

ORIGINAL ARTICLE

섬진강 하구를 통한 용존무기영양염 유출량 변동

박미옥^{1),2)} · 이재성^{1),3)} · 김성수^{1),2)} · 김성길^{1),2)} · 이석모⁴⁾ · 이용우^{2)*}

¹⁾국립수산과학원 어장환경과, ²⁾해양환경관리공단 해양수질팀, ³⁾한국해양과학기술원 기기검교정·분석센터

⁴⁾부경대학교 생태공학과

Variations of Dissolved Inorganic Nutrient Flux through the Seomjin River Estuary

Mi-Ok Park^{1),2)}, Jae-Seong Lee^{1),3)}, Seong-Soo Kim^{1),2)}, Seong-Gil Kim^{1),2)}, Suk-Mo Lee⁴⁾,
Yong-Woo Lee^{2)*}

¹⁾Marine Environment Research Division, National Fisheries Research & Development Institute, Busan 619-705, Korea

²⁾Marine Environment Monitoring Team, Korea Marine Environment Management Corporation, Busan 606-080, Korea

³⁾Marine Instrument Service & Calibration Department, Korean Ocean Research and Development Institute, Ansan 425-600, Korea

⁴⁾College of Ecological Engineering, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

Abstract

We investigated the spatiotemporal variations of dissolved inorganic nutrients along a saline gradient to estimate nutrient fluxes in the Seomjin River estuary during dry (March 2005, March 2006, March 2007, and March 2008) and rainy seasons (August 2005, July 2006, July 2007, and July 2008). Dissolved inorganic nitrogen concentrations were similar in the endmembers of freshwater for the rainy and dry seasons. In contrast, the concentrations of dissolved inorganic phosphate and silicate in the rainy season were approximately 2-3 times higher than those in the dry season. River discharge was approximately 10 times higher in the rainy season ($212 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$) than in the dry season ($21 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$). The fluxes of dissolved inorganic nitrogen, phosphate, and silicate were 2.91, 0.004, and 2.51 tons day^{-1} in the dry season and 7.45, 0.421, and 30.5 tons day^{-1} in the rainy season, respectively. Although the range of nutrient concentrations were similar to previous results from investigations in the Seomjin River estuary, the nutrient fluxes were differed according to river discharge for different survey periods.

Key words : Seomjin River estuary, Nutrient flux, Nutrient, River discharge

1. 서론

연안에 분포하는 물질은 주로 강이나 대기, 해저퇴적물, 해저 지하수 유출 등을 통해서 공급되는 것으로 알려

져 있다(Church, 1996; Chester, 2000). 특히, 유입원별 영양염류의 공급 기여도는 건기와 우기에 따라 차이를 보이게 되고, 우기에는 강을 통한 유입이 우세하고 건기에는 다른 유입원에 의한 기여도가 증가하게 된다. 강을

Received 15 October, 2013; Revised 16 April, 2014;

Accepted 28 April, 2014

*Corresponding author: Yong-Woo Lee, Marine Environment Monitoring Team, Korea Marine Environment Management Corporation, Busan 606-080, Korea
Phone: +82-51-400-7741
E-mail: wbluese@koem.or.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

통해서 하구로 공급된 영양염류는 다양한 생지화학적 과정을 거치면서 최종적으로 해양으로 공급된다(Kwon 등, 2004).

하구로 공급된 물질은 pH, 생물 활동에 의해 응집(flocculation), 침전(deposition), 이온교환(ion-exchange), 생물체 흡수(biological uptake), 재광물화(re-mineralization) 등의 생지화학적 반응이 일어난다. 각 물질의 반응 정도 및 특성에 따라서 하구내에서 보존적(conservative) 또는 비보존적(non-conservative) 거동을 보인다. 특히 영양염류의 경우 하구에서 비보존적 특성을 보이며, 용존무기질소는 질산화, 탈질산화 과정을 거치고(Balls, 1992), 인산염은 부유입자물질에 흡착되어 제거되거나 산화-환원환경에 따라 공급 또는 제거된다(Edmond 등, 1985). 규산염은 저층퇴적물로 부터 공급 또는 규조류의 광합성에 의해 완전 제거되기도 한다(Boyle 등, 1974).

육상으로부터 물질들이 하구를 통해서 해양으로 최종 공급되는 양을 추정하기 위한 많은 노력들이 진행되어 왔다(Boyle 등, 1974; Officer, 1979; Kaul과 Froelich, 1984; Kwon 등, 2004; Liu 등, 2009). 하구를 통한 물질의 공급량을 추정하기 위하여 물질의 농도와 염분과의 상관관계를 이용하는 방법(Sharp 등, 1982; Billen 등, 1985), 물질수지 방정식을 이용하는 방법(Lebo와 Sharp, 1992; Sanders 등, 1997), 평균 플럭스를 이용하는 방법(Lebo와 Sharp, 1992) 등 다양하게 제시되어왔다. 이 중 보존적 거동을 보이는 염분과 화학성분과의 상관관계를 이용하여 추정하는 방법이 물질의 거동과 유출량을 쉽게 추정할 수 있는 장점이 있어 가장 많이 이용되고 있다(Sharp 등, 1982; Lebo 등, 1994; Kwon 등, 2004).

섬진강 하구에서 영양염류 플럭스 추정에 대한 연구를 살펴보면 Kim(1992)은 풍수기에 염분과 영양염류와의 상관관계를 이용하여 영양염류 플럭스를 추정하였으며, Kwon 등(2004)은 1999-2001년 사이에 영양염류의 분포 특성과 플럭스를 추정하였다. 섬진강 하구는 국내에서 유일하게 자연하구 형태를 유지하고 있어 연안 환경 변화 및 기후변화에 따른 장기적인 영양염류 플럭스의 변화 양상을 파악하기 좋은 지역이다.

이 연구에서는 섬진강 하구 혼합구간에서 염분변화에 따른 영양염류의 분포 특성을 파악하고, 섬진강을 통해

서 해양으로 최종 공급되는 영양염류 유출량을 추정하고자 한다. 또한 장기적인 영양염류 유출량의 변화를 살펴 보기 위해서 이 연구해역에서 조사된 기존의 연구결과와 비교 분석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구지역

섬진강 하구는 전라남도 광양시, 순천시, 여수시와 경상남도 하동군, 남해군으로 둘러싸여 있으며, 강의 길이는 약 303 km, 총 유역 면적은 약 4,900 km²이다(KEI, 2005). 섬진강 상류에는 섬진강 댐과 동북댐, 보성강댐, 주암댐이 있으며, 약 29개소의 취수장에서 일당 약 100만 톤의 담수가 채수되고 있다. 섬진강을 통해서 광양만으로 유입되는 담수량은 연간 약 10.7~39.3×10⁸톤이며(MLTMA, 2007, 2008), 섬진강 하류는 광양만과 연결되어 광활한 기수역을 형성하고 있다.

2.2. 현장조사 및 시료분석

섬진강 하구와 광양만 주변해역에서 염분경사에 따른 영양염 분포특성 및 생지화학적 거동을 파악하기 위해서 현장조사는 건기(2005년 3월 9일, 2006년 3월 14일, 2007년 3월 22일, 2008년 3월 12일)와 우기(2005년 8월 26일, 2006년 7월 25일, 2007년 7월 16일, 2008년 7월 25일)에 각각 실시하였다. 조사정점은 고정된 정점이 아닌 섬진강 하구 상류의 염분이 0인 지점에서 염분 변화가 일정한 광양만까지 염분구배 약 2~3 간격으로 선정하였다(Fig. 1).

연구해역의 강수량 및 유량은 섬진강 하구와 가장 인접한 전라남도에 위치한 송정관측소에서 측정된 결과를 인용하였다(MCT, 2005, 2006; MLTMA, 2007, 2008)(Fig. 2).

수온, 염분, pH는 수질측정기(YSI-6600V2, USA)를 이용하여 현장에서 측정하였으며, 해수시료는 니스킨 채수기를 이용하여 채수하고 용존산소(DO)는 채수 즉시 고정하여 Winkler 적정법으로 측정하였다. 영양염 분석용 시료는 현장에서 여과한 후 드라이아이스로 냉동 보관하여 실험실로 운반 후 분석 전까지 냉동 보관하였다. 영양염류는 해양환경공정시험방법(MMAF, 2005)에 따라 비색법으로 측정했다. 암모늄은 인도페놀법, 아질산

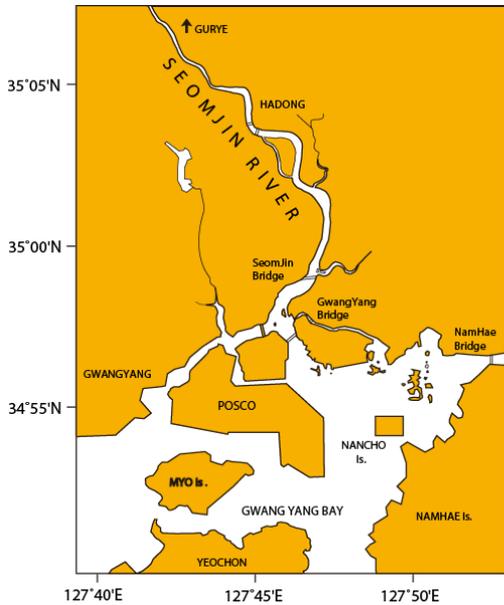


Fig. 1. Map showing the study area. Seawater sampling stations represented in the map were different for each survey period because those were selected at each 2~3 interval with a saline gradient.

염은 아조화합물 생성법, 질산염은 카드뮴-구리 환원법, 인산염은 아스코르빈산 환원법, 규산염은 청색 몰리브덴산 환원법을 이용하여 목적 성분을 발색시킨 후 분광광도계(Cary 100 UV-Vis, Varian, USA)로 정량하였다. 부유입자물질(SPM)은 해수 1 L를 GF/F 여과지로 여과한 후 110 °C에서 2시간 건조하고 여과전 후의 무게차로 계산했다. 엽록소 *a*는 membrane 여과지(공극크기 0.45 μm)로 여과 후 1% 탄산마그네슘을 첨가하여 시료의 산화

를 방지하고 냉동보관 후 분석 전 90% 아세톤으로 추출하여 형광광도계(10-AU-005-CE, Turner Designs, USA)로 측정하였다.

2.3. 영양염의 플럭스 추정모델

섬진강 하구를 통한 영양염 플럭스는 Kaul과 Froelich (1984)에 의해서 제시된 모델을 이용하여 계산하였다. 하구에서 용존 물질의 분포는 염분의 함수로 표현될 수 있다. 즉, 염분에 따른 용존 물질의 분포양상은 물질의 생지화학적 거동에 의해서 조절된다. 따라서 담수와 해수의 endmember에서 농도 기울기를 이용하여 플럭스를 추정할 수 있다(식 1).

$$F \text{ (moles sec}^{-1}\text{)} = R[C - C_l(dC/dCl)] \quad \text{(식 1)}$$

C (moles L⁻¹) = concentration of the dissolved constituent at a given chloride value

R (m³ sec⁻¹) = river discharge

Cl (mM) = chloride concentration

Fig. 3은 보존성 및 비보존성 물질의 분포 특성과 플럭스 계산방법에 대해 도시한 것이다. 보존성 성분의 물질 플럭스는 담수의 endmember(C₀) 농도와 담수 유량(R)을 곱해서 계산하고, 비보존성 성분은 하구내에서 공급 또는 제거 플럭스를 고려하여 물질의 플럭스를 추정할 수 있다. 해양의 endmember에서 점선의 함수를 구하면, 이 함수의 절편값은 염분이 0일 때의 가상적 농도(C_{*s}, C_{*D})가 구해진다. 따라서 실제 강의 endmember(C₀)와 가상적인 endmember(C_{*s} 혹은 C_{*D})간의 차이는 공급 또는 제거 기작에 의한 차이가 된다.

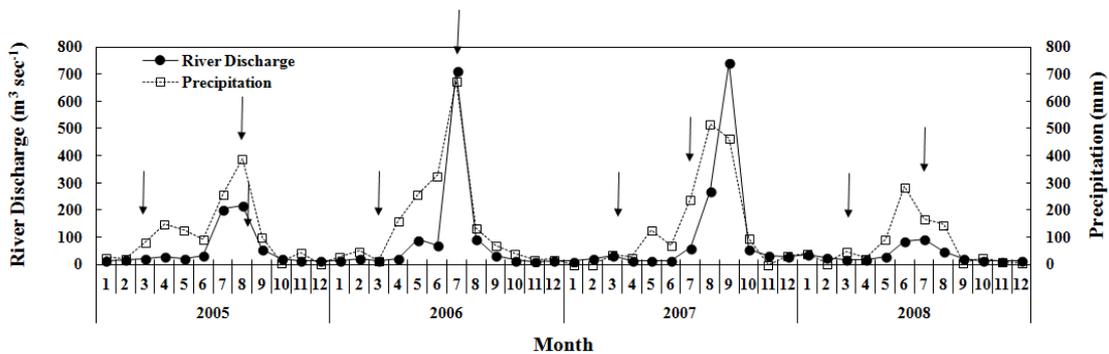


Fig. 2. River discharge and precipitation of Semjin River at Songjung, Chollanamdo (2005~2008).

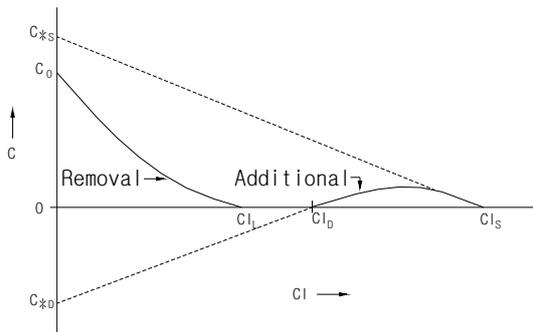


Fig. 3. Simple concept of removal and additional of dissolved constituent versus salinity (Kaul and Froelich, 1984). Riverine flux = RC_0 ; Flux out of the estuary = RC_{*s} ; Removal flux = $R(-C_0)$ (between $Cl = 0$ and $Cl = L$) + RC_{*D} (at the discontinuity on the input curve); Input flux = $R(C_{*s} - C_0)$. Note that $C_{*L} = 0$.

3. 결과 및 고찰

3.1. 이화학 성분 분포

수온은 건기에 5.50~11.18°C(평균 8.81±1.50°C) 범위였으며, 공간적 분포는 염분에 따라 큰 차이를 보이지 않았으나 2006년 3월에는 염분이 증가함에 따라 증가하는 양상을 보였다(Table 1; Fig. 4). 우기에는 21.30~28.47°C(평균 24.20±2.09°C) 범위였으며, 염분에 따른 수온의 변화 양상은 2005~2006년에는 큰 차이를 보이지 않았지만, 2007~2008년에는 염분이 증가함에 따라 수온이 감소하는 양상을 보였다.

조사정점은 염분 구배에 따라 선정되었지만, 조사기간 동안(2005~2008년) 건기에 0.00~34.10(평균 20.23±10.93), 우기에 0.00~32.25(평균 11.51±10.91)

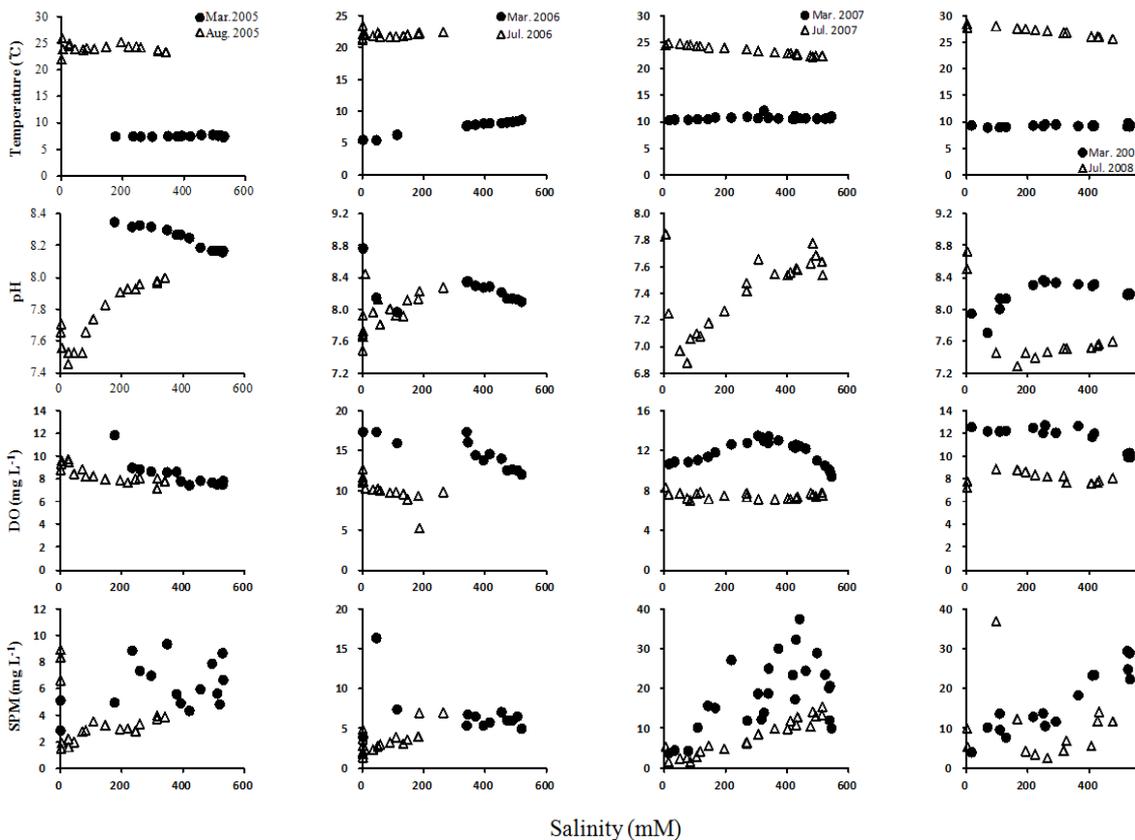


Fig. 4. Relationship of temperature (°C), pH, DO (mg L^{-1}), and SPM (mg L^{-1}) with salinity in the surface water of the Seomjin River estuary during the dry and rainy seasons.

Table 1. Range and mean values of chemical constituents in the surface water of Seonjin River estuary and river discharge

Investigation period	River discharge m ³ sec ⁻¹	Salinity	Temp. °C	pH	DO mg L ⁻¹	SPM mg L ⁻¹	Chl <i>a</i> µg L ⁻¹	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	DIN µM	PO ₄ ³⁻	Si(OH) ₄
09 Mar. 2005	15.0	20.43 (0.00-33.27)	7.56 (7.39-7.80)	8.25 (8.16-8.35)	8.38 (7.49-11.90)	6.20 (2.88-9.38)	4.45 (1.50-13.75)	2.07 (0.98-3.57)	0.64 (0.14-1.40)	48.32 (2.78-94.55)	51.0 (5.2-97.9)	0.86 (0.20-1.98)	39.2 (4.5-98.6)
14 Mar. 2006	14.0	21.47 (0.09-32.49)	7.63 (5.50-8.72)	8.25 (7.97-8.77)	14.70 (12.04-17.41)	6.81 (3.95-16.40)	6.27 (2.90-9.19)	2.02 (0.04-11.05)	0.71 (0.13-1.85)	19.75 (2.55-61.73)	22.5 (3.4-69.2)	0.28 (0.14-0.75)	8.0 (0.5-32.3)
22 Mar. 2007	15.5	20.45 (0.89-34.10)	10.73 (10.36-11.18)	-	11.76 (9.44-13.55)	18.57 (3.87-37.56)	3.49 (0.87-12.80)	1.20 (0.34-3.52)	0.60 (0.15-0.86)	48.33 (0.20-91.61)	50.1 (0.8-94.8)	0.23 (0.09-0.49)	19.5 (0.8-62.8)
12 Mar. 2008	21.1	18.56 (0.98-33.36)	9.31 (8.99-9.82)	8.19 (7.71-8.37)	11.75 (9.93-12.77)	16.64 (4.10-29.50)	6.32 (3.06-10.84)	0.26 (0.00-1.57)	0.74 (0.03-1.19)	47.99 (1.93-81.23)	48.9 (2.0-84.0)	0.28 (0.09-0.86)	49.0 (0.3-115.6)
26 Aug. 2005	132.0	7.90 (0.00-21.34)	24.16 (22.00-25.99)	7.76 (7.46-8.00)	8.47 (7.18-9.76)	3.66 (1.51-8.95)	1.35 (0.45-3.91)	3.02 (0.87-5.68)	0.62 (0.26-1.25)	61.71 (28.75-107.34)	65.4 (35.5-108.5)	0.85 (0.25-1.16)	137.0 (80.7-165.9)
25 Jul. 2006	100.0	4.65 (0.04-16.48)	22.03 (21.30-23.44)	7.97 (7.49-8.45)	10.08 (5.32-12.73)	3.50 (1.42-7.03)	1.88 (0.68-8.89)	1.69 (0.22-3.17)	0.73 (0.19-1.79)	73.14 (52.74-79.61)	75.6 (55.9-80.1)	0.87 (0.36-0.99)	139.1 (78.2-167.0)
16 Jul. 2007	26.5	17.47 (0.21-32.25)	23.53 (22.35-24.91)	7.42 (6.88-7.85)	7.50 (7.03-8.32)	8.04 (1.70-15.56)	6.43 (1.61-14.80)	4.12 (0.67-6.77)	1.27 (0.41-1.76)	30.35 (3.51-45.72)	36.2 (7.2-53.5)	1.10 (0.51-1.51)	55.0 (9.7-97.2)
25 Jul. 2008	71.9	16.01 (0.06-29.81)	27.07 (25.67-28.47)	7.66 (7.29-8.73)	8.12 (7.31-8.91)	10.08 (2.70-37.05)	6.90 (3.20-13.12)	4.88 (0.79-6.71)	0.87 (0.30-1.16)	40.10 (10.41-78.10)	46.2 (14.6-79.7)	1.34 (0.79-1.80)	95.6 (40.6-142.8)

범위로 우기에 비해 건기에 9 정도 높았다. 조사기간 동안(2005~2008년) 강수량은 대부분 6~9월(우기)에 집중되었고, 이 시기에 담수 유량 또한 증가하였다(Fig. 2). 월평균 강수량은 건기(3월)와 우기(7~8월)에 각각 평균 43.8 mm(13.0~80.0 mm), 316 mm(134~675 mm)였고, 담수 유량은 건기와 우기에 각각 월평균 $21 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$ (13.8~30.9 $\text{m}^3 \text{ sec}^{-1}$), $212 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$ (48~713 $\text{m}^3 \text{ sec}^{-1}$)로 건기에 비해 우기에 약 10배 높았다. 섬진강 하구에서 시기별 염분 분포 및 담수 유량은 강수량의 영향을 크게 받는 것으로 판단된다(Park 등, 2012).

pH는 건기에 7.71~8.77(평균 8.23 ± 0.03) 범위였으며, 우기에는 6.88~8.73(평균 7.70 ± 0.23) 범위였다(Table 1). pH는 일반적으로 해수에 비해 담수에서 낮기 때문에 건기에 비해 담수의 유입이 많은 우기에 낮게 나타났다(Chester, 2000). 염분에 따른 pH의 변화 양상은 건기에는 대체로 염분이 증가함에 따라 약간 감소하거나 일정한 분포양상을 보였으며, 우기에는 염분이 증가함에 따라 pH가 대체로 증가하는 양상을 보였다(Fig. 4).

DO 농도는 건기에 $7.49 \sim 17.41 \text{ mg L}^{-1}$ (평균 $11.65 \pm 2.41 \text{ mg L}^{-1}$) 범위였으며, 우기에 $5.32 \sim 12.73 \text{ mg L}^{-1}$ (평균 $8.54 \pm 1.46 \text{ mg L}^{-1}$) 범위였다. DO 농도는 전 조사기간 동안 대체로 염분이 증가함에 따라 감소하거나 일정한 양상을 보였다. DO 농도는 우기에 비해 수온이 낮아 용존산소 포화도가 증가하는 건기에 상대적으로 높게 나타났다며, 조사 시기별로 농도차가 크게 나타났다. 특히 하계 2007년 3월에 중간 염분 수역에서 DO 농도가 증가하는 양상을 보였다. 이 시기에 엽록소 *a*의 농도가 높게 나타나(Fig. 5) 식물플랑크톤의 광합성에 의해서 공급된 DO로 인해 수층의 DO 농도가 증가한 것으로 판단된다.

SPM 농도는 건기와 우기에 각각 $2.88 \sim 37.56 \text{ mg L}^{-1}$ (평균 $12.06 \pm 8.68 \text{ mg L}^{-1}$), $1.42 \sim 37.05 \text{ mg L}^{-1}$ (평균 $6.32 \pm 5.91 \text{ mg L}^{-1}$) 범위였다. 건기에 SPM 농도는 2008년을 제외하고 염분경사에 따라 뚜렷한 변화 양상을 보이지 않았으며, 우기에는 대체로 증가하는 양상을 보였다.

3.2. 영양염 및 엽록소 *a* 분포

강을 통해서 하구로 공급된 영양염류는 다양한 생지화학적 과정을 거치면서 공급 또는 제거된다(Boyle 등, 1974; Edmond 등, 1985; Balls, 1992). 섬진강 상류 염

분 0 부근에서 용존무기질소(NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^-), 용존무기인(PO_4^{3-}), 용존무기규소($\text{Si}(\text{OH})_4$) 농도는 건기와 우기에 각각 평균 42.6, 0.41, 28.9 μM 과 55.8, 1.04, 106.7 μM 였다(Table 1). 용존무기질소 및 용존무기인의 경우 건기에 비해 우기에 각각 약 1.3, 2.5배 높게 나타났다, 용존무기규소는 건기에 비해 우기에 약 3.7배 높게 나타났다. 같은 해역에서 Kwon 등(2002)에 의해서 1999~2001년에 조사된 용존무기질소, 용존무기인, 용존무기규소 농도는 건기에 각각 62.0, 0.70, 43.4 μM , 우기에 각각 65.5, 1.16, 99.0 μM 로 이 연구결과보다 대체로 높은 값을 보였다. Kim 등(2004)에 의해서 2000년 6월에 한강 하류에 위치한 전류리 부근(염분 0.2~1.7)에서 조사된 영양염류의 농도는 용존무기질소의 경우 약 370 μM 이었다. 섬진강 하구에서 조사한 결과에 비해서 약 6~8배 높아 섬진강 하구가 한강 하구에 비해서 육상으로부터 공급되는 용존무기질소 농도가 낮은 것으로 나타났다. 조사기간 동안 NO_3^- , NO_2^- , $\text{Si}(\text{OH})_4$ 는 대체로 섬진강 상부에서 높은 농도를 보였으며, 염분이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인 반면, NH_4^+ 와 PO_4^{3-} 는 조사시기에 따라 담수와 해수의 혼합구간에서 제거 또는 공급되는 다양한 형태의 분포 양상을 보였다(Fig. 5). NH_4^+ 의 경우 우기에는 하구에서 대체로 공급되는 양상을 보여 이는 저층으로부터 재용출에 의한 공급으로 판단되며, 건기에는 NH_4^+ 가 제거되는 양상을 보인 염분구간에서는 엽록소 *a*가 높게 나타나 식물플랑크톤의 광합성 작용에 의해 소모된 것으로 판단된다(Carpenter 등, 1972; McCarthy 등, 1977)(Fig. 5). PO_4^{3-} 의 경우 NH_4^+ 의 기작과 유사하게 우기에는 공급, 건기에는 제거되는 양상을 보였다(Fig. 5). 섬진강 하구에서 PO_4^{3-} 의 시공간적 분포 양상은 우기에 비해 SPM의 농도가 높게 나타난 건기에 하구에서 제거되는 기작을 보여 이 시기에 PO_4^{3-} 이 부유입자물질에 흡착 및 식물플랑크톤의 광합성에 의한 소모로 제거되는 양상을 보이는 것으로 판단된다(Bale과 Morris, 1981). 일반적으로 PO_4^{3-} 은 하구에서 제거되는 기작을 보이지만 섬진강 하구에서 우기에 염분 약 5~15 범위에서 공급되는 경향을 보였다. 이는 부유입자물질의 농도가 낮은 우기 동안 비점오염원에 의한 공급이 더 우세했던 것으로 판단된다.

해수 중 주요 환경인자(pH, DO, 영양염류 등)들의 농도 분포와 밀접한 상호 연관성이 있는 엽록소 *a*는 건기에

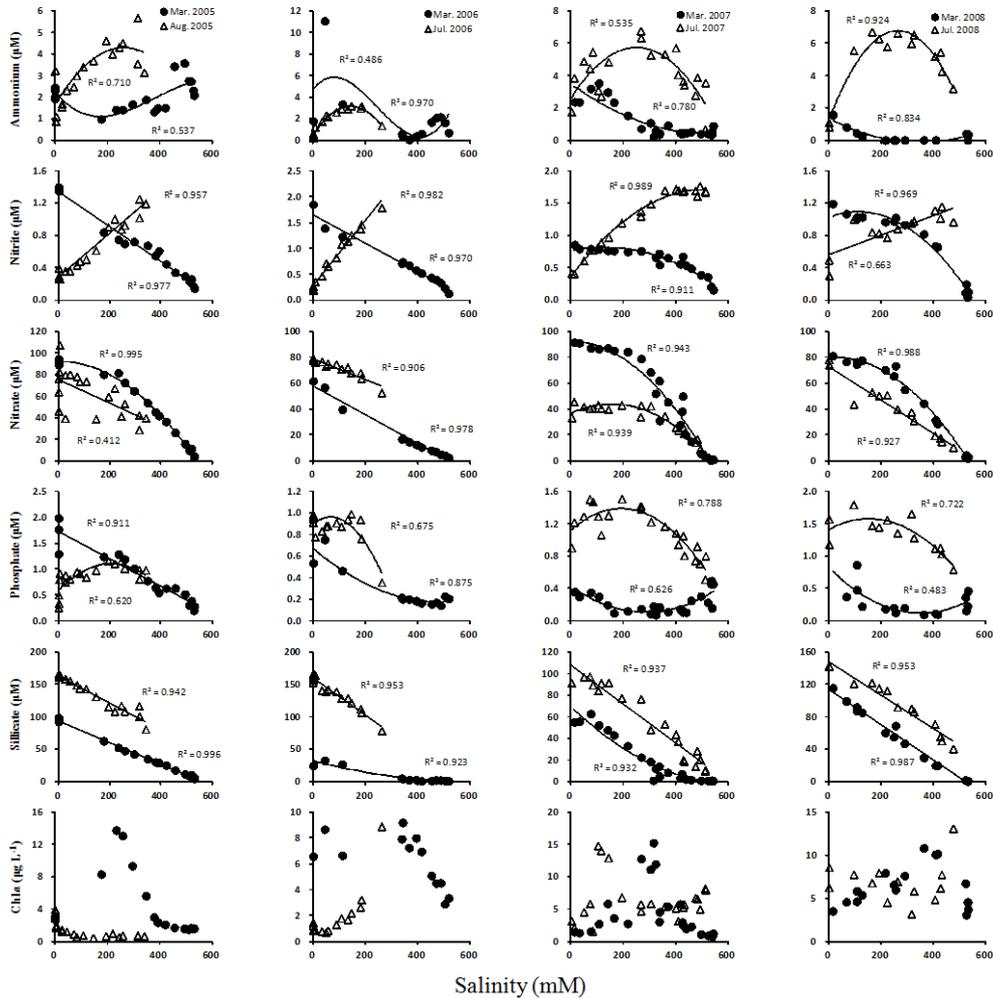


Fig. 5. Relationship of ammonium (μM), nitrite (μM), nitrate (μM), phosphate (μM), silicate (μM), and chlorophyll *a* ($\mu\text{g L}^{-1}$) with salinity in the surface water of the Seomjin River estuary during the dry and rainy seasons.

0.87~13.75 mg L^{-1} (평균 $5.13 \pm 3.57 \text{ mg L}^{-1}$) 범위였으며, 우기에는 0.45~14.80 mg L^{-1} (평균 $4.14 \pm 3.54 \text{ mg L}^{-1}$) 범위였다. 건기에 엽록소 *a*는 2005년과 2006년에는 염분이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였으며, 2007년과 2008년에는 염분 15~25 범위에서 높게 나타났다. 엽록소 *a* 농도가 높은 염분대에서 용존무기영양염 농도는 대체로 제거되는 양상을 보이고 있다(Fig. 5). 식물플랑크톤이 성장하는데 필요한 용존무기질소(NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^-)의 경우, NO_2^- 와 NO_3^- 농도는 보존적 양상을 보인 반면 NH_4^+ 는 제거되는 양상이 뚜렷하게 나타났다

다. 이러한 양상은 식물플랑크톤이 광합성하는 과정에서 용존무기질소 중 NO_2^- 와 NO_3^- 보다 NH_4^+ 를 먼저 선택적으로 흡수함으로 인해 나타난 것으로 판단된다(McCarthy 등, 1977; Dortch, 1990). 반면 우기에는 2005년에 염분 0 부근에서 높게 나타났으며, 염분이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 반대로 2006년 7월에는 염분이 증가함에 따라 증가하는 양상을 보였다. 엽록소 *a*는 우기에 비해 건기에 대체로 높게 나타났으며, 시기에 따른(건기와 우기) 엽록소 *a* 농도차는 강물 유출량의 변화에 영향을 받는 것으로 판단된다(Park 등,

2012). 우기에는 염분경사에 따라 농도 변화가 크지 않은 반면, 건기에는 변화폭이 크게 나타났다.

3.3. 섬진강 하구를 통한 영양염 플럭스

섬진강 하구를 통해서 해양으로 공급되는 용존무기영양염류(NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , Si(OH)_4)의 플럭스를 Kaul과 Froelich(1984)에 의해서 제시된 방법을 이용하여 계산하였다(Table 2, 3). 하구를 정상상태로 가정하고 보존적 거동을 보이는 염분을 혼합지수로 용존무기영양염류의 혼합과정 중 발생하는 이류-확산 공식을 이용하여 영양염류의 플럭스를 추정하였다. 염분은 chloride 농도로 환산하여 사용하였다(35 salinity = 558.6 mM Cl⁻)(Kaul과 Froelich, 1984).

육상으로부터 섬진강 하구로 유입되는 영양염 플럭스(F_{Riv})는 담수의 유량과 endmember에서의 영양염 농도를 곱하여 계산하였다. 2005~2008년에 현장조사를 실시한 날의 일평균 담수 유량은 건기(3월)와 우기(7~8월)에 각각 $14.0\sim 21.1 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$ (평균 $16.4\pm 3.2 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$), $26.7\sim 132.0 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$ (평균 $82.6\pm 44.7 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$)범위로 건기에 비해 우기에 약 5배 많았다(Table 1). 담수를 통해 섬진강 하구로 유입되는 NH_4^+ 플럭스(F_{Riv})는 건기에 $0.030\sim 0.045 \text{ tons day}^{-1}$ (평균 $0.039 \text{ tons day}^{-1}$) 범위였으며, 우기에는 $0.037\sim 0.346 \text{ tons day}^{-1}$ (평균 $0.135 \text{ tons day}^{-1}$) 범위였다. NH_4^+ 플럭스는 건기에 비해 우기에 약 3배 이상 높았으며 건기에 비해 우기에 조사시기에 따른 변화가 크게 나타났다.

NO_2^- 플럭스(F_{Riv})는 건기에 $0.016\sim 0.031 \text{ tons day}^{-1}$ (평균 $0.026 \text{ tons day}^{-1}$) 범위였으며, 우기에는 $0.013\sim 0.054 \text{ tons day}^{-1}$ (평균 $0.035 \text{ tons day}^{-1}$) 범위로 건기에 비해 우기에 높게 나타났다. NO_3^- 플럭스(F_{Riv})는 건기에 $1.03\sim 2.07 \text{ tons day}^{-1}$ (평균 $1.45 \text{ tons day}^{-1}$) 범위였으며, 우기에는 $1.07\sim 9.82 \text{ tons day}^{-1}$ (평균 $6.80 \text{ tons day}^{-1}$) 범위로 건기에 비해 우기에 약 4배 이상 높았으며, 우기에는 유출량의 변화가 심하였다. PO_4^{3-} 플럭스(F_{Riv})는 건기와 우기에 각각 $0.016\sim 0.067 \text{ tons day}^{-1}$ (평균 $0.031 \text{ tons day}^{-1}$), $0.064\sim 0.303 \text{ tons day}^{-1}$ (평균 $0.188 \text{ tons day}^{-1}$) 범위였다. Si(OH)_4 플럭스(F_{Riv})는 건기에 $0.84\sim 5.89 \text{ tons day}^{-1}$ (평균 $3.06 \text{ tons day}^{-1}$) 범위였으며, 우기에는 $5.86\sim 52.3 \text{ tons day}^{-1}$ (평균 $30.47 \text{ tons day}^{-1}$) 범위였다. 건기와 우기에 육상으로부터 섬진강 하

구로 공급되는 영양염류는 대체로 건기에 비해 우기에 높게 나타났으며, 건기에 비해 우기에 조사 시기별로 영양염류 유출량의 변화가 크게 나타났다.

하구로 공급된 영양염류가 하구에서 공급(F_{In}) 또는 제거(F_{Rem})되는 양은 Table 2와 3에 정리하였다. 건기에 하구에서 NH_4^+ 의 제거량은 $-0.066 \text{ tons day}^{-1}$ 였고 공급량은 없었다. 반면 우기에는 제거량이 없었으며 공급되는 양은 약 $0.811 \text{ tons day}^{-1}$ 였다. NO_3^- 과 NO_2^- 은 조사 기간 동안 하구내에서 제거되는 양은 없었으며, NO_2^- 는 건기와 우기에 공급량은 각각 $0.013, 0.009 \text{ tons day}^{-1}$ 였으며, NO_3^- 는 건기에 $1.46 \text{ tons day}^{-1}$, 우기에 $0.66 \text{ tons day}^{-1}$ 공급되었다. 건기에 PO_4^{3-} 와 Si(OH)_4 의 제거량은 각각 $-0.027, -0.55 \text{ tons day}^{-1}$ 였고, 공급량은 없었다. 우기에 PO_4^{3-} 의 공급량은 $0.233 \text{ tons day}^{-1}$ 였고, Si(OH)_4 의 공급량은 없었으며, PO_4^{3-} 과 Si(OH)_4 의 제거량은 없었다. NH_4^+ 와 PO_4^{3-} 는 하구에서 건기에는 대체로 제거되고 우기에는 공급되는 양상을 보였다. 반면 NO_3^- 와 NO_2^- 는 하구에서 공급되는 양이 우세하였다. Si(OH)_4 의 경우 건기에는 하구에서 제거되는 양상을 보였으나 우기에는 공급과 제거되는 양이 없어 하구에서 보존적인 거동을 보이는 것으로 판단된다. 섬진강 하구에서 우기에 Si(OH)_4 의 플럭스를 추정할 이전 결과에 의하면 하구를 통해 최종적으로 해양으로 공급되는 Si(OH)_4 의 약 30%가 하구내에서 공급되는 것으로 보고되었다(Kim, 1992; Kwon 등, 2004)(Table 3). 그러나 Kim 등(2004)은 한강에서 Si(OH)_4 가 하계에 제거되는 양상을 보이는 것으로 보고하였으며, Wollast와 de Broeu(1971)에 의해서 Scheldt estuary에서 추정한 결과에서도 하구에서 Si(OH)_4 는 구조류에 의해서 주로 제거된다고 보고하였다. 따라서 섬진강 하구에서 Si(OH)_4 의 거동 및 플럭스는 조사시기에 따라 물리적인 요인(유속 및 유량 등)과 식물플랑크톤 번식 등과 같은 여러 요인에 의해서 복합적으로 조절되는 것으로 판단된다.

육상으로부터 하구로 공급된 영양염류가 하구에서 생지화학적 과정을 거쳐 최종적으로 해양(광양만)으로 유출되는 양을 계산하였다(Table 2, 3). 하구를 통해 광양만으로 유출되는 NH_4^+ 의 플럭스(F_{Est})는 건기에 $-0.097\sim 0.027 \text{ tons day}^{-1}$ (평균 $-0.028 \text{ tons day}^{-1}$), 우기에 $0.543\sim 1.683 \text{ tons day}^{-1}$ (평균 $0.944 \text{ tons day}^{-1}$) 범위였다. NO_2^- 는 건기와 우기에 각각 $0.025\sim 0.070 \text{ tons}$

Table 2. Flux of nutrients in the Seomjin River estuary

		F_{Riv}	F_{In}	F_{Rem}	F_{Est}	F_{In}/F_{Riv}	F_{Rem}/F_{Riv}	F_{Est}/F_{Riv}		
		tons day ⁻¹				%				
NH ₄ ⁺	Dry season	Mar. 2005	0.040	0.000	-0.137	-0.097	0	-342	-242	
		Mar. 2006	0.030	0.000	-0.052	-0.022	0	-172	-72	
		Mar. 2007	0.045	0.000	-0.018	0.027	0	-41	59	
		Mar. 2008	0.040	0.000	-0.058	-0.018	0	-145	-45	
	Rainy season	Aug. 2005	0.346	0.535	0.000	0.881	155	0	255	
		Jul. 2006	0.037	0.634	0.000	0.671	1690	0	1790	
		Jul. 2007	0.056	0.487	0.000	0.543	876	0	976	
		Jul. 2008	0.096	1.587	0.000	1.683	1661	0	1761	
	NO ₂ ⁻	Dry season	Mar. 2005	0.025	0.000	0.000	0.025	0	0	100
			Mar. 2006	0.031	0.000	0.000	0.031	0	0	100
Mar. 2007			0.016	0.011	0.000	0.027	69	0	169	
Mar. 2008			0.030	0.040	0.000	0.070	132	0	232	
Rainy season		Aug. 2005	0.054	0.000	0.000	0.054	0	0	100	
		Jul. 2006	0.028	0.000	0.000	0.028	0	0	100	
		Jul. 2007	0.013	0.037	0.000	0.051	282	0	382	
		Jul. 2008	0.044	0.000	0.000	0.044	0	0	100	
NO ₃ ⁻		Dry season	Mar. 2005	1.67	1.44	0.00	3.11	86	0	186
			Mar. 2006	1.05	0.00	0.00	1.05	0	0	100
	Mar. 2007		1.03	2.32	0.00	3.35	225	0	325	
	Mar. 2008		2.07	2.09	0.00	4.16	101	0	201	
	Rainy season	Aug. 2005	9.82	0.00	0.00	9.82	0	0	100	
		Jul. 2006	9.51	0.00	0.00	9.51	0	0	100	
		Jul. 2007	1.07	2.62	0.00	3.69	245	0	345	
		Jul. 2008	6.79	0.00	0.00	6.79	0	0	100	
	PO ₄ ³⁻	Dry season	Mar. 2005	0.067	0.000	0.000	0.067	0	0	100
			Mar. 2006	0.021	0.000	-0.013	0.008	0	-63	38
Mar. 2007			0.016	0.000	-0.040	-0.024	0	-250	-150	
Mar. 2008			0.021	0.000	-0.056	-0.035	0	-263	-163	
Rainy season		Aug. 2005	0.134	0.429	0.000	0.562	320	0	420	
		Jul. 2006	0.252	0.083	0.000	0.335	33	0	133	
		Jul. 2007	0.064	0.153	0.000	0.217	238	0	338	
		Jul. 2008	0.303	0.268	0.000	0.570	88	0	188	
Si(OH) ₄		Dry season	Mar. 2005	3.46	0.00	0.00	3.46	0	0	100
			Mar. 2006	0.84	0.000	-0.43	0.40	0	-52	48
	Mar. 2007		2.06	0.00	-1.77	0.30	0	-86	14	
	Mar. 2008		5.89	0.00	0.00	5.89	0	0	100	
	Rainy season	Aug. 2005	52.3	0.0	0.0	52.3	0	0	100	
		Jul. 2006	38.9	0.0	0.0	38.9	0	0	100	
		Jul. 2007	5.86	0.00	0.00	5.86	0	0	100	
		Jul. 2008	24.8	0.0	0.0	24.8	0	0	100	

Table 3. Comparison of nutrient fluxes in the Seomjin River estuary

			F_{Riv}	F_{In}	F_{Rem}	F_{Est}	F_{In}/F_{Riv}	F_{Rem}/F_{Riv}	F_{Est}/F_{Riv}	Reference
			tons day ⁻¹				%			
Rainy season	Aug. 1991	NH_4^+	2.16	0.00	-1.78	0.39	0	-82	18	Kim (1992)
		NO_2^-	0.042	0.156	-0.016	0.183	400	-50	450	
		NO_3^-	4.40	0.00	-3.72	0.69	0	-85	16	
		PO_4^{3-}	0.02	0.00	-1.76	-1.74	0	-8800	-8700	
		$Si(OH)_4$	84	43	0	126	51	0	151	
Dry season	Mar. 1999-2000	NH_4^+	0.15	1.21	-0.46	0.91	807	-307	607	Kwon et al. (2004)
		NO_2^-	0.054	0.013	-0.006	0.060	20	-20	120	
		NO_3^-	3.76	1.60	-0.39	4.98	43	-10	132	
		PO_4^{3-}	0.054	0.000	-0.027	0.027	0	-60	60	
		$Si(OH)_4$	4.22	6.59	-0.90	9.92	156	-21	235	
Rainy season	Jul. 1999 Aug. 2000	NH_4^+	3.68	2.16	0.00	5.84	59	0	159	This study
		NO_2^-	0.222	0.514	0.000	0.736	232	0	336	
		NO_3^-	36.1	3.9	0.0	40.1	11	0	111	
		PO_4^{3-}	1.08	0.20	-0.50	0.79	18	-46	72	
		$Si(OH)_4$	95	33	0	128	34	0	134	
Dry season	Mar. 2005-2008	NH_4^+	0.039	0.000	-0.066	-0.028	0	-171	-71	This study
		NO_2^-	0.026	0.013	0.000	0.038	49	0	149	
		NO_3^-	1.45	1.46	0.00	2.91	100	0	200	
		PO_4^{3-}	0.031	0.000	-0.027	0.004	0	-87	13	
		$Si(OH)_4$	3.06	0.00	-0.55	2.51	0	-18	82	
Rainy season	Aug. 2005 Jul. 2006-2008	NH_4^+	0.134	0.811	0.000	0.944	607	0	707	This study
		NO_2^-	0.035	0.009	0.000	0.044	27	0	127	
		NO_3^-	6.80	0.66	0.00	7.45	10	0	110	
		PO_4^{3-}	0.188	0.233	0.000	0.421	124	0	224	
		$Si(OH)_4$	30.5	0.0	0.0	30.5	0	0	100	

* Kim (1992) : Values estimated in Aug. 1991

* Kwon et al. (2004) : Average values estimated in Mar. 1999, Mar. 2000 (dry season) and Jul. 1999, Aug. 2000 (rainy season), respectively

* This study : Average values estimated in the dry and rainy seasons during 2005~2008

day⁻¹(평균 0.038 tons day⁻¹), 0.028~0.054 tons day⁻¹ (평균 0.044 tons day⁻¹) 범위였으며, NO₃⁻는 각각 1.05~4.16 tons day⁻¹(평균 2.92 tons day⁻¹), 3.69~9.82 tons day⁻¹(평균 7.45 tons day⁻¹) 범위였다. PO₄³⁻는 건기에 약 -0.035~0.067 tons day⁻¹(평균 0.004 tons day⁻¹), 우기에 0.217~0.570 tons day⁻¹(평균 0.421 tons day⁻¹), Si(OH)₄는 건기에 0.30~5.89 tons day⁻¹(평균 2.51 tons day⁻¹), 우기에 5.86~52.3 tons day⁻¹(평균 30.5 tons day⁻¹) 범위로 해양으로 유출되었다. 하구를 통해서 해양으로 공급되는 영양염의 양은 NO₂⁻의 경우 건기와 우기에 유사하였으며, NH₄⁺의 경우 약 30배, NO₃⁻의 경우 약 2.5배, PO₄³⁻의 경우 약 100배, Si(OH)₄의 경우 건기에 비해 우기에 약 12배 높았다.

섬진강 하구에서 Kwon 등(2004)에 의해서 건기와 우기에 추정된 결과와 비교했을 때 해양으로 유출되는 영양염류의 양은 줄어든 것으로 나타났다(Table 3). 용존 무기질소의 경우 건기와 우기에 각각 약 2배, 5.5배 감소한 것으로 나타났으며, 용존무기규소의 경우도 건기와 우기에 각각 약 4배 감소한 것으로 나타났다. Kim(1992)에 의해서 1991년에 우기에 추정된 용존무기규소의 유출량(F_{Est})는 126 tons day⁻¹로 Kwon 등(2004)에 의해서 추정된 결과와 유사하였다.

육상으로부터 섬진강으로 공급된 영양염류 양에 대한 하구를 통해 해양(평양만)으로 최종적으로 공급되는 영양염류의 양의 비율(F_{Est}/F_{Riv})은 NH₄⁺의 경우 건기에 약 -71%, 우기에 약 707%, NO₂⁻의 경우 건기에 약 149%, 우기에 127%, NO₃⁻의 경우 건기에 약 200%, 우기에 약 110%, PO₄³⁻의 경우 건기와 우기에 각각 약 13%, 224%, Si(OH)₄의 경우 건기와 우기에 82%, 100%로 나타났다. Kaul과 Froelich(1984)에 의해서 미국 플로리다 Ochlockonee Bay에서 조사된 NH₄⁺와 NO₃⁻의 F_{Est}/F_{Riv} 비는 약 3.16, 0.79였으며, 강을 통해서 하구로 공급된 질소계열 영양염류는 탈질산화 과정에서 NO₃⁻+NO₂⁻는 제거되고 NH₄⁺는 공급되는 것으로 보고하였다. 그러나 섬진강 하구에서 추정된 결과, 우기 동안에는 NO₃⁻과 NO₂⁻의 경우 F_{Est}/F_{Riv} 비는 조사기간 동안 약 1이였으며, NH₄⁺의 경우 평균 약 7.07이었다. 따라서 섬진강 하구에서 NH₄⁺의 공급(F_{In})은 NO₃⁻과 NO₂⁻의 탈질산화 과정에 의한 공급이라기 보다는 비점오염원으로부터 공급되는 것으로 판단된다(Kwon 등, 2004).

4. 결론

섬진강 하구에서 2005~2008년까지 건기(3월)와 우기(7~8월)에 육상으로부터 하구를 통하여 해양으로 최종 공급되는 영양염류의 양을 추정하였다. 건기와 우기 사이의 담수 유출량은 각각 월평균 21, 212 m³ sec⁻¹로 건기에 비해 우기에 약 10배 높았으며, 담수 endmember에서 용존무기질소, 용존무기인, 용존무기규소의 농도는 건기와 우기에 각각 평균 42.6, 0.41, 28.9 μM과 55.8, 1.04, 106.7 μM로 건기에 비해 우기시 높았다. 하구를 통해서 해양으로 유출되는 용존무기질소, 용존무기인, 용존무기규소의 유출량은 건기에 비해 우기시 각각 약 2.9, 100, 12배로 높았다. 섬진강 하구를 통해서 해양으로 공급되는 영양염류의 유출량은 주로 인위적 또는 기후변화에 의한 담수 중 용존무기영양염류의 농도와 담수 유출량의 변화에 의해 조절될 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 해양수산부 「해양환경측정망 운영」 사업의 지원으로 수행되었습니다. 이 논문을 세심하게 검토 해주신 익명의 심사위원분들께 진심으로 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Bale, A. J., Morris, A. W., 1981, Laboratory simulation of chemical processes induced by estuarine mixing : The behaviour of iron and phosphate in estuaries, Est. Coast. Shelf Sci., 13, 1-10.
- Balls, P. W., 1992, Nutrient behaviour in two contrasting Scottish estuaries, the Forth and Tay, Oceanol. Acta, 15, 261-277.
- Billen, G., Somville, M., de Becker, E., Servais, P., 1985, A nitrogen budget of the Scheldt hydro- graphical basin, Neth. J. Sea Res., 19, 223-230.
- Boyle, E., Collier, R., Dengler, A. T., Edmond, J. M., Ng, A. C., Stallard, R. F., 1974, On the chemical mass-balance in estuaries, Geochim. Cosmochim. Acta, 38, 1719-1728.
- Carpenter, E. J., Remsen, C. C., Watson, S. W., 1972, Utilization of urea by some marine phytoplankters, Limnol. Oceanogr., 17, 265-269.
- Chester, R., 2000, Marine Geochemistry, Blackwell

- Science.
- Church, T. M., 1996, An underground route for the water cycle, *Nature*, 380, 579-580.
- Dortch, Q., 1990. The interaction between ammonium and nitrate uptake in phytoplankton, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 61, 183-201.
- Edmond, J. M., Spivack, A., Grant, B.C., Ming-Hui, H., Zexiam, C., Sung, C., Xiushau, Z., 1985, Chemical dynamics of the Changjiang estuary, *Continental Shelf Res.*, 4, 17-36.
- Kaul, L. W., Froelich Jr., P. N., 1984, Modeling estuarine nutrient geochemistry in a simple system, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 48, 1417-1433.
- KEI, 2005, Development of sustainable estuary management strategy in Korea II, Korea Environment Institute.
- 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.
- Kim, D. H., Park, Y. C., Lee, H. J., Son, J. W., 2004, Characteristics of geochemical processes along the salinity gradient in the Han River Estuary, *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 9, 196-203.
- Kwon, K. Y., Moon, C. H., Kang, C. K., Kim, Y. N., 2002, Distribution of particulate organic matters along the salinity gradients in the Seomjin River estuary, *J. Korean Fish. Soc.*, 35, 86-96.
- Kwon, K. Y., Moon, C. H., Lee, J. S., Yang, S. R., Park, M. O., Lee, P. Y., 2004, Estuarine behavior and flux of nutrients in the Seomjin River estuary, *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 9, 153-163.
- Lebo, M. E., Sharp, J. H., 1992, Modeling phosphorus cycling in a well-mixed coastal plain estuary, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 35, 235-252.
- Lebo, M. E., Sharp, J. H., Cifuentes, L. A., 1994, Contribution of river phosphate variations to apparent reactivity estimated from phosphate-salinity diagrams, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 39, 583-594.
- Liu, S. M., Hong, G. H., Zhang, J., Ye, X. W., Jiang, X. L., 2009, Nutrient budgets for large Chinese estuaries, *Biogeosciences*, 6, 2245-2263.
- McCarthy, J. J., Taylor, W. R., Taft, J. L., 1977, Nitrogenous nutrition of the plankton in the Chesapeake Bay. 1. Nutrient availability and phytoplankton preferences, *Limnol. Oceanogr.*, 22, 996-1011.
- MCT, 2005, Annual hydrological report on Korea, Ministry of Construction & Transportation.
- MCT, 2006, Annual hydrological report on Korea, Ministry of Construction & Transportation.
- MLTMA, 2007, Annual hydrological report on Korea, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs.
- MLTMA, 2008, Annual hydrological report on Korea, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs.
- MMAF, 2005, Standard methods of marine environment in Korea, Ministry of Maritime Affairs and Fisheries.
- Officer, C. B., 1979, Discussion of the behaviour of nonconservative dissolved constituents in estuaries, *Est. Coast. Mar. Sci.*, 9, 91-94.
- Park, M. O., Kim, S. S., Kim, S. G., Kwon, J., Lee, S. M., Lee, Y. W., 2012, Factors controlling temporal-spatial variations of marine environment in the Seomjin River estuary through 25-hour continuous monitoring, *J. Korean Mar. Environ. Energy*, 15, 314-322.
- Sanders, R. J., Jickells, T., Malcolm, S., Brown, J., Kirkwood, D., Reeve, A., Taylor, J., Horrobin, T., Ashcroft, C., 1997, Nutrient fluxes through the Humber estuary, *J. Sea Res.*, 37, 3-23.
- Sharp, J. H., Culberson, C. H., Church, T. M., 1982, The chemistry of the Delaware estuary, General considerations, *Limnol. Oceanogr.*, 27, 1015-1028.
- Wollast, R., de Broeu, F., 1971, Study of the behavior of dissolved silica in the estuary of the Scheldt, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 35, 613-620.