

영산강 하구역 및 목포 연안 해역 식물플랑크톤 1차생산력의 시·공간적 변화

이연정 · 민준오 · 신용식¹ · 김성환² · 신경훈*

(한양대학교 해양환경과학과, ¹목포해양대학교 해양시스템공학부, ²경북대학교 화학과)

Temporal and Spatial Variations of Primary Productivity in Estuary of Youngsan River and Mokpo Coastal Areas. Lee, Yeon-Jung, Jun-Oh Min, Yongsik Shin¹, Sung-Hwan Kim² and Kyung-Hoon Shin* (Department of Environmental Marine Sciences, Hanyang University, Ansan 425-791, Korea; ¹Division of Ocean System Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo, Chonnam 530-729, Korea; ²Department of Chemistry, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea)

Temporal and spatial variations of primary productivity were investigated in the estuary of Youngsan River and Mokpo coastal areas in 2009. After heavy rain, concentrations of ammonium, phosphate, and silicate increased at six stations in August. The torrential rainfall may cause an increase in nutrient concentrations during summer. There is no limitation of nutrients (except for February at the mid-Youngsan estuarine region YS2) but a potential phosphate limitation was apparent at all stations. Silicate depletion was observed at YS2 in February due to a massive diatom bloom. The trophic status of the Youngsan estuary and Mokpo coastal areas were inferred from an assessment of the primary productivity. In February and May, YS1 (upper Youngsan estuary site) and YS2, YS3 (near the Youngsan river estuary barrage), MP1 (upper Mokpo coastal region site) were appropriately assigned to the mesotrophic category. MP2 (mid-Mokpo coastal region site) and MP3 (outer site of Mokpo coastal region) were assigned to the oligotrophic category. All stations were classified to the oligotrophic status in November. In August, after heavy rain, Youngsan estuary stations maintained mesotrophic status. On the other hand, MP1 and MP2 were classified in the eutrophic category and MP3 to mesotrophic status. In particular, primary productivities of MP1 and MP2 were 9 and 7 times higher respectively than the standard of eutrophic status ($1,000\text{-mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$). These results suggest that a massive freshwater discharge from the Youngsan River estuary should be considered a main factor in the occurrence of phytoplankton bloom in Mokpo coastal areas during summer. Seasonal variations of primary productivity are closely related with depth-integrated Chl. *a*.

Key words : phytoplankton, ¹³C tracer method, primary productivity, Youngsan River, Mokpo Coastal areas

* Corresponding author: Tel: 031) 400-5536, Fax: 031) 416-6173, E-mail: shinkh@hanyang.ac.kr

서 론

식물플랑크톤은 광합성을 통해 유기물을 생성하며, 이는 수층 내 미생물 및 동물플랑크톤에게 중요한 탄소원으로 이용된다. 특히 1차 생산자에 의해 생성되는 유기물은 동물플랑크톤의 영양 및 생식에 중요한 역할을 한다고 알려져 있다(Becker and Boersma, 2003; Kainz *et al.*, 2004). 식물플랑크톤 1차생산력 측정은 높은 먹이질을 가진 자생 기원 유기물이 얼마나 수층에 제공되는지에 대한 정보를 알려준다.

식물플랑크톤 1차생산력은 온도나 빛의 이용 가능 정도 등의 물리적인 요인, 영양염류 농도 등의 화학적 요인, 식물플랑크톤 생물량이나 종조성 등 생물적인 요인 등에 의해 영향을 받는다(Stearns *et al.*, 1987; Cloern, 1991; Landry *et al.*, 1995; Gallegos and Jordan, 1997; Calbet and Landry, 2004; Cermeno *et al.*, 2006). 계절적 강수 분포는 수질 환경 변화에 큰 영향을 준다고 보고된 바 있으며(Parks and Baker, 1997; Winston and Criss, 2002), 1차생산력에 영향을 주는 수층의 물리, 화학적인 환경 변화에 큰 기여를 할 것이다. 특히 우리나라와 같이 강우량의 50% 이상이 하절기에 편중되어 있는 기후에서는(Kim *et al.*, 2000) 여름철 집중 호우에 의한 1차생산력 변화가 크게 나타날 것으로 판단되며, 하구역과 같은 특수한 환경에서는 그 영향이 더욱 뚜렷할 것으로 사료된다.

영산강 하구둑은 1981년 농업종합개발계획의 핵심 사업으로 건설되었다. 그러나 그 후 주변 지역에서 생활하수 및 농축산 폐수 등이 지속적으로 유입되어 영양염류 농도가 증가하고 유기물 오염이 가속화(Ryu and Lee, 2000) 되는 등 영산호의 오염 정도는 매우 심각한 수준에 도달하였다. 뿐만 아니라 하구 둑 수문의 운영을 통해 높은 영양염류 및 유기물을 포함한 영산강 물이 간헐적으로 목포 연안으로 방류되어 목포항의 주요한 오염원 역할을 하고 있다(Kim and Lee, 2003).

이와 같이 영산강 담수역과 목포 연안 해수역은 직접적으로 연결되어 있어, 다양한 항목에 대한 동시적인 관찰이 필요하다. 그러나 영산강 및 목포 연안 주변에서 각각 영양염류 농도 및 BOD, COD 항목 측정을 통해 오염 정도나 식물플랑크톤의 현존량을 파악한 논문은 있지만(Kim, 2001; Kim and Lee, 2003; Kim and Ryu, 2003; Sin *et al.*, 2005; Kang and An, 2006; Song and Shin, 2008), 담수역과 해수역을 대상으로 동시에 진행된 연구는 매우 부족하다. 뿐만 아니라 영산강 상류부터 목포해역까지 시·공간적으로 자생기원 유기물의 공급 속도가 어떻게 변

화하는지에 대해 조사한 연구는 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 연 4회, 같은 시기에 영산강 3개 정점 및 목포 연안 3개 정점을 선정하여 1차생산력의 시·공간적인 변화를 비교하였다.

재료 및 방법

1. 연구지점 및 환경요인

본 연구는 영산강 3개 정점(YS1, YS2, YS3)과 목포 연안 해역 3개 정점(MP1, MP2, MP3)에서 2009년 2월, 5월, 8월 및 11월 총 4회 실시되었으며 조사지점은 Fig. 1에 나타내었다.

수온 및 탁도, 염분은 수질 다항목 측정기(YSI-85, YSI inc., USA)를 이용하여 수심별로 측정하였으며, 본 연구에서는 표층 자료를 사용하였다. 강우량 자료는 기상청 홈페이지(www.kma.go.kr)의 자료를 사용하였으며, 유광층 깊이는 광량계(Li-1000, Li-COR, USA)를 이용하여 측정하였다. 영양염류의 농도는 각 정점의 표층수를 GF/F 여과지로 여과하여 냉동보관한 후, Parsons *et al.* (1984)의 방법에 따라 자동영양염분석기(AACS5, BLTEC®, Japan)를 이용하여 분석하였다.

2. 1차생산력 측정을 위한 현장 배양실험

각 깊이별로 채수된 현장수를 대형동물플랑크톤을 제거하기 위해 100 μ m 망목으로 거른 후 시료에 NaH¹³CO₃ (98%)를 첨가하여 100%, 30%, 6%, 1%의 빛이 투과할 수

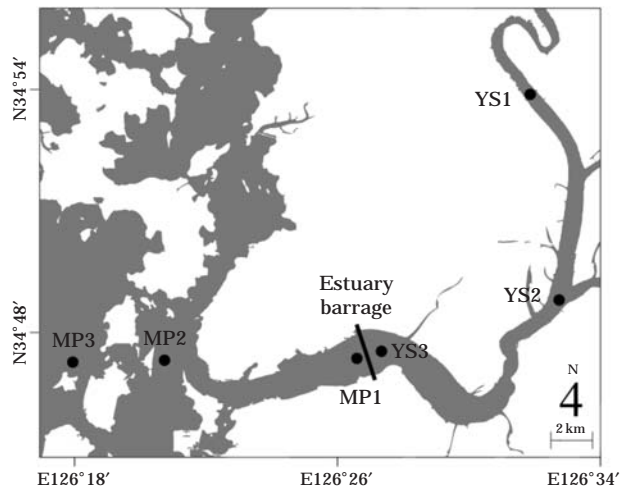


Fig. 1. Map showing the sampling stations in the Youngsan River estuary and Mokpo coastal areas.

있도록 자체 제작한 망목으로 걸러낸 후, 대형 수조에서 일정시간 동안 배양하였다. 이 때 암상태에서의 무기탄소 이용 및 흡착 등의 효과를 제어해 주기 위해 은박지와 검정 테이프로 빛을 차단한 용기를 함께 배양하였으며, 대형 수조는 목포항 표층 해수를 순환시켜 현장과 동일한 수온을 유지하였다.

3. 엽록소 a의 농도 및 1차생산력

엽록소 a의 농도는 100 μ m 망목으로 거른 시료를 GF/F 여과지로 여과한 후 90% 아세톤으로 추출하여 분광광도계 (Cary 50 series, Varian, Australia)로 측정하였다. 1차생산력 측정을 위한 시료는 배양이 끝난 후 미리 태운 (450 $^{\circ}$ C, 4시간) GF/F 여과지로 여과한 후, 진한염산 증기로 여과지의 무기탄소를 제거하여 원소-질량 분석기 (EuroEA-Isoprime irms, GV instruments, UK)로 분석하였다. 그 후 Hama *et al.* (1983)의 식에 따라 1차생산력을 계산하였다 (Lee *et al.*, 2006). 용존성 무기탄소의 농도는 깊이별 현장수를 미리 태운 GF/F 여과지로 여과한 후, 미생물 활동을 억제하기 위해 여과액에 엽화수은을 첨가하여 총 유기탄소 분석기 (TOC-V_{CPH}, Shimadzu, Japan)로 분석하였다.

결과 및 고찰

1. 물리적 특성

2009년 1월부터 12월까지 목포시 강수량 분포를 Fig. 2에 나타내었다.

강수량은 집중 호우 시기인 7월에 가장 높게 나타났으며, 5월과 6월 역시 비교적 높은 강수량을 보였다. 7월을

제외한 월평균 강수량은 57 mm로 나타났다. 1월부터 11월까지 조사 정점에서의 표층 염분 변화는 Fig. 3에 나타내었다.

영산강과 목포 연안은 연중 염분의 큰 차이를 보여주고 있어 하구둑으로 인해 담수와 해수의 환경으로 뚜렷하게 구분되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 또한 양쪽 모두 상류(YS1, MP1)에서 하류(YS3, MP3)로 갈수록 염분이 높아졌으며, 모든 정점에서 8월에 가장 낮은 값을 보였다. 이는 강수량이 매우 높았던 7월 이후 하구둑 운영을 통해 담수가 해양으로 대량 방류되어 나타난 결과로 사료되며, 목포 해역 중 다른 정점에 비해 하구둑에 가장 가깝게 위치한 MP1에서 가장 낮은 값을 보였다. 조사 기간 동안 수온은 3~28 $^{\circ}$ C의 범위를 보였다.

2. 화학적 특성 (영양염류 농도 변화)

조사 기간 동안 조사 지점 표층에서 질산성 질소 및 아질산성 질소, 암모니아성 질소, 인산염 인, 규산염의 농도 변화는 Fig. 4에 나타내었다.

영산강 및 목포 연안에서 연 4회 측정된 값을 이용하여

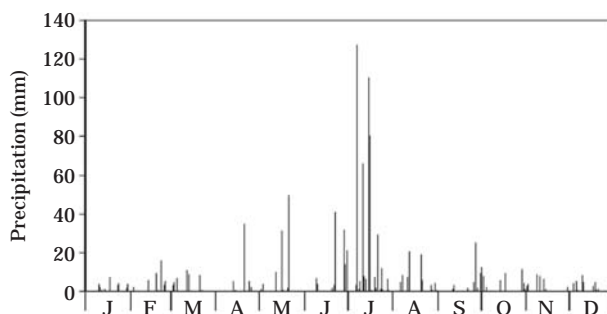


Fig. 2. Temporal variation of precipitation amounts from January to December 2009 in Mokpo City.

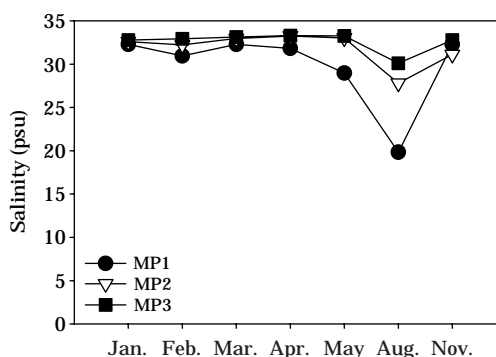
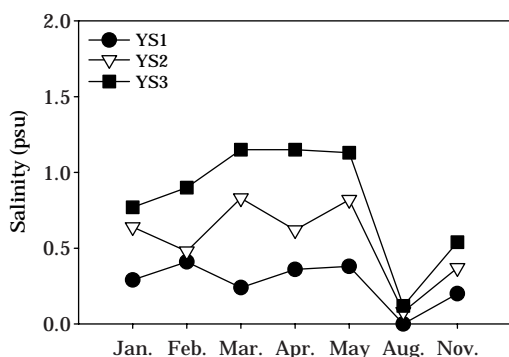


Fig. 3. Spatial and temporal variations of salinity in surface water at six stations.

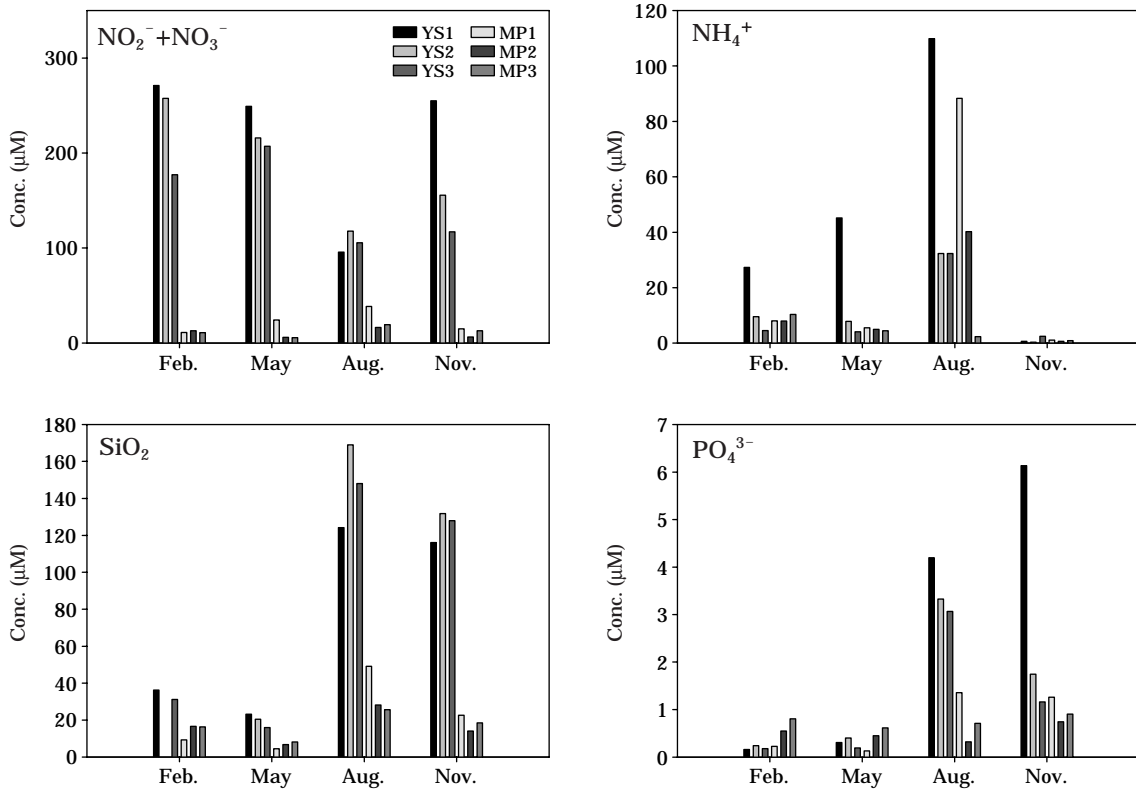


Fig. 4. Spatial and temporal variations of surface water nutrients ($\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$, NH_4^+ , SiO_2 and PO_4^{3-}) at six stations.

계산된 연평균 질산성 질소 및 아질산성 질소의 합은 각각 185, 15 μM 로 나타났으며, 암모니아성 질소는 각각 23, 15 μM , 인산염 인은 각각 1.8, 0.7 μM , 규산염은 각각 79, 18 μM 로 나타났다. 이중 영산강과 목포 연안에서 가장 큰 차이를 보인 항목은 질산성 질소 및 아질산성 질소의 합이었으며, 평균 10배 이상 영산강 정점에서 높게 나타났다. 이는 영산강 주변 유역에서 비료 및 토양기원 유입원, 축산폐수, 생활하수 등이 유입된 결과로 사료된다. 다른 영양염류 역시 영산강이 목포 해역에 비해 높은 농도를 보였다. 집중 호우 이후인 8월은 염분이 가장 낮았던 시기로, 목포 연안에서는 담수 유입에 의한 영향이 가장 두드러지게 나타날 것으로 판단된다. 이 시기에 영산강 정점에서 질산성 질소 및 아질산성 질소 이외의 다른 영양염류(암모니아성 질소, 규산염, 인산염 인)가 2월과 5월에 비해 증가하는 경향을 나타냈으며, 이는 강우를 통해 유입된 것으로 사료된다. 특히 영산강에 비해 영양염류 농도가 낮았던 목포 해역에서는 8월 담수 유입에 의한 영양염류 증가가 식물플랑크톤 1차생산력을 증가시키는 요인으로 작용하였을 것이다.

영산강 정점에서 다른 영양염류와 달리 질산성 질소 및

아질산성 질소의 합이 8월에 가장 낮은 값을 보였다. 이와 반대로 암모니아성 질소의 농도는 가장 높게 나타났다. 목포 연안에서는 질산성 질소 및 아질산성 질소의 농도 합과 암모니아성 질소 농도가 높은 양의 상관관계($r=0.9$)를 보였으며, 이는 두 종($\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$, NH_4^+)의 증가 및 감소 변화가 유사함을 의미한다. 반면 영산강 정점에서는 음의 상관관계($r=-0.5 \sim -0.9$)를 보였으며, 이는 두 종의 증가 및 감소 경향이 상반됨을 의미한다. 이를 설명할 수 있는 가능성의 하나로 집중호우 이후 토양 혹은 영산강 수층에서의 질산화과정 약화를 들 수 있다. 호기성 환경의 토양에서는 미생물 활동에 의해 암모니아성 질소가 빠르게 아질산성 질소 및 질산성 질소로 변환된다 (Robertson, 1997). 그러나 집중 호우 시기에는 질산화 과정이 진행될 수 있는 시간이 감소하고, 토양에 흡착되어 있던 암모니아성 질소까지 함께 영산강 정점으로 유입될 수 있다. 또한 영산강 수층에서의 용존산소 농도 역시 다른 조사 기간에는 7~13 mg L^{-1} 인 반면, 8월은 평균 4 mg L^{-1} 로 크게 감소한 것은 질산화 과정 약화에 영향을 주었을 것으로 사료된다. 그러나 이를 규명하기 위해서는 더 많은 연구가 필요하다.

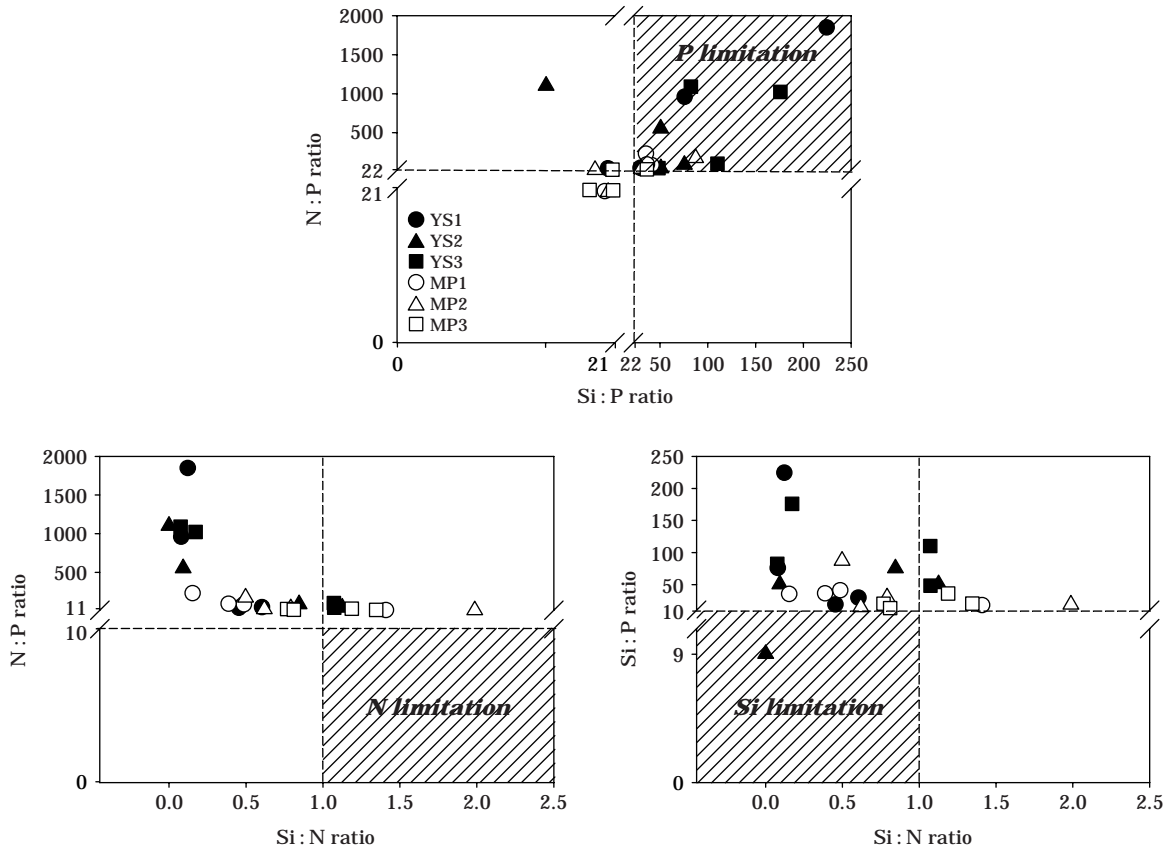


Fig. 5. Assessments of potential nutrient limitations at six stations.

Justic *et al.* (1995)은 다양한 영양염 이용 속도에 관한 연구결과를 기준으로 식물플랑크톤의 성장을 제한하는 영양염류의 농도 기준을 규산염은 $2\mu\text{M}$, 용존무기질소는 $1\mu\text{M}$, 인산염 인은 $0.1\mu\text{M}$ 로 사용한 바 있으며, 본 연구에서도 같은 기준을 사용하였다. 2월 YS2 정점의 규산염 농도를 제외하고 모두 기준 이상의 값을 나타내었으며, 이는 영양염류 고갈로 인한 식물플랑크톤 생산력 제한은 없었음을 의미한다. 2월 YS2 정점에서의 규산염 농도는 $0.04\mu\text{M}$ 로 매우 낮은 값을 보였다. 이 시기 YS2 정점에서는 규조강이 우점하였으며, 특히 세 종(*Coscinodiscus sp.*, *Cyclotella meneghiniana*, *Thalassiosira sp.*)의 세포 수 합은 $12,000\text{ cell mL}^{-1}$ 로 모든 조사 기간 동안 모든 정점에서 가장 높은 개체수를 보였다. 따라서 2월 YS2 정점에서는 높은 개체수를 보였던 규조강에 의해 규산염의 고갈이 나타났으며, 이후 다른 강(class)이 우점 하였을 것으로 사료된다. 수중환경에서 영양염류의 화학양론(stoichiometry)은 식물플랑크톤 성장의 잠재적인 제한 요소를 판단하는데 사용되며, 인(P)의 잠재적인 결핍은 $\text{Si/P} > 22$, $\text{N/P} > 22$ 환경에서, 질소(N)는 $\text{N/P} < 10$, $\text{Si/N} > 1$ 환

경에서, 규소(Si)는 $\text{Si/P} < 10$, $\text{Si/N} < 1$ 환경에서 나타난다고 보고된 바 있다(Justic *et al.*, 1995). 조사정점에서의 영양염류 비는 Fig. 5에 나타내었으며, 각 영양염류의 농도 기준은 그래프 내 점선으로 표시하였다.

본 연구에서 무기질소($\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$)에 의한 식물플랑크톤 성장의 잠재적인 제한은 관찰되지 않았으며, 규산염에 의한 잠재적인 제한은 규산염의 절대 농도가 가장 낮았던 2월 YS2 정점에서 나타났다. 인산염 인은 영산강 및 목포 연안 식물플랑크톤의 성장을 잠재적으로 제한할 수 있는 가장 중요한 요소로 나타났으며 이는 선행 연구결과(Yi *et al.*, 2007)와 일치하였다. 영산강에서는 11월 YS1과, 규산염의 고갈이 관찰되었던 2월 YS2 정점을 제외하고 모두 인산염이 잠재적인 제한요소로 조사되었으며, 이는 외부로부터 영양염 유입 없이 식물플랑크톤 생산력이 크게 증가할 경우 인산염에 의한 성장 제한이 나타날 수 있음을 의미한다. MP1에서는 2월, 5월 및 8월, MP2는 2월과 8월, MP3은 8월에 인산염이 식물플랑크톤 성장의 잠재적 제한요소로 작용하였다.

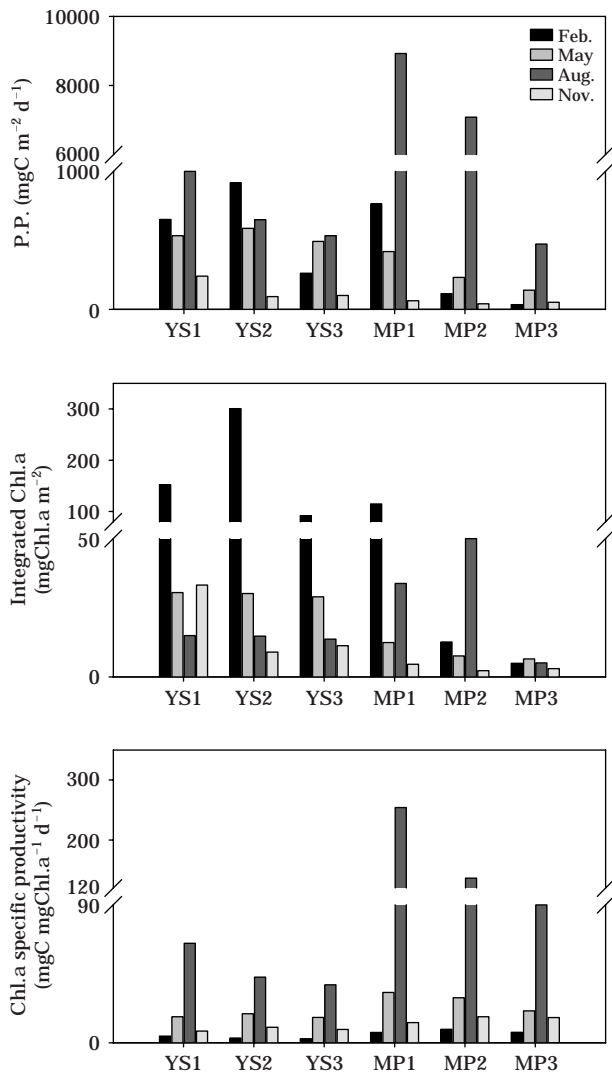


Fig. 6. Primary productivity (P.P.), depth integrated Chl. *a* (Chl. *a*), and Chl. *a* specific productivity (Chl. *a* S.P.).

3. 식물플랑크톤 1차생산력

조사 기간 동안 조사 정점 내에서의 식물플랑크톤 1차생산력 및 유광층 내 엽록소 *a* 농도의 합, 엽록소 *a*에 의한 탄소 고정 속도를 Fig. 6에 나타내었다.

식물플랑크톤 1차생산력은 8월을 제외한 조사 시기 동안 대부분 영산강 정점에서 높게 나타났으며, 영산강과 목포 연안해역 모두 상류에서 하류로 갈수록 감소하였다. Wetzel (1983)은 1차생산력에 따라 50~300 mgC m⁻² d⁻¹은 빈영양호(Oligo; Oligotrophic lake), 250~1,000 mgC m⁻² d⁻¹은 중영양호(Meso; Mesotrophic lake), 1,000 mgC m⁻² d⁻¹ 이상은 부영양호(Eutro; Eutrophic lake)로 구분하였다. Wetzel의 구분에 따르면 2월과 5월에 YS1, YS2,

YS3 및 MP1은 중영양상태, MP2, MP3은 빈영양상태를 나타내었으며, 8월은 YS1, YS2, YS3, MP3은 중영양상태, MP1, MP2는 부영양상태를 나타내었으며, 11월은 모든 조사 지점에서 빈영양상태를 나타내었다. 영산강 정점은 동일한 조사 기간에는 모든 정점에서 동일한 영양 상태로 조사되었지만, 목포 해역은 MP2와 MP3이 비교적 유사한 영양 상태를 보이는 반면, 담수의 영향을 가장 많이 받는 MP1은 오히려 영산강 정점과 유사한 영양 상태를 보였다. 이는 MP1은 해안에 위치하고 있지만 식물플랑크톤 1차생산력이 담수 유입에 크게 영향을 받고 있음을 의미한다. 집중 호우 이후인 8월은 목포 해역의 모든 정점에서 다른 시기보다 높은 생산력을 보였으며, 영산강 정점의 값보다도 높게 나타났다. 특히 MP1과 MP2의 1차생산력은 각각 8,927 및 7,083 mgC m⁻² d⁻¹로 부영양상태로 구분하는 기준을 크게 상회하는 매우 높은 값을 보였다.

유광층 깊이 내에서 엽록소 *a* 농도의 합은 1차생산력 변화와 유사한 경향을 보였으며, 1차생산력을 유광층 내 엽록소 *a* 농도로 나누어준 엽록소 *a* 당 탄소 고정속도는 전 조사 기간 동안 영산강 정점보다 목포 연안 해역 정점에서 높게 나타났다. 이는 목포 연안 해역의 식물플랑크톤 활성도가 더 높음을 의미 할 수 있다. 8월에는 모든 정점에서 엽록소 *a* 당 탄소 고정속도가 다른 조사 기간에 비해 높은 값을 나타내었으며, 이는 집중 호우를 통해 주변 토양 등에서 다양한 영양분들이 유입된 결과로 사료된다. 특히 높은 생산력을 보였던 MP1과 MP2에서는 각각 254, 136 mgC mgChl. a⁻¹ d⁻¹로 매우 높은 값을 보였으며, 평소 영양염류의 농도가 낮았던 환경에 질소, 인 및 규산염이 모두 공급되어 식물플랑크톤의 대발생을 야기한 것으로 사료된다.

영산강 하구역 및 목포 연안 해역에서의 식물플랑크톤 1차생산력을 우리나라 주요 호수 및 강, 다른 나라의 하구에서 측정된 값과 비교하였으며, 그 결과는 Table 1에 나타내었다. 영산강에서의 1차생산력 최고값은 한강 수계, 낙동강 수계 및 금강 수계에 비해 낮게 나타났으며, 목포 연안 해역은 동북호를 제외한 다른 담수 수계에 비해 높게 나타났다. 다른 나라의 하구와 비교해 보았을 때, 영산강 하구역의 최대 1차생산력은 탁도가 높은 Louisiana estuary를 제외한 다른 하구역(Danube estuary, Changjiang estuary, Neuse river estuary, Chesapeake Bay and Darwin Harbour)에 비해 낮았으며, 목포 연안 해역의 값은 세계에서 가장 많은 양의 담수와 퇴적물을 유입시키는 아마존 강(Meade *et al.*, 1985) 주변해역의 1차생산력(220~8,160 mgC m⁻² d⁻¹)과 유사한 값을 보였다. 이는 여름철

Table 1. Primary productivity in various water environments.

Regions	Primary productivity (mgC m ⁻² d ⁻¹)	Method	Reference
Youngsan estuary	95 ~ 1,019	¹³ C	This study
Mokpo coastal areas	36 ~ 8,927	¹³ C	
Lake Juam	103 ~ 2,792	¹⁴ C	NIER (National institute of environmental research)_ Youngsan river environment research center, 2006
Lake Dongbok	304 ~ 18,506	¹⁴ C	
Nakdong river system	91 ~ 1,997	¹⁴ C	NIER_Nakdong river environment research center, 2008
Geum river system	431 ~ 2,842	Oxygen method	NIER_Geum river environment research center, 2008
Lake Soyang	23 ~ 3,876	¹⁴ C	Namkung <i>et al.</i> , 2001
Lake Paldang	21 ~ 2,791	¹³ C	NIER_Han river environment research center, 2009
Lake Cheongpyeong	56 ~ 1,091	¹³ C	
Amazon river plume	220 ~ 8,160	¹⁴ C	Smith and Demaster, 1996
Mississippi delta	50 ~ 1,000	¹⁴ C	Thomas and Simmons, 1960
Nile river plume	70 ~ 380	¹⁴ C	Dowidar, 1984
Danube estuary	200 ~ 4,400	¹⁴ C	Humborg, 1997
Changjiang estuary	13 ~ 1,514	¹⁴ C	Xiuren <i>et al.</i> , 1988
Louisiana estuary (turbid estuary)	120 ~ 317	Oxygen method	Randall and Day, 1987
Neuse river estuary	2 ~ 4,840	¹⁴ C	Boyer <i>et al.</i> , 1993
Chesapeake Bay	265 ~ 2,354	¹⁴ C	Harding <i>et al.</i> , 2002
Darwin Harbour	979 ~ 2,165	Oxygen method	Burford <i>et al.</i> , 2008

영산호 부영양 물의 대량 방류에 의한 목포 연안 해역의 1차생산력 증가 효과가 매우 높음을 의미한다.

4. 식물플랑크톤 1차생산력과 유광층 내 엽록소 a 농도 합의 선형회귀식

식물플랑크톤 광합성에 의한 유기물 생성은 양의 차이는 있지만 표층뿐 아니라 빛이 도달하는 유광층 깊이까지 모두 행해진다. 따라서 본 연구에서는 조사 기간 동안 영산호 및 목포 연안 해역의 식물플랑크톤 생물량을 나타내는 지표인 엽록소 a의 유광층 내 농도합과 1차생산력간의 상관계수(R), 결정계수(R²) 및 선형회귀식을 계산하였으며 결과는 Fig. 7에 나타내었다. 이 때 두 변수는 로그값으로 표현하였다. 상관계수(R)는 2월부터 11월까지 각각 0.96, 0.93, 0.89 및 0.99로 두 변수의 상관은 매우 높은 것으로 나타났다. 또한 결정계수(R²)는 각각 0.93, 0.86, 0.78 및 0.98로 두 가지 변수만 고려했을 때 1차생산력 변화는 유광층 내 엽록소 a 총량 변화에 의해 크게

영향을 받고 있는 것을 확인할 수 있었다. 담수의 대량 방류가 있었던 8월은 상관계수와 결정계수가 가장 낮으며, 이는 식물플랑크톤 활성도의 급격한 증가에 의한 결과일 수 있다. 8월을 제외한 모든 조사 기간 동안 모든 조사 정점에서의 두 변수의 R값과 R²값은 각각 0.86, 0.74로 나타났다. 회귀식은 Y=0.66x+1.47로 나타났다. 따라서 유광층 내에서의 엽록소 a 총량의 변화는 1차생산력 변화를 상당량 대변해 줄 수 있는 요소로 판단된다.

본 연구 결과를 통해 하계 강우기 영산호 물의 대량 방류는 영양염 공급 등으로 인해 목포 연안 해역에 식물플랑크톤 대발생을 야기하며, 이는 목포 연안해역의 수질에 부정적인 영향을 주는 것으로 확인되었다. 특히 목포 연안 해역은 물의 순환이 원활하지 않기 때문에 (Kim, 2001) 그 영향이 크고 장기적으로 지속될 것으로 사료된다. 뿐만 아니라 유광층 내 엽록소 a의 총량과 식물플랑크톤 1차생산력은 높은 상관계수 및 결정계수를 보이기 때문에 회귀식을 통한 1차생산력의 추정이 가능할 것으로 사료된다.

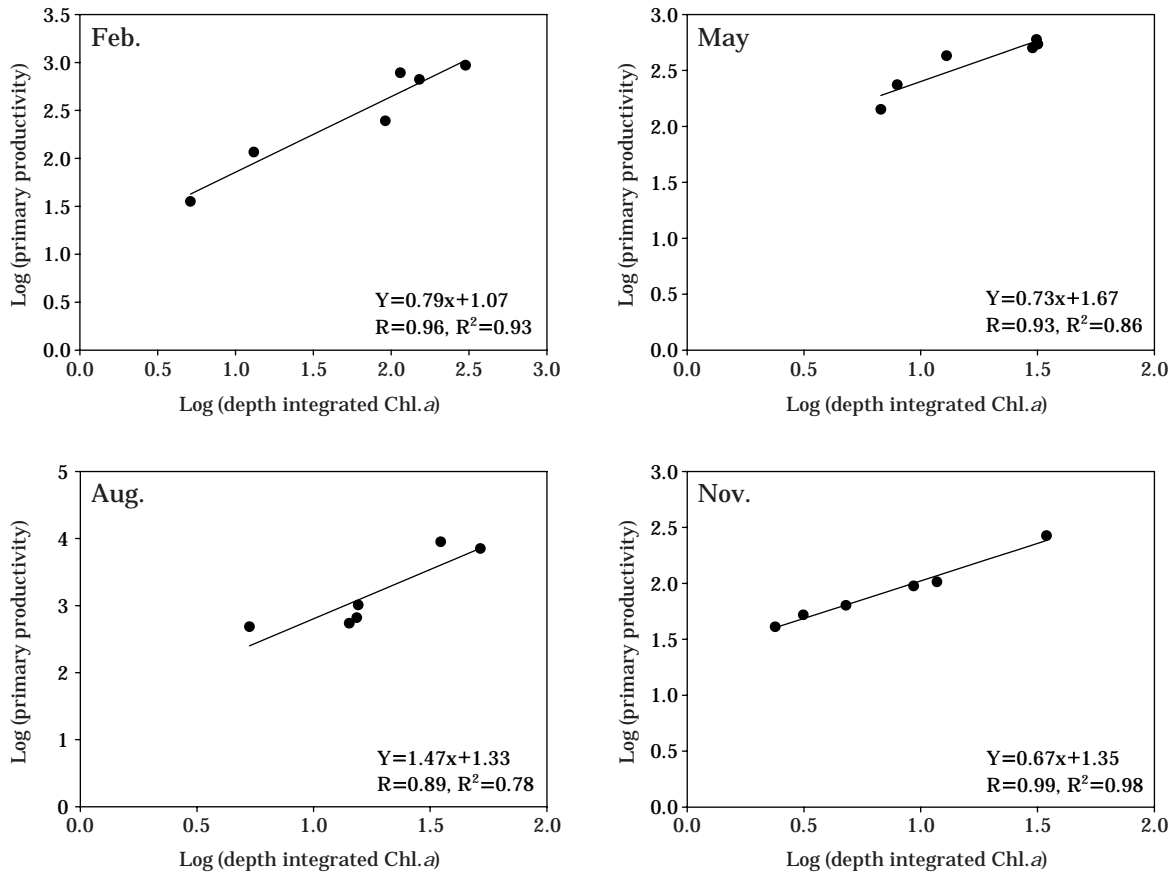


Fig. 7. Regressions of log primary productivity ($\text{mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$) on log depth integrated Chl. *a* (mg m^{-2}) for data divided into seasons.

적 요

본 연구는 연 4회에 걸쳐서 영산강 하구역 및 목포 연안 정점에서 1차생산력의 시·공간적인 변화를 비교하였다. 집중 호우 이후인 8월 조사 시 모든 정점에서 암모니아성 질소 및 인산염 인, 규산염의 농도가 증가하였으며, 이는 강우에 의한 영향으로 사료된다. 연구기간 동안 2월 YS2 정점을 제외하고 영양염류 고갈 현상은 관찰되지 않았으며, 인산염 인이 식물플랑크톤 성장을 잠재적으로 제한하는 가장 주요한 요소로 나타났다. 2월 YS2에서는 규조류의 대량 번식에 의한 규산염 고갈이 관찰되었다. 1차생산력을 기준으로 영양 상태를 구분한 결과 2월과 5월 YS1, YS2, YS3 및 MP1은 중영양 상태, MP2와 MP3은 빈영양 상태로 분류되었으며, 11월은 모든 정점이 빈영양 상태로 나타났다. 강우의 영향이 가장 컸던 8월에 영산강 하구역은 모두 중영양 상태를 유지한 반면, MP1과 MP2는 부영양, MP3은 중영양 상태를 나타내었다. 특히 MP1

과 MP2의 1차생산력은 부영양 상태로 구분하는 기준을 크게 상회하는 매우 높은 값(각각 $8,927, 7,083 \text{ mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$)을 보였으며, 이를 통해 여름철 영산호 부영양 물의 대량 방류가 목포 연안 해역에 식물플랑크톤 대발생을 야기하는 주된 요인으로 작용함을 알 수 있었다. 유광층 내 엽록소 *a*의 총량과 식물플랑크톤 1차생산력 간의 상관계수 및 결정계수는 8월을 제외하고 모두 0.9 이상의 높은 값을 보였으며, 이러한 결과는 유광층 내 엽록소 *a* 총량을 통한 1차생산력 추정 가능성을 제시한다.

사 사

본 연구는 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단(No. 2008-0060923)의 지원을 받았으며, 또한 국가연구개발사업(국토해양부, 한국해양과학기술진흥원)으로 한국해양연구원에서 수행한 “한국 관할해역 지질구조 및 해양지질조사” 과제의 일환으로 한국 관할해역

퇴적물 내 퇴적유기물 기원 및 고수온 지표 연구(세부과제)의 지원을 받아 수행되었습니다. 연구수행에 도움을 주신 목포해양대학교 해양환경미생물 연구실 연구원 분들에게 감사드립니다.

인 용 문 헌

- Becker, C. and M. Boersma. 2003. Resource quality effects on life histories of *Daphnia*. *Limnology and Oceanography* **48**: 700-706.
- Boyer, J.N., 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.
- Burford, M.A., D.M. Alongi, A.D. McKinnon and L.A. Trott. 2008. Primary productivity and nutrients in a tropical macrotidal estuary, Darwin Harbour, Australia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **79**: 440-448.
- Calbet, A. and M.R. Landry. 2004. Phytoplankton growth, microzooplankton grazing, and carbon cycling in marine systems. *Limnology and Oceanography* **49**: 51-57.
- Cermeno, P., E. Maranon, V. Perez, P. Serret, E. Fernandez and C. Castro. 2006. Phytoplankton size structure and primary production in a highly dynamic coastal ecosystem (Ria de Vigo, NW-Spain): seasonal and short-time scale variability. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **67**: 254-266.
- Cloern, J. 1991. Tidal stirring and phytoplankton bloom dynamics in an estuary. *Journal of Marine Research* **49**: 203-221.
- Dowidar, N.M. 1984. Phytoplankton biomass and primary productivity of the south-eastern Mediterranean. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers* **31**: 983-1000.
- Gallegos, C.L. and T.E. Jordan. 1997. Seasonal progression of factors limiting phytoplankton pigment biomass in the Rhode River estuary, Maryland (USA). I. Controls on phytoplankton growth. *Marine Ecology Progress Series* **161**: 185-198.
- Hama, T., T. Miyazaki, Y. Ogawa, T. Iwakuma, M. Takahashi, A. Otsuki and S. Ichimura. 1983. Measurement of photosynthetic production of a marine phytoplankton population using a stable ^{13}C isotope. *Marine Biology* **73**: 31-36.
- Harding, L.W. Jr., M.E. Mallonee and E.S. Perry. 2002. Toward a predictive understanding of primary productivity in a temperate, partially stratified estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **55**: 437-463.
- Humborg, C. 1997. Primary productivity regime and nutrient removal in the Danube estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **45**: 579-589.
- Justic, D., N.N. Rabalais, R.E. Turner and Q. Dortch. 1995. Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: stoichiometric nutrient balance and its consequences. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **40**: 339-356.
- Kainz, M., M.T. Arts and A. Mazumder. 2004. Essential fatty acids in the planktonic food web and their ecological role for higher trophic levels. *Limnology and Oceanography* **49**: 1784-1793.
- Kang, S.A. and K.G. An. 2006. Spatio-temporal variation analysis of physico-chemical water quality in the Yeongsan-River watershed. *Korean Journal of Limnology* **39**(1): 73-84.
- Kim, B., K. Chio, C. Kim, U. Lee and Y. Kim. 2000. Effects of the summer monsoon on the distribution and loading of organic carbon in a deep reservoir, Lake Soyang, Korea. *Water Research* **34**(14): 3495-3504.
- 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. 2001. Seasonal variations of marine water quality and eutrophication index in Mokpo harbour. *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering* **4**(3): 3-15.
- Kim, K.S. and N.I. Lee. 2003. Estimation of pollution loads flowing into Mokpo harbour -centering on pollution loads from land in dry case-. *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering* **6**(1): 11-20.
- Landry, M.R., W.K. Peterson. and C.J. Lorenzen. 1995. Zooplankton grazing, phytoplankton growth, and export flux - inferences from chlorophyll tracer methods. *ICES Journal of Marine Science* **52**: 337-345.
- Lee, Y.J., M.S. Kim, E.J. Won and K.H. Shin. 2006. An application of ^{13}C tracer for the determination of size fractionated primary productivity in upper stream of Lake Shihwa. *Korean Journal of Limnology* **39**: 93-99.
- Meade, R.H., T. Dunne, J.E. Richey, U.M. Santos and E. Salati. 1985. Storage and remobilization of suspended sediment in the lower Amazon River of Brazil. *Science* **228**: 488-490.
- Namkung, H., B. Kim, G. Hwang, K. Choi and C. Kim. 2001. Organic matter sources in a reservoir (Lake Soyang); Primary production of phytoplankton and DOC, and external loading. *Korean Journal of Limnology* **34**: 166-

- 174.
- National institute of environmental research, Geum river environment research center. 2008. Survey of lake environment and ecology in the Geum river system. Fundamental Investigation on Environment of the Geum River 1st report.
- National institute of environmental research, Han river environment research center. 2009. Survey on the Environment and ecosystem of lakes in the Han river system. Fundamental Investigation on Environment of the Han River 1st report.
- National institute of environmental research, Nakdong river environment research center. 2008. Survey of environment and ecosystem of lakes in the Nakdong river system. Fundamental Investigation on Environment of the Nakdong River 1st report.
- National institute of environmental research, Youngsan river environment research center. 2006. Investigation of mechanisms and processes of eutrophication in the Youngsan and Sumjin river systems. Fundamental Investigation on Environment of the Youngsan and Sumjin River 2nd report.
- Parks, S.J. and L.A. Baker. 1997. Source and transport of organic carbon in an Arizona River-Reservoir System. *Water Research* **31**: 1751-1759.
- Parsons, T.R., Y. Maita and C.M. Lalli. 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press, New York, pp. 22-25.
- Randall, J.M. and J.W. Jr. Day. 1987. Effects of river discharge and vertical circulation on aquatic primary production in a turbid Louisiana (USA) estuary. *Netherlands Journal of Sea Research* **21**(3): 231-242.
- Robertson, P.G. 1997. Ecology in agriculture. Academic press, San Diego.
- Ryu, I.K. and C.Y. Lee. 2000. A study on phosphorus loading model for eutrophication response in the Yongsan Lake. *Korean Journal of Environmental Health Society* **26**(4): 97-104.
- Sin, Y., H. Soh and B. Hyun. 2005. Effect of salinity change on biological structure between primary producers and herbivores in water column. *Journal of the Korean Society of Oceanography* 「The Sea」 **10**(2): 113-123.
- Smith, W.O. Jr. and D.J. Demaster. 1996. Phytoplankton biomass and productivity in the Amazon River plume: correlation with seasonal river discharge. *Continental Shelf Research* **16**(3): 291-319.
- Song, E. and Y. Shin. 2008. Spatio-temporal fluctuations of size-structured phytoplankton over an annual cycle in the Youngsan Lake. *Korean Journal of Limnology* **41**: 530-540.
- Stearns, D., W. Litaker and G. Rosenberg. 1987. Impacts of zooplankton grazing and excretion on short-interval fluctuations in chlorophyll-*a* and nitrogen concentrations in a well mixed estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **24**: 305-325.
- Thomas, W.H. and E.G. Simmons. 1960. Phytoplankton production in the Mississippi Delta, p. 103-116. *In*: Recent sediment, Northwestern Gulf of Mexico (Shepard, F. ed.). American association of petrologists, Tulsa.
- Wetzel, R.G. 1983. Limnology. W.B. Saunders, Philadelphia.
- Winston, W.E. and R.E. Criss. 2002. Geochemical variations during flash flooding, Meramec River basin, May 2000. *Journal of Hydrology* **265**: 149-163.
- Xiuren, N., D. Vaulot, L. Zhensheng and L. Zilin. 1988. Standing stock and production of phytoplankton in the estuary of the Changjiang (Yangtse river) and the adjacent East China Sea. *Marine Ecology Progress Series* **49**: 141-150.
- Yi, H., Y.S. Shin, S.R. Yang, N.I. Chang and D.H. Kim. 2007. Size-structure and primary productivity of phytoplankton from major lakes in Sumjin and Yeongsan watershed. *Korean Journal of Limnology* **40**: 419-430.

(Manuscript received 7 November 2011,
Revised 16 December 2011,
Revision accepted 20 December 2011)