 실험실의 salinometer 염분값을 이용하였다. 섬진강의 강물배수량(river discharge)은 건설교통부의 한국수문조사연보(1999, 2000, 2001)의 유량자료를 이용하였으며, 감조의 영향을 받지 않는 송정지점에서 측정·계산된 유량을 선택하였다.

영양염 분석을 위해서는 선상에서 채수한 표층수 500 mL를 공경 0.45 μm Whatman membrane 여과지로 여과한 후, 분석 시까지 -20 °C에서 냉동 보관하였다. 영양염은 Strickland and Parsons (1972)의 비색법으로 아질산염(nitrite), 질산염(nitrate), 암모니움염(ammonium), 인산염(phosphate), 규산염(silicate)을 측정하였다.

염록소 a 측정을 위해서 표층수 250 mL를 공경 0.45 μm Whatman membrane 여과지로 현장에서 여과하고, 여과가 끝나기 직전 1% 탄산마그네슘 용액으로 여과지를 씻어내린 다음 여과지를 분석 시까지 냉동 보관하였다. 분석을 위하여 여과지를 90% acetone 10 mL를 주입하여 냉암소에서 24시간동안 색소를 추출한 후, 2000 rpm으로 10분간 원심분리시켜 상등액을 형광측정기(Turner Designs Model 10-AU-005)로 측정하였다(Holm-Hansen et al., 1965). 염록소 a의 계산방법과 결과는 권 등(2002)에 자세히 보고하였다.

**영양염의 flux 계산방법**

영양염의 flux는 Boyle et al.(1974), Officer(1979), Kaul and Froelich(1984) 등이 제시한 모델을 이용하여 계산하였다. 간략히 설명하면 염분이 하구에서 보존적 혼합을 한다는 가정 하에 염분을 혼합지수로 사용하여, 하구 혼합과정 중 용존물질의 이류-확산 공식을 세우면 다음과 같다.

$$F=R \cdot \{C-S \cdot dC/dS\} \tag{1}$$

여기서 F는 염분 S인 지점에서 용존물질의 flux(moles · sec<sup>-1</sup>),

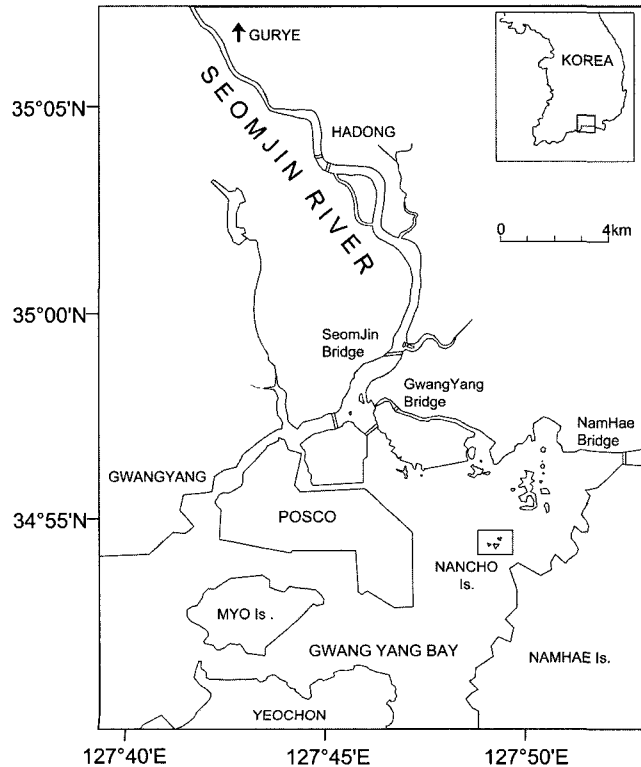


Fig. 1. Map showing the study area.

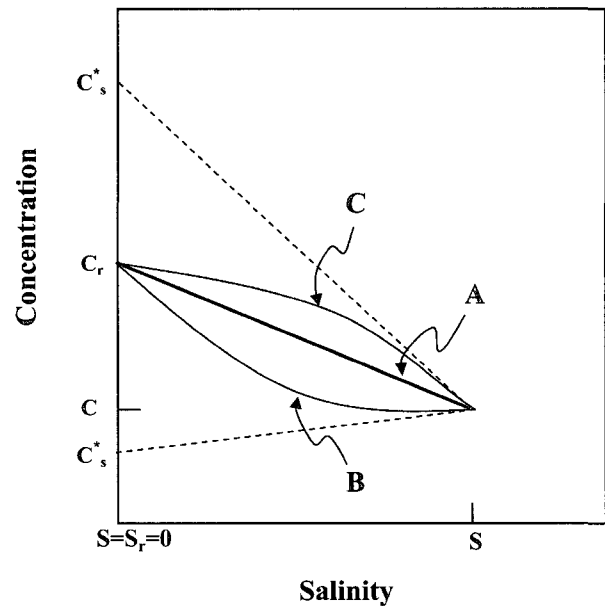


Fig. 2. Simple example of constituent concentration, C, versus salinity. (Officer, 1979; Kaul and Froelich, 1984). A, conservative; B, removal; C, additional (C<sub>s</sub><sup>\*</sup>: intersection of the tangent (dC/dS) to the concentration-salinity curve at S=S<sub>r</sub>).

R은 강물 배출량( $m^3 \cdot sec^{-1}$ ), C는 염분 S인 지점에서 용존물질의 농도( $\mu mol \cdot L^{-1}$ ), S는 염분,  $S_0$ 는 담수 단성분에서 염분이다. 식 1의 { }안의 항은 Fig. 2에서 나타낸 바와 같이 염분이 S이고 농도가 C인 점에서의 접선이  $S=S_0=0$ 인 y축과 만나는 점의 농도 값을 나타낸다. 이 농도 값을  $C_e^*$ 로 표기하며, “임의 염분 S에서의 유효 비혼합 농도(effective unmixed concentration)”라 한다. 즉, 염분 S인 점에서 이론적인 초기 강물 유입 농도를 의미한다. 만일 보존적인 혼합이 발생한다면 모든 염분수치에서  $C_e^*$ 는  $C_0$ (담수 단성분에서의 실지 측정 농도)과 일치할 것이며, 만일  $C_e^*$ 가  $C_0$ 보다 작다면(혹은 크다면) 하구내에서 제거(공급)가 발생됨을 의미한다.

이와 같은 개념을 바탕으로, 조사기간 동안 측정된 영양염과 염분의 상관관계(nutrient-salinity plot)를 도시하고, 가장 근접한 회귀선을 구하였으며, 하구역을 정상상태(steady-state)로 가정하여 영양염 flux를 계산하였다. flux 계산방법은 Kaul and Froelich(1984)에 자세하게 설명되어있다.

### 결 과

#### 염분과 유량

조사기간 동안 염분은 풍수기인 7월과 8월경에 가장 낮았고, 갈수기인 춘계와 추계에 높았다(Fig. 3). 해수와 담수가 처음 만나는 지점으로 예상되는 곳은 하구입구의 난초도로부터 약 8.0 km(1999년 7월)~28.5 km(2001년 4월)의 상류지역이었으며, 하구입구로 설정된 난초도에서 염분은 8.1(1999년 7월)~33.1(2000년 4월)의 범위로 변동하였다(권 등, 2002).

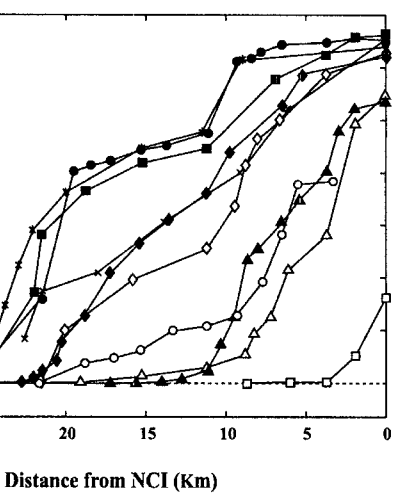
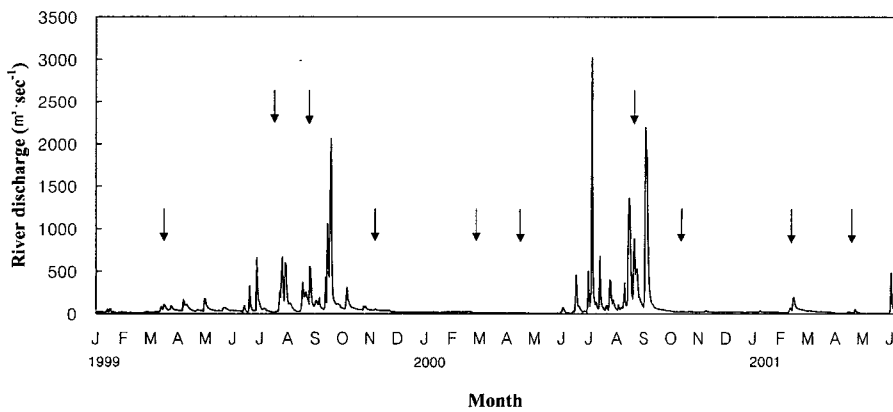


Fig. 3. Salinity change in the surface water of Seomjin River estuary along the upstream distance from the Nan Cho Island.

조사기간 동안 송정지점에서 측정된 월 평균 강물배수량은 4.8~416  $m^3 \cdot sec^{-1}$ 의 범위로, 강물배출은 풍수기인 6월부터 9월까지 집중되었으며, 그 외의 시기에는 강물배출량이 매우 적었다(Fig. 4).

#### 영양염과 엽록소 a 분포

영양염의 조사결과를 Table 1과 Fig. 5에 나타내었다. 아질산염은 평균 0.48~1.58  $\mu mol \cdot L^{-1}$ 의 범위로, 전반적으로 동계와 춘계에는 저염분역 구간에서, 하계와 추계에는 고염분역에서 높은 농

Fig. 4. River discharge (daily means) of Seomjin River at Songjung, Chollan-ando (MOCT, 1999, 2000, 2001). Sampling dates are marked by arrows.

Table 1. Average nutrient concentrations of surface water of Seomjin River estuary and river discharge (Values in parenthesis are ranges)

| Month       | River discharge ( $m^3 \cdot sec^{-1}$ ) | $NO_2-N$ ( $mol \cdot L^{-1}$ ) | $NO_3-N$ ( $\mu mol \cdot L^{-1}$ ) | $NH_4-N$ ( $\mu mol \cdot L^{-1}$ ) | $PO_4-P$ ( $\mu mol \cdot L^{-1}$ ) | $SiO_2-P$ ( $\mu mol \cdot L^{-1}$ ) |
|-------------|--|---------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 26 Mar. '99 | 52.52                                    | 1.11(0.79~1.24)                 | 93.7(43.0~119)                      | 10.7(4.10~28.3)                     | 0.92(0.60~1.42)                     | 66.0(18.3~95.7)                      |
| 31 July '99 | 668.07                                   | 0.54(0.45~0.77)                 | 70.7(60.1~76.9)                     | 9.24(6.00~12.6)                     | 0.97(0.88~1.06)                     | 81.6(70.8~102)                       |
| 4 Sep. '99  | 92.95                                    | 1.13(0.28~3.54)                 | 68.2(16.4~93.5)                     | 4.70(1.80~8.11)                     | 1.03(0.88~1.20)                     | 120.5(42.0~151)                      |
| 13 Nov. '99 | 51.72                                    | 1.28(0.36~2.20)                 | 31.5(5.00~59.5)                     | 5.68(0.21~31.1)                     | 0.49(0.09~1.20)                     | 33.0(13.8~52.5)                      |
| 5 Mar. '00  | 11.67                                    | 0.77(0.29~2.03)                 | 14.9(0.91~43.3)                     | 2.81(0.25~11.6)                     | 0.48(0.18~1.01)                     | 20.7(1.31~80.7)                      |
| 28 Apr. '00 | 5.39                                     | 0.48(0.21~0.97)                 | 7.21(0.39~22.2)                     | 1.37(0.25~3.44)                     | 1.01(0.18~2.29)                     | 22.7(3.23~66.3)                      |
| 30 Aug. '00 | 176.21                                   | 1.32(0.29~2.51)                 | 42.1(21.4~49.1)                     | 7.04(2.04~12.5)                     | 1.34(1.05~1.78)                     | 116.5(50.2~194)                      |
| 14 Oct. '00 | 30.72                                    | 1.58(0.33~2.42)                 | 36.8(6.36~47.9)                     | 7.30(3.43~13.1)                     | 0.36(0.09~1.05)                     | 78.3(13.3~148)                       |
| 15 Feb. '01 | 14.9                                     | 1.24(0.35~1.88)                 | 76.3(1.34~140)                      | 10.2(3.41~27.9)                     | 0.27(0.09~0.86)                     | 40.5(0.46~69.4)                      |
| 29 Apr. '01 | 4.51                                     | 0.59(0.25~1.35)                 | 24.0(2.31~51.2)                     | -                                   | 0.57(0.26~1.28)                     | 26.8(2.22~62.2)                      |

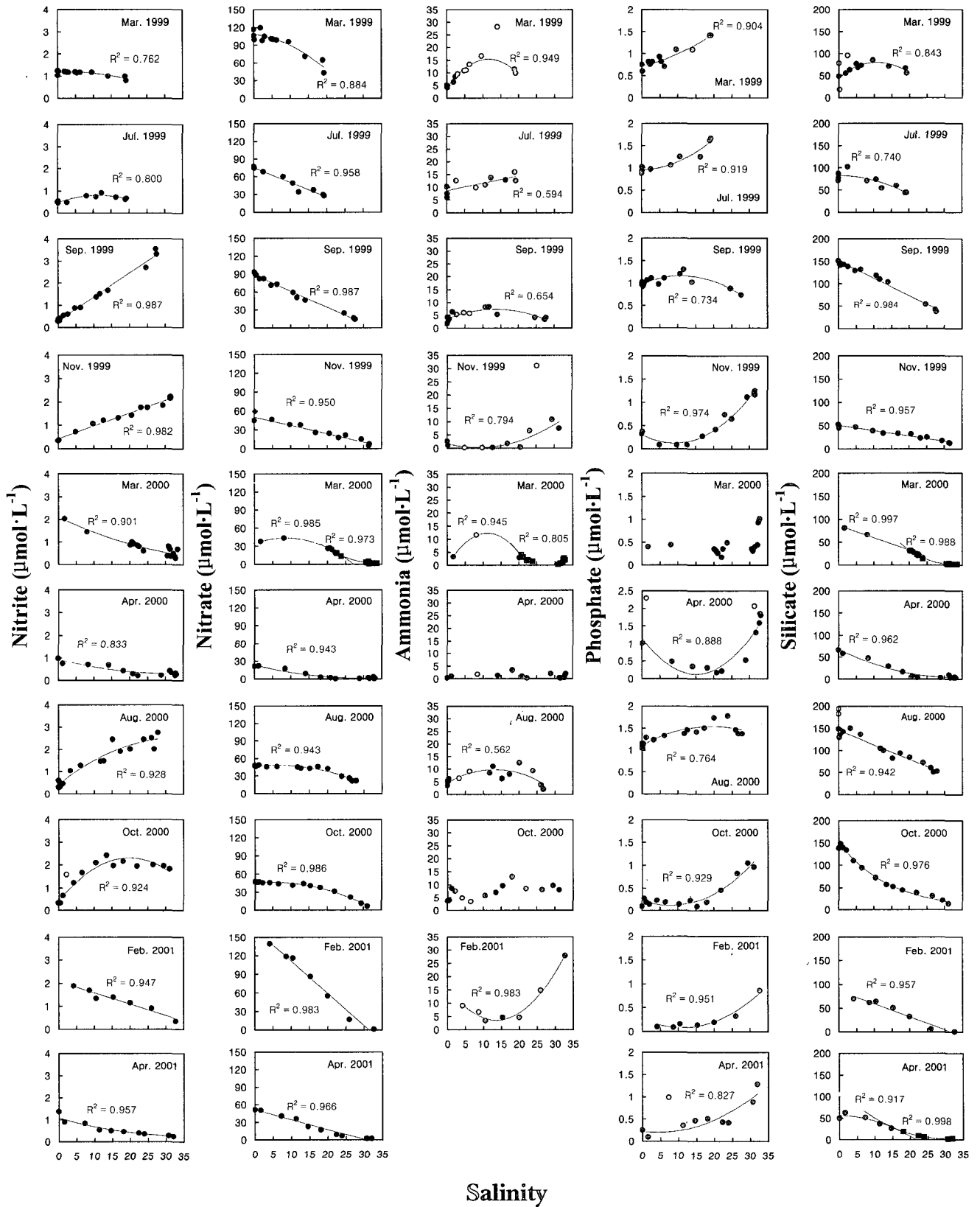


Fig. 5. Salinity-nutrients plot of the surface water of Seomjin River estuary.

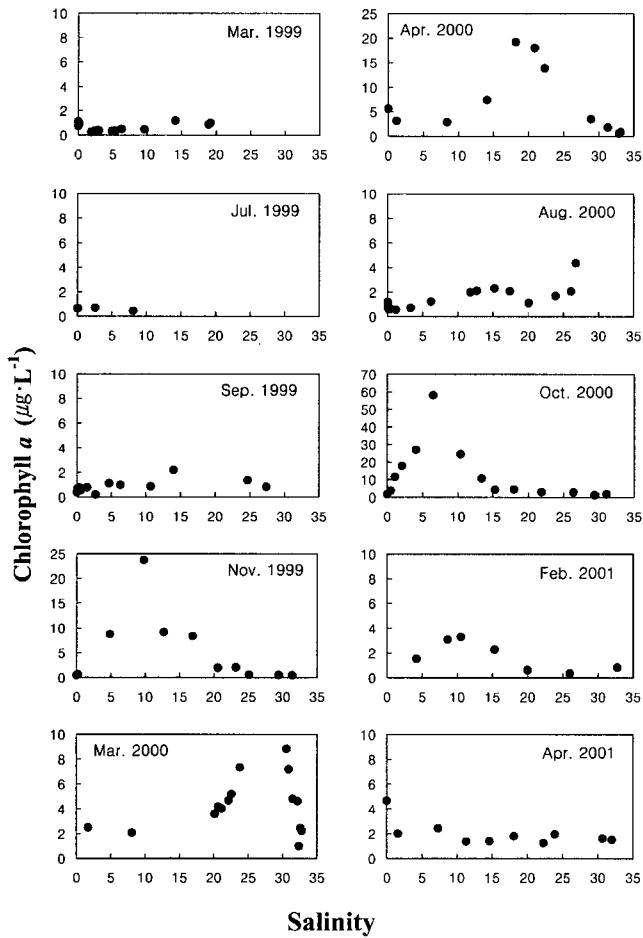


Fig. 6. Plot of chlorophyll *a* against salinity in the surface water of Seomjin River estuary.

도를 보였다.

질산염은 평균 7.21~94  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 의 범위로, 1999년의 농도에 비해 2000년의 농도가 월등히 낮았다. 분포양상은 2000년 3월과 4월에 제거 경향을 보였고 그 외의 시기에는 대부분 보존 또는 공급되는 분포를 나타내었다.

암모늄염은 평균 1.37~10.7  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 의 범위로, 수평분포는 특별한 경향성을 보여주지 않았다. 1999년 11월에 5~15 염분구간, 2000년 3월에 22 이상 염분구간, 그리고 2000년 4월에 전 염분구간에서 농도가 매우 낮았다. 분포는 1999년 3월과 9월, 2000년 8월에 공급을, 1999년 9월, 2000년 10월 그리고 2001년 2월에는 제거를 나타내었다.

인산염은 평균 0.27~1.34  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 의 범위로, 수평분포는 질산염의 경우와 반대로 저염분역보다 고염분역에서 농도가 높았다. 1999년 11월에 5~15 염분구간, 2000년 10월에 18 이하 염분구간, 그리고 2001년 2월에 15 이하 염분구간에서 농도가 매우 낮았다. 분포양상은 1999년 9월과 2000년 8월의 공급 거동을 제외하면, 대부분 제거 거동을 나타내었다.

규산염은 평균 20.7~120  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 의 범위로, 1999년 11월부터 2000년 4월까지 평균 20.7~33.0  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 로 낮았다. 수평분포는 질산염의 변화양상과 유사하여 고염분역보다 저염분역의 농

도가 높았다. 분포양상은 2000년 3월, 4월, 10월과 2001년 4월에 제거 거동을 나타내었으며, 그 외의 시기에는 보존적 또는 공급을 나타내었다.

엽록소 *a*의 농도는 0.2~58  $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 의 범위로, 1999년 11월에 염분 5~15, 2000년 4월에 염분 15~25, 그리고 2000년 10월에 염분 약 1~15 구간에서 엽록소 *a* 농도가 약 8  $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  이상으로 높았으며, 2000년 3월에도 25~30 염분구간에서 엽록소 *a* 농도가 증가한 양상이었다(Fig. 6). 특히, 2000년 10월 염분 6.5 지점에서의 엽록소 *a* 농도는 58  $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 로 조사기간 중 최고치를 나타내었다(권 등, 2002).

영양염 flux

영양염과 염분의 상관관계(nutrient-salinity plot)를 이용하여 추정된 영양염의 flux를 Table 2에 요약하였다. 담수를 통해 섬진강하구로 유입되는 영양염의 flux( $F_{\text{Riv}}$ )는 아질산염의 경우, 0.005~0.31 moles  $\cdot \text{sec}^{-1}$ , 질산염은 0.11~51.39 moles  $\cdot \text{sec}^{-1}$ , 암모늄염은 0.02~5.30 moles  $\cdot \text{sec}^{-1}$ , 인산염은 0.001~0.62 moles  $\cdot \text{sec}^{-1}$  그리고 규산염은 0.22~52 moles  $\cdot \text{sec}^{-1}$ 의 범위로, 전반적으로 풍수기에 flux가 높고 갈수기에 낮았으며, 특히 폭우 직후에 조사된 1999년 7월의 영양염 flux는 타 조사 시기에 비해 월등히 높았다. 하구를 경유하여 인접한 남해안으로 배출되는 영양염의 flux( $F_{\text{Est}}$ )는 아질산염의 경우, 0.002~0.89 moles  $\cdot \text{sec}^{-1}$ , 질산염은 0~51 moles  $\cdot \text{sec}^{-1}$ , 암모늄염은 (-)0.85~5.30 moles  $\cdot \text{sec}^{-1}$  ((-)는 광양만에서 섬진강하구로 역유입을 의미함), 인산염은 (-)0.10~0.34 moles  $\cdot \text{sec}^{-1}$  그리고 규산염은 0~79 moles  $\cdot \text{sec}^{-1}$ 의 범위였다.

풍수기(1999년 7월, 9월, 2000년 8월 및 강우직후 조사된 1999년 3월)와 갈수기 간의 flux를 비교하면(Fig. 7),  $F_{\text{Riv}}$ 는 풍수기에 아질산염, 질산염, 암모늄염, 인산염, 규산염(이하 영양염 flux 순서) 각각 0.11, 18.6, 1.65, 0.24, 23.8 moles  $\cdot \text{sec}^{-1}$ 였으며, 갈수기에는 각각 0.02, 1.22, 0.13, 0.01, 1.55 moles  $\cdot \text{sec}^{-1}$ 였다.  $F_{\text{Est}}$ 는 풍수기에 각각 0.33, 20.7, 3.31, 0.20, 31.9 moles  $\cdot \text{sec}^{-1}$ 였으며, 갈수기에는 각각 0.04, 1.47, (-)0.68, (-)0.03, 1.49 moles  $\cdot \text{sec}^{-1}$ 로 풍수기의 flux가 갈수기의 flux에 비해 월등히 높게 나타났다. 전반적으로 갈수기에는 영양염의 하구내 제거 flux( $F_{\text{Rem}}$ )가, 풍수기에는 하구내 공급 flux( $F_{\text{In}}$ )가 주로 나타났으며, 갈수기에 암모늄염과 인산염은 광양만에서 섬진강 하구로 역유입되는 flux가 산출되었다.

약 2년 6개월에 걸친 10회의 전체 조사기간 동안 영양염의 평균 flux는(Table 2), 강을 통해 섬진강 하구로 유입되는 flux( $F_{\text{Riv}}$ )의 경우, 질산염은 8.16 moles  $\cdot \text{sec}^{-1}$ , 아질산염은 0.056 moles  $\cdot \text{sec}^{-1}$ , 암모늄염은 1.00 moles  $\cdot \text{sec}^{-1}$ , 인산염은 0.11 moles  $\cdot \text{sec}^{-1}$ , 규산염은 10.5 moles  $\cdot \text{sec}^{-1}$ 였으며, 섬진강 하구를 거쳐 광양만으로 유출되는 flux( $F_{\text{Est}}$ )의 경우, 질산염은 9.16 moles  $\cdot \text{sec}^{-1}$ , 아질산염은 0.16 moles  $\cdot \text{sec}^{-1}$ , 암모늄염은 1.60 moles  $\cdot \text{sec}^{-1}$ , 인산염은 0.07 moles  $\cdot \text{sec}^{-1}$ , 규산염은 13.3 moles  $\cdot \text{sec}^{-1}$ 였다. 이 평균 flux를 이용하여 추정된, 섬진강을 통하여 광양만으로 배출되는 영양염의 연간 flux는 질산염의 경우, 4,044 tonnes  $\cdot \text{yr}^{-1}$ , 아질산염은 69 tonnes  $\cdot \text{yr}^{-1}$ , 암모늄염은 707 tonnes  $\cdot \text{yr}^{-1}$ , 인산염은 68 tonnes  $\cdot \text{yr}^{-1}$ , 규산염은 11,747 tonnes  $\cdot \text{yr}^{-1}$ 였다(Table 3).

**Table 2.** Riverine input, estuarine removal, input, and outward flux of dissolved nutrients in the Seomjin River estuary (unit: moles·sec<sup>-1</sup>)

| Date       | Nitrite          |                  |                 | Nitrate          |                  |                  | Ammonia         |                  |                  | Phosphate        |                 |                  | Silicate         |                  |                 |                  |      |       |      |      |
|------------|------------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|------------------|------|-------|------|------|
|            | F <sub>Riv</sub> | F <sub>Rem</sub> | F <sub>In</sub> | F <sub>Est</sub> | F <sub>Riv</sub> | F <sub>Rem</sub> | F <sub>In</sub> | F <sub>Est</sub> | F <sub>Riv</sub> | F <sub>Rem</sub> | F <sub>In</sub> | F <sub>Est</sub> | F <sub>Riv</sub> | F <sub>Rem</sub> | F <sub>In</sub> | F <sub>Est</sub> |      |       |      |      |
| 26 Mar. 99 | 0.064            | 0                | 0.021           | 0.085            | 5.85             | 0                | 1.99            | 7.84             | 0.23             | 0                | 1.61            | 1.85             | 0.04             | -0.02            | 0               | 0.02             | 2.55 | 0     | 5.45 | 8.00 |
| 31 Jul. 99 | 0.314            | 0                | 0.575           | 0.889            | 51.4             | 0                | 0               | 51.4             | 5.30             | 0                | 0               | 5.30             | 0.62             | -0.37            | 0               | 0.25             | 52.4 | 0     | 27.1 | 79.5 |
| 4 Sep. 99  | 0.026            | 0                | 0               | 0.026            | 8.69             | 0                | 0               | 8.69             | 0.28             | 0                | 1.48            | 1.76             | 0.09             | 0                | 0.11            | 0.20             | 14.1 | 0     | 0    | 14.1 |
| 13 Nov. 99 | 0.019            | 0                | 0               | 0.019            | 2.70             | 0                | 0               | 2.7              | 0.14             | -1.00            | 0               | (-0.85)          | 0.02             | -0.11            | 0               | (-0.10)          | 2.71 | 0     | 0    | 2.71 |
| 5 Mar. 00  | 0.025            | -0.010           | 0               | 0.015            | 0.37             | -0.64            | 0.66            | 0.40             | 0.02             | -0.76            | 0.39            | (-0.35)          | -                | -                | -               | -                | 0.94 | -0.74 | 0    | 0.20 |
| 28 Apr. 00 | 0.005            | -0.003           | 0               | 0.002            | 0.11             | -0.11            | 0               | 0                | -                | -                | -               | -                | 0.01             | -0.03            | 0               | (-0.02)          | 0.36 | -0.34 | 0    | 0.02 |
| 30 Aug. 00 | 0.053            | 0                | 0.275           | 0.328            | 8.37             | 0                | 6.52            | 14.9             | 0.78             | 0                | 3.57            | 4.35             | 0.19             | 0                | 0.15            | 0.34             | 26.2 | 0     | 0    | 26.2 |
| 14 Oct. 00 | 0.010            | 0                | 0.142           | 0.153            | 1.47             | 0                | 1.56            | 3.03             | -                | -                | -               | -                | 0.003            | -0.048           | 0               | (-0.045)         | 4.25 | -2.67 | 0    | 1.58 |
| 15 Feb. 01 | 0.035            | 0                | 0               | 0.035            | 2.44             | 0                | 0               | 2.44             | 0.23             | -1.06            | 0               | (-0.83)          | 0.004            | -0.024           | 0               | (-0.020)         | 0.84 | 0     | 0    | 0.84 |
| 29 Apr. 01 | 0.006            | -0.003           | 0               | 0.003            | 0.23             | 0                | 0               | 0.23             | -                | -                | -               | -                | 0.001            | -0.005           | 0               | (-0.004)         | 0.22 | -0.38 | 0.16 | 0    |

**Table 3.** Comparison of mean fluxes of dissolved nutrients in the Seomjin River estuary

| Sampling date (times)    | Unit   | DIN              |                  |                 | Phosphate        |                  |                  | Silicate        |                  |                  | Sources |                  |                 |                          |
|--------------------------|--|------------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|---------|------------------|-----------------|--------------------------|
|                          |  | F <sub>Riv</sub> | F <sub>Rem</sub> | F <sub>In</sub> | F <sub>Est</sub> | F <sub>Riv</sub> | F <sub>Rem</sub> | F <sub>In</sub> | F <sub>Est</sub> | F <sub>Riv</sub> |         | F <sub>Rem</sub> | F <sub>In</sub> | F <sub>Est</sub>         |
| Aug. 1991 (1)            | moles·sec <sup>-1</sup>                            | 5.46             | -0.13            | 4.55            | 1.04             | 0.01             | -0.66            | 0               | (-0.65)          | 34.5             | 0       | 17.7             | 52.2            | Kim (1991)               |
| Dec. 2000~Aug. 2001 (3)  | moles·sec <sup>-1</sup><br>tonnes·yr <sup>-1</sup> | 2.93             | -10.78           | 10.18           | 2.33             | 0.01             | -0.05            | 0               | (-0.04)          | 10.94            | -8.40   | 0                | 2.54            | Lee <i>et al.</i> (2003) |
| Mar. 1999~Apr. 2001 (10) | moles·sec <sup>-1</sup><br>tonnes·yr <sup>-1</sup> | 9.22             | -0.48            | 2.18            | 10.92            | 0.11             | -0.06            | 0.02            | 0.07             | 10.45            | -0.41   | 3.26             | 13.30           | this study               |
|                          |  | 4069             | -212             | 963             | 4820             | 107              | -59              | 27              | 68               | 9226             | -365    | 2886             | 11747           |                          |

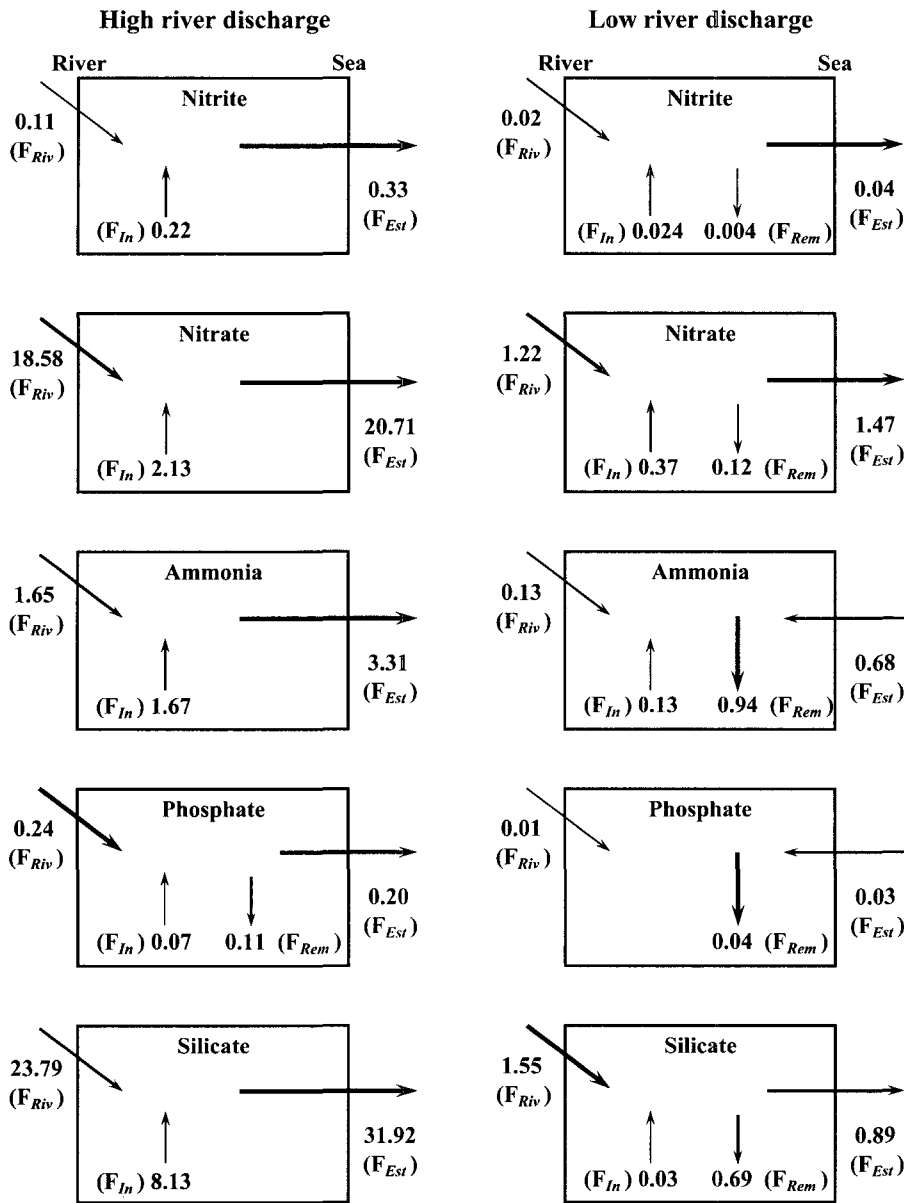


Fig. 7. Diagrams of mean fluxes of nutrient between wet season and dry season in the surface water of Seomjin River estuary. (unit: moles · sec<sup>-1</sup>).

### 고찰

조사해역의 염분은 풍수기인 7월에서 9월까지 낮게 나타났고, 갈수기인 춘계와 추계에 높았다(Fig. 3). 강물 배출량은 하계 풍수기에 집중되고, 그 외의 시기에는 매우 적게 배출되어(Fig. 4), 염분분포와 강물배수량은 강우량에 의해 직접적으로 영향을 받는 것으로 판단된다.

조사기간 동안 나타난 영양염의 분포양상으로부터 각 영양염의 주요 공급원을 살펴보면, 질산염과 규산염은 저염분역에서 농도가 높게 나타나 주로 섬진강을 통해 공급되는 것으로 판단되며, 인산염은 하구입구에서 농도가 높게 나타나 하구에 인접한 광양만에서 하구내로 공급되는 것으로 판단된다(Fig. 5). 이는 Kim *et al.* (1988), Moon(1990), Kim(1992)이 섬진강 하류와 섬진강 하구와 인접한 여수해만에서 질산염과 규산염의 공급원은 섬진강이고, 인

산염의 공급원은 광양만 주변에서 나오는 생활하수와 공장폐수라고 한 결과와 일치한다. 특히, 이 등(2001)은 광양만 남쪽에 위치한 여천공단내의 인광석을 처리하는 남해화학에서 용존 무기인이 대량으로 유입되어 광양만의 인산염 농도가 높게 유지된다고 하였다. 이는 상류에 큰 도시가 없어 인산염의 유입이 적은 섬진강의 특성 때문에 상류역보다 하구역에서 인산염의 농도가 높은 분포양상을 나타낸 것으로 판단된다.

암모니움염의 경우, 각 조사 시기에 따라 거동양상이 불규칙적이고, 최대 농도를 나타내는 염분구간이 변화하였다. 1999년의 경우, 암모니움염의 농도가 가장 높은 곳은 난초도로부터 약 6~8 km의 상류 지점으로(권 등, 2001a) 주변의 횡집촌 등 비교적 특정 점 공급원에 의해서 유입된 것으로 판단된다. 그러나 2000년과 2001년에는 최고 농도를 나타내는 위치가 조사시기마다 달라서, 암모니움염의 하구내 공급은 담수와 해수의 혼합과정에서 발생하는 생지



화학적 과정보다는 본류 이외의 비점원 공급원에서 유입되는 것으로 판단된다. 이는 낙동강 하구의 조사에서 낙동강 본류 주위의 장림천이 위치한 지점에서 생활하수와 공장폐수의 유입으로 암모니움염이 크게 증가하였다고 보고한 문과 최(1991)의 결과와 유사하다.

섬진강 하구에서 각 영양염의 제거가 뚜렷하게 나타난 시기는 1999년 11월, 2000년 4월, 10월에 나타났다(Fig. 5). 영양염별로 제거되는 염분구간이 다소 차이는 있으나 대체로 1999년 11월에는 5~15, 2000년 4월에는 15~25, 그리고 10월에는 1~15 염분구간에서 뚜렷한 제거양상을 보였다. 이 염분구간은 염록소 *a*의 농도가 매우 높고(Fig. 6), *Skeletonema costatum*(1999년 11월 및 2000년 10월)과 *Rhizosolenia* 속(2000년 4월) 등의 규조류가 크게 성장하였던(권 등, 2001b; 권, 2002) 구간으로서, 이 구간에서 대규모의 식물플랑크톤 성장에 의한 활발한 영양염 흡수로 인해 영양염이 제거된 것으로 판단된다. 특히, 질산염과 규산염에 비해 암모니움염과 인산염의 제거가 뚜렷하게 나타났다. 강물이 지속적으로 풍부하게 공급되는 질산염과 규산염에 비해 강물의 공급 의존도가 낮은 암모니움염과 인산염은 지속적으로 낮은 농도를 유지하게 되고, 식물플랑크톤의 급격한 성장으로 쉽게 소모되는 것으로 판단된다. 이는 암모니움염과 인산염의 농도가 낮게 유지되는 시기가 많고, 전 조사기간 동안 제거 양상이 우세하게 나타나는 결과와도 관련이 있을 것으로 판단된다.

영양염으로서 질산염과 암모니움염이 동시에 존재할 때, 식물플랑크톤은 암모니움염을 선택적으로 흡수하는 것으로 알려져 있으며(Strickland *et al.*, 1969; McCarthy *et al.*, 1977), 인산염은 조석에 의해 저층에서 재 부유된 입자에 흡착되어 비생물학적으로 제거되기도 한다(Morris *et al.*, 1981). 그러나 식물플랑크톤에 의해서 주로 제거되는 것으로 알려져 있다(Froelich *et al.*, 1985). Sharp *et al.*(1984)은 Delaware강 하구에서 식물플랑크톤의 춘계 대번식시 인산염의 생물학적 제거를 보고하였으며, Zwolsman(1994)은 Scheldt 강 하구에서 증가된 용존산소에 의해 인산염이 산화철과 결합하여 급격하게 제거되는 결과를 보고하였다.

질산염과 규산염은 암모니움염과 인산염에 비해 식물플랑크톤에 의한 제거 효과가 다소 약하고, 보존적 거동을 보인 예가 많았다. 그러나 식물플랑크톤이 대발생하였던 가을부터 다음해 봄까지 저염분역의 질산염과 규산염 농도가 낮게 유지되었던 것은 가을철에 저염분역에서 식물플랑크톤에 의해 대량 흡수되고 겨울동안 육상에서 공급이 낮았기 때문인 것으로 판단된다. 규산염이 하구 내에서 제거되는 경우는, 규조류의 섭취에 의해 주로 제거된다(D'Elia *et al.*, 1983; Yamada and D'Elia, 1984). Moon and Dunstan(1990)은 James강 하구의 초저염분해역에서 규조류가 우점하는 식물플랑크톤의 번무로 인해 담수에서 유입된 규산염의 대부분이 제거되고, 염분에 의해 대량 폐사된 담수 규조류에서 규산염이 재생되어 저염분역에 공급되는 과정을 보고하였다. 문과 최(1991) 및 문과 권(1994)도 낙동강 하구 상부역에서 규조류의 춘계 대번식시 규산염의 고갈을 보고하였다.

한편, 섬진강 하구역에서 영양염이 하구내로 공급되는 과정을 보인 예는 주로 강물 유량이 많았던 풍수기에 비교적 저염분역에서 나타났다(Fig. 5). 일반적으로 하구역의 저염분역은 부유입자물질의 농도가 높은 것이 특징이며, 이는 하구로 유입된 영양염을 비롯한 물질의 분포에 영향을 준다. 인산염은 저염분역에서 해수

이온과의 경쟁으로 부유입자물질에서 탈착되어 용존상태로 공급되는 "완충(buffered)" 작용을 하는 것으로 알려져 있으며(Sharp *et al.*, 1982), 질산염은 수괴 내에서 부유입자물질이 풍부할 때 질산화 과정에 의해서 공급되기도 한다(Balls, 1992; Rendell *et al.*, 1997). 따라서 본 연구에서 입자부유물질의 농도가 높아진 풍수기에 나타나는 인산염의 공급양상은 인산염의 완충작용과 관련이 있을 것으로 판단되지만, 질산염은 풍수기의 짧은 체류시간을 고려한다면, 질산화 과정보다는 지류를 통한 육상유입이 하구내 공급 거동에 더 큰 영향을 주었으리라고 판단된다.

영양염-염분 plot를 이용하여 영양염 flux를 계산한 결과, 전반적으로 풍수기에 초저염분역에서 영양염의 절대농도가 낮았음에도 불구하고(Table 2, Fig. 5), 남해안으로 배출되는 flux가 월등히 높았는데(Fig. 7), 이는 강물 유량이 flux를 주도하기 때문에 풍수기의 영양염 flux가 높았고, 갈수기에는 낮은 flux를 보인 것이다. 특히 갈수기에는 하구내 기초생산에 의한 영양염의 소모가 광양만으로 배출되는 영양염의 flux를 더욱 감소시키고, 암모니움염과 인산염의 경우에는 육상에서 유입된 양과 더불어 광양만에서 역으로 유입된 양 모두 하구내에서 제거되는 결과를 보여주었다. 따라서 섬진강 하구를 통해 광양만으로 공급되는 영양염의 양은 장기간의 갈수기에 비해 짧은 시기동안의 풍수기에 월등히 많이 공급된다는 것을 시사한다.

연간 섬진강 하구를 통해 광양만으로 배출되는 영양염의 양은 용존무기질소의 경우 약 4,820 tonnes·yr<sup>-1</sup>, 인산염은 68 tonnes·yr<sup>-1</sup>, 규산염은 11,747 tonnes·yr<sup>-1</sup>로 추정되었다(Table 3). 1991년 8월에 조사한 Kim(1991)은 용존무기질소, 인산염, 규산염의 flux를 각각 1.04, (-)0.65, 52.2 moles·sec<sup>-1</sup>로 추정하였고 2000년 12월부터 2001년 8월까지 조사한 Lee *et al.*(2003)은 각각 1,029, (-)36, 2,243 tonnes·yr<sup>-1</sup>로 추정하였다. 하구역의 물리, 화학, 생물학적인 상황은 일별, 월별, 계절별 또는 연별로 달라질 수 있기 때문에 두 연구결과와 직접 비교하기는 어려우나, 본 연구에서 추정된 flux가 두 연구의 flux 추정치보다 대체로 높게 나타났다. 또한 갈수기에 영양염이 활발한 기초생산으로 제거되고 인산염이 광양만으로부터 역유입되어 하구내에서 제거되는 양상은 본 연구결과와 일치하였으나 풍수기에도 영양염이 하구내에서 제거되는 결과는 본 연구결과와 달랐다. 이는 본 연구가 10회의 조사를 수행한데 반해, Kim(1991)은 풍수기 1회, Lee *et al.*(2003)은 갈수기 2회, 풍수기 1회의 조사만이 수행되었고, 풍수기 또는 갈수기 일지라도 조사 직전의 강수 상황에 따라 하구역의 상황이 크게 달라질 수 있기 때문에 평균 flux 추정값과 영양염 분포양상이 달라진 것으로 판단된다.

서론에서 언급한 바와 같이, 영양염과 염분의 상관관계를 이용한 flux 추정방법(property-salinity)은 담수 단성분(endmember) 농도의 급격한 변동으로 인해서 영양염의 flux를 과대 또는 과소 평가할 수 있는 단점을 가지고 있다. 또한 1999년 9월과 2000년 7월에 강물배출량이 급격하게 증가된 시기가 제외되었던 경우처럼 지속적이고 세밀한 조사가 수행되지 않으면 영양염의 flux 추정값이 과소평가될 수도 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구가 약 2년 동안 계절별로 10회의 조사를 통해 영양염의 평균 flux를 제시하였으나, 이 평균 flux를 적용하여 정확한 섬진강의 연간 영양염 배출량으로 규정하기에는 어려움이 있다. 그러나 우리나라 하

구역에서 해양으로 유입되는 영양염의 양을 추정할 자료가 극히 적고, 염분경사를 고려하지 않은 하구입구에서의 농도만을 이용한 영양염 flux 추정이 주로 이루어졌음을 고려하면, 본 연구결과에서 제시된 영양염의 flux는 섬진강 하구와 광양만의 수질과 생태계를 이해하는데 중요한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다. 그리고 섬진강으로부터 광양만으로 유입되는 영양염 양에 대한 정확한 flux를 도출하기 위해서는 지속적이고 세밀한 모니터링이 필요할 것으로 판단된다.

이와 같이, 섬진강 하구역으로 유입되는 영양염의 양이 계절에 따라 다르고, 공급된 양과 동일한 비율로 하구입구에서 주변 연안역으로 배출되지 않는다는 것은 각 영양염마다 하구내에서 겪게 되는 하구반응과정들이 각기 다르다는 것을 시사하고 있다. 이는 하구역은 강에서 유입된 영양염이 연안역으로 배출되는 과정에서 그 양을 조절하는 중요한 역할을 하고 있음을 의미한다. Fisher *et al.*(1988)은 Chesapeake Bay, Delaware Bay 그리고 Hudson River 하구에서 하구내 생물학적 과정은 하구내로 유입된 영양염이 하구 하부 또는 연안역에 미치는 영양염의 부하량을 조절한다는 하구역의 정화기능을 보고하였다. 이에 반해 Rendell *et al.*(1997)은 영국 Great Ouse 강 하구의 저염분역에서 갈수기동안 발생하는 왕성한 기초생산이 Wash 해역으로 배출되는 영양염의 flux를 크게 변화시킨다고 하였으며, 하구역내에서의 높은 기초생산에 의한 과도한 영양염 소모는 해양으로 배출되어야 할 영양염을 고갈시킨다고 하였다. 특히, 하구내에서 규조류의 성장으로 인한 규산염의 소모로 N:Si 및 P:Si 비의 증가를 유도하여 연안해역의 기초생산 체계를 변화시킬 수 있다는, 즉 규조류에서 외편모조류로의 우점종 천이와 여름이후 대규모의 번무 형성을 초래하는데 영향을 주게 될 것이라고 보고하였다.

섬진강하구역은 짧은 기간의 풍수기를 제외한 대부분 시기에 기초생산에 의한 영양염의 대규모 소비가 일어나고, 댐건설, 취수등 강물이용으로 인한 강물유량의 지속적인 감소로 하구 본래의 상태가 계속 변화되어가고 있다. 더불어 광양만과 여수해협에는 인산염의 강력한 점오염원이 존재하고(이 등, 2001), 풍수기에는 섬진강의 담수가 여수해협을 지나 주요 적조발생해역인 소리도 해역까지 유입·확산된다(임 등, 2003). 이와 같은 상황을 고려하면, 섬진강을 통해 광양만으로 배출되는 영양염의 flux 변동은 광양만을 비롯한 인접해역의 영양상태(trophic state) 즉, 앞서 언급한 N:Si 및 P:Si 비 등을 갈수기와 풍수기에 따라 극단적으로 변화시켰을 가능성이 충분하며, 이 영양염 변동은 해역의 기초생산 체계에 직·간접적으로 영향을 주어왔거나 앞으로도 계속 영향을 주게 될 주요 요인 중의 하나가 될 것으로 판단된다. 하구내 생물학적 과정이 연안역에 미치는 영양염의 부하량을 줄여줄 수 있는 하구역의 순(정화)기능(Fisher *et al.*, 1988)과 과도한 영양염 소모로 인해 해양으로 배출되어야 할 영양염을 고갈시켜 연안 생태계 변형을 유발시킬 수 있는 역기능(Rendell *et al.*, 1997) 측면에서, 섬진강 하구역의 갈수기 기초생산이 인접 연안역에 어떠한 영향을 미칠지에 대한 정확한 평가를 위해서 지속적인 연구가 필요하다고 판단된다.

## 사 사

이 연구는 2000년도 한국과학재단의 학술연구비(과제번호 2000-

1-13500-001-3) 지원에 의해 수행되었습니다. 논문을 심사하여 주신 두 분의 심사위원께 깊이 감사드립니다.

## 참고문헌

- 건설교통부(MOCT, Ministry Of Construction & Transportaion), 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001. 한국수문조사연보.
- 권기영, 2002. 저탁도 하구역에서 염분경사에 따른 하부 생태계 구성요소의 거동. 부경대학교 박사학위 청구논문, 204 pp.
- 권기영, 문창호, 양한섭, 2001a. 섬진강하구역에서 염분경사에 따른 영양염의 거동. 한국수산학회지, **34**: 199-206.
- 권기영, 이평강, 박 철, 문창호, 박미옥, 2001b. 섬진강하구역에서 염분경사에 따른 동식물플랑크톤의 현존량 및 종조성. 한국해양학회지, **6**: 93-102.
- 권기영, 문창호, 강창근, 김영남, 2002. 섬진강하구역에서 염분경사에 따른 입자성 유기물질의 분포. 한국수산학회지, **35**: 86-96.
- 김경렬, 기준학, 1987. 금강 하구에서의 화학적, 생물학적 제과정에 관한 연구. I. 질소계 화합물의 순환: 전반적 고찰. 한국해양학회지, **22**: 191-206.
- 김학균, 정창수, 임월애, 이창규, 김숙양, 윤성화, 조용철, 이삼근, 2001. 한국연안의 *Cochlodinium polykrikoides* 적조 발생과 변천. 한국수산학회지, **34**: 691-696.
- 문창호, 최혜지, 1991. 낙동강 하구 환경특성 및 식물플랑크톤의 군집구조에 관한 연구. 한국해양학회지, **26**: 144-154.
- 문창호, 권기영, 1994. 낙동강 하구역 입자성 유기 규소의 계절적 변화. 한국해양학회지, **29**: 5-16.
- 심재형, 신윤근, 이원호, 1984. 광양만 식물플랑크톤 분포에 관한 연구. 한국해양학회지, **10**: 172-186.
- 양재삼, 정주영, 허진영, 이상호, 최진용, 1999. 금강하구의 물질수지 1. 영양염의 계절적 분포. 한국해양학회지, **4**: 71-79.
- 양한섭, 김성수, 1990. 금강 하구역에서 수질의 시공간적 변화특성. 한국수산학회지, **23**: 225-237.
- 이영식, 이재성, 정래홍, 김성수, 고우진, 김귀영, 박중수, 2001. 광양만에서 식물플랑크톤증식의 제한영양염. 한국해양학회지, **6**: 201-210.
- 임동일, 엄인권, 전수경, 유재명, 정희수, 2003. 한국 남해 연안역에서 여름 홍수기에 형성된 연안 염하구 환경의 물리·화학적 특성. 한국해양학회지, **8**: 151-163.
- 정래홍, 홍재상, 이재학, 1997. 광양제철소 건설을 위한 매립과 준설공사 기간중 저서 다모류 군집의 공간 및 계절 변화. 한국수산학회지, **30**: 730-743.
- Balls, P.W., 1992. Nutrient behaviour in two contrasting Scottish estuaries, the Forth and Tay. *Oceanol. Acta.*, **15**: 261-277.
- Billen G., M. Somville, De Becker E., and Servais P., 1985. A nitrogen budget of the Scheldt hydrographical basin. *Neth. J. Sea Res.*, **19**: 223-230.
- Boyle, E., 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.
- D'Elia C.F., D.M. Nelson and W.R. Boynton. 1983. Chesapeake Bay nutrient and plankton dynamics: III. The annual cycle of dissolved silicon. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, **47**: 1945-1955.
- Fisher, T.R., L.W. Harding, D.W. Stanley and L.G. Ward, 1988. Phytoplankton, nutrients and turbidity in the Chesapeake, Delaware

- and Hudson estuaries. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **27**: 61–93.
- Froelich, P.N., 1988. Kinetic control of dissolved phosphate: A primer on the phosphate buffer mechanism. *Limnol. Oceanogr.*, **33**: 649–668.
- Froelich, P.N., L.W. Kaul, J.T. Byrd, M.O. Andreae and K.K. Roe, 1985. Arsenic, Barium, Germanium, Tin, Dimethylsulfide and nutrient biogeochemistry in Charlotte Harbor, Florida, a phosphorus-enriched estuary. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **21**: 239–264.
- Kang, C.K., J.B. Kim, J.B. Kim, P.Y. Lee and J.S. Hong, 2001. The importance of intertidal benthic autotrophs to the Kwangyang Bay (Korea) food webs:  $\delta^{13}\text{C}$  analysis. *J. Oceanol. Soc. Korea*, **36**: 109–123.
- Kaul, L.W. and P.N. Froelich. 1984. Modeling estuarine nutrient geochemistry in a simple system. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, **48**: 1417–1433.
- Kim, S.H., C.B. Song, S.H. Kang, D.B. Yang and J.S. Hong, 1988. The distribution pattern of nutrients at the cultivation ground of laver in Kwangyang Bay, 1986. *Ocean Research*, **10**: 1–8.
- Kim, T.J. 1992. Sorption behaviour of radium isotopes and nutrient fluxes in the Seomjin estuary of Korea, during high river discharge. Master thesis, Chungnam National University, Daejeon, 59 pp.
- Lebo, M.E. and J.H. Sharp, 1992. Modeling phosphorus cycling in a well-mixed coastal plain estuary. *Estuar. Coastal Shelf Sci.*, **35**: 235–252.
- Lebo, M.E., J.H. Sharp and L.A. Cifuentes, 1994. Contribution of river phosphate variations to apparent reactivity estimated from phosphate-salinity diagrams. *Estuar. Coastal Shelf Sci.*, **39**: 583–594.
- Lee J.S., R.H. Jung, T.S. Ko, J.S. Park, S.S. Kim and K.Y. Kim, 2003. Biogeochemical cycling of nutrients and estuarine fluxes in the Seomjin River Estuary. Oceans 2003 MTS/IEEE Conference Proceedings, p. 2740.
- McCarthy, J.J., W.R. Taylor and J.L. Taft, 1977. Nitrogenous nutrition of the plankton in the Chesapeake Bay. 1. Nutrient availability and phytoplankton preferences. *Limnol. Oceanogr.*, **22**: 996–1011.
- Moon, C.H. 1990. Studies on the phytoplankton and nutrients in the Yeosu Heman. *J. Kor. Fish. Soc.*, **22**: 408–414.
- Moon, C.H. and W.M. Dunstan. 1990. Hydrodynamic trapping in the formation of chlorophyll a peak in turbid, very low salinity waters of estuaries. *J. Plankton Res.*, **12**: 323–336.
- Morris, A.W., A.J. Bale and R.J.M. Howland. 1981. Nutrient distribution in an estuary: Evidence of chemical precipitation of dissolved silicate and phosphate. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **12**: 205–216.
- Officer, C.B., 1979. Discussion of the behavior of nonconservative dissolved constituents in estuaries. *Est. Coast. Mar. Sci.*, **9**: 91–94.
- Officer, C.B. and J.H. Ryther, 1980. The possible significance of silicon in marine eutrophication. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **9**: 91–94.
- Rendell, A.R., T.M. Horrobin, T.D. Jickells, H.M. Edmunds, J. Brown, and S. Malcolm, 1997. Nutrient cycling in the Great Ouse estuary and its impact on nutrient fluxes to the Wash, England. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **45**: 653–668.
- Sanders, R.J., T. Jickells, S. Malcolm, J. Brown, D. Kirkwood, A. Reeve, J. Taylor, T. Horrobin and C. Ashcroft, 1997. Nutrient fluxes through the Humber estuary. *J. of Sea Res.*, **37**: 3–23.
- Sharp, J.H., J.R. Pennock, T.M. Church, J.M. Tramontano and L.A. Cifuentes. 1984. The Estuary as a Filter. In: The estuarine interaction of nutrients, organics and metals: A case study in the Delaware estuary. V.S. Kennedy, Academic Press, New York, pp. 241–257.
- Sharp, J.H., C.H. Culbertson and T.M. Church, 1982. The chemistry of the Delaware estuary. General consideration. *Limnol. Oceanogr.*, **27**: 1015–1028.
- Strickland, J.D.H., R.W. Eppley and B.R. Mondiola. 1969. Phytoplankton populations, nutrients and photosynthesis in Peruvian Coastal Waters. *Biol. Inst. del Mer del Peru*, **2**: 1–45.
- Strickland, J.D.H. and T.R. Parsons. 1972. A Practical Handbook of Seawater Analysis, 2nd ed. *Bull. Fish. Res. Board Can.* 167, 310 pp.
- Webb, K.L. and C.F. D'Elia, 1980. Nutrient and oxygen redistribution during a spring neap tidal cycle in a temperate estuary. *Science*, **207**: 983–985.
- Yamada S.S. and C.F. D'Elia, 1984. Silicic acid regeneration from estuarine sediment cores. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **18**: 113–118.
- Zwolsman J.J.G., 1994. Seasonal variability and biogeochemistry of phosphorus in the Scheldt estuary, south-west Netherlands. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **39**: 227–248.

2004년 4월 29일 원고접수

2004년 8월 12일 수정본 채택

담당편집위원: 이동섭