

## Microcystis 3종 (*M. aeruginosa*, *M. ichthyoblabe*, *M. viridis*)의 성장과 microcystins 생성에 대한 온도 및 조도의 영향

이경락 · 정원화<sup>1</sup> · 김진희<sup>2</sup> · 김한순<sup>3,\*</sup>

(국립과학수사연구소 법의학과, <sup>1</sup>국립환경과학원 상하수도연구과, <sup>2</sup>국립생물자원관 하등식물연구과, <sup>3</sup>경북대학교 생명과학부)

**Effects of the Temperature and Light Intensity on the Growth and Microcystin Production of Three Species of *Microcystis* (*M. aeruginosa*, *M. ichthyoblabe*, *M. viridis*). Lee, Kyung-Lak, Weon Hwa Jheong<sup>1</sup>, Jin Hee Kim<sup>2</sup> and Han Soon Kim<sup>3,\*</sup> (Department of Forensic Medicine, National Institute of Scientific Investigation, Seoul 158-707, Korea; <sup>1</sup>Water Supply and Sewerage Research Division, National Institute of Environmental Research, Incheon 404-170, Korea; <sup>2</sup>Non-vascular Plants Research Division, National Institute of Biological Resources, Incheon 404-708, Korea; <sup>3</sup>Department of Biology, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea)**

The growth and microcystins production characteristics of three species of *Microcystis* (*M. aeruginosa*, *M. ichthyoblabe*, *M. viridis*) isolated from Yeongchun dam and Ankei dam in Kyungpook Province, South Korea were investigated at temperatures of 15~35°C and light intensities of 35~180  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . All of the three species exhibited the highest growth rates ( $\mu_{\text{max}}$ ) over the 30°C. The maximum growth rates of *M. aeruginosa* and *M. ichthyoblabe* was observed at 70  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , while *M. viridis* showed maximum growth rate at 35  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . The maximum production of total microcystins was observed at 20°C, and the production of microcystins decreased according as temperature increase. The highest microcystins production of *M. aeruginosa*, *M. ichthyoblabe* and *M. viridis* observed at light intensities of 120  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , 70  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  and 35  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , respectively. The concentration of microcystin production and microcystin types of three species according to temperatures and light intensities showed clear difference between the species.

**Key words :** *Microcystis*, microcystins, temperature, light intensity, growth rates

### 서 론

남조류에 의한 수화(water bloom) 현상은 세계적으로 빈번하게 발생하고 있으며, 많은 남조류는 독소를 생산하여 수생동물뿐 아니라 인간의 건강에도 심각한 위협을 주고 있다(El Saadi and Cameron, 1993; Ressom *et al.*, 1993; Kuiper-Goodman *et al.*, 1999; Sivonen and Jones,

1999; Falconer, 2001). 남조류가 생성하는 독소들은 주로 신경독소(neurotoxins)나 간장독소(hepatotoxins)로 알려져 있으며(Kaebnick and Neilan, 2001), 간장독소인 microcystins가 담수에서 가장 빈번하게 발생하고 있다(Sivonen and Jones, 1999; Kemp and John, 2005). *Microcystis*, *Anabaena*, *Oscillatoria*, *Nostoc*, *Anabaenopsis* 등 다양한 남조류가 microcystins를 생성하는 것으로 알려져 있으며(Kaebnick and Neilan, 2001), 그 중 *Micro-*

\* Corresponding author: Tel: 053) 950-5344, Fax: 053) 953-3066, E-mail: kimhsu@knu.ac.kr

cystis가 microcystins를 생성하는 대표적인 남조류로 알려졌다(Park *et al.*, 1998; Vezie *et al.*, 1998; Sivonen and Jones, 1999; Kurmayer *et al.*, 2002; Via-Ordorika *et al.*, 2004; Ozawa *et al.*, 2005; Znachor *et al.*, 2006).

*Microcystis* 속은 군체 및 세포의 형태적 특징을 근거로 *M. aeruginosa*, *M. ichthyoblabe*, *M. flos-aquae*, *M. novacekii*, *M. viridis* 및 *M. wesenbergii* 등 총 15종이 알려져 있다(Komárek, 1991; Komárek and Anagnostidis, 1999). *Microcystis* 속의 각 종은 microcystins 생성의 종 특이성(Vezie *et al.*, 1998; Kurmayer *et al.*, 2002; Via-Ordorika *et al.*, 2004) 뿐만 아니라 군주 특이성을 가지는 것으로 알려져 있다(Oh *et al.*, 2000; Rohrlack *et al.*, 2001; Yéprémian *et al.*, 2007). 또한 이들 종 또는 군주들은 환경조건에 따라 생성하는 microcystin 종류와 생성정도가 다른 것으로 보고되었다(Ozawa *et al.*, 2005; Kemp and John, 2006; Dai *et al.*, 2008).

Microcystins 독소 생성에 대한 연구는 세계적으로 가장 빈번하게 *Microcystis* bloom을 형성하는 것으로 알려진 *Microcystis aeruginosa*를 대상으로 주로 수행되었다(Codd and Poon, 1988; Watanabe, 1996; Orr and Jones, 1998; Oh *et al.*, 2000). 그러나, *M. ichthyoblabe*와 *M. viridis* 또한 *M. aeruginosa*와 더불어 *Microcystis* blooms를 형성하는 주요 구성종으로 확인되고 있고(Shirai *et al.*, 1991; Park *et al.*, 1998; Sabour *et al.*, 2002), 수체마다 다양한 *Microcystis* 종 구성에 의한 bloom이 형성될 수 있다.

따라서 수자원의 효율적 관리와 안전한 음용수 공급을 위해 *Microcystis* 각 종의 microcystins 생성에 대한 생리·생태적 특성을 이해하는 것이 필요하다. 그러나 아직 microcystins 생성에 대한 *Microcystis* 종간의 배양을 통한 직접적인 비교 연구는 매우 미비한 실정이고, 특히 한 국산 *Microcystis* 종의 배양을 통한 microcystins 생성 특성에 관한 연구는 수행된 바가 없다.

이번 연구에서 저자들은 국내 호수에서 blooms을 형성한 3종의 *Microcystis* (*M. aeruginosa*, *M. ichthyoblabe*, *M. viridis*)를 분리하고, 실험실 배양을 통해 온도와 빛 조건에 대한 이들 3종의 성장률과 microcystins 생성 특성을 알아보고자 하였다.

## 재료 및 방법

2006년 8월에 수화가 발생한 영천댐과 안계댐으로부터 3종의 *Microcystis* (*M. aeruginosa* YC, *M. ichthyoblabe*

AK 및 *M. viridis* AK)를 분리하였다(Fig. 1). 인접한 지역에 위치하고 있는 영천댐과 안계댐은 수로에 의해 서로 연결되어 있으며, 수화발생시 이들 두 댐의 남조류의 종 구성은 매우 유사하였다(이 등, 2008).

모든 배양실험은 250 mL 용량의 Erlenmeyer flasks에 100 mL의 CB배지(Watanabe, 1996)를 이용하여 실시하였다(Table 1). Stock cultures는  $30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 의 연속 광과  $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 에서 유지하였으며, 지수성장기를 유지한

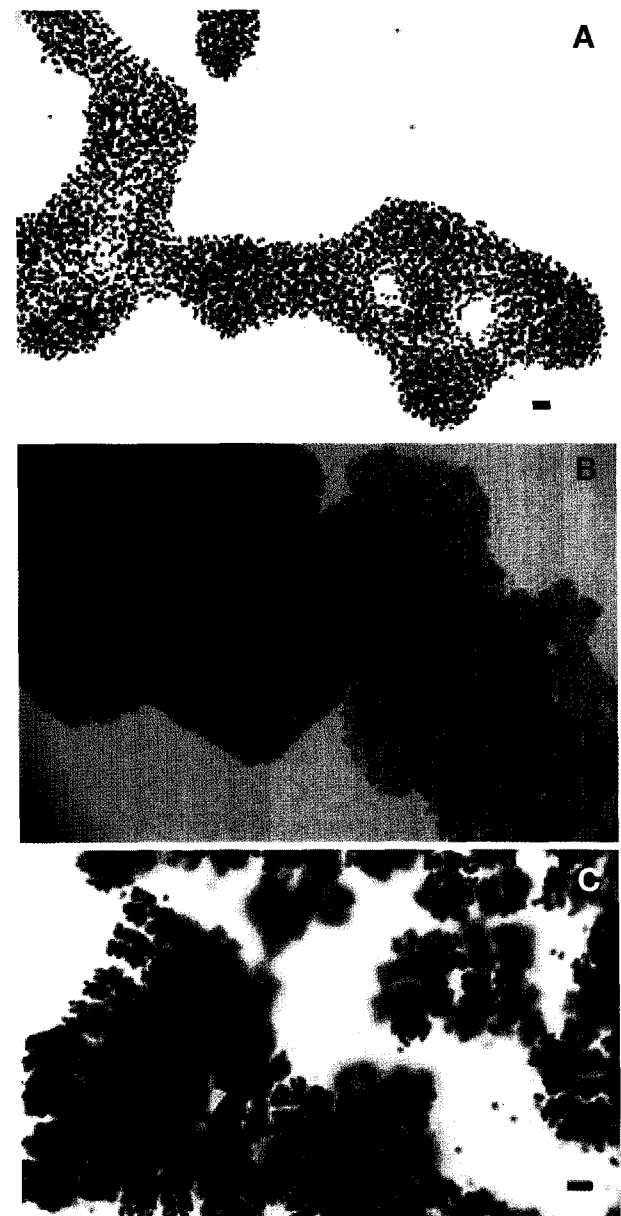


Fig. 1. Micrographs of three species of *Microcystis*. A: *M. aeruginosa* YC, B: *M. ichthyoblabe* AK, C: *M. viridis* AK. Scale bars are 20  $\mu\text{m}$ .

**Table 1.** Compositions of CB media used for cultivation of *Microcystis* (Watanabe, 1996).

Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	150 mg	PIV metal mixture	
KNO <sub>3</sub>	100 mg	FeCl <sub>3</sub> · 6H <sub>2</sub> O	196 mg
MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	40 mg	MnCl <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	36 mg
β-Sodiumglycerophosphate	50 mg	ZnSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	22 mg
Vitamin B <sub>1</sub>	10 µg	CoCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	4 mg
Vitamin B <sub>12</sub>	0.1 µg	Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	2.5 mg
Biotin	0.1 µg	Na <sub>2</sub> EDTA · 2H <sub>2</sub> O	1,000 mg
PIV metal mixture	3 mL	Distilled water	1,000 mL
Bicine	500 mg		
Distilled water	997 mL		
pH 9.0			

stock cultures로부터 약 5,000 cells의 세포들을 취하여 온도 및 조도에 맞춘 각각의 Erlenmeyer flasks에 접종하였다. 각 배양실험에서 실험조건을 제외한 나머지 배양 조건들은 stock cultures와 동일하게 적용하였다.

배양실험들은 지수성장기를 유지한 2주간 진행하였으며, 세포의 계수는 haemocytometer를 이용하여 실시하였다. 성장률은  $\mu = (\ln N_2 - \ln N_1) / (t_2 - t_1)$  공식에 기초하여 산정하였으며, 이 식에서  $N_2$ 와  $N_1$ 은 각각 실험종료 및 실험개시 당시의 세포수들을 각각 나타내며,  $t_2 - t_1$ 은 실험에 걸린 시간을 나타낸다.

Microcystins는 HPLC (high-performance liquid chromatography, Waters, USA)를 사용하여 분석하였다. HPLC 분석을 위해 농축한 배양시료를 동결건조기(Labconco, USA)로 건조시켰으며, 동결 건조된 시료들은 50 mL의 5% acetic acid로 sonication (Fisher Scientific, USA)과 함께 3회에 걸쳐 추출하였다. 추출액은 15분 동안 4,000 g로 원심 분리하였으며, 상등액은 활성화된 Sep-Pak C<sub>18</sub> cartridge (Waters, USA)에 흡착시켰다. 이후, cartridge를 20% 메탄올로 세척하고 메탄올에 용해된 0.1% TFA (Trifluoroacetic Acid)로 microcystins를 용출하였다. 용출물은 동결건조기로 완전 건조시키고 메탄올로 녹여 분석에 사용하였다. 1 mL min<sup>-1</sup>의 유속에서 메탄올: 0.05 M phosphate buffer (pH 3.0; 52:48)로 구성된 mobile phase를 사용하였으며, Xterra-C<sub>18</sub> 4.6 × 15 cm, 5 µm column (Waters, USA)을 이용하여 210~420 nm에서 PDA detector (Waters 960, USA)로 검출하였다. Microcystins 표준물질은 microcystin-RR, -YR 및 -LR (Waco, Japan)을 사용하였다.

## 결 과

### 1. 온 도

*Microcystis* 3종(*M. aeruginosa*, *M. ichthyoblabe*, *M.*

*viridis*)의 성장 및 microcystins 생성에 대한 온도의 효과를 알아보기 위해 15~35°C의 범위에서 실험을 실시하였다(Fig. 2).

*Microcystis aeruginosa* YC의 성장률은 20°C에서 급격하게 증가하였고, 온도가 증가할수록 지속적으로 증가하여 35°C에서 최대 성장률을 나타내었다. 그러나, microcystins 생성은 20°C에서 최대값을 나타낸 후 온도가 증가할수록 급격하게 감소하였다. *Microcystis ichthyoblabe* AK 성장률 또한 20°C에서 급격한 성장을 나타낸 후 온도가 증가할수록 점차 증가하여 30°C에서 최대 성장률을 보였으며, 20~35°C 범위에서 유사한 성장률을 나타내었다. Microcystins 생성은 *M. aeruginosa* YC와 마찬가지로 20°C에서 최대값을 나타낸 후 온도가 증가할수록 점차 감소하였다. *Microcystis viridis* AK는 최대 성장률을 나타낸 30°C까지 온도가 증가할수록 성장률이 지속적으로 증가한 후 35°C에서 모든 세포들이 사멸하였다. Microcystins의 생성은 다른 두 종과 유사하게 20°C에서 최대값을 나타내었으며, 온도가 증가할수록 감소하였다.

*Microcystis* 3종(*M. aeruginosa*, *M. ichthyoblabe*, *M. viridis*)이 생성하는 microcystin 타입(microcystin-RR, -YR, -LR) 및 이들의 구성비 또한 온도의 변화에 따라 각기 다른 양상을 나타내었다(Fig. 2B). *Microcystis aeruginosa* YC는 microcystin-RR, -YR 및 -LR을 모두 생성하였으나 온도에 따라 microcystin 생성 타입의 뚜렷한 차이를 나타내었다. Microcystin-YR 타입은 모든 실험 온도조건에서 생성되었고, microcystin-RR 타입은 20~30°C 범위에서 생성되었으며, microcystin-LR 타입은 20°C에서만 생성되었다. 모든 온도 범위에서 확인된 microcystin-YR은 15°C에서 최대값을 나타내었으며, 온도가 증가할수록 점차 감소하였다. *Microcystis ichthyoblabe* AK 또한 3종류의 microcystins를 모두 생성하였으나 15°C에서는 microcystins가 생성되지 않았다. Microcystin-RR 및 -YR 타입들은 20~35°C의 범위에서 생성되었고, microcystin-LR

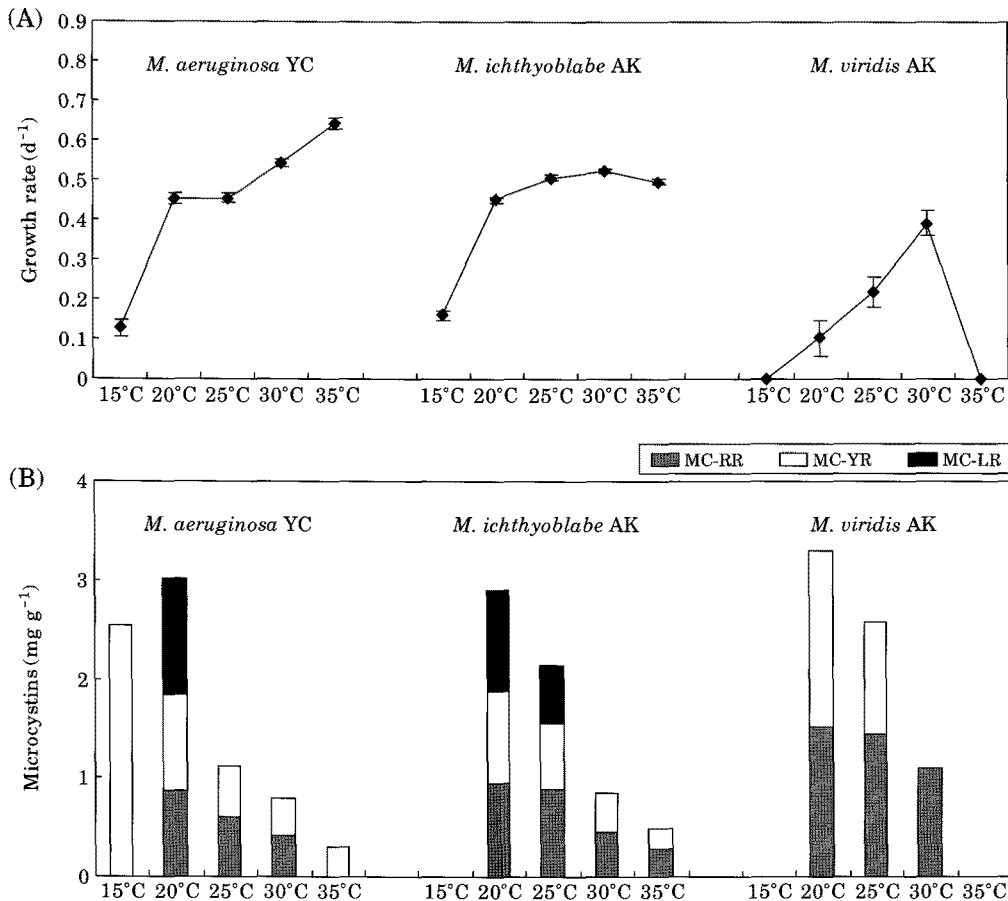


Fig. 2. Effects of temperature on growths (A) and contents of microcystins (B) in three species of *Microcystis*.

타입은 20°C와 25°C에서 생성되었으며, 생성된 세 가지 타입 모두 20°C에서 최고값을 나타낸 후 온도가 증가할수록 점차 감소하였다. *Microcystis viridis* AK는 20~30°C에서 microcystin-RR 및 -YR을 생성하였으나, microcystin-LR의 생성은 검출한계농도 미만으로 확인되었으며, 15°C와 30°C에서는 microcystin이 생성되지 않았다. Microcystin-LR 타입은 제한된 온도범위에서만 생성되는 양상을 보였다.

## 2. 광도

0, 35, 70, 120 및 180  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 의 조도 범위에서 *Microcystis* 3종(*M. aeruginosa*, *M. ichthyoblabe*, *M. viridis*)의 성장률 및 microcystins 생성 반응을 Fig. 3에 나타내었다.

*Microcystis aeruginosa* YC는 70  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에서 최대성장률을 나타낸 후 조도가 증가할수록 성장률이 약간 감소하였으나, 35  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  이상의 조도에서는 유사한

성장률을 나타내었다. 반면 *Microcystis aeruginosa* YC의 microcystins 생성은 최대성장률을 보인 광 조건(70  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )에서 가장 낮았으며, 성장률이 감소하기 시작한 120  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에서 최고값을 나타내었다. *Microcystis ichthyoblabe* AK의 성장률은 *M. aeruginosa* YC와 유사하게 70  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에서 최대 성장률을 나타낸 후 조도가 증가할수록 성장률이 약간 감소하였다. 그러나 microcystins 생성은 *M. aeruginosa* YC와 반대로 최대성장률을 나타낸 광 조건(70  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )에서 최고값을 나타내었다. *Microcystis viridis* AK는 35  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에서 최대성장률을 나타낸 후 조도가 증가할수록 성장률이 급격히 감소하였고, microcystins 생성은 *M. ichthyoblabe* AK와 마찬가지로 최대 성장률을 나타낸 광 조건(35  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )에서 최고값을 나타내었으며, 다른 두 종에 비해 microcystins 생성 농도가 매우 높게 나타났다.

조도 변화에 따른 3종의 *Microcystis* (*M. aeruginosa*, *M. ichthyoblabe*, *M. viridis*)가 생성하는 microcystin 타

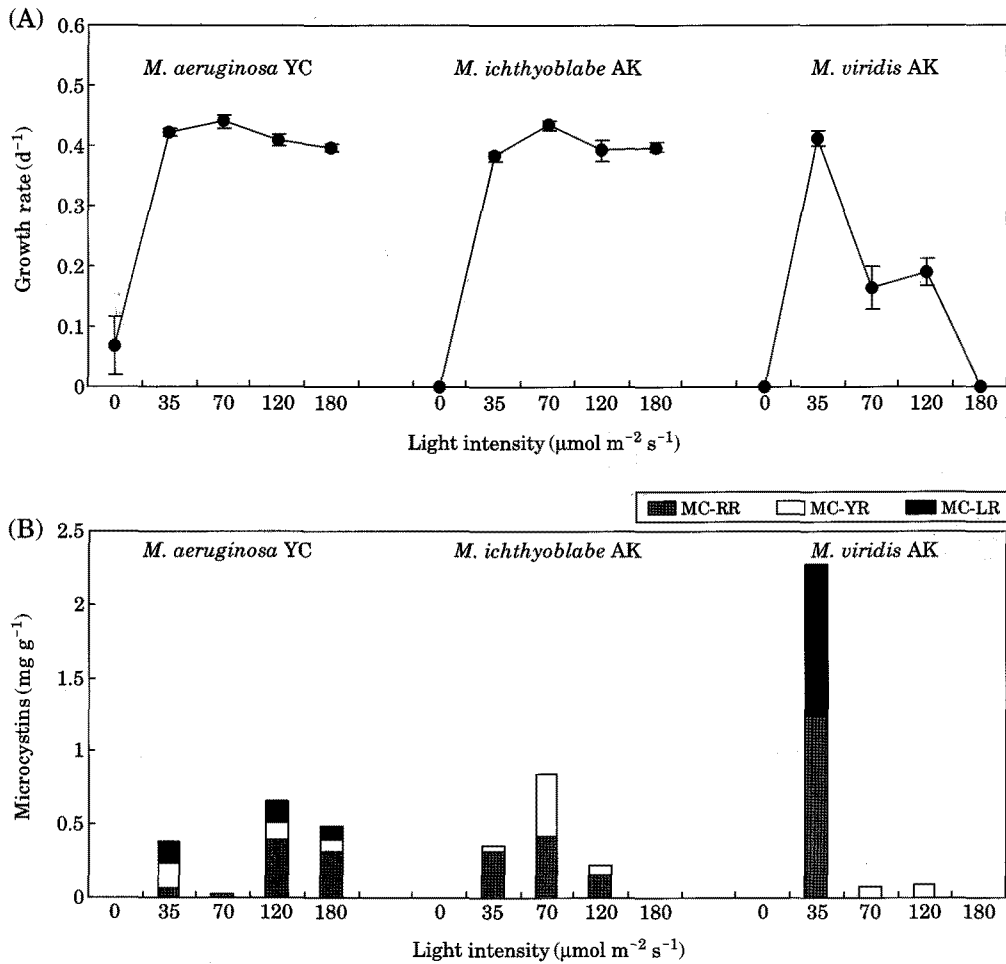


Fig. 3. Effects of light intensity on growths (A) and contents of microcystins (B) in three species of *Microcystis*.

입 (microcystin-RR, -YR, -LR) 및 이들의 구성비도 종에 따라 각기 다른 양상을 나타내었다 (Fig. 3B). *Microcystis aeruginosa* YC와 *M. viridis* AK는 microcystin-RR, -YR 및 -LR을 모두 생성하였으나 *M. ichthyoblabe* AK는 microcystin-RR와 -YR의 두 타입만 생성하였고, 조도에 따라 microcystins 생성정도와 타입들의 뚜렷한 차이를 나타내었다.

*Microcystis aeruginosa* YC의 microcystin-RR은 35~180 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> 범위에서 생성되었으나 120~180 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>에서 매우 높은 농도를 나타내었으며, microcystin-LR과 microcystin-YR은 조도에 따른 뚜렷한 차이를 나타내지 않았다. *Microcystis ichthyoblabe* AK에서는 microcystin-LR은 검출한계농도 미만으로 나타났으며, microcystin-RR과 microcystin-YR만이 35~120 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>의 조도 범위에서 생성되었다. *Microcystis viridis* AK는 최대성장률을 나타낸 35 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>에서 microcystin-

RR 타입 및 -LR 타입의 매우 높은 생성을 나타내었으며, 70~120 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> 범위에서 microcystin-YR 타입의 낮은 생성을 나타내었다.

### 고 찰

저자들은 *Microcystis*에 의한 수화 형성 시 호소내의 microcystins 농도 차이의 주된 원인으로 알려져 있는 다양한 환경조건에 대한 *Microcystis*의 종특이적 반응에 대한 국내 균주들의 특성을 알아보기 위해 국내 호수에서 bloom을 형성한 *Microcystis* 3종을 분리하여 배양실험을 통한 온도 및 빛에 대한 반응특성을 조사하였다.

온도는 남조류의 증식과 microcystins의 생성을 결정하는 가장 중요한 환경요인으로 알려져 있으며 (Park and Watanabe, 1996), microcystins의 생성은 18~25°C에서

가장 높은 것으로 보고되어 왔다(Codd and Poon, 1988; Sivonen, 1990; Rapala *et al.*, 1997).

이번 연구에서, 3종의 *Microcystis* (*M. aeruginosa* YC, *M. ichthyoblabe* AK, *M. viridis* AK)의 세포내 microcystins 최대 농도는 모두 20°C에서 확인되었으며, 최대 성장률은 30~35°C 사이에서 관찰되었다. 이 결과는 microcystins 생성은 *Microcystis* 성장률과 일치하지 않고, 최적 성장을 위한 온도 스트레스가 될 수 있는 최적 성장온도보다 낮은 온도 범위에서 최대값을 나타낸다고 하는 이전 연구결과와 유사하였으며(Watanabe and Oishi, 1985; Sivonen, 1990; Rapala *et al.*, 1997), 이러한 양상은 다른 cyanotoxins의 생성에서도 확인된 바 있다(Saker and Griffiths, 2000; Briand *et al.*, 2004).

다양한 종류의 microcystin 생성 또한 온도 변화에 영향을 받을 수 있다. Rapala *et al.*(1997)은 온도 조건에 따라 생성되는 microcystin 종류가 다르다고 보고하였으며, 25°C 미만에서는 microcystin-LR 변이형이 증가한 반면, microcystin-RR 변이형은 25°C에서 최대 생성을 나타낸다고 하였다. 이번 연구에서 *M. aeruginosa* YC는 20°C에서만 유일하게 microcystin-LR의 생성을 나타내었으며, *M. ichthyoblabe* AK는 20°C와 25°C에서 microcystin-LR의 생성이 확인되었다. 이들 두 균주의 microcystin-LR은 microcystin-RR 및 -YR과 달리 최적 성장온도보다 낮은 온도범위에서만 생성되어 Rapala *et al.*(1997)의 연구결과와 유사한 양상을 나타내었다. 반면에, *M. viridis* AK는 20~30°C의 범위에서 microcystin이 검출되었고, microcystin-RR과 -YR이 생성된 microcystin의 대부분을 차지하였다.

조도 또한 남조류의 독소 생성에 영향을 미칠 수 있다(Watanabe, 1996). *Microcystis aeruginosa*의 다양한 균주들은 실험 범위에서 40  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 까지 조도가 증가할수록 microcystins 생성은 증가하는 것으로 보고되었으며(Watanabe and Oishi, 1985; Utkilen and Gjølme, 1992), 일부 균주는 145  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에서 최대 독성을 나타내는 것으로 보고되었다(Van der Westhuizen and Eloff, 1985). 반면 Codd and Poon (1988)은 5~50  $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 의 범위에서 *M. aeruginosa* 7813의 독소는 조도의 영향을 받지 않는다고 보고하였다. 이번 연구에서 *M. aeruginosa* YC는 120  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에서 microcystins 농도가 최대값을 나타내어 대부분의 이전 연구결과와 차이를 나타내었다. *M. ichthyoblabe* AK와 *M. viridis* AK는 각각 70  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 와 35  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 의 상대적으로 낮은 조도에서 최대의 microcystins를 생성하였으며, 특히 *M. viridis* AK는 *M. viridis*의 microcystins 생성이 15  $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 의 낮은 조

도에서 최대값을 나타낸다고 보고한 Song *et al.*(1998)의 결과와 유사하였다. 이번 연구결과는 광 조건에 대한 *Microcystis*의 각 종은 microcystins 생성의 종 특이성을 나타낸다고 하는 이전 연구결과들을 잘 지지하는 것으로 나타났다.

Microcystins 생성에 대한 조도의 영향은 온도를 함께 고려할 필요성이 있다. Rapala *et al.*(1997)은 *Anabaena* spp.의 microcystins 생성은 15°C에서 microcystin 생성은 조도의 증가에 비례하지만, 25°C에서는 오히려 조도가 증가할수록 microcystins 생성이 감소한다고 보고하였으며, Song *et al.*(1998)은 *Microcystis viridis*의 microcystins 생성이 15°C에서는 조도에 영향을 받지 않은 반면, 25°C에서는 가장 낮은 조도에서 microcystins 생성은 최대값을 나타내며, 조도의 증가와 더불어 감소한다고 하였다. 이는 *Microcystis*의 microcystins 생성이 온도 조건에 따라 조도의 영향이 다르게 나타날 수 있음을 보여주고 있으며, microcystins 생성에 대한 환경요인의 영향을 파악하기 위해 복합 조건의 실험이 필요함을 의미한다.

25°C의 온도 조건에서 실시된 조도 실험에서 *M. ichthyoblabe* AK와 *M. viridis* AK는 낮은 조도에서 microcystins 생성은 최대값을 나타내었으나, 조도의 증가와 더불어 급격히 감소하며 Rapala *et al.*(1997)과 Song *et al.*(1998)의 결과와 유사하였으나, *M. aeruginosa* YC의 microcystins 생성은 이전 연구들과는 달리 온도와 조도가 모두 높은 조건에서 증가하였다. 이러한 결과는 microcystins 생성반응이 조도 및 온도조건에 대한 종 특이성뿐만 아니라 종내 균주 특이성을 나타내는 것으로 판단되고, 온도 조건에 따른 조도의 영향을 분석하기 위한 추가적인 실험이 필요할 것으로 판단된다.

여러 선행 연구에서 조도와 관련된 남조류의 성장과 microcystins 생성은 낮은 상관성을 나타내는 것으로 보고되어 왔으며, *Anabaena* sp. (Rapala *et al.*, 1997), *Oscillatoria agardhii* (Sivonen, 1990) 및 *M. aeruginosa* (Watanabe and Oishi, 1985) 등은 최대 성장률을 나타낸 조도보다 낮은 조도에서 microcystins 생성이 최대를 나타내었다. 그러나 이번 연구에서 *M. aeruginosa* YC는 최대 성장률을 보인 70  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 의 광 조건에서 microcystins 생성은 가장 낮았으며, 120  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에서 최대값을 나타내었다. 반면, *M. ichthyoblabe* AK와 *M. viridis* AK는 최대 성장률을 나타낸 70  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 과 35  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에서 최대의 microcystins 생성을 나타내어 선행 연구와 다른 양상을 보여주었다.

이번 연구에서 광 조건에 따른 microcystin-RR은 생성은 실험에 이용된 3종의 *Microcystis* 종간에 뚜렷한 차이

를 나타내었다. *M. aeruginosa* YC는 최대성장률을 보인 조도보다 높은 120~180  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에서 microcystin-RR의 높은 생성을 보인 반면, *M. ichthyoblabe* AK와 *M. viridis* AK에서 microcystin-RR의 생성은 최대성장률이 관찰된 조도에서 가장 높았다. 이와 같은 한국산 *Microcystis* 3종의 조도에 대한 microcystin-RR 생성 반응은 *Planktothrix agardhii*와 *M. aeruginosa*의 microcystin-RR의 생성이 조도가 증가할수록 감소한다고 보고된 Böttcher *et al.* (2001)의 결과와는 다른 양상을 보였다.

이번 연구결과에서 *Microcystis*는 온도 및 조도에 대한 microcystins 생성의 종 특이성뿐 아니라 군주 특이성을 가지고 있음이 확인되었다. 우리나라 담수에서 빈번하게 발생하고 있는 *Microcystis* bloom에 의한 독성 피해를 방지하기 위해서는 bloom을 형성하는 원인종의 정확한 동정 및 각 종의 다양한 환경조건에 대한 microcystin 생성 특성 규명을 위한 배양연구와 함께 지속적인 현장연구도 병행되어야 할 것으로 판단된다.

## 적 요

수확이 발생한 영천댐과 안계댐에서 분리한 *Microcystis* (*M. aeruginosa*, *M. ichthyoblabe*, *M. viridis*) 3종의 온도 및 조도에 대한 성장률과 microcystins 생성 특성을 알아보기 위해 배양실험을 실시하였다. 성장률은 3종 모두 30°C 이상에서 최고값을 나타내었으나 microcystins은 20°C에서 최대로 생성되었으며, 온도가 증가할수록 microcystins 생성은 감소하였다. *Microcystis aeruginosa*와 *M. ichthyoblabe*은 70  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 의 광 조건에서 최대성장률을 나타낸 반면, *M. viridis*은 35  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 의 광 조건에서 최대성장률을 나타내었다. *Microcystis aeruginosa*, *M. ichthyoblabe* 및 *M. viridis*는 각각 120  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , 70  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , 그리고 35  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 의 광 조건에서 최대의 microcystins를 생성하였다. 온도와 조도에 대한 이들 3종의 microcystins 생성 정도와 microcystins 타입은 종간에 뚜렷한 차이를 나타내는 종 특이성을 보였다.

## 사 사

이 논문은 2009학년도 경북대학교 연구교수 연구비에 의하여 연구되었음.

## 인 용 문 헌

- 이경락, 정원화, 김종민, 김영생, 최희진, 김한순. 2008. 영천호에서 남조류 독소(microcystins)의 계절적 변동. 한국하천호수학회지 41(2): 264-274.
- Böttcher, G., I. Chorus, S. Ewald, T. Hintze and N. Walz. 2001. Light-limited growth and microcystin content of *Planktothrix agardhii* and *Microcystis aeruginosa* in turbidostats. p. 115-133. In: Cyanotoxins-Occurrence, Causes, Consequences (Chorus, I. ed.). Springer, New York.
- Briand, J.F., C. Leboulanger, J.F. Humbert, C. Bernard and P. Dufour. 2004. *Cylindrospermopsis raciborskii* (Cyanobacteria) invasion at mid-latitudes: selection, wide physiological tolerance, or global warming. *J. Phycol.* 40: 231-238.
- Codd, G.A. and G.K. Poon. 1988. Cyanobacterial toxins. p. 283-296. In: Biochemistry of the algae and cyanobacteria. Proceedings of the phytochemistry society of Europe, vol. 28 (Roger, L.J. and J.R. Gallon, eds.). Oxford University Press, Oxford.
- Dai, R., H. Liu, J. Qu, J. Ru and Y. Hou. 2008. Cyanobacterial and their toxins in Guanting Reservoir of Beijing, China. *J. Hazardous Materials* 153: 470-477.
- El Saadi, O. and A.S. Cameron. 1993. Illness associated with blue-green algae. *Med. J. Aust.* 158: 792-793.
- Falconer, I.R. 2001. Toxic cyanobacterial bloom problems in Australian waters, risk and impacts on human health. *Phycologia* 40: 228-233.
- Kaebnick, M. and B.A. Neilan. 2001. Ecological and molecular investigations of cyanotoxin production. *FEMS Microbiol. Ecol.* 35: 1-9.
- Kemp, A. and J. John. 2005. Microcystins associated with *Microcystis* dominated blooms in the Southwest wetlands, Western Australia.
- Komárek, J. 1991. A review of water-bloom forming *Microcystis* species, with regard to populations from Japan. *Arch. Hydrobiol. Suppl.* 92(Algological Studies 64): 115-127.
- Komárek, J. and A. Anagnostidis. 1999. Cyanoprokaryota 1. Teil: Chroococcales. In: Süßwasserflora von Mitteleuropa (Ettl, H., G. Gärtner, H. Heynig and D. Mollenhauer, eds.). Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- Kuiper-Goodman, T., I. Falconer and J. Fitzgerald. 1999. Human health aspects. p. 112-153. In: Toxic cyanobacteria in water: A guide to their public health consequences, monitoring, and management (Chorus, I. and J. Bartram, eds.). E & FN Spon, London.

- Kurmayer, R., E. Dittmann, J. Fastner and I. Chorus. 2002. Diversity of microcystin genes within a population of the toxic cyanobacterium *Microcystis* spp. in Lake Wannsee (Berlin, Germany). *Microb. Ecol.* **43**: 107-118.
- 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**: 176-179.
- Orr, P.T. and G.J. Jones. 1998. Relationship between microcystin production and cell division rates in nitrogen-limited *Microcystis aeruginosa* cultures. *Limnol. Oceanogr.* **43**: 1604-1614.
- Ozawa, K., H. Fujioka, M. Muranaka, A. Yokoyama, Y. Katagami, T. Homma, K. Ishikawa, S. Tsujimura, M. Kumagai, M.F. Watanabe and H.D. Park. 2005. Spatial distribution and temporal variation of *Microcystis* species composition and microcystin concentration in Lake Biwa. *Environ. Toxicol.* **20**: 270-276.
- Park, H.D. and M.F. Watanabe. 1996. Toxic *Microcystis* in eutrophic lakes. p. 57-77. In: Toxic *Microcystis* (Watanabe, M.F., K.-I. Harada, W.W. Carmichael and H. Fujiki, eds.). CRC Press, Boca Raton.
- Park, H.D., C. Iwami, M.F. Watanabe, K.J. Harada, T. Okino and H. Hayashi. 1998. Temporal variabilities of the concentrations of intra- and extracellular microcystin and toxic *Microcystis* species in a hypertrophic lake, Lake Suwa, Japan (1991~1994). *Environ. Toxicol. Water Qual.* **13**: 61-72.
- Rapala, J., K. Sivonen, C. Lyra and S.I. Niemelä. 1997. Variation of microcystins, cyanobacterial hepatotoxins, in *Anabaena* spp. as a function of growth stimuli. *Appl. Environ. Microbiol.* **63**: 2206-2212.
- Ressom, R., F.S. Soong, J. Fitzgerald, L. Turczynowicz, O. El Saadi, D. Roder, T. Maynard and I. Falconer 1993. Health effects of toxic cyanobacteria (blue-green algae), National Health and Medical Research Council, Australia.
- Rohrlack, T., M. Henning and J.G. Kohl. 2001. Isolation and characterization of colony-forming *Microcystis aeruginosa* strains. p. 152-158. In: Cyanotoxins-occurrence, causes, consequences (Chorus, I. ed.). Springer-Verlag, Berlin.
- Sabour, B., M. Loudiki, B. Oudra, V. Vasconcelos, R. Martins, S. Oubraim and B. Fawzi. 2002. Toxicology of a *Microcystis ichthyoblabe* waterbloom from Lake Oued Mellah (Morocco). *Environ. Toxicol.* **17**: 24-31.
- Saker, M.L. and D.J. Griffiths. 2000. The effect of temperature on growth and cylindrospermopsin content of seven isolates of *Cylindrospermopsis raciborskii* (Nostocales, Cyanophyceae) from water bodies in northern Australia. *Phycologia* **39**: 349-354.
- Shirai, M., A. Ohtake, T. Sano, S. Matsumoto, T. Sakamoto, A. Sato, T. Aida, K.I. Harada, T. Shimada, M. Suzuki and M. Nakano. 1991. Toxicity and toxins of natural blooms and isolated strains of *Microcystis* sp. (cyanobacteria) and improved procedure for purification of cultures. *Appl. Environ. Microbiol.* **57**: 1241-1245.
- Sivonen, K. 1990. Effects of light, temperature, nitrate, orthophosphate, and bacteria on growth and hepatotoxin production by *Oscillatoria agardhii* strains. *Appl. Environ. Microbiol.* **56**: 2658-2666.
- Sivonen, K. and J. Jones. 1999. Cyanobacterial toxins. p. 41-111. In: Toxic cyanobacteria in water. a guide to their public health consequences, monitoring, and management (Chorus, I. and J. Bartram, eds.). E and FN Spon (on behalf of WHO), London.
- Song, L., T. Sano, R. Li, M.M. Watanabe, Y. Liu and K. Kaya. 1998. Microcystin production of *Microcystis viridis* (cyanobacteria) under different culture conditions. *Phycol. Res.* **46**(Suppl.): 19-23.
- Utkilen, H. and N. Gjølme. 1992. Toxin production by *Microcystis aeruginosa* as a function of light in continuous cultures and its ecological significance. *Appl. Environ. Microbiol.* **58**: 1321-1325.
- Van der Westhuizen, A.J. and J.N. Eloff. 1985. Effect of temperature and light on the toxicity and growth of the blue-green alga *Microcystis aeruginosa* (UV-006). *Planta* **163**: 55-59.
- Vezie, C., L. Brient, K. Sivonen, G. Bertru, J.C. Lefevre and M. Salkinoja-Salonen. 1998. Variation of microcystin content of cyanobacterial blooms and isolated strains in Lake Grand-Lieu (France). *Microb. Ecol.* **35**: 126-135.
- Via-Ordorika, L., J. Fastner, R. Kurmayer, M. Hisbergues, E. Dittmann, J. Komárek, M. Erhard and I. Chorus. 2004. Distribution of microcystin producing and non-microcystin-producing *Microcystis* sp. in European freshwater bodies: Detection of microcystins and microcystin genes in individual colonies. *System. Appl. Microbiol.* **27**: 592-602.
- Watanabe, M.F. and S. Oishi. 1985. Effects of environmental factors on toxicity of a cyanobacterium (*Microcystis aeruginosa*) under culture conditions. *Appl. Environ. Microbiol.* **49**: 1342-1344.
- Watanabe, M.F. 1996. Production of microcystins. p. 35-56. In: Toxic *Microcystis* (Watanabe, M.F., K.-I. Harada, W.W. Carmichael and H. Fujiki, eds.). CRC Press, Boca Raton.
- Yéprémian, C., M.F. Gugger, E. Briand, A. Catherine, C.



- Berger, C. Quiblier and C. Bernard 2007. Microcystin ecotypes in a perennial *Planktothrix agardhii* bloom. *Water Res.* **41**: 4446-4456.
- Znachor, P., T. Jurczak, J. Komárková, J. Jezberová, J. Mankiewicz, K. Kaštovská and E. Zapomělová. 2006. Summer changes in cyanobacterial bloom composition and microcystin concentration in eutrophic Czech reservoirs. *Environ. Toxicol.* **21**: 236-243.

(Manuscript received 30 July 2010,  
Revision accepted 30 August 2010)