

## pH, 영양염류 농도 및 빛이 *Microcystis* bloom의 초기단계에 미치는 영향

하 경·장 민 호·정 광 석·박 재 림\*·주 기 재  
부산대학교 생물학과·신라대학교 환경학과  
(2001년 6월 2일 접수; 2002년 7월 5일 채택)

### Effect of pH, nutrient and light on the early stage of *Microcystis* bloom

Kyong Ha, Min-Ho Jang, Kwang-Seuk Jeong, Jae-Rim Park\* and Gea-Jae Joo

Dept. of Biology, Pusan National University, Busan 609-735, Korea  
\*Dept. of Environmental Science, Silla University, Busan 617-736, Korea  
(Manuscript received 2 June, 2001; accepted 5 July, 2002)

In order to determine the factors causing *Microcystis* spp. bloom in the lower Nakdong River (Mulgum), we prepared wide ranges of pH, nutrient(N, P) concentration and the light through an enclosure experiment for 10 days (pH gradient: 6.5, 7.5, 8.5, 9.5; gradient of N, P:  $\frac{1}{2}$ DW +  $\frac{1}{2}$ River Water (RW), RW only; four different levels of nutrient addition/day; light: 100, 85, 60, 30, 15% of full sun light). From three days, the difference of *Microcystis* density in each enclosures was observed. The high density of *Microcystis* was maintained in the treatments over pH 9.5 and 85% of full sun light. However, in all nutrient treatments, relatively lower cell density than that of pH and light treatments was observed. These results suggested that pH and light input may play more important roles than nutrients in the early development of *Microcystis* bloom in the eutrophic lower Nakdong River.

Key words : *Microcystis* bloom, enclosure, light, nutrient, pH

#### 1. 서 론

우리나라를 비롯한 유럽, 일본, 호주 등에서 남조 군집의 번성과 이에 따른 수자원 관리는 현재 당면하고 있는 심각한 환경문제 중의 하나이다. 특히, 부영양화가 진행된 호수나 강에서 남조류의 수화현상은 수표면에 과도하게 밀집하여 형성하여 주변 경관을 해치거나, 이취미 물질을 생산하여 수질관리 측면에서 문제가 되고 있다.<sup>1-3)</sup> 특히, 남조군집의 대표종인 *Microcystis aeruginosa*의 경우, 간독성의 일종인 microcystin을 생성, 분비하여 상위 포식자인 동물플랑크톤, 어류 등의 성장률이나 생존률을 떨어뜨려 담수 생태계의 먹이망 구조와 기능에 변화를 초래하기도 한다.<sup>4)</sup>

*Microcystis aeruginosa*의 번성에 관한 연구는 전 세계 부영양화 담수생태계를 대상으로 비교적 활발하게 진행되어 왔다. 1970년 초 Reynolds의 연구를 기점으로,<sup>5)</sup> 주로 현장 모니터링을 통해 이 군집의 번성과 수표면의 과다 밀집 현상의 기작을 밝히는 연구가 진행되었다.<sup>6-10)</sup> Shaprio<sup>11)</sup>는 *M. aeruginosa* 군집이 부영양화 상태의 정체수계에서 수온증가, 질소와 인의 농도 비율, 높은 pH 조건에서의 이산화탄소 친화성, 기낭을 이용한 부유기작과 군체형성, 독성물질 생성 기작 등의 방어수단을 이용해 열악한 환경에서도 우점할 수 있다고 하였다.

우리나라 4대강을 비롯한 대부분의 큰 강들은 농·공업 용수 등으로 수자원의 수요가 높아 수자원의 인위적 관리가 필요한 실정이다. 강의 지류 곳곳에 설치된 댐과 염수의 유입을 막기 위해 건설된 하구둑으로 인해 강의 흐름이 방류량에 의해 조절되는 '강·저수지 혼합형태(river-reservoir hybrid

Corresponding Author : Gea-Jae Joo, Dept. of Biology, Pusan National University, Busan 609-735, Korea  
Phone : +82-51-510-2258  
E-mail : gjjoo@pusan.ac.kr

system)'의 특성을 보이며, 유량이 부족한 갈수기에  
는 심각한 부영양화 현상이 관측되고 있다.<sup>12)</sup> 지난  
8년간 낙동강 하류 (물금) 모니터링에 의하면, 6월  
중순 발생하는 여름 초기강우 이후 일사량과 30℃  
이상의 수온 증가로 인해 수체가 정체되는 7월말부  
터 *Microcystis* 군집이 번성하는 것으로 관찰되었  
다.<sup>13,14)</sup> 특히, 이 군집은 발생 초기에 밀도가 급증하  
며, microcystin을 생성한다고 알려져 있다.<sup>15)</sup> 그러  
나, 발생의 초기단계에 어떤 환경 요소들의 직·간  
접적인 영향으로 이 군집의 경쟁력이 증가하여 2~  
3개월 이상 우점하는데 대한 실험적인 접근은 미흡  
한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 특정 식물 플랑  
크톤군집이 우점하지 않는 6월말 낙동강 하류 원수  
를 실험실로 운반하여 pH, 빛(light), 영양염류 농도  
(질소, 인)의 단계를 달리한 enclosure 실험을 통해  
*Microcystis* 군집의 초기 번성 및 우점에 영향을 주  
는 환경요소들을 기존의 현장연구 및 문헌을 통해  
설명하고자 한다.

## 2. 실험 대상지 및 실험 방법

낙동강 하류역은 연평균 클로로필 함량 40  $\mu\text{g}$   
 $\text{L}^{-1}$  이상으로 심각한 부영양화 상태이며, 갈수기 겨  
울~봄 (11월 말~4월 초)에는 규조 군집의 일종인  
*Stephanodiscus hantzschii*가, 갈수기 여름철에는 남  
조 군집인 *M. aeruginosa*가 전체 출현군집의 70~  
80% 정도를 차지하여 대번성 현상을 일으킨다.<sup>13)</sup> 특  
히, 이러한 현상의 대표종인 *Microcystis* 군집의 번  
성은 여름철 취수장 수질악화의 가장 큰 요인이 된  
다. Table 1은 물금 지역의 지난 5년 (1994~1998  
년)간 여름철 (7~9월)과 조사시기(1997년 여름)의  
육수학적 특성을 보여주고 있다.

pH, 빛, 영양염류(질소, 인) 등에 따른 *M. aeru-*  
*ginosa* 밀도 변화를 추적하기 위해, 6월말 장마 집  
중강우 이후 낙동강 하류에서 특정군집이 우점하지  
않는 시기에 실험을 실시하였다 (*M. aeruginosa*의  
상대풍부도 20%; chl. *a*, 10.3  $\mu\text{g}$   $\text{L}^{-1}$ ; pH, 8.1; 영양  
염류 농도,  $\text{NO}_3$ , 3.4  $\text{mg}$   $\text{L}^{-1}$ ,  $\text{NH}_4$ , 0.09  $\text{mg}$   $\text{L}^{-1}$ ,  
TN, 3.6  $\text{mg}$   $\text{L}^{-1}$ ,  $\text{PO}_4$ , 31.7  $\mu\text{g}$   $\text{L}^{-1}$ , TP, 427  $\mu\text{g}$   $\text{L}^{-1}$ ;  
수온 30.4℃). 조사지점에서 채수된 원수를 실험실로  
운반하여 5L 폴리에틸렌 병 (pH, 빛, 영양염류 처리  
군, 단계별  $n=3$ )에서 10일간 수행하였다. 동물플랑  
크톤의 포식 영향을 최소화하기 위해, 물금 원수를  
망목 크기 67  $\mu\text{m}$ 의 screen (Wild Co. plankton net)  
에 여과한 후 사용하였다. pH 처리군은 6.5, 7.5, 8.5,  
9.5로, 빛 처리군은 여름철 평균 조도인 1133  $\mu\text{E}$   
 $\text{m}^{-2} \text{sec}^{-1}$ 을 100% 투과율로 하여 100%, 85%, 60%,  
30%, 15%의 5가지 구배로 나누었다. 영양염류의 경

Table 1. Physico-chemical parameters in lower Nakdong  
River during the summer  
(Jun.-Sept.)(1994 to 1998,  $n=71$ ; 1997,  $n=26$ )

Parameter	1994~1998	1997
	Mean±sd (min.-max.)	Mean±sd (min.-max.)
Water temperature	27.2±3.5(20.3~34.4)	26.0±3.0(20.3~30.8)
Secchi transparency(cm)	68±27.8(7~145)	58.1±39(7~145)
Conductivity( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )	265.8±99.5(90~640)	253.2±96.9(130~440)
pH	8.3±0.9(6.5~10.2)	8.0±0.9(6.82~9.71)
DO( $\text{mg l}^{-1}$ )	9.0±3.1(3.4~17)	7.6±2.7(3.4~13)
DO(%)	115.6±42.2(40.6~238)	96.2±37.9(40.6~167.2)
Turbidity(NTU)	32.4±90.6(1.8~648)	41.2±58.6(1.8~233)
Alkalinity( $\text{mg l}^{-1}$ )	51.9±16(20~84)	44±13.7(26~68)
BOD( $\text{mg l}^{-1}$ )	5.0±2.49(0.9~12.9)	5.1±2.8(0.91~11.1)
Chl. <i>a</i> ( $\mu\text{g l}^{-1}$ )	54.4±136.5(1.8~1035)	37.9±114.8(3.0~573.8)
$\text{NO}_3\text{-N}$ ( $\text{mg l}^{-1}$ )	2.3±0.99(0.19~4.12)	3.1±0.5(1.8~4.03)
$\text{NH}_4\text{-N}$ ( $\text{mg l}^{-1}$ )	0.2±0.17(0.01~0.71)	0.17±0.09(0.06~0.45)
Total Nitrogen( $\text{mg l}^{-1}$ )	3.1±1.3(0.3~7.5)	4.02±0.92(2.5~6.2)
$\text{PO}_4\text{-P}$ ( $\mu\text{g l}^{-1}$ )	42.9±26.9(4.0~106.1)	29.6±19(4.0~71.9)
Total Phosphorus( $\mu\text{g l}^{-1}$ )	194.4±120.4(54.0~817)	266.8±195(154~817)
Silica( $\text{SiO}_2$ )	6.6±4.1(0.16~16.2)	8.0±4.1(0.57~14.8)

우는 실험 대상원수의 1일 평균 질산성 질소 (nitrate-  
N)와 인산성 인 (phosphate-P) 감소량 (질산성 질  
소, 35  $\mu\text{g}$   $\text{L}^{-1}$ ; 인산성 인, 2.1  $\mu\text{g}$   $\text{L}^{-1}$ )을 기초하여, 6  
가지 구배로 나누었다 (½중류수+½원수; 낙동강 원수;  
낙동강 원수에  $\text{NaNO}_3$  8.75  $\mu\text{g}$   $\text{L}^{-1}$ ,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  0.525  
 $\mu\text{g}$   $\text{L}^{-1}$ 을 매일 첨가; 낙동강 원수에  $\text{NaNO}_3$  17.5  $\mu\text{g}$   
 $\text{L}^{-1}$ ,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  1.05  $\mu\text{g}$   $\text{L}^{-1}$ 을 매일 첨가; 낙동강 원수  
에  $\text{NaNO}_3$  35  $\mu\text{g}$   $\text{L}^{-1}$ ,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  2.1  $\mu\text{g}$   $\text{L}^{-1}$ 을 매일 첨  
가; 낙동강 원수에  $\text{NaNO}_3$  75  $\mu\text{g}$   $\text{L}^{-1}$ ,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  4.2  
 $\mu\text{g}$   $\text{L}^{-1}$ 을 매일 첨가). 영양염류와 빛, 그리고 pH 중  
각 처리구별로 변화를 준 항목을 제외한 나머지 항  
목의 경우 일정한 수준으로 유지하였다 (빛, 963  $\mu\text{E}$   
 $\text{m}^{-2} \text{sec}^{-1}$ ;  $\text{NO}_3$  주입량, 35  $\mu\text{g}$   $\text{L}^{-1} \text{day}^{-1}$ ;  $\text{PO}_4$  주입  
량, 2.1  $\mu\text{g}$   $\text{L}^{-1} \text{day}^{-1}$ ; pH, 8.5). 빛의 경우 여름철 평  
균 일사량을 기준으로 하였고, 영양염류 농도의 경  
우 1일 소모량을 기준으로 사용하였다. pH는 매일  
0.001 N HCl을 주입하여 유지하였다. 교반기를 이  
용하여 폴리에틸렌 병을 매일 4회 흔들어 침전 등을  
방지하였다. 실험 진행 중 세포 밀도 계수를 위해  
실험시작일과 이로부터 2, 4, 6, 8, 10일 경과 후 동  
일시간대 (11:00-12:00)에 샘플을 채수하였다.

식물플랑크톤의 종조성 및 계수를 위해서는 채수  
한 원수 샘플을 Lugol's 용액으로 고정시킨 후, 10  
mL를 24시간 동안 settling chamber (체적: 10 mL,  
직경: 2.5 cm)에 침전시켜 두었다가 Zeiss IM 도립현  
미경 (Telaval 31, Carl Zeiss, Germany)으로 ×400에

서 20회 이상 계수하여, mL 당 개체수로 환산하였다.<sup>16)</sup> *Microcystis* 군집의 동정은 Komarek<sup>17-19)</sup> 방식을 따라 Nikon 광학 현미경하( $\times 1000$ )에서 실시하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. pH 처리군

pH는 *M. aeruginosa* 군집의 생체량에 영향을 미치는 중요한 인자로 나타났다 (Fig. 1). 실험시작일에는 남조, 녹조, 규조와 Cryptomonads 군집의 공우점 상태가 관찰되었으나, 3일 후 남조군집 우점으로 전환되었다. 모든 처리군에서 3~8일동안 80% 이상이 남조군집이었으며, 이 중 90% 이상은 *M. aeruginosa*였다.

각 단계별 pH 처리군 (6.5, 7.5, 8.5, 9.5)에서 *M. aeruginosa*의 밀도변화는 Fig. 1에서 보여주고 있다. 3일째부터 pH 9.5 처리군에서 세포 밀도가 급격하게 증가하기 시작하여 (day 0,  $6 \times 10^5$  cells mL<sup>-1</sup>; day 3,  $21 \times 10^5$  cells mL<sup>-1</sup>) 5일째에 최대값 (day 5,  $300 \times 10^5$  cells mL<sup>-1</sup>)을 보인 후 8일째 ( $11 \times 10^5$  cells mL<sup>-1</sup>)부터 서서히 감소하는 경향이 관찰되었다. 8일째 이후의 밀도 감소현상은 분해 세균과 바이러스 (cyanophage)의 용균 현상 때문으로 사료된다. 다른 처리군에 비해 pH 9.5 처리군에서 최고

성장과 분명한 세포밀도의 변화가 관찰된 반면, pH 6.5 처리군에서 가장 느린 세포밀도의 변화가 관찰되었다. 모든 처리군에서 5일째 최고값을 보였는데, pH 6.5, 7.5, 8.5 처리군에서는 각각  $6.7 \pm 3.7$ ,  $7.5 \pm 5.2$ ,  $8.2 \pm 3.7 \times 10^5$  cells mL<sup>-1</sup>로 pH 9.5에서보다 낮은 값을 나타내었다.

녹조, 규조 등의 대부분 조류 군집에서는 보통 pH 4~8의 범위에서 성장가능하고 중성 상태인 pH 7 전후에서 최대의 밀도 증가를 보이는데 반해, 높은 pH 상태에 대하여 내성을 가지는 것은 알칼리 환경에 내성이 강한 특정 미생물 (세균, 균류 (fungi), 남조) 군집의 생리적 특성으로 볼 수 있다. 높은 pH에서는 중탄산 이온과 탄산이온의 비율이 높아지므로, 중탄산 이온을 흡수하는 남조류에 비해 용존 이산화탄소에 의존하는 다른 조류에게는 불리한 환경이 된다. 즉, 남조류는 빛이나 탄산과 같은 환경변화에 제한이 없는 종류로 볼 수 있다. 호수에 이산화탄소를 공급하면 남조군집에 의한 녹조현상은 없어지고 녹조나 규조류의 우점으로 전환된다는 사실이 유럽과 미국의 대규모 격리수계실험에서도 확인되었다.<sup>9)</sup> Dwivedi 등<sup>20)</sup>은 실내 배양실험에서 pH가 *M. aeruginosa*의 성장에 미치는 영향을 실험한 결과 pH 10에서 최고의 성장을 보인 반면, pH 7.5, 8.5,

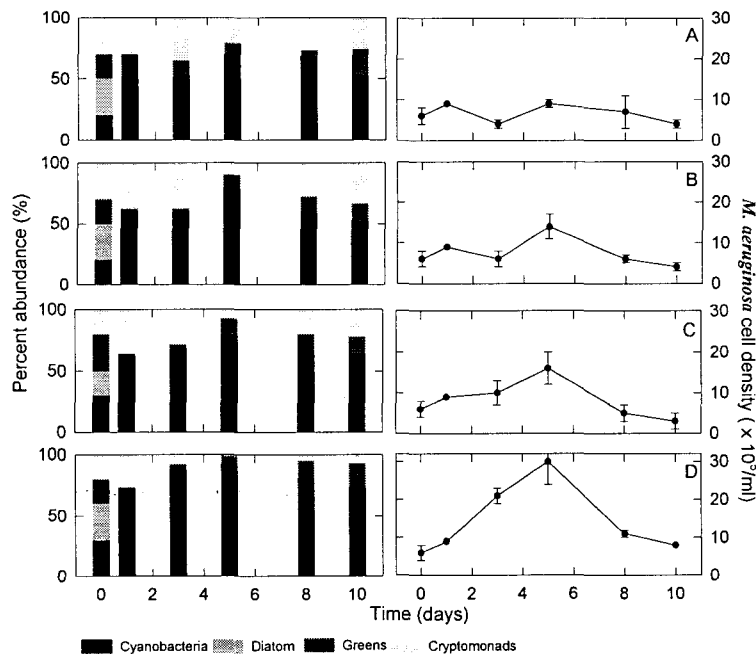


Fig. 1. Percent abundance of phytoplankton community(based on cell biovolumes) and *M. aeruginosa* cell density (mean $\pm$ SD,  $n=3$ ) in laboratory bottle experiment(day 0, July 10, 1997)(pH treatment, A, pH 6.5; B, 7.5; C, 8.5; D, 9.5). All water samples were filtered with a 67  $\mu$ m mesh-sized screen.

10.5, 11 처리군에서는 pH 10처리군에 비해 뚜렷한 성장을 보이지 않았다. 특히, pH 10.5, 11에서는 오히려 이 종의 밀도 감소 현상을 보여주었는데, 이는 배지의 알칼리화 현상 때문인 것으로 보고하였다. 본 실험에서는 pH 9.5 처리군에서 *Microcystis*가 다른 환경 인자인 빛과 영양염류 처리군보다 월등히 높은 밀도를 나타내는 것으로 보아, 영양염류가 높은 물금의 원수에서는 높은 pH 환경이 *M. aeruginosa*의 초기 성장에 가장 중요한 요소로 사료된다.

### 3.2. 영양염류 처리군

실험대상 샘플인 물금 원수는 질소와 인의 농도가 높은 편으로 (Table 1) 모든 단계의 영양염류 처리

군에서 비교적 높은 값이 관찰되어, 처리군별 차이는 뚜렷하게 관찰되지 않았다. 그러나, 최고 세포밀도가 관찰된 pH 9.5 및 85~100% 빛 처리군에 비해서는 전반적으로 낮은 세포 밀도값이 관찰되었으며, 시간대별 변화도 뚜렷하게 관찰되지 않았다(Fig. 2). 비록 각 영양염류 처리군에 따라 밀도의 차이는 있었지만, 1일째에 급격한 밀도 증가 양상을 보여준 이후, 실험이 끝나는 10일째까지 이 수준의 밀도가 유지되는 것으로 나타났다.

상대풍부도의 경우는 원수를 희석한 처리군보다 영양염류를 매일 첨가한 처리군 (Fig. 2c, d, e, f)에서 (Fig. 2a) 높게 나타났다. 그러나, 세포 밀도의 경

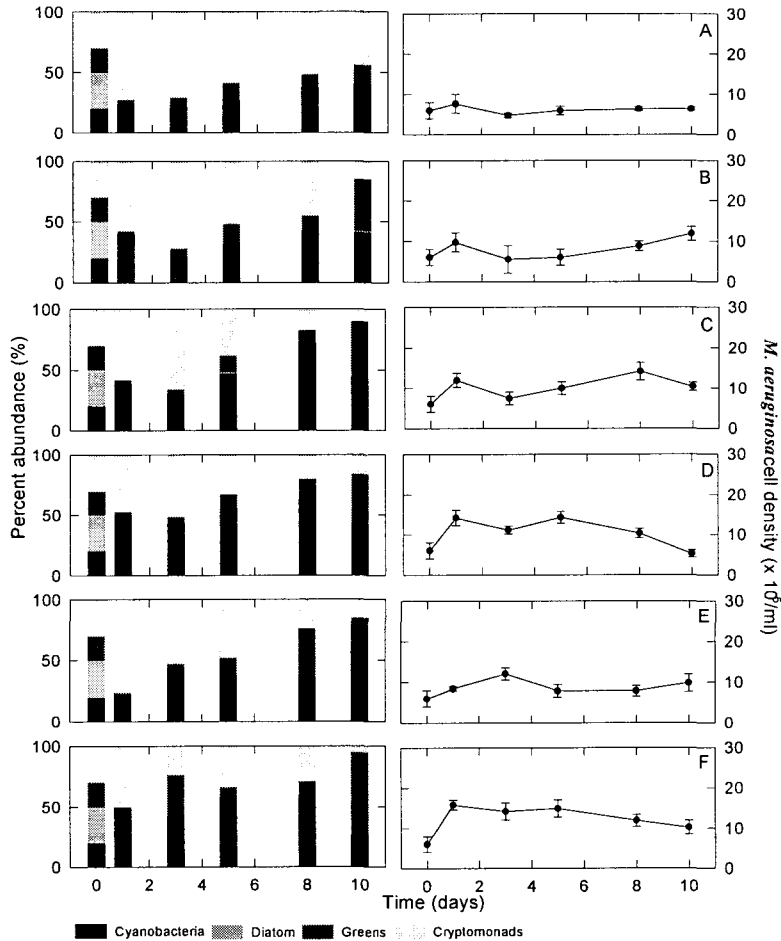


Fig. 2. Percent abundance of phytoplankton community(based on cell biovolumes) and *Microcystis aeruginosa* cell density(mean±SD, n=3) in laboratory bottle experiment(day 0, July 10, 1997)(nutrient treatment, A,  $\frac{1}{2}$ DW+ $\frac{1}{2}$ River Water(RW); B, RW only; C, daily supply of  $8.75 \mu\text{g L}^{-1}$  of  $\text{NaNO}_3$  and  $0.525 \mu\text{g L}^{-1}$  of  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ; D, daily supply of  $17.5 \mu\text{g L}^{-1}$  of  $\text{NaNO}_3$  and  $1.05 \mu\text{g L}^{-1}$  of  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ; E, daily supply of  $35 \mu\text{g L}^{-1}$  of  $\text{NaNO}_3$  and  $2.1 \mu\text{g L}^{-1}$  of  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ; F, daily supply of  $75 \mu\text{g L}^{-1}$  of  $\text{NaNO}_3$  and  $4.5 \mu\text{g L}^{-1}$  of  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ). All water samples were filtered with a  $67 \mu\text{m}$  mesh-sized screen.

우는 영양염류 처리군에 따라 뚜렷한 차이를 보여 주지 않았는데 (Fig. 2c, d, e, f), 이는 낙동강 하류 물금 지역의 원수에는 이 군집의 성장에 필요한 영양소인 질소와 인이 충분히 포함되어 있기 때문에 필요 이상의 영양 염류양에 의해서는 성장에 큰 영향을 받지 않았기 때문으로 생각된다. Pearson<sup>21)</sup>은 호수에서 수화현상을 유발하는 종으로 잘 알려진 *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Microcystis* 군집은 질소, 인 등의 유기물질 함량과 연관성이 높다는 것을 보여주었으며, Reynolds<sup>5)</sup>도 일반적으로 용존 유기물질의 양이 풍부한 영양단계가 높은 호수에서 남조군집의 번성현상도 관찰될 가능성이 높다고 하였다. 실제로 유기물질이 풍부한 호수나 양어장, 하수처리장 등에서 독성 남조군집이 흔히 관찰되고 있다. 심하게 부영양화 되어있는 미국의 Neuse 강과 낙동강 하류 물금지역의 장기조사 (1993~1999) 결과에서도 질소농도가 높은 곳에서 적응력이 높은 비질소 고정 남조류인 *M. aeruginosa*가 우점하는 것을 보여주었다.<sup>9,22)</sup> 그러나, 본 실험결과, 영양염류 농도는 *Microcystis*군집 성장의 필수적인 요소로서 높은 영양염류 농도는 비질소고정 남조류(*M. aeruginosa*)의 출현에는 중요한 요소로 작용하지만, 성장의 필요량 이상으로 높은 영양염류는 남조군집의 우점과 밀도수의 증가를 유도하는 유일한 요소는 아닌 것으로 생각된다.

### 3.3. 빛 처리군

빛 처리군에서는 전체 일사량의 약 85%정도의 빛을 처리해준 조건에서 *Microcystis*군집이 우점하는 것으로 나타났으며, 완전노출 상태에서는 오히려 이보다 낮은 값을 보였다(Fig. 3). 85% 광도는 935  $\mu\text{E m}^{-2} \text{sec}^{-1}$  정도로 물금 현장의 수심 0.5~1 m의 빛에 해당하는 값이다. 실제 현장 모니터링과 기존연구에서도 수표면 보다 0.5~1 m사이의 수심에서 식물플랑크톤이 번성이 관찰된다.<sup>23)</sup> 일본의 대표적인 호수인 가수미가우라호 (Lake Kasumigaura)와 수와호 (Lake Suwa)에서 대번성을 유발하는 남조군집 (*Microcystis* spp.) 번성시기의 광도-광합성 곡선도 이와 유사한 양상을 보인다.<sup>24)</sup> *Microcystis*가 가지고 있는 기낭도 빛을 효율적으로 이용할 수 있는 수단으로 생각된다. 즉, 가스포를 이용해 부유성을 가지는 것은 광합성이 일어나지 않는 암상태 혹은 탁한 수중 즉 식물플랑크톤의 밀도의 증가상태에서도 다른 군집들보다 광을 흡수하는데 유리한 수단이 될 수 있다. 반면, 15~30% 처리군에서는 3일째부터 *Microcystis*군집이 관찰되지 않았는데 (Fig. 3c, d, e) 이는 영양염류 및 pH 등 다른 환경조건들이 충분하더라도 광도가 차단되어 제한인자(limiting

factor)로 작용하게 되면 *Microcystis*군집은 성장에 장애를 받게된다는 광도-광합성 관계를 보여주었다.

### 3.4. 조절강 생태계에서의 남조류 대번성

낙동강 하류는 자연적으로 유하하는 강과는 다른 생태계로, 결국 지속적으로 유입되는 풍부한 영양염류 환경에서 하계의 적절한 빛과 pH의 변화에 의해 남조류의 대번성이 발생하는 것으로 보인다. 영양염류와 수문학적 현상의 관계가 *Microcystis*의 동태에 영향을 미치는 것이 보고되었으며,<sup>14)</sup> 모형을 통한 *M. aeruginosa* 동태에 대한 최대 영향변수 추출의 결과 역시 pH와 빛 에너지 조건 등이 큰 영향을 보이는 것으로 나타났다.<sup>26)</sup> 본 연구는 이와 같은 선행연구의 가설에 대한 정보로서 가치가 있으며, 부영양화된 조절강 생태계의 경우 일반적인 강 생태계와 비교하여 대번성 유도 조건이 다소 차이가 있음을 알 수 있다.

## 4. 결 론

낙동강 하류역(물금)에서 여름철 남조 *Microcystis* 군집의 초기 발생시기에 물리·화학적 환경요인들이 미치는 영향을 밝히기 위한 연구의 일환으로, 남조 군집의 발생이 시작된 7월 중순 현장의 원수를 취수하여 실험실 내에서 enclosure를 설치하여 다양한 구배의 pH (6.5, 7.5, 8.5, 9.5), 영양염류 농도 (♂ 중류수+♂원수; 낙동강 원수; 질소, 인의 1일 소모량의 1배를 매일 첨가; 질소, 인의 1일 소모량의 1/2배를 매일 첨가; 질소, 인의 1일 소모량의 2배를 매일 첨가), 광도 (100%, 85%, 60%, 30%, 15% of full sun light) 처리군에서 *M. aeruginosa*의 세포밀도를 추적하여 이 군집 번성에 미치는 영향을 조사하였다. 10일 동안 1~2일 간격으로 각 처리군에서 식물플랑크톤 군집의 변화를 조사한 결과, 3일째부터 모든 처리군에서 *M. aeruginosa* 밀도증가가 관찰되었으며, 8일째부터 감소하기 시작했다. 특히, pH 8.5 이상의 처리군 (8.5, 9.5)에서 3일째 후부터 급격한 증가가 관찰되었다. 빛 처리군의 경우, 85% 빛 투과도 처리군에서 높은 밀도의 *M. aeruginosa*가 관찰되었으며, 광저해 현상에도 불구하고, 완전노출 상태에서도 비교적 높은 값이 관찰되었다. 영양염류 처리군의 경우, 모든 처리군에서 비교적 높은 밀도값이 관찰되었으나, 처리군별 차이는 뚜렷하게 나타나지 않았으며, 최고 값을 보인 pH와 빛처리군 보다는 낮은 세포밀도값이 관찰되었다. 이상의 결과에서, 낙동강 하류 남조 군집의 초기 번성단계에는 여러 환경요인들이 복합적으로 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 원수의 영양염류 농도가 이 군집이 성장하는데 풍부한 정

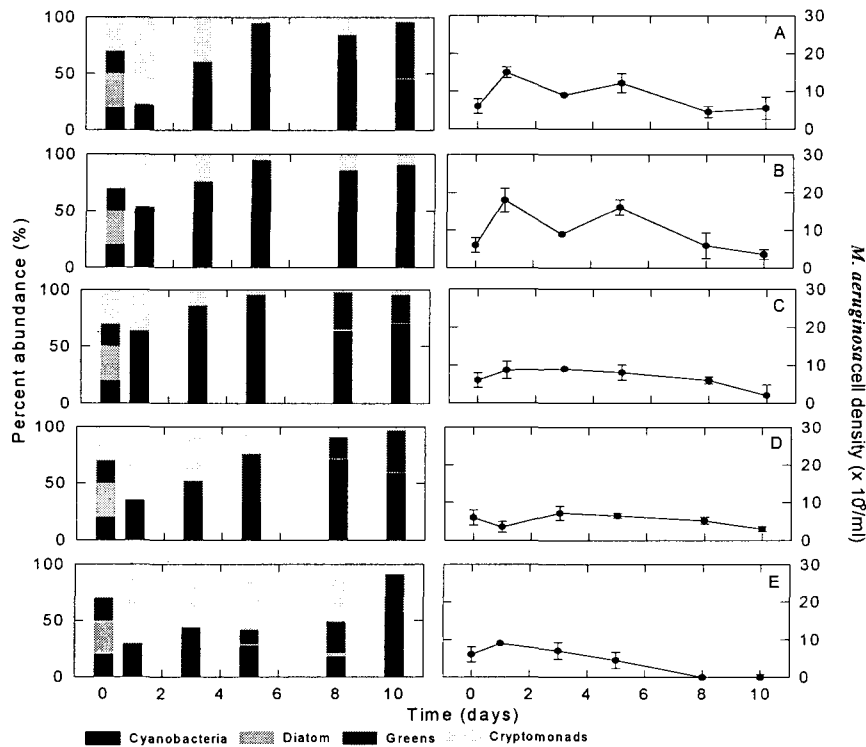


Fig. 3. Percent abundance of phytoplankton community(based on cell biovolumes) and *Microcystis aeruginosa* cell density(mean±SD, n=3) in laboratory bottle experiment(day 0, July 10, 1997)(light treatment, A, 100%; B, 85%; C, 60%; D, 30%; E, 15% of full sun light). All water samples were filtered with a 67  $\mu$ m mesh-sized screen.

도로 일정하게 유지되는 낙동강 하류지역에서 영양 염류 농도는 비질소고정 남조류 (*M. aeruginosa*)의 출현에는 중요한 요소로 작용하지만, 성장의 필요량 이상으로 높은 영양염류는 남조군집의 우점과 밀도 수의 증가를 유도하는 유일한 요소는 아닌 것으로 생각된다. 또한, pH와 광도가 *M. aeruginosa* 번성의 초기단계에서 번성을 유지시키는 보다 중요한 요소로 작용하게 될 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

이 연구는 부산대학교 환경기술 산업개발 연구센터(IETI, KSF-RRR-R12-1996-015-00035-0)의 지원에 의하여 이루어졌으며, 부산대학교 육수학 연구실의 낙동강 연구 논문 #26입니다.

#### 참고 문헌

1) Thompson, P. A. and G. Y. Rhee, 1993, Phytoplankton responses to eutrophication, In: Rai and Gaur (eds.), Phycological Perspectives of Water Pollution, Springer-Verlag, New York.

2) Vincent, W. F., 1987, Dominance of blooming forming cyanobacteria (blue-green), New Zea, J. Mar. Freshwater Res., 21, 361-542.  
 3) Kohl, J. G. and W. Lampert, 1991, Interactions between zooplankton and blue-green algae (cyanobacteria), Int. Rev. Ges. Hydrobiol., 76, 1-3.  
 4) Carr, N. G. and B. A. Whitton, 1992, The biology of cyanobacteria, Scientific, Oxford.  
 5) Reynolds, C. S., 1973, Growth and buoyancy of *Microcystis aeruginosa* Kutz. Emend. Elenkin in a shallow eutrophic lake, Proc. R. Soc. London, 184, 29-50.  
 6) Robarts, R. D. and T. Zohary, 1992, The influence of temperature and light on the upper limit of *Microcystis aeruginosa* production in a hypertrophic reservoir, J. Plankton Res., 14, 235-247.  
 7) Ganf, G. G. and R. L. Oliver, 1982, Vertical separation of light and available nutrients as a factor causing replacement of green algae by

- blue-green algae in the plankton of a stratified lake, *J. Ecol.*, 70, 829-844.
- 8) Paerl, H. W. and J. F. Ustach, 1982, Blue-green algal scums: an explanation for their occurrence during freshwater blooms, *Limnol. Oceanogr.*, 27, 212-217.
  - 9) Paerl, H. W., 1987. Dynamics of blue-green algal(*Microcystis aeruginosa*) blooms in the lower Neuse River, North Carolina: causative factors and potential controls, Water Resources Research Institute for the University of North Carolina(UNC-WRRI-87-229).
  - 10) Jones, G. J.(ed), 1994, Cyanobacterial Research in Australia, CSIRO, Australia.
  - 11) Shapiro, J., 1990, Current belief regarding dominance of blue-greens, *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 24, 38-54.
  - 12) Kim, H. W., K. Ha, and G. J. Joo, 1998, Eutrophication of the lower Nakdong River after the construction of an estuarine dam in 1987, *Int. Rev. Ges. Hydrobiol.*, 83, 65-72.
  - 13) Ha, K., H. W. Kim, and G. J. Joo, 1998. The phytoplankton succession in the lower part of hypertrophic Nakdong River (Mulgum), South Korea, *Hydrobiologia*, 369/370, 217-227.
  - 14) Ha, K., E. A. Cho, H. W. Kim, and G. J. Joo. 1999, *Microcystis* bloom formation in the lower Nakdong River South Korea : Importance of hydrodynamics and nutrient loading, *Mar. Freshwater Res.*, 50, 89-94.
  - 15) Oh, H. M., S. J. Lee, M. H. Jang, and B. D. Yoon, 2000, Microcystin production by *Microcystis aeruginosa* in a phosphorus-limited chemostat, *Appl. Environ. Microbiol.*, 66(1), 176-179.
  - 16) Utermöhl, H., 1958, Zur Vervollkommnung der quantitativen phytoplankton -Methodik.- *Mitt. Internat. Verein. Limnol.*, 9, 1-38.
  - 17) Komarek, J., 1958, Die taxonomische revision der planktischen blualgen der Tschechoslowakei. In J. Komarek, and H. Ettl (eds.), *Algologische Studien*, Publisher, city, 10-206pp.
  - 18) Komarek, J., 1991, A review of water-bloom forming *Microcystis* species, with regard to populations from Japan, *Arch. Hydrobiol.*, 92, 115-127.
  - 19) Komarek, J., 1994, Current trends and species delimitation in the cyanoprokaryote taxonomy, *Algological Studies*, 75, 11-29.
  - 20) Dwivedi, A., A. K. Singh, and H. D. Kumar, 1991, An improved medium for the isolation, axenic culture, and physiological study of the alkali-tolerant bloom forming cyanobacterium *Microcystis aeruginosa*, *Phykos*, 30(1-2), 1-11.
  - 21) Pearson, M., 1990, Toxic blue-green algae, A report by the UK National Rivers Authority, *Water Quality Series*, 2, 1-128.
  - 22) Ha, K., H. W. Kim, K. S. Jeong, and G. J. Joo, 2000, Vertical distribution of *Microcystis* population in the regulated Nakdong River, Korea, *Limnology*, 1, 225-230.
  - 23) Ohkubo, N., O. Yagi, and M. Okada, 1991, Effect of temperature and illumination on the growth of blue-green alga *Microcystis viridis*, *Jap. J. Limnol.*, 52(4), 255-261.
  - 24) Iwakuma, T. and M. Yasuna, 1983, A comparison of several mathematical equations describing photosynthesis-light curve for natural phytoplankton population, *Arch. Hydrobiol.*, 97, 208-226.
  - 25) Jeong, K. S., F. Recknagel, and G. J. Joo, 2002, Prediction and Elucidation of Population Dynamics of a Blue-green Alga(*Microcystis aeruginosa*) and Diatom(*Stephanodiscus hantzschii*) in the Nakdong River-Reservoir System(South Korea) by Artificial Neural Network, In: F. Recknagel (ed.), *Ecological Informatics*, Springer Verlag, New York (in press).