

## 하구언 담수방류와 영산강 하구 식물플랑크톤 생체량 및 환경인자의 장기변동

윤보배<sup>1</sup> · 이어진 · 강태안 · 신용식\*

(목포해양대학교 환경·생명공학과, <sup>1</sup>한국기초과학지원연구원)

Long-term Change of Phytoplankton Biomass (chlorophyll-*a*), Environmental Factors and Freshwater Discharge in Youngsan Estuary. Yoon, Bo-bae<sup>1</sup>, Eo-jin Lee, Tae-ahn Kang and Yong-sik Shin\* (Department of Marine Environmental Engineering and Biotechnology, Mokpo National Maritime University, Mokpo 530-790, Korea; <sup>1</sup>Korea Basic Science Institute, Seoul 136-701, Korea)

In Yeongsan River estuary, located in the southern West Coast, a dike was constructed in December 1981. After the construction of a dike, discharge mechanism of fresh water has been changed, the water quality and chlorophyll-*a* are expected to be influenced by fresh water discharge. We investigated temporal and spatial variations and long-term trend of phytoplankton biomass (chlorophyll-*a*) and environmental factors. The concentrations of nutrient and chlorophyll-*a* were generally high in summer and the concentrations were increased toward downstream. Surface/bottom salinity difference was negatively correlated with salinity in surface water but positively with nutrient and chlorophyll-*a*. TN, TP and DIN concentrations were generally increased over 10 years. This study can provide information for better management of water quality for Youngsan River estuary.

**Key words :** phytoplankton, water quality, dike, Youngsan River estuary

### 서 론

해양생태계에서 하구는 육상의 영향을 직접적으로 받고 있으며, 담수와 해수가 혼합되는 완충지대로 조석, 파랑 및 담수 유입 등에 의한 영향을 받아 물리, 화학, 생물, 지리학적으로 매우 복잡한 환경을 갖고 있다. 또한, 육지로부터 유입되는 유기물질 및 부유물질은 하구에 서식하는 생물들의 유·무기물질의 공급원으로 널리 알려

져 있다 (Kim and Lee, 2000). 특히, 영양염류의 유입으로 인해 일차생산자인 식물플랑크톤의 대증식이 발생할 경우, 포식되지 않은 식물플랑크톤이 저층으로 침전하여 용존산소의 감소에 기여하는 악영향을 주기도 한다 (Sundbaeck *et al.*, 1990).

본 연구지역인 영산강 하구는 남해 서부 가장자리의 영산강과 인접하여 위치하고 있으며, 무안반도와 영암반도 그리고 많은 섬들로 둘러싸인 반폐쇄적인 해역이다 (Kim, 2001; Cho, 2010). 1973년부터 영산강 유역 개발사

\* Corresponding author: Tel: +82-61-240-7312, Fax: +82-61-240-7321, E-mail: yongsik@mmu.ac.kr

업의 일환으로 농경지 개발 및 임해공단 조성사업이 현재 까지 지속적으로 추진되고 있으며 (Cho and Park, 1998), 1981년에 영산강 방조제가 건설되었고, 1991년 영산강 하구 연안에 영암방조제, 1994년에는 금호방조제가 건설되었다 (Kang, 1996). 또한, 영산강 하구 주변지역에는 삼호공단과 대불공단이 위치하고 있으며, 남약 신도시가 건설되는 등 서남권 경제 활성화와 생활 기지향으로서 영산강 하구의 역할이 점차 증대되고 있다 (Kim, 2000). 이러한 영산강 하구는 우기시에 영산강 방조제의 수문이 개방됨으로써 많은 양의 담수가 일시적으로 해역으로 유입되고, 이에 따라 영산강 하구내에 많은 변화를 야기시키며, 더불어 목포 주변해역 수질의 주요 오염부하원인으로 보고되고 있다 (Kim and Ryu, 2003).

현재까지 영산강 하구와 그 주변해역에 대한 연구는 수질인자 및 부영양도 (Kim, 2000; Kim, 2001; Cho, 2010), 조류 특성 및 물리적 유동 (Kang *et al.*, 1998; Jeong and Keum, 1999; Kang *et al.*, 2003), 방조제 건설로 인한 변화 (Kang, 1996; Kang and Ihm, 1998), 월별 식물플랑크톤 동태 (Sin *et al.*, 2005a) 등이 이루어진 상태이다. 또한, 수질에 대한 장기변동 분석도 수행되었지만 (Sin *et al.*, 2005b; Park *et al.*, 2010), 영산강 하구와 인접한 영산호, 영암호, 금호호에서의 담수 유입과 영산강 하구의 부유생태 및 수질의 장기적 연관성에 대한 이해가 미흡한 실정이다.

본 연구는 영산강 방조제에 의한 담수 유입이 영산강 하구 주변 해역의 부유생태와 수질에 미치는 영향을 장기적으로 파악하기 위하여 식물플랑크톤의 생체량 지표인 클로로필 *a* (chlorophyll-*a*)와 염분과 수온을 포함한 수질항목들에 대한 분석을 실시하였다.

## 재료 및 방법

본 연구에서는 영산강 하구의 부유생태 및 수질의 장기 동향을 파악하기 위하여, 국가해양환경측정망 (국립수산과학원 해양수산연구정보포털 <http://portal.nfrdi.re.kr/envirodata>)을 통해 1999~2008년 (10년간) 조사된 자료를 분석하였다. 자료는 영산강 하구인 목포연안 (St. 1, 2, 4, 5, 6), 해남만 (St. 3), 신안연안 (St. 7)의 총 7개 정점에서 조사되었으며 (Fig. 1), 매년 2월, 5월, 8월, 11월에 조사되었다. 강수량은 기상청 (<http://www.kma.go.kr>)에서 제공된 자료를 활용하였고, 영산강사업단에서 수집한 영산강 방조제 방류량자료 (1999~2008년)를 이용하여 담수 유입량을 파악하였다. 강수량과 방류량 자료는 국가해양환경측정망의 조사시기인 2월, 5월, 8월, 11월의 자료를

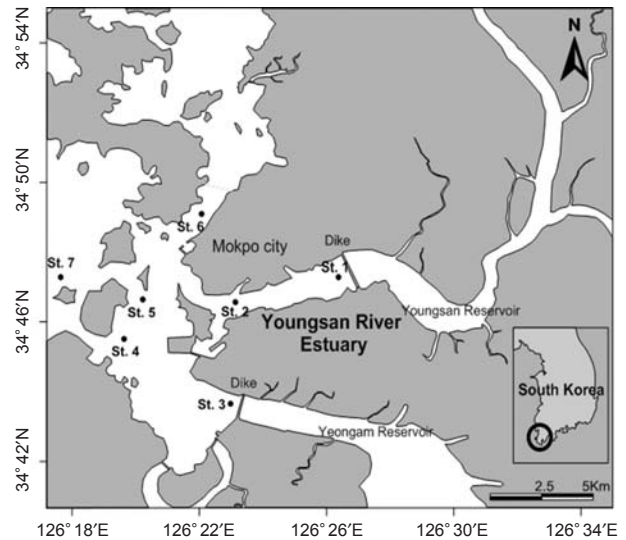


Fig. 1. Water quality monitoring stations in the Youngsan River estuary.

이용하였다.

조사항목은 수온 (temperature), 염분 (salinity), 용존산소 (DO), 암모니아성질소 ( $\text{NH}_4^+$ ), 아질산성질소 ( $\text{NO}_2^-$ ), 질산성질소 ( $\text{NO}_3^-$ ), 인산염인 ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), 규산염 ( $\text{SiO}_2$ ), 총질소 (TN), 총인 (TP), 부유물질 (SS), 클로로필 *a* (Chlorophyll-*a*)이며, 조사 항목별 측정 및 분석은 국가해양환경측정망 운영계획에 따라 「해양환경공정시험기준」에 의거하여 실시되었다.

또한, 담수 방류량에 따라 영산강 하구 표층의 염분 분포가 결정되므로 (Sin *et al.*, 2005a) 영산강 하구의 표층과 저층의 염분차이 ( $\Delta$ salinity)를 계산하여 담수 방류의 간접적인 영향을 파악하였고, 조사 항목들간의 상관성을 알아보기 위하여 SPSS 18.0을 이용한 Pearson's correlation analysis를 실시하였다.

## 결 과

### 1. 10년간 강수량 및 영산강 방조제의 방류량 분포

영산강 하구의 지난 10년간 (1999~2008) 2월의 평균 강수량은 3.10 mm로 조사 시기 중 가장 낮은 분포를 보였으며, 8월의 평균 강수량은 15.21 mm로 가장 높은 분포를 보였다 (Table 1). 영산강 방조제의 평균 방류량 역시 평균 강수량이 제일 높았던 8월에 가장 많은 양의 담수를 방류 ( $144.49 \times 10^6$  ton) 하였다. 지난 10년간 (1999~2008) 영산강 하구의 강수량은 다소 감소하는 경향 ( $a = -0.01$ )을

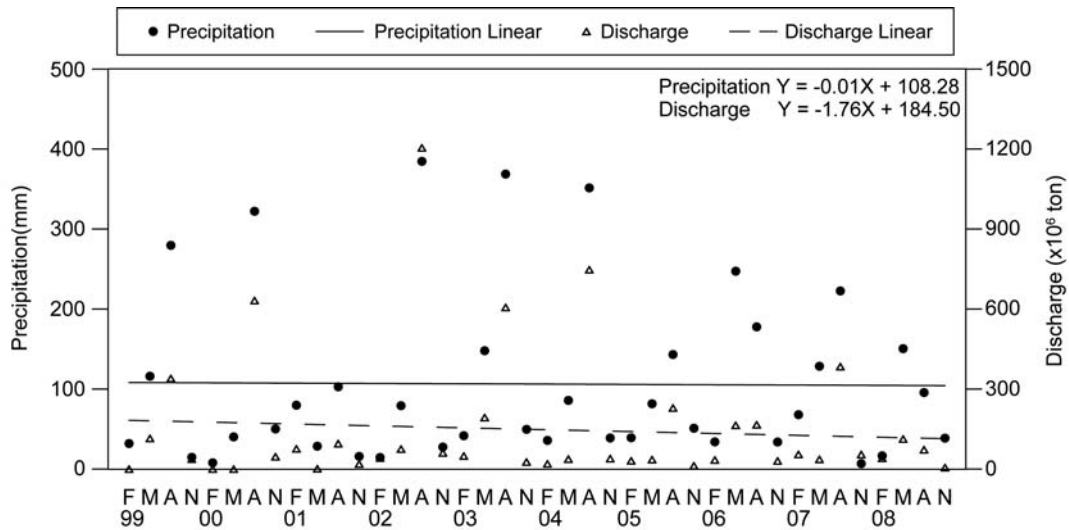


Fig. 2. Long-term variations of precipitation in Mokpo and Youngsan dike discharge from 1999 to 2008.

Table 1. Average of precipitation in Mokpo and Youngsan dike discharge from 1999 to 2008.

Season	Winter (Feb.)	Spring (May)	Summer (Aug.)	Fall (Nov.)
Precipitation (mm)	3.10	9.45	15.21	3.08
Discharge ( $\times 10^6$ ton)	10.59	24.92	144.49	11.12

나타냈으며, 영산강 방조제의 담수 방류량은 뚜렷하게 감소하는 경향( $a = -1.76$ )을 나타냈다(Fig. 2).

## 2. 계절별 장기 변동

영산강 하구의 지난 10년간 계절에 따른 수온(temperature)의 변화를 살펴보면, 겨울철인 2월의 평균 수온은  $5.16 \pm 1.20^\circ\text{C}$ 였으며,  $3.20 \sim 7.63^\circ\text{C}$ 의 분포를 나타냈다(Table 2). 봄철인 5월의 최저수온은  $13.00^\circ\text{C}$ , 최고수온은  $18.41^\circ\text{C}$ 로 나타났으며, 평균은  $15.45 \pm 1.13^\circ\text{C}$ 였다. 여름철인 8월과 가을철인 11월의 평균수온은 각각  $25.55 \pm 1.05^\circ\text{C}$ ,  $15.71 \pm 1.40^\circ\text{C}$ 의 분포를 보였다. 계절별 수온 분포는 겨울철에 낮고, 여름철에 높은 우리나라의 계절적 특성과 일치하는 분포를 나타냈다.

염분(salinity)의 경우, 2월에는  $24.53 \sim 34.65$  psu의 범위로 분포하였으며, 평균염분은  $31.65 \pm 1.47$  psu를 나타냈다. 5월과 8월의 염분은 각각  $9.49 \sim 33.17$  psu,  $8.71 \sim 32.26$  psu로 분포하였으며, 평균  $30.88 \pm 4.03$  psu,  $28.36 \pm 4.27$  psu의 분포를 보였다. 11월에는  $24.11 \sim 34.03$  psu의 분포를 보였으며,  $31.42$  psu의 평균치를 보였다. 염분

은 여름철인 8월에 가장 낮은 경향을 나타냈다.

용존산소(DO)의 2월 평균은  $11.00 \pm 1.61$  mg L<sup>-1</sup>였으며,  $5.00 \sim 14.93$  mg L<sup>-1</sup>의 분포를 보였다. 5월에는  $8.73 \pm 1.50$  mg L<sup>-1</sup>의 평균치를 나타냈고,  $6.91 \sim 14.81$  mg L<sup>-1</sup>의 분포를 나타냈다. 8월과 11월의 평균은 각각  $7.70 \pm 1.83$  mg L<sup>-1</sup>,  $8.04 \pm 0.64$  mg L<sup>-1</sup>였으며,  $3.36 \sim 12.81$  mg L<sup>-1</sup>,  $5.06 \sim 9.50$  mg L<sup>-1</sup>의 분포를 보였다.

암모니아성질소(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)의 변화를 보면, 겨울철인 2월에는  $0.018 \pm 0.015$  mg L<sup>-1</sup>의 평균을 보였으며,  $0.001 \sim 0.086$  mg L<sup>-1</sup>의 범위를 나타냈다. 5월의 평균은  $0.041 \pm 0.106$  mg L<sup>-1</sup>이었으며,  $0.001 \sim 0.576$  mg L<sup>-1</sup>의 분포를 보였고, 8월에는 평균  $0.026 \pm 0.029$  mg L<sup>-1</sup>의 분포를 나타냈다. 11월의 평균은  $0.021 \pm 0.029$  mg L<sup>-1</sup>이었으며,  $0.001 \sim 0.130$  mg L<sup>-1</sup>의 분포를 보였다. 아질산성질소(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)의 경우, 2월에는  $0.010 \pm 0.010$  mg L<sup>-1</sup>, 5월에는  $0.013 \pm 0.016$  mg L<sup>-1</sup>의 평균값을 보였으며, 8월의 평균은  $0.019 \pm 0.020$  mg L<sup>-1</sup>, 11월의 평균은  $0.021 \pm 0.015$  mg L<sup>-1</sup>의 분포를 나타냈다. 2월의 질산성질소(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)의 평균농도는  $0.178 \pm 0.206$  mg L<sup>-1</sup>의 값을 나타냈고,  $0.011 \sim 1.192$  mg L<sup>-1</sup>의 범위를 보였다. 5월과 8월에는 각각  $0.181 \pm 0.266$  mg L<sup>-1</sup>,  $0.224 \pm 0.312$  mg L<sup>-1</sup>의 평균값을 보였으며, 11월에는  $0.005 \sim 0.443$  mg L<sup>-1</sup>의 분포를 나타냈다. 질산성 질소는 여름철인 8월의 평균농도가 가장 높은 분포를 보였다.

인산염인(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>)의 분포는 겨울철인 2월에 평균  $0.010 \pm 0.009$  mg L<sup>-1</sup>의 분포로 조사기간 중 가장 낮은 값을 나타냈으며, 여름철인 8월에는 평균  $0.015 \pm 0.021$  mg L<sup>-1</sup>로 가장 높은 값을 나타냈다. 5월과 11월에는 각각  $0.0002 \sim$

**Table 2.** Temporal variation of water quality in surface water.

Properties	Season			
	Winter (Feb.)	Spring (May)	Summer (Aug.)	Fall (Nov.)
Temperature (°C)	5.16±1.20 (3.20~7.63)	15.45±1.13 (13.00~18.41)	25.55±1.05 (24.00~28.13)	15.71±1.40 (12.78~18.31)
Salinity (psu)	31.65±1.47 (24.53~34.65)	30.88±4.03 (9.49~33.17)	28.36±4.27 (8.71~32.26)	31.42±2.06 (24.11~34.03)
DO (mg L <sup>-1</sup> )	11.00±1.61 (5.00~14.93)	8.73±1.50 (6.91~14.81)	7.70±1.83 (3.36~12.81)	8.04±0.64 (5.06~9.50)
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	0.018±0.015 (0.001~0.086)	0.041±0.106 (0.001~0.576)	0.026±0.029 (0.000~0.166)	0.021±0.029 (0.001~0.130)
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	0.010±0.010 (0.000~0.042)	0.013±0.016 (0.001~0.093)	0.019±0.020 (0.000~0.096)	0.021±0.015 (0.001~0.073)
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	0.178±0.206 (0.011~1.192)	0.181±0.266 (0.004~1.269)	0.224±0.312 (0.003~1.627)	0.154±0.094 (0.005~0.443)
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	0.010±0.009 (0.016~0.612)	0.014±0.018 (0.000~0.102)	0.015±0.021 (0.001~0.163)	0.014±0.009 (0.000~0.034)
SiO <sub>2</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	0.340±0.179 (0.109~1.428)	0.508±0.628 (0.026~0.612)	0.780±0.618 (0.070~2.246)	0.421±0.188 (0.142~1.145)
TN (mg L <sup>-1</sup> )	0.580±0.327 (0.109~1.428)	0.699±0.675 (0.119~4.416)	0.794±0.467 (0.226~2.362)	0.594±0.254 (0.223~1.011)
TP (mg L <sup>-1</sup> )	0.045±0.020 (0.002~0.088)	0.049±0.033 (0.009~0.140)	0.048±0.030 (0.017~0.164)	0.040±0.019 (0.007~0.078)
SS (mg L <sup>-1</sup> )	20.19±13.37 (4.40~61.50)	19.05±14.00 (1.00~90.00)	15.75±11.85 (3.40~62.12)	14.92±9.21 (4.10~55.00)
Chl- <i>a</i> (µg L <sup>-1</sup> )	7.56±7.69 (0.15~39.96)	5.33±3.83 (1.04~15.52)	10.07±11.96 (0.79~50.82)	5.57±8.72 (0.15~40.02)

0.102 mg L<sup>-1</sup>, 0.0003~0.034 mg L<sup>-1</sup>의 분포를 보였다. 규산염(SiO<sub>2</sub>)과 총질소(TN) 역시 여름철인 8월에 평균값이 각각 0.780±0.618 mg L<sup>-1</sup>, 0.794±0.467 mg L<sup>-1</sup>로 조사 기간 중 가장 높은 분포를 보였다.

총인(TP)의 경우, 2월에는 평균 0.045±0.020 mg L<sup>-1</sup>의 농도를 보였으며, 0.002~0.088 mg L<sup>-1</sup>의 범위를 나타냈다. 5월과 8월의 평균은 각각 0.049±0.033 mg L<sup>-1</sup>, 0.048±0.030 mg L<sup>-1</sup>의 값을 나타냈고, 11월에는 0.007~0.078 mg L<sup>-1</sup>의 범위를 나타냈다. 부유물질(SS)은 겨울철인 2월에 평균 20.19±13.37 mg L<sup>-1</sup>로 조사 기간 중 가장 높은 값을 나타냈으며, 11월에 평균 14.92±9.21 mg L<sup>-1</sup>로 가장 낮은 분포를 보였다.

식물플랑크톤 생체량의 간접적 지표인 클로로필 *a*(Chlorophyll-*a*)의 경우에는 2월에 7.56±7.69 µg L<sup>-1</sup>의 평균 농도를 보였고, 5월에 5.33±3.83 µg L<sup>-1</sup>의 평균값을 나타냈다. 8월에는 평균 10.07±11.96 µg L<sup>-1</sup>, 11월에는 5.57±8.72 µg L<sup>-1</sup>의 평균농도를 보였다. 식물플랑크톤 생체량 역시 전반적인 영양염류의 분포와 같이 여름철인 8월에 가장 높은 경향을 보였다.

### 3. 정점별 장기 변동

영산강 하구의 지난 10년간 수온(temperature)의 평균 분포는 15.25±7.10~15.95±7.57°C를 나타냈으며, 각 정점별로 큰 차이를 나타내지 않았다(Table 3). 염분(salinity)은 영산강 방조제 인접 정점인 정점 1에서 평균 28.11±6.01 psu로 가장 낮은 분포를 보였고, 영산강 방조제와 가장 먼 정점인 정점 7에서 32.07±1.11 psu로 가장 높은 분포를 보였다.

용존산소(DO)는 정점 1에서 평균 9.10±2.38 mg L<sup>-1</sup>이였으며, 정점 2에서는 9.30±2.06 mg L<sup>-1</sup>의 평균값을 보였고, 정점 3에서는 9.19±1.92 mg L<sup>-1</sup>의 평균값을 나타냈다. 정점 4에서는 8.86±1.80 mg L<sup>-1</sup>, 정점 5에서는 9.01±1.80 mg L<sup>-1</sup>, 정점 6에서는 8.44±1.88 mg L<sup>-1</sup>, 정점 7에서는 8.44±1.85 mg L<sup>-1</sup>의 평균농도를 나타냈다.

암모니아성질소(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)의 경우에는 영산강 방조제 인접 정점인 정점 1에서 0.001~0.576 mg L<sup>-1</sup>의 분포를 보였으며, 평균 0.049±0.104 mg L<sup>-1</sup>로 가장 높은 분포를 보였고, 영산강 방조제와 가장 먼 정점인 정점 7에서 평균

**Table 3.** Spatial variation of water quality in surface water.

Properties	Station						
	1	2	3	4	5	6	7
Temperature (°C)	15.95±7.57 (4.32~27.50)	15.37±8.74 (4.04~28.13)	15.59±7.40 (3.73~26.60)	15.25±7.10 (3.87~26.10)	15.30±7.33 (3.70~27.00)	15.26±7.63 (3.20~27.70)	15.25±7.13 (3.85~25.56)
Salinity (psu)	28.11±6.01 (8.71~33.05)	29.57±3.35 (16.84~34.19)	30.86±2.09 (23.58~34.24)	31.65±1.46 (28.35~34.62)	30.40±3.66 (12.34~34.12)	31.01±2.29 (19.90~33.81)	32.07±1.11 (29.64~34.65)
DO (mg L <sup>-1</sup> )	9.10±2.38 (4.71~14.93)	9.30±2.06 (6.08~14.09)	9.19±1.92 (5.80~13.38)	8.86±1.80 (5.80~13.95)	9.01±1.80 (5.87~12.18)	8.44±1.88 (5.00~12.74)	8.44±1.85 (3.36~13.25)
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	0.049±0.104 (0.001~0.576)	0.029±0.038 (0.003~0.166)	0.019±0.025 (0.001~0.129)	0.019±0.025 (0.000~0.120)	0.031±0.087 (0.001~0.547)	0.023±0.025 (0.001~0.130)	0.016±0.010 (0.001~0.046)
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	0.025±0.023 (0.001~0.093)	0.020±0.021 (0.002~0.096)	0.012±0.012 (0.000~0.063)	0.013±0.011 (0.000~0.051)	0.018±0.018 (0.000~0.087)	0.013±0.011 (0.000~0.050)	0.011±0.009 (0.001~0.045)
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	0.261±0.355 (0.004~1.627)	0.230±0.296 (0.014~1.096)	0.142±0.178 (0.005~0.845)	0.146±0.132 (0.003~0.727)	0.225±0.303 (0.005~1.269)	0.141±0.154 (0.010~0.939)	0.159±0.106 (0.008~0.520)
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	0.015±0.016 (0.000~0.098)	0.011±0.009 (0.001~0.036)	0.010±0.010 (0.000~0.041)	0.016±0.026 (0.002~0.163)	0.014±0.017 (0.001~0.102)	0.012±0.009 (0.000~0.035)	0.015±0.009 (0.000~0.031)
SiO <sub>2</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	0.654±0.736 (0.025~2.304)	0.633±0.743 (0.069~1.991)	0.463±0.413 (0.030~1.552)	0.480±0.424 (0.025~1.796)	0.543±0.505 (0.016~1.776)	0.423±0.271 (0.085~1.212)	0.465±0.271 (0.048~1.444)
TN (mg L <sup>-1</sup> )	0.865±0.849 (0.109~4.416)	0.725±0.523 (0.122~1.803)	0.630±0.369 (0.149~1.697)	0.603±0.333 (0.149~1.712)	0.669±0.340 (0.198~1.528)	0.576±0.287 (0.119~1.256)	0.611±0.303 (0.123~1.285)
TP (mg L <sup>-1</sup> )	0.056±0.034 (0.002~0.140)	0.047±0.032 (0.005~0.130)	0.037±0.019 (0.011~0.087)	0.047±0.030 (0.012~0.164)	0.047±0.025 (0.009~0.140)	0.041±0.017 (0.008~0.087)	0.045±0.021 (0.009~0.088)
SS (mg L <sup>-1</sup> )	14.04±10.06 (1.00~46.94)	13.72±8.22 (2.50~38.18)	13.08±7.06 (3.40~32.00)	20.04±16.72 (4.20~90.00)	15.29±9.27 (3.40~51.58)	19.40±11.12 (4.40~62.12)	25.90±15.37 (3.40~61.50)
Chl- <i>a</i> (µg L <sup>-1</sup> )	9.92±11.16 (0.15~42.71)	11.19±12.78 (0.24~50.82)	7.34±6.77 (0.15~27.94)	5.69±6.74 (0.26~25.29)	7.06±7.60 (0.35~32.23)	6.23±8.87 (0.35~39.49)	3.98±4.96 (0.22~23.97)

0.016±0.01 mg L<sup>-1</sup>로 가장 낮은 농도를 나타냈다. 아질 산성질소(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)의 분포 역시 암모니아성질소의 분포와 마찬가지로 정점 1에서 0.025±0.023 mg L<sup>-1</sup>의 평균값을 보이며 가장 높은 분포를 보였고, 정점 7에서 0.011±0.009 mg L<sup>-1</sup>의 평균농도로 가장 낮은 분포를 나타냈다. 질산성질소(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)는 방조제 인접정점인 정점1에서 0.261±0.355 mg L<sup>-1</sup>의 평균농도로 가장 높은 분포를 보였으며, 방조제에서 먼 정점인 정점 6에서 평균 0.141±0.154 mg L<sup>-1</sup>의 평균농도로 가장 낮은 분포를 보였다.

인산염인(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>)의 정점별 평균 분포는 0.010±0.010~0.016±0.026 mg L<sup>-1</sup>의 범위를 보였으며, 정점별로 뚜렷한 차이를 보이지 않았다. 규산염(SiO<sub>2</sub>)의 경우에는 평균 값이 정점 1에서 정점 7까지 각각 0.654±0.736 mg L<sup>-1</sup>, 0.633±0.743 mg L<sup>-1</sup>, 0.463±0.413 mg L<sup>-1</sup>, 0.480±0.424 mg L<sup>-1</sup>, 0.543±0.505 mg L<sup>-1</sup>, 0.423±0.271 mg L<sup>-1</sup>, 0.465±0.271 mg L<sup>-1</sup>의 분포를 나타냈다.

총질소(TN)는 정점 1에서 평균 0.865±0.849 mg L<sup>-1</sup>로 가장 높은 값을 나타냈으며, 정점 6에서 0.576±0.287 mg L<sup>-1</sup>로 가장 낮은 분포를 보였다. 총인(TP)의 평균농도는

정점 1에서 0.056±0.034 mg L<sup>-1</sup>, 정점 2에서 0.047±0.032 mg L<sup>-1</sup>, 정점 3에서 0.037±0.019 mg L<sup>-1</sup>, 정점 4에서 0.047±0.030 mg L<sup>-1</sup>, 정점 5에서 0.047±0.025 mg L<sup>-1</sup>, 정점 6에서 0.041±0.017 mg L<sup>-1</sup>, 정점 7에서 0.045±0.021 mg L<sup>-1</sup>의 분포를 보였으며, 방조제 인접정점인 정점 1에서 가장 낮은 경향을 보였다.

부유물질(SS)은 방조제에서 가장 먼 정점인 정점 7에서 평균 25.90±15.37 mg L<sup>-1</sup>로 가장 높은 값을 보였으며, 내항 정점인 정점 2에서 평균 13.72±8.22 mg L<sup>-1</sup>로 가장 낮은 값을 나타냈다. 클로로필 *a* (Chlorophyll-*a*)의 평균 농도는 정점 2에서 11.19±12.78 µg L<sup>-1</sup>로 가장 높은 분포를 보였고 방조제에서 가장 먼 정점인 정점 7에서 3.98±4.96 µg L<sup>-1</sup>의 평균농도와 0.22~23.97 µg L<sup>-1</sup>의 분포로 가장 낮은 경향을 나타냈다.

#### 4. 10년간 변동 추세

영산강 하구의 환경인자의 지난 10년간 변동 추세를 보면, 수온(temperature)은 모든 정점에서 점차적으로 상

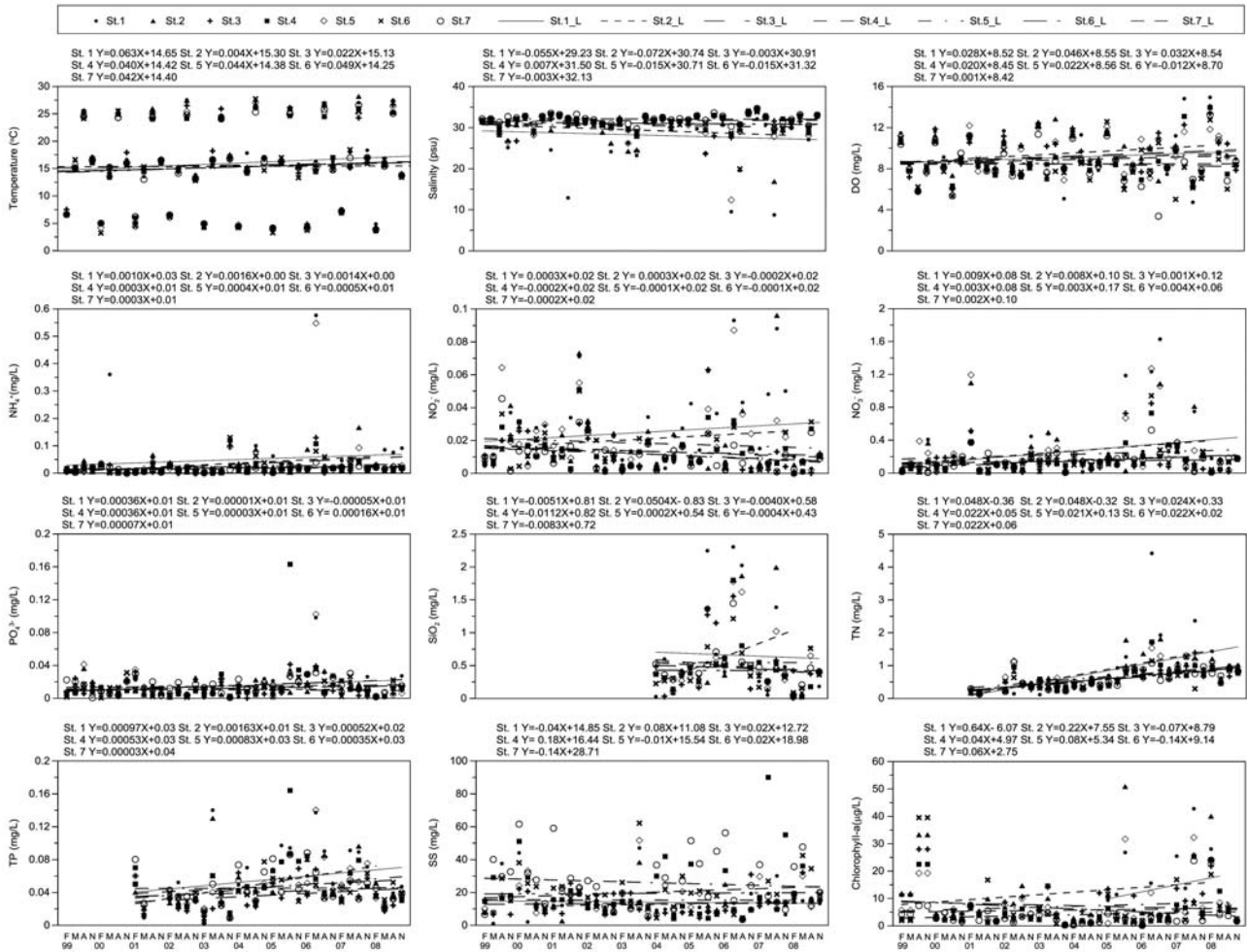


Fig. 3. Long-term trends of surface water quality from 1999 to 2008.

승하는 경향을 보였다 (Figs. 3, 4). 염분 (salinity)은 표층의 정점 4 ( $a=0.007$ )와 저층의 모든 정점 ( $a=0.008 \sim 0.029$ )에서 점차적으로 증가하는 경향을 보였으며, 표층에서는 정점 4를 제외한 나머지 정점에서 감소하는 경향을 보였다 ( $a=-0.003 \sim -0.071$ ). 용존산소 (DO)의 경우에는 표층의 정점 6 ( $a=-0.012$ )과 저층의 정점 1 ( $a=-0.002$ )을 제외한 모든 정점에서 증가하는 분포를 보였다.

암모니아성질소 ( $\text{NH}_4^+$ )는 표층과 저층의 모든 정점에서 증가하는 경향을 나타냈으며, 아질산성질소 ( $\text{NO}_2^-$ )의 경우에는 영산강 방조제에 인접한 정점 1과 정점 2의 표층에서 다소 증가하는 경향 ( $a=0.0003$ )을 보였으나, 나머지 정점에서는 시간이 흐를수록 감소하는 분포를 나타냈다 ( $a=-0.0001 \sim -0.0002$ ). 질산성질소 ( $\text{NO}_3^-$ )의 경우, 표·저층의 모든 정점에서 증가하는 경향을 나타냈으며, 인산염인 ( $\text{PO}_4^{3-}$ )은 각 정점별로 차이를 보였다. 표층의 정점

3에서는 감소하는 경향 ( $a=-0.00005$ )을 나타냈고, 표층의 나머지 정점에서는 증가하는 추세 ( $a=0.00001 \sim 0.0003$ )를 나타냈으며, 저층의 경우에는 정점 3, 정점 6, 정점 7에서 다소 증가하는 경향을 나타냈다 ( $a=0.00003 \sim 0.00007$ ).

규산염 ( $\text{SiO}_2$ )은 표층의 경우, 정점 2 ( $a=0.0504$ )와 정점 5 ( $a=0.0002$ )에서는 증가하는 분포를 보였으며, 나머지 정점에서 감소하였다 ( $a=-0.0004 \sim -0.0112$ ). 저층에서는 정점 2 ( $a=0.0037$ )를 제외한 나머지 정점에서 감소하는 경향을 보였다.

총질소 (TN)와 총인 (TP)은 표층과 저층 모두 모든 정점에서 점차 증가하는 경향을 나타냈으며, 클로로필 *a* (Chlorophyll-*a*)의 경우, 표층에서는 정점 3과 정점 6에서 감소하는 경향 ( $a=-0.07, -0.14$ )을 나타냈고, 저층에서는 모든 정점에서 점차 증가하는 경향을 보였다.



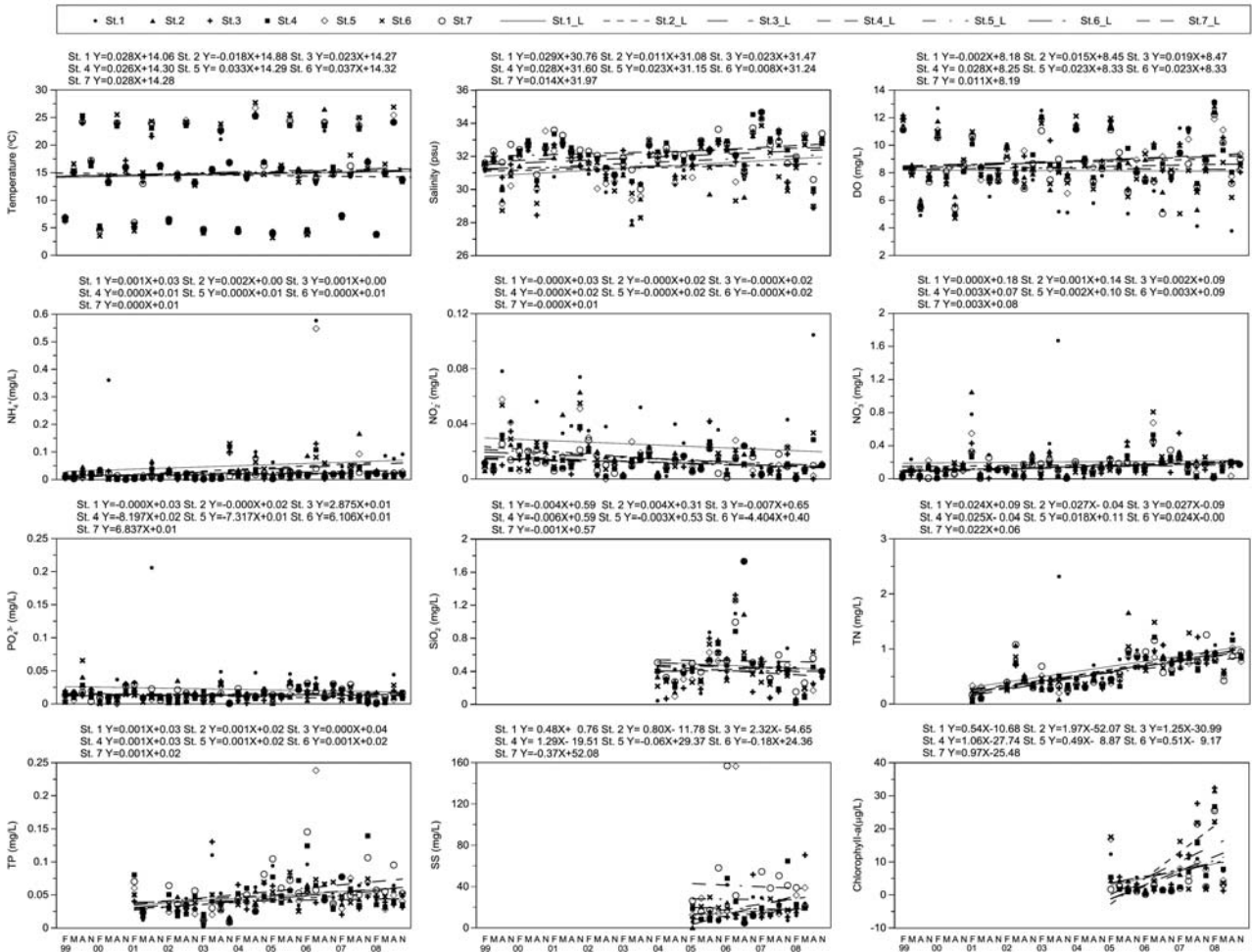


Fig. 4. Long-term trends of bottom water quality from 1999 to 2008.

5. 계절별 표-저층 염분차와 부유생태와의 상관성

영산강 하구의 지난 10년간 방류에 의한 표층과 저층의 염분차이 ( $\Delta$ salinity)와 각 환경인자와의 상관관계를 계절별로 살펴보면, 겨울철인 2월에는  $\Delta$ salinity와 염분은 유의한 음의 상관관계를 나타냈으며,  $\text{NO}_3^-$ 와는 유의한 양의 상관관계를 나타냈다 (Table 4). 봄철인 5월의 경우,  $\Delta$ salinity와 염분은 유의한 음의 상관관계를 보였고, 영양염류인  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{SiO}_2$ , TN, TP 모두 유의한 양의 상관관계를 보였다. 클로로필 *a* 역시 유의한 양의 상관관계를 나타냈다. 여름철인 8월에는  $\Delta$ salinity와 염분이 유의한 음의 상관관계를 나타냈고, 영양염류인  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{SiO}_2$ , TN, TP 모두 5월과 마찬가지로 유의한 양의 상관관계를 보였으며, 클로로필 *a* 역시 유의한 양의 상관관계를 나타냈다. 가을철인 11월은  $\Delta$ salinity와 염분이 유의한 음의 상관관계를 보였으며,

Table 4. Correlation of seasonal surface/bottom salinity difference and surface water quality from all seasons.

Season	Winter (Feb.)	Spring (May)	Summer (Aug.)	Fall (Nov.)
Temperature (°C)	-.043	.149	.274*	-.048
Salinity (psu)	-.783**	-.960**	-.955**	-.867**
DO (mg L <sup>-1</sup> )	.124	-.149	.009	-.109
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	.162	.872**	.398**	-.124
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	.219	.878**	.609**	.122
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	.295*	.816**	.521**	.545**
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	.045	.885**	.146	.128
SiO <sub>2</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	-.185	.762**	.586**	.659**
TN (mg L <sup>-1</sup> )	.045	.777**	.576**	-.012
TP (mg L <sup>-1</sup> )	-.180	.654**	.447**	.016
SS (mg L <sup>-1</sup> )	-.097	-.146	.046	-.146
Chl- <i>a</i> (µg L <sup>-1</sup> )	.118	.454**	.277*	.473**

\*P < 0.05, \*\*P < 0.01

**Table 5.** Correlation of surface/bottom salinity difference and surface water quality including all stations.

Properties	Station						
	1	2	3	4	5	6	7
Temperature (°C)	.360*	.345	.160	.379**	.249	.282	.352*
Salinity (psu)	-.976**	-.922**	-.847**	-.688**	-.936**	-.812**	-.527**
DO (mg L <sup>-1</sup> )	-.276	-.276	-.078	-.238	-.280	.148	-.247
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	.416**	.569**	.288	.397*	.873**	.259	.349*
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	.652**	.613**	.630**	.196	.622**	-.004	-.045
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	.676**	.490**	.590**	.470**	.620**	.192	.095
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	-.568**	.170	.538**	.467**	.793**	.200	.093
SiO <sub>2</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	.772**	.646	.797**	.698**	.753**	.288	.401
TN (mg L <sup>-1</sup> )	.815**	.129	.437*	.541**	.552**	.092	.240
TP (mg L <sup>-1</sup> )	.544**	.428	.659**	.496**	.692**	-.065	-.019
SS (mg L <sup>-1</sup> )	.171	.156	-.055	-.228	-.038	-.212	-.236
Chl- <i>a</i> (µg L <sup>-1</sup> )	.398**	.235	-.070	.264	.365*	-.088	.539**

\*P&lt;0.05, \*\*P&lt;0.01

NO<sub>3</sub><sup>-</sup>와 클로로필 *a*는 유의한 양의 상관관계를 보였다.

### 6. 정점별 표-저층 염분차와 부유생태와의 상관성

영산강 방조제의 방류로 인한 염분차이 ( $\Delta$ salinity)와 각 환경인자의 상관관계를 정점별로 살펴보면, 모든 정점에서  $\Delta$ salinity와 염분은 유의한 음의 상관관계를 나타냈다 (Table 5). 방조제 최 근접정점인 정점 1에서는  $\Delta$ salinity와 수온, 영양염류 (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, SiO<sub>2</sub>, TN, TP), 클로로필 *a*가 유의한 양의 상관관계를 나타냈다. 방조제 인접정점인 정점 2에서는  $\Delta$ salinity와 질소계 영양염류인 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, 클로로필 *a*가 유의한 양의 상관관계를 보였다. 정점 3의 경우, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, SiO<sub>2</sub>, TN, TP는 유의한 양의 상관관계를 나타냈고, 정점 4에서는 수온, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, SiO<sub>2</sub>, TN, TP가 유의한 양의 상관관계를 보였다. 정점 5에서는, 수온, 용존산소, 부유물질을 제외한 나머지 환경인자들과 유의한 양의 상관관계를 나타냈다. 방조제와 가장 먼 정점인 정점 7에서는  $\Delta$ salinity와 수온, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, 클로로필 *a*가 유의한 양의 상관관계를 보였다.

## 고 찰

본 연구는 한반도 서남해역에 위치하고, 국내 4대강 중 영산강의 영향을 직접적으로 받는 영산강 하구 해역을 대상으로, 영산강 방조제의 담수 유입이 영산강 하구 주변 해역의 부유생태와 수질에 미치는 영향을 조사하였다. 영산강 하구 염분의 장기변동 추세를 보면, 표층의 염분은 전반적으로 감소하는 추세를 보였고, 저층의 염분은

지속적으로 증가하는 경향을 나타냄으로써 염분성층이 강화되는 것을 확인할 수 있었다 (Figs. 3, 4).

지난 10년 (1999~2008) 동안 영산강 하구 수온의 분포는 우리나라의 일반적인 계절적 기온과 비슷한 분포를 보였으며, 염분의 경우, 8월 염분의 평균값과 최소값이 가장 낮은 분포로 나타났는데, 이는 우리나라의 계절적 특징인 여름철의 몬순성 강우로 인해 영산강 방조제를 통한 대량의 담수 방류가 발생되었기 때문으로 사료된다 (Tables 1, 2). 또한, 영산강 방조제 인접정점인 정점 1에서는 영산강 담수 유입의 영향으로 인해 낮은 염분의 분포를 보였으며 (Table 3), 외해로 갈수록 점차 염분이 높아지는 경향을 보였다. 이와 유사한 형태의 분포는 Park *et al.* (2005)의 연구결과에서도 제시된 바 있다.

일반적으로 하구의 상류로 유입되는 담수는 식물플랑크톤의 성장과 사멸에 영향을 미치는 여러 가지 환경인자들인 광, 영양염류, 염분 등을 일시적으로 변화시킨다 (Malone *et al.*, 1988; Gallegos *et al.*, 1992; Madariaga *et al.*, 1992; Boyer *et al.*, 1993). 영산강 하구 해역 장기자료의 계절적 변동은 전반적으로 8월에 영양염류의 농도가 높은 경향을 나타냈고, 클로로필 *a* (chlorophyll-*a*) 역시 비슷한 분포를 보였다 (Table 2). 또한, 공간적으로 방조제 인접정점에서 가장 높은 분포를 보였으며, 외해로 갈수록 낮아지는 분포를 보였다 (Table 3). 담수 유입은 또한 부유물질 (SS) 분포에도 영향을 줄 수 있는데 본 연구에서는 담수 유입 (염분 변화)과 부유물질 농도의 상관성이 크지 않은 것으로 나타났다. 하지만 현장 조사가 담수 방류 후에 실시되었을 것으로 예상되므로 담수 유입의 직접적인 영향을 본 연구에서는 확인할 수 없을 것으로 사료된다. Sin *et al.* (2005a)의 연구결과에서는 영산강 방조



제의 수문 개방시에 탁도 뿐만 아니라 아질산+질산성질소 ( $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$ ), 인산염인 ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), 규산염 ( $\text{SiO}_2$ )의 농도가 방조제 인접정점에서 높고 외항으로 갈수록 낮아지는 경향을 확인할 수 있었으며, 여름철 몬순성 강우가 발생하는 8월에 부영양화 상태인 영산강의 담수가 대량으로 방류되어 영양염의 농도가 증가하고, 방류 직후에 탁도가 감소하면서 식물플랑크톤 분포가 높아지는 경향을 보인 것으로 판단된다.

영산강 담수 유입의 지시인자인 표-저층의 염분차 ( $\Delta\text{salinity}$ )와 영양염류들과의 상관분석 결과, 방류량이 가장 많은 8월과 영산강 방조제에서 가까운 정점들의 모든 영양염류들이  $\Delta\text{salinity}$ 와 유의한 양의 상관관계를 나타냄으로써 (Tables 4, 5), 영산강 담수의 유입에 의한 영향을 확인할 수 있었고, 담수 방류를 통한 영양염류의 유입은 방조제가 있는 아산만에서도 최근에 보고된 바 있다 (Sin *et al.*, 2012). 또한,  $\Delta\text{salinity}$ 와 클로로필 *a*의 상관분석 결과 역시 방조제 인접정점에서 유의한 양의 상관관계를 나타냈으며 이러한 결과는 담수 방류가 발생되었을 때, 클로로필 *a*가 높아짐을 의미한다. 하지만 선행연구 (Sin *et al.*, 2005a)에서 영산강 방조제의 수문 개방시 영산강 하구 인근 해역의 영양염 농도가 증가한 반면 식물플랑크톤 생체량이 낮아지는 것으로 보고하였다. 따라서 본 연구에 사용된 자료의 현장측정이 수문 개방시 아닌 방류가 완료된 이후 염분이 해수로 복원되기 이전에 주로 이루어졌을 것으로 판단된다.

영산강 하구 인근해역의 수질환경은 영산강 하구언의 방류에 따른 담수 유입에 의해 영향을 받는다고 알려져 있다 (Park *et al.*, 2005). 본 연구에서 10년간 영산강 하구의 장기변동 특성을 분석한 결과, 대부분 영양염류 ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ )와 클로로필 *a*의 장기변동 추세는 전반적으로 증가하는 경향을 나타냈지만, 영산강 방조제의 방류량은 감소하는 경향을 보였다 (Figs. 3, 4). 이러한 결과는 장기적 관점에서 담수 방류량의 변화 외에 하구 인근 육상지역이나 재순환을 통한 퇴적층에서의 영양염류 유입량 변화가 하구의 영양염 분포에 영향을 주고 있음을 암시한다고 볼 수 있다. 다시 말해 영산강 방조제를 통한 담수 유입 이외에도 목포 인근 지역이나 유기물 생산 증가로 인한 재순환을 통한 상당한 양의 영양염류들이 유입될 가능성이 있고 이에 대한 추가적인 조사가 필요하다고 본다.

따라서 본 연구에서 영산강 방류에 의한 영산강 하구 주변 해역의 영향을 다각적으로 분석한 결과, 계절적으로 방류량이 가장 많은 8월과 영산강 방조제 인접정점에서 염분성층이 발생하고, 장기적으로 영양염류 및 클로로필

*a*(식물플랑크톤 생체량)가 점차 증가하는 경향을 보였다. 이에 따라 영산강 하구 해양환경의 부영양화를 방지하기 위해서는 계절적(단기적)으로 영산강 방조제의 방류와 연관한 수질개선 방안 마련과 더불어 장기적으로 영양염 재순환의 기여도 조사나 영산강 하구 해역 주변 지역(목포 인근)의 비점오염원과 점오염원 관리 등이 종합적으로 이루어져야 할 것으로 사료된다.

## 적 요

영산강 하구에서 담수 유입이 부유생태와 수질에 미치는 영향을 파악하기 위해 국가해양환경측정망 장기자료(1999~2008년)인 클로로필 *a*와 수질 항목들에 대한 계절적, 공간적 변화와 장기변동 추세를 분석하였다. 분석 결과, 여름철(8월) 영산강 방조제 인접정점의 염분은 조사기간 중 가장 낮은 분포를 보였고, 영양염류와 클로로필 *a*는 전반적으로 높은 분포를 나타냈다. 영산강 담수 유입의 지시인자인 표-저층의 염분차 ( $\Delta\text{salinity}$ )와 영양염류, 클로로필 *a*는 유의한 양의 상관성을 나타냈으나, 지난 10년동안 담수 방류량은 감소하는 추세를 보였고, 영양염류, 클로로필 *a*는 전반적으로 증가하는 경향을 나타냈다. 이러한 결과는 영산강 하구 해역 영양염의 공급원이 담수유입뿐만 아니라 인근 지역의 발달에 따른 점오염원 증가 등의 추가적인 요인이 존재할 가능성을 제시한다. 따라서 영산강 하구 주변 해역의 부영양화 방지를 위해서는 영산강 방조제의 방류와 연관한 수질개선 방안 마련과 더불어 인근 지역의 점오염원 파악 및 관리가 병행되어야 할 것으로 사료된다.

## 인 용 문 헌

- Boyer, J.P., R.R. Christian and D.W. Stanley. 1993. Patterns of phytoplankton primary productivity in the Neuse River estuary, North Carolina, USA. *Marine Ecology Progress Series* **97**: 287-297.
- Cho, E.S. 2010. Variations in marine environments and phytoplankton community around Mokpo harbor. *Journal of the Korean Environmental Sciences Society* **19**(11): 1323-1336.
- Cho, Y.G. and K.Y. Park. 1998. Heavy metals in Surface sediments of the Youngsan estuary west coast of Korea. *Journal of the Korean Environmental Sciences Society* **7**(4): 549-557.
- Gallegos, C.L., T.E. Jordan and D.I. Correll. 1992. Event

- scale response of phytoplankton to watershed inputs in a subestuary: Timing, magnitude, and location of blooms. *Limnology and Oceanography* **37**(4): 813-825.
- Jeong, D.D. and J.S. Keum. 1999. A study on the change of current in the vicinity of Mokpo harbor due to the discharging from YongSan River estuary weir. *The Journal of Mokpo Maritime University* **7**(2): 109-118.
- Kang, J.W. 1996. Tide/Tidal currents changes by construction of seadike/seawalls near the coastal zone of Mokpo. *Korean Society of Civil Engineers* **16**(2-6): 611-619.
- Kang, J.W. and B.S. Ihm. 1998. Changes of pollutant dispersion mechanism by constructions of the seawalls near the Mokpo coastal zone. *Korean Society of Civil Engineers* **18**(2-6): 613-622.
- Kang, J.W., J.J. Song and N.S. Oh. 1998. Analysis of ebb-dominant tidal currents characteristics at Mokpo coastal zone. *Korean Society of Civil Engineers* **18**(2-2): 185-193.
- Kang, J.W., N.S. Oh, S.R. Moon and S.J. Park. 2003. Analysis of tidal current characteristics near Mokpo harbor by observations. *Engineering Research & Technology* **3**: 537-544.
- Kim, C.K. and J.S. Lee. 2000. Three-Dimensional Hydrodynamic and Sediment Transport Modelling in the Nakdong Estuary. *Korean Society of Civil Engineers* **3**: 729-732
- Kim, D.H. and H.H. Ryu. 2003. Water quality in Mokpo coastal area after a strong rainfall. *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering* **6**(2): 28-37.
- Kim, K.S. 2000. The change of pollution Loads flowing into Mokpo harbor Due to the operation of Mokpo municipal sewage treatment plant. *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering* 189-193.
- Kim, K.S. 2001. Seasonal variations of marine water quality and eutrophication Index in Mokpo harbor. *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering* **4**(3): 3-15.
- Madariaga, I., L. González-Azpiri, F. Villate and E. Orive. 1992. Plankton responses to hydrological changes induced by freshets in a shallow mesotidal estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **35**: 425-434.
- Malone, T.C., L.H. Crocker, S.E. Pike and B.W. Wendler. 1988. Influences of river flow on the dynamics of phytoplankton production in a partially stratified estuary. *Marine Ecology Progress Series* **48**: 234-249.
- Park, J.H., S.Y. Park, Y.H. Lee, D.M. Choi and S.Y. Lee. 2005. Seasonal and year-to-year variations of water quality in Mokpo harbor area by the long-term monitoring. *Journal of the Korea Society of Marine Environmental & Safety* **11**(2): 97-102.
- Park, S.Y., S.S. Kim, P.J. Kim, E.S. Cho, S.Y. Kim, Y.S. Choi, B.M. Kim and D.U. Kim. 2010. Long-term Variation and Characteristics of Water Quality in the Mokpo Coastal Areas of Yellow Sea, Korea. *Journal of the Korea Society of Marine Environmental & Safety* **16**(4): 321-337.
- Sin, Y., B. Hyun, Q.-D. Bach, S. Yang and C. Park. 2012. Phytoplankton Size and Taxonomic Composition in a Temperate Estuary Influenced by Monsoon. *Estuaries and Coasts* **35**: 839-852.
- Sin, Y.S., C.H. Lee, K.A. Cho and E.S. Song. 2005b. Trends of phytoplankton community and water quality and implications for management in estuarine river systems. *Korean Journal of Limnological Society* **38**(2): 160-180.
- Sin, Y.S., H.Y. Sho and B.K. Hyun. 2005a. Effect of salinity change on biological structure between primary producers and herbivores in water column. 「The Sea」 *Journal of the Korean Society of Oceanography* **10**(2): 113-123.
- Sundbaeck, K., B. Joensseon, P. Nilsson and I. Lindstroem. 1990. Impact of accumulating drifting macroalgae on a shallow-water sediment system: An experimental study. *Marine Ecology Progress Series* **58**: 261-274.

(Manuscript received 12 March 2013,

Revised 22 May 2013

Revision accepted 21 June 2013)