

## 살조세균 적용이 식물플랑크톤 군집과 조류독소 분포에 미치는 영향

김백호\* · 정승원 · 서종근 · 서미연<sup>1</sup> · 한명수

(한양대학교 자연과학대학 생명과학과,

<sup>1</sup>서울시 보건환경연구원 환경연구개발팀)

Effects of Biological Control Agent Algicidal Bacterium on the Phytoplankton Community and Microcystin-LR Contents in a Mesocosm Experiment. Kim, Baik-Ho,\* Seung-Won Jung, Jong-Kun Seo, Mi-Yeon Suh<sup>1</sup> and Myung-Soo Han (Department of Life Science, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea; <sup>1</sup>Seoul Metropolitan Government, Research Institute of Public Health and Environment, Seoul 137-130, Korea)

Biological control agents (BCA; algicidal bacterium *Xantobacter autotrophicus*) plus casitone media, strongly changed physicochemical variables, standing crops of phytoplankton and microcystin-LR phytoplankton in 100-L mesocosm constructed in a small hexagonal pond (3.5 m × 5 m). No *M. aeruginosa* showed by 8 days, and 60% of total standing crops of phytoplanktons were decreased by the BCA treatment. BCA treatment also induced a strong decline of cellular extracted microcystin-LR (MCLR) and a remarkable increase of dissolved MCLR with the decrement in standing crops of cyanobacteria. In addition, BCA strongly increased all nutrients, but new outbreak of phytoplanktons hardly showed in the experimental mesocosm. The field application of BCA to controlling the cyanobacterial bloom in large lakes and reservoirs is not relevant due to high concentration of nutrients and toxins. Thus, a further study is needed to diminish the adverse effects after BCA treatment for water quality preservation.

Key words : biological control agents, algicidal bacteria, *Microcystis aeruginosa*, mesocosm, phytoplankton community, Microcystin-LR

### 서 론

부영양화가 심화된 정체수역에서의 남조발생 (cyanobacterial bloom)은 수질 관리에 많은 어려움을 주고 있다 (Reynolds, 1985; Vincent, 1987). 이들은 수중 용존산소와 투명도를 현저하게 감소시키고 악취를 발생시키며 (박, 2000), 독소를 생성하여 수중생물이나 가축은 물론 사람의 건강까지 위협을 주고 있다 (Carmichael *et al.*, 1988; Dawson, 1998; 이 등, 2002). 최근 다양한 기능성

생물을 이용하여 조류를 제어하려는 생물조작과 같은 직접적인 방법 (Daft *et al.*, 1975; Wright *et al.*, 1981; Burnham *et al.*, 1984; Fukami *et al.*, 1992; Ohki and Fujita, 1996; Gosselain, 1998; Yamamoto *et al.*, 1998; Sigee *et al.*, 1999; Fukushima *et al.*, 2000; Bettarel *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2004)과 수중식물을 이용한 수중 영양물질 흡수를 통한 조류성장 억제와 같은 간접적인 방법 (전과 김, 1999; 신과 박, 2001)이 보고되고 있다. 이들은 모두 물리-화학적 방법 (Kasai *et al.*, 1993; Sigee *et al.*, 1999; Ahn *et al.*, 2003)에 비해 비교적 경제적이고 생

\* Corresponding author: Tel: 02) 2220-0909, Fax: 02) 2296-1741, E-mail: tigerk@hanyang.ac.kr

태친화적인 효과를 갖지만 현장에 적용된 사례가 극히 드물고 실험실적 규모의 연구가 대부분이다 (Kim *et al.*, 2003; Kang *et al.*, 2005; Choi *et al.*, 2005).

지금까지 남조류 제어능이 밝혀진 살조세균의 종류는 매우 다양하다 (Yamamoto *et al.*, 1998; Manage *et al.*, 2001; Shinya *et al.*, 2002; Sang *et al.*, 2004; Choi *et al.*, 2005). 이처럼 남조 *Microcystis aeruginosa* 제어에 있어 살조세균을 이용하려는 시도는 1) 다른 생물제제에 비해 분리 및 배양이 비교적 쉽고 성장속도가 빠르며, 2) 남조 발생 현장에서 서식하는 박테리아를 직접 분리함으로써 현장 적용시 생태계 교란을 최소화할 수 있고, 3) 다른 기능성 생물제제와 혼합적용시 상승효과를 기대할 수 있다 (Kim *et al.*, 2003). 그러나 살조세균을 이용한 현장 조류 제어 연구는 시행된 사례를 찾기 어렵고, 조류 대발생 현장에서 서식하는 endemic species 일지라도 적용 후 현장 생태계의 예측 불가능한 변화 등의 위험성 때문에 실험적 연구가 활발하다 (Choi *et al.*, 2005). Sang 등 (2004)의 연구에 의하면, 살조세균 *Xanthobacter autotrophicus* HYK0201-SM02 (SM02)는 NB (nutrient broth) 보다 Casitone 배지에서 배양할 경우 *M. aeruginosa*에 대한 살조능이 높았으며, Casitone이 NB보다 *M. aeruginosa*에 대한 독성이 낮고, 살조세균 적용시 bacteria 단독 처리보다 효과가 높았다.

따라서 본 연구는 실내에서 남조 *M. aeruginosa* 제어능이 밝혀진 살조세균 SM02의 현장에서의 제어능 재현 여부와 수생태계에 미치는 영향을 평가하기 위하여, 매년 남조 *M. aeruginosa* 대발생이 일어나는 소형 인공연못에 100 L mesocosm을 설치하고, 생물제제 처리에 따른 식물플랑크톤 및 조류독소 microcystin-LR의 변화를 조사하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 연구장소의 개황

본 연구는 2004년 10월 4일부터 10월 13일까지 총 10일 동안 경기도 양수리 소재 국립환경연구원 한강물환경연구소 내에 설치한 실험연못에서 실시하였으며, 연못의 바닥과 벽은 모두 콘크리트 재질로 만들어졌고 (수심 3 m, 직경 5 m), 평상시 약 2.75 m 정도의 수심이 유지되도록 설계되었다. 수원은 약 15 m 정도 떨어진 북한강 지류로서 갈수기에 인위적으로 유입되며 강우기에는 overflow를 위하여 여수통로가 설치되어 있다. 연못은 보통 저온기 (12월초~3월중순)에는 결빙되며 3월말부터 해동된다.

실험연못은 매년 봄~가을동안 *M. aeruginosa*가 대발생하며 ( $10^4 \sim 10^5$  cells mL<sup>-1</sup>), 바닥은 약 10~15 cm 정도의 저니층이 형성되어 있다.

### 2. Mesocosm 설치 및 실험디자인

Mesocosm은 플라스틱 재질로 된 바닥이 폐쇄된 원통 (높이 1.2 m, 직경 60 cm)을 연못의 가장자리에 밀착하고 강우의 직접적인 영향을 막기 위해 강우시와 야간에는 물통의 상부 5 cm 높이에 덮개로 덮어 공기 출입과 강우를 차단하였다. 물통은 균형을 유지하기 위해 사면을 받줄로 고정하고, 각 물통은 살조세균 처리 2일전에 현장수 100 L를 각각 넣고 소형 전기펌프로 실험종료일까지 계속 하여 부드럽게 순환시켰다 (Fig. 1). 실험은 대조군과 실험군으로 3회 반복 실시하였는데, 실험군은 mesocosm 내에 현장수를 채우고 2일 동안 안정화시킨 다음, 생물제제를 처리하였다. 생물제제는 100 L mesocosm에 이미 *Microcystis aeruginosa*에 대한 살조능이 밝혀진 살조세균 *Xanthobacter autotrophicus* SM02 (Sang *et al.* 2004)을 수중 농도  $1 \times 10^7$  cells mL<sup>-1</sup>가 되도록 0.5% Casitone 배지와 함께 처리하였다. Casitone (CAS)와 살조세균 (BAC)이 혼합된 생물제제 (CAS+BAC) 처리에 따른 mesocosm내 환경요인, 식물플랑크톤 출현 종수, 각 출현종의 현존량, 군집지수, 조류독소 microcystin-LR의 변동을 각각 조사하였다.

### 3. 환경요인 조사

환경요인 조사는 각 mesocosm의 중심 부분에서 (수심 30 cm) 수행하였으며, 수온, pH, 용존산소는 현장에서 직

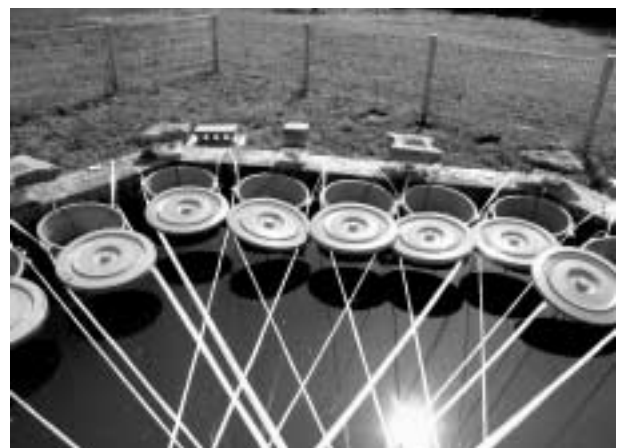


Fig. 1. Photographs of experimental mesocosm constructed in Youkkagji pond.

접 portable multiparameter (Horiba U-10, Japan)를 이용하여 측정하였다. 영양염 분석을 위한 시료는 각 mesocosm에서 500 mL를 채수하여 채수통에 넣고 ice box에 담아 실험실로 운반한 후 수질오염공정시험방법 (APHA, 1995)에 준하여 분석하였다. 아질산성 질소 ( $\text{NO}_2\text{-N}$ )는 sulfanilamide solution과 naphthyl-ethylenediamine dihydrochloride solution을 이용하여 발색시킨 뒤 543 nm에서 흡광도를 측정하여 정량하였다. 질산성 질소 ( $\text{NO}_3\text{-N}$ )는 카드뮴 환원관 (Cd-Cu reduction column)에 시료를 통과시켜 아질산염으로 환원시킨 뒤 아질산 측정방법과 동일한 방법으로 측정하였다. 인산염은 ( $\text{PO}_4\text{-P}$ )은 몰리브덴산 (molibdate solution)과 반응하여 생기는 황색의 몰리브덴산 착물을 아스코르빅산 (ascorbic acid)으로 환원시켜 그 흡광도를 측정하였다. Chlorophyll *a*는 현장수 500 mL를 GF/C (Whatman 1.2  $\mu\text{m}$  porosity, England) filter로 여과한 후, 90% acetone 10 mL를 주입한 시험관에 넣고 마쇄하여 하룻밤 냉암소에 보관 후, UV/Visible Spectrophotometer (DU800, Beckman Coulter, Inc., Fullerton, California, USA)를 사용하여 multiple wavelength에서 측정하였다.

#### 4. 식물플랑크톤 현존량

생물제재 (CAS+BAC)처리에 따른 식물플랑크톤의 변동을 파악하기 위하여 각 mesocosm에서 매일 1회씩 10 mL씩을 취해 glutaraldehyde 용액으로 (최종 농도 1%)로 고정시켰다. 농축한 시료는 잘 혼합한 후 Sedgwick-Rafter Counting Chamber에 시료 1 mL을 골고루 옮긴 후 10분 이상 침전시킨 다음 광학현미경 (Nikon eclipse 600, Japan)  $\times 200$ 배 하에서 세포수를 계수하였다. 종 동정을 위해 광학현미경 400~1,000배 (Nikon-eclipse 600, Japan)하에서 검정하였다. 동일 속 (genus)에서 뚜렷한 식별 형질의 차이를 보이지 않은 것들은 모두 미동정 처리하였다. 한편, 생물제재처리에 따른 식물플랑크톤 군집의 변화를 확인하기 위하여 출현된 종수 및 현존량을 근거로 하여 우점종, 우점도지수 (McNaughton, 1967), 다양도지수 (Shannon-Weaver, 1963), 균등도지수 (Lloyd and Ghelard, 1964; Pielou, 1966), 풍부도지수 (Margalef, 1958)를 각각 계산하였다.

#### 5. 남조독소 Microcystin-LR 측정

생물제재 처리에 의한 각 mesocosm내 조류독소의 변동을 파악하기 위하여, 처리 전후 2일 간격으로 Microcystin-LR (MCLR)를 측정하였다. MCLR양은 크게 1) 조

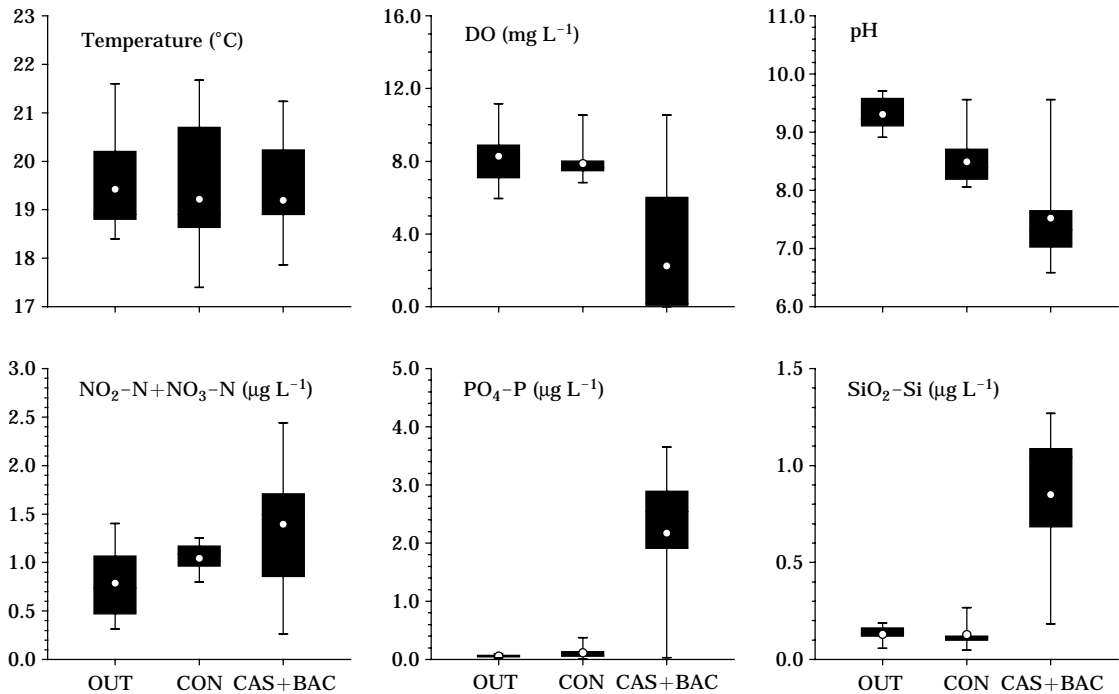
체성 (cell extraction), 2) 용존성 (dissolved)으로 구분하여 효소면역학적 방법 (ELISA, enzyme-linked immunosorbent assay)으로 분석하였다 (Nagata *et al.*, 1997). 분석은 시료 400 mL를 GF/C 여과지에 여과 시킨 후 여과지에 걸러진 조체성 시료는 시험관에 넣고 methanol 10 mL를 가하고 동결 보관하였다가 분석하기 전, 동결 보관한 시료를 해동하여 10  $\mu\text{L}$ 를 취하고 증류수 990  $\mu\text{L}$ 를 microcentrifuge tube에 넣은 후 ELISA 분석에 사용하였다. 용존성 독소는 해동하여 특별한 처리없이 ELISA 분석에 사용하였다. 독소분석은 microcystins ADDA 잔기의 monoclonal antibody를 microplate의 well에 고정화시킨 반응 kit (Mitsubishi Kagaku Bio-clinical Laboratories, Inc. Tokyo, Japan)를 사용하였고 검출한계는 0.05  $\mu\text{g L}^{-1}$ 이다. Microcystin standard는 ELISA kit에서 제공된 표준 물질을 50, 100, 200, 400, 1600  $\text{pg mL}^{-1}$ 를 well plate에 각각 50  $\mu\text{L}$ 씩 접종하고, microplate reader (Labsystem iEMS Reader MF, FINLAND)를 이용하여 450 nm에서 측정한다. 구해진 검량선을 기준으로 시료 중의 MCLR 농도를 Ascent S/W (Labsystem)의 4계수 logistic 곡선에 의한 회귀식을 사용하여 정량하였다.

## 결 과

### 1. 이화학적 환경요인

연구기간 동안 mesocosm의 이화학적 환경요인 중 수온을 제외한 모든 요인이 대조군과 처리군 (CAS+BAC) 간에 뚜렷한 차이를 보였다 (Fig. 2). 수온은 평균 19.3°C (17.4~21.7°C)로서 외부환경이나 실험기간에 큰 차이를 보이지 않았다. 용존산소는 대조군과 mesocosm외부환경 (6.85~8.45  $\text{mg L}^{-1}$ )은 큰 차이를 보이지 않은 반면, CAS+BAC 처리군 (평균 0.38  $\text{mg L}^{-1}$ )에서 급속하게 혐기화가 일어났다.

pH역시 실험초기에 9.56에서 대조군 (8.06)에 비해 CAS+BAC처리군 (6.58)에서 크게 감소하였다. 질산염 ( $\text{NO}_2\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}$ )은 대조군 (평균 = 1.045  $\text{mg L}^{-1}$ )에 비해 CAS+BAC처리군 (평균 = 1.547  $\text{mg L}^{-1}$ )에서 약 1.5배 이상 높았다. 인산염 ( $\text{PO}_4\text{-P}$ )과 규산염 ( $\text{SiO}_2\text{-Si}$ )은 CAS+BAC처리 이후 뚜렷하게 증가하였는데, 인산염은 대조군 (평균 = 0.138  $\text{mg L}^{-1}$ )보다 CAS+BAC처리군 (평균 = 2.169  $\text{mg L}^{-1}$ )에서 15배 이상 증가하였다. 규산염 역시 크게 증가하였는데 대조군 (평균 = 0.127  $\text{mg L}^{-1}$ )보다 CAS+BAC처리군 (평균 = 0.850  $\text{mg L}^{-1}$ , 범위 = 0.183~1.269)에서 약 6.7배 높았다. 결국 유해조류 생물제재 처



**Fig. 2.** Effects of CAS plus BAC on major physicochemical variables during the study period. OUT: outer environment, CON: control, CAS+BAC: Casitone plus algicidal bacterium.

리에 의해 수중 내 뚜렷한 pH와 DO감소 및 영양염 증가가 일어났다.

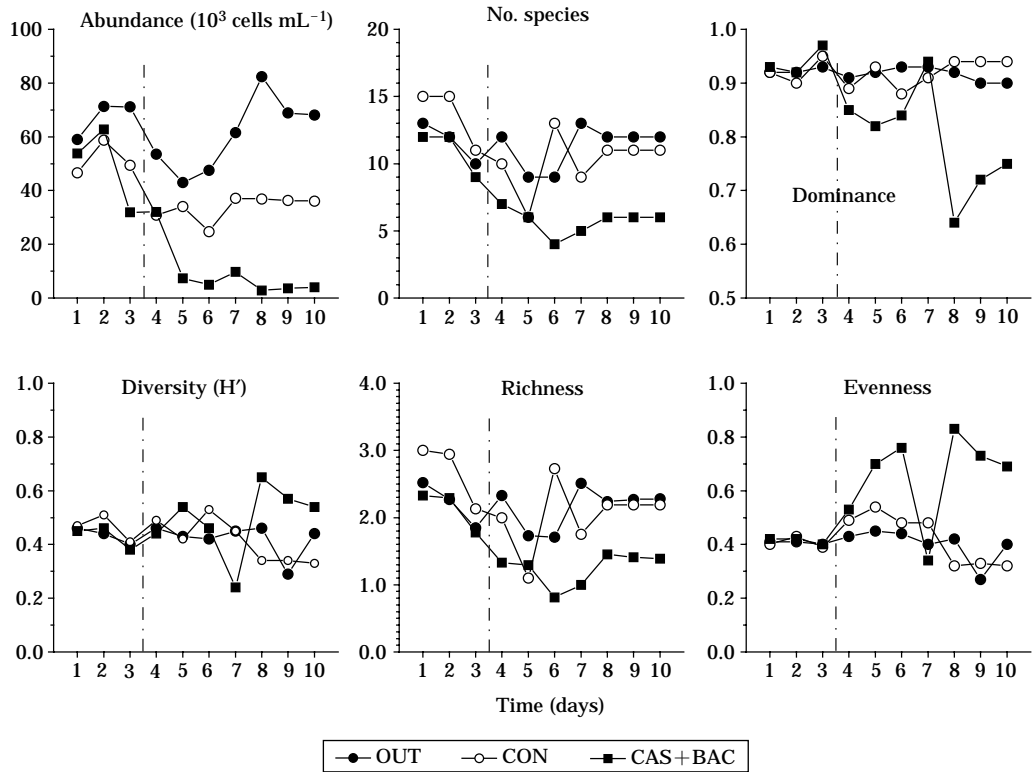
## 2. 식물플랑크톤 군집변화

생물제재 처리 후 식물플랑크톤 군집의 변화는 Fig. 3과 같다. 실험기간 동안 식물플랑크톤 밀도는 대조군에서 평균  $3.9 \times 10^4$  cells mL<sup>-1</sup> (범위 =  $2.5 \sim 5.9 \times 10^4$  cells mL<sup>-1</sup>)로서 변동폭은 크지 않았으나 생물 실험군에서는 평균  $1.62 \times 10^4$  cells mL<sup>-1</sup> (범위 =  $0.3 \sim 6.3 \times 10^4$  cells mL<sup>-1</sup>)로서 약 60% 정도 감소되었다. 출현 종수 역시 생물제재 처리에 따라 뚜렷한 감소를 보였는데, 대조군에서 평균 11종 (범위 = 6~15종)를 보인 반면, CAS+BAC처리군에서는 평균 7종 (범위 = 4~12종)으로 약간 감소하였다. 우점종 지수는 생물제재를 처리하지 않은 대조군에서 평균 0.92 (범위 = 0.88~0.95)로서 *Microcystis aeruginosa*의 절대적인 우점을 보였다. 이에 반해 생물제재 처리 후에는 평균 0.88 (범위 = 0.64~0.97)으로 뚜렷한 감소를 보였다. 종 다양성 지수(H)는 대조군의 경우, 평균 0.43 (범위 = 0.33~0.53), 생물제재 처리군에서는 평균 0.47 (범위 = 0.24~0.57)로 실험 후반으로 갈수록 증가하였다. 이는 출현 종수의 증가라기보다 현존량의 감소로 인한 상대적

인 다양성 지수가 증가한 것으로 판단된다. 조사기간 중 식물플랑크톤 풍부도지수는 생물제재 처리 전후에 큰 차이를 보였다. 대조군의 경우 약  $2.2 \pm 0.5$ 인 반면, 처리군은  $1.5 \pm 0.5$ 를 나타내어 처리 후의 낮은 종 출현과 낮은 현존량에 기인한 것으로 판단된다. 균등성 지수는 풍부도와 상반된 결과를 보였다. 대조군의 경우 평균 0.42 (범위 = 0.32~0.54)인 반면, 생물제재 처리군에서는 평균 0.58 (범위 = 0.34~0.76)로서 실험 후반으로 갈수록 큰 차이를 보였다. 결국 실험초기부터 남조 *M. aeruginosa*, 녹조 *Ankistrodesmus* spp.가 우점하였던 mesocosm 내외부 환경은 식물플랑크톤 군집이 비교적 안정된 반면, 생물제재 (CAS+BAC) 처리에 따른 식물플랑크톤 총 현존량 감소로 인하여 우점도지수는 감소하고 종다양성, 풍부도, 균등도 지수 등은 증가하였다.

## 3. 우점종과 엽록소 a 변동

실험연못의 식물플랑크톤 군집은 실험초기에 남조 *Microcystis aeruginosa*와 녹조 *Ankistrodesmus* spp.가 총 밀도의 90% 이상을 점유하였으며, 그밖에 녹조 *Scenedesmus quadricauda*, *Ankistrodesmus falcatus*가 약 5~7%를 차지하였다. 시간의 경과에 따라 대조군은



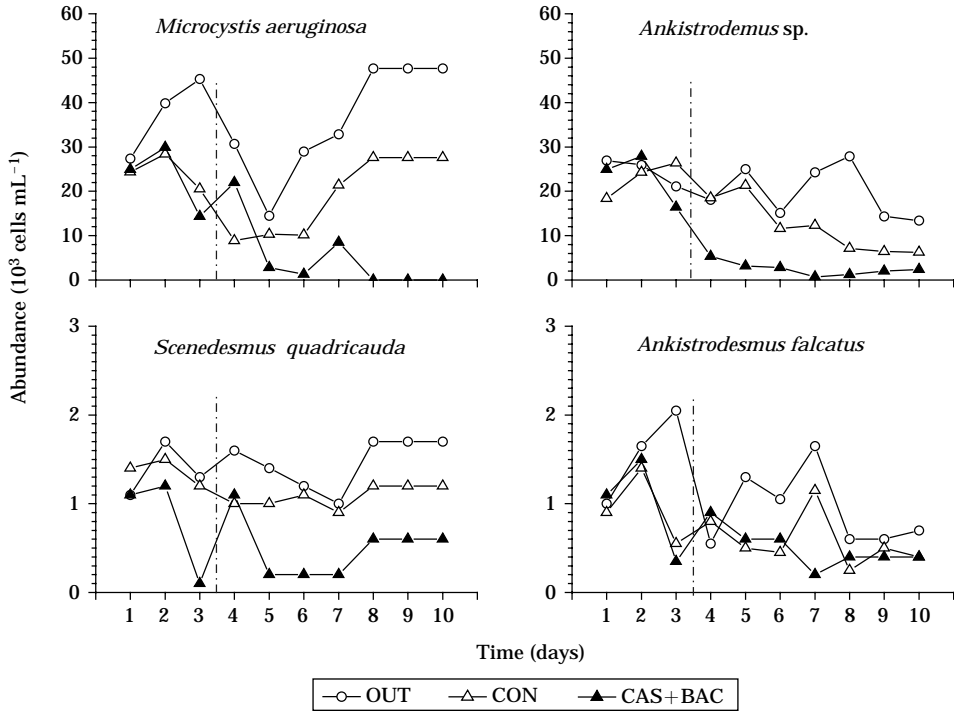
**Fig. 3.** Effects of CAS plus BAC on the ecological indices the phytoplankton communities during the study period. OUT: outer environment, CON: control, CAS+BAC: Casitone plus algicidal bacterium. The dot line means the treatment time of biological control agent.

Mesocosm외부 밀도의 20~30% 정도로 낮았다. 실험 기간 동안 생물체제의 처리에 상관없이 가장 우점하였던 *M. aeruginosa*는 대조군의 경우, mesocosm설치 후 3일간 일시적인 감소가 일어났으나 다시 증가하여 실험 후기에는  $3.0 \times 10^4$  cells mL<sup>-1</sup>까지 도달한 반면, 생물체제 처리군에서는 처리 8일부터 거의 출현하지 않았다. 제2 우점종인 *Ankistrodesmus* spp.는 실험 초기부터 완만하게 감소하였는데, 대조군에서 점차적으로 완만하게 감소한 반면, 생물체제 CAS+BAC처리군에서는 처리 1일째부터 급격하게 감소하여 처리 4일째에는 극히 낮은 현존량 ( $0.28 \times 10^4$  cells mL<sup>-1</sup>)을 보였다. 또 다른 우점종 *Scenedesmus quadricuda*와 *Ankistrodesmus falcatus*는 실험 초기부터 낮은 현존량을 보였으나 CAS+BAC 처리에 의해 더욱 뚜렷하게 감소하였다(평균;  $1.2 \times 10^4$  cells mL<sup>-1</sup> →  $0.3 \times 10^4$  cells mL<sup>-1</sup>). 결국 식물플랑크톤 군집은 생물체제 CAS+BAC 처리에 의해 대상조류인 *M. aeruginosa* 뿐만 아니라 다른 우점종들 역시 강한 억제효과를 받은 것으로 밝혀졌다(Fig. 4). 한편, 실험기간 동안 생물체제의 처리와 상관없이 전체적으로 *M. aeruginosa*

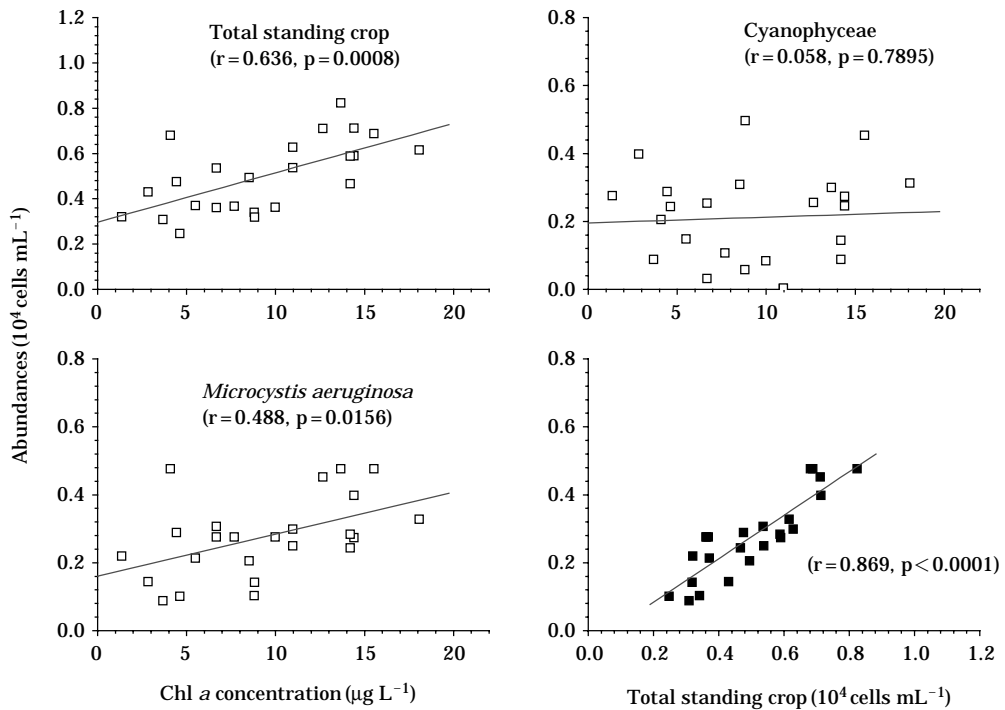
는 식물플랑크톤 총 밀도( $r = 0.87, p < 0.0001$ )와 엽록소 a양( $r = 0.49, p < 0.05$ )과 높은 상관성을 나타낸 반면, 남조류 총밀도와는 극히 낮은 관계를 보였다(Fig. 5).

#### 4. 조류독소 microcystin-LR의 변동

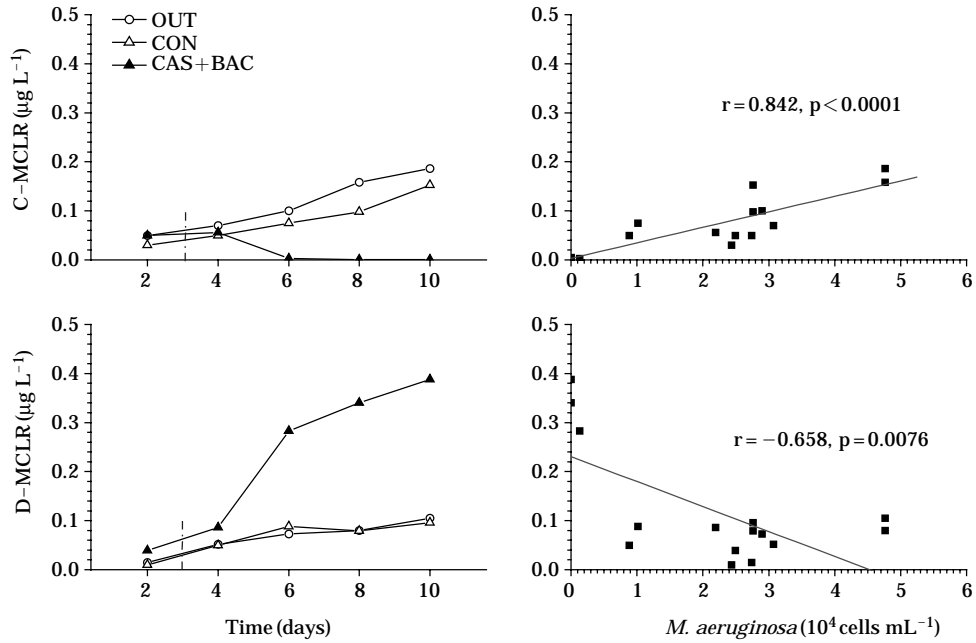
Mesocosm외부 및 대조군의 microcystin-LR농도는 조체성과 용존성 모두 점차적으로 증가하였으나, CAS+BAC 처리에 따라 조체성 독소의 감소 및 용존성 독소의 증가가 일어났다(Fig. 6). 또한 CAS+BAC 처리 전에는 조체성이 용존성보다 높았으나 처리 후에는 남조 *M. aeruginosa*감소로 인한 조체성 감소 및 용존성 증가가 뚜렷하였다. 특히, 조체성은 CAS+BAC처리 3일째부터 거의 검출되지 않은 반면, 용존성은 처리 3일째부터 점차 급격하게 증가하여 대조군 용존성 농도의 4배 이상 증가하였다. 결국 독소 microcystin-LR는 남조 *M. aeruginosa* 밀도와 높은 상관성을 보였는데, 각각 조체성에 대해 강한 양의 상관( $r = 0.842, p < 0.0001$ ), 용존성에 대해 음의 상관( $r = -0.658, p = 0.0076$ )을 나타냈다.



**Fig. 4.** Effects of CAS plus BAC on the dominant species (over 90% of total standing crops) during the study period. OUT: outer environment, CON: control, CAS+BAC: Casitone plus algicidal bacterium. The dot line means the treatment time of biological control agent.



**Fig. 5.** Correlation between chlorophyll *a* concentrations and standing crops of phytoplankton, cyanophyceae, and *M. aeruginosa*, and between total standing crops of phytoplankton and *M. aeruginosa* throughout the study.



**Fig. 6.** Variation of the concentrations of microcystin-LR after the treatment of CAS plus BAC, and relation to the abundance of *M. aeruginosa* throughout the study.

고 찰

남조 대발생 연못에 설치한 mesocosm에 살조세균 *Xantobacter autotrophicus*와 Casitone를 혼합 처리한 결과, 남조 *Microcystis aeruginosa*의 뚜렷한 감소는 물론 식물플랑크톤 총현존량의 감소가 일어났다. 특히 전자는 처리 8일째 거의 관찰되지 않고, 후자는 약 60% 이상의 감소효과를 나타냈다. 뿐만 아니라 *Ankistrodesmus spp.*, *Scenedesmus quadricauda*, *Ankistrodesmus falcatus* 등 대부분의 우점종이 감소하였으며, 역으로 특정종의 증가는 관찰되지 않았다. 본 실험에 사용된 살조세균 SM02는 이미 Sang 등(2004)에 의하여 살조능이 밝혀진 균주로서, 배양 *M. aeruginosa*에 살조세균 pellet만을 처리하거나 또는 Casitone과 혼합 처리할 경우 효과적인 살조능을 보였으나, 1L 규모의 현장수 실험에서 Casitone 혼합 처리군에서만 살조능을 보였다 (Sang et al., 2004). Choi 등(2005)의 연구에서도 배양 *M. aeruginosa*에 효과적인 제어능을 보였던 *Streptomyces neyagawaensis* 역시 현장수에 단독 처리할 경우, 거의 제어효과를 나타내지 않았다. 두 연구에 의하면 결국 살조세균을 이용한 현장수 남조 *M. aeruginosa* 제어는 살조세균의 배지첨가에 따른 살조능의 활성을 증가시켰다고 판단된다. 비록 100L

mesocosm에 0.1% Casitone처리가 남조는 물론 식물플랑크톤 제어에 매우 효과적이었으나 현장수에 함께 첨가한 배지 Casitone이 살조세균의 성장에 어떠한 효과를 주었는지 정확히 알 수 없었다. Casitone처리 이후 지속적인 감소와 8일째부터 계수범위 미만으로 관찰되는 점을 고려할 때, 처리한 Casitone은 시간의 경과에 따라 살조세균이 이용하였을 것으로 사료되었다. 다만 처리한 살조세균과 현장수 내에 존재하였던 박테리아와의 먹이경쟁 등 (Lovejoy et al., 1998)과 같은 살조세균의 거동에 대한 다양한 연구가 계속되어야 할 것이다.

생물제재 처리 이후 mesocosm내 pH, 용존산소의 감소와 영양염의 증가가 일어났다. 특히 pH의 감소는 식물플랑크톤의 감소와 밀접한 관계를 보이며 (Horne and Goldman, 1994), 용존산소의 감소는 Casitone첨가에 의한 살조세균 및 수계 내 박테리아의 활성 증가로 판단된다 (Lewis et al., 1986). 또한 급격한 영양염의 증가는 유기물 Casitone 유입으로 인한 결과이며 (Horne and Goldman, 1994), 인산염 (PO<sub>4</sub>-P)과 규산염 (SiO<sub>2</sub>)의 농도가 급증하였는데 살조세균의 투입시 나타나는 일반적인 현상이지만 (Jung et al. 2004; Kang et al. 2005; Choi et al. 2005), 특히 인산염의 경우, 대조군보다 15배 이상의 급격한 증가를 가져왔는데, 이는 살조세균을 이용한 조류 제어에 있어 매우 부정적인 결과로 판단되며 규산염 역

시 6.5배 이상의 높은 증가를 가져왔으나, 다른 규모의 성장은 관찰되지 않았다. 이런 결과들은 생물제제를 이용한 남조 *M. aeruginosa*의 제어에 있어 배지를 포함한 살조세균의 적용이 수계 내 영양염이나 용존산소의 급격한 변화를 가져와 다른 수중생물에도 심각한 영향을 미칠 수 있음을 시사해 주고 있다. 다만, 퇴적층(sediment)이 없는 mesocosm내부에서 지속적인 물의 교란으로 인한 섭모충, HNF, 동물플랑크톤 등의 섭식활동이나 퇴적층에 의한 영양물질의 흡수 등이 원활치 못하고 살조세균에 의한 식물플랑크톤 분해 및 사멸과정에서 무기이온들이 그대로 수중에 용출되었을 것으로 사료되었다.

생물제제의 처리에 따른 남조류 감소와 더불어 mesocosm내 microcystin-LR중 조체성 독소는 처리 3일째부터 검출 되지 않았으며, 반대로 용존성 독소는 점차 증가하였다. 조체성 독소의 미검출은 살조세균에 의해 *Microcystis aeruginosa*가 감소되면서 대부분이 수중으로 용출되었을 것으로 판단된다. 김 등(1999)은 호수에서 존재하는 microcystin은 대부분 조류 세포 내에 존재하며 조류 세포를 제거하면 동시에 제거된다고 보고하였다. 그러나 본 연구에서 *Microcystis* 분해에 따른 용존성 독소의 증가는 다른 수중생물이나 수서생태계의 심각한 교란 인자로 작용할 가능성이 매우 높다. 결국 하절기 *Microcystis aeruginosa*의 대발생을 보이는 대청호(오 등, 1999), 낙동강(Ha et al., 2003), 주암호(Kim and Hwang, 2004) 등이 인근 지역의 주요 상수원인 점을 감안한다면, 생물제제를 이용한 상수원 저수지의 남조류 제어는 사실상 어려울 것으로 판단된다. 아울러 비록 공원 내 소형 연못과 같은 작은 수역일지라도 수온 감소와 함께 남조세포의 사멸 및 분해 시 유리되는 용존성 독소의 증가에 대한 적극적인 대책이 필요하다고 사료되었다.

## 적 요

매년 남조 *Microcystis aeruginosa*가 대발생하는 인공 연못에 100 L mesocosm를 설치하고 생물제제 (*Xantobacter autotrophicus*+Casitone)를 혼합 처리한 결과, 환경요인의 변화(pH, DO감소, 영양염 증가)와 함께 식물플랑크톤 군집의 뚜렷한 변화가 관찰되었다. 생물제제 처리 후 *M. aeruginosa*는 점차 감소하여 8일에는 관찰되지 않았고, 식물플랑크톤 총 밀도의 약 60% 이상이 감소하였다. 또한 남조의 소멸과 함께 조체성 독소의 감소 및 용존성 독소가 증가하였으며, 뚜렷한 영양물질의 증가에도 불구하고 현존량이 증가하는 종은 나타나지 않았다.

이러한 영양물질이나 용존성 독소의 증가는 생물제제를 이용한 남조류 제어가 상수원 저수지와 같은 장소보다는 규모가 작은 연못이나 저수지 등에 적합하며, 생물제제 처리 이후 수질변화에 대한 적극적인 수질관리 대책이 마련되어야 할 것으로 판단되었다.

## 감사의 말씀

이 논문은 2004년 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었으며(KRF-2004-050-C00018), 본 연구수행에 협조해 주신 국립환경연구원 한강물환경연구소에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 김범철, 김호섭, 박호동, 최광순, 박종근. 1999. 국내 호수에서 발생한 남조류의 microcystin 함량과 독성 평가. 한국육수학회지 **32**: 288-294.
- 박혜경. 2000. 녹조현상. 수질분야-환경관련미생물 21. 환경자료집 vol. 2.
- 신정이, 박석순. 2001. 하천 수생식물의 영양염류 제거능 산정에 관한 연구. 한국물환경학회지 **17**: 201-213.
- 오희목, 반용호, 박대균, 이진환, 맹주선. 1999. 대청호내 cyanobacteria에 의한 취기물질 생산. 한국육수학회지 **32**: 181-188.
- 이정호, 박종근, 김은정. 2002. 국내 주요 호수의 식물플랑크톤 종조성 및 영양단계 평가. *Algae* **17**: 275-281.
- 전만식, 김범철. 1999. 부레옥잠의 수중영양염 제거 잠재력에 관한 고찰. 한국환경물학회지 **17**: 117-124.
- Ahn, C.Y, M.H. Park, S.H. Joung, H.S. Kim, K.Y. Jang and H.M. Oh. 2003. Growth inhibition of cyanobacteria by ultrasonic radiation: Laboratory and enclosure studies. *Environ. Sci. Technol.* **37**: 3031-3037.
- APHA. 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater. 19th Ed. APHA, AWWA, WPCF, Washington, p. 1134.
- Bettarel, Y, C., Amblard, T. Sime-Ngando, J.F. Carrias, D. Sargos, F. Garabetian and P. Lavandier. 2003. Viral lysis, flagellate grazing potential, and bacterial production in Lake Pavin. *Microbiol.* **45**: 119-127.
- Burnham, J.C., S.A. Collart and M.J. Daft. 1984. Myxococcal predation of the cyanobacterium *Phormidium luridum* in aqueous environments. *Arch. Microbiol.* **137**: 220-225.
- Carmichael, W.W. 1988. Toxins of freshwater algae. *In* Tu



- AT (Ed.) Handbook of Natural Toxins, Vol. 3, Marine Toxins and Venoms. Marcel Dekker, New York, pp. 121–147.
- Choi, H.-J., B.-H. Kim, J.-D. Kim and M.-S. Han. 2005. *Streptomyces neyagawaensis* as a control for the hazardous biomass of *Microcystis aeruginosa* (Cyanobacteria) in eutrophic freshwaters. *Biological Control* **33**: 335–343.
- Daft, M.J., S.B. McCord and W.D.P. Stewart. 1975. Ecological studies on algal-lysing bacteria in fresh waters. *Freshwater Biol.* **5**: 577–596.
- Dawson, R.M. 1998. The toxicology of microcystins. *Toxicol.* **36**: 953–962.
- Fukami, K., A. Yuzawa, T. Nishijima and Y. Hata. 1992. Isolation and properties of a bacterium inhibition the growth of *Gymnodinium nagasakiense*. *Nippon Suisan Gakkaishi* **58**: 1073–1077.
- Fukushima, M., N. Takamura, B.H. Kim, M. Nakagawa, L. Sun and Y. Zheng. 2000. The responses of an aquatic ecosystem to the manipulation of the filter-feeding silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) *Verh. Internat. Verein. Limnol.* **27**: 1–7.
- Gosselain, V., J.-P. Descy, L. Viroux, C. Joaquim-Justo, A. Hammer, A. Metens and S. Schweitzer. 1998. Grazing by large river zooplankton: a key to summer potamoplankton decline. The case of the Meuse and Moselle rivers in 1994 and 1995. *Hydrobiologia* **369/370**: 199–216.
- Ha, K., M.H. Jang and G.J. Joo. 2003. Spatial and temporal dynamics of phytoplankton communities along a regulated river system, the Nakdong River, Korea. *Hydrobiologia* **470**: 235–245.
- Horne A.J., Goldman C.R. 1994. *Limnology*. 2<sup>nd</sup> ed. McGraw-Hill. New York.
- Jung, S.W., J.-K. Seo, B.-R. Kim, B.-H. Kim and M.-S. Han. 2004. Potential in the application of algicidal bacterium *Pseudomonas fluorescens* HYK0210-SK09 to control centric diatom *Stephanodiscus hantzschii* in mesocosm experiments in the Han River, Korea. 1st Korean-Japan joint meeting of symposium. 2004. Pusan. Korea.
- Kang, Y.-H, J.-D. Kim, B.-H. Kim, D.-S. Kong and M.-S. Han. 2005. Isolation and characterization of Bio-agent antagonistic to diatom, *Stephanodiscus hantzschii*. *J. Microbiol.* **98**: 1030–1038.
- Kasai, F., N. Takamura and S. Hatakeyama. 1993. Effects of simetyrene on growth of various freshwater algal taxa. *Environ Pollu.* **79**: 77–83.
- Kim, B.H., M.K. Choi and N. Takamura. 2003. Phytoplankton preferences of young silver carp, *Hypophthalmichthys molitrix*, in hypereutrophic mesocosms during a warm season. *J. Freshwater Ecol.* **18**: 69–77.
- Kim, B.-H. and S.O. Hwang. 2004. The structure of the plankton community and the cyanobacteria bloom during the rainy season in mesoeutrophic lake (Lake Juam), Korea. *Kor. J. Sanit.* **19**: 51–59.
- Kuosa, H., R. Autio, P. Kuuppo, O. Setälä and S. Tanskanen. 1997. Nitrogen, silicon and zooplankton grazing controlling the Baltic spring bloom: an experimental study. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. **45**: 813–821.
- Lewis, D.L., H.P. Kollig and R.E. Hodson. 1986. Nutrient limitation and adaptation of microbial populations to chemical transformations. *Appl. Environ. Microbiol.* **51**: 598–603.
- Lloyd, M. and R.J. Ghelard. 1964. A table for calculating the equitability? component of species diversity. *J. Anim. Ecol.* **33**: 421–425.
- Lovejoy, C., J.P. Bowman and M.H. Gustaaf. 1998. Algicidal Effects of a Novel Marine *Pseudoalteromonas* Isolate (Class Proteobacteria, Gamma Subdivision) on Harmful Algal Bloom Species of the Genera *Kattonella*, *Gymnodinium*, and *Heterosigma*. *Appl. Environ. Microbiol.* **64**: 2806–2813.
- Manage, P.M., Z. Kawabata and S. Nakano. 2001. Dynamics of cyanophage-like and algicidal bacteria causing *Microcystis aeruginosa* mortality. *Limnology* **2**: 73–78.
- Margalef, R. 1958. *Perspectives in ecology theory*. Chicago, University of Chicago Press. 112 pp.
- McNaughton, S.J. 1967. Structure and function in California grasslands. *Ecology* **49**: 962–972.
- Nagata S.T. Tsutusmi, A. Hasegawa, F. Yoshida and Y. Ueno 1997.: Enzyme Immunoassay for direct determination of microcystins in environmental water. *J. Assoc. Off Anal. Chem. Int.* **80**: 408–417.
- Ohki, K. and Y. Fujita. 1996. Occurrence of a temperate cyanophage lysogenising the marine cyanophyte *Phormidium persicum*. *J. Phycol.* **32**: 365–370.
- Pielou, E.C. 1966. The measurement of diversity in different types of biological collections. *J. Theor. Biol.* **13**: 131–144.
- Reynolds, C.D. 1985. *The ecology of freshwater phytoplankton*. Cambridge Univ Press. p. 384.
- Sang, M., B.-H. Kim and M.-S. Han. 2004. Isolation and identification of an algicidal bacterium against *Microcystis aeruginosa* in freshwater. Korean Association of Biological Science, Seoul national University.
- Shannon, C.E. and W. Weaver. 1963. *The mathematical*

- theory of communication. University Of Illinois Press, Urbana.
- Shinya, K., I. Akiko, M. Atsushi and M. Masahoro. 2002. Isolation and identification of the anti-algal compound, harmaline (1-methyl- $\beta$ -carboline), produced by the algicidal bacterium, *Pseudomonas* sp. K44-1. *J. Appl. Phycol.* **14**: 109-114.
- Sigee, D.C., R. Glenn, M.J. Andrews, E.G. Bellinger, R.D. Butler, H.A.S. Epton and R.D. Hendry. 1999. Biological control of cyanobacteria: principles and possibilities. *Hydrobiologia* **395/396**: 161-172.
- Vincent, W.F. 1987. Dominance of blooming forming cyanobacteria (blue-green). *New Zea, J. Mar. Freshwater Res.* **21**: 361-542.
- Wright, S.J., K. Redhead and H. Maudsley. 1981. *Acanthamoeba castellanii*, a predator of cyanobacteria. *J. Gen. Microbiol.* **125**: 293-300.
- Yamamoto, Y., T. Kouchiwa, Y. Hodoki, K. Hotta, H. Uchida and K. Harada. 1998. Distribution and identification of actinomycetes lysing cyanobacteria in a eutrophic lake. *J. Appl. Phycol.* **10**: 391-397.
- (Manuscript received 14 May 2005,  
Revision accepted 9 June 2005)