

연속 측정된 대청호 Chlorophyll-*a* 의 자료 특성 및 상관 분석

연인성 · 홍지영[†] · 홍은영 · 임병진

국립환경과학원

The Characteristics and Correlation Analyses of Chlorophyll-*a* Data Monitored Continuously in Daecheong Reservoir

Insung Yeon · Jiyoung Hong[†] · Eunyoung Hong · Byungjin Lim

National Institute of Environmental Research

(Received 23 August 2010, Revised 8 October 2010, Accepted 12 October 2010)

Abstract

The toxin of Cyanobacteria (blue-green algae) during summer season has been a problem and early prevention should be considered. A variety of methods can be used to forecast algal blooms and this study aims at examining feasibility of chlorophyll-*a*. The real-time data were collected by automatic water quality monitoring system (AWQMS) in Daecheong reservoir and invalid data were sorted by experts. And then, the sorted data were filled using linear interpolation. When the concentration of chlorophyll-*a* increased by 15 mg/m³, water temperature and pH exceeded 26.8°C and 9.5 respectively. As a result of correlation between chlorophyll-*a* and other parameters(i.e. water quality items and hydrological data), temperature ($r=0.502 - 0.574$), pH ($r=0.583 - 0.681$), total organic carbon (TOC, $r=0.583 - 0.681$) comparably had higher values. Meanwhile, the data around a day or two showed the highest correlation. In addition, chlorophyll-*a* is considered to be significantly effected by precipitation and inflow.

keywords : Algal blooms, Automatic water quality monitoring system, Chlorophyll-*a*, Daecheong reservoir

1. 서론

다목적댐의 설치 목적에 따라 홍수조절, 수력발전, 용수 공급 등에 많은 기여를 해왔으나, 정체된 수체와 영양염류의 농도 증가에 따른 최적의 생육 조건은 여름철 조류로 인한 수질문제를 가져왔다. 호소 등에서의 조류대발생은 정수처리장 여과지 폐색과 산소고갈로 인한 수생태계를 교란한다. 장마철 이후에 발생하는 남조류의 독성 또한 큰 문제로 대두되어져 왔으며, 조기 차단이 고려되어야 한다.

조류의 성장과 천이를 조절하는 중요한 요소는 빛과 수온, 부력, 무기 및 유기 영양염류, 포식관계이며, 각 조건들이 최적의 조합을 이룰 때 조류는 급성장하는 것으로 분석(Wetzel, 2001)되고 있다.

현행 조류예보제는 항목분석에 장시간이 소요되어 실제 정보 시점에서는 이미 조류 대발생으로 인해 호소 수질이 악화되고 조류의 제거를 위해서도 많은 노력이 수반되어 선제적 조류 저감 대응에 한계가 있다. 또한 남조류의 독소는 조류가 지수성장 할 때는 조류 증식에만 전념하여 독소분비에는 관여하지 않으나, 이미 조류가 급성장하여 더 이상 증식할 필요성이 없을 경우, 즉 정체기 내지 사멸초기에 다량의 독소를 분비한다고 보고되었다(국립환경연구원, 1999).

환경부는 과거 수질오염 사고를 계기로 전국 주요 상수원 및 오염사고 취약지역 등에서 수질 상태를 연속적으로 자동측정하고, 상시 감시할 필요성을 제기하였다. 이에 따라 수질관리 업무를 효율적이고 능동적으로 수행하고, 수질오염사고 발생시 신속한 대응조치를 할 수 있는 조기경보 체계 구축을 위하여 전국 52개소에 수질자동측정망을 설치·운영하고 있다(임병진 등, 2010a). 수질자동측정망에 의한 실시간 감시 및 예측은 조류발생에 대한 조기 차단을 위해서 상당히 효과적으로 활용될 수 있을 것이다.

호주에서는 2007년부터 하구를 관리하기 위해 Chl-*a*, 전기전도도, 염분, 수온 등을 실시간으로 측정하여 매 15분마다 데이터 로거를 통하여 자료를 전송하고 인터넷으로 공개하고 있다. 조류발생은 일반적으로 수중에 영양염류가 증가하고 기온이 높을 때 발생한다. 호주의 하구관리 프로그램에 의하면 Chl-*a* 농도 20 µg/L를 잠재적인 조류발생의 지표로 삼고 있다. 기준 초과시에는 정보가 전자우편(E-mail)을 통하여 위원회 담당자에게 전달되고 규정에 따라 대응절차가 진행된다(HSC, 2008).

미국 캔사스주의 올라디호수에서는 수질자동측정기를 이용하여 chlorophyll-*a* (Chl-*a*), 수온, pH, DO, 탁도 등을 실시간으로 측정하고 있으며, 오리건주 노스샌티엄강의 경우, 1996년 큰 홍수가 발생한 이후 퇴적물의 이동과 근원지를 파악하기 위하여 수온, pH, EC, 탁도를 측정하고 있다. 펜

[†] To whom correspondence should be addressed.
hong4488@korea.kr

실베니아주에 위치한 엘리게이니강에서는 수온, pH, EC, DO, 탁도, TOC 등과 Chl-*a* 를 자동측정하고 있다. 일본의 비와호에서도 pH, DO, TN, TP 등과 함께 측정기기의 발달로 인해 UV 흡광도, 탁도, Chl-*a* 가 현장에서 실시간으로 측정되고 있다(국립환경과학원, 2006).

국내에서도 조류발생 특성분석을 위해 수질항목 및 지수와 Chl-*a* 와의 상관관계 분석(양형재와 김병익, 2006; 임병진 등, 2010b), 조류발생 및 이동에 관한 모델링(윤순주 등, 2006; 윤성규 등, 2010) 뿐만 아니라 남조류 발생 및 독소 생성과 강우가 조류발생에 미치는 영향 분석 연구(국립환경과학원, 2008; 박혜경 등, 2006; 이재용 등, 2010; 천세억 등, 2006)를 시도하여 왔다. 이번 연구는 Chl-*a* 를 포함하여 대청호에서 실시간으로 측정하고 있는 수질자동측정 항목 즉, 수온, pH, EC, DO, TOC, 생물독성지수, TN 및 TP 와 국가 수자원관리 종합정보시스템 및 기상청에서 제공하고 있는 수문 기상자료 즉, 댐수위, 유입량, 강우량 자료의 분석을 통해 호소에서 실시간으로 조류발생을 예측하는데 활용할 수 있는지를 검토하는데 그 목적이 있다.

2. 연구방법

조류의 종류와 생물량을 평가하는 방법에는 여러 가지가 있겠으나, 일반적으로 Chl-*a* 의 값을 통해 조류의 발생 정도를 추정할 수 있다. 연구에 사용한 Chl-*a* 자료는 수질자동측정 장비를 통해 수집이 가능하며, 대청호 수질자동측정소(Fig. 1)의 2007, 2008년도 자료를 분석하였다.

잠재기나 지수성장기 때는 세포수와 Chl-*a* 농도와는 아주 뚜렷한 정의 상관성을 갖고 있지만 정체기와 사멸기 때는 시간에 따라 다소 다르게 보이고 있다(국립환경연구원, 1999). 대체로 대청호의 여름철 우점종은 남조류이며, 남조류의 증가시기에 Chl-*a* 분석 및 세포수 계수를 통해서 정량적인 분석이 가능하고 발생 정도를 평가할 수 있다.

연구에 사용된 자료는 그래프 도시를 위해서 시간자료를, 상관분석을 위해서는 일자료를 사용하였다. 일자료는 시간

자료들의 평균값으로 전문가들의 검토를 통해서 측정 항목 별로 이상치가 확인되었으며, 이상치 처리로 인해 삭제된 자료는 전후의 유효 자료를 통한 선형 보간이 이루어졌다(임병진 등, 2010a).

자료간의 인과관계 분석을 위해서 자기상관 분석과 교차상관 분석을 수행하였다. 자기상관 분석은 Chl-*a* 의 분석 자료수와 평균을 통해 계산되었고, 교차상관 분석은 Chl-*a* 의 농도와 타 항목 농도와의 공분산, 각 항목의 표준편차를 통해 계산되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 자동측정 자료의 특성

조류의 대발생은 영양염류의 농도뿐만 아니라 수온, 광량, 강우량 등의 환경요인에 의해서 영향을 받는다(정승현 등, 2005). 이는 조류의 성장 및 광합성에 관련된 인자들이며, 2008년에 수집된 수질자동측정망 시간자료를 사용하여 Chl-*a* 농도와 다른 항목과의 산포도 분석을 실시한 결과에서도 수온($r=0.547$)과 pH($r=0.653$)가 조류와의 상관성이 높은 것으로 나타났다.

수온은 최초로 남조류 수화시점을 결정하는 주요 요인으로 대발생기에 이어 소멸기까지 양의 상관성을 보이며 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다(한국수자원공사, 2002). 남조류는 20°C 이상의 높은 수온을 선호하는 것으로 알려져 있지만 종에 따라 적응 온도 범위가 다양하다. *Microcystis* 속은 높은 수온에서도 잘 증식하며 열대부터 온대에 걸쳐 넓게 분포하는데, 온대지방에서는 한 여름에만 녹조현상이 일어난다. *Anabaena* 와 *Aphanizomenon* 은 *Microcystis* 보다 낮은 수온에서 증식한다(경기개발연구원, 2001).

일반적으로 조류대발생의 주요 원인 조류로 알려진 남조류의 생육에 적절한 수온은 25~30°C이며, 15°C 이하와 40°C 이상에서는 증식이 없거나 아주 미미하다는 연구가 보고된 바 있다(박혜경 등, 1993). 대부분의 남조류 성장률은 25°C 이상에서 최적이며(Robarts and Zohary, 1987), 녹조류나 규조류의 최적 생육 수온보다 높기 때문에 여름에 주로 대발생을 야기한다고 하였다(Mur et al., 1999).

현재 국내 조류예보 발령기준은 Chl-*a* 농도와 남조류의 세포수에 따라 조류주의보, 경보, 대발생, 해체의 4단계로 구분된다. Fig. 2는 2008년도 수질자동측정망 자료의 산포도를 분석한 결과로 조류주의보 수준에 해당하는 Chl-*a* 농도인 15 mg/m³ 이상인 시기에 수온은 26.8°C 이상을 보였다. 조류대발생은 pH의 증가를 야기시키며 pH가 9.5 이상일 때, 대체로 Chl-*a* 는 주의보 기준을 초과한 것으로 분석되었다.

2007, 2008년에 수질자동측정기로 대청호 현장에서 측정된 Chl-*a* 농도와 실험실에서 습식으로 분석한 조류예보제 자료와 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. 2007년도에 Chl-*a* 농도와 유독남조류 세포수가 동시에 조류주의보 기준을 초과한 것은 8월, 9월, 10월 중 1회씩 발생했다. 특히 10월에는 연속 2회 이상 조류주의보 기준을 초과하여 조류주의보가 발령되었다. 우점남조류는 *Microcystis*, *Oscillatoria*, *Aphani-*

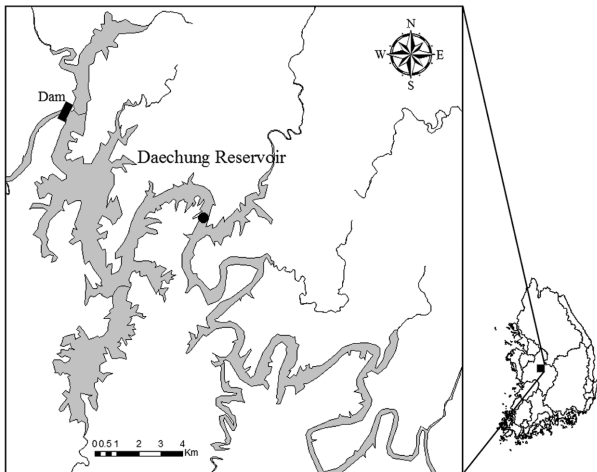


Fig. 1. The map showing the location of a automatic water quality monitoring station in Daechung reservoir.

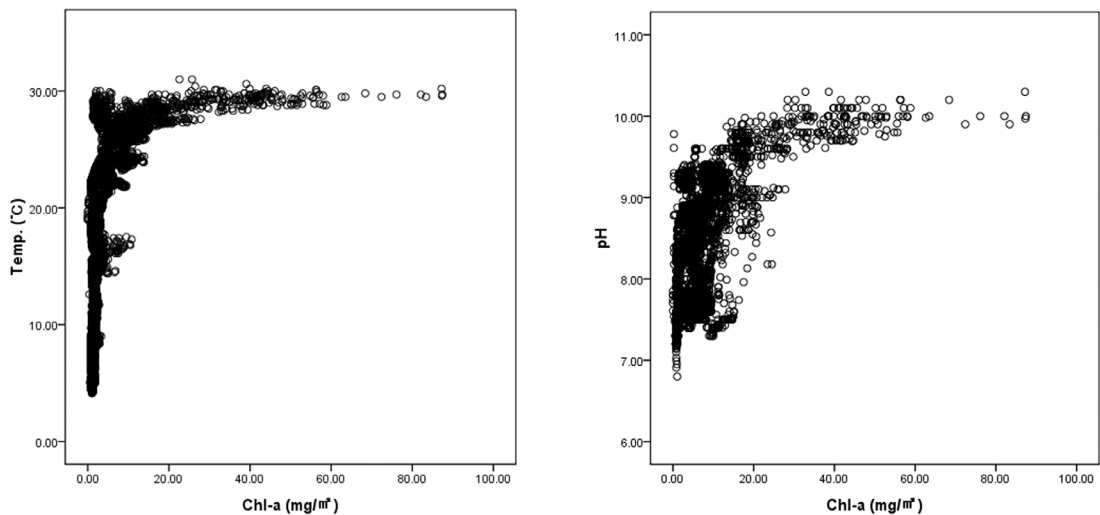


Fig. 2. Scatter diagram between water quality parameters and Chl-a.

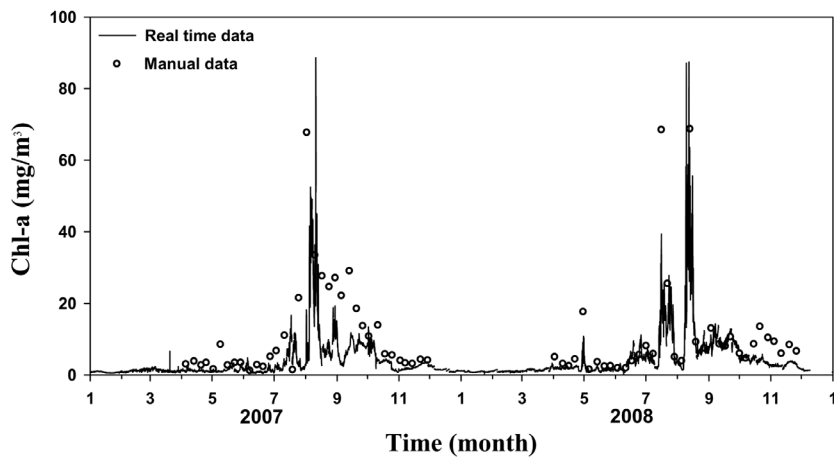


Fig. 3. The comparison of Chl-a concentration between algae warning data and automatic water quality monitoring data.

zomenon, *Anabaena* 가 서로 번갈아 3종씩 관찰되면서 조류주의보 수준을 초과하였지만, 우점조류는 대부분 규조류들이었다. 2008년 Chl-a 농도가 조류주의보 수준(15 mg/m^3)을 초과한 것은 4회였으며, 유독남조류 세포수가 조류주의보 수준(500 cells/mL)을 초과한 것은 12회, 조류경보 수준($5,000 \text{ cells/mL}$)을 초과한 경우는 3회로 나타났다. 7월 중순에 *Anabaena*의 대발생으로 조류경보 수준을 초과하였다. 7월 하순에도 *Microcystis*가 가세하면서 남조류도 조류주의보 수준을 초과하여 조류주의보가 발생하였다. 그러나 7월 말 다량의 강우로 Chl-a 농도는 물론 남조류 수가 급격히 감소하거나 사라지면서 해제되었다(국립환경과학원, 2009).

자동과 수동으로 측정된 자료는 대체로 유사한 변화 추이를 보였다. 다만, 조류경보 수준이하($\leq 25 \text{ mg/m}^3$)에서는 수동 측정된 Chl-a 농도가 자동측정 농도보다 다소 큰 경향을 보였는데, 수동측정 자료는 1회 측정하여 분석한 결과인데 반해 자동측정 자료는 5분자료를 평균하는 과정에서 생긴 오차로 판단된다. 또한 첨두(peak) 값은 자동측정망에서의 측정치가 높게 나타났으며, 수동측정이 이루어지지 않은 기간 동안에도 연속적인 측정 및 분석이 가능하여

조류대발생 기간 내의 분석을 위해서는 보다 효과적인 것으로 판단된다.

3.2. Chl-a 상관 분석

2007년과 2008년의 Chl-a 농도 일자료를 사용한 자기상관 분석 결과, 시차에 따른 상관성의 변화 추이는 서로 비슷한 경향을 보였으며, Chl-a 농도는 2007년의 경우에 Lag 20, 2008년의 경우에 Lag 25의 주기성을 보였다(Fig. 4).

자기 상관은 1일 전후의 자료간에 가장 상관성이 컸으며, 점차 감소하다가 2-3주 후의 자료와 상관성이 다시 커지는 것으로 나타났다. 이는 여름철 Chl-a의 대발생과 소멸 기간에 따른 영향으로 판단된다.

2007년과 2008년 Chl-a 농도와 수질항목(수온: Temp., 수소이온농도: pH, 전기전도도: EC, 용존산소: DO, 총유기탄소: TOC, 물벼룩 좌우 펄스: *Daphnia Toxicity Left*, *Daphnia Toxicity Right*, 총질소: TN, 총인: TP) 및 수문(댐 수위: Water Level, 댐 유입량: Inflow), 기상(강우: Rainfall) 자료에 대한 교차상관 분석결과, 수온, pH, TOC와의 상관성이 대체로 큰 것으로 나타났으며, 자기상관 분석과 유사

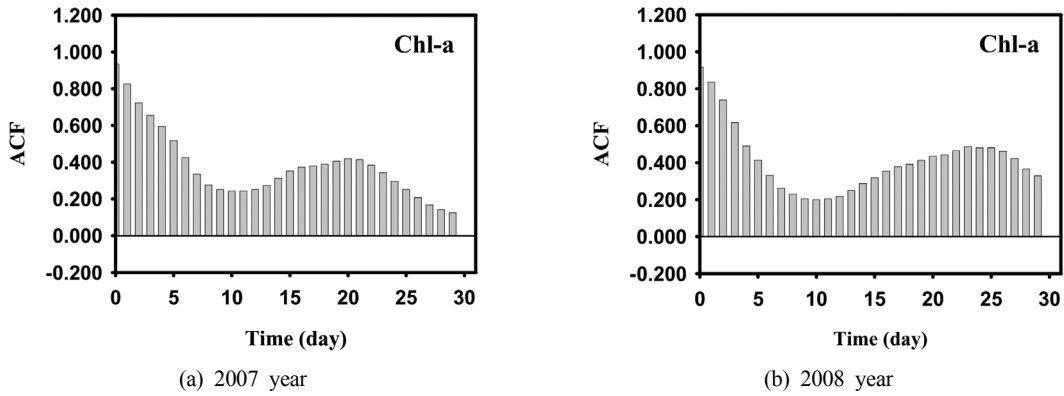


Fig. 4. Auto correlation of Chl-a.

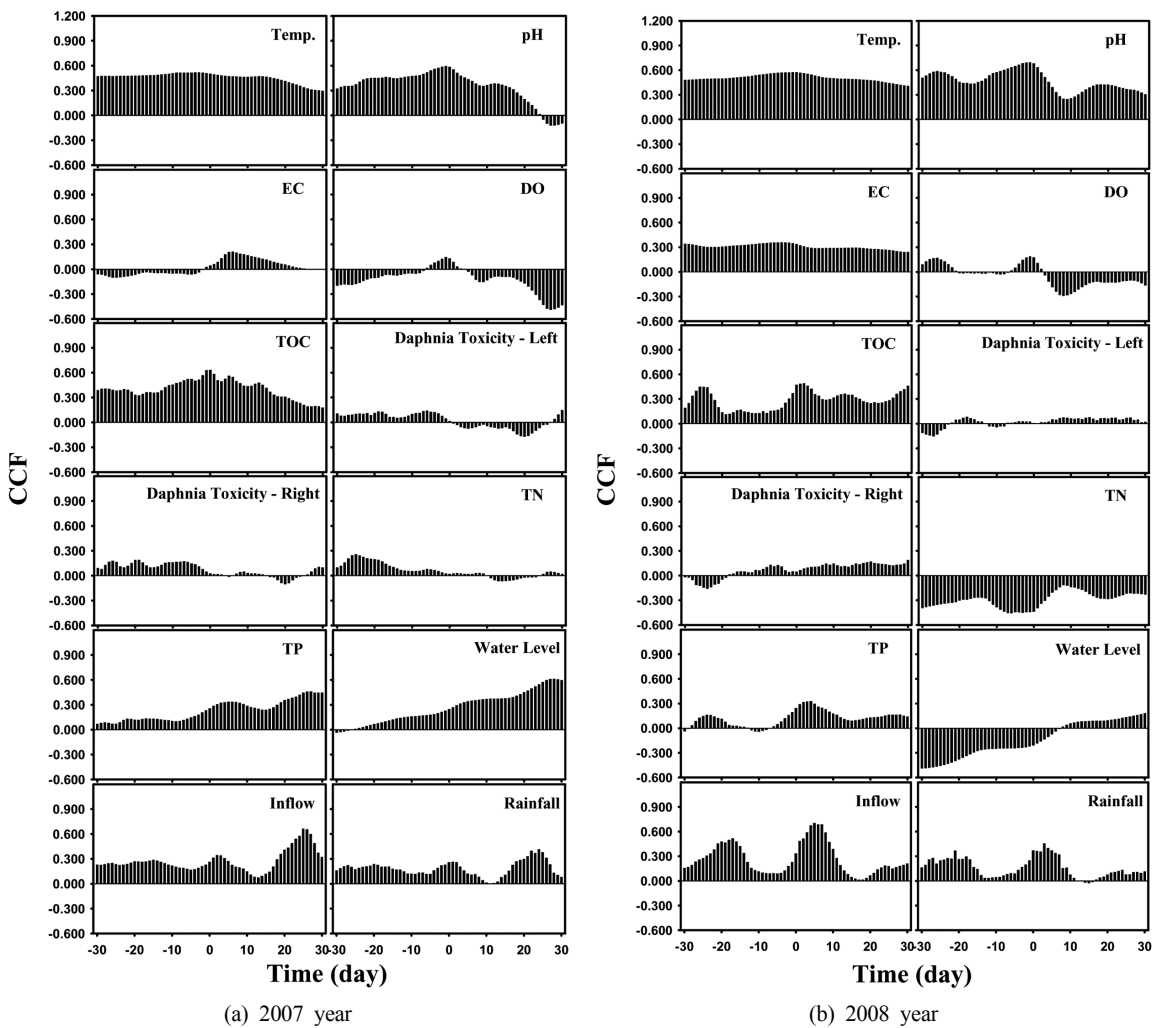


Fig. 5. The analysis of cross correlation between water quality parameters and Chl-a.

하계 1, 2일 전후의 자료 간에 교차상관계수가 가장 컸다. 2007년 Chl-a 와 수온, pH, TOC와의 상관계수는 각각 0.502, 0.583, 0.632, 2008년의 경우에는 각각 0.574, 0.681, 0.472 로 다른 항목에 비해 높게 나타났다(Fig. 5). TOC의 경우, Chl-a의 급증 이전에는 강우 및 영양염류의 증가로 축적된 양이며, 이후에 상관성이 높은 경우는 대발생 이후, 조류 사체에 의한 영향이 있었을 것으로 판단된다. 조류가 사멸

하면 바닥으로 가라앉으면서 미생물에 의한 분해가 일어나고. 이때, 이 분해과정에서 많은 산소를 소모하여 심층수에서는 산소의 고갈이 일어나며, 결과적으로는 물고기들이 죽어간다(국립환경연구원, 1996). 이에 따라 조류발생에 대한 선제적 저감 대책이 요구되며, 대응 방안으로 환경보전을 위한 유입 유량을 고려하여 상류 댐과 연계하여 운영하는 방안도 검토할 필요가 있다.

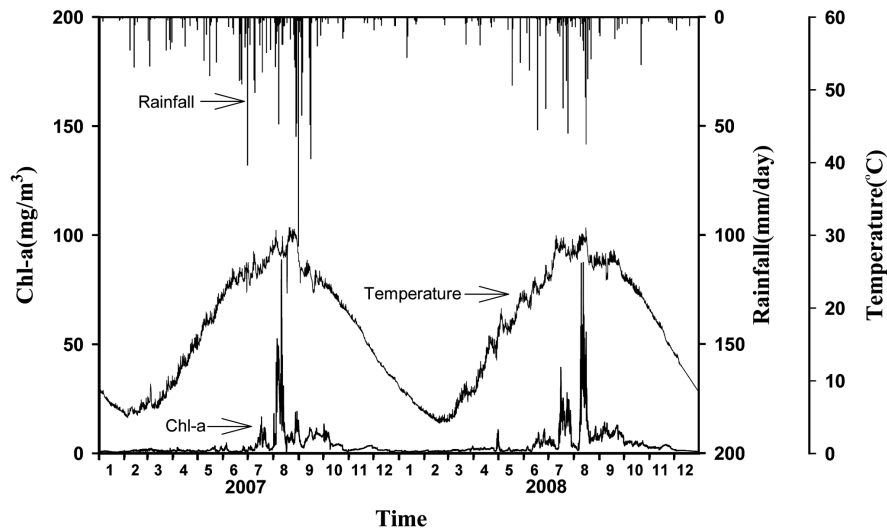


Fig. 6. Interaction between temperature, rainfall and Chl-*a* concentration.

강우는 남조류 수화 발생시 조절 요인으로 크게 영향을 미칠 수 있다. 일반적으로 강우에 의해 조류발생을 저감시킬 수 있는 영향은 표층수에 집적되는 남조류의 생태적 특성으로 인한 직접적 플러싱(flushing) 효과, 유입수의 급증으로 인한 수온성층의 교란효과, 부유물질의 증가로 인한 남조류의 광합성 감소 등이 있다(Henderson-Seller and Markland, 1987). 또한 강우에 의해 수화가 촉진되는 영향은 영양염류의 유입을 들 수 있다. 강우에 의한 50 CMS 정도의 유입량은 남조류 성장에 필요한 영양염류 등을 공급하고, 400 CMS 이상의 유입은 플러싱 효과로 작용하는 것으로 분석된 연구 결과(박종근, 2005)가 있다.

2007년과 2008년의 대청호 유역의 강우량은 총 1,357.3 mm, 총 782.4 mm로 나타났으며 하절기에 약 2차례의 집중호우가 발생하였다. 집중호우 뒤에 플러싱 효과에 의한 Chl-*a* 농도가 급격히 감소하였으나, 약 2주 후에 다시 증가하여 최고 농도(87.4 mg/m³)에 도달하였다(Fig. 6). 이재정 등(2008)은 집중강우기에 영양염류가 일시에 유입되고 그 이후에 수온 상승과 일사량 증가 등의 환경조건이 남조류의 생육에 적합하게 형성되기 때문에, 집중강우가 발생한 이후 1~4주 후에 조류예보가 집중적으로 발생한 것으로 설명하였다.

강우량의 강도와 시기에 따라 영양염류의 유입에 따른 조류대발생이 있는 측면과는 다르게 플러싱 효과에 의한 Chl-*a* 농도 감소 효과도 나타내고 있어, Chl-*a*는 강우에 의해 발생된 유입량과의 상관성도 상당히 큰 것을 확인할 수 있었다.

이번 연구 결과는 향후에 조류 발생에 대한 조기 예측 방안을 마련하는 데에 기초자료가 될 수 있다. 연속적으로 측정되는 자료는 시계열적 분석을 통해서 조류발생 시기를 예측하는 데에 활용될 수 있다. 대청호와 같이 다양한 요인이 영향을 미치는 곳에서의 비선형적 예측을 위해서는 자료간의 분석을 통해서 영향을 미치는 인자와 영향을 미치는 시차가 고려되어야 한다. 현장에서 수집되는 측정자료에 대한 세부적인 분석 후, 비선형적 방법론에 의한 Chl-*a*의 예측이 효과적으로 적용될 수 있을 것이다.

4. 결론

- 1) 산포도를 통해서 수질자동측정망의 Chl-*a* 농도와 수온 및 pH와의 높은 상관성을 확인할 수 있었으며, Chl-*a* 농도가 15 mg/m³ 이상으로 조류주의보 발령기준을 초과하였을 때에 수온은 26.8°C 이상, pH는 9.5 이상의 분포를 보였다.
- 2) 자동측정망에서 측정된 Chl-*a* 농도를 수분석으로 수행한 조류예보제 자료와 비교한 결과, 전체적으로 유사한 변화 추이를 보였으며, 첨두(peak) 값은 자동측정망의 자료에서 다소 높게 나타났다. Chl-*a*는 강우에 의해 발생된 유입량과의 상관성이 매우 컸으며, 집중호우에 의한 유입량 증가로 인해 플러싱 효과를 보였다.
- 3) 2007년과 2008년의 대청호 측정소 자동측정망 자료를 이용하여 Chl-*a* 농도의 자기상관 분석을 수행한 결과, 서로 간에 유사한 경향을 보였다. Chl-*a* 농도와 수질항목 및 수문 자료와의 교차상관 분석결과, 항목별로는 수온, pH, TOC와의 상관성이 대체로 큰 것으로 나타났으며, 시차(lag time) 1, 2일 전후의 자료 간에 교차상관계수가 가장 컸다.

이상을 통해서 일반화된 Chl-*a*의 성향에 부합되는 자동측정망 자료의 특성 및 안정성을 파악하였으며, Chl-*a*를 통해서 추정이 용이한 여름철 남조류 등의 조류 예측을 수행할 경우에는 영향 인자와 시차를 고려하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 2009년도 국립환경과학원 박사후연수과정 지원사업에 의해 이루어진 것임

참고문헌

경기개발연구원(2001). *녹조제어 사례에 기초한 녹조 방지*

- 사업의 적용 방안.
- 국립환경연구원(1996). 정책결정자를 위한 부영양화 관리 방안.
- 국립환경연구원(1999). 호소내 조류 대발생에 대한 수면제 어기술에 관한 연구(II) - 팔당호 수역을 중심으로 한 제 어기술의 개발. pp. 173-179.
- 국립환경과학원(2006). 수질자동측정망 측정항목 및 경보기 준의 합리적 조정방안 연구.
- 국립환경과학원(2008). 대청호 수질 및 조류발생 실태조사.
- 국립환경과학원(2009). 2009년 대청호 조류예보제 시행결과.
- 박종근(2005). 대청호의 남조세균 수화 발달 특성. *한국환경생물학회지*, **23**(3), pp. 304-314.
- 박혜경, 서용찬, 조일형, 박병황(2006). 녹조현상 원인조류들의 염소처리에 의한 소독부산물 생성 및 microcystins 유출. *수질보전 한국물환경학회지*, **22**(3), pp. 513-520.
- 박혜경, 천세억, 유재근(1993). 인공배양에 의한 수화원인 남조류의 증식특성 연구. *한국조류학회지*, **8**(1), pp. 47-54.
- 양형재, 김병익(2006). 주암호의 수질변화 및 COD 및 Chl-*a* 농도의 상관관계 분석. *대한환경공학회지*, **28**(12), pp. 1331-1336.
- 유순주, 황종연, 채민희, 김상용(2006). 대청호 유속에 따른 조류이동 영향. *수질보전 한국물환경학회지*, **22**(5), pp. 420-431.
- 윤성규, 공동수, 배우근(2010). 하천형 저수지의 단순 물질수지 모델링. *수질보전 한국물환경학회지*, **26**(3), pp. 420-431.
- 이재용, 자히돌이슬람, 신명선, 정성민, 김법철(2010). 인북천에서 부작조류 현존량의 시·공간적 변동. *수질보전 한국물환경학회지*, **26**(1), pp. 104-110.
- 이재정, 이재안, 천세억(2008). 강우 특성이 대청호 조류예보 발령에 미치는 영향. *공동추제 학술발표회 논문집. 대한상하수도학회 · 한국물환경학회*, pp. 546-547.
- 임병진, 홍은영, 연인성(2010a). 수질자동측정망 자료의 항목별 이상치 비교 분석. *수질보전 한국물환경학회지*, **26**(4), pp. 700-706.
- 임병진, 홍지영, 연인성(2010b). 대청호 내 실시간 수질측정 자료를 이용한 CCME WQI의 적용. *수질보전 한국물환경학회지*, **26**(5), pp. 796-801.
- 정승현, 안치용, 최애란, 장감용, 오희목(2005). 대청호에서 강우와 식물플랑크톤 군집의 관계. *한국환경생물학회지*, **23**(1), pp. 57-63.
- 천세억, 이재안, 이재정, 유영복, 방규철, 이열재(2006). 대청호 유입유량 변동과 수질 및 조류증식의 관계. *수질보전 한국물환경학회지*, **22**(2) pp. 342-348.
- 한국수자원공사(2002). 대청호 남조류 수화발달의 생태기작 연구(2차년도).
- Henderson-Seller, B. and Markland, H. R. (1987). *Decaying Lakes: The Origins and Control of Cultural Eutrophication (Principles and Techniques in the Environmental Science)*, John Wiley & Sons, Chichester.
- Hornsby shire council (HSC) (2008). *Estuary Management Program (2007-2008 Annual Report)*, Australia.
- Mur, L. R., Skulberg, O. M. and Utkilen, H. (1999). Cyanobacteria in the environment. In *Toxic Cyanobacteria in Water: A Guide to Their Public Health Consequences, Monitoring and Management*, I. Chorus and J. Bartram (eds.), E&FN Spon, London, pp. 15-40.
- Robarts, R. D. and Zohary, T. (1987). Temperature effects on photosynthetic capacity respiration, and growth rates of bloom-forming cyanobacteria. *N. Z. J. Mar. Freshwat. Res.*, **21**, pp. 391-399.
- Wetzel, R. G. (2001). *Limnology 3rd*, Academic press.