

낙동강 중, 하류 및 덕동호의 시·공간적 남조류 군집 특성

박혜경[†] · 신라영 · 이해진 · 이경락 · 천세억

국립환경과학원 낙동강물환경연구소

Spatio-temporal Characteristics of Cyanobacterial Communities in the Middle-downstream of Nakdong River and Lake Dukdong

Hae-Kyung Park[†] · Ra-Young Shin · Haejin Lee · Kyung-Lak Lee · Se-Uk Cheon

Nakdong River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research

(Received 27 March 2015, Revised 6 May 2015, Accepted 18 May 2015)

Abstract

Temporal and spatial characteristics of cyanobacterial communities at the monitoring stations for Harmful Algal Bloom Alert System (HABAS) in Nakdong River and Lake Dukdong were investigated for two years (2013 to 2014). A total of 30 cyanobacterial species from 14 genera were found at the survey stations. *Microcystis* sp. showed maximum cell density in the total cyanobacterial community in August, 2014 at ND-2 and in September, 2013 at ND-3 station. *Lynbya limnetica* and *Geitlerinema* sp., non-target species for alert criteria showed maximum cell density at ND-1 (August, 2013) and Dam station of Lake Dukdong (September, 2014), respectively. Total cyanobacterial cell density and the relative abundance of four target genera (*Microcystis*, *Anabaena*, *Aphanizomenon* and *Oscillatoria* spp.) for alert criteria was relatively lower in the mesotrophic Lake Dukdong than at the eutrophic riverine stations of Nakdong River, indicating cyanobacterial density and the RA of target genera is affected by the trophic state of the monitoring stations. Simulating the alert system using phycocyanin concentration as an alert criterion resulted in the longer period of alert issued compared to the period of alert issued using the current criterion of harmful cyanobacterial cell density due to the influence of phycocyanin concentration from non-target cyanobacterial species.

Key words : Cyanobacteria, Harmful Algal Bloom Alert System (HABAS), Lake Dukdong, Nakdong River, Phycocyanin concentration

1. Introduction

남조류는 지구상에서 가장 오래된 생명체로 현재의 지구 대기환경을 만드는데 결정적 역할을 한 광합성 생물이다 (Paerl and Otten, 2013). 남조류는 질소고정능, 인 저장능, 세포내 기포생성 등 다른 조류와 구별되는 생리적인 특성을 가지고 있어 빈영양상태에서 과영양상태까지의 매우 다양한 토양, 수중환경에서 서식하고 있다(Gallon, 1992; Whitton, 2012). 그런데 인구 증가와 산업발전에 따른 담수역의 급속한 인공적 부영양화는 하천과 호수에서 이런 남조류 중 일부 속의 대량 발생 즉 녹조현상을 유발하였고 특히 최근 들어 가장 심각한 지구적 환경문제로 인식되고 있는 기후변화 현상과 맞물려 갈수기간의 증가, 기온과 수온의 상승에 따라 녹조 발생의 강도 및 기간은 앞으로 더 증가할 것으로 예상

되고 있어(Bates et al., 2008; Senhorst and Zwolsman, 2005; Thackeray et al., 2008), 이는 현재 전 세계가 공통적으로 직면한 심각한 수질문제가 되었다(Paerl and Otten, 2013). 우리나라도 예외 없이 호수나 하천 유역의 도시화 및 개발에 따른 수변완충지대인 녹지나 습지의 급격한 감소, 수량확보를 위한 댐, 보 등의 구조물 건설에 따른 하천 중의 정체수역 증가, 인구 증가에 따른 과도한 용수 이용 및 하·폐수 오염부하량의 증가, 농업배수, 미처리 축산폐수와 같은 비점오염원의 강우시 유출 등으로 호수와 하천의 수질이 악화되고 있고, 특히 질소와 인과 같은 영양염류의 수중 농도가 증가하여 부영양화되고 있다. 이에 따라 수 중의 남조류에 의한 녹조현상 발생되고 있고 특히 상수원에서 녹조 현상으로 매년 여름과 가을에 수도물의 취기 문제(Bae et al., 2008; You et al., 2013), 남조류 독소 문제(Choi et al., 2013; Kim et al., 2010; Lee et al., 2009; Park et al., 2000), 소독부산물 문제(Park et al., 2006) 등 먹는물의 질과 안전성 문제가 제기되고 있다.

대부분의 상수원수를 호수와 하천과 같은 지표수에 의존하고 있는 우리나라는 녹조에 의한 건강위해성을 미연에 방지하고 안전한 상수원수 관리를 위해 1998년부터 주요

[†] To whom correspondence should be addressed.
parkhknier@hanmail.net

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

상수원 호수와 하천을 대상으로 조류경보제를 시행하고 있으며, 2014년에는 21개 호수와 한강 하류부를 대상으로 조류경보제가 시행되고 있다. 조류경보제의 경보기준 지표항목은 유해남조류 세포수와 클로로필 *a* 농도로 되어 있으며, 주1회 대상 수역의 유해남조류 세포수와 클로로필 *a* 농도를 모니터링하여 3단계의 경보 기준에 따라 경보가 발령된다(MOE, 2014).

녹조현상을 일으켜 수이용 장애를 유발하는 것으로 알려진 남조류는 전체 남조류 중에서 극히 일부 종에 불과하기 때문에 우리나라의 조류경보제에서는 현재까지 우리나라 수계에서 독소 생산이 확인된 *Microcystis*, *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Oscillatoria*의 4속을 유해남조류로 지정하여 발령기준을 위한 감시대상으로 하고 있으며, 그 외의 남조류는 포함하지 않는다(Park et al., 2011).

그런데 전체 조류현존량의 지표인 클로로필 *a* 농도는 유해남조류 세포수와 상관계수가 낮으며 특히 상시적으로 규조류 현존량이 높은 하천형 인공호와 하천 하류의 경우 두 항목간의 상관성은 매우 낮다. 또한 유해남조류 세포수의 경우 숙련된 분석자가 현미경 시야에서 직접 계수를 해야만 하기 때문에 분석의 정도관리에 어려움이 있고 또 분석에 상당한 시간과 전문성이 필요하다는 점에서 조류발생 상황을 신속히 파악하여 대처하기 위한 조류경보제의 취지를 달성하기에는 한계가 있다. 이런 문제점으로 현행 조류경보제 발령지표항목과 발령기준의 개정 필요성이 지속적으로 제기되어 왔다(Ahn et al., 2007, Park et al., 2011). 특히 최근에는 측정의 신속, 간편성을 장점으로 남조류 색소인 phycocyanin이 남조류 현존량 모니터링의 지표로 제안되고 있다(Ahn et al., 2007; Izydorczyk et al., 2005; McQuaid et al., 2011; Song et al., 2014; Vincent et al., 2004). Phycocyanin은 남조류의 대표적인 보조색소로서 남조류 고유의 남색을 띄게 하는 색소이다(Gantt, 1981; Maxwell and Johnson, 2000; Whitton and Potts, 2000). 따라서 전체 조류현존량의 지표인 클로로필 *a* 농도가 아닌 phycocyanin 농도를 사용할 경우 전체 남조류 현존량을 파악할 수 있을 것이다. 그러나 현행 조류경보제는 유해남조류를 감시대상으로 하고 있기 때문에 phycocyanin 농도를 지표로 사용할 경우 4속의 유해남조류 외의 남조류 현존량이 포함되어 과도한 경보발령이 될 가능성도 배제할 수는 없다.

본 연구에서는 조류경보제가 (시범)시행되고 있는 낙동강 본류 3개 지점과 덕동호를 대상으로 2013년부터 2014년 2년간 전체 출현남조류의 군집구조 및 출현시기 등을 파악하고, 특히 조류경보제 감시대상인 4속의 유해남조류와 그 외 남조류의 출현량을 조사하여 새롭게 도입이 제안되고 있는 남조류 색소 phycocyanin 농도가 조류경보제 발령지표항목으로 도입될 경우를 시뮬레이션하고 그 결과를 검토하였다.

2. Materials and Methods

조사대상 지점은 낙동강 본류의 중 하류 구간으로 상수원수 취수구 인근의 구미시 해평면(ND-1), 달성군 다사읍(ND-2),

함안군 남지읍(ND-3)의 3 지점과 경주시 상수원인 덕동호 댐알지점이다(Fig. 1). 낙동강 본류의 경우 위의 세 지점을 대상으로 2013년 2월부터 조류경보제가 시범 운영되고 있고, 2013년과 2014년에 걸쳐 조류경보(2주 연속 유해남조류세포수 5,000 cells/ml 이상이며 클로로필 *a* 농도 25 μ g/L 이상일 때 발령)는 ND-1 지점에서는 발령된 적이 없으며, ND-2 지점에서는 2013년에 13일 발령되었고, 2014년에는 발령되지 않았다. ND-3 지점에서는 2013년에 60일, 2014년에 65일로 가장 긴 기간동안 조류경보가 발령되었다. 덕동호에서도 2013년과 2014년에 조류경보가 발령되지 않았다(MOE, 2014).

낙동강 본류 지점에서는 하천의 횡단면을 4등분하여 정중앙, 좌중, 우중 세 지점에서 각각 표층부터 수심 50 cm까지의 표층수를 5 L 플라스틱 비이커로 채수한 후 혼합하여 조류분석시료로 사용하였다(MOE, 2011). 덕동호는 댐측 호안의 표층수를 채취하였다. 채취한 시료는 Lugol 용액으로 고정하였으며 실험실로 옮겨 현미경(Nikon, Eclipse Ni) 검경하여 출현 조류종을 동정하고 Sedwick-Rafter chamber를 사용하여 출현세포수를 정량 분석하였다(MOE, 2011). 덩어리형 군체를 형성하여 정확한 계수가 어려운 *Microcystis* 속은 1차 동정 후 초음파파쇄기(Sonics & Materials Inc., VCX750)로 군체를 깨 다음 2차로 정량 계수하였다. 남조류의 동정은 한국의 조류(담수산 남조류 I, II)(NIBR, 2012a, 2012b), 일본담수조도감(Hirose et al., 1977) 및 Komárek (1991)의 분류체계에 따라 동정하였다.

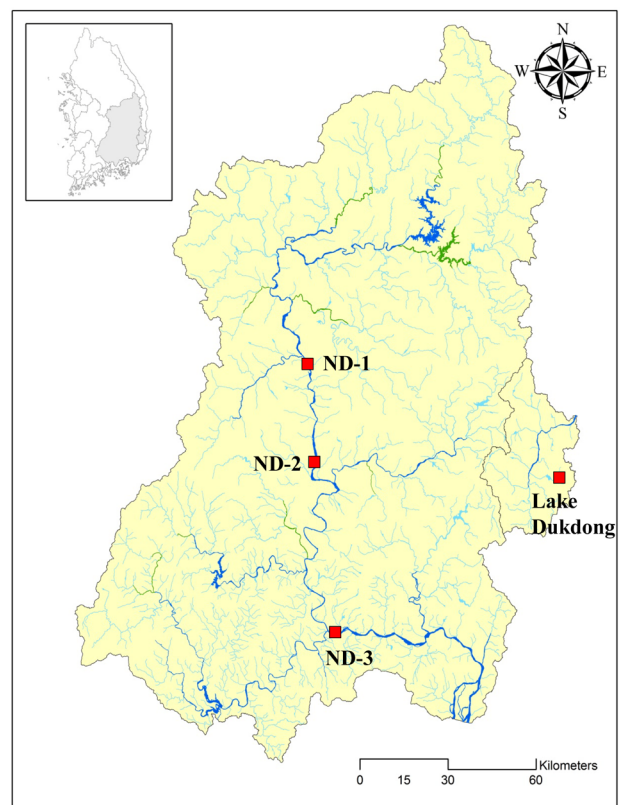


Fig. 1. Location of monitoring stations in the Nakdong River and Lake Ddukdong.

3. Results and Discussion

3.1 남조류 군집 특성

낙동강 수계 조류경보제 대상 수역에서 2013년부터 2014년 2년간 조사된 남조류는 총 3목 7과 14속 30종으로, 조류경보제 감시대상 유해남조류 4속 12종이외에 10속 18종이 더 조사되었다(Table 1). 지점별로는 낙동강 본류 중 ND-1 지점에서 11속 18종, ND-2 지점에서 10속 19종, ND-3 지점에서 13속 28종, 그리고 덕동호 댐앞 지점에서 11속 18종이 조사되어 ND-3 지점에서 가장 많은 종이 조사되었다.

ND-1 지점에서 2013년부터 2014년 2년간 최대 현존량을 나타낸 종은 조류경보제 감시대상종이 아닌 *Lynbya limnetica* 로 2013년 8월에 33,600 cells/ml이었고 다음으로 *Anabaena* sp. (18,992 cells/ml)와 *Pseudanabaena* sp. (11,796 cells/ml)가 많은 현존량을 보였다. 조사기간 평균 속별 상대우점도를 보면 *Pseudanabaena* 속이 28.6%, *Merismopedia* 속이 27.0%로 높은 우점도를 보였고 조류경보제 감시대상속 중에서는 *Aphanizomenon* 속이 15.2%로 우점도가 가장 높았다. ND-2 지점과 ND-3 지점에서는 대표적인 녹조원인 남조류인 *Microcystis* sp.가 각각 31,830 cells/ml, 72,252 cells/ml로 조사기간 최대 현존량을 나타내었다. 조사기간 평균 상대우점도는 ND-2 지점의 경우 *Microcystis* 속이 33.2%로 가장 높았고 다음으로 *Pseudanabaena* 속이 21.8%로 높았다. ND-3 지점에서도 *Microcystis* 속과 *Pseudanabaena* 속이 각각 30.1%와 30.4%로 높은 우점도를 보였다. 덕동호 댐앞 지점에서는 조류경보제 감시대상 속들의 현존량은 적었으며, *Geitlerinema* sp.이 9,637 cells/ml로 조사기간 최대 현존량을 보였고 조사기간 평균 상대우점도는 적은 현존량이지만 출현기간이 길었던 *Microcystis* 속과 *Pseudanabaena* 속이 23.4%, 25.1%로 높은 우점도를 보였다(Fig. 2, Table 2). 낙동강 본류 및 덕동호의 조류경보제 대상 수역에서는 수역별 수질환경에 따라 남조류 속의 현존량과 우점도는 차이를 보여 유역의 대부분이 산으로 이루어져 있으며 영양염류 농도가 가장 낮은 덕동호(NRERC, 2014)에서 가장 낮은 현존량을 보였고, 낙동강 본류 구간에서는 유하방향으로 볼 때 상류쪽에서 하류로 갈수록 전체 남조류 현존량도 많았고 유해남조류속의 우점도도 높았다. 전 지점에서 경보제 대상 유해남조류로는 *Microcystis* 속과 *Aphanizomenon* 속, 비대상 남조류는 *Pseudanabaena* 속의 우점도가 가장 높은 것으로 조사되었다. 국내 다른 호수 및 하천의 남조류 군집구조를 보면, 주암호에서 *Microcystis* 속이 72.1~73.3%로 제1 우점하였으며 조류경보제 비대상 남조류로는 *Aphanocapsa* 속의 우점도가 10.8~15.5%로 가장 높았다(Lee et al., 2010). 국내 호수 및 하천을 대상으로 독소를 생산하는 유해 남조류에 대한 연구는 다수 이루어져 왔으나 전체 남조류 군집구조에 대한 연구는 보고된 사례가 거의 없다. 따라서 조류경보제 기준 개정 등과 관련하여 다양한 수역에서의 전체 남조류 군집구조 및 경보제 비대상 남조류에 대한 추가 연구의 필요성이 높은 것으로 생각된다.

Table 1. List of cyanobacterial species found at survey stations from 2013 to 2014

Class Cyanophyceae	
Order Chroococales	
Family Merismopediaceae Elenkin, 1933	
Genus <i>Aphanocapsa</i> Nageli, 1849	<i>Aphanocapsa delicatissima</i> <i>Aphanocapsa elachista</i> <i>Aphanocapsa</i> sp.
Genus <i>Merismopedia</i> Meyen, 1839	<i>Merismopedia tenuissima</i> <i>Merismopedia</i> sp.
Genus <i>Synechocystis</i> Sauvageau, 1892	<i>Synechocystis aquatilis</i>
Genus <i>Woronichinia</i> Elenkin, 1933	<i>Woronichinia</i> sp.
Family Chroococcaceae Rabenhorst, 1863	
Genus <i>Chroococcus</i> Nageli, 1849	<i>Chroococcus minutus</i> <i>Chroococcus</i> sp.
Family Microcystaceae Elenkin, 1933	
Genus <i>Microcystis</i> Kützing ex Lemmermann, 1907	<i>Microcystis aeruginosa</i> <i>Microcystis viridis</i> <i>Microcystis wesenbergii</i> <i>Microcystis</i> sp.
Order Oscillatoriales	
Family Pseudanabaenaceae Anagnostidis & Komárek, 1988	
Genus <i>Geitlerinema</i> (Anagnostidis & Komárek) Anagnostidis, 1989	<i>Geitlerinema amphibium</i> <i>Geitlerinema</i> sp.
Genus <i>Limnothrix</i> Meffert, 1988	<i>Limnothrix redekei</i>
Genus <i>Pseudanabaena</i> Lauterborn, 1915	<i>Pseudanabaena catenata</i> <i>Pseudanabaena</i> sp.
Family Phormidiaceae Anagnostidis & Komárek, 1998	
Genus <i>Phormidium</i> Kützing ex Gomont, 1892	<i>Phormidium valderianum</i> var. <i>tenuis</i> <i>Phormidium</i> sp.
Family Oscillatoriaceae Engler, 1898	
Genus <i>Oscillatoria</i> Vaucher ex Gomont, 1892	<i>Oscillatoria</i> sp.
Genus <i>Lyngbya</i> C. Agardh ex Gomont, 1892	<i>Lyngbya limnetica</i> <i>Lyngbya</i> sp.
Order Nostocales	
Family Nostocaceae Eichler, 1886	
Genus <i>Anabaena</i> Bory de Saint-Vincent ex Bornet & Flahault, 1886	<i>Anabaena aphanizomenoides</i> <i>Anabaena crassa</i> <i>Anabaena flos-aquae</i> <i>Anabaena planktonica</i> <i>Anabaena smithii</i> <i>Anabaena</i> sp.
Genus <i>Aphanizomenon</i> A. Morren ex Bornet & Flahault, 1886	<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>

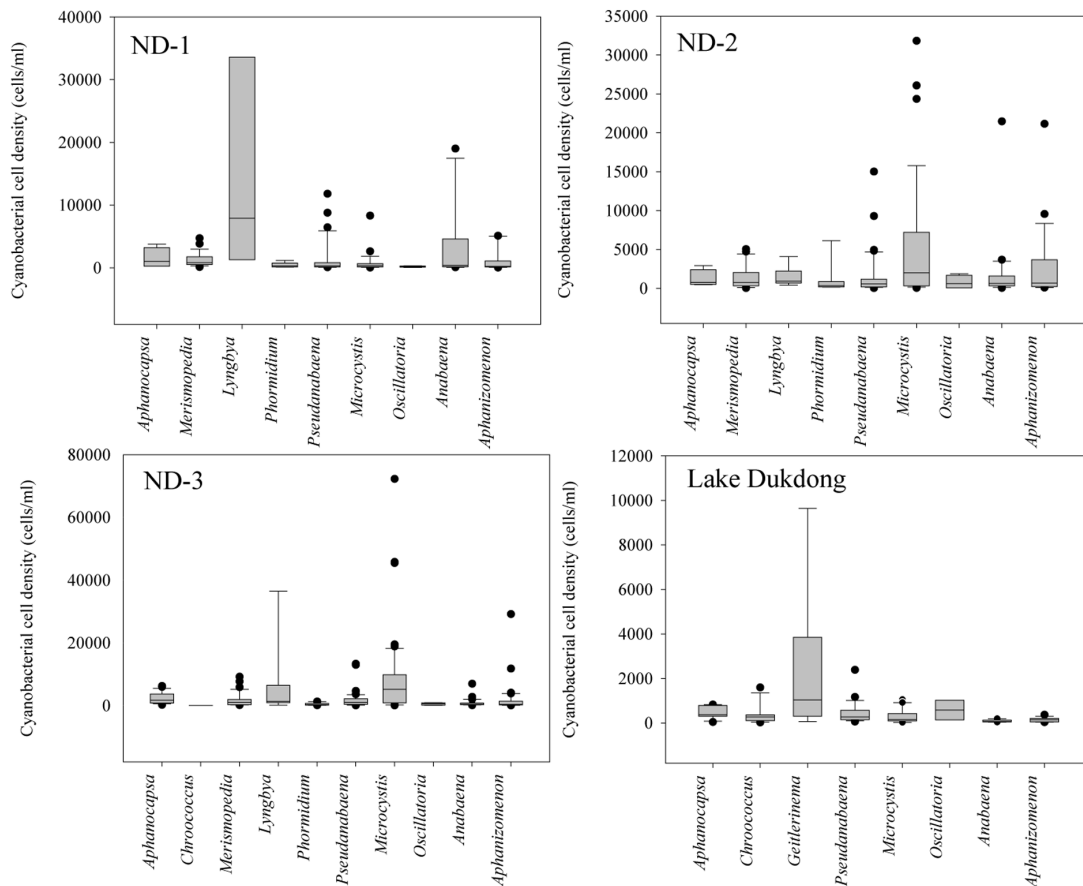


Fig. 2. Distribution of major cyanobacterial general cell density at each survey station. In box plots, boxes indicate 25th and 75th percentile confidence intervals, whiskers indicate 5th and 95th percentiles, dashed lines within boxes indicate mean values.

2013년과 2014년에 조류경보제 대상 유해남조류 4속의 발생 패턴은 출현시기와 현존량에서 차이를 보였다(Fig. 3). 낙동강 본류 구간에서 상류쪽의 ND-1 지점에서는 2014년에 비해 2013년에 유해남조류 현존량이 많았다. 2013년 7월부터 유해남조류가 출현하기 시작했으며 8월 하순에 *Anabaena* 속이 대량 증식하여 최대 현존량을 나타내었고 이후에 급격히 감소하였으며 11월에 *Aphanizomenon* 속이 경보발령기준 이하로 출현한 후 사라졌다. 2014년에는 2013년에 비해 출현시기는 6월 중순으로 빨랐으나 하절기 내내 대량발생은 없었고 11월 이후에는 출현하지 않았다. ND-2 지점에서는 ND-1 지점과 달리 2014년에 유해남조류 속의 현존량이 현저히 많았고 본격적인 출현시기도 약 3주 정도 빨라져 5월 하순부터 6월 하순까지 *Anabaena* 속과 *Aphanizomenon* 속이 대량발생하였으며 이후에는 *Microcystis* 속의 대량발생이 이어졌다. 가장 하류에 위치한 ND-3 지점에서는 2013년에 6월 중순부터 *Oscillatoria* 속을 제외한 나머지 유해남조류 속이 출현하기 시작하였으며 7월 하순부터 *Microcystis* 속을 중심으로 대량발생하기 시작하여 9월 하순에 최고 현존량을 보인 후 감소하였으며 11월까지도 소량씩 지속적으로 출현하였고, *Aphanizomenon* 속의 경우 2014년 1월까지도 낮은 현존량으로 출현하였다. 2014년에는 5월하순부터 본격적으로 출현하기 시작하였고 약 2주간 *Aphanizomenon* 속이 대량 발생하였으며 이후부터 *Microcystis*

속으로 천이되어 7월 하순에 최대현존량을 나타내었다. 호수인 덕동호에서는 하천 구간인 낙동강 본류의 지점들과는 다소 다른 경시적 변동패턴을 보여 2013년에는 7월과 8월에 *Microcystis* 속과 *Oscillatoria* 속이 소량 출현했으며 9월 이후 11월까지 *Aphanizomenon* 속이 소량 출현하였고 조류경보제 발령기준 이상의 현존량은 나타내지 않았다. 2014년에는 7월부터 유해남조류가 소량 출현하였으나 9월하순부터 *Microcystis* 속을 중심으로 조류경보제 주의보 수준(500 cells/ml)으로 출현하였으며 12월초까지 이어졌다. 덕동호의 경우 클로로필 *a* 농도가 낮아 현행 조류경보제 발령기준으로는 현재까지 경보발령이 없었다.

전체 출현남조류를 조류경보제 대상 유해남조류와 비대상 남조류로 구분하여 현존량의 경시적 변화를 보면 유해남조류 현존량이 조사대상 수역 중에서 상대적으로 적었던 ND-1과 덕동호 댐앞 지점에서 비대상 남조류 현존량에 의한 전체 현존량 증가가 두드러져 경보제 비대상 남조류의 우점도가 유해남조류의 우점도에 비해 훨씬 높았으며 남조류의 출현 기간도 길어졌다(Fig. 4, Table 2). 특히 전체 조사대상 수역에서 수온이 높은 하절기에는 유해남조류의 우점도가 높았으나 그 외의 시기에는 비대상 남조류의 우점도가 높았다. 이런 현상은 조사대상 수역의 주요 출현남조류 속의 연간 출현시기를 비교해 보면 더욱 분명해지는데, 네 수역에서 모두 비대상 남조류 속 중 우점도가 높았던

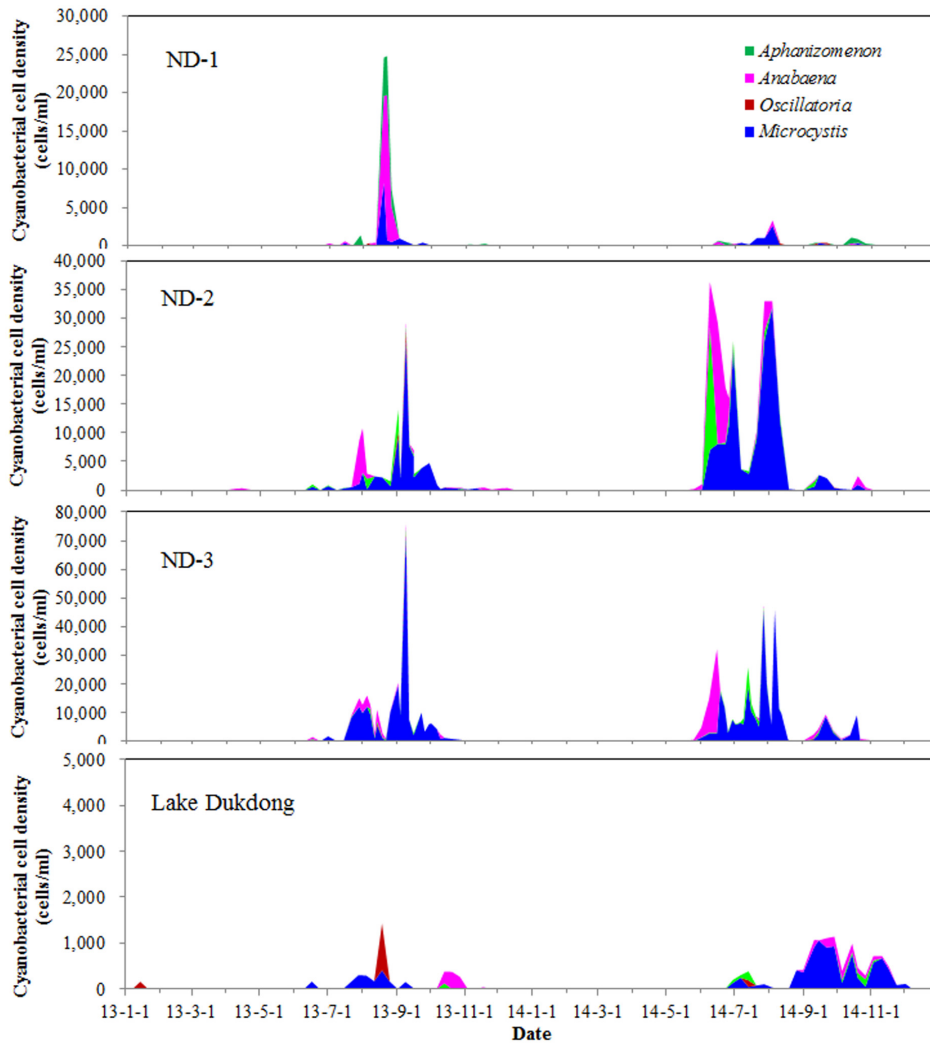


Fig. 3. Temporal variations of four target harmful cyanobacterial general cell density for HABAS at the survey stations from 2013 to 2014.

Table 2. Average relative abundance of target and non-target cyanobacterial genera for alert system and each of major genera in total cyanobacterial community from 2013 to 2014

Genus	Relative abundance (%) in total cyanobacteria			
	ND-1	ND-2	ND-3	Lake Dukdong
Target cyanobacterial genera	35.0	55.1	53.5	37.3
Non-target cyanobacterial genera	65.0	44.9	46.5	62.7
<i>Microcystis</i>	13.3	33.2	30.1	23.4
<i>Anabaena</i>	3.5	3.8	3.4	3.3
<i>Aphanizomenon</i>	15.2	17.8	18.4	6.7
<i>Oscillatoria</i>	3.0	0.3	1.5	4.0
<i>Aphanocapsa</i>	2.7	1.1	4.3	16.2
<i>Chroococcus</i>	0.2	1.6	0.02	11.5
<i>Geitlerinema</i>	0	0	2.7	6.4
<i>Lyngbya</i>	1.1	0.8	1.5	0
<i>Merismopedia</i>	27.0	9.7	4.2	0
<i>Phormidium</i>	5.2	10.0	3.2	0.7
<i>Pseudanabaena</i>	28.6	21.8	30.4	25.1

Pseudanabaena 속의 출현시기는 초봄을 제외하면 연중 출현하는 것으로 나타났고 현재까지 조류경보제에서 유해남조류로 지정되지 않은 *Phormidium* 속도 다른 남조류의 출현이 적은 봄철에 출현하는 것으로 나타났다(Fig. 5). 이런 결과들로 볼 때 낙동강 수계의 조류경보제 대상 수역에서는 수온이 높은 하절기에 일시적으로 녹조현상을 유발하는 것은 조류경보제 대상 유해남조류이지만 그 외의 남조류들이 결빙기를 제외한 대부분의 시기에 지속적으로 출현하고 있는 것을 알 수 있다.

3.2. Phycocyanin 농도 기준 조류경보 발령 시뮬레이션

현행 조류경보제 발령기준 항목인 유해남조류 세포수와 클로로필 *a* 농도의 대체 지표로 제안되고 있는 phycocyanin은 유해남조류 뿐만 아니라 모든 남조류가 가지고 있는 색소이다. 따라서 phycocyanin 농도를 조류경보제 발령기준항목으로 할 경우 실제 수이용상의 장애를 유발하고 상수원수의 건강상의 위해를 유발할 가능성이 낮은 비대상 남조류에 의해 경보가 발령될 가능성이 있으며, 그럴 경우 과도한 수처리 등으로 불필요한 예산과 행정력이 낭비되고 상수원의

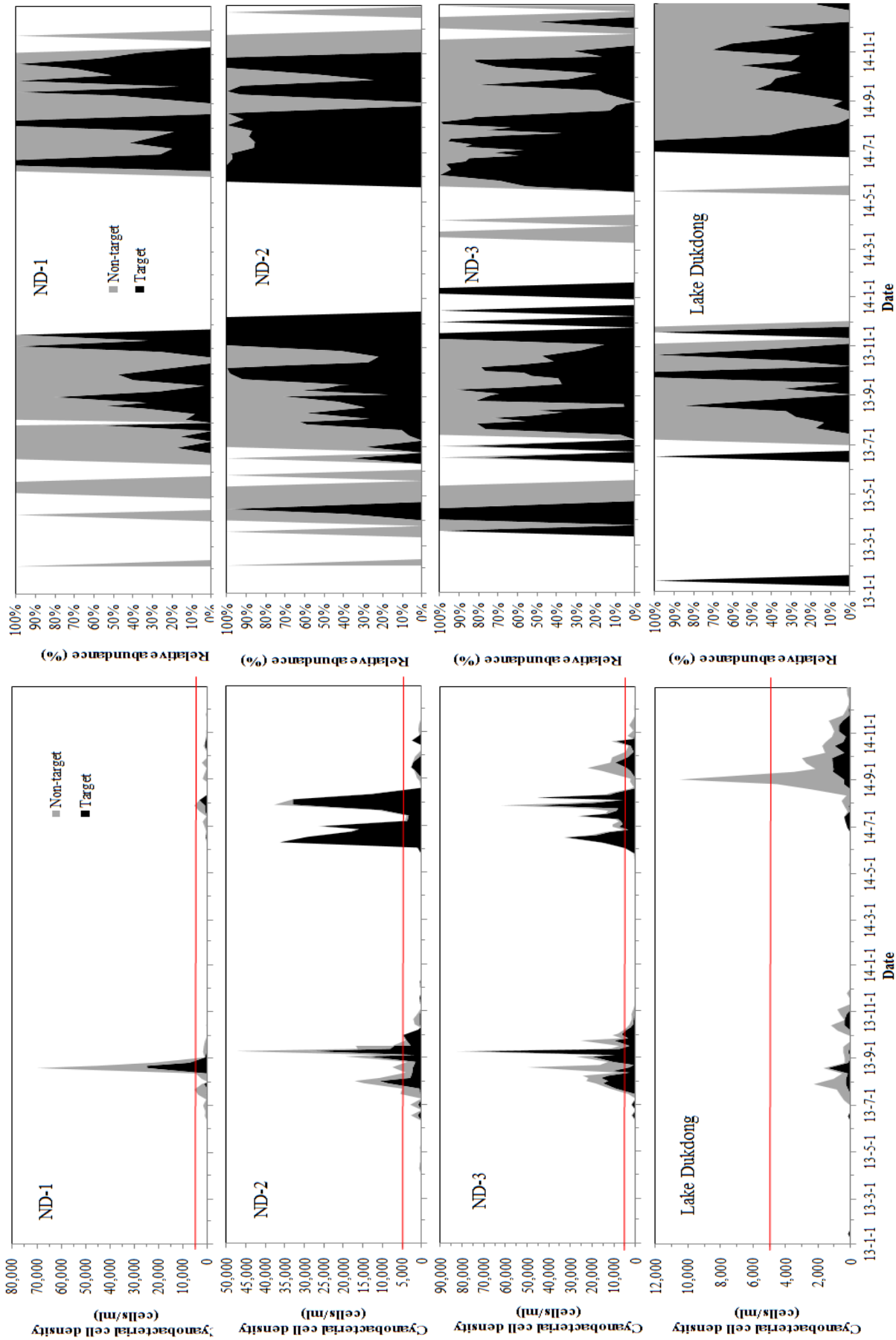


Fig. 4. Temporal variations of cell density (a) and relative abundance (b) of target harmful cyanobacterial genera for HABAS (black) and non-target cyanobacterial genera (grey) at the survey stations from 2013 to 2014.

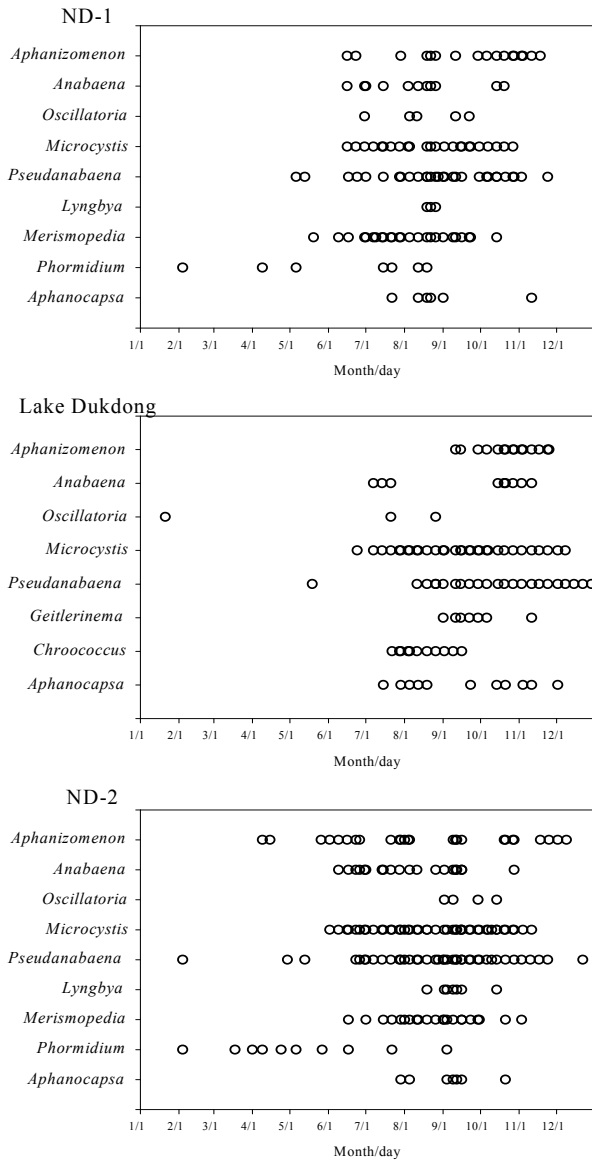


Fig. 5. Time of appearance throughout the year of major cyanobacterial genera in each monitoring station from 2013 to 2014.

안전성에 대한 불신이 높아질 가능성이 있다. 본 연구에서 조사된 낙동강 수계 조류경보제 대상 수역의 2년간 전체 남조류 현존량 자료를 가지고 phycocyanin 농도를 발령 기준으로 할 경우의 발령 상황을 시뮬레이션 하였다. Ahn et al. (2007)은 대청호에서 출현한 유해남조류 자료를 가지고 phycocyanin과 남조류세포수간의 상관식 ($\text{Log}(\text{cyanobacteria}) = 0.360\text{Log}(\text{phycocyanin}) + 4.08$)을 만들었고, phycocyanin의 발령기준을 주의보, 경보, 대발생에 대해 0.1, 30, 700 $\mu\text{g/L}$ 로 제안하였다. phycocyanin 0.1 $\mu\text{g/L}$ 에 해당하는 남조류 세포수를 상관식을 이용해 산정하면 약 5,250 cells/ml이 되며 이 기준은 현행 조류경보제의 경보 발령기준인 5,000 cells/ml과 유사하다. 따라서 phycocyanin 0.1 $\mu\text{g/L}$ 에 해당하는 남조류 세포수를 약 5,000 cells/ml로 보고 본 연구대상 수역에서 2년간 유해남조류현존량과 그의 남조류를 포함한 전체남조류 현존량이 각각 5,000 cells/ml을 초과하는 기간을

산정한 결과, ND-1 지점은 유해남조류현존량으로 산정할 경우 2주이었던 것이 전체남조류현존량으로 산정할 경우 4주로 100% 증가, ND-2 지점은 11주에서 15주로 36% 증가, ND-3 지점은 20주에서 27주로 35% 증가, 그리고 덕동호 댐앞 지점은 유해남조류 세포수만으로는 초과하는 기간이 없으나 전체남조류 세포수로는 1주간 초과하는 것으로 나타났다. 이 결과는 phycocyanin 농도를 조류경보제 발령기준으로 할 경우 유해남조류 세포수를 발령기준으로 할 경우보다 35~100% 이상 발령기간이 증가할 가능성이 있음을 보여준다. 본 연구의 시뮬레이션은 남조류의 biovolume을 고려하지 않고 세포수로만 산정한 것이기 때문에 유해남조류 4속에 비해 *Pseudanabaena* sp. 등의 비대상 남조류의 세포 부피가 대부분 적은 점을 고려할 경우 실제 phycocyanin 농도와는 다소 차이가 있을 수 있다. 그러나 phycocyanin은 남조류 세포내에서 질소저장소 역할을 하며 조도가 낮거나 질소 농도가 높을 경우 세포내 함량이 증가할 가능성이 있고 (Campbell et al., 1998; Grossman et al., 1994) 따라서 유해남조류가 증식하기 어려운 환경에서 비대상 남조류 세포내 phycocyanin 함량이 높아질 가능성이 있다. 따라서 유해남조류에 의한 피해를 최소화하고 상수원수의 안정성 확보를 위해 시행하는 조류경보제의 발령기준항목으로 phycocyanin 농도를 활용하기 위해서는 비대상 남조류의 phycocyanin 농도 기여에 대한 부분을 보완할 수 있는 방안이 추가적으로 검토되어야 할 것으로 생각된다.

4. Conclusion

낙동강 수계의 조류경보제 시행 대상 수역인 낙동강 본류 3개 지점과 덕동호를 대상으로 2013년부터 2014년 2년간 전체 출현남조류의 군집구조와 출현시기를 조사하고 남조류 색소 phycocyanin이 조류경보제 발령기준항목으로 도입될 경우 파생될 수 있는 문제점을 검토한 결과 아래와 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 낙동강 수계 조류경보제 대상 수역에서 2013년부터 2014년 2년간 조사된 남조류는 총 3목 7과 14속 30종으로, 지점별로는 낙동강 본류 중 ND-1 지점에서 11속 18종, ND-2 지점에서 10속 19종, ND-3 지점에서 13속 28종, 그리고 덕동호 댐앞 지점에서 11종 18종이 조사되어 ND-3 지점에서 가장 많은 종이 조사되었다.
- 2) 낙동강 본류 및 덕동호의 조류경보제 대상 수역에서는 수역별 수질환경에 따라 남조류 속의 현존량과 우점도는 차이를 보여 조사기간 최대 현존량과 최대 평균 상대우점도를 나타낸 종은 ND-1 지점에서는 각각 *Lynbya limnetica*와 *Pseudanabaena* 속이었으며, ND-2 지점은 *Microcystis* sp.와 *Microcystis* 속, ND-3 지점은 *Microcystis* sp.와 *Pseudanabaena* 속이었다. 덕동호 댐앞 지점에서는 *Geitlerinema* sp.이 최대 현존량을 보였고 조사기간 평균 상대우점도는 *Pseudanabaena* 속이 높은 우점도를 보였다.
- 3) 유해남조류 현존량이 조사대상 수역 중에서 상대적으로 적었던 ND-1과 덕동호 댐앞 지점에서 조류경보제 비대

상 남조류의 우점도가 유해남조류의 우점도에 비해 훨씬 높았으며 출현 기간도 초봄을 제외하면 연중 출현하는 것으로 나타났다.

4) 남조류 색소인 phycocyanin 농도를 조류경보제 발령기준항목으로 가정하여 조류경보 발령가능성을 시뮬레이션한 결과, 현행 조류경보제 감시대상인 유해남조류 이외의 비대상 남조류에서 기인하는 phycocyanin 농도의 영향으로 현행 기준에 비해 조류경보제 발령기간이 상당기간 증가할 가능성이 있는 것으로 나타나 조류경보제의 발령기준항목으로 phycocyanin 농도를 활용하기 위해서는 비대상 남조류의 phycocyanin 농도 기여에 대한 부분을 보완할 수 있는 방안이 추가적으로 검토되어야 할 것이다.

References

Ahn, C. Y., Joung, S. H., Yoon, S. K., and Oh, H. M. (2007). Alternative Alert System for Cyanobacterial Bloom, Using Phycocyanin as a Level Determinant, *The Journal of Microbiology*, 45(2), pp. 98-104.

Bae, B. U., Lee, U. J., and Lim, M. G. (2008). Comparison of Taste and Odor in Raw Water from the Main Daecheong Reservoir and Its Regulating Reservoir Downstream, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 24(5), pp. 598-602. [Korean Literature]

Bates, B. C., Kundzewicz, Z. W., Wu, S., and Palutikof, J. P. (eds) (2008). *Climate Change and Water*, Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva.

Campbell, D., Hurry, V., Clarke, A. K., Gustafsson, P., and Öquist, G. (1998). Chlorophyll Fluorescence Analysis of Cyanobacterial Photosynthesis and Acclimation, *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 62(3), pp. 667-683.

Choi, Y. A., Han, N. S., Lim, E. G., Kim, Y. M., Choun, C. J., and Lee, B. H. (2013). Characteristics of Cyanobacterial Occurrence and Concentration Distribution of Cyanotoxins in Hoeya Reservoir, *Journal of Korean Society of Environmental Engineering*, 35(12), pp. 943-952. [Korean Literature]

Gallon, J. R. (1992). Tansley Review no.44/reconciling the Incompatible: N₂ Fixation and O₂, *New Phytology* 122, pp. 571-609.

Gantt, E. (1981). Phycobilisomes, *Annual Review of Plant Biology*, 32, pp. 327-347.

Grossman, A. R., Schaefer, M. R., Chiang, G. G., and Collier, J. L. (1994). The Responses of Cyanobacteria to Environmental Conditions: Light and Nutrients. In: Bryant DA, editor. *The Molecular Biology of Cyanobacteria*, Dorecht (The Netherlands): Kluwer Academic Publishers, pp. 641 - 675.

Hirose, H. M., Akiyama, T., Imahori, K., Kasaki, H., Kumano, S., Kobayashi, H., Tajahashi, E., Tsumura, T., Hirano, M., and Yamagishi, T. (1977). *Illustrations of the Japanese Freshwater Algae*, Uchidarokakuho Publishing Co. Ltd., Tokyo, Japan. [Japanese Literature]

Izydorczyk, K., Tarczynska, M., Jurczak, T., Mrowczynski, J., and Zalewski, M. (2005). Measurement of Phycocyanin Fluorescence as an Online Early Warning System for Cyanobacteria

in Reservoir Intake Water, *Environmental Toxicology*, 20, pp. 425-430.

Kim, H. B., Park, H. K., Shin, K., and Moon, J. S. (2010). The Characteristics of Toxin Production in the Korean Toxic Cyanobacteria, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 26(5), pp. 834-840. [Korean Literature]

Komárek, J. (1991). A Review of Water-Bloom Forming Microcystis Species with Regard to Populations from Japan, *Archiv für Hydrobiologie, Supplement Band*. 92, Algological Studies, 64, pp. 115-127.

Lee, K. L., Jheong, W. H., Kang, Y. H., and Kim, H. S. (2009). Evaluation of the Potential Human Health Risk Associated with the Microcystin Bioaccumulation in the Freshwater Fish from Lake Yeongcheon and Lake Daecheong, *Korean Journal of Limnology*, 42(3), pp. 331-339. [Korean Literature]

Lee, Y. C., Lim, Y. T., Chae, J. H., and Kim, N. H. (2010). Algae Condition and Blue Green Algae Characteristics Analysis of Lake Juam, *Proceeding of the 2010 Spring Co-Conference of the Korean Society on Water Environment and Korean Society of Water and Wastewater*, Korean Society on Water Environment and Korean Society of Water Wastewater, pp. 577-578. [Korean Literature]

Maxwell, K. and Johnson, G. J. (2000). Chlorophyll Fluorescence - a Practical Guide, *Journal of Experimental Botany*, 51, pp. 659-668.

McQuaid, N., Zamyadi, A., Prevost, M., Bird, D. F., and Dorner, S. (2011). Use of in vivo Phycocyanin Fluorescence to Monitor Potential Microcystin-producing Cyanobacterial Biovolume in a Drinking Water Source, *Journal of Environmental Monitoring*, 13(2), pp. 455-463.

Ministry of Environment (MOE). (2011). *Standard Method for the Examination of Water pollution*, Ministry of Environment. [Korean Literature]

Ministry of Environment (MOE). (2014). *Report on Harmful Algal Blooms and Countermeasures in 2014*, Ministry of Environment, 11-1480000-001362-10. [Korean Literature]

Nakdong River Environment Research Center (NRERC). (2014). *Survey of Lake Environment and Ecosystem in the Nakdong River System*, Nakdong River Environment Research Center, pp. 805-811. [Korean Literature]

Natioanl Institute of Biological Resources (NIBR). (2012a). *Algal Flora of Korea, Freshwater Cyanophrokaroyota I, Cyanophyta: Cyanophyceae: Chroococcales, Oscillatoriales*, Natioanl Institute of Biological Resources. [Korean Literature]

Natioanl Institute of Biological Resources (NIBR). (2012b). *Algal Flora of Korea, Freshwater Cyanophrokaroyota II, Cyanophyta: Cyanophyceae: Chroococcales, Oscillatoriales*, Natioanl Institute of Biological Resources. [Korean Literature]

Paerl, H. W. and Otten, T. G. (2013). Harmful Cyanobacterial Blooms: Causes, Consequences, and Controls, *Microbial Ecology*, 65(4), pp. 995-1010.

Park, H. K., Jheong, W. H., Kwon, O. S., and Ryu, J. K. (2000). Seasonal Succession of Toxic Cyanobacteria and Microcystins Concentration in Paldang Reservoir, *Algae*, 15(1), pp. 29-35. [Korean Literature]

Park, H. K., Kim, H. B., Lee, J. J., Lee, J. A., Lee, H. J., Park, J. H., Seo, J. K., and Moon, J. S. (2011). Investigation of Criterion on Harmful Algae Alert System Using Correlation

- between Cell Numbers and Cellular Microcystins Content of Korean Toxic Cyanobacteria, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 27(4), pp. 491-498. [Korean Literature]
- Park, H. K., Seo, Y. C., Cho, I. H., and Park, B. H. (2006). Effect of Chlorination on Disinfection Byproducts Production and Release of Microcystins from Bloom-forming Algae, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 26(5), pp. 834-840. [Korean Literature]
- Senhorst, H. A. J. and Zwolsman, J. J. G. (2005). Climate Change and Effects on Water Quality: a First impression, *Water Science and Technology*, 51, pp. 53 - 59.
- Song, K., Li, L., Tedesco L. P., Li, S., Hall, B. E., and Du, J. (2014). Remote Quantification of Phycocyanin in Potable Water Sources through an Adaptive Model, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 95, pp. 68-80.
- Thackeray, S. J., Jones, I. D., and Maberly, S. C. (2008). Long-term Change in the Phenology of Spring Phytoplankton: Species-specific Responses to Nutrient Enrichment and Climatic Change, *Journal of Ecology*, 96, pp. 523 - 535.
- Vincent, R. K., Qin, X., MaKay, R. M. L., Miner, J., Czajkowski, K., Savino, J., and Bridgeman, T. (2004). Phycocyanin Detection from LANDSAT TM Data for Mapping Cyanobacteria Blooms in Lake Erie, *Remote Sensing of Environment*, 89, pp. 381-392.
- Whitton, B. A. (2012). The Ecology of Cyanobacteria II: Their Diversity in Time and Space, *Springer*, Dordrecht, the Netherlands.
- Whitton, B. A., and Potts, M. (2000). The Ecology of Cyanobacteria: Their Diversity in Time and Space, *Springer*, Berlin, 0792347358.
- You, K. A., Byeon, M. S., Youn, S. J., Hwang, S. J., and Rhew, D. H. (2013). Growth Characteristics of Blue-Green Algae (*Anabaena spiroides*) Causing Tastes and Odors in the North-Han River, Korea, *Korean Journal of Ecology and Environment*, 46(1), pp. 135-144. [Korean Literature]