

## 한국산 유독 남조류의 독소함량을 근거로 한 조류경보제 발령기준 검토

박혜경<sup>†</sup> · 김화빈<sup>\*</sup> · 이재정<sup>\*\*</sup> · 이재안<sup>\*\*\*</sup> · 이혜진<sup>\*\*\*\*</sup> · 박종환<sup>\*\*\*\*\*</sup> · 서정관<sup>\*\*\*</sup> · 윤석제<sup>\*</sup> · 문정숙<sup>\*</sup>

국립환경과학원 물환경연구부  
\*국립환경과학원 한강물환경연구소  
\*\*국립환경과학원 금강물환경연구소  
\*\*\*국립환경과학원 환경건강연구부  
\*\*\*\*국립환경과학원 낙동강물환경연구소  
\*\*\*\*\*국립환경과학원 영산강물환경연구소

## Investigation of Criterion on Harmful Algae Alert System using Correlation between Cell Numbers and Cellular Microcystins Content of Korean Toxic Cyanobacteria

Hae-Kyung Park<sup>†</sup> · Hwabin Kim<sup>\*</sup> · Jay J. Lee<sup>\*\*</sup> · Jae-An Lee<sup>\*\*\*</sup> · Haejin Lee<sup>\*\*\*\*</sup> · Jong-Hwan Park<sup>\*\*\*\*\*</sup> · Jungkwan Seo<sup>\*\*\*</sup> · Seok-Jea Youn<sup>\*</sup> · Jeongsuk Moon<sup>\*</sup>

Water Environment Research Department, National Institute of Environment Research  
<sup>\*</sup>Han River Environment Research Center, National Institute of Environment Research  
<sup>\*\*</sup>Keum River Environment Research Center, National Institute of Environment Research  
<sup>\*\*\*</sup>Environmental Health Research Department, National Institute of Environment Research  
<sup>\*\*\*\*</sup>Nakdong River Environment Research Center, National Institute of Environment Research  
<sup>\*\*\*\*\*</sup>Youngsan River Environment Research Center, National Institute of Environment Research  
(Received 25 April 2011, Revised 17 June 2011, Accepted 22 June 2011)

### Abstract

We investigated the ranges of total cellular microcystins content of cyanobacterial blooms collected in Korean lakes and rivers from 2005 to 2009. The amount and composition of microcystins of Korean cyanobacteria varied depending on the sampling water bodies and dominant cyanobacterial genera. Toxic cyanobacterial cell numbers equivalent to 1 µg MCYSTs/L using total cellular microcystin content of Korean cyanobacteria were in the range of 2,348 to 66,980,638 cells/mL. Only four samples among forty nine samples showed less cell numbers than current criterion of Harmful Algae Alert System, 5,000 cells/mL indicating current criterion do not reflect properly the microcystins content of Korean cyanobacteria. *Anabaena* and *Aphanizomenon* spp. showed three to six times higher cell numbers equivalent to 1 µg MCYSTs/L than *Microcystis* spp. To propose criteria of Harmful Algae Alert System for Korean toxic cyanobacteria, we calculated about 50% selective geometrical means of cyanobacterial cell numbers equivalent to 1 µg MCYSTs/L in order of toxic content. The proposed criteria for *Microcystis*, *Oscillatoria*, *Anabaena*, and *Aphanizomenon* spp., are 10,000, 20,000, 40,000, and 80,000 cells/mL, respectively.

**keywords** : Cyanobacterial bloom, Harmful algae alert system, Microcystins, Toxic cyanobacteria

### 1. 서론

우리나라는 용수공급의 91% 이상을 지표수, 즉 호소와 하천에 의존하고 있다. 특히 우리나라의 기후 특성상 여름철에 집중적인 강우로 물의 유출속도가 높아 날로 높아가는 용수 수요에 부응하여 수자원을 확보하고, 하류지역의 홍수피해를 방지하기 위하여 하천에 대형 댐을 건설하여 많은 물을 체류시키고 있다. 그런데 대형 다목적 댐의 건설에 의하여 형성된 호수들은 그 형상이 하천의 기본 형태

에 따라 폭이 좁고, 길이가 긴 나뭇가지 형태를 지니게 되며, 또한 댐 상류의 전체 유역이 호수의 유역이 되기 때문에 저수면적의 수십 배에 달하는 넓은 유역을 가진다. 뿐만 아니라 장기 저수 및 불규칙한 수량통제로 인해 호소내의 수리학적 체류시간이 길어지게 되었으며, 인위적으로 인한 만입부 등의 정체수역이 다수 형성되어 호소내 외부에서의 오염물질 유입에 의한 부영양화의 가능성이 매우 높다.

부영양화된 호수에서는 유해조류의 과다 증식이 보고되고 있으며 특히 상수원 호수에서 유해 남조류의 과다한 증식으로 매년 여름에 수돗물의 취기 문제(배병욱 등, 2008), 남조류 독소 문제(김화빈 등, 2010; 박혜경 등, 2000; 이경

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
parkhkner@korea.kr

락 등, 2008; 이정준 등, 2003), 소독부산물 문제(박혜경 등, 2006) 등 정수처리상의 문제가 매우 심각한 상황이다.

이에 따라 정부에서는 1998년부터 우리나라 주요 상수원 호수를 대상으로 조류경보제 실시하게 되었다. 조류경보제는 상수원수에 유해남조류가 대량 발생할 경우 정수처리장 여과장치의 기능 저하 및 남조류 독소가 수돗물로 혼입되어 야기할 수 있는 건강위해성을 미연에 방지하여 국민건강을 보호하기 위해(Protection of public health), 3단계의 경보 기준에 따라 조류발생 상황을 사전에 관계기관 등에 신속하게 전파하여 수면관리, 유역관리, 정수장 관리 등을 통해 유해남조류 발생으로 인한 피해를 최소화하고 먹는물의 안전성을 확보하기 위한 제도이다(국립환경과학원, 2006).

현행 조류경보제의 발령기준은 유독 남조류세포수 및 클로로필 *a* 농도의 두 항목을 대상으로 조류주의보, 조류경보, 조류대발생의 3단계로 나누어져 있다. 그런데 현행 조류경보제의 발령기준은 최초 도입 시에 외국의 기준을 차용하여 한국의 수계 특성과 출현 남조류에 대한 과학적인 근거가 부족하고, 남조류 독소에 대한 한국의 관리기준이 설정되어 있지 않은 상태이다(국립환경과학원, 2008). 현행 조류경보제의 발령기준은 WHO에서 채용하고 있는 간독소인 microcystins (MCYSTs)의 먹는물 가이드라인인 1 µg MCYST-LR/L을 기준으로(Chorus and Bartram, 1999), Falconer 등(1994)의 연구에서 제안된 1 µg MCYST-LR/L에 해당하는 *Microcystis* 세포수인 약 5,000 cells/mL를 조류경보 기준으로 하고 그보다 10배 적은 500 cells/mL를 조류주의보 기준으로 하고 있다. 그런데 유독 남조류의 MCYSTs 생산능은 종, 출현환경, 세대기간에 따라 달라질 수 있고, 또한 생산하는 MCYSTs의 종류도 출현지역에 따라 달라질 수 있다(김화빈 등, 2010; Chorus and Bartram,

1999; Park et al., 1998). 따라서 외국의 자료에 근거한 현행 조류경보제 발령기준은 한국의 유독 남조류의 독성을 대변하지 못할 가능성이 높기 때문에 상수원수에서 남조류 독소로 부터의 상수원수 안정성 확보를 위한 조류경보제 실시 목적 달성을 위해서는 우리나라 수계에서 출현하는 유독 남조류의 MCYSTs 종류와 함량을 감안한 발령기준이 필요하다. 본 연구에서는 한국산 유독 남조류의 독성을 기준으로 한 현실적인 조류경보제 발령기준을 제안하기 위해 국내 주요 호수에서 대량발생된 유독 남조류의 세포수, 클로로필 *a* 농도, MCYSTs 종류 및 함량을 조사하여 그 결과를 바탕으로 한국 수계에 맞는 조류경보제 발령기준을 검토하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 유독 남조류 시료채취

2005년부터 2009년까지 우리나라의 주요 13개 호수 및 3개 하천 하류에서 대량으로 발생한 유독 남조류 시료 49건을 채취하였다(Table 1). 수표면에 스킴을 형성한 시료는 플라스틱 비이커 등을 이용하여 스킴부분만 채취하였고, 스킴을 형성하지 않은 현탁시료는 플라스크톤 넷트 등을 이용하여 농축, 채취하였다. 채취한 시료는 현미경 하에서 검정하여 남조류가 90% 이상 우점한 것을 확인한 후 최종 시료로 사용하였다.

### 2.2. 분석방법

각 채취시료는 클로로필 *a* 농도, SS, 유독 남조류세포수 그리고 MCYSTs를 분석하였다. 클로로필 *a* 농도는 아세톤 용액으로 클로로필 색소를 추출하여 추출액의 흡광도를

**Table 1.** Microcystins concentrations and dominant toxic cyanobacteria in cyanobacterial blooms from Korean lakes and rivers

Sampling lakes and rivers	Sample numbers	Sampling period	Microcystins (µg/gDW)	Dominant cyanobacterial genus
Lake Paldang	9	Aug 2005 ~ Oct 2009	1.1 ~ 330.9	<i>Anabaena</i> spp., <i>Aphanizomenon</i> spp., <i>Microcystis</i> spp. separately or together
Lake Chungju	6	Oct 2005 ~ Sep 2009	0.2 ~ 258.0	<i>Microcystis</i> spp., <i>Oscillatoria</i> spp. separately or together
Lake Chungpyung	1	Oct 2008	-*	<i>Anabaena</i> spp., <i>Microcystis</i> spp.
Lake Uiam	1	Jul 2008	20.0	<i>Anabaena</i> spp., <i>Microcystis</i> spp.
Lake Youncho	1	Sep 2009	522.4	<i>Microcystis</i> spp.
Lake Andong	1	Jun 2008	70.8	<i>Microcystis</i> spp.
Lake Youngcheon	1	Sep 2008	382.6	<i>Microcystis</i> spp.
Lake Hapcheon	1	Sep 2008	828.7	<i>Microcystis</i> spp.
Lake Imha	1	Sep 2008	51.7	<i>Microcystis</i> spp.
Lake Daechong	10	Jun 2008 ~ Sep 2009	51.5 ~ 361.9	<i>Anabaena</i> spp., <i>Aphanizomenon</i> spp., <i>Microcystis</i> spp., <i>Oscillatoria</i> spp. separately or together
Lake Sangsa	1	Aug 2006	14.7	<i>Microcystis</i> spp.
Lake Dongbok	1	Jun 2009	30.3	<i>Anabaena</i> spp.
Lake Juam	7	Aug ~ Oct 2009	6.3 ~ 691.0	<i>Anabaena</i> spp., <i>Microcystis</i> spp. separately or together
Jecheon River	6	Sep 2005 ~ Oct 2009	56.7 ~ 1,119.9	<i>Microcystis</i> spp.
Nakdong River	1	Jun 2009	2,166.0	<i>Microcystis</i> spp.
Sanbuk River	1	Jun 2009	674.8	<i>Microcystis</i> spp.

\*No data as toxin amount by dry weight

663 nm, 645 nm, 630 nm, 750 nm에서 측정하여 클로로필 a 농도를 계산하는 수질오염공정시험방법의 흡광광도법에 따라 분석하였다(환경부, 2008). SS는 강열감량한  $\phi$  47 mm GF/F를 사용해 여과 전후의 여과지 무게 차를 구하여 SS 양으로 측정하였다(환경부, 2008).

MCYSTs은 현재 표준품 구매가 가능한 MCYST-LR, -RR, -YR, -LA(Alexis, USA) 4종류에 대해서만 정량조사를 하였다. MCYST-LR, -RR, -YR, -LA 표준품(Alexis, USA)을 100% methanol에 용해한 후 적정농도로 혼합하여 Total MCYSTs standard를 제조하여 -20°C에 보관하였고 농도별로 희석하여 정량분석에 사용하였다.

MCYSTs 정량분석은 LC/MS/MS를 이용하여 진행하였다(김화빈 등, 2009). MCYSTs은 세포내 독소이므로 추출을 위해 시료를 초음파 파쇄기로 처리하여 세포를 파쇄하고 현미경으로 세포가 완전히 다 파쇄되었는지를 관찰한 후, 파쇄 된 현탁액을 원심분리하여 상등액만 취하였다(Spoof et al., 2003). ODS Sep-Pak C18 카트리지를 100% 메탄올 10 mL와 증류수 10 mL로 활성화 시킨 후 원심분리한 상등액을 통과시켜 MCYSTs을 카트리지에 흡착시켰다. 20% 메탄올 10 mL를 흘려 카트리지의 불순물을 제거한 후 100% 메탄올 10 mL로 카트리지에 흡착된 MCYSTs을 용출시키고 공기펌프를 사용하여 10 mL 메탄올을 모두 증발시키고 남은 분말에 100% 메탄올 1~2 mL를 넣어 MCYSTs을 녹인 후 0.45  $\mu$ m 실린지 필터로 불순물을 제거한 후 ZORBAX Eclipse XDB-C18 (Agilent) 컬럼을 장착한 LC/MS/MS (Varian 320-MS TQ Mass spectrometer)를 사용하여 분석하였다(Ruangyuttikarn et al., 2004). 이동상 용매로는 0.1% formic acid와 acetonitrile을 사용하였으며 이동상의 유속은 0.8 mL/min로 하였다. 모든 실험은 3회 분석하여 재현성을 확인하였고 MCYST-RR, -YR, -LR, -LA의 질량/전하(m/z)비는 본 연구에서 설정한 LC/MS/MS 조건을 바탕으로 조사했을 시 피크가 가장 뚜렷하게 나왔던 520, 1045.5, 995.6, 908.5로 하여 분석하였다.

유독 남조류세포수는 국내 호수에서 가장 흔하게 출현하며 MCYSTs 생산이 보고되어 있는 *Microcystis* 속, *Anabaena* 속, *Aphanizomenon* 속, *Oscillatoria* 속 등 4 속을 대상으로 조사하였다. 채수한 시료에 Lugol's solution을 1~2 v/v% 되도록 가하여 보존한 다음 조류의 농도에 따라 희석 또는 그대로 현미경 검정하였다. 조류종은 한국 동식물도감(담수조류편; 정영호, 1968), Komárek (1991)의 분류체계를 따라 동정하였고 계수에는 Sedgwick-Rafter counting chamber를 사용하여 정량 계수하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 한국산 유독 남조류의 독소 함량

주요 13개 호수 및 3개 하천 하류에서 채집된 남조류 대량발생시료의 우점 남조류는 *Microcystis*, *Aphanizomenon*, *Anabaena*, *Oscillatoria* 속으로 대표적 유독 남조류 속이 각각 또는 혼합되어 우점하고 있었으며, 모든 시료에서 MCYSTs이 검출되었고 그중 21개 시료에서는 MCYSTs 4종류가 모두 검출되었고 한 시료에서는 MCYST-RR과 YR만 검출되었으며 나머지 27개 시료에서는 MCYST-RR, LR, YR이 검출되었다. 전체 시료의 유독 남조류 건조중량당 MCYSTs 함량의 범위는 0.2~2,166  $\mu$ g/g DW(평균 262  $\mu$ g/g DW)이었으며 수역에 따라 또한 동일한 수역에서도 채취 시기나 우점 남조류 종류에 따라 다양한 독소 함량을 보였다(Table 1).

외국의 사례를 보면 호주에서 발생한 남조류의 MCYSTs 함량은 2,100~4,100  $\mu$ g/g DW (Jones et al., 1995), 캐나다에서는 1~1,550  $\mu$ g/g DW (Kotak et al., 1995), 덴마크에서는 5~1,900  $\mu$ g/g DW (Henriksen, 1996), 남아프리카에서는 40~630  $\mu$ g/g DW (Scott, 1991), 중국에서는 200~7,300  $\mu$ g/g DW (Zhang et al., 1991), 일본에서는 70~1,610  $\mu$ g/g DW (Park et al., 1993) 등 출현지역에 따라 독소 함량이 차이를 보였으며 이런 외국산 유독 남조류의 독

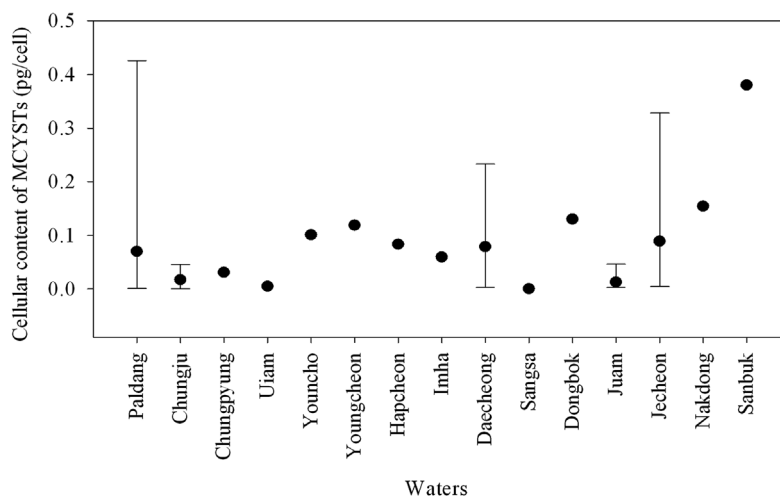


Fig. 1. Cellular content of microcystins of toxic cyanobacteria in Korean lakes and rivers (black circles - mean value, error bars - the maximum and minimum value).

소 함량과 비교할 때 한국산 유독 남조류의 독소 함량은 높은 수준은 아닌 것으로 판단된다.

본 연구에서 채집된 유독 남조류 세포당 MCYSTs 함량을 비교한 결과, 전체적으로  $0.1 \times 10^4 \sim 0.4$  pg MCYSTs/cell의 범위를 보여 세포에 따라 약 28,000배 이상의 독소함량 차이를 보였다(Fig. 1). 세포당 독소함량이 많은 남조류는 그만큼 적은 세포수로도 WHO 가이드라인에 해당되는 독소 기준을 초과할 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 세포당 독소함량을 고려하지 않는 일률적인 세포수 기준은 실제 수역에서의 독소량을 반영하기 어렵다.

세포당 MCYSTs 함량을 이용해 현행 조류경보제의 경보 기준이 되는  $1 \mu\text{g MCYSTs/L}$ 에 해당하는 유독 남조류 세포수를 산정한 결과, 2,348 ~ 66,980,638 cells/mL로 매우 큰 편차를 보였다. 출현 수역별로  $1 \mu\text{g MCYSTs/L}$ 에 해당하는 유독남조류 세포수는 상사호에서 출현한 종의 독소함량이 가장 적어 66,980,638 cells/mL로 가장 많은 세포수가 산정되었고 팔당호에서 2008년 8월에 대량발생한 유독 남조류가 가장 높은 독소함량을 보여  $1 \mu\text{g MCYSTs/L}$ 에 해당하는 세포수는 2,348 cells/mL로 가장 적었다. 조사대상 호수 중에서 충주호가 가장 넓은 범위를 보여 동일한 수역에서 출현 시기나 우점 남조류 속에 따라 세포내 독소함량이 큰 차이가 있는 것으로 나타났으며 이에 반해 대청호, 주암호, 제천천은 출현 시기나 우점 남조류에 크게 좌우되지 않고 좁은 범위를 보였다(Fig. 2).

남조류는 세균과 같은 원핵생물로 이분법을 통해 증식하므로 기하급수적으로 세포수가 증가한다. 따라서 남조류세포수의 평균을 산술평균으로 계산할 경우 표본간의 편차가 지나치게 커 최대값에 의한 전체 결과의 왜곡현상이 나타날 가능성이 크기 때문에 각 수역별 대표값으로 기하평균을 계산하였다. 기하평균으로 비교한 결과 낙동강 수계의 호수나 하천 하류부에서 출현한 유독 남조류의 독소함량이 높아  $1 \mu\text{g MCYSTs/L}$ 에 해당하는 세포수가 적게 나타났

고, 상대적으로 한강 수계의 호수에서 출현한 유독 남조류의 독소함량이 낮아  $1 \mu\text{g MCYSTs/L}$ 에 해당하는 유독남조류 세포수가 많았다(Fig. 2). 그러나 높은 독소함량을 보인 낙동강 수계의 호수들은 대부분 1개 시료만 분석한 결과이기 때문에 출현 시기나 우점 남조류가 서로 다른 다수의 시료에 대해 독소함량을 조사한다면 다른 결과가 나올 가능성도 있다.

전체 남조류 시료 중에서  $1 \mu\text{g MCYSTs/L}$ 에 해당하는 유독 남조류 세포수가 현행 조류경보의 유독 남조류세포수 기준인 5,000 cells/mL 보다 적은 세포수를 보인 시료는 팔당호, 대청호, 제천천 그리고 산북천에서 채취한 유독 남조류 시료 각 1건씩만 해당되었고 다른 시료들은 모두 더 많은 세포수를 보였으며, 기하평균값으로 볼 때 현행 조류경보제 경보 기준보다 적게 나타난 수역은 금강의 지류인 산북천 한 곳 뿐이었으며, 현행 기준보다 2배 이하가 4개 수역, 2배에서 10배 사이가 5개 수역이었으며 10배 이상이 5개 호수로 우리나라의 대부분의 수역에서 현행 조류경보제 발령기준이 실제 출현하고 있는 유독 남조류의 독소함량과는 잘 맞지 않음을 시사하였다.

각 시료의 단위클로로필 *a* 당 독소량을 이용해  $1 \mu\text{g MCYSTs/L}$ 에 해당하는 유독남조류의 클로로필 *a* 농도를 산정한 결과 충주호에서 출현한 남조류가  $62,193.6 \mu\text{g Chl. } a/L$ 로 산정되어 가장 높은 농도를 보였고 낙동강 하류의 물금지점에서 대량발생한 남조류 시료에서  $0.9 \mu\text{g Chl. } a/L$ 로 가장 낮은 농도를 보였다. 다수의 시료가 채집된 수역을 비교하면 충주호가 가장 넓은 범위를 보였고 대청호가 가장 좁은 범위를 보여 대청호에서 출현하는 남조류는 시기에 상관없이 클로로필 *a* 당 독소함량이 거의 일정한 것으로 조사되었다(Fig. 3). 본 조사에서 산정된 클로로필 *a* 농도가 현행 조류경보 기준인  $25 \mu\text{g Chl. } a/L$ 에 비해 낮은 농도를 보인 시료는 전체 시료의 약 41%인 20건이었으며 조류주의보 기준인  $15 \mu\text{g Chl. } a/L$ 보다도 낮은 농도를

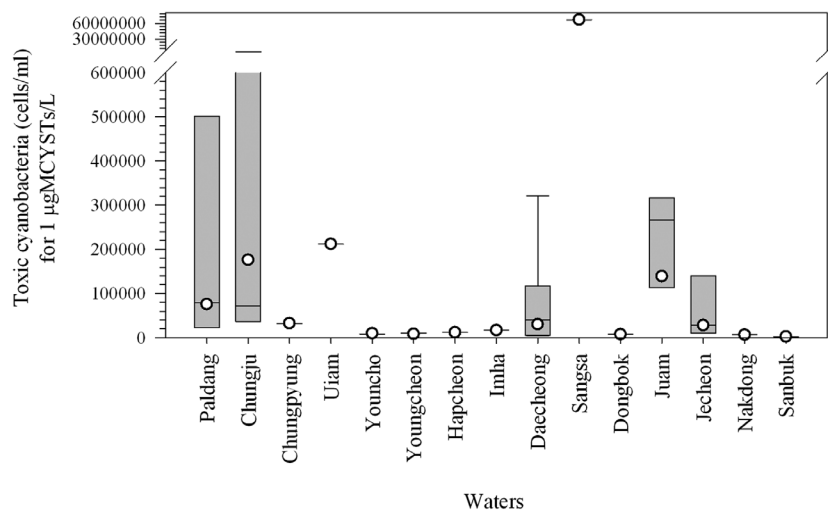


Fig. 2. Range of toxic cyanobacterial cell numbers equivalent to  $1 \mu\text{g MCYSTs/L}$  in Korean lakes and rivers (Box - 25th and 75th percentiles, whisker - 5th and 95th percentiles, line within box - median value, open circle - geometrical mean).

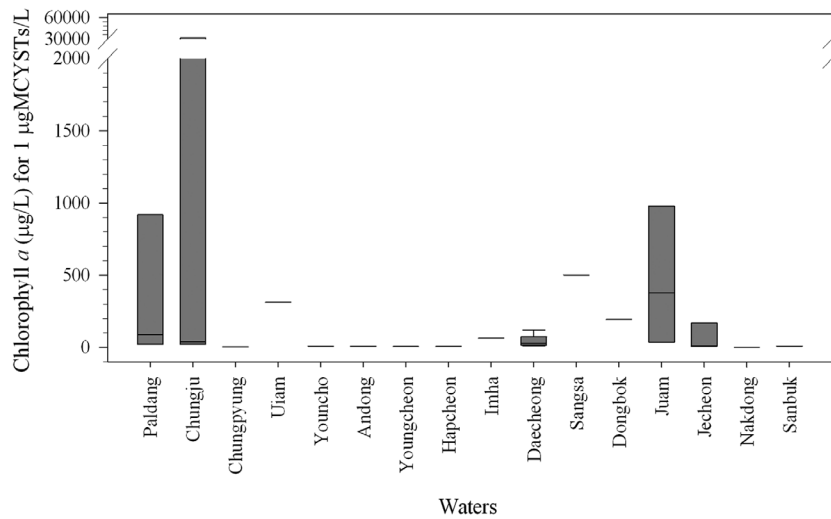


Fig. 3. Range of chlorophyll *a* concentrations of toxic cyanobacteria equivalent to 1 µg MCYSTs/L in Korean lakes and rivers (Box - 25th and 75th percentiles, whisker - 5th and 95th percentiles, line within box - median value).

보인 시료도 13건이나 되었다. 수역별로 보면 조사된 16개 수역 중에서 1µg MCYSTs/L에 해당하는 유독 남조류의 클로로필 *a* 농도가 현행 조류경보제 경보 기준 이하로 조사된 수역은 총 7개 수역으로 모두 10 µg Chl. *a*/L 미만의 값을 보여 해당 수역에서 여름철 유독 남조류의 우점도가 95% 이상을 차지한다고 가정할 경우에는 실제 현장에서 출현하는 유독 남조류는 현행기준보다 낮은 클로로필 *a* 농도에서도 독소 농도는 1 µg MCYSTs/L을 초과할 가능성이 있으므로 현행 발령기준이 높게 설정되었다고 할 수 있다. 한편 1 µg MCYSTs/L에 해당하는 유독 남조류의 세포수에 비해 클로로필 *a* 농도는 현행기준과의 편차가 적게 나타났는데 이는 우점한 남조류의 세포당 클로로필 *a* 함량차이와 세포크기의 차이때문으로 판단된다.

유독 남조류 속별 MCYSTs의 함량을 보기 위해 단일 남조류 속이 90% 이상의 우점도를 보인 시료를 대상으로 해당 남조류 속의 세포당 독소함량을 비교하였다. 출현 호수와 상관없이 남조류 속별로 구분하여 1 µg MCYSTs/L에

해당하는 유독 남조류 속별 세포수를 비교한 결과, 한 개의 시료에서만 우점한 *Oscillatoria* 속을 제외하면 *Microcystis* 속이 가장 적은 세포수로 산정되었고 그 다음으로 *Anabaena*, *Aphanizomenon* 속의 순으로 나타났다(Fig. 4). *Microcystis*가 우점할 경우에 비해 *Anabaena* 속이나 *Aphanizomenon* 속이 우점할 경우가 3~6배의 세포수 차이를 보이므로 유독 남조류 속에 관계없이 일률적으로 정해져 있는 현행 조류경보제의 발령기준을 속별로 차별화할 필요가 있을 것으로 판단된다.

그런데 동일 속이라 하더라도 출현 수역 및 시기에 따라 MCYSTs 생성능이 다를 수 있으므로 본 연구에서는 시료수가 가장 많았던 *Microcystis* 우점 시료를 대상으로 출현 호수별로 1 µg MCYSTs/L가 되기 위한 세포수를 산정한 결과, 출현수역에 따라 차이를 보였으며 산복천을 제외하면 모두 현행 기준보다는 많은 세포수를 나타내어 현행 기준이 우리나라에서 출현하는 유독 *Microcystis* 속의 독성을 반영하지 못하고 있음을 나타내었다(Fig. 5).

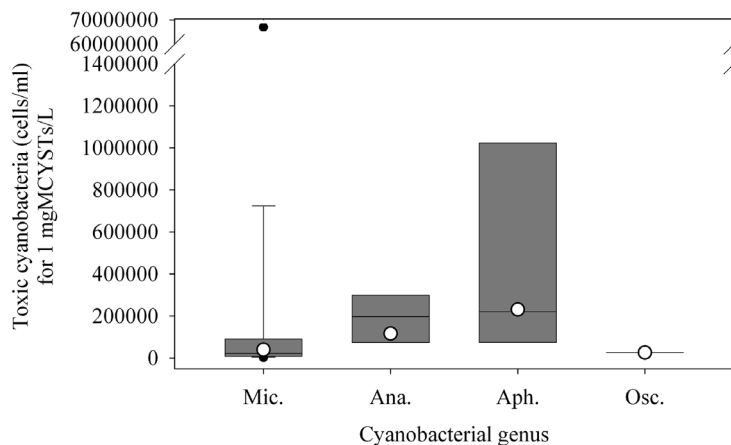


Fig. 4. Range of toxic cyanobacterial cell numbers equivalent to 1 µg MCYSTs/L according to cyanobacterial genera (Box - 25th and 75th percentiles, whisker - 5th and 95th percentiles, line within box - median value, black circle - outlier, open circle - geometrical mean).

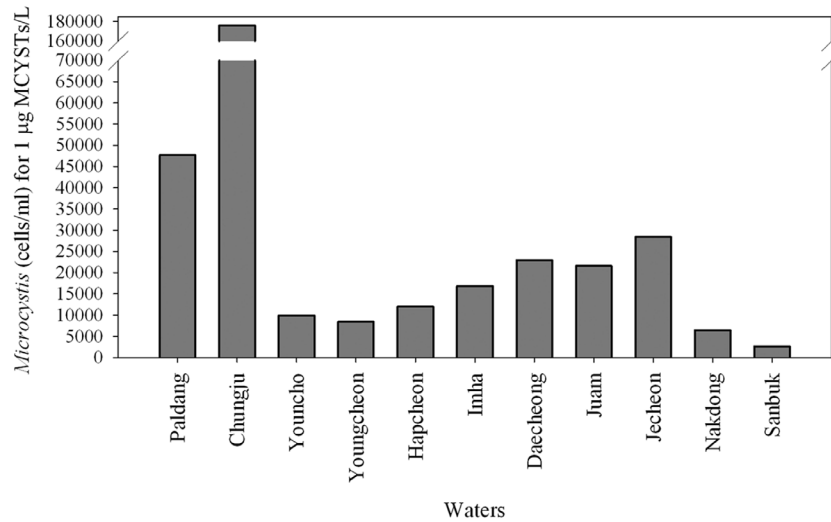


Fig. 5. Geometrical mean of toxic cyanobacterial cell numbers equivalent to 1 µg MCYSTs/L in Korean lakes and rivers.

3.2. 유독 남조류 속별 발령기준 산정

우리나라 수역에서 출현하는 유독 남조류의 독소함량조사를 통해 현행 조류경보제 발령기준의 적정성을 검토한 결과 우리나라 유독 남조류의 독성을 적절히 반영하지 못하는 것으로 조사되어 우리나라 유독 남조류의 독성을 반영한 조류경보제 발령기준을 산정하였다. 먼저 유독 남조류 속별로 독소함량이 다르므로 조류경보제 발령기준을 전체 유독 남조류에 대해 하나의 기준을 적용하는 것보다는 각 속별로 기준을 정하는 것이 더 적절할 것으로 보고, 유독 남조류 속별로 조류 경보 발령기준이 되는 1 µg MCYSTs/L에 해당되는 유독 남조류 세포수 결과의 전체 기하평균을 구하였다(Fig. 4). 그런데 전체 기하평균값은 최저값과 비교하여 60,000배 이상의 극값이 포함되어 있어 이를 포함한 평균산출은 평균으로서의 의미가 적을 것으로 판단된다. 또한 조류경보제의 목적이 남조류 독소로 인한 먹는물의 건강위해성을 사전에 예방하여 먹는물의 안전성을 확보하기 위함이므로 가능하면 경보 발령기준을 보수적이고 엄격하게 적용하는 것이 바람직하고 WHO의 조류경보체계에서도 Alert level 1의 기준인 2,000 cells/mL이 먹는물 가이드라인인 1 µg MCYST-LR/L을 기준으로 하여 독소함량이 가장 높게 보고된 남조류 세포수를 적용하였다고 하고 있어 (Chorus and Bartram, 1999) 본 연구에서도 독소함량이 높은 순서대로 선별 기하평균 방식을 사용하여 발령기준을 산정하였다.

시료 수가 가장 많았던 *Microcystis* 속이 우점한 시료를

대상으로 전체 결과에서 하위(독소함량이 낮은)부터 순차적으로 삭제하면서 1 µg MCYSTs/L에 해당하는 세포수를 계산한 결과를 Table 2에 나타내었다. 총 27건의 시료 중에서 독소함량이 가장 높은 5개의 시료만 적용할 경우 현행 조류경보제 기준에 근접한 세포수를 보였다. 그러나 이런 결과는 전체 조사대상 시료의 19%만이 반영되어 실제 우리나라 수역에서 출현 *Microcystis*의 독소함량을 대변한다고 보기 어려우며 지나치게 엄격한 기준을 적용할 경우 수중 독소량은 먹는물의 가이드라인에 크게 미치지 못함에도 불구하고 조류경보가 발령되어 이에 따른 후속대응조치로 인해 불필요한 행정력의 낭비 및 예산의 낭비를 초래할 가능성이 있다. 따라서 우리나라 출현 유독 남조류의 독소함량을 적절히 반영하는 수준에서의 엄격한 기준을 적용하기 위해 시료비율 약 50%의 상위(독소함량이 높은 순서) 선별 기하평균값을 산정하여 이를 각 속별 조류경보 발령기준으로 제안하였다(Table 3).

한편 위에서 산정한 1 µg MCYSTs/L에 해당되는 유독 남조류 속별 세포수는 WHO에서 먹는물 가이드라인으로 제시한 MCYST-LR이 아니라 MCYST-LR, RR, YR, LA의 합인 총 MCYSTs 함량으로 산정한 세포수이기 때문에 실제로 본 연구에서 적용한 먹는물 가이드라인은 1 µg MCYST-LR CE/L (concentration equivalents of microcystin-LR)이다. 그런데 MCYSTs은 종류에 따라 독성이 다른데(Chorus and Bartram, 1999), 우리나라에서 출현하는 유독 남조류가 생산하는 MCYSTs의 종류는 외국과 달리 독성이 강한 MCYST-

Table 2. Selective geometrical mean of *Microcystis* spp. cell numbers equivalent to 1 µg MCYSTs/L

No. of samples	Selective geometrical mean in order of toxic content (cells/mL)	Ratios of calculated samples
27	40,221	100%
25	23,829	93%
23	16,086	85%
19	13,570	70%
15	9,444	56%
5	4,175	19%

**Table 3.** Selective geometrical means of cyanobacterial cell numbers equivalent to 1 µg MCYSTs/L in order of toxic content and proposed criteria of harmful algae alert system for four toxic cyanobacterial genera

Toxic cyanobacterial genus	No. of sample	Geometrical mean of total sample (cells/mL)	Selective geometrical mean (ratios of calculated samples) (cells/mL)	Proposed criteria of harmful algae alert system
<i>Microcystis</i>	27	40,221	9,444 (56%)	10,000
<i>Anabaena</i>	6	116,875	45,852 (50%)	40,000
<i>Aphanizomenon</i>	4	231,503	82,703 (50%)	80,000
<i>Oscillatoria</i>	1	26,865	-	20,000

**Table 4.** Calculation of cyanobacterial cell numbers equivalent to 1 µg MCYST-LR CE/L and 1 µg MCYST-LR TE/L

Toxic cyanobacterial genus	Cell No. equivalent to 1 µg MCYST-LR CE/L (cells/mL)	Ratio of MCYST-RR to total MCYSTs	Ratio of MCYST-LR, YR, LA to total MCYSTs	Cell No. equivalent to 1 µg MCYST-LR TE/L (cells/mL)
<i>Microcystis</i>	9,444	0.57	0.43	68,659
<i>Anabaena</i>	45,852	0.62	0.38	358,562
<i>Aphanizomenon</i>	82,703	0.50	0.50	537,568
<i>Oscillatoria</i>	26,865	0.80	0.20	263,277

LR의 비율이 적고(16~68%) 독성이 상대적으로 약한 MCYST-RR의 비율이 많아(32~84%), 평균으로 보면 총 MCYSTs에서 MCYST-RR의 비율이 57%, MCYST-RR을 제외한 독성이 비슷한 MCYST-LR, YR, LA의 비율이 43%로 조사되었다. 그런데 WHO에서 제안한 MCYSTs의 먹는물 가이드라인은 독성이 높은 MCYST-LR을 기준으로 하여 1 µg/L 즉 1 µg MCYST-LR TE/L (toxicity equivalents of microcystin-LR)이므로 이에 해당하는 유독남조류 세포수를 산정하면 1 µg MCYST-LR CE/L (concentration equivalents of microcystin-LR)에 비해 훨씬 많은 세포수가 산정된다(Table 4). 그러나 조류경보제의 본래 취지에 맞게 먹는물의 안정성 확보를 위해 가능하면 엄격한 기준을 적용하기 위해서는 총 MCYSTs 농도(CE of microcystin-LR)를 기준으로 하는 것이 적당할 것으로 판단된다.

한편 실제 현장에서 대량발생하는 유독 남조류는 대부분의 경우 2속 이상이 혼재하며 단일 남조류속만이 출현하는 경우는 드물다. 본 조사에서 채취한 남조류 대량발생 시료에서도 49 건의 시료에서 단 9건만이 단일 속이 출현하였으며 이중 *Microcystis* 이외의 다른 속이 우점한 것은 단 1건에 불과하였다. 따라서 남조류 독소에 의한 건강위해성 대비라는 측면에서는 가능한 한 엄격한 기준을 적용하는 것을 원칙으로 하여 유독 남조류가 2속 이상 함께 출현하는 경우 우리나라 수계에서 가장 흔하게 그리고 많은 우점도를 보이며 또한 독소 함량도 가장 높게 조사된 *Microcystis* 속의 세포수 기준(10,000 cells/mL)을 대표 발령기준으로 해서 적용하고, 단 *Microcystis* 이외의 단일 유독남조류 속이 98% 이상 우점할 경우 해당 남조류 속의 독소함량을 고려하여 Table 3에 제시된 해당 남조류 속의 기준을 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

우리나라 주요호수와 하천 하류에서 대량발생한 유독 남조류 시료를 대상으로 세포당 및 클로로필 *a* 당 독소함량

을 조사하고 이를 근거로 한 조류경보제 발령기준을 산정하여 현행 조류경보제 발령기준과 비교 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 전체 조사대상 시료의 유독 남조류 건조중량당 MCYSTs 함량의 범위는 0.2~2,166 µg/g DW (평균 262 µg/g DW)으로 수역에 따라 또한 동일한 수역에서도 채취 시기나 우점 남조류 종류에 따라 다양한 독소 함량을 보였으며, 외국산 유독 남조류의 독소 함량과 비교할 때 높은 수준은 아닌 것으로 나타났다.
- 2) 세포당 MCYSTs 함량을 이용해 현행 조류경보제의 경보 기준이 되는 1 µg MCYSTs/L에 해당하는 유독 남조류 세포수를 산정한 결과, 2,348~66,980,638 cells/mL로 매우 큰 편차를 보였으며, 전체 시료 중에서 1 µg MCYSTs/L에 해당하는 유독 남조류세포수가 현행 조류경보의 유독 남조류세포수 기준인 5,000 cells/mL보다 적게 산정된 시료는 4건에 불과했고 다른 시료들은 모두 더 많은 세포수를 보여 우리나라의 대부분의 수역에서 현행 조류경보제 발령기준이 실제 출현하고 있는 유독 남조류의 독소함량을 적절히 반영하지 못함을 시사하였다.
- 3) 단위클로로필 *a* 당 독소량을 이용해 1 µg MCYSTs/L에 해당하는 유독남조류의 클로로필 *a* 농도를 산정한 결과 현행 조류경보 기준인 25 µg Chl. *a*/L에 비해 낮은 농도를 보인 시료는 전체 시료의 약 41%인 20건으로 조사되어 실제 현장에서 출현하는 유독 남조류는 현행기준보다 낮은 클로로필 *a* 농도에서도 독소 농도는 1 µg MCYSTs/L을 초과할 가능성이 있는 것으로 나타났다.
- 4) 1 µg MCYSTs/L에 해당하는 유독 남조류 속별 세포수를 비교한 결과, *Microcystis*가 우점할 경우에 비해 *Anabaena* 속이나 *Aphanizomenon* 속이 우점할 경우가 3~6배의 많은 세포수를 보여 유독 남조류 속에 관계없이 일률적으로 정해져 있는 현행 조류경보제의 발령기준을 속별로 차별화할 필요가 있는 것으로 나타났다.
- 5) 본 연구에서 조사된 한국산 유독 남조류의 독소함량을

이용하여 남조류 속별로 시료비율 약 50%의 상위(독소 함량이 높은 순서) 선별 기하평균값으로 조류 경보 세 포수 기준을 산정한 결과, *Microcystis* 속은 10,000 cells/mL, *Oscillatoria* 속은 20,000 cells/mL, *Anabaena* 속은 40,000 cells/mL, *Aphanizomenon* 속은 80,000 cells/mL로 산정 되었다.

## 사 사

본 연구는 2009년도 국립환경과학원의 환경현안지원연구 인 「조류예보제 발령기준 적정화 방안연구(II)」의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 국립환경과학원(2006). 2005년도 조류예보제 시행결과보고서. NIER No. 2006-2-784.
- 국립환경과학원(2008). 조류예보제 발령기준 적정화 방안연구(I). NIER No. 2008-49-999.
- 김화빈, 박혜경, 문정숙(2009). LC/MS/MS 분석을 위한 MCYSTs 전처리 단계별 효율성 연구. 수질보전 한국물환경학회지, **25**(5), pp. 720-726.
- 김화빈, 박혜경, 신교동, 문정숙(2010). 국내산 유독 남조류의 독소생산 특성. 수질보전 한국물환경학회지, **26**(5), pp. 834-840.
- 박혜경, 서용찬, 조일형, 박병환(2006). 녹조현상 원인조류들의 염소처리에 의한 소독부산물 생성 및 microcystin 유출. 수질보전 한국물환경학회지, **22**(3), pp. 513-520.
- 박혜경, 정원화, 권오상, 류재근(2000). 팔당호에서 남조류 및 남조류생산 독성물질의 계절변동. 한국조류학회지, **15**(1), pp. 277-282.
- 배병욱, 이유정, 임문구(2008). 대청호 원수와 하류 역조정지 원수에서의 이취미 비교. 수질보전 한국물환경학회지, **24**(5), pp. 598-602.
- 이경락, 정원화, 김종민, 김영생, 최희진, 김한순(2008). 영천호에서 남조류 독소(microcystins)의 계절적 변동. 한국하천호수학회, **41**(2), pp. 264-274.
- 이정준, 이정호, 박종근(2003). 대청호의 남조류 수화발달과 환경요인 변화와의 상관관계. 한국하천호수학회, **36**(3), pp. 269-276.
- 정영호(1968). 韓國 動植物 圖鑑 제 9 권 淡水藻類편, 아카데미출판사.
- 환경부(2008). 수질오염공정시험방법.
- Chorus, I. and Bartram, J. (1999). *Toxic Cyanobacteria In Water*, Spon Press.
- Falconer, I. R., Burch, M. D., Steffensen, D. A., Choice, M. and Coverdale, O. R. (1994). Toxicity of the blue-green algae (cyanobacterium) *Microcystis aeruginosa* in drinking water to growing pigs, as an animal model for human injury and risk assessment. *Environ. Toxicology and Wat. Quality*, **9**, pp. 131-139.
- Henriksen, P. (1996). Microcystin profiles and contents in Danish populations of cyanobacteria/blue-green algae as determined by HPLC. *Phycologia, (Supplement)*, **35**, pp. 102-110.
- Jones, G. J., Falconer, I. F., and Wilkins, R. M. (1995). Persistence of cyclic peptide toxins in dried cyanobacterial crusts from Lake Mokoan, Australia. *Environ. Toxicol. Water Qual.*, **10**, pp. 19-24.
- Komárek, J. (1991). A review of water-bloom forming *Microcystis* species with regard to populations from Japan. *Archiv Hydrobiologie*, **92**(64), pp. 115-127.
- Kotak, B. G., Lam, A. K. Y., Prepas, E. E., Kenefick, S. L., and Hrudehy, S. E. (1995). Variability of the hepatotoxin microcystin-LR in hypereutrophic drinking water lakes. *J. Phycol.*, **31**, pp. 248-263.
- Park, H. D., Kim, B., Kim, E., and Okino, T. (1998). Hepatotoxic microcystins and neurotoxic anatoxin-a in cyanobacterial blooms from Korean lakes. *Environ Toxicol Water Qual.*, **13**, pp. 225-234.
- Park, H. D., Watanabe, M. F., Harada, K. I., Nagai, H., Suzuki, M., Watanabe, M., and Hayashi, H. (1993). Hepatotoxin (microcystin) and neurotoxin (anatoxin-a) contained in natural blooms and strains of cyanobacteria from Japanese freshwaters. *Natural Toxins*, **1**, pp. 353-360.
- Ruangyuttikarn, W., Miksik, I., Pekkoh, J., Peerapornpisal, Y., and Deyl, P. (2004). Reversed-phase liquid chromatographic-mass spectrometric determination of MCYST-LR in cyanobacteria blooms under alkaline conditions. *Journal of Chromatography B*, **800**(1-2), pp. 315-319.
- Scott, W. E. (1991). Occurrence and significance of toxic cyanobacteria in Southern Africa. *Wat. Sci. Techno.*, **23**, pp. 175-180.
- Spoof, L., Vesterkvist, P., Lindholm, T., and Meriluoto, J. (2003). Screening for cyanobacterial hepatotoxins, MCYSTs and nodularin in environmental water samples by reversed-phase liquid chromatography - electrospray ionisation mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, **1020**(1), pp. 105-119.
- Zhang, Q. X., Carmichael, W. W., Yu, M. J., and Li, S. H. (1991). Cyclic peptide hepatotoxins from freshwater cyanobacterial (blue-green algae) waterblooms collected in central China. *Toxicol. Chem.*, **10**, pp. 313-321.