

〈Review paper〉

담수수계에서 남조류 증식억제의 기술적, 전략적 접근

이창수 · 안치용 · 나현준 · 이상협^{1,2} · 오희목*

한국생명공학연구원 환경바이오연구센터,
¹한국과학기술연구원 물자원순환연구단, ²고려대학교 그린스쿨

Technical and Strategic Approach for the Control of Cyanobacterial Bloom in Fresh Waters

Chang Soo Lee, Chi-Yong Ahn, Hyun-Joon La, Sanghyup Lee^{1,2} and Hee-Mock Oh*

*Environmental Biotechnology Research Center, Korea Research Institute of
Bioscience and Biotechnology, Daejeon 305-806, Korea*

¹*Center for Water Resource Cycle Research, Korea Institute of Science and Technology,
Seoul 136-791, Korea*

²*Graduate School of Convergence Green Technology & Policy, Korea University,
Seoul 136-701, Korea*

Abstract - Cyanobacteria (blue-green algae) are not only the first oxygenic organisms on earth but also the foremost primary producers in aquatic environment. Massive growth of cyanobacteria, in eutrophic waters, usually changes the water colour to green and is called as algal (cyanobacterial) bloom or green tide. Cyanobacterial blooms are a result of high levels of primary production by certain species such as *Microcystis* sp., *Anabaena* sp., *Oscillatoria* sp., *Aphanizomenon* sp. and *Phormidium* sp. These cyanobacterial species can produce hepatotoxins or neurotoxins as well as malodorous compounds like geosmin and 2-methylisoborneol (MIB). In order to solve the nationwide problem of hazardous cyanobacterial blooms in Korea, the following technically and strategically sound approaches need to be developed. 1) As a long-term strategy, reduction of the nutrients such as phosphorus and nitrogen in our water bodies to below permitted levels. 2) As a short term strategy, field application of combination of already established bloom remediation techniques. 3) Development of emerging convergence technologies based on information and communication technology (ICT), environmental technology (ET) and biotechnology (BT). 4) Finally, strengthening education and creating awareness among students, public and industry for effective reduction of pollution discharge. Considering their ecological roles, a complete elimination of cyanobacteria is not desirable. Hence a holistic approach mentioned above in combination to addressing the issue from a social perspective with cooperation from public, government, industry, academic and research institutions is more pragmatic and desirable management strategy.

Key words : blue-green algae, control technology, cyanobacterial bloom, eutrophication, strategy

* Corresponding author: Hee-Mock Oh, Tel. 042-860-4321,
Fax. 042-879-8103, E-mail. heemock@kribb.re.kr

서 론

1. 녹조 (綠潮, green tide)

산업화에 따라 표면수의 수질은 생물학적인 부영양화와 독성물질에 의한 오염으로 악화되고 있다. 대청호 등 주요 호수들은 생태학적인 증상으로 보아 부영양화(eutrophication) 상태에 이른 것으로 판단된다. 부영양화는 영양염류의 유입이 증가하여 일어나는 현상으로서, 이들 증가로 조류(algae)는 급속히 성장하여 흔히 녹조(綠潮, green tide)로 불리는 수화(水華, algal bloom, water bloom)를 형성하게 된다. 즉, 녹조는 부영양화된 호소나 유속이 느린 하천에서 부유성의 조류가 대량 증식하여 물빛이 현저하게 녹색으로 변화되는 현상을 가리키는 말이다. 부영양화의 문제점은 수중 일차생산량의 증가뿐 아니라 일차생산자가 유독성의 특정 남조류(blue-green algae, cyanobacteria, 남세균)로 변하는데 있다.

조류의 번성은 영양염류 중 인이나 질소의 농도에 따라 결정되며, 대부분의 담수호에서 인이 더욱 중요하게 작용하는 것으로 알려져 있다(Schindler 1974, 1977; Schindler et al. 2008; Ahn et al. 2013). 더구나 대청호, 팔당호 등의 대형 인공호는 수심이 깊어 하절기에 성층(stratification)현상을 보이며, 이때 심층은 산소가 고갈됨에 따라 환원적 상태로 변하여 저니(sediment)에 쌓여 있던 침전상 인산염화합물의 용해도가 증가한다. 결과적으로 다량의 인이 용출되어 수중인의 농도를 높임으로서 조류발생을 촉진하게 되며, 일반적으로 부영양화된 호소에서는 대부분 *Microcystis* sp., *Anabaena* sp., *Oscillatoria* sp., *Aphanizomenon* sp., *Phormidium* sp.에 속하는 남조류가 우점하는 것으로 알려져 있다.

2. 남조류 (blue-green algae, cyanobacteria)

남조류는 약 35억 년 전에 지구상에 출현했다고 알려져 있다. 남조류가 장기간 퇴적하여 형성된 박편상 석회암 화석인 stromatolite가 이 시기의 지층에서 발견되었다. 일부 남조류는 혐기적인 환경에서도 생육이 가능하며, 혐기적 또는 호기적으로 질소고정을 할 수 있고, 물 또는 황화수소를 이용하여 광합성을 할 수 있으므로 지구상에서 처음으로 산소를 발생한 생물이라고 여겨진다. 남조류는 원시 지구환경에서 크게 번성하여 유기물과 산소를 축적시켰으며, 대기 중의 오존층이 형성되어 많은 생명체들이 해면과 육지로 진출하는데 크게 공헌한 것으로 판단된다.

우리나라 수계에서 가장 흔하게 문제를 일으키는 남조류인 *Microcystis* sp.의 경우 군체를 형성하고, 남조류 독소를 생산할 수 있으며, 기낭이 있어 일주성 수직이동 등의 특성을 갖는다(Oh et al. 1998; Oh et al. 1999; Oh et al. 2001; Codd et al. 2005). 또한 *Anabaena* sp.는 질소고정능이 있으며, geosmin, 2-methylisoborneol (MIB) 등의 취기 물질을 생성함으로써 수자원으로서의 가치를 하락시킨다. 특히 *Microcystis* sp. 등이 생산하는 독성물질인 microcystin은 물고기, 가축뿐만 아니라 인간에게도 해를 줄 수 있다. WHO(세계보건기구)는 음용수의 microcystin 허용기준을 $1 \mu\text{g L}^{-1}$ 이하로 규제하고 있다(Oh et al. 2000b; Srivastava 2013).

3. 녹조의 문제점

주로 남조류에 의한 녹조발생의 문제점은 다음과 같다(Oh et al. 2007). 1) 시각적 영향으로서 착색 또는 스킴 형성, 죽은 물고기 등으로 인한 시각적인 불쾌감 유발 및 레크리에이션 활동의 저해, 2) 공중위생상의 문제로 남조류 독소에 의한 인체 및 가축에의 건강상의 손상, 악취로 불쾌감 유발, 3) 생태학적인 영향으로서 생태계 파괴로 인한 토종 동물의 사멸 또는 서식처 이동, 개체군 변화, 먹이 손실, 4) 경제적인 손실로서 레크리에이션 활동 및 여행의 저해로 인한 지역 경제적 손실, 농업용수, 산업용수 부족으로 인한 경제적 손실, 5) 동물건강에 미치는 영향: 남조류 독소에 의한 가축이나 야생동물의 폐사, 대량 증식한 조류의 분해 동안 수중 용존산소 감소로 인한 물고기 및 수중생물의 폐사, 그리고 6) 상수원에 미치는 영향: 남조류 독소발생, 악취생성, 상수처리 과정 중의 여과지 폐쇄, 응집 침전 저해 등이 있다.

조류대발생은 정수장의 침전사를 막히게 할 뿐만 아니라 정수과정에서 활성탄 처리에 의한 막대한 비용지출의 경제적 부담이 있다. 실제로 1990년대 후반 호주에서 조류대발생에 의한 수자원관리 등의 비용 부담은 약 2000억 원으로 추정하고 있으며, 수산양식업 및 관광에 끼치는 손실은 더욱 큰 것으로 보고되었다(Atech Group 2000).

본 론

1. 국내외 녹조발생 현황

미국은 지난 1970, 80년대 호소 부영양화에 의한 수질 문제를 해결하기 위하여 조류의 생리·생태에 관한 집

중적인 연구 및 환경기초시설에 대한 대폭적인 투자 등을 통하여 남조류 수화를 성공적으로 해결한 바 있으며, 전 세계적으로 이 분야의 대표적 선진국이라 할 수 있다. 실제로 오대호로 유입되는 하·폐수의 방류수 인 농도를 1 mg L^{-1} 이하로 정하고 환경기초시설의 증설 등을 통하여 이를 엄격히 지키도록 유도한 결과 1990년대에 들어 만족할 만한 수질을 얻게 되었다. 이와 함께 다양한 수처리 기술 및 부영양화 방지기술들이 pilot 수준 또는 전체 호소수준에서 이루어지고 있으며 많은 평가 자료를 축적하여 적용성과 응용성을 증대시키고 있다. 미국을 포함하는 북아메리카 대륙의 호소는 대부분 자연적으로 만들어진 자연호사이므로 호소주변의 지형이 완만하고 자연적인 습지 형태를 많이 포함하여 인공습지(미국, EPA) 또는 자연습지(예: Everglades, 미국 플로리다)를 이용한 자연적인 정화방법을 적용하는 사례가 많다.

유럽 또한 녹조발생이 빈번한 지역이다. 영국은 남조류가 생산하는 독소가 다른 생물에 미치는 영향, 독소의 생분해 등의 연구를 Dundee 대학의 Codd 박사팀이 집중적으로 수행하고 있으며(Codd *et al.* 2005), 2002년 영국 환경청에서 “Blue-green Algae in Inland Waters: Assessment and Control of Risks to Public Health”를 발간하여

수질관리에 활용하고 있다(SEHP 2002). 또한, 인공습지 또는 습지에서 식생을 매개체로 이용하여 오염물질 및 중금속을 정화하는 사례(폴란드), 모래와 식생을 동시에 응용하는 sand-plant 시스템(스위스), 부착조류와 수생식물을 이용하는 기술(스웨덴), 인공연못 형태의 저류조를 이용하는 기술(노르웨이), 인공습지, 식생완충대(buffer-strip), 소규모의 하수를 처리하는 복합적(식생, 조류, 어류, 폭기 등) 기법을 응용하는 사례(스웨덴)들이 연구되고 있고, 이 중 많은 부분들이 실제 적용된 사례가 있다.

일본의 경우, 대표적으로 1,200만 인구의 식수원인 비와호(琵琶湖, Lake Biwa)는 1987년 이후 녹조발생으로 문제가 되고 있으며, 일본정부는 25년간의 장기 연구계획을 수립하여 호수의 수질개선을 위한 연구개발에 많은 투자를 하고 있다. 일본의 Watanabe 박사팀은 녹조발생 남조류의 분자적 분류체계 확립, 독소 생산의 생리·생태적 특성 규명 등의 연구를 활발히 수행하고 있다(Tanabe *et al.* 2009). 또 다른 방법론적 접근은 생태학적인 이론과 원칙을 바탕으로 자연생태계의 기능과 특성(즉, 물질의 재순환, 피드백 조절, 항상성 개념 등)을 기초로 하여, 생태학, 환경공학, 토목공학 등이 접목된 생태공학적인 기술들도 개발·적용하고 있다. 하천의 자연정화공법을 이용한 정화기술의 적용은 일본에서 많이 시행되고

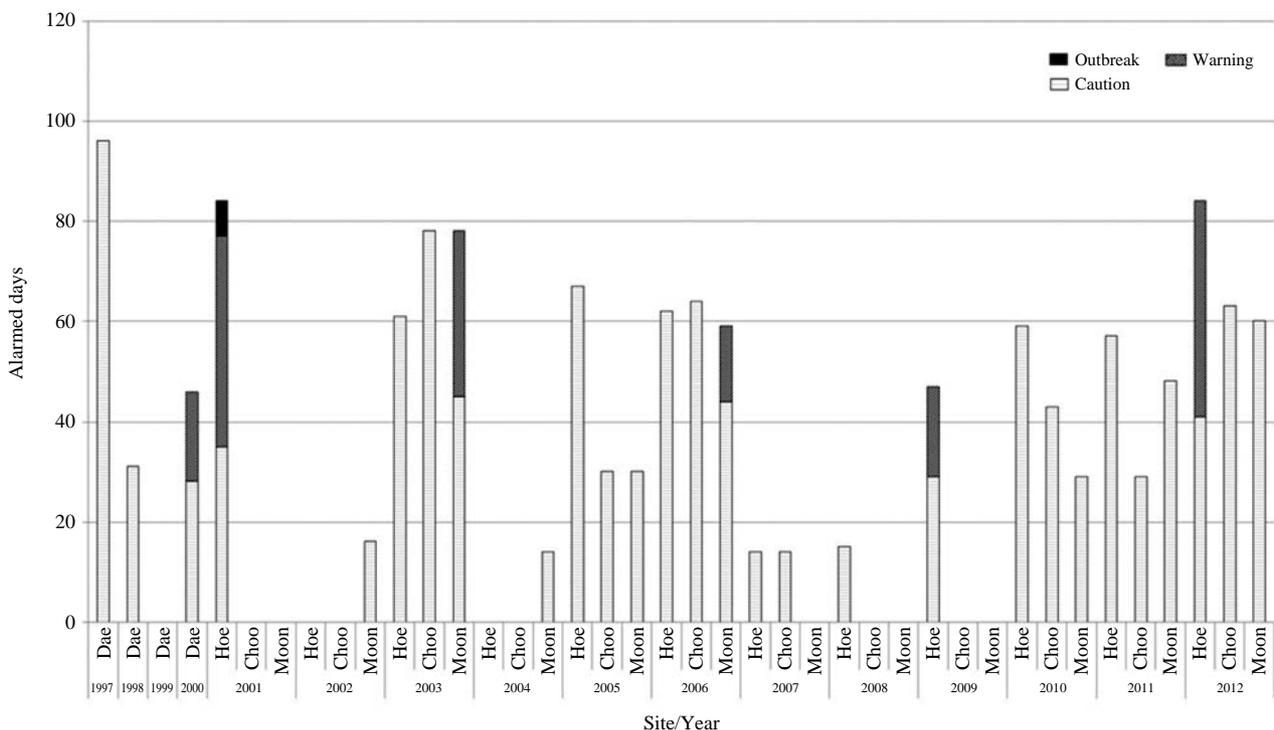


Fig. 1. Alarmed days according to the Alarm System for Algal Bloom at 3 sites in Daechung Reservoir during a period of year 1997~2012. Abbreviations are as follows: Dae, Daechung Reservoir; Hoe, Hoenam; Choo, Choodong; Moon, Moonue.

Table 1. Summary of various techniques for the control and mitigation of algal bloom (Holdren *et al.* 2001)

Category	Technique	Descriptive notes
Physical techniques	Aeration or oxygen addition	Mechanical maintenance of oxygen level
	Artificial or augmented circulation	Water movement to enhance mixing and/or prevent stratification
	Bottom sealing	Physical obstruction of rooted plant growths and/or sediment-water interaction
	Dilution and/or flushing	Increased flow to dilute or minimize retention of undesirable materials
	Dredging	Removal of sediments under wet or dry conditions
	Hydroraking or rotoavation	Disturbance of sediments, often with removal of rooted plants, to disrupt growth
	Harvesting, pulling, or cutting	Reduction of plant growths by mechanical means, with or without removal from the lake
Chemical techniques	Partitioning for pollutant capture	Creation of in-lake areas, such as forebays and created wetlands, to capture incoming pollutants
	Selective withdrawal	Removal of targeted waters for discharge or intake
	Water level control	Drying or flooding of target areas to aid or eliminate target species
	Biocidal chemical treatment	Addition of inhibitory substances intended to eliminate target species
	Chemical sediment treatment	Addition of compounds that alter sediment features to limit plant growths or control chemical exchange reactions
Biological techniques	Dye addition	Introduction of suspended pigments to create light inhibition of plant growth
	Nutrient inactivation	Chemical complexing and usually precipitation of nutrients, normally phosphorus
	Nutrient supplementation	Addition of nutrients to enhance productivity or alter nutrient ratios to affect algal composition
Others	Other chemical treatments	Addition of chemicals to adjust pH, oxidize compounds, flocculate and settle solids, or affect chemical habitat features
	Biomanipulation	Facilitation of biological interactions to alter ecosystem processes
Others	Rules and regulations	Restrictions on human actions directed at minimizing impacts on lakes and lake users

있으며, 특히 다양한 공법의 자연형 하천정화기술들(역간산화접촉법, 자연형 호안 정비, 미생물 부착여재의 이용 등)이 적용되고 있다.

우리나라는 호소의 부영양화에 의한 수질오염이 전국적으로 크게 문제되고 있으며, 환경부는 1996년 대청호에서의 시범실시를 시작으로 1997년부터 본격적으로 조류예보제를 시행해 오고 있다. 이러한 문제는 급속한 산업화와 인구증가 및 생활수준의 향상에 따른 축산폐수, 농경유출수, 생활하수, 공장폐수 등의 증가로 유기·무기 영양염류의 과다 유입에 따른 조류나 수중식물의 급속한 성장으로 일어나게 된다. 그러나 수중식물의 분포는 수심이 낮은 곳에 한정되므로 수심이 깊은 호수나 저수지에서는 주로 미세조류의 증식이 문제의 초점이 되고 있다. 국내의 녹조발생에 따른 문제점은 이취미 (taste and odor), 정수처리 장애 등과 같이 상수원에 대한 문제들로 국한되고 있으며, 독소에 대한 피해 사례는 전무한 상태이다. 조류경보제가 본격적으로 시행된 대청호에서 1997년 처음으로 조류주의보가 발령된 이후로 발령일수는 2011년까지 다소 감소하는 추세에 있었으나, 2012년에는 다소 증가하는 경향을 보였다(Fig. 1).

지구온난화에 의하여 앞으로도 계속 대기 중 이산화탄소 농도 증가, 수온 상승이 예상되는 바 향후 녹조발생은 더욱 심해질 것으로 전망된다. 실제로 미국 오대호 중 하나인 Lake Erie는 1970년대 적절한 수질관리로 녹조가 자취를 감추었으나, 2011년 다시 녹조가 출현하였고, 이는 농경유출수, 수온 상승 등의 기상요소가 주요 원인으로 밝혀진 바 있다(Michalak *et al.* 2013). 또한 전 세계적으로 급속한 산업화가 진행 중인 나라들을 중심으로 호소나 강의 부영양화는 여전히 주요한 환경문제로 남아 있다.

2. 녹조 제어기술

부영양화 호소에서 녹조발생을 억제하기 위하여 흔히 사용될 수 있는 방법은 물리적, 화학적, 생물학적 그리고 이들의 복합적 사용에 의한 기술로 크게 구분된다(Tables 1, 2). 국내외에서 개발 소개된 기술이 종합적으로 보고된 바 있으며(Cooke *et al.* 1993; Holdren *et al.* 2001; Oh *et al.* 2007; KEC 2012), 이들의 기술적 특성, 장·단기적 효과, 생태계에 미치는 효과 등은 다음과 같다.

Table 2. Summary of various techniques for the control and mitigation of algal bloom conducted in Korea (KEC 2012)

Category	Technique	Developer
Physical techniques	Sola water circulation system	Ecoco
	Contactless plasma system	Jarwon Electronics
	Ultrasonic algae control system	Rapsys
	Integrated submersible pressure flotation technique	GeoMarine
	Portable pressure flotation device	Shingang Hi-Tech
	S-DAF flotation separation	KED
	Multistage pressure filter waster purifying system	Eson E&L, K-1 EcoTech
	Ultrasonic algae control system	KRIBB
	Red clay spraying ship	Sangseung Global
Chemical techniques	Natural inorganic coagulant complex method	GCM Korea
	Ozone micro-bubble method	Ox Engineering
	Chlorine dioxide processing	Chemopia
Biological techniques	Predatory natural enemy utilization technique	Rural Research Institute (RRI)
	Algicidal Medi-Tide	Hanyang University
	Complex microbial agent application	Kunnong
Others	Natural algicidal agent application technique	MCE Korea
	Combined system with underwater coagulation-flotation and plant island	Earth-En, Eco-Top
	Water quality decontaminant and annular flow system	Daekyung Aqua Service
	Algae monitoring system package	BL process
	Algal concentration measuring system	JMENB

1) 물리적 제어

(1) 심층 폭기

심층 폭기 (hypolimnetic aeration)는 수온약층 (thermocline) 아래에 위치한 혐기적 상태의 심층에 공기를 불어 넣는 방법이다. 산소가 많아지면 저니 (sediment)로부터 인의 용출이 감소하고, 철과 망간과 같은 환원물질의 양도 감소하게 된다. 실제로 수중폭기의 이용은 대청호, 달방댐 등에서 수행되거나 수행 중에 있다. 미국 캘리포니아 주의 Casitas호, 독일 Krupunder호 등에서 사용되었으나 시설 및 유지비용의 문제로 대규모로 시설하기에는 어려움이 있는 것으로 알려져 있다.

(2) 저질토 도포

저질토는 많은 영양염류를 함유하고 있기 때문에 저질토를 합성수지, 토양 등으로 호수 바닥을 도포하여 저질토에서 나오는 영양물질을 차단하는 방법이다. 저서생물에 영향을 주고 비용이 많이 들며 저질토에서 발생하는 가스를 처리해야하는 등의 단점이 있다.

(3) 저질토의 준설

저질토 준설 (dredging)의 경우, 물보다 10,000~1,000,000배의 인이 녹아 있는 저니를 준설하여 인을 제거하는 방법이다. 저니에 다량의 영양염류가 농축되어 있는 경우에 효과적이다. 스웨덴 Trummen호, 체코 등에서 성공사례가

보고된 바 있으나, 처리비용이 많이 들고, 수중 생물상에 미치는 영향, 준설된 저니의 처리 등이 문제점으로 지적되고 있다. 그 밖에 저질의 안정화(독일), 회석 (Moses호, 미국 워싱턴), lake flushing (미국, 네덜란드) 등의 기술이 적용된 사례가 있다.

(4) 외부의 수류를 이용한 물 교환을 향상

영양염류의 농도가 낮은 물을 호소로 끌어 들여, 교환율을 높이고 체류시간을 짧게 하여 생물체가 호소 내에서 생성되고, 축적되는 것을 막는다. 그러나 이 방법은 많은 양의 물을 필요로 하는 단점이 있다.

(5) 영양염류 농도가 높은 심층수의 방류

영양염류의 농도가 높은 심층수를 방출하면 영양염류의 체류시간을 짧게 하는 효과가 있다. 이 방법은 수심이 깊은 호소에서 매우 효과적이다 (Lee *et al.* 2010).

(6) 초음파 처리

초음파 처리 기술은 남조류의 미세소기관인 기낭 (gas vesicle)을 파괴하여 부력 조절능력을 상실케 함으로써, 호수 바닥에 가라앉게 하여, 빛을 이용한 광합성을 원천적으로 차단함으로써 결과적으로 남조류의 성장을 억제하는 기술이다 (Ahn *et al.* 2003). 또한 초음파는 기낭 파괴뿐만 아니라 남조류의 세포분열을 억제하는 효과도 있었다. 따라서 수심이 깊지 않고 투명도가 높아, 광합성

차단 효과를 크게 기대하기 어려운 호소에서도 초음파에 의한 남조류의 제어는 충분히 가능하다. 이 기술은 녹조가 발생하기 이전에 사전예방 조치로서 매우 효과적인 방법이나, 일부 호소에서는 단일 기술에 의한 효과가 뚜렷하지 않은 경우도 있기 때문에, 남조류의 생장을 억제하거나 사멸능력이 있는 규산질다공체, 세라믹, 미생물 소재, 식물추출물을 복합적으로 이용하여 담수에서 녹조발생을 억제시킬 수 있다.

(7) 녹조제거선 활용

남조류를 여과 제거할 수 있는 미세체를 장착한 녹조제거선을 활용하여 수표면에 형성된 남조류 덩어리를 제거할 수 있다. 녹조제거선은 5개의 흡입, 집수, 여과, 회수 및 초음파 장치와 2개의 선박 본체 및 부속장치로 구성되어 수심이 얇은 곳(1 m)까지 접근할 수 있어 효과적으로 수표면에 떠 있는 조류를 제거할 수 있는 장점이 있다(Shin 2009).

(8) 가압부상법

가압부상법은 10~50 μm 의 미세기포를 응집제와 함께 수체내 가압, 분사시켜 유기물의 화학적 침전 및 부상과 유기물 산화 및 살균효과를 동시에 유도하여 수계에서 조류와 영양염류를 제거하는 기술로 대청호와 팔당호에 적용된 사례가 있다(KWRC 2008).

(9) 차광막 설치

만입된 지역 등에서 차광막을 설치하여 조류의 광합성 기작에 필요한 빛을 차단함으로써 조류의 증식을 억제하는 방법이다. 소규모 호소나 제한된 지역에만 적용 가능한 단점이 있다.

(10) 연속 원심분리

원심력의 작용으로 수계의 조류를 분리, 정제, 농축하는 장치로 필터나 부품의 교환 없이 연속적인 사용이 가능하나, 처리용량이 적어 실용성과 경제성이 부족한 단점이 있다.

2) 화학적 제어

(1) 살조물질 이용

살조제(algicide)로서 흔히 사용되는 것은 황산구리(CuSO_4 , $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)로서 구리는 조류의 광합성을 억제하고 질소대사를 변화시키는 작용이 있는 것으로 알려져 있다. 황산구리는 일시적으로 조류제거에 효과가 있으나 반복적인 사용에 의하여 장기적으로는 어류에 독성을 보이고 용존산소를 고갈시키는 부정적 결과를 초래할 수 있다. 조류제거를 위하여 흔히 사용되는 살조제

인 CuSO_4 는 과량 사용시 수중 생물에 미치는 악영향으로 인하여 엄격한 관리 하에 사용되어야 한다(1~2 mg $\text{CuSO}_4 \text{ L}^{-1}$ 이하).

(2) 인의 불활성화

인의 불활성화는 aluminum sulfate ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$) 등을 가하여 수주(水柱, water column)의 인을 침전시키고, 저니의 인을 불활성화 하는 것으로 조류의 발생을 억제하는 효과가 매우 크다. 특히, 성층을 형성하는 수심이 깊은 호수에서 지속적인 효과가 나타나는 것으로 알려져 있다. 미국 오하이오 주의 Twin Lakes와 독일, 네덜란드 등에서 적용된 바 있으나, pH 6 이하의 조건에서 다량 존재하는 $\text{Al}(\text{OH})_2$ 나 Al^{3+} 는 수중 생물에 독성이 있을 수 있다.

(3) 인의 흡착

규산질다공체는 인을 흡착하는 성질이 있어, 부영양화의 주범이며 미세조류의 생장에 가장 중요한 영양인자로 작용하는 인의 농도를 감소시키는 역할을 한다. 실제로 세라믹소재는 미세조류 중에서도 남조류에 대한 선택적 제어효과를 보였다(Oh *et al.* 2000a).

3) 생물학적 조류제어

(1) 천적 생물이용

생태계 내에는 녹조 원인생물인 식물플랑크톤의 자연적인 포식자가 공존하고 있으므로, 이들을 선택적으로 증가시키면 녹조의 초기 성장을 억제할 수 있다. 천적 생물의 이용법은 이러한 조류의 먹이연쇄와 경쟁 특성을 이용해 조류를 제어하는 방법이다. 동물플랑크톤의 섭식효과를 이용한 방법(Nam *et al.* 2011), 담수에 서식하는 조개(참재첩)의 식물플랑크톤 섭식효과를 이용한 방법(Hwang *et al.* 2004) 등이 있다. 그러나 새로운 종을 이식할 때에는 수생태계가 외래종 도입에 의해 받는 잠재적인 영향에 대하여 사전에 충분한 검토가 있어야 한다.

(2) 살조생물 이용

생물을 이용한 방법으로는 어류조절을 통한 조류제어(독일, 캐나다, 미국, 네덜란드)와 수생식물의 제거를 통한 유기물오염원 제어(미국, 스웨덴, 네덜란드)는 시행된 사례가 많으며, 최근에 들어와 수생식물과 조류의 경쟁을 이용한 조류제어 방법에 대한 연구가 진행되고 있으며, 자연시스템의 일부를 직접 이용한다는 측면에서 기대효과가 매우 크다. 특히, Milligan and Cosper (1994)는 연안의 "brown tide" 유발 조류로 알려진 *Aureococcus anophagefferens*에 특이적으로 반응하는 바이러스를 분

리함으로서 생물살조제 (bioalgaicide)를 이용한 생물학적 조류제어의 가능성을 보였다. 국내에서 개발된 남조류 제어 생물제제 (Kim *et al.* 2004; Kim *et al.* 2005; Kim *et al.* 2007) 등이 있다.

(3) 미생물 생장조절물질 이용

박테리아의 군집연구로부터 시작되어 최근 미생물생태학 분야에서 주목되고 있는 quorum sensing (QS, 정족수 인식현상)은 세포의 개체수를 인식하여 일정수준 이상이 되면 inducer (유도물질)를 세포외부로 방출하여 세포의 특정 유전자 발현을 촉진하여 세포증식을 유도하는 현상으로 자연계에서 생물막 (biofilm), 녹조 (cyanobacterial bloom) 등에서 볼 수 있다 (Bachofen and Schenk 1998).

QS에 의한 생물의 대량 증식에 대하여 주로 단세포생물의 세균을 대상으로 많이 연구되고 있으나, 호소 부영양화에 관련되어 남세균의 대량발생 기작에 대한 QS계 연구 등 분자생물학적 연구는 극소수 그룹에 의해 수행되고 있다. 현재까지 남세균 및 조류의 quorum sensing계에 대한 연구는 몇 건의 연구 결과 (*Chlamydomonas reinhardtii* & *Gloeothece* PCC 6909) 이외에는 극히 미흡한 실정이다. 따라서 수중생태계에서 biofilm의 형성, 녹조발생 등 미생물의 집단적 증식을 효율적으로 억제하기 위해서는 생물상호간 신호전달 체계를 구명하고, 분자수준에서 QS의 활동 방해, QS의 저해인자 투여 등 유전체학과 생태학의 복합체라 할 수 있는 ecogenomics (생태유전체학)에 기초한 새로운 개념의 환경정화 및 생태계 복원 기술개발이 필요하다.

(4) 생분해성 제제

녹조발생 억제물질로 알려진 lysine은 $50 \mu\text{g L}^{-1}$ 농도로 처리할 경우 효과가 있다고 보고되었으나 (Takamura *et al.* 2004), 분자수준에서 작용하는 QS 저해인자 (inhibitor)는 약 10 ng L^{-1} 의 극히 낮은 농도에서도 효과를 나타낸다.

(5) 식물 이용

식물 (예: 미나리, 개구리밥, 부레옥잠, 줄, 부들, 갈대 등)을 이용하여 수질을 개선하는 연구가 상당히 많이 진척되었으며 이를 적용한 중소규모의 사례도 여러 곳이 있다 (예: 팔당호). 호소 내 인공 식물섬 (예: 팔당호, 경포호, 파로호 등에서의 시행)이 적용된 사례가 있으며, 이들의 경관향상 및 호소 내 생물들의 피난, 은신처를 제공하고 있는 역할이 주목받고 있다. 또한 해캄류 (*Zygnematales*)는 질산성 염류와 인산성 염류 농도가 높은 작은 도랑 등에서 많이 서식하고 있는 분류군으로 활성도가 높기 때문에 염류 흡수력이 뛰어난 것으로 확인되고 있다.

4) 기타

황토 살포 (예: 팔당호, 대청호), 조류 펜스의 이용 (예: 서낙동강), 전자선 조사 (Kang *et al.* 2003) 등의 녹조제어 기술이 있다. 황토 살포는 황토의 콜로이드 입자가 수표면의 녹조와 함께 영양물질인 인과 질소를 흡착하고 강과 호수 바닥으로 가라앉는 성질을 이용한다. 그러나 황토에는 중금속도 포함한 경우가 있어 이들이 하천에 유입되면 정수과정을 통해 제거하기 어려워지는 단점이 있어 황토 살포에 관련된 관련연구와 유해성분 규정강화가 필요하다. 조류 펜스의 경우, 조류 저감효과가 지속적으로 유지되기 위해서는 효과적인 기계의 설치와 주기적인 역세척과 같은 유지관리가 필요하고, 또한 조류 번성시기를 예측하여 조류펜스가 효율적으로 활용되어야 한다 (Joo *et al.* 2003).

3. 녹조제어의 전략적 접근

남조류는 지구상에서 오랜 진화의 과정을 거치고, 수중생태계에서 1차 생산자의 중요한 역할을 수행한다. 녹조의 문제는 남조류를 포함한 조류 즉, 1차 생산자의 양이 너무 많고, 특정 남조류가 우점한다는 데 있다. 따라서 특정 남조류의 분포를 줄이기 위해서는 이들의 생리, 생태적 특성을 고려한 저감 방안이 도출, 적용되어야 한다. 또한 녹조제어의 다양한 기술은 현장 적용 시 녹조제어 효과 (effectiveness), 생태 위해성 (ecological risk), 논리적 실현 가능성 (feasibility), 경제성 (economic cost), 대중의 인식 (public perception) 등을 종합적으로 고려하여 평가되어야 한다.

1) 장단기적 대책 병행 추진

호소 부영양화 방지를 위해서 무엇보다 중요하며 기본적인 것은 부영양화의 원인이 되는 영양염류 중 특히 인과 질소의 유입을 제한하는 것이다. 즉, 호소의 자정능력에 의해 수질을 양호한 상태로 유지할 수 있는 영양염류의 유입 허용량을 정하고, 이를 실천하기 위해서는 필요한 하수처리장의 증설과 처리 수준을 설정하여 준수하도록 하는 것이 필요하다 (호소 외적 대책). 그러나 이의 실천을 위해서는 장기간의 시일과 막대한 재정적 지원이 필요할 뿐만 아니라, 이러한 방법에 의하여 크고 작은 모든 호소를 관리할 수는 없으므로 단기적이며 국지적인 호소 부영양화 방지대책의 병행이 필요하다. 더욱이 우리나라의 경우 호소 부영양화 문제의 심각함과 긴급성에 비추어 단기적인 수질개선책의 수립과 실천이 절실히 요구되고 있다 (호소 내적 대책).

조류는 수중생태계의 1차생산자로서 생태적으로 중요

한 위치를 점하고 있으나, 하절기에 일부 남조류의 대량 번성에 의한 수화가 문제되고 있다. 따라서 생태계의 먹이연쇄 및 남조류의 생리·생태적 특성을 고려한 환경친화적인 남조류의 선택적 제거기술 개발이 필요하다. 수화발생 조류인 남조류는 체내에 이취미 물질 및 독소를 함유한 경우가 많으므로 대량 발생한 남조류를 사멸시키는 것은 유독물질의 방출에 의한 수질 악화의 가능성이 크다. 따라서 조류대발생을 억제하는 사전예방기술의 개발이 바람직하다.

2) 모니터링 기반 상황별 최적기술의 선별 적용

조류발생을 사전에 예측할 수 있는 예측모델 및 모니터링 기술이 많이 개발되고 있다(Ahn *et al.* 2011; Joung *et al.* 2011; Srivastava *et al.* 2013). 따라서 이들 모니터링을 바탕으로 수계의 상황에 맞게 시기별로 적절한 조류제어 기술을 선별하여 적용하는 것이 효과적이다. 일례로, 대청호에서 2006년에 조사된 녹조발생 현황(Fig. 2)에서 보는 바와 같이 녹조가 발생하기 이전이 6월경에는 호소내외의 과량 존재하는 인 제거가 중요하다. 녹조발생이 시작되는 7월경에는 녹조 증식을 억제할 수 있는 초음파 처리기술, 천적생물 이용 기술 등이 적용될 수 있다. 녹조가 대량으로 증식한 상태에서는 독소나 이취미 물질의 유출을 방지하기 위하여 가능한 세포를 파괴하지 않은 상태에서 녹조를 수거하여 수계 밖으로 제거하는 것이 효과적이다. 전반적으로 남조류 발생이 예상되는 시기에는 남조류 독소 및 이취미 물질에 대한 조사를 강화하여 수질안전성 확보 여부를 판단하는 것이 중요하다.

3) 복합적 녹조 제거기술 활용

구미 환경선진국에서 부영양 호소의 수질관리를 위해서 다양한 기술개발이 이루어졌고(Table 1), 국내에서도 녹조제어의 다양한 기술이 개발 소개된 바 있다(Table 2). 그러나 호소별 수리·수문학적 특성에 따라 적용기술에 차이가 있으며, 단일기술로는 녹조제어 효과에 한계가 있다. 따라서 조류제어의 효율성을 높이기 위해서는 호소의 특성에 따른 적용기술의 차별화 및 기술의 복합적 적용이 필요하다. 또한, 대부분의 부영양 호소는 상수원 또는 농·공·생활용수로 이용되므로 조류제어제 사용시 수중생태계에 미치는 영향 및 환경 안전성 평가가 필수적으로 병행되어야 한다.

4) 민관산학연 협력 및 국민운동 추진

환경오염은 인구증가, 산업화 등에 따른 오염물질의 배출 증가에 의한 것이므로, 학생, 일반 국민, 산업체 등을 대상으로 교육 및 홍보를 강화하여 환경개선의 효과

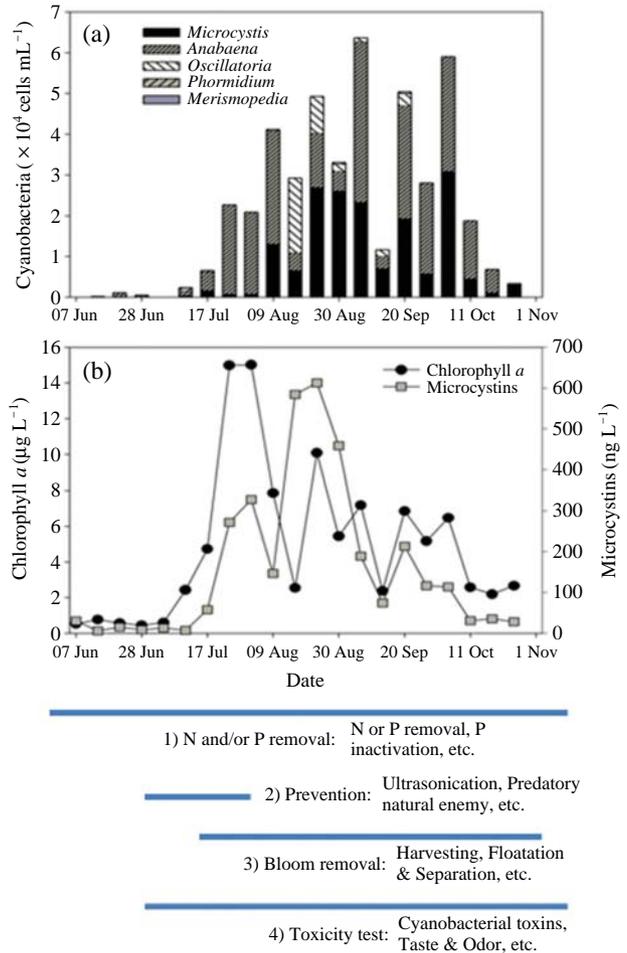


Fig. 2. A time-specific strategy to control cyanobacterial bloom. Figures show the variation of cyanobacterial genera (a) and concentrations of chlorophyll a and microcystins (b) in Daechung Reservoir from June to October, 2006.

를 높여야 한다. 일례로 우리나라는 과거 환경부에서 기획한 쓰레기분리수거 제도에 따라서 국민의 적극적 협조에 의해 가정에서 분리되는 쓰레기의 분리 및 수거에 의하여 환경을 개선하고, 자원 재활용의 성공적 경험을 갖고 있다.

결 론

녹조는 부영양화된 호소나 유속이 느린 하천에서 부유성의 조류가 대량 증식하여 물빛이 현저하게 녹색으로 변화되는 현상을 가리키는 말이다. 부영양화의 문제점은 수중 일차생산량의 증가뿐 아니라 일차생산자가 유독성의 특정 남조류로 변하는데 있다. 부영양화된 호소에서는 대부분 *Microcystis* sp., *Anabaena* sp., *Oscillatoria* sp.,

Aphanizomenon sp., *Phormidium* sp.에 속하는 남조류가 우점하는 것으로 알려져 있다. 일부 남조류는 수표면에 군집 형태로 생존하며 geosmin, 2-methylisoborneol (MIB) 등의 취기 물질을 생성함으로써 수자원으로서의 가치를 하락시킨다. 특히 대표적인 남조류로서 *Microcystis* sp.는 독성물질인 microcystin을 배출함으로써 물고기, 가축뿐만 아니라 인간에게도 악영향을 미친다.

우리나라에서 하절기에 반복적으로 나타나는 녹조문제를 해결하기 위해서는 녹조관리를 위한 종합적 연계, 조정 기능을 갖고 다음과 같은 업무를 수행할 수 있는 상시적 전담조직이 필요하다. 첫째, 녹조의 근본적 해결을 위해서는 장기적으로 질소, 인 등 영양염류의 유입을 줄여야 하며, 이에 대한 관리 및 통제 기능이 있어야 한다. 둘째, 단기적 대책으로서 기 개발된 녹조제어기술의 현장 적용 및 상용화를 추진하고, 녹조제어를 위해서는 필요시 댐이나 보의 방류 권한도 있어야 한다. 셋째, 우리나라의 선진 ICT (정보통신기술), 환경기술 (ET), 조류학 등 생명공학기술 (BT) 등을 결합한 융·복합 기술개발의 장을 마련하여야 한다. 넷째, 환경오염은 인구증가, 산업화 등에 따른 오염물질의 배출 증가에 의한 것이므로, 학생, 일반 국민, 산업체 등을 대상으로 교육 및 홍보를 강화하여 환경개선의 효과를 높여야 한다.

끝으로 녹조를 일으키는 주요 조류종인 남조류는 지구상에서 가장 오랜 세월동안 진화를 거친 생물이므로 척결의 대상이라기보다 수계에 상존하는 광합성 생물이므로, 우리에게 해를 주지 않을 정도의 효율적 수질관리 목표가 현실적이고 경제적 부담도 적을 것이다. 따라서 녹조관련 다양한 과학적 연구결과를 바탕으로 조직적으로, 체계적으로 대책을 마련하고, 민·관·산·학·연이 협력하여 실천을 위해 노력한다면 보다 효과적인 녹조관리가 가능할 것이다.

사 사

본 연구는 KIST 주요사업 ORP (과제번호 2E24280) 한국연구재단 특화전문대학원 연계 학연협력 지원사업, 그리고 환경부 Eco-STAR project (수생태복원사업단)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

Ahn C-Y, H-M Oh and Y-S Park. 2011. Evaluation of environmental factors on cyanobacterial bloom in eutrophic reser-

- voir using artificial neural networks. *J. Phycol.* 47:495-504.
- Ahn C-Y, J-Y Lee and H-M Oh. 2013. Control of microalgal growth and competition by N:P ratio manipulation. *Korean J. Environ. Biol.* 31:61-68.
- 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.
- Atech Group. 2000. Cost of algal blooms, Occasional paper series No. 26/99. Land & Water Resources Research and Development Corporation. Panther Publishing and Printing, Australia.
- Bachofen R and A Schenk. 1998. Quorum sensing autoinducer: Do they play a role in a natural microbial habitats. *Microbiol. Res.* 153:1-3.
- Codd GA, LF Morrison and JS Metcalf. 2005. Cyanobacterial toxins: risk management for health protection. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 203:264-272.
- Cooke GD, EB Welch, SA Peterson and PR Newroth. 1993. Restoration and Management of Lakes and Reservoirs, 2nd ed. Lewis Publishers, Boca Raton.
- Holdren C, W Jones and J Taggart. 2001. Managing Lakes and Reservoirs. North American Lake Management Society and Terrene Institute in coop. with Off. Water Assess. Watershed Proc. Div. U.S. Environ. Prot. Agency, Madison, WI.
- Hwang S-J, H-S Kim, J-K Shin and J-M Oh. 2004. Grazing effects of a freshwater bivalve (*Corbicula leana* Prime) and large zooplankton on phytoplankton communities in two Korean lakes. *Hydrobiologia* 515:161-179.
- Joo G-J, M-H Jang, S-B Park, J-M Jung, J-S Roh and K-S Jeong. 2003. The application of an algal fence for the reduction of algal intake into the water intake facility. *Korean J. Limnol.* 36:467-472.
- Joung S-H, H-M Oh, S-R Ko and C-Y Ahn. 2011. Correlation between environmental factors and toxic and non-toxic *Microcystis* dynamics during a bloom in Daechung Reservoir, Korea. *Harmful Algae* 10:188-193.
- Kang H, E-K Na, K-S Shin and J-H Jang. 2003. Feasibility test for control of algae by electron beam irradiation in eutrophic lake and coastal water. *J. Korean. Soc. Environ. Eng.* 25: 1368-1374.
- Kim B, S Hwang, Y Kim, S Hwang, N Takamura and M Han. 2007. Effects of biological control agents on nuisance cyanobacterial and diatom blooms in freshwater systems. *Microbes Environ.* 22:52-58.
- Kim B-H, H-J Choi and M-S Han. 2004. Potential in the application for biological control of harmful algal bloom cause by *Microcystis aeruginosa*. *Korean J. Limnol.* 37:64-69.
- Kim B-H, Y-H Kang, H-J Choi, S-K Ka and M-S Han. 2005.

- Antialgal interactions of biological control agents on cyanobacterium and diatom blooms in vitro. *Korean J. Limnol.* 38:494-502.
- Korea Environment Corporation (KEC). 2012. Proceedings of the Conference for Algae Removal Technology. KEC, Seoul.
- Korea Water Resources Corporation (KWRC). 2008. An Investigation on the Occurrence Mechanism and Reduction Technology of the Blue-green Algal Bloom in the Stream to Reservoir Systems. KWRC. KWE-WERC-08-03.
- Lee HS, SW Chung, HY Jeong and BH Min. 2010. Analysis the effects of curtain weir on the control of algal bloom according to installation location in Daechung reservoir. *J. Korean Soc. Water Qual.* 26:231-242.
- Lim B-J, S-H Kim and S-O Jun. 2002. Application of various plants as an inhibitor of algal growth: Studies in barge enclosure and artificially eutrophicated pond. *Korean J. Limnol.* 35:123-132.
- Michalak AM, EJ Anderson, D Beletsky, S Boland, NS Bosch, TB Bridgeman, JD Chaffin, K Cho, R Confesor, I Daloglu, JV Depinto, MA Evans, GL Fahnenstiel, L He, JC Ho, L Jenkins, TH Johengen, KC Kuo, E Laporte, X Liu, MR McWilliams, MR Moore, DJ Posselt, RP Richards, D Scavia, AL Steiner, E Verhamme, DM Wright, MA Zagorski. 2013. Record-setting algal bloom in Lake Erie caused by agricultural and meteorological trends consistent with expected future conditions. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 110:6243-6244.
- Milligan KLD and EM Cospser. 1994. Isolation of virus capable of lysing the brown tide microalga, *Aureococcus anophagefferens*. *Science* 266:805-807.
- Nam G-S, Y-H Song, E-H Lee, Y-S Bae and D-B Hong. 2011. Development of a predatory natural enemy technology for the prevention of algae bloom. *Mag. Korea Wat. Resour. Assoc.* 44:49-56.
- Oh H-M, SG Lee, J-H Park and J Maeng. 1998. Vertical distribution and phosphorus component of cyanobacteria at the end of stratification in Daechung reservoir. *Korean J. Limnol.* 31:54-61.
- Oh H-M, SJ Lee, B-D Yoon, WJ Lee, S-K Lee and L Choi. 2000a. Control of microalgae using a porous silicate material, CellCaSi. *Korean J. Limnol.* 33:145-151.
- Oh H-M, SJ Lee, J-H Kim, H-S Kim and B-D Yoon. 2001. Seasonal variation and indirect monitoring of microcystin concentration in Daechung Reservoir, Korea. *Appl. Environ. Microbiol.* 67:1484-1489.
- Oh H-M, SJ Lee, M-H Jang and B-D Yoon. 2000b. Microcystin production of *Microcystis aeruginosa* in P-limited chemostat. *Appl. Environ. Microbiol.* 66:176-179.
- Oh H-M, S-R Ko, B-B Kim, C-J Kim, C-Y Ahn, C Yoo, S-H Joung and G-G Choi. 2007. Practical Guidance Manual for the Control of Cyanobacterial Bloom. Environmental Biotechnology Research Center, Korea Research Institute of Bioscience and Biotechnology (KRIBB), Daejeon.
- Oh H-M, Y-H Ban, D-K Park, J-W Lee and J Maeng. 1999. Production of odorous components by cyanobacteria in Daechung reservoir. *Korean J. Limnol.* 32:181-188.
- Schindler DW. 1974. Eutrophication and recovery in experimental lakes: Implications for lake management. *Science* 184:897-899.
- Schindler DW. 1977. Evolution of phosphorus limitation in lakes. *Science* 195:260-262.
- Schindler DW, RE Hecky, DL Findlay, MP Stainton, BR Parker, MJ Paterson, KG Beaty, M Lyng and SEM Kasian. 2008. Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: Results of a 37-year whole-ecosystem experiment. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 105:11254-11258.
- SEHP (Scottish Executive Health Department). 2002. Blue-Green Algae in Inland Waters: Assessment and Control of Risks to Public Health. The Stationery Office Bookshop, Edinburgh.
- Shin J-K. 2009. Development of low-carbon green growth technology for water quality management: Algae harvesting ship. *K-Water techzine.* Korea Water Resour. Co. 3:90-101.
- Srivastava A, S Singh, C-Y Ahn, H-M Oh and R Asthana. 2013. Monitoring approaches for a toxic cyanobacterial bloom. *Environ. Sci. Technol.* 47:8999-9013.
- Takamura Y, T Yamada, A Kimoto, N Kanehama, T Tanaka, S Nakadaira and O Yagi. 2004. Growth inhibition of *Microcystis* cyanobacteria by L-lysine and disappearance of natural *Microcystis* blooms with spraying. *Microbes Environ.* 19:31-39.
- Tanabe Y, F Kasai and MM Watanabe. 2009. Fine-scale spatial and temporal genetic differentiation of water bloom-forming cyanobacterium *Microcystis aeruginosa*: Revealed by multi-locus sequence typing. *Environ. Microbiol. Rep.* 1:575-582.

Received: 5 November 2013

Revised: 14 November 2013

Revision accepted: 20 November 2013