

영산호 식물플랑크톤 변동에 대한 영양염과 광 제한의 상대적 평가

송은숙 · 신용식^{1,*} · 장남익² · 이준배²

(목포해양대학교 연안하구연구센터, ¹목포해양대학교 해양시스템공학부, ²국립환경과학원 영산강물환경연구소)

Assessment of Nutrient and Light Limitation of Phytoplankton in the Youngsan Lake. Song, Eunsook, Yongsik Shin^{1,*}, Namik Jang² and Junbae Lee² (Coastal Estuarine Research Center, Mokpo National Maritime University, Mokpo, Jeonnam 530-729, Korea; ¹Division of Ocean System Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo, Jeonnam 530-729, Korea; ²Yeongsan-River Environment Research Laboratory, National Institute of Environmental Research, Gwangju 500-480, Korea)

Nutrient limitation and light limitation was examined for the Youngsan Lake by collecting chlorophyll *a* and other properties including light intensity, nutrient concentrations, pheopigment ratio monthly from March, 2003 to April, 2004 (except for November-January). Chlorophyll *a* was fractionated into net- (>20 μm) and nano-size (<20 μm). Light and nutrient limitation index was calculated based on the equations incorporating the mechanisms of limitation of light and nutrients from the literature. Phytoplankton population (chlorophyll *a*) was low during the wet season especially in August and increased in short-period during other seasons. Photoperiod was short during the wet season but long during the dry season. Nutrients such as phosphate and ammonium were rapidly increased in spring, 2004. Light limitation index was minimum (0.01) in August during the wet season and nutrient limitation index was relatively high (>0.4) except for May and September. Light limitation may affect phytoplankton growth rather than nutrient limitation considering that nutrient levels are high in the Youngsan Lake. Results of correlation analyses showed a negative correlation between light and nutrient limitation indices and net-pheopigment index, and a positive correlation between the indices and nano-pheopigment index. These results suggest that phytoplankton response to change of light and nutrient may be size-dependant.

Key words : Youngsan Lake, phytoplankton, light limitation index, nutrient limitation index

서 론

담수호에서의 수질은 수체 내의 유기물 양에 의한 영향이 크기 때문에 수생태계의 특성을 이해하고 수질을 관리

하는데 있어 유기물의 생성근원을 파악하는 것은 중요하다. 수체 내의 유기물은 두 가지 공급경로로 유입되는데 수체 내에서 식물플랑크톤과 수생식물 등의 일차생산자가 광합성을 통해 생성하는 내부생성 유기물 (autochtho-

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

nous organic matter)과 도시, 농지, 산림 등 육상에서 형성되어 유입되는 외부기원 유기물(allochthonous organic matter)로 구분된다. 수층에서 광합성을 통해 무기물로부터 높은 에너지의 유기 화합물을 합성하는 식물플랑크톤은 수체 내의 유기물 생성에 대한 양적, 질적 기여가 매우 크므로 적절한 생물량을 유지하였을 때 물질순환과 먹이사슬을 통해 생태계의 생산성을 유지할 수 있다. 하지만 식물플랑크톤이 과잉번식했을 때는 수층의 투명도 저하뿐만 아니라 산소고갈, 정수처리 시 발생하는 다양한 문제들 때문에 수질 관리 측면에서도 식물플랑크톤의 생물량 변동에 대한 이해가 필수적이다(김 등, 2001).

식물플랑크톤의 생물량은 일차생산력(광합성율)에 의해 결정되고 일차생산력은 수층의 영양염 농도, 수온, 광도 등의 환경인자들의 복합적 영향을 받는다(Epply, 1972; Hyun *et al.*, 2001; Jeon and Cho, 2004; Domingues *et al.*, 2005; Piirsoo *et al.*, 2008). 이러한 환경인자 중에서도 광도와 영양염은 가장 중요한 자원이고 계절적 변화 외에도 수층의 탁도와 영양염 순환에 의해 수시로 변동하면서 복합적으로 작용하기 때문에(Becker *et al.*, 2009; Steinman *et al.*, 2009) 이들 자원들에 대한 상대적 중요도를 파악하기가 쉽지 않다. 하지만 담수호의 효율적인 수질관리를 위해서는 여러 가지 과학적 방법을 통해 식물플랑크톤의 일차생산력을 결정하는 광도와 제한 영양염의 상대적 중요도를 파악하는 것이 필수적이라 할 수 있다.

연구지역인 영산호는 1981년에 하구둑을 영산강 하류에 건설함으로써 조성된 인공 호소로 현재는 공업용수와 농업용수로 사용되고 있지만 수질이 악화되고 있는 실정이다. 농경지 면적 비율이 다른 유역에 비해 상대적으로 높으며 소, 돼지 등의 가축사육수가 많기 때문에 산업 활동 등에 의한 영향보다 농업활동 및 생활하수 등의 영향이 크게 작용하는 것으로 알려져 있다(차 등, 1999; 윤 등, 2003). 따라서 인근 담수호인 주암호, 동북호에 비해 영양염의 농도와 탁도가 높은 편이다(이 등, 2006). 선행연구에서 영산호는 수중 영양염의 평균 농도비 즉 N:P molar ratio가 14.7로 나타나 식물플랑크톤의 일차생산력이 잠재적으로 N에 의해 제한될 수 있다고 보고된 바 있다(신 등, 2005). 또한 탁도의 증가로 인한 광량의 제한보다는 암모니아와 같은 질소성 영양염에 의해 일차생산력이 조절될 것이라고 추론하였다. 하지만 이러한 조사는 기존 모니터링 자료를 토대로 N:P ratio를 분석한 결과라는 한계가 내재하고 있고, 광 제한과의 비교 평가가 이루어지지 않았다. 따라서 광도와 제한 영양염에 대한 상대적 중요성을 파악하기 위해서는 광 및 영양염 제한을 표현하는 수식을 이용하는 지수 평가와 같은 직접적이고 복합적인 연구가

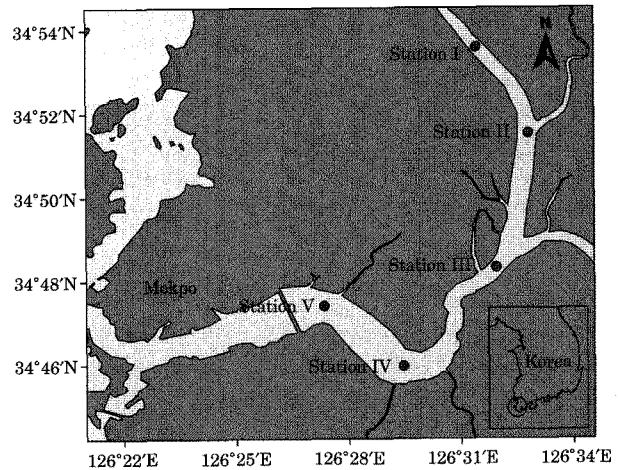


Fig. 1. Sampling stations located along the channel of Youngsan Lake.

필요한 실정이다. 이러한 연구는 영산호에서는 처음 시도되는 것으로 영양염의 농도와 탁도가 동시에 높게 나타나는 영산호에서 수질과 수중 생태계에 큰 영향을 미치는 식물플랑크톤의 성장을 조절하는 광도와 영양염에 대한 상대적 중요도를 파악함으로써 효율적인 수질 및 생태계 관리를 위한 자료를 제공하고자 한다.

재료 및 방법

1. 현장조사

식물플랑크톤의 chlorophyll *a*, 환경인자들을 파악하기 위해 영산호의 채널(channel)을 따라가며 2003년 3월부터 2004년 4월까지 월별(11월~1월 제외)로 5개 정점에서 선상채집을 실시하였다(Fig. 1). 조사 지점의 식물플랑크톤 현존량, 화학적 특성을 조사하기 위해 니스킨 채수기를 이용해 수심 0.5 m 지점과 바닥으로부터 0.5 m 떨어진 수심에서 채수하였다. 수온, 염분, 용존산소(DO)는 YSI Model 85를 사용하여 측정하였다. 물리, 화학적 특성의 분포는 3개 정점 즉 Station I, III, V에 대한 결과만을 제시하였다.

2. 실험실 분석

식물플랑크톤의 현존량을 나타내는 chlorophyll *a*를 크기별로 측정하기 위해, 2개(net-, micro-size)의 크기 즉 대형식물플랑크톤(>20 μm), 미소형식물플랑크톤(<20 μm)으로 분류하였다. 전체 식물플랑크톤의 chlorophyll *a* 농도를 측정하기 위해 펌프(<120 mm Hg)를 이용하여 시료

50~100 mL를 유리섬유여과지(GF/F filter, 직경 25 mm, Whatman®, pore size 0.7µm)로 여과 하였다. 또한 크기 구분을 위하여 20µm Nutex® mesh로 여과한 후 여액을 위의 방법(chlorophyll *a* 농도를 측정을 위한 여과방법)으로 유리섬유여과지를 이용하여 여과하였다. 이러한 여과는 각 지점에서 2회씩 시행하였다.

사용된 각각의 여과지들을 클로로필 추출용매인 90% 아세톤(Acetone) 8 mL가 담긴 차광 시험관에 넣고 12시간 이 지난 후 24시간 이내로 Turner Designs® 10-AU fluorometer를 사용하여 chlorophyll *a*를 측정하였고, 직후 2N 염산(HCL)을 2~3방울 추가해서 산성화(acidification)에 따른 pheopigments의 양을 측정하여 Chl:Phaeo index (chlorophyll *a* : pheopigments)를 계산하였다. 일반적으로 상위소비자가 식물플랑크톤을 섭식한 후 pheopigments를 배설하거나 또는 어두운 채 장시간 노출되는 등의 환경악화로 인해 phytoplankton 자체에서 pheopigments를 생성하기 때문에 chlorophyll *a*와 pheopigments의 비를 통해 섭식의 포식압 내지는 자가 산화 정도를 간접적으로 측정할 수 있다(Welschmeyer and Lorenzen, 1985). Index가 작으면 포식압 내지는 자가 산화 정도가 높다는 간접적 의미를 나타낸다고 할 수 있다.

표층과 저층으로부터 채수된 일정량의 물을 0.45µm Gelman Supor로 여과한 다음, 영양염(ammonium, nitrite +nitrate, orthophosphate, dissolved silica) 분석을 위해 여액을 20 mL plastic scintillation vial에 넣어 dry ice에 냉동 운반하여 -20°C로 냉동 보관하였고, Parsons *et al.* (1984)에 준하여 AutoAnalyzer (Bran Luebbe®)를 이용하여 분석하였다.

3. 제한지수 및 통계 조사

광 제한지수(light limitation index) 개발을 위해 DiToro *et al.* (1971)의 수식을 사용하였다.

$$LtLim = \frac{e \times f}{k_d \times z} \left(e^{-\frac{I_m}{I_o} \cdot e^{-k_d z_1}} - e^{-\frac{I_m}{I_o}} \right)$$

f=the fraction of photoperiod

k_d=light attenuation coefficient (m⁻¹)

z₁=water depth (m)

I_m=incident average light (µmol m⁻² s⁻¹)

I_o=optimal light (µmol m⁻² s⁻¹)

일조시간(photoperiod)은 목포지역 기상청의 자료(2003~2004)를 이용하였고 수중의 광량을 측정하기 위해 수심

10, 35, 60, 85, 110 cm에서 LICOR® PAR Quantum Radiometer를 사용해 측정하였다. 탁도를 나타내는 광 소멸계수(light attenuation coefficient) 계산은 Beers Law(*I_z*=*I_o* e^{-k_dz})를 이용하였다. 혼합층 깊이(*z₁*)는 수온의 수직분포를 바탕으로 4 m로 선정하여 모든 정점에 일률적으로 적용하였다. 광량(*I_m*)은 각 정점에서 측정된 air solar radiation값을 이용하였고 적정광도(*I_o*)는 문헌자료(Sin and Wetzel, 2002)를 참조하여 조사기간 중 최대값의 중간값인 1,500 µmol m⁻² s⁻¹으로 선정하였다.

영양염 제한지수(nutrient limitation index) 개발을 위해 Monod (1942) 수식을 이용하였다.

$$LtLim = \min \left(\frac{N}{K_N + N}, \frac{P}{K_P + P} \right)$$

N, P=Concentration of nitrogen and phosphorus in water

K_N, K_P=Half-saturation constants for N and P

각 정점의 질산 및 아질산, 암모니아 농도를 질소(N)로, 인산염을 인산(P)으로 산정하여 계산하였고 질소, 인산염 반포화상수는 영산호를 대상으로 조사된 문헌 자료(국립환경과학원, 2007)를 이용하였다(*K_N, K_P*=질소, 인산염 반포화상수). 광 제한 및 영양염 제한 지수는 1에 가까울수록 제한의 정도가 낮아지고 0에 가까울수록 제한 정도가 높아진다. 산출된 제한 지수들과 크기별 식물플랑크톤 생체량(chlorophyll *a*) 및 환경인자들에 대한 상관성은 Pearson's correlation analysis를 이용하여 분석하였다.

결 과

1. 물리, 화학적 특성

강우는 전형적인 몬순 기후로 여름철인 풍수기(7~8월)에 최대치를 기록하였고 나머지 계절에는 낮은 강우량을 나타냈다(Fig. 2A). Station I에서 현장조사 일자에 측정된 광량의 경우, 7월에 최대치(3,083 µmol s⁻¹ m⁻²)를 보였고 2004년 2월에 최소치(536 µmol s⁻¹ m⁻²)를 보였다(Fig. 2B). 조사일자의 일조시간은 5월에 12.3시간으로 최대치였고 8월에 2.3시간으로 최소치를 보였다.

조사기간 동안 암모니아, 아질산+질산, 인산염은 각각 0.002~4.28 mg L⁻¹, 0.002~0.46 mg L⁻¹, 0.003~3.27 mg L⁻¹의 농도 범위를 보였다. 상류정점인 Station I에서 영양염 암모니아는 2003년도에는 낮은 농도를 보이다가 2004년도에 높아지는 경향을 보였고, 아질산+질산의 경우는

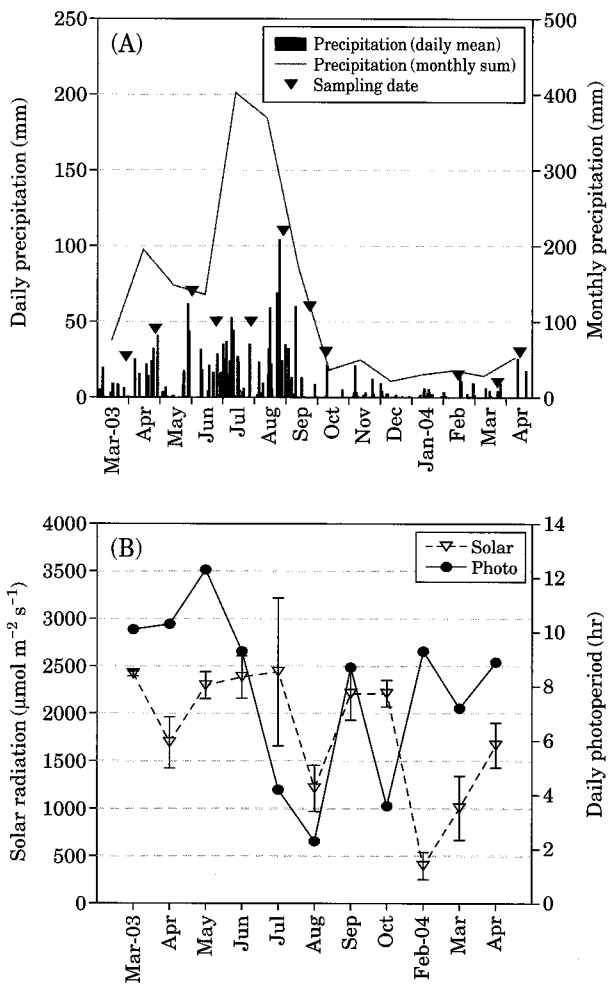


Fig. 2. Temporal variations of daily/monthly sum of precipitation or rainfall (A), and solar radiation and daily of photo-period (B) in Mokpo, Jeonnam.

2003년 2월에 0.46 mg L^{-1} 로 최대값을 보이다가 점차 감소하는 경향을 보였다(Fig. 3A). 인산염의 경우는 전체적으로 2004년 3월에 2.4 mg L^{-1} 로 최대값을 보였고 2003년에는 다소 낮은 농도를 나타냈다. 중류 정점인 Station II에서도 상류정점과 유사한 경향을 보였고, 하류정점인 Station III에서는 암모니아와 인산염이 2004년 4월에 각각 4.1 mg L^{-1} 와 3.3 mg L^{-1} 로 최대값을 보인 것을 제외하고 상류 정점들과 유사한 경향을 보였다.

2. 식물플랑크톤 변동

조사기간 동안 식물플랑크톤의 전체 클로로필 농도는 2004년 4월에 Station V 표층에서 $0.9 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 최소 농도를 보였고 동년 2월에 Station III의 표층에서 $128 \mu\text{g L}^{-1}$

의 최대값을 보였다. 영산호 상류 정점인 Station I의 표층에서 대형(net-size) 식물플랑크톤의 클로로필 농도는 2003년 10월에 $42 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 최대값을 보였고, 4월에 $0.3 \mu\text{g L}^{-1}$ 으로 최소값을 보였다(Fig. 4A). 이 정점에서는 표층과 저층의 클로로필 농도가 유사하게 나타났다. 중류에 위치한 Station III에서는 2003년 3월에 $45 \mu\text{g L}^{-1}$ 으로 최대값을 보였고 2004년 2월에도 다소 높은 농도($34 \mu\text{g L}^{-1}$)를 보였으며, 상류정점과 유사하게 4월에 $0.8 \mu\text{g L}^{-1}$ 으로 가장 낮은 농도를 나타냈다(Fig. 4B). 하류 정점인 Station V에서는 클로로필 농도가 최대값($34 \mu\text{g L}^{-1}$)을 기록한 2004년 3월을 제외하고는 전반적 낮은 농도를 보였다(Fig. 4C). 중, 하류의 정점들에서는 대발생시에 표층과 저층의 클로로필 농도가 현저한 차이를 나타냈다. 소형(nano-size) 식물플랑크톤의 경우, 상류 정점(Station I)에서는 2004년 2월에 $50 \mu\text{g L}^{-1}$ 으로 높은 현존량을 보였고 8월에 최저치($3.8 \mu\text{g L}^{-1}$)를 보였다(Fig. 3C). 중류와 하류 정점(Station I, III)에서는 2월에 최대치(각각 $94 \mu\text{g L}^{-1}$, $41 \mu\text{g L}^{-1}$)를 보였지만 2004년 4월에 최저치($2.9 \mu\text{g L}^{-1}$, $0.9 \mu\text{g L}^{-1}$)를 보였다(Fig. 4D, 4E). 표층과 저층의 현존량 차이 형태는 대형식물플랑크톤과 유사하게 나타났다.

포식이나 사멸을 간접적으로 나타내는 pheopigment index를 보면(Fig. 5), 대형식물플랑크톤은 표층에서 2004년 3, 4월을 제외하고 1.7보다 다소 낮거나 높은 지수를 보였고, 대발생의 시기에 지수 또한 높아지는 형태를 띠었다(Fig. 5A-5C). 이에 반해, 소형식물플랑크톤은 대형식물플랑크톤에 비해 전체적으로 낮은 지수를 보였고, 하류로 갈수록 낮아지는 경향을 보였다(Fig. 5D-5F).

3. 제한 지수 및 통계 분석

Station I의 광 제한 지수를 월별로 살펴보면(Fig. 6A), 2003년 8월에 0.01로 최소치를 보였고 2003년 3월에 0.12로 최대치를 보였다. 영양염 제한 지수는 9월에 0.31로 최소치, 2004년 4월에 0.96으로 최대치를 보였다. 중류 정점에서도 광 제한 지수는 8월에 0.005로 아주 낮은 지수를 보였고 2004년 4월에 0.16으로 높은 지수를 나타냈다(Fig. 6B). 영양염 제한 지수는 역시 9월과 2004년 4월에 0.26, 0.96으로 최소치와 최대치를 기록하였다. 하류 정점인 Station III은 8월에 0.007, 2004년 4월에 0.225라는 지수를 보였다(Fig. 6C). 영양염 제한지수는 다른 정점과 동일하게 9월(0.29)과 4월(0.96)에 최소지수와 최대지수를 나타냈다. 모든 정점을 평균하여 살펴보면(Fig. 7A), 광 제한 지수는 8월에 최소치(0.008)를 기록하였고, 7월에도 낮은 지수를 보여 풍수기에 광 제한 지수가 낮아지는 경향

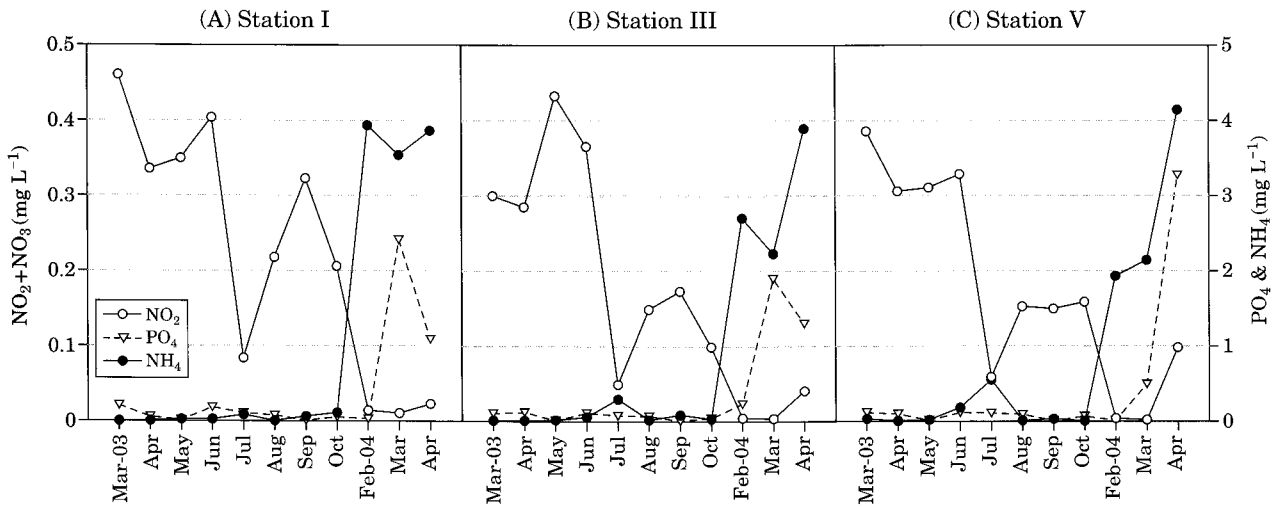


Fig. 3. Temporal distributions of ambient nutrient concentration for ammonium (NH_4^+), nitrite+nitrate ($\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$) and orthophosphate (PO_4^{3-}) in the surface water at Stations I, III and V.

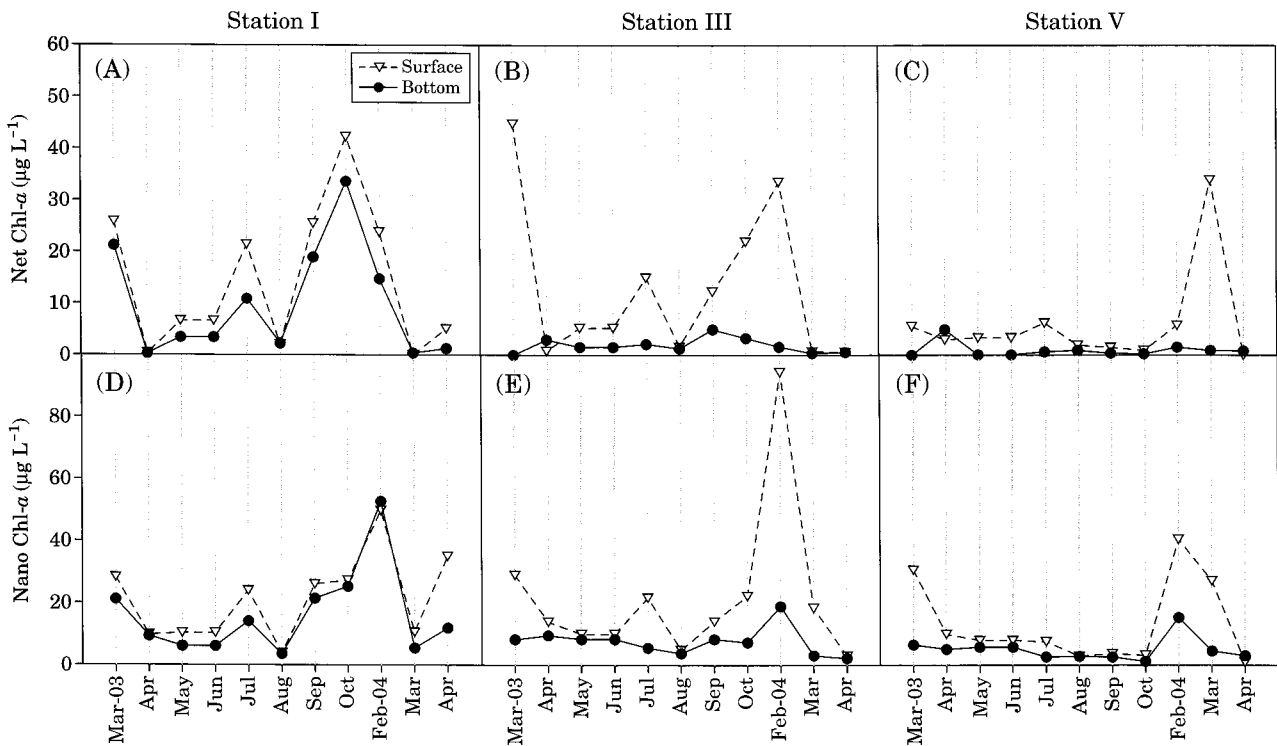


Fig. 4. Temporal variations of net-sized chlorophyll *a* (net-chl *a*), nano-sized chlorophyll *a* (nano-chl *a*) at Stations I, III and V along the axis of Youngsan Lake.

을 보였다. 영양염 제한 지수는 5월과 9월에 특히 낮은 지수를 보였다. 모든 계절에 대한 정점별 분포를 보면(Fig. 7B), 광 제한 지수는 하류로 갈수록 지수가 증가하는 뚜렷한 경향을 보였지만 영양염 제한 지수는 Station II에서

다소 감소하는 것을 제외하고 공간 변동이 크게 나타나지 않았다.

Table 1은 제한 지수들과 식물플랑크톤 현존량 및 여러 환경인자들과 상관관계를 분석한 결과이다. 광 제한 지수

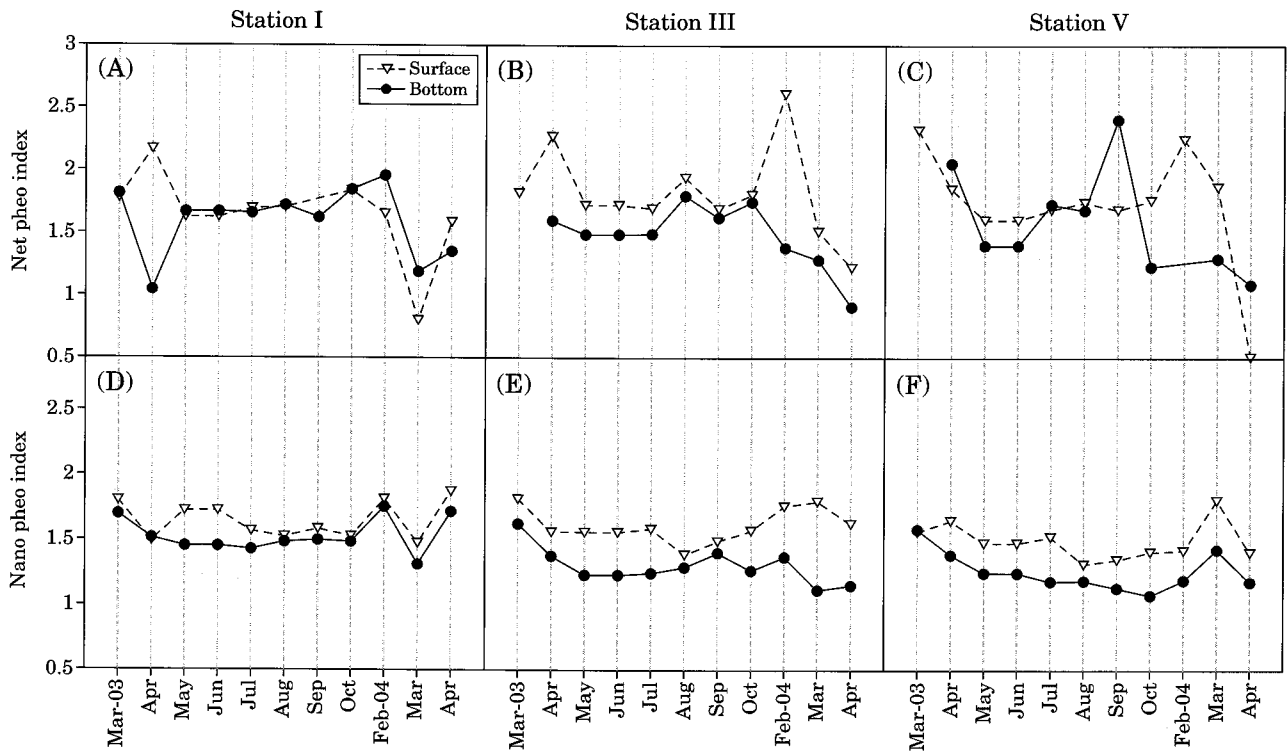


Fig. 5. Temporal variations of net-sized pheopigment index and nano-sized pheopigment index at Stations I, III and V along the axis of Youngsasan Lake.

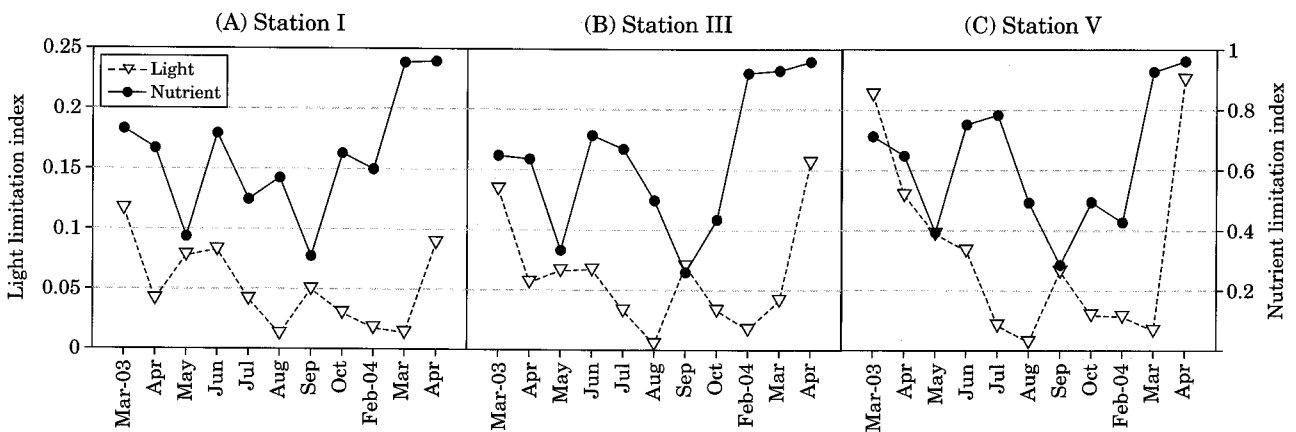


Fig. 6. Temporal variations of light limitation and nutrient limitation index in the surface water at the Stations I, III and V.

는 영양염 제한 지수, 일조시간, 인산염, 아질산+질산 등과 유의한($P < 0.05$) 양의 상관관계를 보였지만, 광소멸계수에 대해서는 유의한($P < 0.05$) 음의 상관관계를 보였다. 영양염 제한 지수는 nano-pheopigment index, 인산염, 암모니아와 유의한($P < 0.05$) 양의 상관관계를 보였고 net-pheopigment index, 수온, 광소멸계수, N:P비와 유의한($P < 0.05$) 양의 상관관계를 보였다.

고 찰

영산호에서 식물플랑크톤의 현존량은 풍수기보다는 갈수기인 봄철, 가을철 혹은 겨울철에 높은 것으로 나타났다 (Fig. 4). 포식이나 환경악화 정도를 간접적으로 나타내는 pheopigment index의 경우도 전체적으로 봄철과 여름철

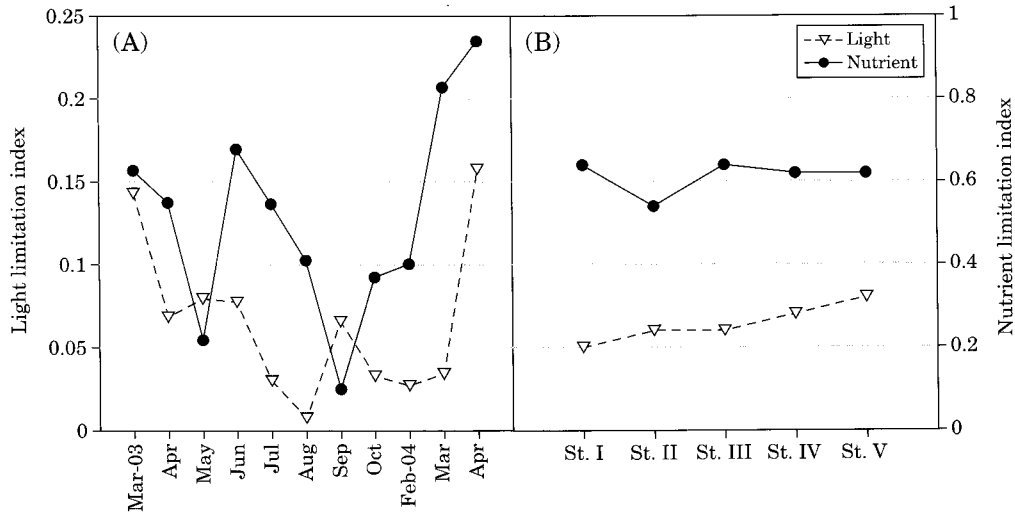


Fig. 7. Temporal (A) and spatial (B) variations of light limitation and nutrient limitation index averaged over all stations and periods of sampling in the Youngsan Lake.

Table 1. Results of correlation analyses for light and nutrient limitation index vs. fractionated chlorophyll *a* and other parameters. Correlation coefficient (*r*) less than 0.2 was not presented.

	L Lim	N Lim	Net	Nano	Net-P	Nano-P	Temp	Kd	Photo	Pre5	PO ₄	NH ₄	NO _x	N:P
L Lim	1	.29 ^a	-	-	-.26	.20	-.20	-.64 ^b	.53 ^b	-.20	.37 ^b	.20	.33 ^a	-
N Lim		1	-	-	-.32 ^a	.37 ^b	-.28 ^a	-.37 ^b	-	-.20	.63 ^b	.48 ^b	-.20	-.37 ^b
Net			1	.55 ^b	.24	.42 ^b	-.26	-	-	-.40 ^b	-.20	-	-	-
Nano				1	.32 ^a	.42 ^b	-.63 ^b	-.20	.20	-.44 ^b	-	.33 ^a	-.27 ^a	.50 ^b
Net-P					1	-	-	.30 ^a	-	-	-.53 ^b	-.36 ^b	.23	-
Nano-P						1	-.38 ^b	-.20	.28 ^a	-.35 ^b	.20	.25	-	-
Temp							1	.34 ^a	-.35 ^a	.42 ^b	-.25	-.61 ^b	.26	-.31 ^a
Kd								1	-.23	.59 ^b	-.44 ^b	-.40 ^b	-	-
Photo									1	-	-	-	.44 ^b	-
Pre5										1	-.20	-.33 ^a	.27 ^a	-
PO ₄											1	.67 ^b	-.37 ^b	-
NH ₄												1	-.66 ^b	.30 ^a
NO _x													1	-.20
N:P														1

^aP<0.05, ^bP<0.01

L Lim=light limitation index; N Lim=nutrient limitation index; Net, Nano=net- and nano-sized chlorophyll *a*; Net-P, Nano-P=Net- and Nano-sized pheopigment index; Temp=water temperature; Kd=light attenuation coefficient; Photo=photoperiod; Pre5=mean precipitation for 5 days before the sampling date; NO_x=nitrite+nitrate; N:P=DIN/DIP

에 다소 낮았고 특히 nano-size의 경우는 풍수기인 7월과 8월에 낮은 지수를 보여(Fig. 5) 이 기간 동안 식물플랑크톤의 성장조건이 악화되었음을 암시한다. 또한 2004년 봄철에는 중류 및 하류정점인 Station III, V에서 지수가 상당히 감소하였고 식물플랑크톤의 현존량 또한 매우 낮게 나타나 포식이나 환경악화가 식물플랑크톤의 성장에 영향을 주었음을 예상할 수 있다. 광 제한 정도를 나타내는 광 제한 지수 역시 풍수기 특히 8월에 매우 낮게 나타나(Fig. 6) 광 제한으로 식물플랑크톤의 성장이 저해되고 있고, 영

양염에 의한 제한은 완화되어 영양염은 식물플랑크톤의 성장에 미치는 영향이 상대적으로 적음을 알 수 있다. 특히 상류의 경우 높은 탁도 외에도 강우시의 담수 유입으로 인해 체류시간이 상대적으로 짧아져 식물플랑크톤의 현존량이 감소할 가능성이 있을 것으로 사료된다. 대형, 소형 식물플랑크톤 모두 현장조사 5일전 강우량과 유의한 음의 상관관계를 보인 것은 이러한 가능성을 보여주는 결과라 할 수 있다. 풍수기에 유입되는 담수로 인해 높아진 탁도와 체류시간의 변화가 식물플랑크톤의 변동에 미치는

영향은 과거에 보고된 바 있다(Sin *et al.*, 1999; Murrell *et al.*, 2007). 식물플랑크톤의 크기 구조에서 대형(net) 식물플랑크톤의 변동은 광 제한 지수의 분포와 좀 더 밀접한 관계가 있는 것으로 보이지만(Figs. 4, 6) 상관성 분석에서는 뚜렷한 경향을 보이지 않았다. TSI(trophic state index)로 조사된 선행연구(이 등, 2006)에서도 영산호에서 전체 식물플랑크톤은 광 제한에 의해 조절될 수 있다고 제시된 바 있다. 식물플랑크톤이 이용 가능한 광량은 수층의 탁도, 그리고 일조시간과 밀접한 관계를 갖는데 실제 조사 결과에서도 광 제한 지수가 광소멸계수($r = -0.64$, $P < 0.01$), 일조시간($r = 0.53$, $P < 0.01$)과 유의한 상관성을 보였다. 강우량과도 유의하지는 않았지만 음의 상관성($r = 0.20$, $P < 0.1$)을 보였다. 광 제한과 영양염 제한 지수는 서로 양의 상관관계($r = 0.29$, $P < 0.05$)를 보이는 것은 영산호에서 광과 영양염 제한이 동시에 발생하여 식물플랑크톤의 변동에 영향을 미칠 수 있음을 암시한다.

전남지역에 위치하고 있는 영산호는 인근 산악지역에 위치한 동북호나 주암호와는 달리 연안지역에 인접해 있으며 호소의 상류와 하류에 물의 흐름이 존재하는 강과 유사한 형태를 띠고 있다. 또한 유역의 토지 이용의 형태도 상이하여 영산강 유역에서는 농업폐수 및 생활하수 등의 오염원 비율이 상대적으로 높은 편이다(차 등, 1999; 윤 등, 2003). 이러한 환경적 요인으로 영산호는 동북호나 주암호에 비해 영양염이 전체적으로 상당히 높은 편이고 인산염의 경우에는 수심 배가 높은 것으로 보고되었다(이 등, 2007). 물론 이렇게 높은 영양염으로 인해 조사된 모든 정점에서의 영양염 제한 지수는 5월과 9월을 제외하고는 0.4 이상의 높은 지수를 보였다(Fig. 7). 인근 호소인 동북호나 주암호를 대상으로 선행적으로 보고된 0.2 미만의 영양염 제한 지수(영산강·섬진강수계관리위원회, 2008)에 비하여 두 배 정도 높은 지수를 나타냈다. 하지만 전체적으로 높은 영양염 농도에도 불구하고 영양염 제한 지수가 nano-pheopigment index와 유의한 상관성($r = 0.37$, $P < 0.01$)을 보여 부분적으로 발생하는 낮은 영양염이 제한 영양염으로 작용하여 소형 식물플랑크톤의 성장을 저해할 수 있는 가능성을 보여주고 있다. 특히 영양염 제한 지수가 인산염($r = 0.63$, $P < 0.01$)과 암모니아($r = 0.48$, $P < 0.01$)와 상관성을 보임으로서 인산염과 암모니아가 소형 식물플랑크톤의 성장에 미치는 영향이 상대적으로 크다고 할 수 있다. 이러한 결과는 영양염 유입에 대한 반응이 크기별로 다르게 나타날 수 있음을 암시하고 이러한 크기별 반응은 다른 수계에서도 보고된 바 있다(Froneman, 2004; Nayar *et al.*, 2005)

대형 및 소형 식물플랑크톤의 현존량과 pheopigment

index가 4월에는 대부분 매우 낮은 수치를 보이고 있는 반면, 광 및 영양염 제한 지수들은 상대적으로 높은 수치를 보이고 있어(Figs. 4, 6), 광과 영양염 제한으로 인한 환경 악화보다는 포식압 상승이 현존량을 조절할 가능성이 존재한다. 김과 이(2007)는 영산호의 동물플랑크톤 밀도가 섬진강의 밀도보다 높게 나타났고 섭식율도 10배에서 40배정도 높았다고 보고한 바 있다. 또한 동물플랑크톤의 밀도가 4월에 갑자기 증가하는 경향을 보여주고 있어 이 시기의 동물플랑크톤 포식이 영산호 식물플랑크톤의 현존량에 영향을 줄 수 있을 것으로 사료된다.

결론적으로 식물플랑크톤 현존량에 대한 광 제한과 영양염 제한은 크기별로 상대적 중요성이 다르게 나타나고 이들 제한이 동시에 나타날 수 있는 가능성을 보였다고 할 수 있다. 제한된 결과이기는 하지만 선행 및 본 연구 결과를 고려했을 때, 영양염 제한보다는 광 제한이 영산호의 식물플랑크톤의 현존량에 미치는 영향이 상대적으로 클 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 2007년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2007-001-D00011).

적 요

담수호인 영산호의 식물플랑크톤에 대한 광 제한과 영양염 제한의 영향을 파악하기 위해 2003년 3월부터 2004년 4월까지(11월~12월 제외) 월별조사를 실시하였다. 식물플랑크톤의 크기를 대형(net-size)과 소형(nano-size)으로 구분하여 클로로필, pheopigment ratio를 측정하였고 물리적, 화학적 환경특성을 측정하였다. 또한 광 제한 지수와 영양염 제한 지수를 산정하기 위해 기존 문헌의 수식을 이용하였다. 식물플랑크톤은 대형과 소형 모두 풍수기 특히 8월에는 낮은 현존량을 보였고 나머지 계절에 간헐적으로 현존량이 증가하는 형태를 보였다. 일조시간은 풍수기에 짧았고 갈수기에 증가하였고, 영양염 특히 인산염과 암모니아는 2004년 봄철에 상당 폭 증가하였다. 광 제한 지수는 풍수기 특히 8월에 최소값(0.01)을 기록하였고, 영양염 제한 지수는 5월과 9월을 제외하고 다소 높은 지수(>0.4)를 나타냈다. 영산호는 인근 호소들보다 영양염 농도가 높은 점을 고려했을 때, 영양염 제한보다는 광 제한이 식물플랑크톤의 성장에 더 영향을 미칠 것으로 사료된다. 공간적으로는 광 제한 지수는 하류로 갈수록 증가하였

지만 영양염 제한 지수는 큰 변동을 보이지 않았다. 상관성 분석에서 net-pheopigment index는 광 제한 지수 및 영양염 제한 지수와 음의 상관관계, nano-pheopigment index는 제한 지수들과 양의 상관관계를 보여 환경악화로 인한 영향이 식물플랑크톤의 크기별로 상이하게 나타날 수 있는 가능성을 보여준다.

인 용 문 헌

국립환경과학원. 2007. 영산강수계 수중생태계 수질모델인자조사. 최종보고서.

김법철, 박주현, 허우명, 임병진, 황길순, 최광순, 최종수. 2001. 국내 주요 호수의 육수학적 조사(4). 한국육수학회지 **24**(1): 30-44.

김현우, 이학영. 2007. 하구언 댐 유무에 따른 강 생태계에서의 동물플랑크톤 동태의 차이. 한국육수학회지 **40**(2): 273-284.

신용식, 이창희, 조기안, 송은숙. 2005. 국내 연안 하구역의 식물플랑크톤 생체량(chlorophyll *a*) 및 수질 동향. 한국육수학회지 **38**(2): 160-180.

영산강·섬진강수계관리위원회. 2008. 수계별 호소환경 및 생태조사-영양물질 순환조사 및 1단계 연계 내용. 영산강·섬진강수계 2008년도 환경기초조사사업 최종보고서.

윤석태, 고영구, 오강호, 문병찬, 김해경. 2003. 영산강 하류권역 하천수의 수질 평가. 환경영향평가 **12**(4): 259-270.

이상현, 신용식, 장남익, 김종민, 김현구, 조영관, 정진. 2006. 섬진강·영산강 수계 주요 호소의 수질 동향과 영양상태 조사. 한국육수학회지 **39**(3): 296-309.

이항화, 신용식, 양성렬, 장남익, 김동호. 2007. 섬진강·영산강 수계 주요 호소의 식물플랑크톤 크기구조와 일차생산력. 한국육수학회지 **40**(3): 419-430.

차진명, 신성의, 차규석. 1999. 영산강 수계의 비점오염원에 관한연구 I-토지이용 및 강우를 중심으로-. 환경영향평가 **8**(4): 41-49.

Becker, V., V.L.M. Huszar and L.O. Crossetti. 2009. Response of phytoplankton functional groups to the mixing regime in a deep subtropical reservoir. *Hydrobiologia* **628**: 137-151.

Cermeño, P., E. Marañoń, V. Perez, P. Serret, E. Fernandez and C.G. Gastro. 2006. Phytoplankton size structure and primary production in a highly dynamic coastal ecosystem (Ría de Vigo, NW-Spain): Seasonal and short-time scale variability. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **67**: 251-266.

DiToro, D.M., D.J. O'Connor and R.V. Thomann. 1971. A dynamic model of the phytoplankton population in the sacramento San Joaquin Delta. In: *Advances in Chemistry Series, Vol. 106, Am. Chem. Soc., Washington, D.C.,*

pp. 131-180.

Domingues, R.B., A. Barbosa and H. Galvão. 2005. Nutrients, light and phytoplankton succession in a temperate estuary (the Guadiana, south-western Iberia). *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **64**: 249-260.

Epply, R.W. 1972. Temperature and phytoplankton growth in the sea. *Fish. Bull.* **70**(4): 1063-1085.

Froneman, P.W. 2004. Food web dynamics in a temperate temporarily open/closed estuary (SouthAfrica). *Estuar. Coast. Shelf Sci.* **59**: 87-95.

Hyun, N.K., G.S. Hwang, B.C. Kim and K.S. Kim, 2001. Primary productivity of phytoplankton at the Eutrophic down Reach of regulated river (the Han River, Korea). *Korean Journal of Limnology* **34**(4): 267-26.

Jeon, S.I. and K.J. Cho. 2004. Primary productivity of phytoplankton in the Shallow and Hypertrophic River (Seonak-dong River). *Korean Journal of Limnology* **37**(1): 56-63.

Monod, J. 1942. Recherches sur la croissance des cultures bacteriennes. *Actualités Scientifiques Et Industrielles.* Hermann Paris.

Murrell, M.C., J.D. Hagy III, E.M. Lores and R.M. Greene. 2007. Phytoplankton production and nutrient distributions in a Subtropical estuary: Importance of freshwater flow. *Estuaries Coasts.* **30**: 390-402.

Nayar, S., B.P.L. Goh and L.M. 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, 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.

Piirsoo, K., P. Pall, A. Tuvikene and M. Viik. 2008. Temporal and spatial patterns of phytoplankton in a temperate lowland river (Emajõgi, Estonia). *J. Plankton Res.* **30**: 1285-1295.

Sin, Y., R.L. Wetzel and I.C. Anderson. 1999. Spatial and temporal characteristics of nitrite and phytoplankton dynamics in the York River, Virginia: analysis of long-data. *Estuaries* **22**: 260-275.

Steinman, A., X. Chu and M. Ogdahl. 2009. Spatial and temporal variability of internal and external phosphorus loads in Mona Lake, Michigan. *Aquat. Ecol.* **43**: 1-18

Welschemeyer, N.A. and C.J. Lorenzen. 1985. Role of herbivory in controlling phytoplankton abundance: Annual pigment budget for a temperate marine fjord. *Mar. Biol.* **90**: 75-86.

(Manuscript received 18 December 2009, Revision accepted 28 January 2010)