

4대강 녹조발생 원인규명과 모니터링



이 한 구

K-water 녹조기술센터장
hglee@kwater.or.kr



김 호 준

K-water 녹조기술센터 녹조연구부장
hjoonk@kwater.or.kr



최 광 순

K-water 녹조기술센터 책임연구원
kchoi@kwater.or.kr

1. 서론

최근 여름철에 4대강에서 발생하는 녹조현상은 심미적인 측면과 상수원으로서의 가치 측면에서 사회적 관심이 매우 높아지고 있으며, 전문가에 따라 녹조발생의 원인에 대해서도 서로 다른 견해를 나타내고 있다. 남조류는 1차생산자로서 육상식물과 같이 광합성에 필요한 적당한 빛과 영양소, 적절한 온도와 유속에서 언제든지 발생할 수 있기 때문에 전

세계 호소, 하천, 연안 등에서 빈번하게 발생하고 있다. 지금까지 녹조발생의 요인으로 물속에 녹아있는 영양염류, 온도, 수리학적 요인, 빛 투과, 포식자의 섭식, 박테리아, 바이러스 등이 알려져 있지만, 녹조 현상은 어느 한 요인에 의해 발생하는 것이 아니라 다양한 요인들의 상호작용에 의해 발생하기 때문에 대상 수체의 물리적·이화학적 특성에 따라 녹조발생 주요 인자는 다르게 나타날 수 있다(Paerl et al, 2001).

지금의 4대강은 보 건설 전에 비해 수심과 저수용량 증가에 따른 유속의 감소로 인해 남조류의 성장을 증가시킬 수 있는 요인이 있는 반면, 인 배출기준 강화 및 총인처리시설 도입으로 인한 인 농도 감소는 남조류 성장을 줄이는 요인도 상존하는 환경으로 바뀌었다. 4대강 사업 전 남조류 조사 자료가 부족하여 사업 전․후의 남조류 발생 증감을 직접 비교할 수는 없지만, 총 조류의 현존량(Chl-a농도)을 보면 수계 및 보별 상이한 결과를 나타내었다(4대강사업조사평가위원회, 2014). 한강, 낙동강, 금강에서는 Chl-a 중앙값이 감소한 반면 영산강에서는 증가하였다. 그리고 낙동강의 경우 하류 보에서는 감소한 반면 상류 보에서는 증가한 것으로 나타났다(그림 1).

4대강 사업 이후 낙동강수계의 보별 녹조발생 현황을 보면 오염부하가 크고 체류시간 이 긴 하류지역에서 남조류의 발생이 증가하였고, 특히 가뭄과

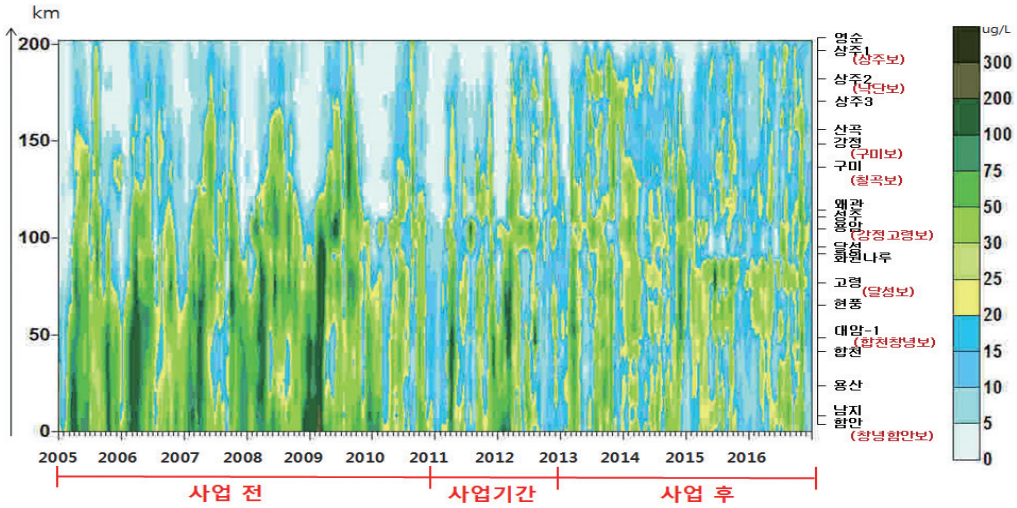


그림 1. 낙동강수계에서 Chl-a 농도의 시공간적 분포(환경부 물환경정보시스템 자료 활용).

폭염이 심한 2015년과 2016년에는 남조류가 더 많이 발생하는 경향을 보여 수문기상조건에도 많은 영향을 받는 것으로 보인다(그림 2). 또한 연도별 월별 녹조발생 패턴도 상이한 것으로 나타났다. 특히 가뭄이 심한 2015년에는 12월까지 남조류가 출현하여 녹조발생의 장기화현상이 나타나기도 하였다.

최근 4대강의 하절기 남조류 농도 증가 및 장기화는 가뭄과 폭염이 주요 요인으로 작용한 것으로 판단되나, 모니터링 자료의 부족과 자료의 대표성 및 신뢰성 결여 등으로 과학적인 원인규명에는 한계가 있는 것이 사실이다. 환경부의 2013년~2015년 4대

강 보 측정망 자료 중 남조류개체수와 영양염류(TN, TP), 수온, 체류시간과의 다변량회귀분석과 기여율 분석 결과 녹조발생의 주요 요인이 수계별 및 보별 서로 상이한 결과를 보였다(표 1). 이러한 결과는 보다 과학적인 녹조발생 원인을 규명하기 위해서는 녹조발생에 영향을 주는 물리-화학-생물학적인 요인들에 대한 상세한 모니터링 자료의 확보가 우선되어야 함을 시사한다.

최근 과학적인 모니터링 기법을 통해 다양하고 유용한 자료를 수집하고 이를 통한 녹조발생의 복잡한 기작을 이해하기 위한 연구가 진행되고 있으며, 이

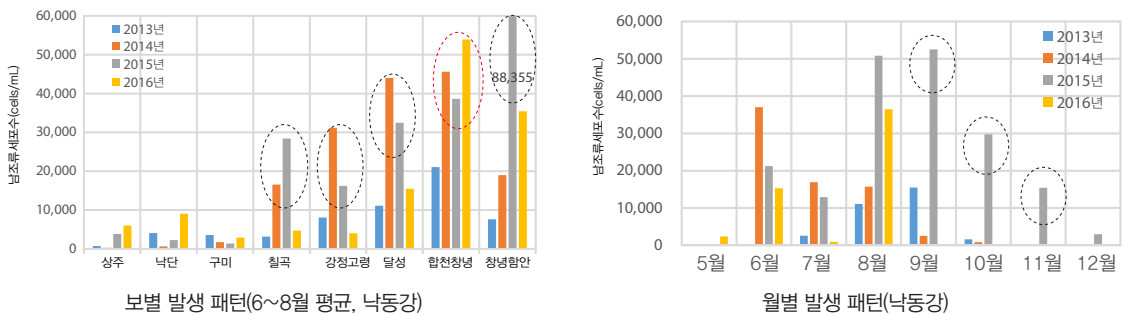


그림 2. 낙동강수계 보별 및 월별 녹조발생 패턴

표 1. 4대강 보지점에서 남조류세포수와 영양염류, 수온, 체류시간과의 다변량회귀분석

낙동강수계							
상주보	낙단보	구미보	칠곡보	강정고령보	달성보	합천창녕보	창녕함안보
TN	TN	TN	TN	체류시간	수온	수온	TN
한강수계 보 전체	금강수계			영산강수계			
	세종보	공주보	백제보	승촌보	죽산보		
TN	수온	수온	TN	수온	수온		

☞ 적용프로그램 : STATA 통계패키지 14 version

를 통하여 발생지점의 맞춤형 관리와 사전 예방적 조치 등 선제적이고 실효성 있는 녹조관리가 이루어 질 것으로 판단된다.

2. 기술개발 현황 및 동향

2.1 점단위 모니터링

4대강의 수질 및 녹조관리를 위한 모니터링은 환경부에서 보 구간 및 유입하천에서 일반측정망, 총량측정망, 자동측정망을 구축하여 수행하고 있다. 일반 및 총량지점은 총 87지점(보 본류구간 48지점, 지류 39지점)이며, 자동측정망은 32지점이다. 일반측정망의 경우 주간단위(7일)로 측정하는 것을 기본으로 하고 있으며, 지류의 경우는 주간 또는 월 단위(30일)로 측정하고 있다. 녹조관리를 위한 조사는 조류현존량(chl-a, 분류군, 유해남조류 세포수) 및 조류기원 이취미, 독소 등을 조사하고 있다.

환경부에서 4대강 유역의 주요 하천과 호수에서 총 56개 지점(하천48, 호수 8)의 수질자동측정망을 운영하고 있으며, 수온, pH, DO, 전기전도도, TOC, 탁도, TN, TP 모니터링 하고 있다. 그리고 환경관리공단에서는 4대강 수계의 수질감시를 위해 70개소의 상시 수질측정지점을 운영하고 있다. 그러나 현재 운영하고 있는 국가자동측정망은 대부분 수질감시와 수질변화를 파악하기 위해 운영되고 있

고, 4대강의 녹조발생 원인규명을 위한 상시 모니터링 자료는 부족한 실정이다. 그리고 녹조발생의 원인물질의 유입부하량 산정을 위해 필요한 유량측정은 4대강 보 구간 본류와 주요 지류에 총 63개 지점에 수위측정망을 운영하고 있는데, 일부 지점의 경우 보가 설치되면서 하천구역에서 저수구역으로 바뀌어 수위 측정지점의 위치변경이 필요한 실정이다. 현재 K-water에서는 보 앞 지점에서 주간 단위로 다항목 수질측정기로 수온, DO 등 7개 항목을 조사하고 있으며, 낙동강, 금강, 영산강수계의 보에서는 상층, 중층, 심층에서 10분 단위의 수온과 DO를 연속측정이 가능한 고정식 수질자동측정기를 설치 운영하고 있지만, 보 구간 내 조류의 거동 및 예측에 필요한 보다 정밀한 자료 취득을 위한 모니터링 항목 및 지점 등이 추가되어야 할 것으로 본다.

예를 들면 조류발생의 원인분석을 위해서는 보다 정밀한 모니터링이 필요하고, 자료의 대표성 등을 고려하여 입체적인 모니터링이 필요하다. 조류의 성장과 수체 내 분포를 해석하기 위해서는 수중광도계를 이용한 수심별 광도분포 및 광소산계수 산정이 필요하고, 수중의 빛 분포에 대한 조사를 위한 투명도 조사가 포함되어야 한다. 조류의 천이기작 규명에 있어서는 규조류의 필수 영양염류인 규소(Si)에 대한 조사와 포식자인 동물플랑크톤에 대한 조사가 포함되어야 한다. 또한 유역으로부터 조류발생의 원인물질인 영양염류와 함께 유출특성, 부하량 산정, 유역모형 인자 산정 등을 위해 자동채수시스템 구축

을 통한 강우 시 시간별 모니터링이 필요하다.

2.2 면단위 모니터링

녹조의 이동·확산·분포 등 전체적인 녹조발생을 파악하기 위해서는 특정 지점에 한정된 점단위 모니터링 방식만으로는 한계가 있다. 이를 보완·개선하기 위하여 환경부(국립환경과학원)와 K-water에서는 유·무인 항공기에 초분광·다중분광센서를 장착하거나 형광센서 등을 활용하여 녹조발생의 면단위 모니터링 기술개발을 추진 중이다. 초분광센서는 일반 카메라 영상과 달리 가시광선 영역(400-700nm)과 근적외선 영역(700-1,000nm) 파장대를 수백개의 밴드로 세분하여 측정함으로써 조류의 고유분광특성을 이용하여 종별 분포현황 분석이 가능하다. 이와 같은 원리를 이용하여 유해남조류의 광역단위 모니터링이 가능하며, 미국 NOAA에서는 위성영상을 이용한 분석방법의 보완 및 대체 기술로 활용 중에 있다. 현재 핀란드(Specim), 미국(Headwall), 이스라엘(GVS)에서는 유인 및 드론에 장착하거나 지상에 설치하여 상시모니터링 하는 기술을 개발하고 있으며 일부는 상용화 단계에 있다. 다파장형광센서는 미세조류의 분류군별 특정 파장범위에서 방출하는 형광 광도를 측정함으로써 강(Class) 수준에서 분포현황을 모니터링 할 수 있으며, 수심별로 현장에서 측정할 수 있는 장비와 특정 지점에 설치하여 연속적으로 모니터링 할 수 있는 온라인 장비 등이 개발되어 미국(YSI), 독일(BBE)

등에서 상용화 되고 있다.

환경부(국립환경과학원)에서는 녹조가 대량 발생하는 시기를 대상으로 무인항공기에 초분광센서를 장착하여 촬영한 영상을 통해 Chl-a, 피코시아닌 농도 등 면단위 모니터링 연구를 시행하여 정확도 제고와 영상후 처리 자동기술 개발 등을 추진하고 있으며, K-water에서는 초분광·다중분광센서를 활용하여 4대강 녹조발생 우심지역의 영상을 주기적으로 취득하여 신속한 녹조관리를 목적으로 연구를 수행중이다(그림 2). 또한, K-water에서는 다파장형광센서를 선박에 장착하여 녹조류의 면단위 모니터링 기술개발을 추진 중에 있다. 이는 수체에 직접 접촉하는 방법으로 남조류가 분포하는 수심을 고려한 모니터링이 가능하고 후처리 등의 시간소요가 적은 장점이 있는 반면에 아직까지는 광범위 데이터 취득에는 한계가 있다.

면단위 녹조 모니터링은 녹조 발생의 원인규명을 위하여 지속적으로 기술개발이 필요한 분야이다. 하지만, 간접적으로 녹조를 모니터링하는 방식이기 때문에 결과의 정확도 제고를 위한 노력이 이루어져야 하며 기상조건 등 제약사항을 보완하기 위한 연구가 지속적으로 필요할 것으로 판단된다.

2.3 원인규명 연구

녹조 발생원인에 대한 연구는 1960년대 산업화 및 도시화에 의해 유역으로부터 많은 영양염류가 유입되어 하천, 강, 저수지, 호수, 연안 등에



그림 3. 유인항공 및 무인항공을 이용한 조류 면단위 모니터링 사례

서 부영양화 문제가 대두되면서 선진국을 중심으로 진행되어 왔다. 그리고 대부분의 연구는 남조류(Cyanobacteria; bluegreen algae)의 발생기작을 규명하기 위하여 실험실, 메조코즘, 발생현장(호수 전체대상) 등 다양한 환경조건에서 수행되어 왔다. 국내에서는 1990년대 전국의 많은 호수와 강에서 부영양화에 따른 녹조현상이 나타나면서 녹조에 관한 연구가 본격적으로 시작되었으며, 특히 녹조현상이 자주 발생했던 대청호 등 대형 댐·저수지와 낙동강을 중심으로 연구가 수행되어 왔다. 또한 대상 수체의 녹조발생과 수온, 영양염류, 체류시간 등 환경요인과의 상관성 분석연구가 대부분이었으며, 실험실 연구의 경우는 빛, 온도, 영양염류 조건에 따른 녹조의 성장영향에 대한 연구로서 수체의 특성이 다양한 현장의 녹조발생의 원인을 규명하기에는 한계가 있다.

최근 4대강 사업 이후 국립환경과학원에서 현장 규모의 실험장치를 설치하여 남조류 발생과 체류시간, 최적 성장조건(수온, 영양염류, 조도 등), 환경요인과의 상관성, 퇴적물의 유무 등에 대한 실험을 통해 녹조의 발생기작 및 거동특성에 대한 연구(2014-2015)를 수행하였다. 또한 낙동강과 영산강 보 현장에 메조코즘을 설치하여 조류 발생 및 영양염류 농도 규명에 대한 연구도 수행되었다(2016). 낙동강 수계 녹조 우심지역 조류 발생 및 거동 특성 정밀조사 연구(2017~2019)는 진행 중에 있다.

한편 K-water는 4대강 보 구간에서 조류의 천이 기작 및 거동해석을 위한 본류구간과 유입하천에 대한 정밀모니터링(2017~2019)을 추진 중에 있으며, 생산된 자료를 활용하여 녹조 및 대사물질에 대한 예측기술을 고도화하기 위한 연구가 추진 중에 있다. 이러한 다양한 연구를 통하여 4대강의 녹조발생에 대한 원인규명과 예측력이 어느 정도 향상 될 것으로 기대되지만, 4대강에서의 과학적인 녹조관리를 위해서는 앞서 기술하였듯이 녹조발생은 물리-화학-생물학적 요인들이 상호 복합적인 과정을 통해 발생하기 때문에 이러한 기작들을 고려하여 장기

모니터링 계획수립과 함께 통합모니터링 플랫폼 구축이 필요하다.

2.4 예측기술 고도화

최근 미국, 유럽 등에서는 첨단 모니터링과 모델링 기술을 통합하여 유해남조류의 거동을 예측하는 시스템을 운영하고 있다. 한 예로 미국 NOAA에서는 Erie호의 유해남조류에 대한 분자생물학적 및 생태학적 연구와 실시간 모니터링, remote sensing 분석자료 등을 종합하여 Microcystis bloom 규모와 호소 내에서의 동적 움직임을 예측하고 그 결과를 제공한다. 국내에서도 환경부 수질예보제를 통해 녹조예측 결과를 제공하고 있는데, 녹조의 확산 및 저감에 대한 사전예측 정확도 향상을 위한 조류예측모델 고도화 연구가 진행되고 있다. 국립환경과학원에서는 “한국형 조류예측모델 개발”연구를 통해 기존 EFDC 모형을 개선하여 남조류의 생리·생태학적 특성을 반영한 EFDC-NIER(모의 가능한 조류 종의 확장, 남조류 수직 이동 기작 탑재 등)을 개발하였으며 모형의 현장 적용 및 검증에 위한 정밀 입체모니터링을 함께 수행하고 있다.

K-water에서는 댐 저수지와 4대강 보 운영을 위해 수질 및 조류예측 시스템을 운영하고 있으며 예측력 향상을 위한 연구를 지속적으로 수행하고 있다. 특히, 최근에는 4대강 주요 보 구간에서의 유역-하천모형 연계 개선을 통해 유입지류별 특성을 면밀히 고려한 유해남조류 장단기 예측기술 고도화를 추진하고 있다. 또한 모니터링 및 실험기반의 모델 인자를 산정하여 신뢰도를 제고하고자 집중 정밀모니터링을 실시하고 있으며, 이를 토대로 유해남조류의 거동과 대사물질을 예측하는 기술을 실용화 할 예정이다.

이처럼 국내외에서 녹조발생 예측을 고도화하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으나,

국내에서는 녹조를 일으키는 원인종에 대한 생태학적 연구가 최근에서야 활발히 진행되고 있어 이를

반영한 예측모델 개발과 보완이 필요한 실정이다. 또한 정밀모니터링과 실시간 모니터링을 통해 많은 양의 데이터가 축적되고 있으므로, 이러한 빅데이터를 인공지능 등을 통해 조류예측에 적극적으로 활용할 수 있는 방안이 마련되어야 할 것으로 사료된다.

4. 맺음말

전 세계적으로 녹조발생은 산업화 및 인구증가에 따른 유역 오염원이 증가한 수체에서 나타나는 일반적인 현상이며, 최근에는 기후변화에 의해 더욱 더

심각하게 나타나는 경향을 보이고 있는 추세이다. 우리나라 4대강도 70~80년대 급속한 산업화 이후 매년 유속이 느리고 수온이 높은 시기에 발생하였으며, 최근 가뭄과 폭염 등에 의해 발생 강도가 증가하고 장기화되고 있다. 그러나 발생양상과 정도는 매년 다른 양상을 보이기 때문에 녹조관리 및 대응에 많은 어려움이 있는 것도 사실이다. 4대강의 녹조관리를 보다 효율적으로 접근하기 위해서는 녹조발생 특성과 기작규명에 필요한 신뢰성 있는 자료 확보를 위한 모니터링의 선진화가 우선시 되어야하며, 이를 기반으로 녹조발생의 과학적인 원인규명과 예측기술의 고도화가 필요할 것으로 사료된다.



1. 4대강사업조사평가위원회(2014), 4대강사업 조사평가보고서.
2. Hans W. Paerl, Rolland S. Fulton, III, Pia H. Moisaner, and Julianne Dyble(2001). Harmful freshwater algal blooms, with an emphasis on cyanobacteria.