

생물검정실험에 의한 섬진강 하구역 식물플랑크톤 성장의 제한영양염 평가

권기영⁺ · 김창훈* · 강창근** · 문창호 · 박미옥 · 양성렬***
 부경대학교 해양학과, *부경대학교 양식학과, **국립수산과학원 환경관리과
 ***광주대학교 토목환경공학부

Limiting Nutrients for Phytoplankton Growth in the Seomjin River Estuary as Determined by Algal Bioassay Experiment

Kee-Young KWON⁺, Chang-Hoon KIM*, Chang-Keun KANG**, Chang-Ho MOON
 Mi-Ok PARK and Sung Ryull YANG***

Department of Oceanography, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

*Department of Aquaculture, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

**National Fisheries Research & Development Institute, Kijang-Gun, Busan 619-902, Korea

***Division of Civil and Environmental Engineering, Kwangju University, Gwangju 503-703, Korea

Limiting nutrients for phytoplankton were determined by dissolved inorganic nitrogen/phosphorous (DIN/DIP) *in situ* and algal bioassay experiment in the Seomjin River estuary during a study period from March 1999 to October 2001. DIN/DIP ranged from 14.7 to 681.1 during the study period. DIN/DIP was over 16 at the upper and middle estuarine region where salinity was lower than 25 psu and chlorophyll *a* concentration was high, probably indicating P-limitation in this region, while the ratio was less than 16 at the high saline (>25 psu) region, reflecting the supply of DIP from Gwangyang Bay and thereby indicating N-limitation at the lower estuarine region. These results suggested that the spatial distribution of DIN/DIP in the study region was controlled by the high supply of phosphate from Gwangyang Bay, the low input from Seomjin River and the active uptake by phytoplankton within the estuarine system. The bioassay experiments using *Skeletonema costatum*, *Thalassiosira rotula* and *in situ* phytoplankton assemblage displayed relatively higher growth of phytoplankton in the P-added culture media, indicating P-limitation. This result was well consistent with the spatial distribution of inorganic nutrients. *S. costatum* showed a rapid adaptation to the low salinity compared to other phytoplankton species. This phenomenon seemed to account for the strong (>90% in total cell number) *S. costatum* bloom in autumn in this estuary. Moreover, although phytoplankton growth rate was higher in the P-added culture media at the end of culture experiment of *in situ* phytoplankton, the fast growth in the trace metal-added media at the beginning of the experiment suggested a possibility of limitation by other micro-nutrients such as trace metal and vitamin etc.

Key words: Limiting nutrient, DIN/DIP, Algal bioassay, Seomjin River estuary

서 론

수중의 일차생산자인 식물플랑크톤은 영양염, 광량 및 온도 등 무생물환경의 변화에 의해 영향을 받으며, 식물플랑크톤 성장은 빛과 온도가 적절할 때 영양염 양에 의해 제한되어진다고 알려져 있다. 이 중 식물플랑크톤의 성장을 제한하는 주요 영양염은 용존 무기질소와 인산 인이며 (McCarthy, 1980; Nalewajko and Lean, 1980), 용존무기질소는 주로 해양에서 (Howarth, 1988; Hecky and Kilham, 1988; Mahoney, 1989), 그리고 인산 인 (Schindler, 1977) 은 주로 담수에서 식물플랑크톤의 성장을 제한하는 주요 영양염이다. 그러나, 강물을 통해 유입되는 담수와 해수의 혼합이 계절적으로 변화하는 하구역에서는 식물플랑크톤의 제한 영양염이 계절적으로, 그리고 공간적으로 크게 변화하며 (D'Elia et al., 1986; Caraco et al., 1987; Webb, 1988; Harrison et al., 1990), 하구역 주변에 발달한 대도시와 공장에서 과도하게 배출되는 인위적인 영양염 유입에 의해서도 하구역의 제한영양염 양상은 크게 변화하게 된다 (Fisher et al., 1992).

식물플랑크톤 성장의 제한영양염을 판단하기 위한 방법으로는 용존무기질소와 인산 인의 비 (N/P 비)를 측정하는 것이 가장 간단한 방법으로 많이 이용되고 있으나, 용존무기질소 및 용존 무기인의 농도가 아주 낮은 경우 측정오차로 인해 잘못된 해석을 내릴 수 있다 (Lee et al., 2001). 또한, 단편적인 영양염과 생물학적 분석만으로는 종의 출현, 성장 및 천이 등의 현장 식물플랑크톤 동태에 따른 화학 성분의 민감한 변화를 판단해 내기는 매우 어려우며 (Smayda, 1974), 앞서 언급한 바와 같이 환경변화가 심한 하구역에서의 제한영양염을 판단하는 것은 더욱 어려울 것이다.

이에 비해, 현장 수 (water)에 영양염을 첨가하고 식물플랑크톤을 현장 또는 실험실에서 배양하는 생물검정실험 (algal bioassay) 방법은 제한영양염을 직접적이고 간단하게 판단할 수 있도록 해주며 (Mahoney, 1989), 주변 해수의 영양염 분석과 식물플랑크톤 현존량만으로는 판단하기 어려운, 식물플랑크톤 성장을 조절하는 제한 영양염, 미량금속 그리고 비타민 등에 대한 정보를 얻을 수 있다 (Smayda, 1974; Hitchcock and Smayda, 1977). 이외에 제한영양염을 판단하기 위한 방법으로는 Mesocosm, Nutrient turnover time 그리고 Alkaline phosphatase activity 등을 이용한 실험방법이 있으나 (Fisher et al., 1992), 현재로서는 제한 영양염을 검토하기 위한 일반적인 방법이라고 보기에는 어렵다 (Lee et al., 2001).

⁺Corresponding author: kwonky@mail1.pknu.ac.kr

한편, 하구역에서 식물플랑크톤 성장의 제한영양염을 판단하는 것은 하구역 및 인접 연안역의 부영양화 기작을 이해하고 수질관리 기술을 개발하는데 있어 중요한 정보를 얻을 수 있다 (Lee, 1997). 그러나, 하구역에서 제한영양염을 판단하기 위해 생물검정 실험을 이용한 연구는 해양 및 담수호에서의 연구에 비해 비교적 적은 실정이며 (Fisher et al., 1992), 국내에서는 영양염의 N/P 비를 이용하여 제한영양염을 판단한 연구는 매우 많으나, 생물검정 실험을 이용한 방법은 광양만에서 생물검정 실험을 통해 식물플랑크톤증식의 제한영양염이 용존무기질소라고 밝힌 Lee et al. (2001)과 사랑도 연안에서 조류성장잠재력 시험을 통한 *Cochlo-dinium polykrikoides* 적조의 제한영양염을 조사한 Kim et al. (2001)의 연구이외에는 비교적 소수에 불과하다. 특히, Lee et al. (2001)은 여천공업단지에 위치한 인산가공공장에서 유입된 다량의 인산 인에 의해 광양만은 제한영양염이 전반적으로 질소성분이 되며, 섬진강 하구역에 인접한 해역에서는 풍수기에 담수유입으로 인하여 인산 인이 제한영양염이 될 것으로 예측하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 강물 유입과 해수의 복잡한 혼합이 이루어지는 섬진강 하구역에서 염분경사에 따른 영양염의 N/P 비와 생물검정 실험을 이용하여 식물플랑크톤 성장의 제한영양염을 판단하고, 강물유량 및 식물플랑크톤 현존량의 변화에 따른 제한영양염의 변동특성을 살펴보는데 목적이 있다.

재료 및 방법

연구해역의 수리학적 특성에 대해서는 Kang et al. (2001), Kwon et al. (2001a, b), Park et al. (2001) 등의 연구에 상세히 보고되었으며, 본 연구와 동시에 분석된 염분, 유량, 염류속 α 의 계절적 변동 양상은 Kwon et al. (2002)에 의해서 자세히 보고되었다.

영양염의 N/P 비 변동 파악을 위해서는 섬진강 하구역에서 염분경사에 따라 1999년 3월부터 2000년 10월까지 총 12회에 걸쳐 조사를 하였으며, 생물검정 실험은 2000년 10월, 2001년 4월, 8월 및 10월 총 4회의 시료수를 이용하여 실험하였다.

영양염의 시료채취 방법은 섬진강 하구 남동쪽에 위치해 있는 난초도에서부터 담수와 해수가 처음 만나는 지점까지 섬진강 본류를 따라 올라가면서 시료를 채취하였으며 (Fig. 1), 조사정점은 지리적 위치보다는 각 조사시마다 염분을 현장에서 측정하여 결정하였다. 영양염 분석을 위해서는 선상에서 채수한 시료수 500 mL를 공경 0.45 μ m Whatman membrane 여과지로 여과한 후, 여과된 시료를 분석시까지 냉동 보관하였다. 영양염은 Strickland and Parsons (1972)의 비색법으로 아질산염 (nitrite), 질산염 (nitrate), 암모니아 (ammonia), 인산염 (phosphate)을 측정하였다.

생물검정 실험에 적용된 시료수는 2000년 10월의 5 psu (난초도로부터 21 km) 염분역, 2001년 4월의 30 psu (9 km) 염분역, 2001년 8월의 30 psu 및 10 psu (각각 0 km, 20.5 km) 염분역, 2001년 10월의 30, 15 및 5 psu (각각 0 km, 20 km, 23.5 km) 염분역의 시료수를 사용하였으며 (Fig. 1), 집중한 식물플랑크톤은 *Skeletonema costatum*과 *Thalassiosira rotula*를 사용하였다. 특히, 2001년

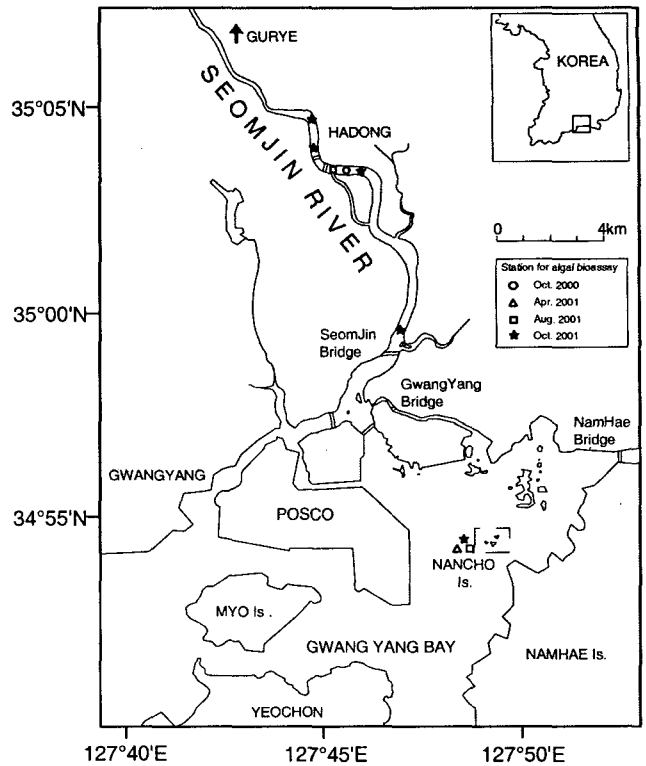


Fig. 1. Map showing the sampling locations for nutrient determination and algal bioassay experiment.

10월에는 현장 식물플랑크톤 배양을 위해서 30, 20, 15, 10 및 5 psu (각각 0 km, 12.5 km, 20 km, 22 km, 23.5 km) 염분역의 시료수를 이용하였다.

*S. costatum*과 *T. rotula*를 이용한 생물검정 실험은 현장에서 시료수를 채취하여 실험실로 운반한 후 공경 0.45 μ m membrane 여과지로 여과하였으며, 여과된 시료수에 영양염을 각각 첨가한 후 멸균처리하여 실험배지를 완성하였다. 각 영양염이 첨가된 배지를 22x150 test tube에 15 mL를 주입한 후, 미리 분리·배양한 식물플랑크톤을 접종하였다. 배양은 온도 20°C, 빛은 백색형광 등을 이용하여 2000~2500 lux, 14:10시간의 명암조건 하에서 정치배양을 하였으며, 매일 1회 손을 이용하여 시험관 바닥에 침전한 식물플랑크톤을 교반시켰다. 배양 식물플랑크톤의 성장곡선은 fluorometer (Turner Designs Model 10-AU-005)를 이용, 1~2일 간격으로 식물플랑크톤이 배양되고 있는 각 test tube에 대한 형광값 (fluorescence)을 측정하여 구하였으며, 각 실험은 3회 반복실험을 하였다.

배양에 사용된 식물플랑크톤은 섬진강 하구역에서 식물플랑크톤 net (입구 300 mm, 망목 20 μ m)를 이용하여 채집한 후, 실험실로 운반하였다. 채집된 시료에서 분리 (isolation)된 종은 무균 배양을 위하여 항생제 (Sigma Co.; No. P 0781, Penicillin-Streptomycin Sol.)를 처리한 후 (1/500 희석, 1일 방치), 30 psu의 해수에서 배양·보존하였다. 배양에 사용된 식물플랑크톤 종은 섬진강 하구역에서 가을철 bloom의 우점종인 *S. costatum* (Kwon et al., 2001a)과 형광측정시 형광값이 비교적 빠르게 안정되는 *T. rotula*

를 선택하였으며, 이 종들을 질소와 인이 결핍된 배지에서 1주일 정도 기아처리한 후, 안정기 상태에 도달한 세포들을 각 영양염 첨가계 배지에 접종하였다.

한편, 2001년 10월의 현장 식물플랑크톤을 이용한 생물검정실험을 위해서는, 영양염 첨가계의 경우, 선상에서 표층수를 0.45 µm membrane 여과지로 여과한 후, 10 mL를 22×150 test tube에 분주하였으며, 각 test tube에 영양염을 첨가하였다. 배양에 이용한 현장식물플랑크톤은 현장에서 식물플랑크톤 net로 채집한 후, 동물플랑크톤의 영향을 배제하기 위하여 망목 200 µm인 여과 net로 여과한 후, 각 영양염 첨가계에 접종하였으며, 실험실로 운반한 후, 특정식물플랑크톤 배양에서 적용된 배양조건에 따라 배양하였다.

각 영양염의 첨가계는 영양염을 첨가하지 않은 대조군 (Control), 질소 첨가계 (+N), 인 첨가계 (+P), 규소 첨가계 (+Si) 및 미량금속 첨가계 (+TM)를 설정하였다. 각 첨가계의 농도는 f/2 배지 (Guillard, 1975) 제조방법을 기준으로 하였다 (Table 1).

Table 1. Nutrient enrichment schedule and media used in the bioassay experiments (Based on f/2 medium; Guillard, 1975)

C	Control (sterilized & filtered water; not added)
+N	Control + 75 mg N/L as NaNO ₃
+P	Control + 5 mg P/L as NaH ₂ PO ₄ ·H ₂ O
+Si	Control + 3 mg Si/L as NaSiO ₃ ·9H ₂ O
+TM	Control + Trace Metal mix 4.36 mg Na ₂ EDTA/L 3.15 mg FeCl ₃ ·6H ₂ O/L 0.01 mg CuSO ₄ ·5H ₂ O/L 0.022 mg ZnSO ₄ ·7H ₂ O/L 0.01 mg CoCl ₂ ·6H ₂ O/L 0.18 mg MnCl ₂ ·4H ₂ O/L 0.006 mg Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O/L

결과 및 고찰

영양염 농도와 N/P 원자비

조사기간 동안 총 무기질소 (아질산 질소 + 질산 질소 + 암모니아 질소)의 농도는 평균 9.07~105.52 µg-at/L의 범위로, 갈수기에 낮고 풍수기에 높으며, 고염분역에 비해 저염분역에서 높은 양상이었다 (Table 2). 인산 인의 농도는 평균 0.27~1.34 µg-at/L의 범위로 계절변화와는 뚜렷한 연관이 없었으나, 대체로 총 무기질소와 달리 저염분역에 비해 고염분역에서 높은 양상이었다. 조사기간 동안 총 무기질소와 인산 인의 원자비 (N/P ratio)는 평균 14.7~681.1의 범위로, 2001년 2월에 34.4~1504.3의 범위로 월등히 높았으며, 2000년 4월에 1.2~41.2의 범위로 가장 낮았다 (Table 2). 염분에 따른 총무기질소와 인산 인 원자비의 분포양상은 대체로 저염분역에서 높고 고염분역에서 낮은 양상이었다 (Fig. 2). 1999년 11월에 5~15 psu 염분역, 2000년 10월에 0~18 psu 염분역, 2001년 2월에 20 psu 이하, 그리고 2001년 4월과 8월에 5 psu 이하 염분역에서 N/P 비값이 200 이상으로 매우 높았으며, 2000년 4월과 8월에는 전 염분역에서 50 이하로 낮았다. N/P 비가 16 이하로 나

Table 2. Mean values of dissolved inorganic nitrogen and phosphate concentrations and of DIN/DIP ratios in the surface water of Seomjin River estuary (Values in parentheses are ranges)

Month	DIN (µg-at/L)	PO ₄ -P (µ-at/L)	ΣN/P ratio
Mar. 1999	105.52 (53.55~126.83)	0.92 (0.60~1.42)	125.1 (37.7~175.0)
Jul. 1999	80.49 (70.58~87.67)	0.97 (0.88~1.06)	83.5 (66.6~99.6)
Sep. 1999	74.01 (23.27~96.79)	1.03 (0.88~1.20)	72.4 (21.0~99.2)
Nov. 1999	38.42 (14.58~60.90)	0.49 (0.09~1.20)	182.3 (12.1~512.1)
Mar. 2000	18.46 (2.01~56.29)	0.48 (0.18~1.01)	53.8 (3.5~127.8)
Apr. 2000	9.07 (1.04~23.93)	1.01 (0.18~2.29)	14.7 (1.2~41.2)
Aug. 2000	50.45 (25.41~61.94)	1.34 (1.05~1.78)	38.9 (18.6~50.6)
Oct. 2000	45.65 (16.24~56.83)	0.36 (0.09~1.05)	257.6 (16.9~578.7)
Feb. 2001	87.65 (29.54~150.43)	0.27 (0.09~0.86)	681.1 (34.4~1504.3)
Apr. 2001	24.55 (2.58~52.55)	0.57 (0.26~1.28)	101.3 (2.2~534.2)
Aug. 2001	70.17 (48.91~92.90)	0.58 (0.14~0.95)	165.5 (51.3~601.8)
Oct. 2001	53.25 (19.81~98.02)	1.09 (0.53~1.58)	65.3 (14.0~175.5)

타난 구간은 대체로 조사시작 지점인 난초도 부근 해역에 국한되었으며, 2000년 4월을 제외하면 시·공간에 관계없이 16 이상의 높은 비값을 나타내었다.

본 연구수역은 난초도 주변 해역을 제외하면 대부분이 강 하류에 위치하고 광양만에서의 유입을 제외하면 강 상류로부터의 인산 인의 뚜렷한 공급원이 없으므로 인해 25 psu 이하 염분역에서는 N/P 비가 높으며 전반적으로 계절에 관계없이 식물플랑크톤의 성장을 조절하는 제한 영양염은 인산 인인 것으로 판단된다. 그러나, 약 25 psu 이상의 염분역인 난초도 주변 해역은 광양만으로부터 공급되는 인산 인의 영향으로 인해 N/P 비는 16 이하로 낮아, 용존무기질소가 식물플랑크톤의 성장을 제한하는 것으로 판단된다. 이는 섬진강 하구에서 기초생산을 조절하는 영양염은 인산 인이라고 보고한 Kim (1992)의 결과와 일치하며, 강력한 인산 인의 점오염원에 의해 질산 질소가 제한 영양염으로 우세하게 나타나는 광양만에서 많은 양의 담수가 유입될 경우 섬진강 하구에 인접한 지역에서는 제한영양염이 인산 인이 될 것이라고 한 Lee et al. (2001)의 결과와도 일치한다. Lee et al. (2001)이 명시한 섬진강 하구 인접 지역은 본 연구의 난초도 주변 해역과 일치하고 있으며, 난초도 주변해역에서의 N/P 비는 갈수기에는 대체로 16 이하, 풍수기에는 16 이상의 비값을 나타내었다.

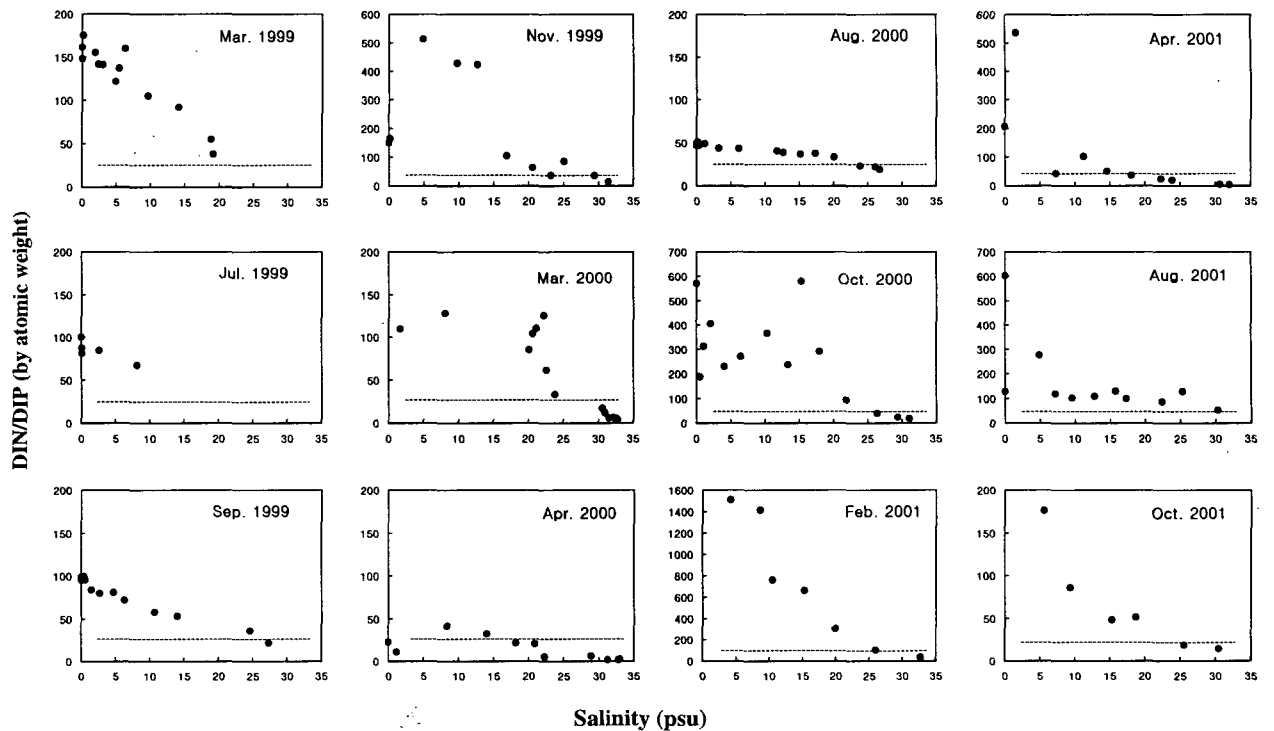


Fig. 2. Relationship of DIN/DIP ratio with salinity in the surface water of Seomjin River estuary (Broken lines indicate 16 as the Redfield ratio).

한편, 계절적인 N/P 비의 변화양상은 2000년 4월 및 8월의 전 염분역, 그리고 2001년 4월의 5 psu 이상 염분역에서 비교적 낮았으며, 1999년 11월 5~15 psu 염분역, 2000년 10월과 2001년 2월의 0~20 psu 염분역, 그리고 2001년 4월과 8월의 초저염분역에서 N/P 비가 약 200 이상으로 높아 계절에 따른 N/P 비는 복잡하게 변화하였다 (Fig. 2). 일반적으로 하구역의 영양염은 갈수기에 비해 풍수기에 주변 육상으로부터 집중적으로 유입되며, 세제를 포함하는 생활하수와 공장폐수를 배출하는 대도시와 공장지대가 없다면, 질소성분이 인산 인에 비해 상대적으로 많은 양이 유입된다. 또한, 해양에서 N/P 비는 낮고, 담수역에서는 N/P 비가 높은 것이 일반적이나 (Schindler, 1977; Howarth, 1988; Hecky and Kilham, 1988; Mahoney, 1989) 해수와 담수가 혼합되는 하구역에서는 N/P 비의 변화가 크며, 강물 유량에 따라 풍수기에는 높은 N/P 비, 갈수기에는 낮은 N/P 비를 나타내는 것이 일반적이다 (D'Elia et al., 1986; Caraco et al., 1987; Webb, 1988; Harrison et al., 1990). 미국 체사피크 만 (Chesapeake Bay)의 경우 갈수기인 늦여름에는 N/P 비가 낮아 질소가 제한영양염으로 작용하였으며, 풍수기인 초봄에는 N/P 비가 높아 인산 인이 식물플랑크톤의 제한영양염으로 작용하였다 (Fisher et al., 1992). 미시시피강의 영향을 받는 루이지애나 만 (Louisiana Bight)에서도 체사피크 만의 경우와 동일한 양상을 보여주었으며 (Smith and Hitchcock, 1994), 히로시만 만 (Lee et al., 1996a,b), Laholm 만 (Graneli, 1987) 등에서도 유사한 결과가 보고되었다.

본 연구에서는 앞서 언급한 바와 같이 광양만과 섬진강 하구 사이에 위치하는 난초도에서의 N/P 비만이 강물유량에 따라 일반적인

변화를 보였을 뿐, N/P 비가 16 이상으로 높은 25 psu 이하 염분역에서는 일반적인 계절변화를 나타내지 않았다. 즉, 1999년 11월 5~15 psu 염분역에서의 400 이상의 N/P 비, 2000년 10월 20 psu 이하 염분역에서의 200 이상의 N/P 비, 그리고 2001년 4월과 8월 초저염분역에서의 500 이상의 N/P 비는 식물플랑크톤의 높은 성장에 의해 (Kwon et al., 2002) 낮은 농도의 인산 인이 급격하게 소모되어 N/P 비가 높아진 것으로 판단된다. 또한 풍수기인 2000년 8월과 2001년 2월의 N/P 비가 풍수기와 갈수기의 일반적인 N/P 비 양상과 반대로 나타난 것은 생물학적 요인보다는 용존 무기질소와 인산 인의 불균형적인 공급으로 인한 결과라고 판단된다. 2000년 4월과 8월은 1999년 이후 용존무기질소가 계속적으로 공급되지 않아 N/P 비가 상대적으로 낮게 유지되었으며, 2001년 2월에는 갈수기임에도 용존무기질소의 대량유입, 인산 인의 매우 낮은 농도로 인해 N/P 비가 매우 높아진 것으로 판단된다.

생물 검정실험 (Algal bioassay) 결과

영양염 첨가계에 따른 *Skeletonema costatum*과 *Thalassiosira rotula*의 성장률을 비교하기 위해 Fig. 3에 대조군에 대한 각 영양염 첨가계에서의 성장률을 %로 나타내었다. *S. costatum*은 4회 조사기간 동안 염분역에 관계없이 전반적으로 인산 인 첨가계에서 상대적으로 높은 성장을 보였으며, 특히 고염분역에 비해 저염분역에서 상대적으로 성장률이 높았다. *T. rotula*는 2001년 8월 30 psu 염분역과 10월 15 psu 염분역의 인산 인 첨가계에서 월등히 높은 성장을 보였으나, 그 외 시기에는 타 영양염 첨가계와 뚜렷한 차이가 없었다. *T. rotula*는 2001년 8월 5 psu 염분역과 10월 5 psu 염분

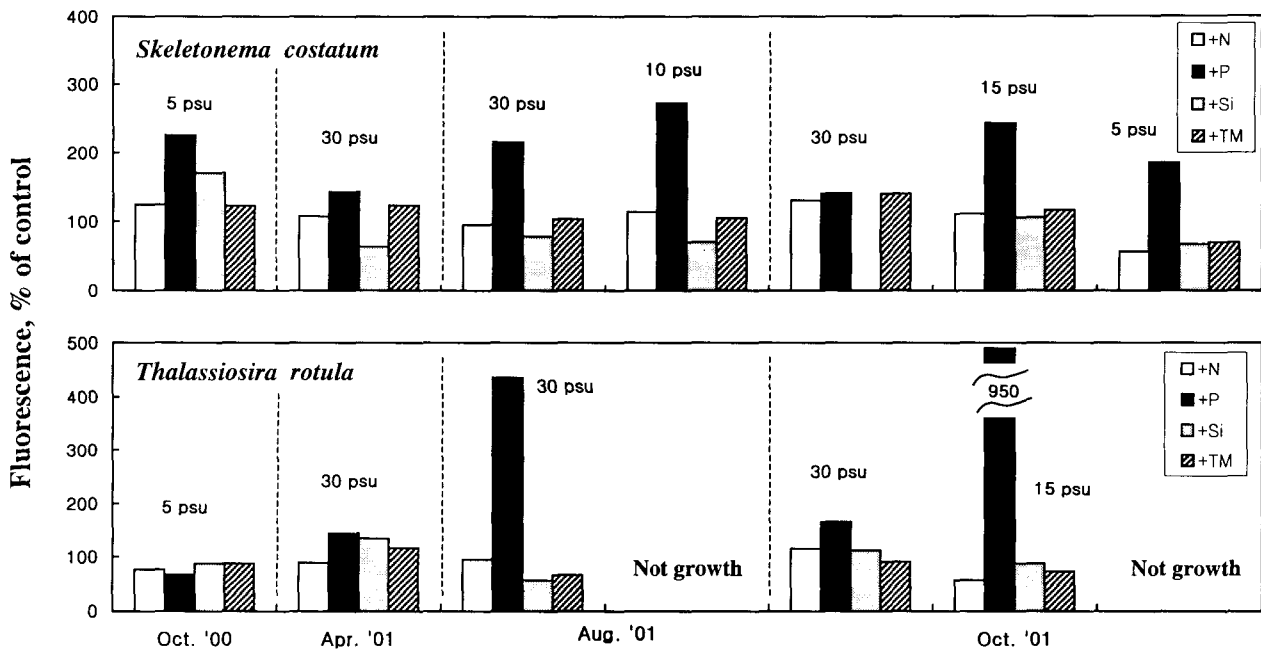


Fig. 3. % growth (in fluorescence) in the nutrient-added culture media against control of *Skeletonema costatum* and *Thalassiosira rotula* in the surface water of Seomjin River estuary.

역에서는 거의 성장하지 않았다.

2001년 10월에 30, 20, 15, 10 및 5 psu 염분역에서 현장 식물플랑크톤을 접종하여 배양한 결과를 살펴보면 (Fig. 4), 각 염분역별 성장양상의 차이는 다소 있으나, 전반적으로 배양초기에는 미량금속 첨가계의 배지에서 빠른 성장을 보였으며, 배양 시작 20일 이후에는 인산 인 첨가계에서 월등히 높은 성장을 보였다. 특히 5 psu에서는 다른 염분역에 비해 인산 인 첨가계에서의 성장이 월등히 높았다.

*S. costatum*과 *T. rotula*를 이용한 생물검정실험과 현장 식물플랑크톤을 이용한 생물검정실험 결과는 대체로 인산 인 첨가계에서 성장이 상대적으로 높게 나타나, 섬진강 하구역에서 식물플랑크톤

성장을 제한하는 영양염은 인산 인인 것으로 검증되었다. 타 영양염 첨가계에 비하여 인산 인이 첨가된 배지에서 뚜렷하게 높게 성장한 예는 2001년 8월의 30 및 10 psu의 *S. costatum* 및 *T. rotula*, 그리고 2001년 10월 15 psu의 *S. costatum* 및 *T. rotula*였으며, 2000년과 2001년 10월 *S. costatum*을 주입한 5 psu 배지에서도 비교적 높은 성장을 보였다. 이와 동일한 시기와 장소에서의 N/P 비는 2000년 10월에 248.8, 2001년 8월에 51.3 (30 psu) 및 100.6 (10 psu), 그리고 2001년 10월에 48.0 (15 psu) 및 175.5 (5 psu)로 redfield ratio의 N/P 비 16보다 월등히 높아, 인산 인 첨가계의 상대적인 높은 성장을 보인 생물검정실험 결과와 일치한다 (Table 3). 그러나, N/P 비가 낮아 질산 질소 첨가계의 배지에서 높은 성

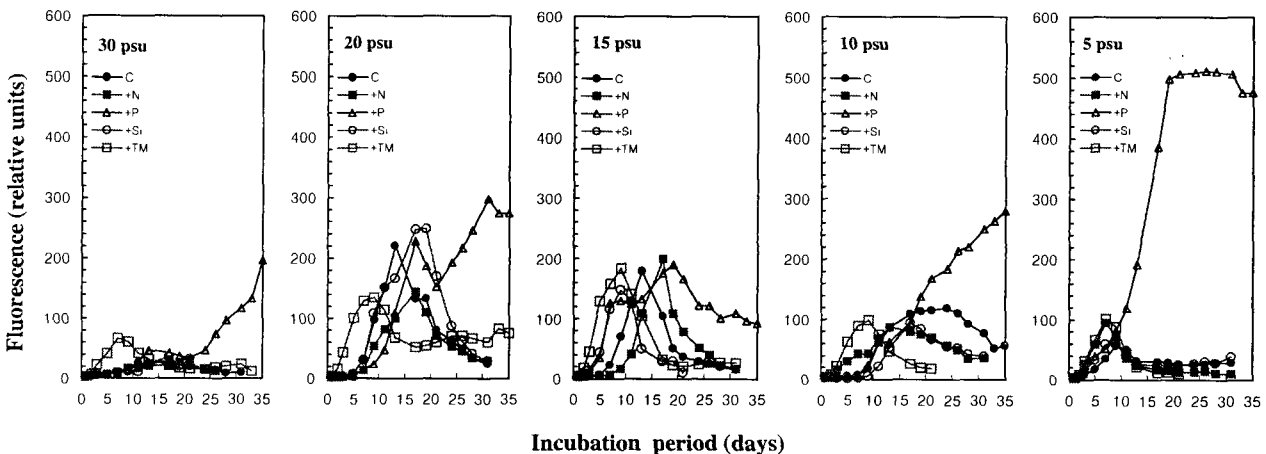


Fig. 4. Growth curves for *in situ* phytoplankton assemblage in the nutrient enrichment bioassay experiment of October 2001.

Table 3. Comparison of estimation of limiting nutrient by algal bioassay and N/P ratios

Date	Salinity zone (psu)	Bioassay diatom	Estimation of limiting nutrient	N/P ratios
Oct. 2000	5	SK TR	(+P)	248.8
Apr. 2001	30	SK TR		2.92*
Aug. 2001	30	SK TR	+P +P	51.30
	10	SK	+P	100.63
Oct. 2001	30	SK TR		13.95
	15	SK TR	+P +P	48.01
	5	SK	(+P)	175.51
Oct. 2001	30	<i>In situ</i> phytoplankton assemblage	+TM, +P	13.95
	20		+TM, +P	50.77
	15		+TM, +P	48.01
	10		+TM, +P	85.79
	5		+TM, +P	175.51

SK: *Skeletonema costatum*
TR: *Thalassiosira rotula*
*: ammonia concentration not added

장을 예상했던 2001년 4월 30 psu 배지 (N/P=2.92)와 2001년 10월 30 psu (N/P=14.0) 배지에서 질산 질소 첨가계의 높은 성장은 발견되지 않았으며, 모든 영양염 첨가계간의 성장률 차이는 크지 않았다. 이는 아마도 낮은 농도의 영양염을 측정하는 과정에서 용존무기질소 성분 및 인산 인의 농도가 과소 또는 과대 평가되어 N/P 비가 잘못 추정되었을 것으로 판단되나, 이에 대한 명확한 판단은 보다 세밀하고 정확한 연구가 필요할 것으로 생각된다. Twinch and Breen (1982)은 주변 환경 수질의 화학적 분석을 통한 N/P 비의 추정용 용존무기질소 및 인산 인에 대한 정확한 측정이 수반되어야 하며, 측정오차로 인한 잘못된 해석은 N/P 비의 과대 또는 과소 추정의 결과를 초래한다고 하였다. 본 연구에서도 N/P 비가 가장 낮았던 2001년 4월의 경우, 암모니아 질소가 분석되지 않아 용존무기질소의 농도가 낮아지게 되면서 N/P 비가 낮아진 것으로 추정된다. 또한, Goldman et al. (1979)과 Lee (1997)는 식물플랑크톤이 해수 중에 상대적으로 많이 존재하는 인을 과량섭취한 후, 인이 부족한 환경이 되었을 때 과량섭취한 인을 이용하여 일정기간 동안 성장한다고 하였다.

한편, 2000년과 2001년 10월 5 psu 염분역에서와 같이, N/P 비가 각각 248.8 및 175.5로 매우 높음에도 불구하고, 인산 인 첨가계에서의 매우 높은 성장이 발생하지 않은 경우와 *S. costatum* 및 *T. rotula*가 동일한 조건의 배지에서 상이한 성장곡선을 나타낸 것은 N/P 비 이외에 배지의 화학적 조건에 따른 식물플랑크톤의 종별 적응 또는 반응 정도가 다르기 때문인 것으로 판단된다. 저염분역에서의 *S. costatum*과 *T. rotula*의 성장곡선을 비교해 보았을 때

(Fig. 5), *S. costatum*은 대체로 중·저염분역 배지에서 *T. rotula*에 비해 지수성장기 시작 시점이 빠르고, 보다 급격한 성장을 보였으며, 인산 인에 대한 반응이 상대적으로 높은 것으로 나타났다. 이에 반해 *T. rotula*는 고염분역에서만 상대적으로 높은 성장을 보였으며, 약 10 psu 이하의 저염분역에서는 거의 성장을 못하거나 성장이 있을시에도 염분에 대한 적응기간이 길게 나타났다. 이와 같은, 환경 특히 염분에 대한 식물플랑크톤의 종별 적응력을 고려하였을 때, 타 종에 비해 염분 내성이 강하고, 인산 인에 대한 반응성이 큰 *S. costatum*의 종 특이성은 섬진강 하구역에서 가을철에 타종에 비해 상대적으로 빠른 성장을 초래하였을 것이며, 우점종 90% 이상의 *S. costatum* bloom이 발생하는 주요 원인종의 하나였을 것으로 추측된다. *S. costatum*은 전형적인 연안성 규조류로 (Round et al., 1990) Northern San Francisco Bay 하구 (Cloern and Cheng, 1981; Cloern et al., 1983), St. Lawrence 강하구 (Roy et al., 1996) 등 여러 강하구에서 염분역에 관계없이 하구의 물리적 순환과 연계하여 종종 bloom을 일으키는 종으로 알려져 있다. 한편, 2001년 10월에 현장식물플랑크톤을 이용한 생물검정실험에서는 배양시작 초기에 미량금속 첨가계에서 비교적 빠른 성장을

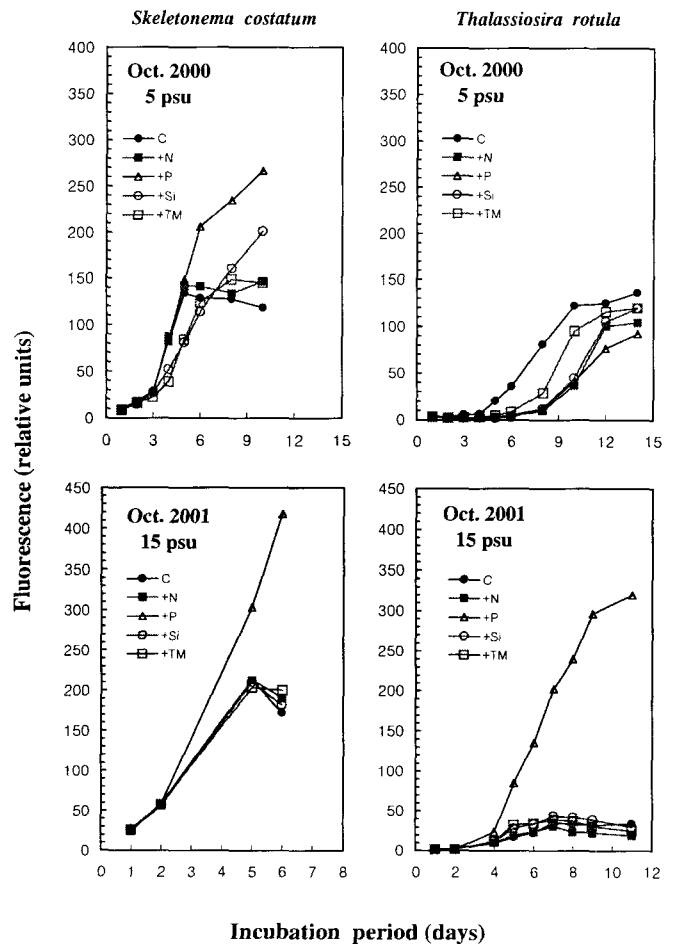


Fig. 5. Growth curves for *Skeletonema costatum* and *Thalassiosira rotula* in the nutrient enrichment bioassay experiment of October 2000 and October 2001.

보였으며, 20일 이후에는 인산 인 첨가계에서 월등한 성장을 보였다 (Fig. 4). 두 종의 규조류를 이용한 생물검정실험과 달리 다양한 종들이 포함된 현장식물플랑크톤이 접종된 점을 고려하였을 때, 앞서 언급한 종 특이성에 의해 여러 종들이 각 배지의 조건에 적응하여 성장과 사멸을 반복하였기 때문에 이와 같은 양상이 나타난 것으로 추정되나 보다 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 배양초기에 모든 염분역에서 미량금속 첨가계에 반응한 종은 현미경 관찰을 하지 못하여 정확한 판단은 할 수 없으나, *S. costatum*과 *T. rotula*가 미량금속 첨가계에서 특별한 반응을 보이지 않았던 것을 고려하면, 이 두 종 이외의 다른 종이 미량금속에 반응하여 빠른 성장을 나타낸 것으로 판단된다. 배양 20일 이후에 인산 인 첨가계에서의 높은 성장은 10 psu 이상 염분역에서 *Cylindrotheca closterium*, *Thalassiosira* sp. *Navicula* sp. 및 미동정 원형 규조류 등에 의해 높은 성장을 보였으며, 5 psu 염분역에서는 매우 작은 녹조류가 급격하게 성장하였다.

2001년 10월에 영양염의 N/P 비가 대체로 16이상의 비값을 보이고, 현장식물플랑크톤을 이용한 생물검정실험에서 장기적으로 인산 인 첨가계에서 높은 성장이 나타난 것은 인산 인이 식물플랑크톤 성장의 제한영양염인 것으로 판단된다. 또한, 배양초기에 보여진 미량금속 첨가계에서의 빠른 성장은 영양염 이외의 미량금속에 의해 성장이 다소 제한되고 있음을 보여주며, 이와 같은 결과는 화학적 분석으로 추정하기 어려운 성장제한요인을 생물검정 실험으로 파악할 수 있다는 것을 지시해준다. 그러나, 미량금속 중 어떤 성분이 정확히 식물플랑크톤 성장과 관련이 있는지는 보다 세부적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한, 현장 식물플랑크톤의 배양시 나타난 복잡한 성장양상으로 인해 식물플랑크톤 성장제한 요인의 정확한 판단은 보다 신중한 해석과 반복적 그리고 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

요 약

1999년 3월부터 2001년 10월까지 섬진강 하구역에서 영양염의 DIN/DIP 비와 생물검정실험을 이용하여 식물플랑크톤 성장을 제한하는 영양염을 파악· 비교하였다. 조사기간 동안 용존무기질소와 인산 인의 비는 평균 14.7~681.1의 범위로, 조사시작 지점인 난초도 주변 해역을 제외한 25 psu 이하 염분역과 염류소 α 의 농도가 매우 높았던 구간에서는 계절에 관계없이 N/P 비가 16 이상으로 매우 높아 식물플랑크톤의 성장을 조절하는 제한 영양염은 인산 인인 것으로 판단된다. 반면, 약 25 psu 이상의 염분역인 난초도 주변 해역은 광양만으로부터 공급되는 인산 인의 영향으로 인해 DIN/DIP 비는 16 이하로 낮아, 용존무기질소가 식물플랑크톤의 성장을 제한하는 것으로 판단된다. 섬진강 하구역에서의 DIN/DIP 비의 변화양상은 인산 인의 공급양상, 즉 육상으로부터의 낮은 공급 및 광양만으로부터의 높은 공급 그리고 시·공간적인 식물플랑크톤의 성장에 의해 주로 영향을 받는 것으로 판단된다.

Skeletonema costatum 및 *Thalassiosira rotula*와 현장 식물플랑크톤을 이용한 생물검정실험 결과는 인산 인이 첨가된 배지에서

성장이 상대적으로 높게 나타나, 섬진강 하구역에서 식물플랑크톤을 조절하는 제한영양염은 인산 인인 것으로 검증되었다. *S. costatum*은 타 종에 비해 염분 적응이 빠르고, 인산 인에 대해 반응이 크게 나타나, 섬진강 하구역에서 가을철에 우점을 90% 이상의 *S. costatum* bloom이 발생되는 주요 원인이었을 것으로 추측된다. 현장식물플랑크톤을 이용한 생물검정실험에서는 배양시작 초기에 미량금속 첨가계에서 비교적 빠른 성장을 보였으며, 20일 이후에는 인산 인 첨가계에서 월등한 성장을 보였다. 이는 주변 해수의 영양염 분석과 식물플랑크톤 현존량만으로는 판단하기 어려운, 영양염 이외의 미량금속 그리고 비타민 등의 성장제한 요인에 대한 정보를 얻을 수 있다는 것을 시사해 준다.

감사의 글

이 연구는 2000년도 한국과학재단의 학술연구비 (과제번호 2000-1-13500-001-3) 지원에 의해 수행되었습니다. 식물플랑크톤 배양실험을 위해 많은 도움을 주신 부경대학교 양식학과 양식장 환경학 실험실원들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

Caraco, N., A. Tamse, O. Boutros, I. Valiela. 1987. Nutrient limitation of phytoplankton growth in brackish coastal ponds. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 44, 473~476.

Cloern, J.E. and R.T. Cheng. 1981. Simulation model of *Skeletonema costatum* population dynamics in the northern San Francisco Bay estuary. *Estuar. Coastal. Shelf Sci.*, 16, 415~429.

Cloern, J.E., A.E. Alpine, B.E. Cole, R.L.J. Wong, J.W. Wong, J.F. Arthur and M.D. Ball. 1983. River discharge controls phytoplankton dynamics in the Northern San Francisco Bay. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 16, 415~429.

D'Elia, C.F., J.G. Sanders and W.R. Boynton. 1986. Nutrient enrichment studies in a coastal plain estuary: Phytoplankton growth in large-scale, continuous cultures. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 43, 397~406.

Fisher, T.R., E.R. Peele, J.W. Ammerman and L. Harding. 1992. Nutrient limitation of phytoplankton in Chesapeake Bay. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 82, 51~63.

Goldman, J.C., J.J. McCarthy and D.G. Peavey. 1979. Growth rate influence on the chemical composition of phytoplankton in oceanic waters. *Nature*, 279, 210~215.

Graneli, E. 1987. Nutrient limitation of phytoplankton biomass in a brackish water bay highly influenced by river discharge. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 25, 555~565.

Guillard, R.R.L. 1975. Culture of phytoplankton for feeding marine invertebrates. In *Culture of Marine Invertebrate Animals*, W.L. Smith and M.H. Chanley, ed. Plenum, New York, pp. 29~60.

Harrison, P.J., H.H. Hu, Y.P. Yang and X. Lu. 1990. Phosphate limitation in estuarine and coastal waters of China. *J. exp. mar. Biol. Ecol.*, 140, 79~87.

Hecky, R.E. and P. Kilham. 1988. Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: A review of recent

- evidence on the effects of environment. *Limnol. Oceanogr.*, 33, 796~822.
- Hitchcock, G.L. and T.J. Smayda. 1977. Bioassay of Lower Narragansett Bay waters during the 1972~1973 winter-spring bloom using the diatom *Skeletonema costatum*. *Limnol. Oceanogr.*, 22, 132~139.
- Howarth, R.W. 1988. Nutrient limitation of net primary production in marine ecosystems. *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, 19, 89~110.
- Kang, C.K., J.B. Kim, J.B. Kim, P.Y. Lee and J.S. Hong. 2001. The importance of intertidal benthic autotrophs to the Kwangyang Bay (Korea) food webs: $\delta^{13}\text{C}$ analysis. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 36, 109~123.
- Kim, H.C., D.M. Kim, D.I. Lee, C.K. Park and H.G. Kim. 2001. Limiting nutrients of *Cochlodinium polykrikoides* red tide in Saryang Island coast by algal growth potential (AGP) assay. *J. Kor. Fish. Soc.*, 34, 457~464 (in Korean).
- Kim, T.J. 1992. Sorption behaviour of radium isotopes and nutrient fluxes in the Seomjin estuary of Korea, during high river discharge. Master thesis, Chungnam National University, Taejon, 59 pp.
- Kwon, K.Y., P.G. Lee, C. Park, C.H. Moon and M.O. Park. 2001a. Biomass and species composition of phytoplankton and zooplankton along the salinity gradients in the Seomjin River estuary. *J. Oceanogr. Soc. Korea*, 6, 93~102 (in Korean).
- Kwon, K.Y., C.H. Moon and H.S. Yang. 2001b. Behavior of nutrients along the salinity gradients in the Seomjin River estuary. *J. Korean Fish. Soc.*, 34, 199~206 (in Korean).
- Kwon, K.Y., C.H. Moon, C.K. Kang and Y.N. Kim. 2002. Distribution of particulate organic matters along the salinity gradients in the Seomjin River estuary. *J. Kor. Fish. Soc.*, 35, 86~96 (in Korean).
- Lee, Y.S., T. Mukai, K. Takimoto and M. Okada. 1996a. Estimation of limiting nutrient by algal assay procedure with indigenous phytoplankton assemblage. *Jpn. Soc. Water Environ.*, 19, 373~380.
- Lee, Y.S., T. Yamada, T. Seiki, T. Mukai, K. Takimoto and M. Okada. 1996b. Effect of freshwater due to heavy rain on phytoplankton growth in Hiroshima Bay. *Jpn. Soc. Water Environ.*, 19, 995~1003.
- Lee, Y.S. 1997. Mechanism eutrophication in Hiroshima Bay, Japan. *J. of KSEE*, 19, 371~380 (in Korean).
- Lee, Y.S., J.S. Lee, R.H. Jung, S.S. Kim, W.J. Go, K.Y. Kim and J. Park. 2001. Limiting nutrient on phytoplankton growth in Gwangyang Bay. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 6, 201~210 (in Korean).
- Mahoney, J.B. 1989. Algal assay of relative abundance of phytoplankton nutrients in northeast United States coastal and shelf waters. *Wat. Res.*, 23, 603~615.
- McCarthy, J.J. 1980. Nitrogen, In *The Physiological Ecology of Phytoplankton*, I. Morris, ed. University of California Press, Berkeley, CA., pp.199~233.
- Nalewajko, C. and D.R.S. Lean. 1980. Phosphorus, In *The Physiological Ecology of Phytoplankton*, I. Morris, ed. University of California Press, Berkeley, CA., pp. 235~258.
- Park, M.O., C.H. Moon, S.Y. Kim, S.R. Yang, K.Y. Kwon and Y.W. Lee. 2001. The species composition of phytoplankton along the salinity gradients in the Seomjin River estuary in Autumn, 2000: Comparison of HPLC analysis and microscopic observations. *Algae*, 16, 179~188 (in Korean).
- Round, F.E., R.M. Crawford and D.G. Mann. 1990. *The Diatoms*. Cambridge University Press, Cambridge, 140pp.
- Roy, S., J.P. Chanut, M. Gosselin and T.S. Ngando. 1996. Characterization of phytoplankton communities in the lower St. Lawrence Estuary using HPLC-detected pigments and cell microscopy. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 142, 55~73.
- Schindler, D.W. 1977. Evolution of phosphorus limitation in lakes. *Science*, 195, 260~262.
- Smayda, T.J. 1974. Bioassay of the growth potential of the surface water of lower Narragansett Bay over an annual cycle using the diatom *Thalassiosira pseudonana* (oceanic clone, 13-1). *Limnol. Oceanogr.*, 19, 889~901.
- Smith, S.M. and G.L. Hitchcock. 1994. Nutrient enrichments and phytoplankton growth in the surface waters of the Louisiana Bight. *Estuaries*, 17, 740~753.
- Strickland, J.D.H. and T.R. Parsons. 1972. *A Practical Handbook of Seawater Analysis*, 2nd ed. *Bull. Fish. Res. Board Can.* 167, 310 pp.
- Twinch, A.J. and C.M. Breen. 1982. A comparison of nutrient availability measured by chemical analysis and calculated from bioassay yields. *Hydrobiologia*, 94, 247~255.
- Webb, K.L. 1988. Comment on 'Nutrient limitation of phytoplankton growth in brackish coastal ponds' by Caraco, Tamse, Boutros and Valiela, 1987. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 45, 380.

2002년 6월 12일 접수

2002년 8월 30일 수리