Korean J. Environ. Biol. 29 (3) : 212~224 (2011)

하구언 건설 전·후의 영산강 하구 식물플랑크톤 군집 및 환경 변화

신 용 식*·윤 보 배

목포해양대학교 해양시스템공학부, 연안하구연구센터

Change in Taxonomic Composition of Phytoplankton and Environmental Factors after Construction of Dike in Yeongsan River Estuary

Yongsik Shin* and Bobae Yoon

Coastal Estuarine Research Center, Division of Ocean System Engineering, Mokpo Maritime National University, Mokpo 530-729, Korea

Abstract – The Yeongsan River estuary, located in the south west coast, was a typical estuary before a dike was constructed in December 1981. After the construction, the water quality and plankton communities are expected to change. We investigated the change of phytoplankton community and environmental properties in the Yeongsan River estuary by comparing the data collected recently with the results reported before and/or shortly after the construction. Concentrations of NH_4-N were significantly increased in the freshwater zone. Concentrations of DO at the surface, NO_2+NO_3 and NH_4-N were increased while the concentrations of PO_4 at the surface were decreased in the seawater zone. The number of green algae species was decreased in the freshwater zone. The number of diatom species was decreased while the numbers of green algae and dinoflagellates were increased in the seawater zone. This study can provide information for better management of the Yeongsan River estuary since no comparison study has been documented between the phytoplankton community before and after the construction of the dike in the estuary.

Key words : phytoplankton community, water quality, dike, Yeongsan River estuary

서 론

식물플랑크톤은 해양 생태계 먹이망(food web)에서 일차 생산자로서 상위 소비자인 동물플랑크톤과 어업 생산량에 영향을 미치고, 또한 탄소와 영양염류의 순환에서 중요한 역할을 담당한다(Kemp and Boynton 1981; Boynton *et al.* 1982; Coffin and Sharp 1987; Sundbaeck *et al.* 1990; Semeneh *et al.* 1998; Rousseau *et al.* 2000; Froneman *et al.* 2004; Vargas and Gonzalez 2004). 해양생태계에서도 하구는 하천의 담수와 바다의 해수가 만나 혼합되는 전이수역으로, 물리적으로는 조석, 파랑 및 하천 유량이 동시에 영향을 미치고, 화학적으로는 육성(陸性)과 해성(海性)이 공존하는 매우 역동적인 환경이다. 특히 하구는 육지로부터 공급받는 영양염으로 인해 매우 생

* Corresponding author: Yongsik Shin, Tel. 061-240-7312, Fax. 061-240-7301, E-mail. yongsik@mmu.ac.kr

산적인 시스템으로 알려져 있으며(Ryther 1969), 실제로 단위면적당 유기물 생산량은 옥수수밭의 4～10배에 이르고, 단위면적당 생태적 가치는 US$ 22,832 ha^{-1} yr^{-1}로 지구 생태계 중 가장 큰 것으로 보고되고 있다(Costanza *et al.* 1997). 미국의 경우, 이러한 하구에서 생산되는 수산물의 생산량이 전체 생산량의 75%가 넘어 경제적 가치는 US$ 4.3×10^9 yr^{-1}에 이르는 것으로 나타났다(ANEP 1998). 하지만 이러한 생산적인 시스템에서 일차생산자인 식물플랑크톤의 대증식이 발생할 경우, 생태계 내에서 포식되지 않은 식물플랑크톤은 저층으로 침전하게 되고, 세균에 의한 유기물 분해과정을 거치면서 빈산소층을 형성하거나 용존산소의 감소에 기여하는 악영향을 주기도 한다(Sundbaeck *et al.* 1990). 따라서 식물플랑크톤 생체량 변동과 군집에 대한 이해는 하구 생태계의 건강성을 진단하는 데 있어서 매우 중요하다.

서남해에 위치한 영산강하구는 1981년 12월에 하구언이 완공되면서 자연형에서 인공구조물이 설치되어 변형된 인공형으로 진화하였다. 이에 따라 하구내의 물리적, 화학적, 생물학적 특성 또한 변화되었을 것으로 예상되지만, 아직까지는 해수역의 물리적 환경 변화에 대한 연구결과들이 주로 보고되었다(강 등 1998; 박 등 2001). 담수역과 해수역에 대한 수질이나 식물플랑크톤과 같은 화학적, 생물학적인 변화에 대한 자료는 아직까지 보고된 바 없다. 따라서 본 논문에서는 담수역과 해수역에 대한 기존 선행연구를 통해 보고된 자료를 수집, 분석하고, 현장조사를 통해 확보된 최근 자료와 비교함으로써 하구언 건설 전・후의 식물플랑크톤 군집(종조성, Chlorophyll-*a*)의 변화와 수질 특히 식물플랑크톤과 관련된 환경변화를 파악하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 조사지역

영산강은 한강, 금강, 낙동강과 함께 우리나라 4대강으로 유역면적 3,467.83 km^2, 유로연장 136.66 km (한국하천일람, 2008년 12월 31일 기준)이다. 영산강 유역은 한반도의 남서부지역에 위치하고 북쪽으로는 동진강 유역, 동쪽으로는 섬진강 유역과 접해 있으며, 동경 126°26′5″～127°6′3″, 북위 34°40′17″～35°28′58″에 해당된다. 영산강 유역에 포함된 행정구역은 광주광역시, 전라남도의 나주시, 목포시, 장성군, 담양군, 함평군, 화순군, 무안군, 영암군, 영광군, 전라북도의 정읍시로 1개 광역시, 3개 시, 7개 군이다. 영산강 수계는 농업용수의 목적으로 영산강 상류에 담양댐, 황룡강 상류에 장성댐, 증암천 상류에 광주댐, 지석천에서 갈라지는 대초천에 나주댐이 1976년에 건설되었고, 하류에는 1981년에 완공된 하구언이 위치한다. 또한 생활용수를 공급하기 위한 목적으로 건설된 평림댐이 황룡강에서 갈라지는 평림천에 위치하고 있어 영산강의 상류와 하류가 모두 막힌 형태를 띠고 있다. 영산강수계는 영산강, 황룡강, 지석천, 고막원천, 함평천이라는 5개 국가하천과 광주천, 증암천, 영암천 등 지방하천 163개로 구분된다.

2. 조사방법

1) 담수역

영산강 하구언 건설 전・후의 수질 환경 및 식물플랑크톤 군집 변화를 파악하기 위하여 하구언 건설 전에 조사된 자료(류 등 1981)와 하구언 건설 직후에 조사된 자료(Choi and Chung 1985; Choi 1988)를 분석하였다. 자료채집 및 측정방법은 다음과 같다. 하구언 건설 전 자료채집은 1980년 10월부터 12월까지 월별로 실시하였으며, 조사정점은 광주천과 극락강 합류점인 서창교(st.1), 황룡강 하류인 삼양 타이어공장 뒤(st.2), 황룡강과 극락강의 합류점인 광주비행장 뒤(st.3), 구진포(st.4), 나주교 상수 취수장(st.5), 지석강(st.6)으로 영산강 상류부터 중류까지 6개 정점의 표층에서 이루어졌고, 건설 직후에는 1983년 6월부터 1984년 7월까지 월별로 영산강 상류부터 하류까지 4개 정점의 표・저층에서 채집이 실시되었다(Fig. 1A). 하구언 건설 전 자료의 분석항목은 pH, 총질소, 총인이며, pH는 Orion 301 측정장비를 이용하여 측정되었다. 총질소는 Kjeldahl method, Zinc reduction method and G.R. method, 총인은 Stannous chloride method에 준하여 분석되었다(APHA-AWWA-WPCF 1976). 또한, 하구언 건설 직후 조사된 자료의 분석항목은 투명도, 용존산소, 영양염, Chlorophyll-*a*이며, 투명도는 Secchi disk를 이용하였다. 용존산소는 YSI-Model 54A 측정장비를 이용하여, 영양염은 APHA method (1981)에 준하여 측정되었다. 식물플랑크톤 채집은 Muller gauge No.15로서 표층수에서 3분간 수평 채집하였고 5% formalin으로 고정처리 한 후, 침전시켜 0.5 mL씩 농정, 계수하였다.

하구언 건설 후의 최근 수질 환경 자료는 목포해양대학교 연안하구연구센터와 영산강물환경연구소에서 측정하였고, 2006년 1월부터 12월까지 월별로(2, 7, 11월 제외) 영산강 상류부터 하류까지 공간적 분포를 나타낼 수 있는 5개 정점의 표・저층에서 채집하였다(Fig. 1A). 분석항목은 pH, 용존산소, 투명도, 영양염류이며, pH는 Hydrolab, 용존산소는 YSI-Model 85 S-C-T, 투명도는 Secchi

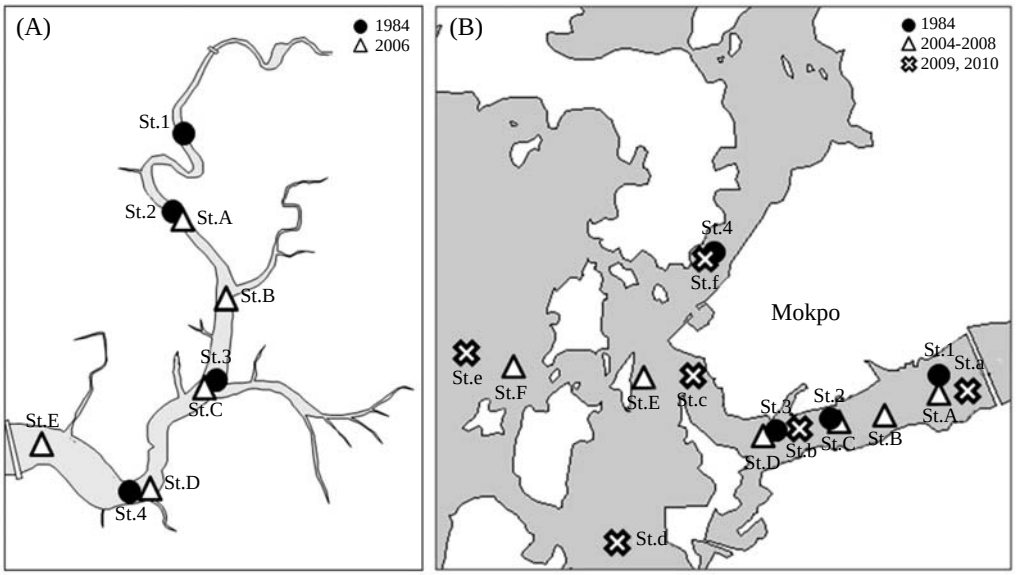

Fig. 1. Sampling stations in the freshwater (A) and seawater (B) zones of the Yeongsan River estuary.

disk를 이용하였다. 영양염인 질산염, 암모늄, 인산염, 총질소, 총인 측정은 수질오염공정시험방법(2001)과 Parsons *et al.* (1984)에 준하여 실시하였다. 식물플랑크톤 군집 구조를 파악하기 위해 연안하구연구센터에서 2006년 10월과 2009년 11월에 중류부터 하류까지 정점 B, D를 제외한 3개 정점의 표층에서 시료를 채집하였다(Fig. 1A). 식물플랑크톤의 계수 및 동정을 위해 3 mL의 Lugol's Solution (Sourinia 1978)을 넣은 1 L 채수병에 표층 시료를 넣어 고정시킨 후 암실에서 48시간 이상 자연 침전시켰다. 침전 후 상등액 800 mL을 제거하고, 여액 200 mL 중 1 mL을 Sedgewick-Rafter Chamber에 넣고 계수하였다. 동정은 영상분석장치시스템을 갖춘 Colored image analyzer를 이용하였다. 또한 동정된 종들을 서식 환경을 크게 담수성, 기수성, 해양성으로 분류하여 분석하였고, 이를 위해 한국 동·식물도감 제9권 식물편(담수조류; 정 1968)과 제34권 식물편(해양식물플랑크톤; 심 1994)을 이용하였다.

2) 해수역

영산강 하구의 해수역에 대한 하구언 건설 전의 자료는 현재까지 보고되지 않았기 때문에 하구언 건설에 따른 영산강 하구의 해수역 수질 환경과 식물플랑크톤 군집 변화를 살펴보기 위하여 하구언 건설 직후인 1984년에 조사된 자료(박 1984)를 분석하였다. 자료는 총 4개 정점(Fig. 1B)의 표·저층에서 1984년 3월부터 5월까지 월별로 채집되었다. 하구언 건설 후인 최근 수질 자료는 연안하구연구센터가 8개 정점에서 2004년부터 2008년(2006년 제외)까지 조사한 결과이고, 1984년 자료와 동일한 시기인 봄철(2004년 4, 5월, 2005년 4월(14일, 29일), 2007년 5월, 2008년 3월)에 측정된 자료를 분석하였다(Fig. 1B). 건설 후의 최근 식물플랑크톤 군집 자료는 연안하구연구센터에서 2009년 5월과 2010년 3월에 영산강 하구 해수역 6개 정점(Fig. 1B)의 표층에서 채집, 동정한 결과이다. 식물플랑크톤 군집에 대한 계수 및 동정은 담수역의 조사와 동일한 방법으로 실시하였다.

3) 통계분석

영산강 하구언 건설 전·후 환경인자들을 통계적으로 비교, 검증하기 위하여 t-test (two-tailed)를 이용하였다.

결 과

1. 담수역

담수역에서 영산강 하구언 건설 전(1980년)과 최근(2006년)의 pH의 변화(Table 1)를 보면, 1980년에 평균이 7.41이었고, 하구언 건설 후인 2006년에는 평균이 7.82로 하구언 건설 후에 pH가 다소 높아진 경향을 보였으며, 최소값과 최대값의 범위도 상대적으로 증가한 것으로 보인다. 전후의 수치를 비교한 결과(t-test), P value가 0.010으로 높은 유의성을 나타내었다. 총질소(total nitrogen)는 1980년에 49.98～1,757.73 μM의 범위를 나타냈고, 평균은 537.88 μM이었다. 2006년에는 85.67～608.28 μM의 범위를 나타냈고, 평균은 265.66 μM으로 하구언

건설 전에 비해 총질소의 농도가 상대적으로 낮아지는 경향을 보였고 이러한 차이는 유의한 것으로 나타났다 (P value=0.013). 총인(total phosphorus)의 경우, 1980년과 2006년에 평균이 각각 2,412.86, 16.17 μM이었으며, 총인 역시 하구언 건설 후에 낮아지는 경향을 보였고 차이 역시 높은 유의성을 나타내었다(P value < 0.0001). 영산강 하구언 건설 직후와 최근의 투명도(transparency) 변화(Table 2)를 보면, 1984년과 2006년에 평균 0.57 m의 분포를 나타냈고, 평균적으로 1984년과 2006년이 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 최저값과 최고값이 2006년에 각각 0.20, 1.20 m로 1984년에 비하여 다소 낮아진 분포를 보였다. 용존산소(dissolved oxygen)는 영산강 하구언 건설 직후인 1984년에 0.90～14.40 mg L^{-1}의 범위를 보였으며, 평균은 8.40 mg L^{-1}의 농도를 나타냈다. 2006년에는 3.67～12.75 mg L^{-1}의 범위를 나타냈고, 평균 7.90 mg L^{-1}의 농도를 보였으며, 투명도와 마찬가지로 1984년에 비하여 2006년에 다소 낮아진 경향을 보였다. 또한 하구언 건설 직후에 용존산소가 거의 혐기성에 가까운 상태를 보인 것으로 나타났다. 용존무기질소인 질산염(nitrate)은 1984년과 2006년에 각각 평균 127.80, 122.08 μM의 분포를 보였고, 평균적으로 큰 차이를 보이지 않았다. 이에 반해 암모늄(ammonia nitrogen)은 1984년과 2006년에 평균이 각각 26.42, 52.83 μM로 나타나 최근(2006년)에 암모늄이 증가하는 형태를 보였으며, 조사기간 중 최고농도 역시 각각 96.38, 393.38 μM로 2006년에 매우 높은 농도로 검출되었다. 인산염(phosphate)은 암모늄과 달리, 1984년에 4.84～39.71 μM의 범위를 보인 반면, 2006년에는 0.03～12.59 μM로 낮은 범위를 나타냈다. 1984년과 2006년에 최저 농도와 최고 농도를 비교해보면, 1984년에 비하여 2006년 인산염의 농도가 뚜렷하게 낮아지는 경향을 보였다. 평균값 역시 1984년과 2006년에 각각 8.39, 3.23 μM의 분포를 보이면서 1984년에 비하여 2006년에 낮아진 결과를 나타냈다. 식물플랑크톤 생체량의 간접적 지표인 클로로필(chlorophyll-*a*)의 경우에는 1984년에 0.12～11.32 μg L^{-1}의 범위를 보였으며, 평균 2.19 μg L^{-1}의 분포를 나타냈다. 2006년에는 평균이 14.99 μg L^{-1}로 최근(2006년)에 식물플랑크톤 생체량이 뚜렷하게 증가하는 것으로 나타났다. 이는 암모

Table 1. Mean (range) of freshwater properties and the P value from two-tailed t-test analysis during the study period in 1980 (n=18) and 2006 (n=78)

Year/ P value	Properties		
	pH	Total nitrogen (μM)	Total phosphorus (μM)
1980	7.41 (6.90～9.10)	537.88 (49.98～1757.73)	2411.86 (98.15～5141.73)
2006	7.82[a] (6.56～9.43)	265.66 (85.67～608.28)	16.17 (0.646～126.88)
P value	0.010	0.013	8.06E～06

[a]: n=84

Table 2. Mean (range) of freshwater properties during the study period in 1984 and 2006

Year	Properties					
	Secchi disk (m)	Dissolved oxygen (mg L^{-1})	Nitrate (μM)	Ammonia nitrogen (μM)	Phosphorus (μM)	Chlorophyll-*a* (μg L^{-1})
1984	0.57 (0.25～1.80)	8.40 (0.90～14.40)	127.80 (22.13～367.68)	26.42 (2.86～96.38)	8.39 (4.84～39.71)	2.19 (0.12～11.32)
2006	0.57 (0.20～1.20)	7.90 (3.67～12.75)	122.08 (0.714～321.99)	52.83 (0.071～393.38)	3.23 (0.03～12.59)	14.99 (1.24～63.01)

Table 3. Mean (range) of seawater properties and the P values of two-tailed t-test analysis during the study period in 1984 (n=12) and 2004～2008 (surface n=47, bottom n=48)

Year/ P value	Secchi disk (m)	Properties							
		Dissolved oxygen (mg L^{-1})		Nitrite+Nitrate (μM)		Ammonium (μM)		Phosphorus (μM)	
		Surface	Bottom	Surface	Bottom	Surface	Bottom	Surface	Bottom
1984	2.03 (0.50～3.30)	7.24 (5.95～8.82)	6.96 (5.22～8.98)	0.205 (0.01～0.90)	0.138 (0.014～0.578)	0.123 (0.02～0.49)	0.084 (0.02～0.20)	0.016 (0.006～0.037)	0.019 (0.004～0.045)
2004～2008	1.76 (0.75～3.20)	8.44 (6.06～12.54)	6.88 (3.48～9.18)	0.97 (0.07～4.26)	0.55 (0.068～1.310)	0.36 (0.001～1.89)	0.26 (0.001～0.83)	0.008 (0.001～0.043)	0.012 (0.001～0.077)
P value	0.345	0.002	0.825	1.82E-05	9.72E-08	0.001	6.23E-06	0.017	0.115

늄이 증가하는 경향과 유사한 결과라 할 수 있다.

담수역에서 하구언 건설 전인 1980년의 종조성을 살펴보면, 규조류 25종(41.7%), 녹조류 25종(41.7%), 남조류 10종(16.7%)으로 분류되어(Table 4) 총 60종이 동정되었으며(Table 5), 남조류인 *Microcystis aeruginosa*가 우점한 것으로 나타났다. 또한 서식환경에 따른 분류에서는 기수종 6종(11.1%), 담수종 47종(87.0%), 해수종 1종(1.9%)으로 담수종이 우세적으로 출현하였다. 하구언 건설 후인 2006년과 2009년의 종조성은 규조류 24종(52.2%), 녹조류 7종(15.2%), 남조류 4종(8.7%), 은편모조류 4종(8.7%), 황색편모조류 1종(2.2%), 와편모조류 1종(2.2%), 유글레나류 4종(8.7%)으로 총 46종이 동정되었으며(Tables 4, 5), 2006년에는 남조류인 *Oscillatoria* sp., 2009년에는 은편모조류인 *Teleaulax acuta*가 우점종으로 출현하였다(Fig. 2 참조). 강(Class) 수준의 분류군수는 건설 전의 3강에서 7강으로 증가하였지만 분류군에 속하는 전체 종수는 건설 전(60종)보다 감소하였다. 특히 남조류의 출현종수는 1980년에 비해 상당히 감소하는 경향을 보였다. 서식환경에 대한 분류에서는 기수종 9종(20.9%), 담수종 29종(67.4%), 해수종 5종(11.6%)으로 담수종이 우세적이나 건설 전인 1980년에 비해 담수종의 종수 비율이 감소하고 기수종이나 해수종의 종수 비율이 오히려 증가한 것으로 나타났다. 하구언 건설 전(1980)과 후(2006, 2009)의 출현종 중에서 공통으로 출현한 종을 살펴보면(Table 5), 규조류인 *Aulacoseira granulate*, *Cymbella tumida*, *Fragilaria construens*, *Navicula* sp., *Nitzschia* sp., *Synedra ulna*, 녹조류인 *Dictyosphaerium pulchellum*, *Pediastrum duplex*, 남조류인 *Microcystis aeruginosa*로 나타났고 나머지 종들은 1980년과 2006년 사이에 사라졌거나 추가적으로 동정되었다.

Table 4. Phytoplankton communities appeared in the freshwater zones of the Yeongsan River estuary in 1980 and 2006, 2009

Division	1980		2006, 2009	
	Number of species	%	Number of species	%
Bacillariophyceae	25	41.7	24	52.2
Chlorophyceae	25	41.7	7	15.2
Cyanophyceae	10	16.7	4	8.7
Cryptophyceae			4	8.7
Chrysophyceae			1	2.2
Dinophyceae			1	2.2
Euglenophyceae			4	8.7
Others			1	2.2
Total	60	100.0	46	100.0

2. 해수역

해수역에서 투명도(transparency)는 영산강 하구언 건설 직후인 1984년에 평균이 2.03 m이었고(Table 3), 최근 자료에서는 평균이 1.76 m로 나타나 1984년에 비하여 최근의 투명도가 낮게 분포하는 것을 확인할 수 있었다. 용존산소(dissolved oxygen)는 1984년에 표층과 저층에서 각각 평균 7.24, 6.96 mg L^{-1}의 분포를 보였으며, 최근의 자료에서는 표층과 저층에서 평균이 각각 8.44, 6.88

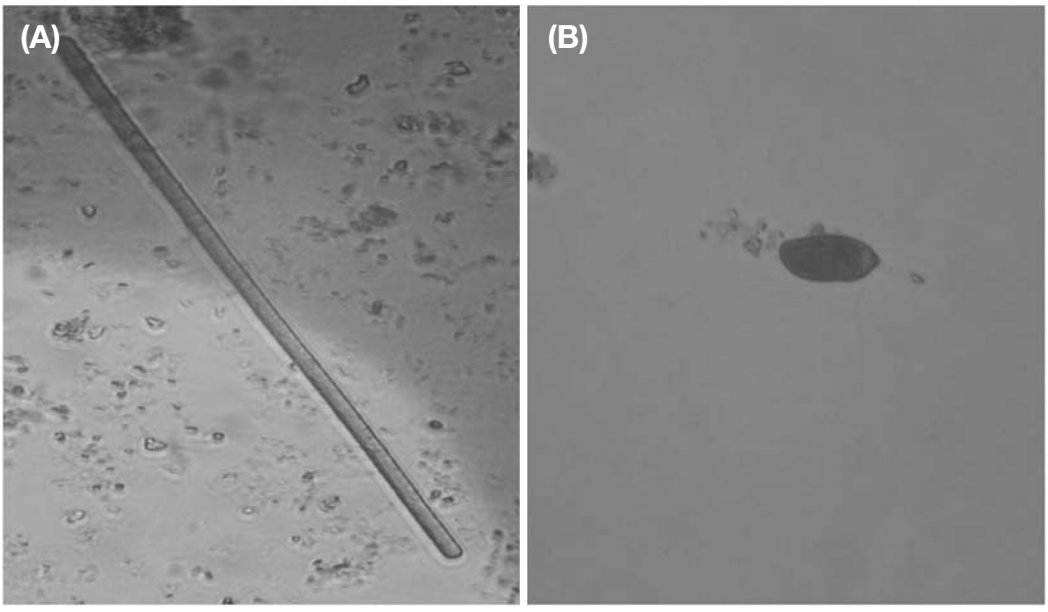

Fig. 2. Dominant species appeared in the freshwater zones of the Yeongsan River estuary: *Oscillatoria* sp. (A), *Teleaulax acuta* (B).

Table 5. List of phytoplankton species appeared in the freshwater of the Yeongsan River estuary in 1980 and 2006, 2009

	Phytoplankton species	1980	2006, 2009	Habitats
Bacillariophyceae	*Asterionella formosa*		✓	○
	Asterionella gracillima	✓		○
	Aulacoseira distans	✓		○
	Aulacoseira granulata	✓	✓	○
	Aulacoseira italica	✓		○
	Aulacoseira sp.		✓	○
	Bacillaria paradoxa	✓		△
	Biddulphia sp.		✓	△
	Cocconeis Placentula		✓	○
	Coscinodiscus sp.		✓	△
	Cyclotella meneghiniana		✓	△
	Cyclotella stelligera		✓	△
	Cymbella tumida	✓	✓	○
	Ditylum brightwellii		✓	●
	Fragilaria brevistriata		✓	○
	Fragilaria construens	✓	✓	○
	Fragilaria crotonensis	✓		○
	Fragilaria sp.	✓		△
	Frustulia rhomboides	✓		○
	Gomphonema olivaceum	✓		○
	Gyrosigma sp.	✓		△
	Leptocylindrus sp.		✓	△
	Navicula cryptocephala	✓		○
	Navicula exigua	✓		○
	Navicula placentula	✓		○
	Navicula sigma		✓	–
	Navicula sp.	✓	✓	●
	Nitzschia amphibia	✓		○
	Nitzschia commutata	✓		○
	Nitzschia scalaris	✓		△
	Nitzschia sigma		✓	△
	Nitzschia sp.	✓	✓	△
	Pinnularia sp.		✓	○
	Rhizosolenia sp.		✓	●
	Rhoicosphenia curvata	✓		○
	Rhopalodia gibba	✓		○
	Surirella robusta	✓		○
	Surirella sp.		✓	△
	Synedra acus		✓	○
	Synedra tabulata	✓		△
	Synedra ulna	✓	✓	○
	Thalassiosira eccentrica		✓	●
	Thalassiosira sp.		✓	●
Chlorophyceae	*Actinastrum hantzschii*	✓		○
	Ankistrodesmus fusiformis		✓	○
	Asterococcus limneticus	✓		○
	Characium linmeticum	✓		○
	Closterium acerosum	✓		○
	Closterium intermedium	✓		○
	Coccomyxa lacustris	✓		–
	Coelastrum microporum		✓	○
	Coelastrum sp.	✓		○
	Coleochaete soluta	✓		○
	Dictyosphaerium pulchellum	✓	✓	○
	Dimorphococcus lunatus	✓		○
	Gloeocystis gigas	✓		○
	Kirchneriella lunaris	✓		○
	Micractinium pusillum		✓	○
	Pediastrum duplex	✓	✓	○
	Pediastrum simplex	✓		○
	Scenedesmus acuminatus		✓	○
	Scenedesmus bijuga	✓		○
	Scenedesmus opoliensis		✓	○
	Scenedesmus quadricauda	✓		○
	Schroederia setigera	✓		○
	Selenastrum gracile	✓		○

Table 5. Continued

	Phytoplankton species	1980	2006, 2009	Habitats
Chlorophyceae	*Sphaerocystis schroteri*	✓		○
	Spirogyra sp.	✓		○
	Staurastrum gracile	✓		○
	Staurastrum gracile leptocladum	✓		○
	Staurastrum sp.	✓		○
	Stigeoclonium lubricum	✓		○
	Ulothrix aequalis	✓		○
Chrysophyceae	*Mallomonas* sp.		✓	○
Cryptophyceae	*Chroomonas* sp.		✓	○
	Cryptomonas erosa		✓	○
	Cryptomonas sp.		✓	○
	Teleaulax acuta		✓	−
Cyanophyceae	*Anabaena* sp.	✓		○
	Anabaena spiroides	✓		○
	Aphanocapsa elachista	✓		−
	Aphanocapsa rivularis	✓		−
	Aphanothece saxicola	✓		−
	Aphanothece sp.	✓		−
	Gloeotrichia echinulata	✓		−
	Lyngbya contorta	✓		○
	Merismopedia punctata		✓	○
	Microcystis aeruginosa	✓	✓	○
	Microcystis wesenbergii		✓	○
	Oscillatoria sp.		✓	△
	Oscillatoria tenuis	✓		○
Dinophyceae	*Ceratium hirundinella*		✓	○
Euglenophyceae	*Euglena agilis*		✓	○
	Euglena oxyuris		✓	○
	Euglena sp.		✓	○
	Phacus sp.		✓	○
Others (unidentified)			✓	

○: Freshwater, △: Brackish, ●: Marine, −: Unclassified

mg L^{-1}로 나타났다. 1984년, 최근의 두 기간 동안 표층 용존산소는 유의한 차이를 보였다(P value=0.002). 저층에서 용존산소의 최저농도는 하구언 건설 직후에 5.22 mg L^{-1}이었지만 최근에는 3.48 mg L^{-1}로 측정되어 하구언 건설 직후에 비하여 최근 영산강 하구 해수역의 용존산소 농도가 낮은 지역이 간헐적으로 형성되는 것으로 나타났다. 아질산염+질산염(nitrite+nitrate)의 경우, 1984년 표층에서 0.01～0.90 μM의 범위에서 평균 0.205 μM의 분포를 보였고, 저층에서는 0.014～0.578 μM의 범위에서 평균 0.138 μM로 측정되었다. 최근에는 표층과 저층에서 평균이 각각 0.97, 0.55 μM으로 1984년에 비하여 매우 높은 농도를 보였고, 실제 통계분석 결과에서도 그 차이가 유의한 것으로 나타났다(P value＜0.0001). 암모늄(ammonia nitrogen)은 1984년 표층과 저층에서 평균이 각각 0.123, 0.084 μM로 나타났고, 최근 자료에서는 각각 0.36, 0.26 μM의 농도를 보여 역시 유의한 차이를 보였다(표층: P=0.001, 저층: P＜0.0001). 질산염+아질산염 분포와 유사하게 암모늄 또한 최근에 매우 높은 농도값을 보였다. 인산염(phosphate)은 1984년 표층과 저층에서 각각 0.016, 0.019 μM로 나타났고, 최근에는 각각 0.008, 0.012 μM의 분포를 보이면서 질소계열의 영양염과는 달리 인산염이 최근에 다소 낮아지는 경향을 나타냈고 표층에서 유의한 차이를 보였다(P=0.017).

Table 6. Phytoplankton Communities appeared in the seawater of the Yeongsan River estuary in 1984 and 2009, 2010

Division	1984		2009, 2010	
	Number of species	%	Number of species	%
Bacillariophyceae	52	88.1	51	69.9
Chlorophyceae	1	1.7	5	6.8
Cyanophyceae			2	2.7
Cryptophyceae			2	2.7
Dinophyceae	6	10.2	11	15.1
Euglenophyceae			1	1.4
Other			1	1.4
Total	59	100.0	73	100.0

해수역에서 하구언 건설 직후인 1984년의 출현종은,

Table 7. List of phytoplankton species appeared in the seawater of the Yeongsan River estuary in 1984 and 2009, 2010

	Phytoplankton species	1984	2009, 2010	Habitats
Bacillariophyceae	*Achnanthes longipes*		✓	●
	Actinoptychus octonarius		✓	●
	Amphiprora sp.	✓		△
	Asterionella formosa		✓	△
	Asterionella glacialis		✓	●
	Asterionella japonica	✓		△
	Asterionella karina	✓		–
	Aulacoseira sp.		✓	○
	Aulacoseira sulcata	✓		○
	Bacillaria paradoxa	✓		△
	Bacteriastrum comosum		✓	△
	Bacteriastrum hyalinum		✓	△
	Biddulphia longicruris	✓		△
	Biddulphia mobiliensis	✓		●
	Caloneis sp.		✓	△
	Chaetoceros affinis		✓	△
	Chaetoceros brevis		✓	△
	Chaetoceros compressus	✓		△
	Chaetoceros curvisetus	✓	✓	△
	Chaetoceros danicus		✓	△
	Chaetoceros debilis	✓		△
	Chaetoceros decipiens	✓	✓	△
	Chaetoceros eibenii		✓	●
	Chaetoceros gracile		✓	●
	Chaetoceros lorenzianus		✓	●
	Chaetoceros muelleri	✓		△
	Chaetoceros socialis		✓	●
	Chaetoceros sp.	✓		△
	Chaetoceros teres		✓	△
	Chaetoceros tortissimus	✓		△
	Coscinodiscus excentricus	✓		△
	Coscinodiscus marginatus		✓	△
	Coscinodiscus radiatus	✓		△
	Coscinodiscus sp.	✓	✓	△
	Coscinodiscus stellaris		✓	△
	Coscinodiscus vivante		✓	–
	Cyclotella glomerata		✓	–
	Cyclotella sp.		✓	△
	Cylindrotheca closterium		✓	△
	Cylindrotheca fusiformis		✓	–
	Cymbella sp.	✓		○
	Detonula pumila	✓		●
	Diploneis splendica	✓		△
	Ditylum brightwellii		✓	●
	Ditylum broughtonii	✓		–
	Ditylum sol	✓		●
	Epitheca sp.	✓		–
	Eucampia zodiacus	✓	✓	△
	Guinardia flaccida		✓	△
	Gyrosigma fasciola	✓		●
	Leptocylindrus danicus	✓	✓	○
	Licmophora abbreviata	✓		△
	Lithodesmium undulatum	✓		●
	Navicula cancellata	✓		△
	Navicula distans	✓		●
	Navicula sp.	✓		△
	Nitzschia closterium	✓	✓	○
	Nitzschia longissima	✓		△
	Nitzschia longissima var. *reversa*	✓		△
	Nitzschia pacifica	✓		●
	Nitzschia palea		✓	○
	Nitzschia pungens var. *atlantica*	✓		●

Table 7. Continued

	Phytoplankton species	1984	2009, 2010	Habitats
Bacillariophyceae	*Nitzschia seriata*	✓	✓	△
	Nitzschia sigma	✓	✓	△
	N*itzschia sigma* var. *intermedia*	✓		△
	Nitzschia sp.		✓	△
	Odontella aurita		✓	●
	Pleurosigma angulatum	✓	✓	△
	Pleurosigma intermedium	✓		●
	Pleurosigma sp.	✓		△
	Rhizosolenia alata		✓	△
	Rhizosolenia hebetata	✓		△
	Rhizosolenia setigera	✓		△
	Rhizosolenia sp.		✓	△
	Rhizosolenia stolterfothii		✓	△
	Skeletonema costatum	✓	✓	△
	Stephanopyxis turris		✓	△
	Synedra ulna	✓		○
	Thalassionema nitzschioides	✓	✓	●
	Thalassionema sp.		✓	●
	Thalassiosira aestivalis	✓	✓	●
	Thalassiosira anguste		✓	●
	Thalassiosira baltica	✓	✓	△
	Thalassiosira condensata	✓		△
	Thalassiosira hyalina		✓	△
	Thalassiosira pacifica	✓		△
	Thalassiosira rotula	✓	✓	△
	Thalassiosira sp.		✓	△
	Thalassiothrix sp.		✓	△
Chlorophyceae	*Closterium* sp.	✓		○
	Cosmarium sp.		✓	○
	Dictyosphaerium pulchellum		✓	○
	Scenedesmus quadricauda		✓	○
	Staurastrum rotula		✓	−
	Volvox aureus		✓	○
Cryptophyceae	*Chroomonas* sp.		✓	○
	Cryptomonas sp.		✓	○
Cyanophyceae	*Microcystis* sp.		✓	○
	Microcystis wesenbergii		✓	○
Dinophyceae	*Alexandrium catenella*		✓	●
	Alexandrium sp.		✓	●
	Amphidinium sp.		✓	●
	Ceratium furca		✓	●
	Dinophysis rotundata		✓	○
	Fragilidium sp.		✓	△
	Glenodinium sp.		✓	△
	Gymnodinium sp.		✓	●
	Gyrodinium sp.		✓	●
	Noctiluca scintillans	✓		●
	Oxyrrhis marina		✓	●
	Protoperidinium bipes	✓		●
	Protoperidinium cerasus	✓		●
	Protoperidinium marielebouriae	✓		●
	Protoperidinium sp.		✓	●
	Protoperidinium subinerme	✓		●
	Taradinium orientale	✓		−
Euglenophyceae	*Trachelomonas* sp.		✓	○
Others (unidentified)			✓	

○: Freshwater, △: Brackish, ●: Marine, −: Unclassified

규조류 52종(88.1%), 녹조류 1종(1.7%), 와편모조류 6종(10.2%)으로 총 59종이었고(Tables 6, 7), 서식환경에 따른 분류에서는 기수종 33종(60.0%), 담수종 6종(10.9%), 해수종 16종(29.1%)으로 기수종이 우세적으로 출현하였다. 하구언 건설 후인 2009년과 2010년에는 규조류 51종(69.9%), 녹조류 5종(6.8%), 남조류 2종(2.7%), 은편모조류 2종(2.7%), 와편모조류 11종(15.1%), 유글레나류 1종(1.4%)으로 총 73종이 동정되어 담수역과는 상이하게 하구언 건설 전보다 출현 종수와 분류군(강)수가 증가한 것으로 나타났다. 특히 건설 직후에는 출현하지 않았던 남조류, 은편모조류, 유글레나 등의 종들이 최근 추가적으로 동정되었다(Table 6). 서식환경은 기수종 33종(48.5%), 담수종 14종(20.6%), 해수종 21종(30.9%)으로 분류되어 건설 전보다 담수종과 해수종의 출현수가 증가하였다. 하구언 건설 직후와 건설 후에 공통적으로 출현했던 종은 *Chaetoceros curvisetus*, *Chaetoceros decipiens*, *Coscinodiscus* sp., *Eucampia zodiacus*, *Leptocylindrus danicus*, *Nitzschia seriata*, *Nitzschia sigma*, *Pleurosigma angulatum*, *Skeletonema costatum*, *Thalassionema nitzschioides*, *Thalassiosira aestivalis*, *Thalassiosira baltica*, *Thalassiosira rotula* 등의 규조류들이었다(Table 7). 우점종의 변화를 살펴보면, 하구언 건설 직후인 3월과 4월에는 규조류인 *Thalassiosira pacifica*, 5월에는 *Nitzschia pacifica*가 우점하였고, 하구언 건설 후인 2009년에는 남조류인 *Microcystis* sp., 2010년에는 은편모조류인 *Chroomonas* sp.로 우점종이 변화하는 분포를 보였다.

고 찰

하구에서 식물플랑크톤의 크기구조나 종조성은 환경오염에 대한 수질이나 물리적 환경 변화를 규명하는 데 필요한 정보를 제공해 주는데 그 이유는 환경변화에 대한 식물플랑크톤의 반응은 크기나 종에 따라 다르게 나타나기 때문이다(Sin *et al.* 2000; Chan *et al.* 2002; Lassen *et al.* 2004; Nayar *et al.* 2005; Totti *et al.* 2005; Alvarez-Gongora and Herrera-Silveira 2006; Gobler *et al.* 2006). 하구언 건설 이후 영산강 하구는 해수면이 상승하고 조석형태가 변화하여 해안의 홍수 가능성이 높아졌고(Byun *et al.* 2004; Kang *et al.* 2009), 유속의 감소로 오염물질의 확산이나 퇴적상의 변화가 예상된다고 보고된 바 있다(강과 임 1998). 또한 자연 하구의 이중층이 나타나는 하구 순환대신 해수역에서 여름철 동안 4개의 수괴가 존재하는 다중층의 형성에 대해서도 보고되었다(Cho *et al.* 2004). 이러한 영산강 하구 순환의 변형은 하구의 수질이나 식물플랑크톤 군집에도 영향을 미칠 것으로 예상 되는데 실제로 본 연구결과에서 그러한 영향을 확인할 수 있었다. 건설 전·후로 담수역에서는 통계적으로 유의하게 pH가 증가하였고, 건설 직후보다 최근 암모늄(ammonia nitrogen), chlorophyll-*a* 등의 평균치가 증가한 것으로 나타났다. 남조류는 알칼리성조건에서 높은 생장율을 보이며, 산성상태에서 생장이 억제된다고 알려져 있다(Coleman and Colman 1981). 실제로 평균 pH가 7.41에서 7.82로 상승하는 분포를 나타냄으로써, 2006년에 남조류인 *Oscillatoria* sp.가 우점할 수 있는 조건중의 하나로 작용했을 가능성도 있다고 본다. 총질소(total nitrogen), 총인(total phosphorus), 용존산소(dissolved oxygen), 질산염(nitrate), 인산염(phosphate) 등이 감소한 것으로 나타났다. 특히 용존산소는 하구언 건설 직후(1984)에 최소값이 0.90 mg L^{-1}로 일시적일 수 있지만 거의 혐기성 환경이 형성되었던 것으로 나타났다. 동일한 시기에 chlorophyll-*a*가 높지 않고, 수온이 높은 여름철이 지난 가을철이었음을 고려할 때 식물플랑크톤의 대증식 보다는 염분의 갑작스런 감소로 인하여 해양생물들이 폐사하고 이로 인한 유기물 공급이 빈산소층 형성에 기여했을 것으로 사료된다. 최근 하구언이 건설된 새만금 담수역에서도 물막이 공사완료 직후에 이러한 빈산소층이 형성된 것으로 보고되었다(박 등 2009). 한편 하구언 건설 직후에는 높지 않던 chlorophyll-*a* 농도가 최근에 최대 63.01 μg L^{-1}까지 증가하였는데 이는 영양염인 암모늄의 증가와 연관이 있을 수 있다. 하지만 식물플랑크톤 생체량 증가 원인에 대한 정확한 해석을 위해서는 향후 더 많은 환경인자들에 대한 종합적으로 고려가 추가적으로 필요할 것으로 사료된다. 생체량뿐만 아니라 식물플랑크톤의 종조성도 하구언 건설 이후에 상당히 변한 것으로 나타났다. 새로운 분류군이 동정되기는 했지만 종수는 60종에서 46종으로 감소하였고, 건설전과 후에 공통적으로 동정된 종은 9종에 불과하고 나머지는 새롭게 동정된 종들이었다. 또한 담수종의 종수가 오히려 감소하여 환경변화가 일부 특정 종들의 성장에 호조건으로 작용했을 가능성을 제시하고 있다. 환경변화에 따른 일부 종들의 우점은 여러 하구에서 보고된 바 있다(Lassen *et al.* 2004; Nayar *et al.* 2005; Alvarez-Gongora and Herrera-Silveira 2006; Gobler *et al.* 2006). 특히 하구언 건설 전에는 출현하지 않았던 규조류인 *Stephanodiscus* sp.는 하구언 건설 후인 1995년 12월부터 1996년 4월까지인 겨울, 봄철에 우점 또는 차우점종으로 동정되었다(김 2003). 이들은 낙동강에서도 유사한 시기에 우점하는 것으로 나타났는데 수온이나 부영양화가 대증식에 영향을 주는 것으로 보고되었다(박 등 1999).

해수역에서는 표층의 인산염이 감소하고 표층의 용존산소, 질소성 영양염 등이 통계적으로 유의하게 증가한 것으로 나타났고, 용존산소의 경우 저층의 최소값이 하구언 건설 직후에 비해 감소한 것으로 조사되었다. 국가해양환경측정망의 장기동향을 살펴본 결과, 역시 질산염+아질산염, 암모늄이 최근에 증가하는 같은 경향을 나타냈다(김과 이 2011). 식물플랑크톤의 종조성은 건설전의 자료가 보고되지 않아 직접적인 비교가 힘들지만 직후의 자료와의 비교 결과에서는 최근에 종수가 증가하는 것으로 나타났다. 권 등(2009)의 조사에 따르면, 하구언 건설 후인 2008년 5월에도 역시 규조류 30종(73.2%), 와편모조류 9종(22.0%), 유글레나류 1종(2.4%), 은편모조류 1종(2.4%)으로 건설 직후에 비하여 4개의 분류군이 출현함으로써 종 구성이 다양해지는 결과를 보였다. 하구언 수문이 폐쇄된 상태에서는 해양환경을 유지하다, 수문 개방시에는 담수가 해수역으로 유입되면서 해역의 염분이 급감하고, 담수종이나 기수종들이 증식할 수 있는 환경을 조성하기 때문에 담수, 기수종의 종수가 증가했을 것으로 예상된다. 수문 개방으로 인한 담수 유입이 해수역의 수질과 식물플랑크톤에 미치는 영향은 낙동강이나 아산만과 같은 하구에서도 보고된 바 있다(양 등 2001; Sin *et al.* 2011). 또한 담수종인 남조류 *Microcystis* sp.가 해수역에서 우점한 것은 높은 pH에서 성장하는 특성(하 등 2002)과 연관이 있을 것으로 사료된다. 실제로 조사 시기에 pH가 평균 8.5의 높은 분포를 나타냄으로써, *Microcystis* sp.가 우점할 수 있는 적합한 환경이 형성되었을 것으로 판단된다. 하지만 일부 종들의 경우, 담수종, 기수종, 해수종 분류가 쉽지 않아 담수 유입에 대한 종들의 반응을 해석하는 데 유의할 필요가 있으며, 영산강 하구 해수역에서 이들 담수 유입이 최종적으로 미치는 구체적인 기작에 대해서는 추가적인 조사가 필요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 하구언 건설 전이나 직후의 자료를 수집하고 분석하여 최근에 조사된 식물플랑크톤 종조성과 관련 환경인자들에 대한 자료와 비교함으로써 하구언 건설에 따른 변화를 분석하였다. 기후 변화로 인한 영향이 고려되지 않았고, 종 동정 전문성, 환경인자들에 대한 측정방법이나 장비 등이 상이하여 측정치(특히 detection limit)가 다를 수 있는 한계도 있으며, 비교를 위한 자료의 양도 많지 않아 상대적으로 정확한 기작을 규명하기에는 제한이 있을 것으로 판단된다. 하지만 하구언의 건설 전・후의 식물플랑크톤 군집이나 환경변화를 확인하고 검토함으로써 향후 영산강 하구의 수질 및 생태계 관리나 복원에 참고할 정보를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

적 요

서남해에 위치한 영산강 하구는 1981년 12월에 하구언이 건설되기 전까지 전형적인 하구의 모습을 보였다. 하지만 하구언이 건설되면서 수질뿐만 아니라 식물플랑크톤이나 동물플랑크톤과 같은 부유생물들의 생물상들도 변화를 나타낼 것으로 예상된다. 따라서 기존에 보고된 자료와 최근 채집한 현장조사 자료를 토대로 식물플랑크톤 군집과 식물플랑크톤 관련 환경인자들의 변화를 조사하였다. 하구언 건설 직후(1984년)의 환경 자료와 최근 자료를 비교 검토한 결과, 담수역에서는 암모늄이 증가하였고, 해수역에서는 표층 용존산소, 아질산염+질산염, 암모늄 농도가 증가하였고 표층 인산염은 감소한 것으로 나타났다. 식물플랑크톤 군집의 경우, 담수역에서 하구언 건설 전(1980)보다 최근에 출현한 군집이 다양해졌고, 녹조류의 종수가 감소하였다. 해수역에서는 하구언 건설 직후(1984)보다 최근에 출현한 규조류의 종수가 감소하였고 녹조류나 와편모조류 등의 종수는 상대적으로 증가하였다. 하구언 건설 전・후에 공통적으로 출현했던 종은 소수로 최근에 새로운 종들이 동정된 것으로 나타났다. 영산강 하구언 건설 전・후의 식물플랑크톤 군집 변화에 대한 조사 결과는 아직까지 보고된 바가 없어, 본 논문의 연구결과는 향후 영산강 하구 생태계를 이해하고 관리하는 데 필요한 정보 및 자료를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

This research was a part of the project entitled “Development of Integrated Estuarine Management System” funded by the Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Korea. This project was also supported by Honam Sea Grant R & D Program fund of (2007).

참 고 문 헌

강주환, 송재준, 오남선. 1998. 낙조우세와 관련된 목포해역의 조류특성 분석. 대한토목공학회. 18:185-193.

강주환, 임병선. 1998. 방조제 건설로 인한 목포해역에서의 오염확산양상 변화. 대한토목학회논문집. 18:613-622.

권기영, 윤석현, 이재성. 2009. 영산강 하구역 식물플랑크톤의 시공간적 변동. 해양환경안전학회. 6:149-150.

김대호, 이희진. 2011. 목포 인근해역의 담수유입에 따른 해

수 환경인자의 변화: 장기자료 분석. 학사학위논문. 목포해양대학교. 목포. 37pp.
김용재. 2003. 영산강의 식물플랑크톤 군집 동태. Algae. 18: 207-215.
류일광, 이치영, 김병환, 강영식. 1981. 영산강의 수질오염에 관한 연구. 광주 보건전문대학 논문집. 6:21-32.
박경양. 1984. 목포만의 봄철 식물성 플랑크톤에 대하여. Mokpo National College. 1:57-65.
박래환, 조양기, 조 철, 선영종, 박경양. 2001. 2000년 여름 영산강 하구의 해수 특성과 순환. 한국해양학회지: 바다. 6:218-224.
박준건, 김은수, 김경태, 조성록, 송태윤, 유정규, 김성수, 박용철. 2009. 방조제 건설에 따른 새만금 표층 유기탄소 분포 특성. 한국해양환경공학회지. 12:75-83.
박홍기, 정종문, 박재림, 홍용기. 1999. 낙동강 하류에서 식물플랑크톤 생산력과 수질 변화와의 관계. 한국환경과학회지. 18:101-106.
심재형. 1994. 한국동식물도감. 제34권: 식물편(해양식물플랑크톤), 교육부, 472 pp.
양성렬, 송환석, 문창호, 권기영, 양한섭. 2001. 낙동강 하구역의 담수유입에 따른 해양환경 및 일차생산력 변화. Algae. 16:165-177.
정영호. 1968. 한국동식물도감. 제9권: 식물편(담수조류), 문교부, 573 pp.
하 경, 장민호, 정광석, 박재림, 주기재. 2002. pH, 영양염류 농도 및 빛이 *Microcystis bloom*의 초기단계에 미치는 영향. 한국환경과학회지. 11:705-711.
환경부. 2001. 수질오염공정시험방법.
Alvarez-Gongora C and JA Herrera-Silveira. 2006. Variations of phytoplankton community structure related to water quality trends in a tropical karstic coastal zone. Mar. Pollut. Bull. 52:48-60.
APHA-AWWA-WPCF. 1976. Standard Method for the examination of water and Wastewater. 14th Ed. Washington DC. 406, 407, 422, 460, 466 and 543 pp.
Association of National Estuary Programs (ANEP). 1998. Preserving Our Heritage, Securing Our Future: A Report to the Citizens of the Nation. Washington DC: ANEP. 49 pp.
Boynton WR, WM Kemp and CW Keefe. 1982. A comparative analysis of nutrients and other factors influencing estuarine phytoplankton production. pp.69-90. In Estuarine Comparisons (Kennedy V ed.). Academic Press. USA.
Byun D, XH Wang and PE Holloway. 2004. Tidal characteristic adjustment due to dyke and seawall construction in the Mokpo Coastal Zone. Korea. Estuar. Coast. Shelf Sci. 59:185-196.
Chan TU, DP Hamilton, BJ Robson, BR Hodges and C Dallimore. 2002. Impacts of hydrological changes on phytoplankton succession in the Swan River. Western Austraila. Estuaries. 25:1406-1415.
Cho Y, L Park, C Cho, I Lee, K Park and C Oh. 2004. Multilayer structure in the Youngsan Estuary. Korea. Estuar. Coast. Shelf Sci. 61:325-329.
Choi C. 1988. Limnological studies of Lake Yongsan, Korea: II. Nutrient, plant pigment contents and primary productivity of a newly formed lake in an estuary. Kor. J. Limnol. 21:181-192.
Choi C and Y Chung. 1985. Limnological studies on Lake Yongsan, Korea: I. General consideration and some physical conditions of a newly formed lake in an estuary. Kor. J. Limnol. 18:15-26.
Coffin RB and JH Sharp. 1987. Microbial trophodynamics in the Delaware Estuary. Mar. Ecol. Prog. Ser. 41:253-266.
Coleman JR and B Colman. 1981. Inorganic Carbon Accumulation and Photosynthesis in a Blue-Green Alga as a Function of External pH. Plant Physiol. 67:917-921
Costanza R, R d'Arge, R de Groot, S Farber, M Grasso, B Hannon, K Limburg, S Naeem, RV O'Neill, J Paruelo, RG Raskin, P Sutton and M van den Belt. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature. 387:253-260.
Froneman PW, EA Pakhomov and MG Balarin. 2004. Size-fractionated phytoplankton biomass, production and biogenic carbon flux in the eastern Atlantic sector of the Southern Ocean in late austral summer 1997-1998. Deep-Sea Res. 51:2715-2729.
Gobler CJ, NJ Buck, ME Sieracki and SA Sanudo-Wilhelmy. 2006. Nitrogen and silicon limitation of phytoplankton communities across an urban estuary: The East River-Long Island sound system. Estuar. Coast. Shelf Sci. 68:127-138.
Kang J, S Moon, S Park and K Lee. 2009. Analyzing sea level rise and tide characteristics change driven by coastal construction at Mokpo Coastal Zone in Korea. Ocean Eng. 36:415-425.
Kemp WM and WR Boynton. 1981. External and internal factors regulating metabolic rates of an estuarine benthic community. Oecologia. 51:19-27.
Lassen MF, ME Bramm, K Richardson, F Yusoff and M Shariff. 2004. Phytoplankton community composition and size distribution in the Langat River Estuary. Malaysia. Estuaries. 27:716-727.
Nayar S, BPL Goh and LM Chou. 2005. Dynamics in the size structure of *Skeletonema costatum* (Greville) Cleve under conditions of reduced photosynthetically available radiation in a dredged tropical estuary. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 318: 163-182.
Parsons TR, Y Maita and CM Lalli. 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press. New York. pp. 22-25.
Rousseau V, S Becquevort, JY Parent, S Gasparini, MH Daro,

M Tackx and C Lancelot, 2000. Trophic efficiency of the planktonic food web in a coastal ecosystem dominated by *Phaeocystis* colonies. J. Sea Res. 43:357-372.

Ryther JH. 1969. Photosynthesis and fish production in the sea. Science. 166:72-76.

Semeneh M, F Dehairs, M Elskens, MEM Baumann, EE Kopczynska, C Lancelot and L Goeyens. 1998. Nitrogen uptake regime and phytoplankton community structure in the Atlantic and Indian sectors of the Southern Ocean. J. Marine Syst. Amsterdam. The Netherlands 17:159-177.

Sin Y, RL Wetzel and IC Anderson. 2000. Seasonal variations of size-fractionated phytoplankton along the salinity gradient in the York River estuary. Virginia (USA). J. Plankton Res. 22:1945-1960.

Sin Y, B Hyun, QD Bach, S Yang and C Park. 2011. Phytoplankton size-taxonomic composition in a temperate estuary influenced by monsoon. Estuar. Coast. (Submitted).

Sourinia A. 1978. Phytoplankton manual. Monographs on oceanographic methodology 6. UNESCO Paris.

Sundbaeck K, B Joensseon, P Nilsson and I Lindstroem. 1990. Impact of accumulating drifting macroalgae on a shallow-water sediment system: An experimental study. Mar. Ecol. Prog. Ser. 58:261-274.

Totti C, M Cangini, C Ferrari, R Kraus, M Pompei, A Pugnetti, T Romagnoli, S Vanucci and G Socal. 2005. Phytoplankton size-distribution and community structure in relation to mucilage occurrence in the northern Adriatic Sea. Sci. Total Environ. 353:204-217.

Vargas CA and HE Gonzalez. 2004. Plankton community structure and carbon cycling in a coastal upwelling system. I. Bacteria, microprotozoans and phytoplankton in the diet of copepods and appendicularians. Aquat. Microb. Ecol. 34: 151-164.

Manuscript Received: August 3, 2011
Revision Accepted: August 12, 2011
Responsible Editor: Hak Young Lee