

25시간 연속관측을 통한 섬진강 하구에서 시공간적 해양환경 변화 조절 요인

박미옥^{1,2} · 김성수^{1,2} · 김성길^{1,2} · 권지남² · 이석모³ · 이용우^{1,†}

¹해양환경관리공단 기후수질팀

²국립수산과학원 어장환경과

³부경대학교 생태공학과

Factors Controlling Temporal-Spatial Variations of Marine Environment in the Seomjin River Estuary Through 25-hour Continuous Monitoring

Mi-Ok Park^{1,2}, Seong-Soo Kim^{1,2}, Seong-Gil Kim^{1,2}, Jinam Kwon², Suk-Mo Lee³, and Yong-Woo Lee^{1,†}

¹Climate & Marine Environment Team, Korea Marine Environment Management Corporation, Busan 606-080, Korea

²Marine Environment Research Division, National Fisheries Research & Development Institute, Busan 619-705, Korea

³College of Ecological Engineering, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

요 약

섬진강 하구에서 수온, 염분, pH, 용존산소, 부유입자물질, 영양염류, 엽록소 *a*의 시간에 따른 변화 양상을 파악하기 위해서 2006년 3월(건기)과 7월(우기)에 각각 25시간 연속관측을 실시하였다. 또한 공간적인 분포특성을 파악하기 위해서 염분경사에 따라 해양환경 조사를 실시하였다. 섬진강 하구에서 염분의 변화는 건기에는 조석주기, 우기에는 강물 유출량에 영향을 받는 것으로 나타났다. 용존무기영양염류(질산염, 아질산염, 규산염) 농도의 시공간적 분포는 건기에는 염분의 변화와 좋은 상관관계를 보였다. 반면 우기에는 시간에 따라 농도 변화가 작았다. 우기시 영양염류의 평균 농도는 건기에 비해 용존무기질산염의 경우 약 6배, 용존무기인의 경우 약 4배, 용존무기규산염의 경우 약 43배 높게 나타났다. 엽록소 *a* 농도는 용존무기영양염류의 농도가 높은 우기에 비해 건기에 높게 나타났다. 이 연구결과, 우기와 건기에 해양환경인자의 시공간적 분포는 조석과 강물유출량의 영향에 의해 결정되며, 엽록소 *a*의 분포는 용존무기영양염류의 분포보다는 담수의 유출량 변화와 연관성이 있는 것으로 판단된다.

Abstract – In order to elucidate temporal variations of temperature, salinity, pH, dissolved oxygen (DO), suspended particulate matter (SPM), dissolved inorganic nutrients, and chlorophyll *a*, we performed 25-hour continuous monitoring in the Seomjin River Estuary in March (dry season) and July (rainy season) 2006. We also investigated spatial variations of marine environmental parameters across a saline gradient. In the Seomjin River Estuary, continuous monitoring results revealed that salinity variations were mainly affected by tidal cycle in the dry season and by river discharge in the rainy season. In the dry season, the spatio-temporal distribution of dissolved inorganic nutrient (nitrate, nitrite, and silicate) concentrations showed a good correlation with tidal cycle. While nutrient concentrations in rainy season showed not much variance in time. There were 6 and 4 times higher dissolved inorganic nitrogen and phosphorus concentrations in the rainy season than those in the dry season, respectively. Silicate concentration was 43 times higher in the rainy season than that in the dry season. Chlorophyll *a* concentration was higher in the dry season than that in the rainy season showing high nutrient concentrations. The results of this study, spatio-temporal variations of marine environmental factors are determined by both tidal cycle and river discharge. It seems that chlorophyll *a* concentration is related to the river discharge than dissolved inorganic nutrient distribution.

Keywords: Seomjin River Estuary(섬진강 하구), Nutrient(영양염), River discharge(강물 유출량), Tidal cycle(조석주기), Chlorophyll *a*(엽록소 *a*)

[†]Corresponding author: wbluese@koem.or.kr

1. 서 론

하구는 담수와 해수가 만나는 전이지역으로 담수 유출량 변화에 따라 염분 변화가 극심하며, 이에 따라 생지화학적 반응도 다양하게 일어난다(Pakulski *et al.*, 1995; Hedges and Keil, 1999; Park *et al.*, 2002; Kwon *et al.*, 2001; Chung and Ceon, 2009). 하구에서 염분의 수평·수직 분포는 담수의 유입, 지형적 특성, 조석에 따른 해수 유동 변화에 따라 다양한 분포 형태를 보인다(Lee and Yang, 1997; Officer, 1979).

강을 통해서 하구로 공급되는 화학물질들은 하구에서 다양한 생지화학적 과정을 거치면서 시공간적 분포 양상과 하구를 거쳐 최종적으로 해양으로 공급되는 양이 결정된다(Moon and Dunstan, 1990; Montani *et al.*, 1998). 특히, 연안 생태계를 구성하는 가장 기초가 되는 식물플랑크톤의 성장과 연관된 용존영양염류는 강물의 유입량에 따라 시공간적 분포가 급격하게 변한다. 따라서 하구 생태계를 이해하기 위해서는 영양염류의 거동 및 분포를 이해하는 것이 매우 중요하다(Kaul and Froelich, 1984).

섬진강은 우리나라 5대 강 중 하나로 다른 하구에 비해서 비교적 자연 상태의 하구 특성을 보인다(Kim and Lee, 2009). 그러나 최근 오염이 심각해져 관리가 필요한 지역으로 대두되고 있다(Na and Son, 2005). 1972년부터 1998년까지 하상모래채취가 이루어졌으며, 1980년 대 초부터 섬진강 상류의 댐건설과 취수로 인한 강물 유량의 감소로 해수 침입의 범위가 강 상류(하동군 읍내)까지 확대되고 있다. 또한 임해공업단지(광양제철소) 및 화력발전소 건설 등의 영향으로 오염강도가 심해지고 있는 해역이다(Na and Son, 2005). 이러한 주변 환경 요인들의 변화로 섬진강 하구의 환경 및 생태계 변화가 급격하게 진행되고 있는 상황이다(Lee *et al.*, 2008).

섬진강 하구에서 해양환경 및 생물의 시공간적 분포 변화에 대한 많은 연구들이 진행되어 왔다(Moon and Dunstan, 1990; Kwon *et al.*, 2001, 2002a, 2002b, 2004; Yang *et al.*, 2005; Lee *et al.*, 2006b). 최근 Lee *et al.*(2006b)은 섬진강 하구에서 담수 유출량의 변화에 따른 해수질 특성과 규조류 번식에 대해서 보고하였으며, Kwon *et al.*(2001, 2002a, 2002b, 2004)은 염분경사에 따른 생지화학적 특성과 식물플랑크톤의 공간적인 분포 양상에 대한 연구를 수행하였다. 그러나 선행 연구들은 주로 하구에서 일어나는 일시적인 공간적 변화 특성에 대해서 연구하였다. 금강하구에서는 여러 연구자들에 의해 연속관측을 통한 해양환경특성 변화를 조사하였으며(Yang and Kim, 1990; Lee and Yang, 1997; Kim and Kang, 2002), 하구와 같은 역동적인 환경에서 생지화학적 특성을 이해하기 위해서는 연속관측의 중요성을 보여주고 있다(Kim and Kang, 2002). 또한 Kim *et al.*(2006)은 매년 적조가 발생하는 해역에서 적조 발생 원인과 기작을 밝히기 위하여 연속관측을 실시하였다. 그러나 섬진강 하구에서 연속관측을 통한 시간에 따른 해양환경과 생태계 변화에 대한 연구는 거의 전무한 실정이다.

이 연구는 섬진강 하구에서 건기와 우기에 강물 유출량의 변화에 따른 해양환경요인의 변화 양상을 살펴보기 위해서 고정 정점에서

각각 25시간 연속관측을 실시하였다. 또한 염분경사에 따른 해양환경요인의 공간적 분포 양상도 파악하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구지역

섬진강은 경상남도와 전라남도를 가로질러 남해로 유입되며, 길이는 약 303 km, 총 유역 면적은 약 4,900 km²이다(KEI, 2005). 연간 담수 유출량은 약 10.7~39.3×10⁸ 톤이다(MCT, 2007). 섬진강 하구는 최대조차가 약 4 m(평균대조차: 약 2.6 m)이며, 표층과 저층의 최강 유속은 각각 56.1, 9.8 cm s⁻¹이다(Lee *et al.*, 2006a). 섬진강 하구 유역에서 2006년의 연 강수량은 약 1,711 mm였으며 대부분 4월과 8월 사이에 집중되어 있다(약 1,445 mm)(MCT, 2007). 섬진강 하구에서 가장 인접한 송정관측소에서 조사된 유량은 연평균 약 86.16 m³ sec⁻¹(최대 2,103 m³ sec⁻¹, 최소 11.04 m³ sec⁻¹)였다.

2.2 현장조사 및 시료분석

시간에 따른 화학성분의 분포 양상을 파악하기 위해서 Fig. 1의 정점 5에서 2006년 3월 13~14일(건기)과 7월 24~25일(우기)에 25시간 동안 2시간 간격으로 현장조사 및 해수시료를 채취하였다. 해수시료는 표층(표면하 50 cm)과 저층(바닥으로부터 1 m 상부)에서 각각 채수하였다. 또한 염분경사에 따른 해양환경 변화 양상을 파악하기 위해서 건기와 우기에 염분이 0인 지점부터 염분경사가 생기지 않는 광양만까지 염분경사를 고려하여 16개 정점을 선정하



Fig. 1. Map of the study area (● Station for continuous observation, ○ Stations for across a saline gradient).

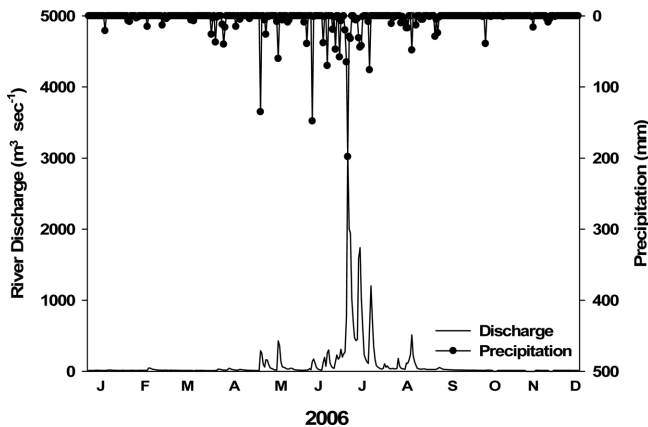


Fig. 2. River discharge and precipitation of Seomjin River at Song-jung, Chollanamdo.

여 표층수를 채수하였다(Fig. 1).

수온, 염분, pH는 수질측정기(YSI-6600V2, USA)로 현장에서 측정하였으며, 모든 화학성분 분석은 해양환경공정시험방법(MMAF, 2005)을 따랐다. 용존산소(DO)는 윙클러-아자이드화나트륨법, 부유입자물질(SPM)은 증량법으로 측정하였으며, 엽록소 *a*는 90% 아세톤으로 추출 후 형광분광광도계(Turner Designs, 10-AU-005-CE, USA)를 이용하여 측정하였다.

용존무기영양염류 분석을 위한 시료는 채수 즉시 현장에서 GF/F 여과지로 여과한 후 드라이아이스로 냉동보관하여 실험실로 운반하고 분석시까지 냉동보관(-20 °C) 하였다. 암모늄은 인도페놀법, 아질산염은 분홍색의 아조화합물 비색법, 질산염은 카드뮴-구리환원법, 인산염은 아스코르빈산 환원법, 규산염은 청색 폴리브덴산환원법을 이용하여 분광광도계(Cary 100 UV-Vis, Varian, USA)로 분석하였다. 유량과 강수량은 국토해양부 영산강 홍수통제소(송정관측소)에서 제공하는 수문자료를 이용했고(Fig. 2), 조석주기는 국립해양조사원에서 제공하는 광양만 해역의 조석정보를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 해양환경요인의 시간적 변화

3.1.1 이화학적 성분의 시간에 따른 변화

하구에서 해양환경요인의 시공간적 분포는 불규칙한 강물 유출량과 조석주기에 의해서 주로 영향을 받는다(Park *et al.*, 2001; Liu *et al.*, 2007; Schmitt *et al.*, 2008). 섬진강 하구에서 건기(3월)와 우기(7월)에 연속관측 결과, 수온은 건기에 표층수와 저층수에서 각각 7.4~8.8(평균 8.2±0.5 °C), 8.1~8.8(평균 8.5±0.3 °C) 범위였다. 우기에는 표층수와 저층수에서 각각 20.7~22.3(평균 21.5±0.4 °C), 20.1~21.3(평균 20.7±0.3 °C) 범위였다(Fig. 3). 수온은 저층에 비해 표층에서 뚜렷한 일주기 변화를 보였으며, 특히, 건기에 수온은 저녁 10시 이후에 급격하게 감소(< 8°C)하여 오전 6시경부터 증가하는 것으로 나타났다. 우기에 표층 수온은 건기에 비해 일주기 변화의 폭이 적었다(약 0.5 °C)(Fig. 3).

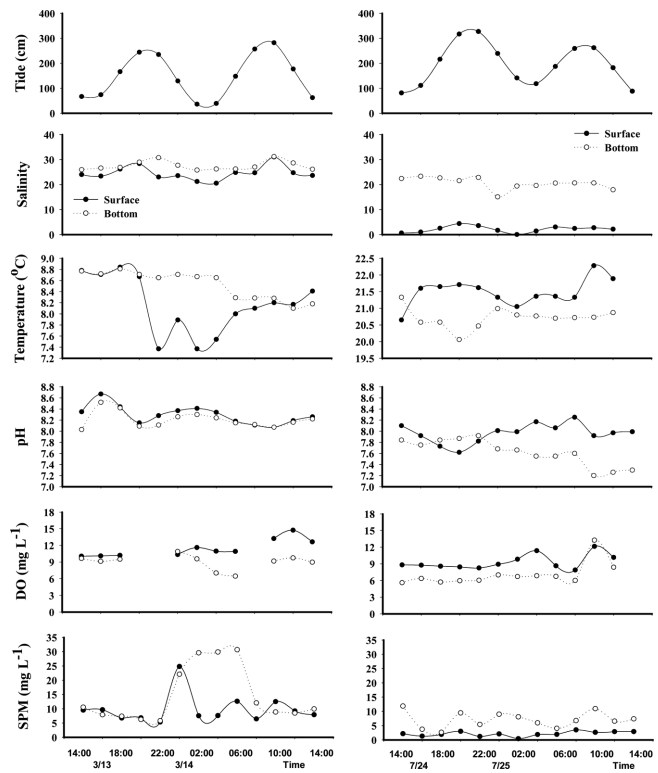


Fig. 3. Temporal variations of tide, salinity, temperature, pH, dissolved oxygen (DO), and suspended particulate matter (SPM) (The dry (L) and rainy (R) season).

염분은 건기에 표층과 저층에서 각각 20.54~31.03(평균 24.56±2.77), 25.79~31.22(평균 27.55±1.82) 범위였으며, 우기에는 표층과 저층에서 각각 0.01~4.40(평균 2.13±1.26), 15.10~23.32(평균 20.55±2.35) 범위였다. 건기와 우기 사이에 표층 염분은 20 이상 큰 차이를 보였다. Kwon *et al.*(2004)에 의해서 1999~2000년에 조사된 염분의 수평 분포 양상은 계절별로 상당한 차이를 보였으며, 본 연구와 유사한 정점에서 월별로 조사된 건기와 우기 사이의 염분차는 본 연구결과와 유사한 범위(약 20)에 있었다. 표층수와 저층수 사이의 염분차는 건기에는 약 3 정도였으며, 우기에는 약 15 이상 차이를 보였다(Fig. 3). 우기에 표층을 통한 담수의 유입으로 건기에 비해 표층수와 저층수 사이의 수직적 염분 구배가 상당히 크게 나타났다(Fig. 3). 조사기간동안 표층수 중 시간에 따른 염분의 변화는 밀물시에는 염분이 증가하고 썰물시에는 감소하는 경향을 보여 섬진강 하구에서 염분의 변화는 조석주기와 연관성이 있는 것으로 나타났다(건기 : $r=0.753$, 우기 : $r=0.702$)(Table 1, 2). 따라서 섬진강 하구에서 시간에 따른 염분 분포는 조석주기의 영향을 받고, 시기별(건기, 우기) 염분 농도 분포는 강물 유출량의 영향을 받는 것으로 판단된다.

pH는 건기에 표층수와 저층수에서 각각 8.07~8.67(평균 8.30±0.16), 8.03~8.52(평균 8.21±0.14) 범위였으며, 우기에는 표층수와 저층수에서 각각 7.62~8.25(평균 7.96±0.18), 7.20~7.92(평균 7.64±0.23) 범위였다(Fig. 3). 우기에 pH가 낮은 담수(강물의 유입으로

Table 1. Correlation matrix between environmental factors in the surface and bottom water of the Seomjin River Estuary during the dry season (continuous monitoring)

		Tidal height	Sal.	Temp.	pH	DO	DIN	DIP	DSi	SPM
Surface water	Sal.	0.753**								
	Temp.	0.084	0.502							
	pH	-0.670*	-0.537	0.138						
	DO	0.538	0.433	-0.093	-0.643					
	DIN	-0.883**	-0.870**	-0.332	0.747**	-0.599				
	DIP	0.106	-0.025	-0.584*	-0.568*	0.701*	-0.172			
	DSi	-0.556*	-0.661*	-0.713**	0.265	-0.315	0.736**	0.255		
	SPM	-0.065	0.066	-0.066	0.058	-0.264	0.027	0.150	0.217	
	Chl <i>a</i>	-0.894**	-0.690**	0.138	0.656*	-0.330	0.740**	-0.208	0.216	-0.112
Bottom water	Sal.	0.797**								
	Temp.	-0.285	-0.163							
	pH	-0.480	-0.406	0.368						
	DO	0.096	0.277	0.208	0.065					
	DIN	-0.853**	-0.825**	0.407	0.291	-0.001				
	DIP	0.409	0.422	-0.758**	-0.459	-0.148	-0.628*			
	DSi	0.231	0.324	-0.448	-0.138	0.320	-0.280	0.147		
	SPM	-0.507	-0.513	0.031	0.094	-0.490	0.357	0.188	-0.373	
	Chl <i>a</i>	-0.940**	-0.854**	0.103	0.515	-0.141	0.833**	-0.328	-0.105	0.506

*: P<0.05, **: P<0.01

Table 2. Correlation matrix between environmental factors in the surface and bottom water of the Seomjin River Estuary during the wet season (continuous monitoring)

		Tidal height	Sal.	Temp.	pH	DO	DIN	DIP	DSi	SPM
Surface water	Sal.	0.702*								
	Temp.	0.595*	0.578*							
	pH	-0.526	-0.526	-0.477						
	DO	-0.132	-0.233	0.397	0.159					
	DIN	-0.424	-0.456	-0.406	0.550	0.120				
	DIP	-0.564*	-0.248	-0.343	0.309	-0.046	0.742**			
	DSi	-0.052	-0.432	0.260	0.357	0.422	0.304	-0.142		
	SPM	0.015	0.492	0.308	0.113	-0.030	-0.384	-0.300	-0.110	
	Chl <i>a</i>	-0.145	-0.136	0.056	-0.160	-0.347	-0.224	0.019	0.004	-0.071
Bottom water	Sal.	-0.035								
	Temp.	-0.567	-0.355							
	pH	0.228	0.347	-0.605*						
	DO	0.282	-0.241	0.083	-0.558					
	DIN	-0.501	-0.519	0.295	-0.208	-0.131				
	DIP	-0.621*	-0.103	0.384	-0.396	-0.119	0.840**			
	DSi	-0.454	-0.511	0.267	-0.293	0.053	0.930**	0.800**		
	SPM	0.035	-0.268	0.352	0.088	0.370	0.068	-0.127	0.112	
	Chl <i>a</i>	0.712**	-0.089	-0.366	-0.012	0.593*	-0.377	-0.579*	-0.339	0.303

*: P<0.05, **: P<0.01

건기에 비해 상대적으로 낮게 나타났다. 건기에 표층수 중 pH 변화는 조석주기와 가장 좋은 음의 상관관계($r=-0.670$)를 보였으며, 우기에 저층에서 가장 낮은 양의 상관관계를 보였다($r=0.228$)(Table 1, 2).

DO 농도는 건기에 표층수와 저층수에서 각각 10.1~14.8(평균 11.6±1.6) mg L⁻¹, 6.5~10.9(평균 9.0±1.4) mg L⁻¹ 범위였으며, 우기에는 표층수와 저층수에서 각각 7.9~12.1(평균 9.3±1.3) mg L⁻¹, 5.6~13.3(평균 7.1±2.1) mg L⁻¹ 범위였다(Fig. 3). DO는 우기보다

건기에 상대적으로 높은 농도를 보였으며, 표층수 농도가 저층수 농도에 비해 건기에는 약 2.7 mg L⁻¹ 우기에 약 2.3 mg L⁻¹ 정도로 높게 나타났다(Fig. 3). 건기와 우기에 표층수 중 용존산소의 포화도는 각각 101~147%(평균 115%), 91~142%(평균 107%) 범위였으며, 저층수 중 평균 포화도는 각각 107%, 89%였다. 우기에 비해 건기에 용존산소 포화도가 약 10% 이상 높게 나타났다. 건기에 높은 포화도는 낮은 수온과 함께 식물플랑크톤의 광합성 작용에 의

한 것으로 판단된다(Dodds, 2007).

부유입자물질은 연구기간 동안 조석주기와 뚜렷한 상관관계를 보이지 않았으며(Table 1, 2), 건기에 저층에서 높게 나타난 부유입자물질 농도(약 30 mg L⁻¹)를 제외하고 건기와 우기에 대체로 10 mg L⁻¹ 이하로 일반적인 하구에서 조사된 부유입자물질 농도에 비해서 낮게 나타났다(Fig. 3)(Berner and Berner, 1996; Ki and Kim, 1987).

3.1.2 용존무기영양염류의 시간에 따른 분포

섬진강 하구에서 건기와 우기에 연속관측한 용존무기영양염류의 변화 양상은 Fig. 4에 나타내었다. 용존무기영양염류의 시간에 따른 변화를 살펴보면, 건기에는 표층수 중 용존무기질소(암모늄+아질산염+질산염)와 규산염 농도 변화는 염분의 변화 양상과 좋은 상관관계를 보였고, 우기에는 상대적으로 낮은 상관관계를 보였다(Table 1, 2). 반면 인산염은 조사기간동안 염분과 낮은 상관관계를 보였다(Table 1, 2). 용존무기영양염류의 농도는 건기에 비해 우기에 상당히 높게 나타났으며, 연속관측 자료를 각 시기별로 평균한 표층수 중 용존무기질소 농도는 건기에 비해 우기에 6배 이상 높게 나타났다. 인산염은 건기에 비해 우기에 표층수 중 농도가 약 4배 이상 높은 농도를 보였으며, 규산염은 약 43배 높게 나타났다. 섬진강 하구의 상부에 위치한 송정관측소에서 조사된 건기와 우기인 2006년 3월과 7월에 한달간 평균한 강물 유량은 각각 13.8, 712.5 m³ sec⁻¹였으며, 1999~2004년 까지 송정관측소에서 조사된 3월과 7월에 한달간 평균 강물 유출량은 약 10.9~48.3, 54.1~636.2 m³ sec⁻¹ 범위였다. 따라서 섬진강 하구를 통해서 해양으로 공급되는 용존무기영양염류의 총량은 건기와 우기 사이에 상당한 차이를 보일 것으로 판단되며, 앞으로 강물 유출량의 증감기 변동에 따른 섬진강 하구를 통한 화학성분의 공급량과 관련된 장기적인 모니터링이 필요할 것으로 판단된다.

표층과 저층 사이의 용존무기영양염류의 농도 구배는 건기에 상당히 적은 반면에 우기에는 표층과 저층 사이에 농도 구배가 크게 나타났다. 우기에 질산염, 인산염, 규산염의 농도는 저층에 비해 표층에서 2~3배 정도 높게 나타났으며, 암모늄과 아질산염의 경우, 저층에서 높은 농도를 보였다. 이는 질산염, 인산염, 규산염의 경우 표층을 따라 흐르는 담수로부터 공급되는 것으로 판단되고, 암모늄과 아질산염은 퇴적물 중 유기물 분해에 의한 영양염의 재용출과 퇴적물로부터 재부유로 인한 공급으로 높은 농도를 보이는 것으로 판단된다(Herbert, 1999).

3.1.3 식물플랑크톤 생체량의 시간에 따른 변화

섬진강 하구에서 용존무기영양염류를 포함한 이화학성분들의 분포는 시간에 따라 상당한 차이를 보였다. 하구에서 식물플랑크톤의 생체량과 군집구조는 해양환경요인들의 변화와 밀접한 관계를 가지고 있다(Carpenter *et al.*, 1972; Kwon *et al.*, 2001; Gameiro *et al.*, 2007; Tas *et al.*, 2009).

식물플랑크톤 생체량의 지시자인 엽록소 *a*와 용존무기영양염류의 변화양상을 살펴보면(Fig. 4), 건기인 3월에 엽록소 *a* 농도는 담수의 유입으로 인한 용존무기영양염류 농도가 높은 시기에 높게 나

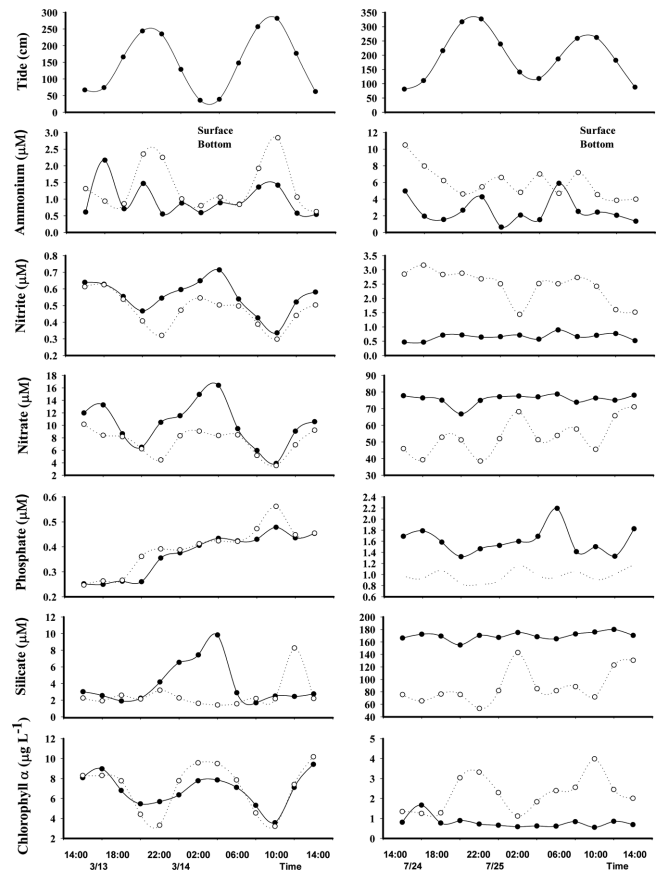


Fig. 4. Temporal variations of tide, ammonium, nitrite, nitrate, phosphate, silicate, and chlorophyll *a* (The dry (L) and rainy (R) season).

타났으며, 담수의 유입이 적어 염분이 높고 용존무기영양염류 농도가 낮은 시기에 낮게 나타났다. 우기인 7월에는 표층수 중 엽록소 *a*의 농도가 시간에 따라 큰 변화를 보이지 않았다. 건기에 엽록소 *a* 농도는 우기에 비해 표층수의 경우 5~6배 정도, 저층수의 경우 3~4배 정도 높게 나타났다. 시기에 따른 엽록소 *a* 농도차는 우기보다 건기에 강물 유출량의 감소로 인한 물의 체류시간 증가로 식물플랑크톤이 성장하기에 좋은 환경이 형성된 것으로 판단된다(Gameiro *et al.*, 2007).

3.2 해양환경요인의 공간적 분포 양상

3.2.1 이화학적 성분의 공간적 분포

섬진강 하구에서 해양환경요인들의 시간에 따른 변화양상과 함께 염분경사에 따른 공간적인 변화 양상을 건기와 우기에 각각 살펴보았다(Fig. 5; Table 3, 4). 표층 수온은 건기의 경우 약 6~9°C 범위로 담수쪽에 비해 해수쪽에서 높게 나타났으며, 우기에는 약 22°C 정도로 공간적 차이가 작았다(Fig. 5). 염분 범위는 건기에 0~35 정도였으며, 우기에는 0~20 정도로 건기와 우기 사이에 뚜렷한 차이를 보였다. 건기에는 정점 1에서 염분이 21.27로 해수가 섬진강 상류까지 침입하는 것을 볼 수 있으며, 우기에는 담수의 유입이 우세하여 정점 1에서 염분이 0.06으로 나타났다(Table 3, 4). 연

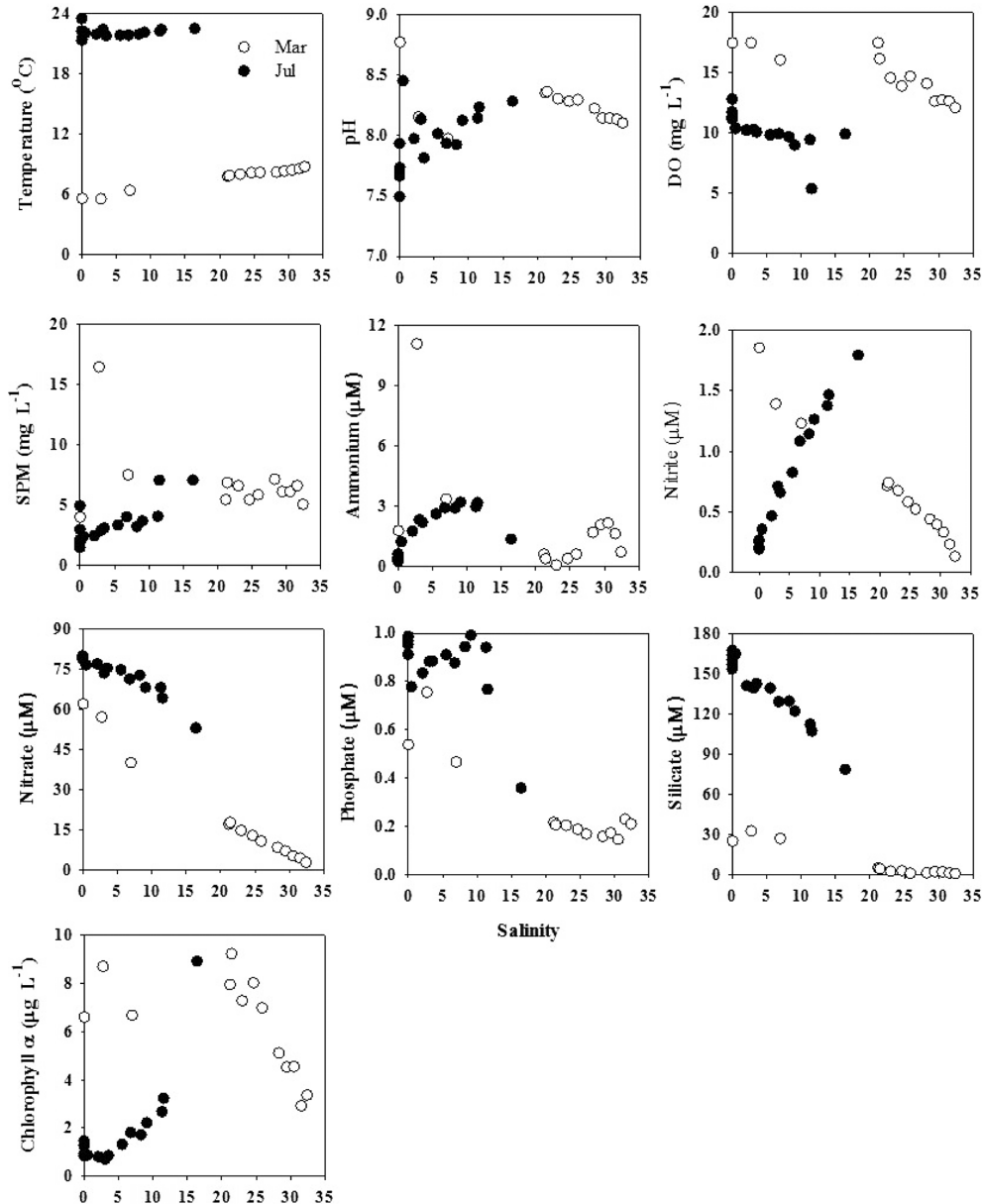


Fig. 5. Relationship of temperature, pH, dissolved oxygen (DO), suspended particulate matter (SPM), ammonium, nitrite, nitrate, phosphate, silicate, and chlorophyll *a* with salinity in the surface water of the Seomjin River Estuary.

구기간인 2006년 3월(건기)과 7월(우기) 한달간 섬진강 하구 주변 유역으로 내린 강수량은 각각 13, 675 mm였다. 유량은 각각 13.8, 712.5 m³ sec⁻¹로 건기와 우기 사이에 상당한 차이를 보였으며(Fig. 2), 시기별 강수량 및 유량의 차이는 섬진강 하구에서 염분의 공간적 분포에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

pH는 건기와 우기에 각각 7.97~8.77(평균 8.25±0.19), 7.49~8.45(평균 7.97±0.25)의 범위였으며(Table 3, 4), 건기에 비해 우기에 변동 폭이 컸다. 우기에 pH의 공간적 분포 양상은 0~15 범위(우기)의 염분 구간에서 담수 쪽에서 뚜렷하게 낮은 값을 보였고, 염분이 증가함에 따라 증가하는 양상을 보였다. 반면, 건기(염분 20~35)에는 오히려 염분이 낮은 구간에서 높은 pH 값을 보였다(Fig. 5). 우

기에는 해수에 비해 상대적으로 낮은 pH 값을 보이는 담수의 유입 정도에 따라 섬진강 하구의 pH 값 분포에 영향을 많이 받는 반면, 강물의 유출이 적은 건기에 pH는 강물과 해수가 가지는 고유 pH 값에 의한 영향 보다는 다른 요인들의 변화에 의한 영향을 받는 것으로 판단된다. 해수 중 pH의 변화는 주로 수온, 용존산소, 그리고 식물플랑크톤의 광합성량에 의해서 조절된다(Chen and Durbin, 1994). 섬진강 하구에서 건기 동안에 용존산소 농도는 낮은 염분구간에서 높게 나타났으며, 동시에 엽록소 *a* 농도 역시 높게 나타났다(Fig. 5). 따라서 섬진강 하구에서 건기에 pH 값의 수평적 분포는 기초생산자의 광합성으로 인한 해수 중 CO₂ 농도의 감소와 연관성이 있는 것으로 판단된다.

Table 3. Values of physico-chemical constituents with salinity in the surface water of the Seomjin River Estuary in March 2006

Sampling data	Station No.	Salinity	Temp.	pH	DO	SPM	Chl <i>a</i>	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	Si(OH) ₄
			°C		mg L ⁻¹	mg L ⁻¹	µg L ⁻¹			µM		
Mar. 2006	F1	0.09	5.5	8.77	17.4	3.95	6.58	1.76	1.85	61.7	0.53	24.7
	F2	2.82	5.5	8.15	17.4	16.4	8.67	11.1	1.39	56.8	0.75	32.3
	F3	7.05	6.3	7.97	16.0	7.45	6.65	3.33	1.22	39.8	0.46	26.7
	SJ1	21.27	7.7	8.35	17.4	5.40	7.92	0.58	0.71	16.8	0.21	4.7
	SJ2	21.50	7.8	8.36	16.1	6.80	9.19	0.36	0.74	17.5	0.20	4.0
	SJ3	23.06	7.9	8.30	14.5	6.55	7.25	0.04	0.67	14.5	0.20	2.3
	SJ4	24.71	8.1	8.28	13.8	5.40	8.00	0.36	0.58	12.6	0.18	2.7
	SJ5	25.97	8.2	8.29	14.6	5.80	6.95	0.59	0.52	10.5	0.16	0.6
	SJ6	28.38	8.2	8.22	14.0	7.10	5.08	1.68	0.44	8.2	0.15	1.1
	SJ7	29.51	8.3	8.14	12.6	6.05	4.50	2.06	0.39	6.8	0.17	1.9
SJ8	30.60	8.4	8.14	12.7	6.05	4.52	2.14	0.33	5.0	0.14	1.8	
SJ9	31.63	8.5	8.13	12.6	6.55	2.90	1.61	0.23	4.1	0.23	0.9	
SJ10	32.49	8.7	8.10	12.0	5.00	3.34	0.69	0.13	2.6	0.21	0.5	

Table 4. Values of physico-chemical constituents with salinity in the surface water of the Seomjin River Estuary in July 2006

Sampling data	Station No.	Salinity	Temp.	pH	DO	SPM	Chl <i>a</i>	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	Si(OH) ₄
			°C		mg L ⁻¹	mg L ⁻¹	µg L ⁻¹			µM		
Jul. 2006	F1	0.04	23.4	7.69	11.7	4.87	1.43	0.25	0.26	78.9	0.91	167
	F2	0.04	21.4	7.93	12.7	2.90	1.26	0.42	0.20	78.4	0.96	160
	F3	0.04	21.3	7.49	11.1	2.06	1.24	0.34	0.19	79.6	0.91	153
	SJ1	0.06	21.4	7.73	11.3	1.85	0.81	0.60	0.21	78.9	0.98	164
	SJ2	0.05	22.2	7.66	11.1	1.42	0.90	0.56	0.25	78.6	0.95	157
	SJ3	0.54	22.0	8.45	10.3	2.34	0.85	1.21	0.35	76.3	0.78	164
	SJ4	2.14	21.9	7.97	10.2	2.40	0.78	1.73	0.46	76.7	0.83	141
	SJ5	3.59	21.8	7.81	10.0	3.03	0.84	2.17	0.66	75.1	0.88	142
	SJ6	3.13	22.4	8.13	10.2	2.83	0.68	2.30	0.71	73.3	0.88	139
	SJ7	5.59	21.8	8.01	9.8	3.28	1.29	2.59	0.82	74.5	0.91	139
	SJ8	6.83	21.8	7.93	9.9	3.97	1.79	2.89	1.08	71.0	0.87	129
	SJ9	8.33	21.9	7.92	9.6	3.16	1.69	2.88	1.14	72.4	0.94	129
	SJ10	9.17	22.1	8.12	8.9	3.62	2.19	3.17	1.26	67.9	0.99	122
SJ11	11.38	22.2	8.14	9.4	4.01	2.65	2.95	1.37	67.8	0.94	112	
SJ12	11.61	22.4	8.23	5.3	7.00	3.21	3.15	1.46	64.0	0.76	107	
SJ13	16.48	22.5	8.28	9.9	7.03	8.89	1.34	1.79	52.7	0.36	78	

용존산소 농도는 우기에 비해 건기에 상대적으로 높은 값을 보였으며, 대체로 염분이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다(Fig. 5). 건기와 우기 사이의 농도 차이는 수온의 감소로 인한 용존산소 포화도의 증가와 식물플랑크톤의 광합성량 차이로 인한 수중의 용존산소량의 변화에 의한 영향으로 판단된다(Bensoussan *et al.*, 2004).

부유입자물질 농도는 건기와 우기에 각각 3.95~16.40(평균 6.81±3.03) 1.42~7.03(평균 3.49±1.63) mg L⁻¹의 범위였다(Table 3, 4). 전세계 주요 하구에서 나타나는 부유입자물질 농도는 10~1,000 mg L⁻¹의 범위(Berner and Berner, 1996)이며, 국내의 금강 하구에서 하구둑 건설전에 조사된 부유입자물질 농도는 1.2~2,136 mg L⁻¹의 범위로 보고된 바 있다(Ki and Kim, 1987). 따라서 섬진강 하구에서 측정된 부유입자물질 농도는 국내외 여러 하구에서 조사된 부유입자물질 농도에 비해서 낮게 나타나 전형적인 저탁도 하구인 것으로 판단된다(Kwon *et al.*, 2002b).

3.2.2 용존무기영양염류의 공간적 분포

섬진강 하구에서 염분경사에 따른 용존무기영양염류의 분포 양상은 Table 3, 4와 Fig. 5에 나타내었다. 표층수 중 용존무기질소 농도는 건기와 우기에 각각 3.4~69.2(평균 22.5±22.3), 55.9~80.1(평균 75.6±6.0) µM 범위였으며, 건기에 비해 우기에 약 3배 이상 높게 나타났다. 인산염과 규산염 농도는 건기에 각각 0.14~0.75(평균 0.28±0.19), 0.5~32.3(평균 8.0±11.5) µM, 우기에는 각각 0.36~0.99(평균 0.87±0.15), 78~167(평균 139±24) µM로 건기에 비해 우기에 인산염은 약 3배, 규산염은 약 17배 정도 높게 나타났다. 우기인 7월에 질산염과 규산염의 농도는 염분 0에서 각각 약 80, 170 µM 정도로 강을 통해 섬진강 하구로 상당한 양이 공급되는 것으로 나타났으며, 염분이 증가함에 따라 해수와 혼합에 의해서 점차 감소하는 경향을 보였다(Gameiro *et al.*, 2007; Seitzinger, 1988). 섬진강 하구에서 건기와 우기에 이전에 조사된 결과(질산염 평균 7.21~94 µM,

인산염 0.27~1.34 μM , 규산염 20.7~120 μM)와 유사한 농도 범위에 있었으며, 염분경사에 따른 용존무기영양염류의 분포 양상과 비슷한 경향을 보였다(Kwon *et al.*, 2004).

섬진강 하구에서 염분경사도에 따른 용존무기영양염류의 공간적 분포양상은 암모늄과 아질산염의 경우, 우기에 염분 약 10~20 정도의 범위에서 염분이 증가함에 따라 증가하는 하는 양상을 보였다(Fig. 5). 이들 분포양상은 식물플랑크톤 생산량(엽록소 *a*)의 분포와 좋은 상관관계를 보였다. 해양에서 탈질산화(denitrification)를 조절하는 요인으로는 수온, 질산염과 유기물질의 공급, 용존산소 농도 등이 있다(Seitzinger, 1988). 연구기간동안 용존산소의 경우 약 10 mg L^{-1} 정도로 높게 나타났으며 따라서, 섬진강 하구에서 우기동안 염분에 따라 암모늄과 아질산염 농도의 증가는 이 시기에 과도한 질산염의 공급(약 80 μM)으로 인해 탈질산화 작용이 활발하게 진행되는 것으로 판단된다. 이러한 양상은 Jahnke *et al.*(2003)에 의해서 미국 Satilla River Estuary에서 측정된 용존무기질소 계열의 공간적 분포양상과 유사하게 나타났다.

3.2.3 식물플랑크톤 생체량의 공간적 분포

섬진강 하구에서 건기와 우기에 엽록소 *a*의 공간적 분포 양상은 Fig. 5에 나타내었다. 엽록소 *a* 농도는 건기와 우기에 각각 평균 6.27와 1.88 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 우기에 비해 건기에 3~4배 정도 높았다(Table 3, 4). 엽록소 *a* 농도의 시공간적 분포는 건기에 염분이 낮은 정점에서 높은 반면, 우기에는 염분이 높은 정점에서 높게 나타났다. 하구에서 식물플랑크톤의 생산량은 육상으로부터 하구로 공급되는 영양염류의 직접적인 영향을 받게 된다(Smith and Demaster, 1996; Lohrenz *et al.*, 1999). 섬진강 하구에서 영양염류의 시기별 분포양상은 건기에 비해 우기에 높게 나타난 반면, 식물플랑크톤의 생체량은 영양염류의 공급이 많았던 우기보다 건기에 높게 나타났다. 섬진강 하구에서 Kim and Lee(2004, 2009)에 의해서 측정된 건기(2월)와 우기(8월)의 낙조시 유속은 각각 39.2, 70.2 cm sec^{-1} 로 우기가 건기에 비해 약 2배 정도 높게 나타났으며, Kwon *et al.*(2004)에 의해서 1999년에 조사된 강물 유출량은 3월(55.2 $\text{m}^3 \text{sec}^{-1}$)에 비해 8월(668 $\text{m}^3 \text{sec}^{-1}$)에 약 10배 정도 높게 나타났다. Gameiro *et al.*(2007)이 Portugal에 위치한 Tagus estuary에서 계절에 따른 식물플랑크톤 생체량의 변화 양상을 살펴본 결과, 우기보다 건기에 높은 엽록소 *a* 농도를 보였다. 이는 건기에 강물 유출량의 감소에 따른 물의 체류시간 증가와 연관이 있는 것으로 보고하였다. 따라서 섬진강 하구에서 나타나는 시기에 따른(건기와 우기) 엽록소 *a* 농도차는 용존무기영양염류의 공급량 보다는 강물 유출량의 변화에 따른 물의 체류시간과 연관이 있는 것으로 판단된다(Gameiro *et al.*, 2007).

4. 결 론

섬진강 하구에서 건기와 우기에 25시간 연속관측 결과, 건기와 우기에 강물 유입량과 조석에 의해서 염분 및 용존영양염류의 시공간적 분포에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 건기와 우기에 표

층수 중 염분은 각각 20.5~31(평균 24.6 \pm 2.8), 0.01~4.40(평균 2.13 \pm 1.26) 범위로 건기에 약 10배 이상 높았다. 용존무기영양염류 농도는 건기에 비해 우기에 용존무기질산염의 경우 약 6배, 용존무기인의 경우 약 4배, 용존무기규산염의 경우 약 43배 높게 나타나 건기와 우기 사이에 섬진강을 통해서 해양으로 공급되는 영양염류의 공급량은 상당한 차이가 있을 것으로 추측된다. 앞으로 섬진강 하구를 통해서 해양으로 유입되는 영양염류 공급량의 시기에 따른 변화와 관련된 심도있는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 국립수산과학원 “해양환경측정망 운영” 사업의 일환으로 수행되었습니다. 이 논문을 심도있게 심사해 주신 심사위원들께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Bensoussan, N., Romano, J.C., El-Haikali, B. and Lafont, M.G., 2004, Relevant time scales in studying coastal marine ecosystems functioning. *Compt. Rendus Geosci.*, 336, 909-918.
- [2] Berner, E.K. and Berner, R.A., 1996, *Global Environment: Water, Air and Geochemical Cycles*. Prentice Hall.
- [3] Carpenter, E.J., Rensen, C.C. and Weston, S.W., 1972, Utilization of urea by some marine phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.*, 17, 265-269.
- [4] Chen, C.Y. and Durbin, E.G., 1994, Effects of pH on the growth and carbon uptake of marine phytoplankton. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 109, 83-94.
- [5] Chung, M. and Ceon, I.K., 2009, Characteristics of salinity variation at downstream reach of the Seomjin River. *J. Korean Soc. Environ. Tech.*, 10, 254-260.
- [6] Dodds, W.K., 2007, Trophic state, eutrophication and nutrient criteria in streams. *Trends in Ecology and Evolution*, 22, 669-676.
- [7] Gameiro, C., Cartaxana, P. and Brotas, V., 2007, Environmental drivers of phytoplankton distribution and composition in Tagus Estuary, Portugal. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 75, 21-34.
- [8] Hedges, J.I. and Keil, R.G., 1999, Organic geochemical perspectives on estuarine processes: sorption reactions and consequences. *Mar. Chem.*, 65, 55-65.
- [9] Herbert, R.A., 1999, Nitrogen cycling in coastal marine ecosystems. *FEMS Microbiology Reviews*, 23, 563-590.
- [10] Jahnke, R.A., Alexander, C.R. and Kostka, J.E., 2003, Advective pore water input of nutrients to the Satilla River Estuary, Georgia, USA. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 56, 641-653.
- [11] Kaul, L.W. and Froelich Jr., P.N., 1984, Modeling estuarine nutrient geochemistry in a simple system. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 48, 1417-1433.
- [12] Ki, J.H. and Kim, K.R., 1987, Studies on chemical and biological processes in the Keum River Estuary, Korea II. Factors controlling chlorophyll-a distribution. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 22,

- 207-215.
- [13] Kim, G., Lee, Y.W., Jung, D.J., Kim, K.R. and Kim, K., 2006, Real-time monitoring of nutrient concentrations and red-tide outbreaks in the southern sea of Korea. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L13607.
- [14] Kim, J.G. and Kang, H., 2002. The effect of tidal cycle and river runoff on the dynamic of nutrients in Keum river estuary. *J Environ. Sci.*, 11, 519-528.
- [15] Kim, S.Y. and Lee, B.K., 2004, In situ particle size and volume concentration of suspended sediment in Seomjin River Estuary, determined by an optical instrument, 'LISST-100'. *J. Kor. Fish. Soc.*, 37, 323-329.
- [16] Kim, S.Y. and Lee, B.K., 2009, The distribution and behaviors of suspended matters in Seomjin River Estuary- Compared with rainy and wet season -. *J. Korean Soc. Water Qual.*, 25, 935-942.
- [17] Korea Environment Institute, 2005, Development of sustainable estuary management strategy in Korea II.
- [18] Kwon, K.Y., Kim, C.H., Kang, C.K., Moon, C.H., Park, M.O. and Yang, S.R., 2002a, Limiting nutrients for phytoplankton growth in the Seomjin River Estuary as determined by algal bioassay experiment. *J. Korean Fish. Soc.*, 35, 455-462.
- [19] Kwon, K.Y., Lee, P.G., Park, C., Moon, C.H. and Park, M.O., 2001, Biomass and species composition of phytoplankton and zooplankton along the salinity gradients in the Seomjin River Estuary. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 6, 93-102.
- [20] Kwon, K.Y., Moon, C.H., Kang, C.K. and Kim, Y.N., 2002b, Distribution of particulate organic matters along the salinity gradients in the Seomjin River Estuary. *J. Korean Fish. Soc.*, 35, 86-96.
- [21] Kwon, K.Y., Moon, C.H., Lee, J.S., Yang, S.R., Park, M.O. and Lee, P.Y., 2004. Estuarine behavior and flux of nutrients in the Seomjin River Estuary. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 9, 153-163.
- [22] Lee, S.B., Hong, C.O., Oh, J.H., Gutierrez, J. and Kim, P.J., 2008, Effect of irrigation water salinization on salt accumulation of plastic film house soil around Sumjin River Estuary. *Korean J. Environ. Agri.*, 27, 349-355.
- [23] Lee, J.C., Kim, J.C. and Park, M.W., 2006a, Observations of current in the northeastern Gwangyang Bay. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 11, 172-178.
- [24] Lee, Y.S., Park, Y.T., Kim, K.Y., Choi, Y.K. and Lee, P.Y., 2006b. Characteristics of coastal water quality after diatom blooms due to freshwater inflow. *J. Korean Soc. Mar. Environ. Safety*, 12, 75-79.
- [25] Lee, Y.H. and Yang, J.S., 1997, 500-days continuous observation of nutrients, chlorophyll suspended solid and salinity in the Keum Estuary, Korea. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 2, 1-7.
- [26] Liu, W.C., Chen, W.B., Cheng, R.T., Hsu, M.H. and Kuo, A.Y., 2007, Modeling the influence of river discharge on salt intrusion and residual circulation in Danshuei River estuary, Taiwan. *Cont. Shelf Res.*, 27, 900-921.
- [27] Lohrenz, S.E., Fahnenstiel, G.L., Redalje, D.G., Lang, G.A., Dagg, M.J., Whitedge, T.E. and Dortch, Q., 1999, Nutrients, irradiance, and mixing as factors regulating primary production in coastal waters impacted by the Mississippi River plume. *Cont. Shelf Res.*, 19, 1113-1141.
- [28] Ministry of Construction & Transportation, 2007, Annual hydrological report on Korea.
- [29] Ministry of Maritime Affairs and Fisheries, 2005, Standard methods of marine environment in Korea.
- [30] Montani, S., Magni, P., Shimamoto, M., Abe, N. and Okutani, K., 1998, The effect of a tidal cycle on the dynamics of nutrients in a tidal estuary in the Seto Inland Sea, Japan. *J. Oceanogr.*, 54, 66-76.
- [31] Moon, C.H. and Dunstan, W.M., 1990, Hydrodynamic trapping in the formation of chlorophyll *a* peak in turbid, very low salinity waters of estuaries. *J. Plankton*, 12, 323-336.
- [32] Na, C.K. and Son, C.I., 2005, Groundwater quality and pollution characteristics at Seomjin River Basin: Pollution source and risk assessment. *Econ. Environ. Geol.*, 38, 261-272.
- [33] Officer, C.B., 1979, Discussion of the behavior of nonconservative dissolved constituents in estuaries. *Est. Coast. Mar. Sci.*, 9, 91-94.
- [34] Pakulski, J.D., Benner, R., Amon, R., Eadie, B. and Whitedge, T., 1995, Community metabolism and nutrient cycling in the Mississippi River plume: evidence for intense nitrification at intermediate salinities. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 117, 207-218.
- [35] Park, L.H., Cho, Y.K., Cho, C., Sun, Y.J. and Park, K.Y., 2001, Hydrography and circulation in the Youngsan River Estuary in summer, 2000. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 6, 218-224.
- [36] Park, C., Lee, P.G. and Yang, S.R., 2002, Variation of zooplankton distribution in the Seomjin River Estuary with respect to season and salinity gradients. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 7, 51-59.
- [37] Schmitt, F.G., Dur, G., Souissi, S. and Zongo, S.B., 2008, Statistical properties of turbidity, oxygen and pH fluctuations in the Seine river estuary (France). *Physica A*, 387, 6613-6623.
- [38] Seitzinger, S.P., 1988, Denitrification in freshwater and coastal marine ecosystems: Ecological and geochemical significance. *Limnol. Oceanogr.*, 33, 702-724.
- [39] Smith, J.W.O. and Demaster, D.J., 1996, Phytoplankton biomass and productivity in the Amazon River plume: correlation with seasonal river discharge. *Cont. Shelf Res.*, 16, 291-319.
- [40] Tas, S., Yilmaz, I.N. and Okus, E., 2009, Phytoplankton as an indicator of improving water quality in the Golden Horn Estuary. *Estuaries and Coasts*, 32, 1205-1224.
- [41] Yang, H.S. and Kim, S.S., 1990. Characteristics of spatio-temporal variation of the water quality in the lower Keum River. *Bull. Korean Fish. Soc.*, 23, 225-237.
- [42] Yang, S.R., Song, H.S., Kim, K.C., Park, C. and Moon, C., 2005. Changes in environmental factors and primary productivity in the Seomjin River Estuary. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 10, 164-170.

2012년 8월 3일 원고접수

2012년 9월 3일(1차), 2012년 11월 13일(2차) 심사수정일자

2012년 11월 16일 게재확정일자