

<Review paper>

유해 남조류의 세계적 발생현황 및 녹조제어를 위한 질소와 인-제한 전략

안치용 · 이창수 · 최재우¹ · 이상협¹ · 오희목*

한국생명공학연구원 바이오에너지연구센터,
¹한국과학기술연구원 물자원순환연구단

Global Occurrence of Harmful Cyanobacterial Blooms and N, P-limitation Strategy for Bloom Control

Chi-Yong Ahn, Chang Soo Lee, Jae Woo Choi¹, Sanghyup Lee¹ and Hee-Mock Oh*

*Bioenergy and Biochemical 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*

Abstract - Increased harmful algal blooms by cyanobacteria are threatening public health and limiting human activities related with freshwater ecosystems. Phosphorus (P) has long been suggested as a critical nutrient for cyanobacterial bloom through field research in Canada during the 1970s, proposing a P-based freshwater management guideline. However, recently, nitrogen (N) has also been highlighted as an impacting nutrient on cyanobacterial harmful algal blooms (CyanoHABs). Due to the intensive and frequent observation of *Microcystis*, this kind of paradigm shift from P limitation to season-dependent N or P limitation has an important implication for a dual nutrient management strategy in eutrophic freshwaters. Through recent international researches, general strategies to control CyanoHABs in lakes and reservoirs are as follows: a dual nutrient (N & P) reduction, wastewater collection and treatment, pre-treatment of influent water in buffer zones, dredging of sediment, reduction of residence time, algal collection, and precipitation and flocculation of cyanobacteria. In addition, sustainable and integrative freshwater algae management should be carried out, based on the ecological aspect, because cyanobacteria are not the target organism to be eradicated, but an essential microbial member in the freshwater ecosystem.

Key words : cyanobacterial bloom, bloom control, limiting nutrient, nitrogen, phosphorus

서 론

부영양화는 영양염류의 유입이 증가하여 일어나는 현

상으로서, 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. 부영양화의 문제 점은 수중 1차 생산자인 조류의 과도한 증식뿐 아니라 유독성의 특정 남조류 (blue-green algae, cyanobacteria, 남세균)가 우점하는 데 있으며, 유해 남조류에 의한 녹조는

* Corresponding author: Hee-Mock Oh, Tel. 042-860-4321,
Fax. 042-860-4594, E-mail. heemock@kribb.re.kr

흔히 CyanoHABs (Cyanobacterial Harmful Algal Blooms) 로 불리고 있다.

남조류를 포함한 미세조류는 광합성 생물로서 이들의 생장은 빛, 수온, 이산화탄소, 영양염류 등에 의하여 결정된다. 특히 영양염류는 인간 활동의 결과 하천, 호수로 유입량이 증가하면서 부영양화를 유발하게 된다. Redfield (1934)는 바다에서 미세조류와 해수 시료를 채취하여 주요 성분인 탄소, 질소, 인의 성분비를 조사한 결과 2가지 시료 모두 원자수를 기준으로 106:16:1의 비로 구성되어 있음(질량의 경우는 42:7:1)을 보고하였다. Rhee (1978)는 종에 따른 최적 영양염류 요구비율의 차이가 특정 환경에서 중간경쟁을 결정한다고 하였고, Tilman (1982)은 공통적인 환경 내 영양염류 조건 하에서도 미세조류가 다양하게 공존하는 역설을 각 미세조류가 서로 다른 영양염류에 받는 제한이 제각기 다르다는 mechanistic theory로써 설명하였다. 특히 이중에서도 많은 양을 필요로 하는 영양염류이기 때문에 쉽게 공급이 부족할 수 있는 질소와 인의 비율이 가장 중요하게 인식되어 이에 대한 연구가 활발히 진행되었다(Ahn *et al.* 2013).

Schindler (1974)는 대부분의 담수호에서 인이 조류의 대량증식(녹조 발생)에 더욱 중요하게 작용하는 것으로 보고하였다. 그러나 2007년 중국 Lake Taihu와 같은 초부영양호에서 녹조 발생 및 제어에 대한 집중적 연구의 결과 겨울~봄에 걸쳐 녹조 발생 초기에는 호수의 인 농도가 중요하지만, 여름~가을의 녹조 확산 시기에는 질소농도가 크게 작용하는 것으로 조사되었다(Paerl *et al.* 2011a, 2014b). 또한 이들 연구를 통하여 환경친화적 녹조제어의 여러 방안이 제시되었다.

본 론

1. 남조류 녹조발생 동향

전 세계적으로 인구증가 및 산업발전에 따른 오염물의 수계유입 증가, 지구온난화에 따른 수온 상승으로 남조류 성장 촉진, 이산화탄소 증가에 따른 조류 광합성능 증대 등으로 향후 녹조 발생은 더욱 빈번할 것으로 전망된다. 국내의 녹조발생 현황, 조류경보제 등에 대하여 최근에 종합적으로 분석 보고된 바 있다(Srivastava *et al.* 2015). 전 세계적으로 녹조관련 연구논문은 2000년대에 들면서 크게 증가하고 있으며, 부영양화 호소에서 *Microcystis*, *Anabaena*, *Oscillatoria*, *Planktothrix*, *Aphanizomenon*, *Phormidium*, *Cylindrospermopsis* 등에 속하는 남조

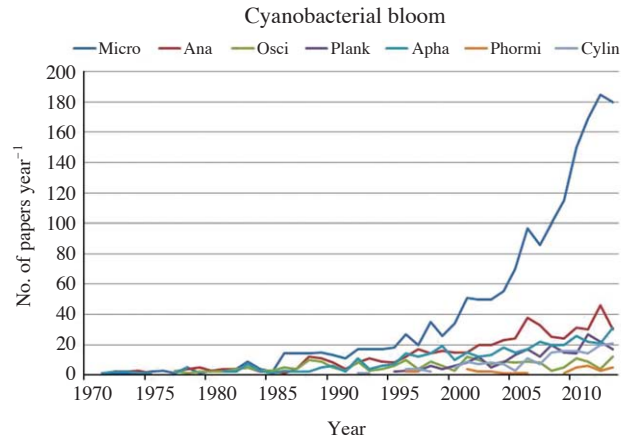


Fig. 1. Number of published papers related to cyanobacterial bloom from 1970 to October 2014 (Search engine: SCOPUS) Abbreviations are: Micro, *Microcystis*; Ana, *Anabaena*; Osci, *Oscillatoria*; Plank, *Planktothrix*; Apha, *Aphanizomenon*; Phormi, *Phormidium*; Cylin, *Cylindrospermopsis*.

류가 주로 우점하는 것을 알 수 있다(Fig. 1). 조사기간 (1970~2014.10.) 중의 전체 논문 중에서 *Microcystis*와 *Anabaena*는 각기 57%, 22%를 점하여 가장 빈번히 출현하는 남조류로 조사되었고, 근래에는 *Cylindrospermopsis*와 *Phormidium*의 출현이 증가하는 추세에 있다.

한국, 중국, 일본, 인도 등 아시아에서의 남조류 녹조에 관한 연구는 대부분 *Microcystis*에 대한 것이나, 호주, 브라질 등의 남반구 국가에서는 *Cylindrospermopsis*에 대한 연구의 비중이 상대적으로 높다(Fig. 2). 독일, 영국, 프랑스의 중부 유럽에서는 *Oscillatoria* (*Planktothrix*)의 연구가 활발하며, 핀란드, 스웨덴의 북부 유럽에서는 *Aphanizomenon*의 비중이 높다는 지역적 특색이 있다. 이 그림에서도 알 수 있듯이 남조류 녹조에 대한 연구는 미국과 중국에서 가장 압도적으로 활발하다. 그러나 중국에서의 녹조 관련 논문은 2000년 이전에는 3편 밖에 없었고, 대부분의 논문이 2000년대에 수행되었다는데 특징이 있다. 이는 중국의 급속한 산업화에 따른 발전으로 환경오염도 매우 빠르게 진행되었으며, 또한 이를 해결하고자 하는 노력도 신속히 이루어지고 있음을 알 수 있는 부분이다.

또한 녹조, 적조 및 이들에 의한 독소 생산과 피해 등을 전문적으로 다루는 16차 국제유해조류회의(16th International Conference of Harmful Algae, ICHA 2014)가 뉴질랜드 웰링톤에서 2014년 10월에 개최되었다. 담수 녹조에 대한 사례와 연구발표도 많았으며, 이는 녹조 발생 빈도가 전 세계적으로 증가하는 일례라고 볼 수 있겠다. 특히 개최되었던 뉴질랜드는, 2005년 북섬의 Hutt River

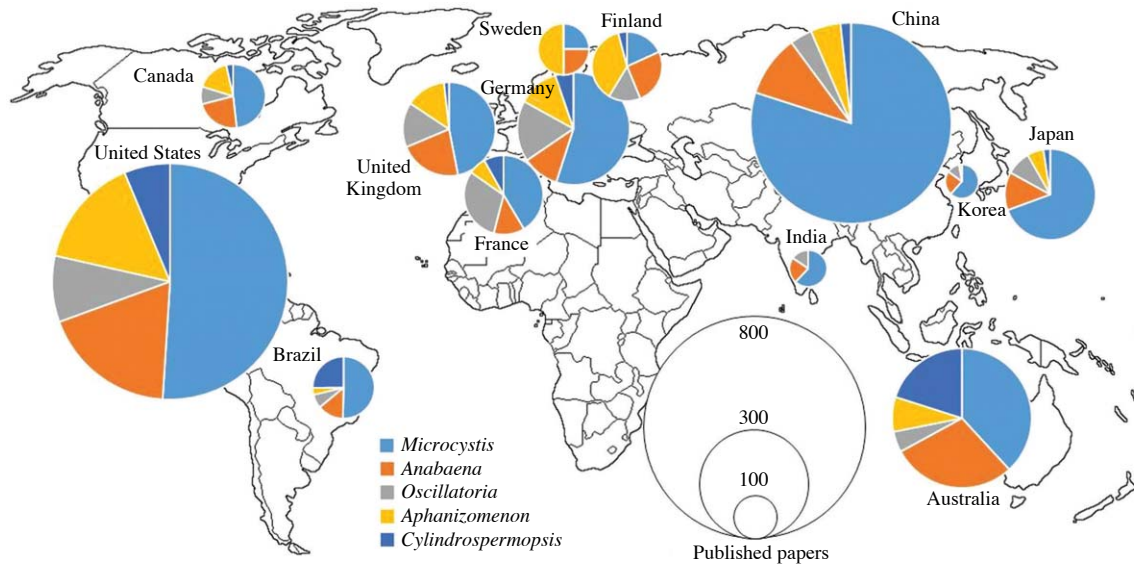


Fig. 2. Map showing studied genera and published papers on cyanobacterial bloom all over the world, from 1970 to October 2014 (Search engine: SCOPUS).

에서 남조류 *Phormidium*의 신경독에 의해 개 다섯 마리가 폐사한 이후, 남조류 연구에 대한 관심이 증가하고 있는 상황이다 (Wood *et al.* 2007).

중국에서 3번째 큰 호수인 Lake Taihu는 2007년 대규모의 *Microcystis* 녹조 발생으로 식수원 사용을 제한하였으며, 부영양화 발생원인 및 방지에 대하여 집중적 연구를 수행하고 있다 (Paerl *et al.* 2011b, 2014b). 최근에 한국에서도 강에서 녹조 발생의 빈도가 증가하고 있다 (Park 2012). 미국 오대호 중 하나인 Lake Erie는 1970년대 적절한 수질관리로 녹조가 자취를 감추었으나, 2011년 봄 다시 녹조가 출현하였고, 이는 농경 유출수로부터 인의 과다 유입, 강우의 증가, 수온 상승 등이 주요 원인으로 밝혀진 바 있다 (Michalak *et al.* 2013). 특히 2014년 8월, 미국 오하이오주 Toledo 시에서는 남조류 독소에 의해 50만 시민에 대해 수도꼭지 공급을 중단하는 초유의 사태가 벌어지기도 하였다 (Wines 2014).

2. 녹조발생과 영양염류

남조류를 포함한 미세조류는 광합성 생물로서 이들의 생장은 빛, 수온, 이산화탄소, 영양염류 등에 의하여 결정된다. 특히 영양염류는 인간 활동의 결과 하천, 호수로 유입량이 증가하면서 부영양화를 유발하게 된다. 조류를 구성하는 원소 중 약 50%를 차지하고 있는 탄소의 수증 농도가 조류의 생장을 결정한다는 견해도 있었다. 그러나 Schindler (1974, 1977)는 자연계에 존재하는 *Anabaena*,

Aphanizomenon, *Nodularia* 같은 질소 고정 남조류가 질소를 고정할 수 있기 때문에, 인이 존재하는 경우 남조류의 증식은 제한되지 않을 것이라고 인의 중요성을 주장하였고, 실제로 캐나다의 자연 호수에서 인과 질소의 첨가에 의한 실험을 바탕으로 담수에서 남조류 증식은 주로 인 농도에 의하여 결정된다고 보고하였다.

그러나 2007년 중국 Lake Taihu와 같은 초부영양호에서 녹조 발생 및 제어에 대한 집중적 연구의 결과 겨울~봄에 걸쳐 녹조발생 초기에는 호수의 인 농도가 중요하지만, 여름~가을의 녹조확산 시기에는 질소농도가 크게 작용하는 것으로 조사되었다. 즉, 유입 영양염류의 조절에 의한 녹조 제어를 효과적으로 달성하기 위해서는 인과 질소를 함께 관리하는 전략이 제기되고 있다 (Conley *et al.* 2009; Paerl *et al.* 2011a, 2014b).

1) 인-제한에 의한 녹조제어

미세조류의 구성성분 중 탄소가 호수에서 남조류 대량 증식의 제한요인이라는 견해도 있었으나, Schindler (1974)의 캐나다 Lake 226 그리고 다년간에 걸친 Lake 304의 실험결과 탄소, 질소, 인을 첨가한 호수에서는 조류 증가에 따른 엽록소-a 농도가 하절기에 크게 증가하였으나, 탄소, 질소만을 첨가한 해에는 엽록소-a 농도 증가가 거의 없었다. 즉, 하절기 높은 수온기에 미세조류 대량증식은 인에 의한 것임을 명확히 보여주었다. 이후로 대부분의 호수에서 광이 충분한 상태에서 미세조류의 생장은 대부분 인에 의하여 제한되는 것으로 받아들

여지게 되었다.

이와 같은 사실에 대한 확증연구로서 Schindler *et al.* (2008)은 캐나다의 Lake 227을 1969~2005년에 걸쳐 37년간 조사한 결과, 질소 공급을 감소시키는 것에 의해서 호수의 부영양화를 줄이지 못함을 보고하였다. 즉, 남조류의 성장 시 질소가 부족한 경우 질소고정 남조류에 의하여 호수의 부족한 질소를 공급해 줄 수 있으므로, 진정한 제한요소가 될 수 없다는 것이었다. 따라서 수십년에 걸친 대규모 현장실험과 여러 사례연구의 결과로서 부영양화를 줄이기 위하여 호소 및 유역관리의 핵심은 인 유입을 줄이는 것이라고 결론지었다. 이와는 별도로 Carpenter (2008)는 Wisconsin의 몇몇 호수에서 하절기 녹조발생 시기에 일시적으로 질소-제한 현상을 보였으나, 호수의 부영양화는 농경 유출수, 도시 하수 등에 기인한다고 보고하여, 인 저감의 중요성을 강조하였다.

또한 최근 대두되고 있는, 인 대신 또는 인과 함께 질소의 유입을 조절해야 부영양화 저감이 가능하다는 주장은 아직 이를 입증할 사례연구, 장기적 생태계(long-term ecosystem scale) 규모의 실험이 없으며, 따라서 호수의 부영양화를 감소시키는 데 성공적으로 입증된 유일한 방법은 인 유입의 감축이라는 점을 강조하였다(Schindler 2012). 또한 European Union's Water Framework Directive에 따라 Baltic Sea로 유입되는 질소, 인 영양염류를 제한하는데 드는 비용은 3.1 billion Euros이며, 인 단독 조절에 드는 비용은 0.21~0.43 billion Euros로 추정되었다. 즉, 질소와 인의 동시 처리는 인의 단독처리에 비해 비용이 크게 증가하게 된다.

2011년 미국 오대호의 하나인 Lake Erie는 대규모 유해조류 bloom이 있었다. 2011년 봄 빈번한 강우에 의한 인의 대량 유입이 원인으로 보인다(Michalak *et al.* 2013). 더불어 호소 수 순환의 약화(체류시간 연장), 수온 상승, 정체된 수체 등이 추가 요인으로 작용하였다. 이와 같은 녹조 번성의 환경요인은 앞으로도 계속될 것으로 보인다.

2) 질소와 인-제한에 의한 녹조제어

한편 Conley *et al.* (2009)은 수심이 낮은 호수에서 인의 유입을 제한하는 것만으로는 남조류의 bloom을 제어하지 못함을 보고하였다. 즉, 녹조 발생의 대표적 남조류인 *Microcystis*는 gas vesicle(기낭)을 지니고 있으므로 자체의 부력을 조절하여 수체에서 수직이동에 의하여 저니(sediment)로부터 인을 공급받고, 수표면으로 부상하여 활발한 광합성과 증식에 의해 bloom을 형성할 수 있는 것이다. 따라서 *Microcystis* 또는 질소고정 남조류를 효과

적으로 제어하기 위해서는 질소와 인을 동시에 저감해야 한다고 주장하였다.

중국의 Lake Taihu는 질소 고정능이 없는 *Microcystis*가 우점종으로 녹조발생이 증가하는 것을 보면, 과도한 질소와 인의 부하때문으로 보인다(Paerl *et al.* 2011a). Lake Taihu는 수심이 얕고, 초부영양(hyper-eutrophic) 상태이며, 지난 30년 만에 bloom-free에서 bloom-plagued로 변화하였다. 영양염류 첨가의 생물검정에 의하면, 이 호수는 겨울~봄에는 인-제한이었다가, 남조류가 우점하는 여름과 가을에는 질소-제한으로 변화하였으며, 계절에 관계없이 질소와 인을 함께 추가하였을 때 조류생장이 최대로 촉진되었다.

미국에서는 인이 담수의 생산성과 유해조류 형성에 제한요소로 작용한다는 근거로 수질관리를 하였다. 그럼에도 불구하고 Lake Erie에서 남조류에 의한 녹조 발생을 막지는 못 하였다. 최근 연구에 의하면 조류증식은 질소와 인의 결합에 반응하고, 경우에 따라서는 단지 질소에만 반응한다. 이는 담수에서 영양염류 관리 방법의 변화(paradigm shift)를 의미하는 것으로 볼 수 있다. 중국에서 3번째 큰 호수인 Lake Taihu는 2007년 *Microcystis* bloom으로 천만 주민의 식수공급을 중단한 적이 있다. 질소는 탈질작용으로 대기 중으로 방출되거나, 저니에 가라앉기도 한다. 질소고정에 의하여 수체 내에 질소를 공급하기는 하지만 전체 생태계 수준의 질소 요구량에는 미치지 못한다(Scott and McCarthy 2010). 따라서 외부로부터 질소 유입은 부영양화의 핵심 요인으로 판단되었다.

3. 녹조제어 전략

CyanoHABs는 전 세계적으로 크게 증가하고 있으며, 1) 인구증가, 2) 오염증가, 3) CO₂ 농도 증가, 그리고 4) 기후변화로 인한 수온 상승 등이 조류 증식을 촉진하게 된다(Qu *et al.* 2014). 중국 Lake Taihu는 2007년 이후 US\$ 16.25 billion 이상을 투자하였으나 큰 효과가 없었다. 따라서 선제적 녹조제어로서 봄철에 조류생장을 제한하기 위한 적절한 기술적 전문성을 요구한다. 조류 농축수역에서 경제적 방법에 의한 처리를 필요로 한다. 또한 연속적 모니터링과 수체의 평가가 처리효능을 최대화 할 수 있다.

근래에 중국 Lake Taihu의 부영양화 방지를 위한 다양한 현장 연구와 노력의 결과 유해 남조류 번성에 영향을 주는 주요 환경조건과 이를 제어하기 위해 제안된 방법과 다음과 같다(Paerl *et al.* 2014a). 환경조건으로는 질소와 인의 영양염류, 온난화와 같은 기후 변화에 영향을

받는 수계의 성층화, 집중 호우와 가뭄에 의한 급격한 수문학적 변화가 중요하다고 보고되었다. 제어 방안으로는 질소와 인 2가지 영양염류 저감 전략의 필요, 폐수 수집 및 처리, 호수 유입수의 사전 처리(수초 재배 등), 저니의 준설, 체류시간 단축(유입수 증가 등), 조류 회수법 개발, 응집 및 침전 등의 방법을 제안하였다.

또한 Smith and Schindler (2009)에 의하면 수중 영양염류의 증가는 병원균을 포함한 비-영양염류성 오염자의 밀도, 조성, 독성, 생존 등에도 영향을 주지만, 세균의 활성을 증가시켜 phenol과 같은 독성물질의 생분해를 촉진할 수도 있다고 한다. 따라서 앞으로의 수질관리는 녹조 제어는 물론이고, 독성물질 분해, 병원균 저감 등을 종합적으로 고려하여 최적 수준의 영양염류 부하를 산정하고, 실천하는 통합적, 전략적 접근이 필요하다.

결 론

전 세계적으로 지구온난화에 의한 수온 상승, 이산화탄소 농도 증가, 수계로 오염물질의 유입 증가 등으로 유해 남조류 발생의 호조조건이 형성되면서 이들은 더욱 증가하고 있다. 우점종으로는 *Microcystis*와 *Anabaena*는 각각 57%, 22%를 점하여 가장 빈번히 출현하는 남조류로 조사되었고, 근래에는 *Cylindrospermopsis*와 *Phormidium*의 출현이 증가하고 있다.

녹조의 근본적 해결을 위해서는 장기적으로 인, 질소 등 영양염류의 유입을 줄여야 하며, 단기적으로는 친환경 생태공학적인 녹조제어기술의 현장 적용을 추진하여야 한다(Lee et al. 2013). 녹조제어를 위한 핵심 제한 영양염류로서 인이 널리 인정되었으나, 최근에 초부영양호 등의 연구를 통하여 하절기 녹조 발생 시 인과 질소 동시 제한의 필요성도 제안되고 있다. 따라서 대상 수체에 대한 조류성장잠재력(Algal Growth Potential) 조사 등 실험을 통해 시기별 남조류 생장의 제안인자를 파악한 후 제한 영양염류 선정 및 저감, 녹조 제어전략을 수립하는 것이 중요하다.

유해 남조류 발생 저감을 위한 기술적 방법으로는 근래에 Lake Erie, Lake Taihu 등의 사례연구를 통해 제안된 다양한 방법을 참고할 수 있다. 조류 생장의 제한영양 염류, 효과성, 환경친화성, 지속가능성 등을 종합적으로 고려한 후 우리의 실정에 적합한 기술을 선정하여 복합적 기술 적용과 전주기적 처리를 포함한 과학과 기술의 통합적 제어전략을 추진하여야 한다.

끝으로 남조류를 비롯한 미세조류는 광합성 작용에

의하여 유기물을 생산하는 수중의 1차생산자로서 생태계 구성에 꼭 필요하다. 그러나 문제는 독소 또는 이취미를 생산할 수 있는 특정 남조류가 우점하고, 이들의 개체수가 너무 많다는 것이다. 따라서 최결의 대상이라기보다, 우리에게 해를 주지 않을 정도의 효율적 수질관리 목표가 현실적이고 경제적 부담도 적을 것으로 사료된다. 따라서 녹조관련 다양한 과학적 연구결과를 바탕으로 조직적으로, 체계적으로 대책을 마련하고, 무엇보다도 민·관·산·학·연이 협력하여 실천을 위해 함께 노력한다면 보다 효과적인 녹조관리가 가능할 것이다.

적 요

전세계적으로 2000년대 이후로 남조류에 의한 녹조의 발생이 증가하고 있으며, 이와 관련된 환경 문제가 공중건강을 위협하고 인간 활동을 제한하고 있다. 1970년대 캐나다의 호수를 중심으로 수행된 다년간의 현장 연구를 통하여, 녹조발생의 핵심적인 영양 제한인자로 인이 제시되었고, 인 저감에 대한 수계 관리가 진행되었다. 그러나 2000년대 이후, 대형 담수수계에서 특히 *Microcystis*에 의한 녹조 현상에서는 인뿐만 아니라 질소가 남조류 녹조 발생에 미치는 영향이 부각되고 있다. 한국의 담수수계에서도 이와 비슷한 남조류에 의한 위해성 녹조 변성 특징을 갖고 있으므로, 이러한 패러다임의 변화는 국내 담수수계의 영양염류 관리에서 중요한 의미를 갖는다. 최근 국제적인 관련 연구를 통하여, 위해성 남조류 번성을 막기 위해 제안된 방법은 다음과 같다. 1) 질소와 인을 함께 관리하는 전략, 2) 폐수의 수집 및 처리, 3) 호수 유입수의 사전처리, 4) 저니의 준설, 5) 체류시간의 단축, 6) 조류의 효율적 회수법, 7) 조류의 침강 및 응집 등이 제시되고 있다. 추가적으로 남조류의 생태학적 특성에 기반한 지속가능하고 통합적인 담수수계의 녹조 관리 기법이 수립되어야 한다. 녹조를 유발하는 남조류는 척결되어야 할 생물체가 아니라, 담수 수계에 필수적인 미생물 구성원이기 때문이다.

사 사

본 연구는 KIST 주요사업 ORP(과제번호 2E24280) 그리고 2014년도 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단 사회문제해결형 기술개발사업(과제번호 2014M3C8A4030437)의 지원을 받아 수행되었음.

REFERENCES

- Ahn CY, JY Lee and HM Oh. 2013. Control of microalgal growth and competition by N:P ratio manipulation. *Korean J. Environ. Biol.* 31:61-68.
- Carpenter SR. 2008. Phosphorus control is critical to mitigating eutrophication. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 105:11039-11040.
- Conley DJ, HW Paerl, RW Howarth, DF Boesch, SP Seitzinger, KE Havens, C Lancelot and G Likens. 2009. Controlling eutrophication: Nitrogen and phosphorus. *Science* 323:1014-1015.
- Lee CS, CY Ahn, HJ La, S Lee and HM Oh. 2013. Technical and strategic approach for the control of cyanobacterial bloom in fresh waters. *Korean J. Environ. Biol.* 31:233-242.
- 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 and 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.* 110:6448-6452.
- Paerl HW, H Xu, MJ McCarthy, G Zhu, B Qin, Y Li and WS Gardner. 2011a. Controlling harmful cyanobacterial blooms in a hyper-eutrophic lake (Lake Taihu, China): The need for a dual nutrient (N & P) management strategy. *Water Res.* 45:1973-1983.
- Paerl HW, H Xu, NS Hall, TG Otten, G Zhu, KL Rossignol and B Qin. 2014a. Controlling harmful cyanobacterial blooms in a world experiencing anthropogenic and climatic-induced change. The 16th International Conference on Harmful Algae. 27-31 October 2014, Wellington, New Zealand.
- Paerl HW, NS Hall and S Calandrino. 2011b. Controlling harmful cyanobacterial blooms in a world experiencing anthropogenic and climatic-induced change. *Sci. Total Environ.* 409:1739-1745.
- Paerl HW, WS Gardner, MJ McCarthy, BL Peierls and SW Wilhelm. 2014b. Algal blooms: Noteworthy nitrogen. *Science* 346:175.
- Park SB. 2012. Algal blooms hit South Korean rivers. *Nature News* doi:10.1038/nature.2012.11221
- Qu M, DD Lefebvre, Y Wang, Y Qu, D Zhu and W Ren. 2014. Algal blooms: proactive strategy. *Science* 346:175-176.
- Redfield AC. 1934. On the proportions of organic derivations in sea water and their relation to the composition of plankton. pp.177-192. In James Johnstone Memorial Volume. (Daniel RJ ed.). University Press of Liverpool.
- Rhee GY. 1978. Effects of N:P atomic ratios and nitrate limitation on algal growth, cell composition and nitrate uptake. *Limnol. Oceanogr.* 23:10-25.
- 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. 2012. The dilemma of controlling cultural eutrophication of lakes. *Proc. Biol. Sci.* 279:4322-4333.
- 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.
- Scott JT and MJ McCarthy. 2010. Nitrogen fixation may not balance the nitrogen pool in lakes over timescales relevant to eutrophication management. *Limnol. Oceanogr.* 55:1265-1270.
- Smith VH and DW Schindler. 2009. Eutrophication science: Where do we go from here? *Trends Ecol. Evol.* 24:201-207.
- Srivastava A, CY Ahn, RK Asthana, HG Lee and HM Oh. 2015. Status, alert system, and prediction of cyanobacterial bloom in South Korea. *BioMed Res. Int.* 2015: Article ID 584696.
- Tilman D. 1982. *Resource Competition and Community Structure.* Princeton University Press, Princeton, 296 pp.
- Wines M. 2014. Behind Toledo's Water Crisis, a Long-Troubled Lake Erie. *The New York Times*, Aug. 4.
- Wood SA, AI Selwood, A Rueckert, PT Holland, JR Milne, KF Smith, B Smits, LF Watts and CS Cary. 2007. First report of homoanatoxin-a and associated dog neurotoxicosis in New Zealand. *Toxicon* 50:292-301.

Received: 15 December 2014

Revised: 2 February 2015

Revision accepted: 3 February 2015