

연구논문

대청호 조류발생에 따른 경보제 운영 및 개선 방안 고찰

정동환 · 이재정 · 김교영 · 이대희 · 홍선화 · 윤조희 · 홍석영 · 김태승

국립환경과학원 금강물환경연구소

(2011년 10월 9일 접수, 2011년 12월 6일 승인)

A study on the management and improvement of alert system according to algal bloom in the Daecheong Reservoir

Dong-Hwan Jeong · Jaejeong Lee · Kyoyoung Kim · Daehee Lee · Sunhwa Hong
· Johee Yoon · Sukyoung Hong · Taeseung Kim

Geum-River Environment Research Center National Institute of Environmental Research

(Manuscript received 9 October 2011; accepted 6 December 2011)

Abstract

Following the industrialization and urbanization in Korea, algal bloom causes aesthetic displeasure and many other problems such as taste and odor, coloration, scum, increase in pH, filter-bed blockage. There were some cases involving human death by microcystins during summertime in foreign countries. In Korea, Harmful cyanobacteria such as *Microcystis* and *Anabaena* develop in summer in the Daecheong reservoir, one of the main water resources, with the retention time of above 200 days. To better control algal bloom, the Ministry of Environment has been running algal bloom alert system from 1998 for the Daecheong reservoir, which needs to be improved to reflect the characteristics of river-type lakes. For this reason, we try to find new measures to improve an algal bloom alert system for each water zone considering the characteristics of harmful cyanobacteria in this study.

Keywords : Algal Bloom, Alert System, Harmful Cyanobacteria, Microcystin

I. 서론

우리나라는 산업화와 도시화에 따른 물부족 현상을 해결하기 위하여 대청호와 같은 인공호수를 만들었는데 체류시간의 증가, 인간활동에 의한 오염물질 유입으로 조류 발생 등 부영양화가 심화되고 있다. 대청호는 충청지역에 하천 유지용수, 생활용수 및 농업용수를 공급하고 홍수조절까지 담당하는 용도로 축조된 다목적댐으로써 영양염류가 장기간 체류되어 하절기 부영양화 현상이 반복적으로 일어나고 있다. 호수의 영양상태는 오염물질의 유입형태, 유입시기, 체류시간, 순환률 등과 같은 여러 가지 요인들에 의해 영향을 받게 되는데 대청호의 경우 여름철에 주로 발생하는 집중강우 시 유역에 산재해 있던 영양염류들이 짧은 시간에 호수로 유입되는 특성을 보인다. 또한 대청호는 호수의 길이가 길고 폭이 좁은 형태적 특성과 기상 등의 환경요인 및 인위적 수량조절 등에 의한 호수 환경 변화에 따라 상류, 중류, 하류 및 만입부 등 수역별로 영양상태가 다르게 나타나며, 또한 조류의 발생 양상도 다양하게 나타난다(국립환경과학원, 2005~2010).

조류의 대량 발생은 이취미를 일으키고 착색 또는 스킴을 형성함으로써 심미적 불쾌감을 주며, 수체의 pH 상승, 정수장 여과지 폐색 등 여러 문제를 일으킨다. 특히, 하절기에 주로 발생하는 남조류 중 일부는 독소를 생성하는 것으로 알려져 있는데, 그 중 *Microcystis*에 의해 생성되는 독소인 Microcystin은 인체 및 가축에 유해를 일으키는 것으로 알려져 있다(Figueroa *et al.*, 2004). 영국의 경우 1989년 8~9월 Leicestershire에서 남조류 독소에 의해 양, 개 등의 가축이 사망한 사례가 보고된 바 있다(Falconer, 2005). 그리고 미국과 호주 등 여러 나라에서 남조류가 사람에게 유해한 것으로 조사되었는데, 이들 조류종의 대량 발생 시기에 수영, 수상스키, 카누 등 수상활동을 한 경우 인체에서 피부, 눈 등의 자극, 급성 위장염 등의 증상이 나타나는 것으로 보고된 바 있다. 또한 음용수와 관련된 것은 아니지만 1996년 브라질 Caruaru의 혈액투석센터에서 남조류 독소의 유입으로 수십 명이 사망한 사건

이 발생하였다(Jochimsen *et al.*, 1998). 따라서 아직 우리나라에서는 남조류에 의한 피해가 알려지지 않았지만 이들 조류발생은 국민 건강의 안전성 측면에서도 매우 중요하다. 환경부는 이러한 조류발생에 따른 피해를 방지하기 위하여 1998년 최초로 팔당호, 대청호, 충주호, 주암호를 대상으로 조류경보제를 실시하였고, 이를 토대로 매년 전국 주요 호소로 점차 확대하여 2010년 현재 총 22개 호소에서 조류경보제를 실시하고 있다(환경부, 2011).

조류경보제 운영에 따라 주의보 및 경보가 발령되면 상수원수인 대청호 상류지역 지자체에서는 오염 발생시설 단속, 하천순찰 등을 강화하고 한국수자원공사에서는 취수구와 조류 우심지역에 대한 방어막 설치 등 조류제거를 위한 조치를 취하고 황토살포, 조류제거선을 운영하고 있다. 또한, 정수장에서는 활성탄 및 오존 처리, 선택적 취수, 정수에서 독소 분석 등을 실시하고 있다. 평상시에도 환경오염 행위 감시, 가축분뇨 적정관리 유도, 인공습지 운영, 유입 하천 쓰레기 수거, 마을 도랑 정화 및 퇴적물 준설 등 다양한 사업을 추진하고 있다. 이러한 억제 방안에도 불구하고 매년 조류경보제가 발령되고 있으며 이에 따른 직·간접적인 예산이 사용되고 있으며, 상류지역 주민의 생활에 제약을 주고 있다. 따라서, 본 연구에서는 대청호 주요 수역의 조류발생 및 수질현황을 조사하고, 대청호를 중심으로 조류경보제 운영 현황을 살펴보고 환경정책 집행자와 지역주민이 모두 만족하는 사회적 비용 절감을 위한 조류경보제 개선 방안을 고찰해 보고자 한다.

II. 연구내용 및 방법

1. 대청호 유역특성

대청호는 1981년 대전시 대덕구와 충북 청원군 사이에 건설된 복합형 댐에 의해 형성된 호소로서 3,204 km²(용담호 포함 4,134 km²)의 유역면적, 1,490×106 m³의 총저수용량을 가지는 다목적 댐이다(표 2). 대청호 유역의 일강우량, 유입유량, 방

류량, 수위, 저수율 등 수리수문 자료는 한국수자원공사에서 제공하는 댐 자료를 참고하였다. 우리나라의 강우는 하절기에 연간 총강우량의 대부분이 집중되는 온대 몬순기후의 특성을 가진다. 2010년도 대청호의 총강우량은 1,227 mm로서 이중 63%가 7~9월에 집중되었다. 특히 집중강우 시기가 예년에 비해 비교적 늦게 형성되어 8월의 강우량이 연간 총강우량의 33%인 403 mm를 기록하였다. 강우량이 적었던 1~4월 및 10~12월의 강우량 합계는 연간 총강우량의 24%에 불과하여 계절 간 강우량 차이가 큰 온대 몬순기후 형태를 보였다. 2010년도 대청호의 총강우량은 최근 13년(1998~2010)동안의 평균인 1,246 mm와 유사하였다.

대청호의 유입 유량은 주로 강우에 의한 영향을 많이 받는데 2010년의 경우 특히 8월에 많이 발생한 강우의 영향으로 유입량이 예년에 비해 많았다. 댐에서 조절에 의존하는 방류량 변화는 1월부터 8월 중순까지는 30~100 CMS 정도 사이를 등락하다가 강우량이 증가한 8월 16일 연간 최대인 1,318 CMS를 기록하였고 9월 중순 이후로 다시 감소하여 이후 100 CMS 이하를 유지하였다. 2010년 대청호의 수위 변화는 집중강우가 발생한 8월 중순에 최고치인 76.4 m를 기록하였으며 9월 중순 이후로는 방류량이 줄어들어 이후 서서히 하강하였는데 12월 말에도 전년(69.1 m)에 비해 높은 72.7 m를 기록하였다. 2010년 대청호의 강우와 유입량, 방류량을 종합하여 보면 예년에 비해 비교적 늦은 8월 중순에 집중강우가 발생하였고, 이에 따라 집중강우기에 비점오염물질로 유입되는 영양염류의 대량 유입도 비교적 늦게 이루어졌으며, 아울러 식물플랑크톤의 발생시기와 분류군별 천이 양상도 영향을 받은 것으로 보인다.

2. 조사 지점 및 방법

조류경보제 시행을 위한 조사지점은 대청호 중류에 위치한 회남, 대전취수탑이 위치한 추동, 청주취수탑이 위치한 문의 등 3개 수역을 선정하였다. 조사시간은 2010년 1~12월 사이 주 1회 현장조사 및

시료채수를 실시하였다. 회남수역은 대청호로 직접 흘러드는 회인천이 유입되는 부분에 형성된 만입부가 대청호 본류와 합류되는 직후에 위치하고 있다. 회남수역은 대청호 중간에 위치하고 있으며 수심이 깊은 지형적 특성에 따라 상류에 비해 강우에 의한 유입 유량의 변화와 유입수의 수질 변화에 의한 영향을 비교적 적게 받는다. 추동수역은 대청호로 직접 유입되는 주원천 합류부 근처로 대청호 중간의 만입부에 위치하고 있다. 추동수역은 주원천 유입부가 대청호에서 넓게 만입되어진 형태적 특성에 따라 상류 수역에 비해 강우에 의한 유입 유량의 변화와 유입수의 수질변화에 의한 영향을 비교적 적게 받는다. 추동수역에는 대전지역의 상수원으로 사용되는 대전취수탑이 위치하고 있으며 대청호 조류경보제 대상수역 중 하나이다. 문의수역은 대청호 댐 북쪽에서 대청호로 유입되는 지천인 품곡천이 유입되는 부분에 위치하고 있으며 청주, 천안, 연기 등 충청도 지역의 상수원으로 이용되는 청주취수탑 전방에 위치하고 있다. 문의수역은 품곡천 합류부에 위치하고 있어 상류와 중류 수역에 비해 강우에 의한 영향을 비교적 적게 받는 것으로 조사



그림 1. 대청호 조사수역

되었다.

수심별 수질조사 항목 중 수온, pH, DO, 전기전도도 등의 항목은 수심별로 다항목 수질측정장치(YSI6600)를 사용하여 현장에서 측정하였고, Chlorophyll a, 영양염류, COD 등은 상·중·하층 수를 반돈 채수기를 사용하여 채수한 다음 아이스박스에 냉장 운반하여 분석하였다. 영양염류, Chlorophyll a 등의 수질 분석은 수질오염공정시험방법에 따라 실시하였다. 식물플랑크톤 조사는 루골용액으로 시료를 고정시키고 정량 분석용 Sedgwick Rafter Chamber에 분취한 후 광학현미경(Zeiss, Axioscop)을 이용하여 속별로 분류 계수하였다.

III. 연구결과 및 고찰

1. 대청호 수질 및 조류발생 현황

1) 대청호 수질현황

회남수역의 수심 변화는 23~35 m 정도로 조사 기간 중 5~7월에 수심이 비교적 낮게 나타났다. 수온의 경우 4~10월 사이의 기간에 비교적 큰 수층별 차이가 관찰되었는데, 수온이 낮았던 1~3월 및 11~12월의 경우 그 차이가 크지 않았다. 투명도는 8월에 0.7 m로 가장 낮은 값을, 2월 조사에서 5.3 m로 최대치를 기록하였다. 수층별 pH 변화는 6~8월 조사에서 층간 격차가 크게 조사되었는데, 8월 표층에서 연중 최대치(9.7)를 기록하였다. DO의 경우 5월까지는 층간 격차가 없다가 조류가 발생하는 6월에서 9월까지 높아진다. 전기전도도는 8월에서 최저를 기록하였고 이때 탁도와 SS도 연중 최대치를 보였는데 이는 이 시기에 회남수역 중층으로 흘러든 강우 유입수의 영향으로 보인다. TN과 DTN 농도는 다른 항목들에 비해 연중 비교적 변동이 크지 않았으며 6월 중층에서 최대치를 보였다. TP와 DTP의 농도는 8월 중층에서 높게 나타났는데, 이는 하절기 강우에 의해 발생한 유입수에 질소, 인 등 영양염류 성분들이 많이 포함되어 있기 때문으로 보인다. 회남수역의 Chlorophyll a 농도는 조류

발생이 많았던 6~9월 표층에서 높게 형성되었으며 월별 조사에서는 6월에 연중 최대치를 보였다. COD는 9월 연중 최대치를 기록하였고 1월에도 비교적 높게 나타났다. TOC는 1월에 연중 최대인 5.5 mg/L를 나타내었다.

추동지점의 수심 변화는 10~23 m 정도로 조사 기간 중 1월과 4~7월에 비교적 낮은 수심을 보였다. 연중 수온변화는 4~8월 사이의 기간에 비교적 큰 수층별 수온 차이가 관찰되었는데, 1~3월 및 9~12월의 경우 수층별 차이가 크지 않았다. pH의 경우 3월까지의 층간 변화가 거의 없다가 8월에 가장 큰 층간 차이를 보였다. DO의 경우 5월까지는 층간 격차가 적었으며 6~9월에 층간 변화가 심한 경향을 보였는데 10월부터 다시 층간 격차가 없어졌다. 전기전도도 변화는 7월까지 꾸준히 상승하다가 강우가 유입된 8월 중·하층에서 급격히 낮아지는 것을 알 수 있다. 탁도와 SS의 경우에도 강우 유입수가 흘러든 8월에 연중 최대치를 보였다. TN과 DTN 농도는 다른 항목들과는 달리 연중 강우 특성과 연관이 없는 것으로 보이는데 5월 하층에서 최대치를 보였다. TP와 DTP의 농도는 9월 표층에서 연중 최대치를 기록하였으며 PO₄-P의 경우 8~10월 하층에서 비교적 높게 형성되었다. 추동지점의 COD와 TOC는 연중 전 층에서 비슷하게 변하는 것을 알 수 있으며 8~10월 사이에 비교적 높게 조사되었다.

문의지점의 수심 변화는 7~19 m 정도로 조사 기간 중 6~7월에 비교적 낮은 수심을 보였다. 연중 수층별 수온변화는 4~8월 사이에 수층별 수온 차이가 관찰되었는데 그 외의 기간에는 수층별 차이가 거의 보이지 않았다. 수심이 깊지 않은 문의지점의 특성에 따라 층간 수온 격차는 크지 않았다. pH의 경우 7~8월을 제외하고는 층간 격차가 크지 않았고 9월 표층에서 가장 높은 pH를 기록하였었다. DO의 경우 7~9월 사이에 층간 격차 보였는데 8월 중·하층에서 매우 낮은 값을 형성하였다. 전기전도도는 7월까지 층간격차가 거의 없이 조금씩 상승하다가 8월부터 10월까지 하락하였고, 11월 이후 다

표 1. 대청호 조류경보제 수역의 수질 현황

구 분	수온 (°C)	pH	DO (mg/L)	전기전도도 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	투명도 (m)	ORP (mV)	탁도 (NTU)	Chl-a (mg/m^3)
회남 (N=37)	21.4±8.0 (3.8-31.7)	8.3±0.7 (7.3-9.7)	10.3±2.0 (7.6-13.8)	150.4±15.7 (126.0-172.0)	2.9±1.0 (0.7-5.3)	144.3±29.1 (47.0-213.0)	1.8±2.5 (0.3-15.9)	11.1±8.1 (1.7-30.3)
추동 (N=37)	20.6±7.6 (4.2-30.7)	8.2±0.5 (7.5-9.4)	10.0±1.7 (6.6-13.3)	147.6±13.2 (124.0-167.0)	2.3±0.9 (0.9-4.8)	163.8±39.1 (47.0-270.0)	2.1±1.8 (0.1-9.0)	12.0±9.0 (1.4-33.5)
문의 (N=37)	21.0±7.8 (4.9-31.5)	8.2±0.7 (7.1-9.6)	9.9±1.7 (7.0-13.5)	144.1±27.0 (0.2-166.0)	3.1±1.0 (1.0-5.8)	127.2±24.8 (47.0-182.0)	1.5±2.2 (0-12.5)	10.0±9.2 (1.3-40.7)
구 분	TN (mg/L)	DTN (mg/L)	TP (mg/L)	DTP (mg/L)	PO ₄ -P (mg/L)	COD (mg/L)	SS (mg/L)	TOC (mg/L)
회남 (N=37)	1.822±0.38 (1.184-2.804)	1.484±0.386 (0-2.265)	0.028±0.016 (0.008-0.0083)	0.011±0.008 (0-0.042)	0.002±0.001 (0-0.006)	4.4±1.2 (2.9-7.8)	2.8±1.5 (0.2-8.9)	2.5±0.8 (1.2-5.5)
추동 (N=37)	1.641±0.345 (1.053-2.558)	1.353±0.390 (0-2.150)	0.023±0.014 (0.007-0.068)	0.011±0.010 (0-0.050)	0.002±0.001 (0-0.006)	4.2±1.1 (3.0-6.7)	3.4±2.3 (0.6-13.9)	2.3±0.7 (0.8-3.4)
문의 (N=37)	1.505±0.304 (0.936-2.293)	1.262±0.364 (0-1.941)	0.019±0.014 (0.003-0.063)	0.011±0.011 (0-0.045)	0.001±0.001 (0-0.004)	4.0±1.1 (2.6-7.3)	2.3±1.2 (0.8-5.2)	2.3±0.7 (0.7-3.8)

※ 평균값 ± 표준편차(최소값 - 최대값)

시 상승하였다. 탁도는 2월, 4~6월 및 9월 하층에서 비교적 높게 측정되었으며, SS의 경우 6월 하층에서 연중 최대로 나타났다. TN과 DTN 농도는 3월 전 층에서 비교적 낮게 형성된 것을 제외하면 연중 뚜렷한 변화가 없는 것으로 보인다. TP와 DTP의 농도는 9월 상층에서 연중 최대를 보였으며 PO₄-P의 경우 8월 하층에서 약간 높은 것을 제외하면 전 층에 걸쳐 연중 매우 낮은 값을 유지하는 것을 알 수 있다. 문의지점의 COD는 연중 층간 변화가 거의 없는 것으로 조사되었으며 10월 조사에서 최대를 나타내었다. TOC 역시 층간 변화가 크지 않았으며 1~5월은 감소, 5~10월은 증가하는 경향을 보였다.

2) 대청호 조류발생 현황

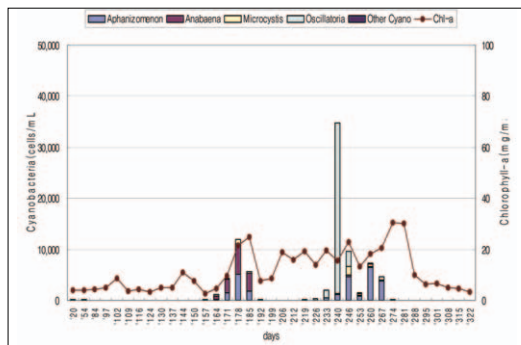
회남수역에서 식물플랑크톤 천이는 상류 수역에 비해 비교적 다양하지 않았다. 특히 집중강우에 의한 유입수가 들어오기 시작한 6월 중순 이전에는 식물플랑크톤의 개체수가 매우 적은 상태를 유지하다가 6월 이후 남조류가 증가하다가 7월 중순에 다시 감소하였고 이후 9월에 다시 증가하는 특징을 보여 주었다. 회남지점의 TP와 Chlorophyll a 변화를 비교해 보면 Chlorophyll a는 6월 말과 10월 초에 두 번 큰 폭으로 증가하였는데, 이러한 Chlorophyll

a의 증가는 TP의 증가가 이루어지고 2~3주 뒤에 나타난 것을 알 수 있다. 2010년 회남수역에서 *Aphanizomenon*, *Microcystis*, *Anabaena*, *Oscillatoria* 등 다양한 종류의 남조류가 관찰되었다. 이 중 8월 30일 *Oscillatoria*가 33,400 cells/mL로 가장 많이 조사되었는데, 이때 Chlorophyll a 농도는 15.6 mg/m³으로 비교적 높지 않았다. 그 외에 규조류(*Aulacoseira*, *Fragilaria*), 녹조류(*Eudorina*, *Volvox*, *Mougeotia*), 갈색편모조류(*Cryptomonas*) 등 다양한 조류가 출현하였다.

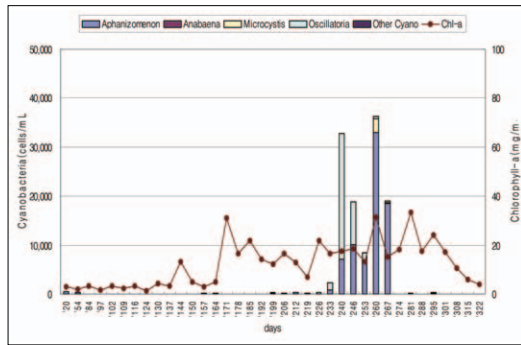
추동수역의 식물플랑크톤 천이는 5월 중순 이후 규조류가 잠시 증가하였고 이후 조류 개체수는 감소하였다. 6월 21일 조사에서 Chlorophyll a 농도가 31.1 mg/m³로 증가하였는데, 개체수는 202 cells/mL로 많지 않았지만 와편모조류인 *Peridinium*의 증가에 따른 것으로 보이며 이후 Chlorophyll a와 조류수는 감소하였다. 8월 23일 조사에서는 녹조류(*Volvox*, 4,800 cells/mL)가 잠시 증가하였다. 8월 30일 남조류 개체수가 32,758 cells/mL로 급증하였으며, 9월 20일에는 36,208 cells/mL로 최대치를 기록하였고, 10월 이후에는 남조류가 급감하고 규조류가 우점하였다. 연중 최대 Chlorophyll a 농도는 10월 11일 3.5 mg/m³로

조사되었다. 추동수역에서 *Aphanizomenon*, *Microcystis*, *Anabaena*, *Oscillatoria* 등 다양한 종류의 남조류가 관찰되었다. 회남수역에서와 마찬가지로 규조류(*Fragilaria*, *Aulacoseira*), 녹조류(*Eudorina*, *Volvox*), 갈색편모조류(*Cryptomonas*), 와편모조류(*Peridinium*) 등 다양한 조류가 관찰되었다.

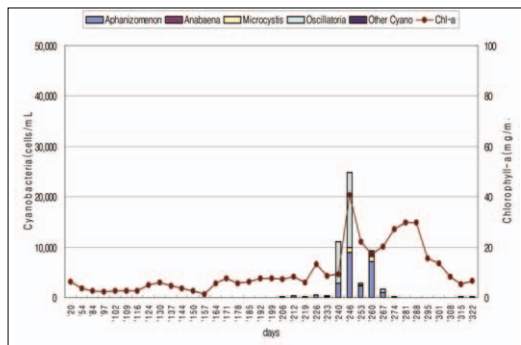
문의수역의 식물플랑크톤 천이는 5월 중순에서



(a) 회남수역



(b) 추동수역



(c) 문의수역

그림 2. 대청호 조류경보제 수역의 조류발생 및 Chlorophyll a 농도

하순 사이에 규조류가 잠시 증가하였다가 감소하였고 이후 7월까지의 대체로 조류발생과 Chlorophyll a 농도가 낮게 유지되었는데 8월 하순 이후 9월에는 남조류가 급증하는 현상이 나타났다. 남조류의 발생은 9월 하순까지 이어졌으며 이후 규조류로 천이되면서 10월 중순에 Chlorophyll a가 상승하다가 이후 12월까지 점차 감소하는 특징을 보였다. 2010년 문의수역에서 남조류는 *Oscillatoria*와 *Aphanizomenon*이 주로 나타났다. 문의수역에 출현한 남조류는 *Anabaena*, *Microcystis*, *Oscillatoria*, *Aphanizomenon* 등 다양하였으며, 약간의 차이는 있지만 회남 및 추동 수역과 유사하게 규조류(*Aulacoseira*, *Fragilaria*), 녹조류(*Scenedesmus*, *Eudorina*, *Pediastrum*), 갈색편모조류(*Cryptomonas*), 와편모조류(*Peridinium*) 등 다양한 조류가 출현하였다.

3) 남조류의 독성

유해 남조류에 의해 생성되는 Microcystin과 같은 독소는 앞서 설명하였듯이 사람과 가축이 사망하거나, 인체에서 피부, 눈 등의 자극, 급성 위장염 등의 증상을 일으킨다고 한다(Falconer, 2005). 따라서, WHO, 호주 같은 나라에서는 Microcystin을 대표지수로 하여 상수원수에서 남조류 발생을 관리하고 있다(Chorus and Bartram, 1999; Newcombe et al., 2010).

외국에서 유해 남조류 발생에 따른 Microcystin 농도는 1~12,800 µg/L의 범위에서 조사되었다. 국립환경과학원에서 대청호 수역의 유해 남조류 독소 Microcystin-RR, LR, YR, LA 4종에 대해 LC/MS/MS를 사용하여 채수시료를 농축하여 분석한 결과, Microcystin의 농도는 250.9~1,845.5 µg/L의 범위에서 검출되었고 외국 사례에 비해 높지 않은 것으로 나타났다(국립환경과학원, 2008).

2. 조류경보제 운영

1) 조류경보제

대청호에서 조류경보제는 조류발생에 따른 정수

표 3. 조류경보제 발령기준

구 분	조류주의보	조류경보	조류대발생
Chlorophyll a 농도(mg/m ³)	15 이상	25 이상	100 이상
남조류 세포수(cells/mL)	500 이상	5,000 이상	10 ⁶ 이상

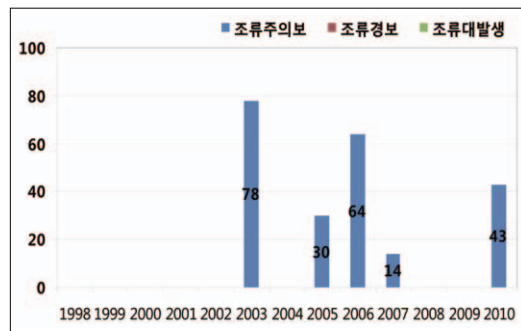
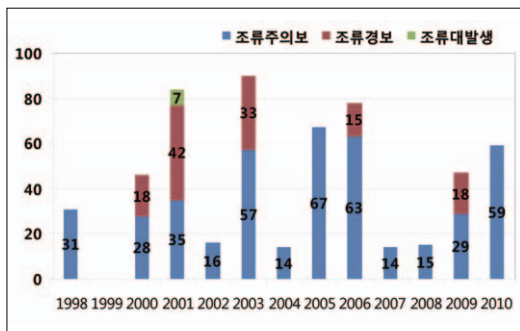
처리장 기능 저하 및 일부 유해 남조류의 독성 피해를 최소화하기 위하여 1998년부터 상수원으로 이용되는 주요 호소에 대해 실시하고 있다. 조류경보제는 4대강 물환경연구소에서 조류발생 상황을 모니터링하고, 유역환경청에서 조류경보제 발령 시 관련 기관에 전파하여 기관별로 유역관리, 내수면관리, 상수 원수 및 정수관리 등 대응방안을 추진하도록 하고 있다. 조류경보제는 4월부터 11월까지 조류발생의 우려가 있는 시기에 실시하며 평상 시에는 주 1회 이상, 조류 경보 또는 대발생 시 주 2회 이상 측정하도록 하고 있다. 측정항목으로 수온, pH, DO, Chlorophyll a, 남조류 세포수를 분석하며 남조류 세포수 측정시 출현 조류종을 남조류, 규조류, 녹조류, 기타 조류로 구분하고 우점종을 명시하도록 한다. 측정방법은 수질오염공정시험기준을 따르고 있다.

조류경보제 발령기준은 표 3과 같으며 2회 연속 측정하여 Chlorophyll a 농도와 남조류 세포수가 동시에 초과 시에 발령하며, 해제 시에도 2회 연속 Chlorophyll a 농도가 15 mg/m³ 미만이거나 남조류 세포수가 500 cells/mL 미만인 경우에 적용한다.

2) 조류경보제 발령 현황

대청호 유역의 2010년도 연간 총 강우량은 1,227 mm로 2009년에 비하여 다소 증가하였으며 최근 13년(1998~2010)간 평균 강우량(1,246 mm)과 유사한 강우량을 기록하였다. 2010년의 경우 최대 강우 발생 시기가 8월 중순 이후로 늦어졌고 이에 따라 강우유입수의 이동이 늦어져 식물플랑크톤의 발생도 늦은 경향을 보였다. 상류에 위치한 회남수역의 경우 다른 수역에 비해 강우유입수의 영향이 직접적이고 빠르기 때문에 다양한 종류의 식물플랑크톤이 비교적 많이 발생한다. 2010년의 경우에도 회남수역의 조류 발생기간과 발생강도도 다른 수역에 비해 높게 관찰되었다. 집중강우기가 늦게 형성되어 강우유입수의 도달이 늦어진 추동 및 문의 수역의 경우 최대 조류발생 시기가 9월 중순 이후로 늦게 나타났다.

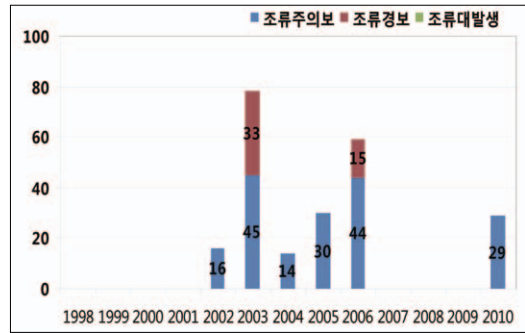
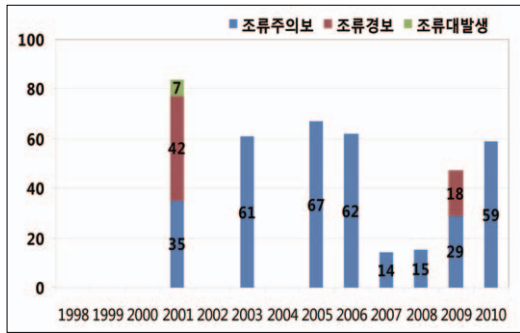
2010년도 대청호의 조류경보 발령은 회남수역에서 7월 7일~7월 22일 사이에 16일간, 9월 2일~10월 14일 사이에 43일간 조류주의보가 발령되었다. 추동수역에는 9월 2일~10월 14일 사이에 43일간 조류주의보가 발령되었고 문의수역의 경우 9월 16일~10월 14일 사이에 29일간 조류주의보가 발령되었다(그림 3). 2010년 대청호의 조류경보 발령상황을



(a) 대청호 전체

(b) 추동수역

그림 3. 대청호의 연도별 조류경보제 발령 현황



(c) 회남수역

(d) 문의수역

그림 3. 계속

종합해 보면 비교적 상류에 위치한 회남수역의 경우 상류에서 유입된 영양염류에 의한 영향이 중·하류 수역에 비해 이르게 작용하여 7월에 잠시 남조류의 발생이 있었으며, 8월 중순 집중강우 이후 유입된 비점오염물질에 포함된 영양염류들은 9~10월 사이의 남조류 발생에 기여한 것으로 보인다. 회남수역보다 하류에 위치한 추동과 문의 수역의 경우 남조류 발생 시기도 회남수역에 비해 늦게 형성되었으며 이에 따라 조류경보 발령기간도 짧게 나타났다.

로 Microcystin-LR에 대해 1 µg/L 이하로 제안하고 있다. 이에 근거하여 상수원수에서 조류경보체계 (Alert level framework)를 운영할 것을 표 4와 같이 제안하고 있다(Chorus and Bartram, 1999). 호주의 경우 상수원 취수구 주변에서 조류경보체계는 *Microcystis aeruginosa*의 세포수와 Cyanobacteria의 총 Biovolume의 크기에 따라 경보 수준을 표 5와 같이 구분하여 적용하고 있다(Newcombe et al., 2010). 세계보건기구와 호주 상수원에서 중간 경보 수준은 각각 남조류의 세포수, *Microcystis aeruginosa*의 세포수에 대해 2,000 cells/mL로써 유사한 값을 적용하고 있다.

3. 조류경보제 개선방안 고찰

1) 외국의 조류경보 제도

세계보건기구(WHO)에서는 먹는물 수질기준으

표 4. WHO 조류경보체계(Alert Levels Framework) 발령기준 제안치

구분	경계수준(Vigilance level)	경보수준1(Alert level 1)	경보수준2(Alert level 2)
남조류(cells/mL)	1 colony/mL 또는 5 filaments/mL 이상	2,000 이상	100,000 이상
biovolume(mm ³ /L)	-	0.2 이상	10 이상
Chlorophyll a(µg/L)	-	1 이상	50 이상

자료: Chorus and Bartram, 1999, Toxic cyanobacteria in water : A guide to their public health consequences, monitoring and management, E & FN Spon.

표 5. 호주 상수원 취수지역에서 조류경보체계 발령기준

구분	낮은 경보 (Low Alert)	중간 경보 (Medium Alert)	높은 경보 (High Alert)	매우 높은 경보 (Very High Alert)
<i>Microcystis aeruginosa</i> (cells/mL)	500 이상	2,000 이상	6,500 이상	65,000 이상
Cyanobacteria의 총 biovolume(mm ³ /L)	0.05 이상	0.2 이상	0.6 이상	6 이상

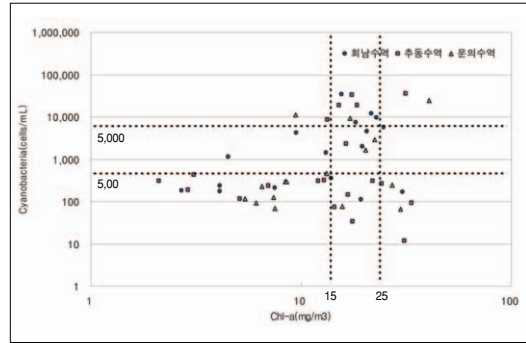
자료: Newcombe et al., 2010, Management strategies for cyanobacteria(Blue-green algae) : A guide for water utilities, Water Quality Research Australia, Research Report No.74.

2) 우리나라 조류경보제 현황 및 개선 방안

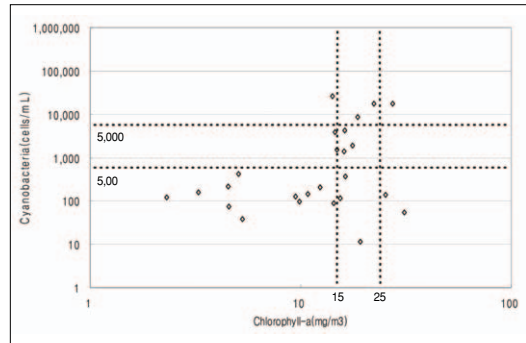
우리나라에서는 Microcystin 등 남조류 독소에 대한 WHO의 먹는물 수질기준 제안치를 적용하고 있지 않다. 대청호 조류경보제 시행계획(환경부, 2011)에서는 남조류 세포수인 5,000 cells/mL를 조류경보 기준으로 정하고 있다. 조류주의보 기준은 이보다 10배 적은 500 cells/mL을 적용하고 있다(표 3).

현행 발령기준은 상수원인 대청호 수역에 다양하게 분포하는 남조류의 발생을 고려하지 못하고 있으며, 정수장 취수구 주변의 상수원수가 아닌 상수원 대상수역에서 조류경보제를 위한 시료를 채수하여 분석하므로 남조류 세포수 및 Chlorophyll a에서 차이가 존재한다. 이를 극복하기 위하여 우선 *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Microcystis*, *Oscillatoria* 등의 유해 남조류의 발생을 고려한 조류경보제 시행지침을 개정하는 것이 필요하며, 먹는물의 안전을 확보하기 위하여 경보단계에서 Microcystin의 농도를 고려하는 것이 바람직하다. WHO에서 조류경보체계 경보 발령기준으로 제시한 Chlorophyll a 농도는 대청호에서 1 µg/L 이상을 유지하고 있기 때문에 조류경보제 항목으로 적용하기에는 국내 실정에 적합하지 않다. 우리가 준거기준으로 활용하려고 하는 WHO 조류경보체계 발령기준 제안치는 인체에 안전하도록 남조류 독소의 먹는물 수질기준 제안치를 반영하고 있기 때문에 유해 남조류와 남조류 Biovolume을 조류경보제 항목으로 고려하였다. 이에 따라 WHO의 조류경보체계 발령기준을 참고하여 우리나라 수계에서 조류발생 특성을 반영하여 표 6과 같이 발령체계를 개선방안을 제시하였다. 대청호 조류경보제 대상수역은 상

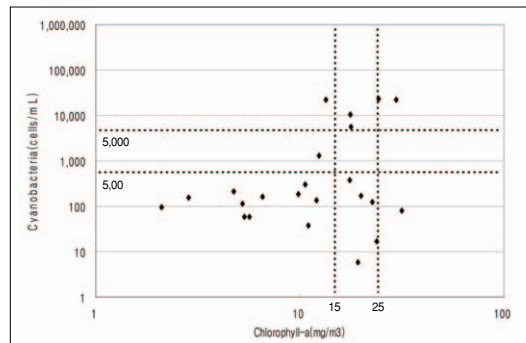
수원보호구역 내에 있어 각종 여가활동, 어업활동 등 직접 이용하는 것이 금지되어 있고 정수처리 공



(a) 현재 조류경보제 적용



(b) 3개 수역 평균 적용



(c) 2개 수역 평균 적용

그림 4. 평균개념을 적용한 조류경보제 발령일수

표 6. 조류경보제 발령체계 개선방안

구분	주의보	경보	대발생
남조류	유해 남조류 종류별 filaments 또는 colony/mL로 설정	Microcystin 섭취허용농도에 해당하는 유해 남조류의 세포수 (cells/mL)로 설정	경보수준 세포수의 50배로 설정
Biovolume(mm ³ /L)	-	경보수준에서의 남조류 총 biovolume으로 설정	경보수준 남조류 총 biovolume의 50배로 설정

※ Microcystin은 조류경보제와 연계하여 먹는물 수질감시항목으로 운영

정을 거쳐 독소가 제거된 정수를 수돗물로 공급하므로 Microcystin은 현재 환경부에서 운영하고 있는 수돗물 감시항목 등 기준에 포함시켜 운영할 수 있을 것으로 판단된다.

현행 조류경보제 시행 지침에 따라 대청호 조류경보제 발령은 3개 수역에 개별적으로 적용하고 있다. 전체적으로 주의보 14회 경보 2회 발령하였지만 3개 수역에서 발령기간이 겹쳐지는 시기를 제외하면 주의보 7회, 경보 2회로 조정할 수 있다(그림 4-a). 평균 개념을 도입하여 현재 조류경보제를 시행하는 3개 수역(회남, 추동, 문의)의 남조류 세포수 및 Chlorophyll a의 평균값을 계산하여 적용한 경우 주의보 5회, 경보 1회로 줄어들고(그림 4-b), 대청호 상수원수를 공급하는 2개 수역(추동, 문의)만을 대상으로 적용하였을 때는 주의보 3회, 경보 1회로 줄어드는 것으로 나타났다(그림 4-c). 즉, 2010년에는 조류경보제 발령일수가 59일간이었으나 평균개념을 도입하여 3개 수역에 적용하였을 때 49일간, 2개 수역에 적용하였을 때 28일간 정도로 줄일 수 있어 조류경보제 대응에 소요되는 사회적 비용을 절감할 수 있는 것으로 판단된다.

IV. 결론

대청호는 320 여만명이 사용하는 상수원수로서 산업화 및 도시화가 급속히 진행되고 있는 시점에서 그 중요성이 더 커지고 있다. 대청호에서 부영양화와 조류 발생을 억제하기 위하여 수중폭기시설, 조류차단막, 황토살포, 수초재배섬, 생태습지 등 다양한 대응책을 실시하고 있으나 수질을 개선하는 것보다 현 상태를 유지하는 정도의 역할을 하고 있다. 또한 대청호의 경우 부영양화가 어느 정도 진행되어 수체에서 질소와 인의 농도가 높은 상태로 유지되고 있고, 또 유입 하천에서 영양염류가 강우 시 지속적으로 유입되며 수체에서 조류 발생 및 사멸에 따른 내부 영양염류 부하가 매년 반복되어 발생하고 있다.

조류경보제를 운영함으로써 대청호 지역주민에

게 경각심을 일깨워 조류 발생에 대비할 수 있게 하는 효과가 있으나 효과적으로 대응할만한 대책을 수립하는 것이 쉽지 않다. 기본적으로 현행의 조류경보제 체계를 유지하면서 이를 지금까지 실시되고 있는 대책을 그대로 활용하고 사회적 비용을 저감할 수 있는 방안을 새롭게 고민해야 하는 것이 바람직하다.

따라서, 여러 나라에서 적용하고 있는 WHO의 조류경보제를 우리나라에 도입하면서 우리나라 호수에서 조류발생 특성을 고려한 경보제를 도입하는 것이 필요하다. 국내 댐호에서 여름철 조류발생을 고려하여 조류경보제 발령기준 항목으로 유해 남조류와 남조류 전체 Biovolume을 채택하고, 상수원수에서 남조류의 독성을 평가하는 항목인 Microcystin을 먹는물 감시항목으로 운영하는 것이 바람직하다고 판단된다. 또한 대청호에서 조류경보제 발령은 상수원보호구역 내 3개 수역에 대해 개별적으로 적용하고 있지만 수역이 상호 영향을 주고받기 때문에 회남, 추동, 문의 등 3개 수역 또는 추동, 문의 등 2개 수역의 평균값을 계산하여 조류경보제를 운영하는 것이 조류발생 대책 시행에 따른 소요 비용을 절감할 수 있는 것으로 판단된다.

참고문헌

- 국립환경과학원, 2005-2009, 대청호 수질 및 조류 발생 실태 조사.
- 국립환경과학원, 2008, 조류예보제 발령기준 적정화 방안 연구.
- 국립환경과학원, 2010, 대청호 및 보령호 조류예보제 운영보고서.
- 국립환경연구원, 1997~2004, 금강수계 상수원 수질조사.
- 환경부, 2008, 수질오염공정시험기준.
- 환경부, 2011, 2011년 조류경보제 시행계획.
- APHA, AWWA, WEF, 1992, Standard Method for the Examination of water and wastewater.

- Chorus, I., and Bartram, J., 1999, Toxic cyanobacteria in water : A guide to their public health consequences, monitoring and management, E & FN Spon.
- Falconer, I.R., 2005, Chapter 5. Cyanobacteria poisoning of livestock and people, 「Cyanobacterial toxins of drinking water supplies」, CRC Press, 77-93.
- Figueiredo, D.R., Azeiteiro, U.M., Esteves, S.M., Gon?alves, F.J.M. and Pereira, M.J., 2004, Microcystin-producing blooms - a serious global public health issue, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 59, 151-163.
- Harper David, 1992, *Eutrophications of freshwater: principles, problems and restoration*, Chapman and Hall.
- Jochimsen, E.M., Carmichael, W.W., Cardo, D.M., Cookson, S.T., Holmes, C.E.M, Antunes, B.C., Melo Filho, D.A, Lyra, T.M., Barreto, V.S.T., Azevedo, S.M.F.O. and Jarvis, W.R., 1998, Liver failure and death after exposure to microcystins at a hemodialysis center in Brazil, *New England Journal of Medicine*, 338(13), 873-878.
- National Rivers Authority, 1990, Toxic blue-green algae, Water quality series No.2, Eastbury House, London.
- Newcombe, G., House, J., Ho, L., Baker, P. and Burch, M., 2010, Management strategies for cyanobacteria(Blue-green algae): A guide for water utilities, Water Quality Research Australia, Research Report No.74.