



# 녹조! 생태환경 개선으로...

(수리·생태특성의 융복합 기술개발)



**전 응 식**

(주)다우해양 대표이사  
dwocean@korea.com

## 1. 개요

인간 활동으로 어긋난 자연 순환계의 불균형이 생태계 파괴와 물환경 부패로 이어져, 자연은 우리에게 ‘녹조라떼’로 표현되는 남조류의 대번식으로 보여 주고 있다.

녹조발생 수역은 혐기성 환경으로 유용 미생물, 동물플랑크톤 및 포식생물의 생존비율이 낮은 것으로 보고되고 있으며, 이로 인해 생태 순환계의 먹이사슬 고리가 끊어짐으로써 녹조에 취약한 문제를 보이고 있다.

또한, 녹조생물은 육상의 식물과 같은 수중생태계의 기본요소로서 녹조방제에서 ‘제거’는 생태계의 기본을 파괴하는 것과 같으므로 자연에서 옳은 적정기술이라 보기 어렵다. 녹조는 박멸, 제거, 퇴치 등의 개념이 아닌 다스려야 할 문제로 인식되어야 한다.

녹조생물의 관리와 제어는 인간 활동으로 손상되어 비정상적인 수중 생태계를 정상적이고 건강한 상태로 치유하여 그 기능을 관리하는 것이다. 결국 끊어진 먹이사슬을 연결하고 정상화시킴으로서 건강성과 기능성을 회복하면, 녹조는 제어되고 그 발생빈도 또한 감소될 것이다.

효과적인 녹조관리를 위해서는 녹조발생의 원인

과 조건, 생태특성 등을 다각적으로 검토할 필요가 있으며, 단순 개념으로 접근하던 시각에서 자연을 시스템(복합적)으로 이해할 필요가 있다.

녹조발생 수역의 어긋난 생태기능 정상화가 문제 해결의 열쇠임을 인식하고, 수중생물의 생태환경을 개선할 수 있는 수리특성 연구에 집중하였다. 이에 따라 수리특성을 인위적으로 변경하여 생물들의 생태환경을 개선함으로써 녹조생물에게 생태기능이 부여되어 환경이 관리되는 융복합 기술을 개발하였다.

수리특성과 생태특성이 결합된 융복합 기술은 녹조발생을 사전에 억제하고 예방할 수 있는 기능을 가지며, 장기적으로는 녹조를 생태계 기본요소로 포함시켜 녹조발생 수역이 동적 생태평형으로 안정될 수 있도록 관리함으로써 환경문제가 해결될 수 있게 된다.

## 2. 녹조발생의 재조명

### 가. 호소의 안정성

호소의 유입 유량이 적거나 성층화로 물의 흐름이 안정되어 체류시간이 길어지면 매우 두꺼운 군체(colony)를 이루어 포식자를 방어할 수 있기 때문에 녹조현상이 일어난다. 수온과 체류시간은 거의 비슷하게 중요하며 수온이 높을수록, 체류시간이 길수록 녹조생물의 번식이 뚜렷해진다.

강우 발생으로 유입 유량이 증가되면 체류시간이 짧아져 녹조현상이 감소할 수 있다. 하지만 강우가 그치고 유입 유량이 감소하여 체류시간이 길어지면,

강우 시 유입되었던 영양물질이 풍부해져 남조류의 대량증식이 유발될 수 있다.

남조류는 다른 종보다 온도가 높을수록 성장속도가 빨라진다. 또한 표면의 온도가 높아지면 성층화가 진행되는데, 안정한 호소에서는 부유할 수 있는 남조류는 쉽게 성장하여 스크(scum)을 이루게 되고, 수면에 부유할 수 없는 종보다 더 많은 일사량을 받을 수 있어 더 많은 광합성을 할 수 있다.

### 나. 오염원 관리의 한계

그 동안 녹조관리를 위해 수온, 체류시간, 일조시간 등 인위적으로 조절하기 힘든 자연조건은 배제하고, 영양염류(특히 인)의 농도를 저감하기 위한 많은 노력을 하였음에도 불구하고, 비점오염 관리의 한계 등으로 실효성을 얻지 못하고 있다.

한국농어촌공사의 다년간 축적된 수질측정 성과에 의하면, 녹조는 예상과 달리 낮은 온도에서도 발생 가능하고, 총인(T-P)이 농업용수 수질기준인 0.1mg/L 보다도 훨씬 낮은 0.03mg/L 농도에서도 녹조가 발생하는 것으로 나타나, 총인(T-P) 농도 관리만이 녹조관리의 관건이 아님을 보여준다고 보고된 바 있다.

### 다. 생태기능의 불균형

녹조가 발생하는 생태계를 보면, 생산자(녹조생물)의 기능이 지나치게 증식되어 있는 반면, 이들을 포식하는 1차, 2차 소비자의 생태적 기능이 정상적으로 운용되지 않는 것을 확인할 수 있다. 녹조발생 수역에서 유기물이나 세균을 섭식하는 윤충류가 전체 동물플랑크톤의 97%를 차지하고, 식물플랑크톤을 포식하는 지각류는 2%에 불과한 것으로 보고된 바 있다.

녹조발생 수역의 어긋난 생태기능을 복원하여 정상화시킨다면 녹조발생을 효과적으로 줄일 수 있다. 특히, 생산자가 과잉 번성한 녹조발생 수역에 생산

자를 포식할 수 있는 1차 소비자인 동물플랑크톤의 기능을 회복시키는 것은 녹조예방에 매우 효과적인 것이다.

## 3. 기존 방제기술의 재검토

### 가. 물리적 제어기술

회전수차는 환경부 신기술로 지정받은 바 있으나 천층 호소에 적용되고 있다.

초미세기포 분사는 초미세기포 효과 및 용존산소 공급에 탁월한 효과가 있어 수처리에서 부상과 폭기의 필수공정으로 적용되고 있으나, 설치대상이 수조와 천층 호수로 제한된다.

물순환 장치는 심층과 수면에서 적용된 바 있으며, 심층에서는 수압의 영향으로 효과가 반감되고 수면에서는 주로 태양광전지를 이용하여 순환을 및 수심에 제한적이다.

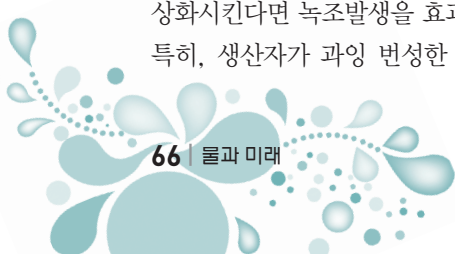
산기장치는 저층수 순환이 기포의 상승압력에 의존하며, 깊은 수심까지 공기를 압축하는데 많은 에너지가 소요되어 설치수심에 제한을 받는다.

### 나. 화학적 제어기술

응집제, 살조제 등이 있으며, 수면살포에 의해 응집/침전 또는 사멸방식으로 지속적인 노력과 2차 오염의 우려가 제기되고 있다.

### 다. 생물학적 제어기술

미생물, 천적생물 등을 살포하는 방식이다, 선택된 미생물 또는 천적생물에 의해 빠른 효과가 나타나며 소규모 호수에서 그 성과가 입증된 바 있으나, 녹조발생 수역은 유용 미생물과 동물플랑크톤(천적생물)에게 불리한 생태환경으로서 지속성이 부족한 기술로 평가되고 있다.



## 라. 복합처리 기술

녹조제거선, 가압부상장치 등은 현장 적용성이 매우 우수한 기술로 평가된 바 있으나 경제성과 지속성이 부족하며, 회수된 녹조 사체의 바이오 에너지, 비료, 퇴비화 등 추가적인 자원화기술 개발이 필요한 실정이다

## 바. 강물을 흐르게 한다.

시화호 사례로부터 많은 환경가의 의견이 있으나, 하천은 폭포, 여울, 소(沼), 자갈, 수초 등의 다양한 요소들이 복합 작용할 때 그 기능이 나타난다. 4대강은 준설에 의해 평탄한 지형으로서 수문개방에 의

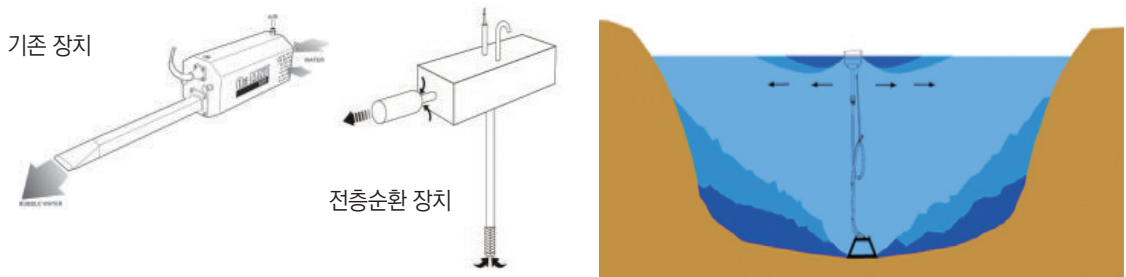
해 정상류 흐름이 예상되며, 갈수기에는 소(沼)의 기능이 사라져 수중생태계 단절이 우려된다.

## 4. 융복합 기술에 의한 녹조관리

### 가. 기술의 원리

녹조발생 호소는 부영양화와 생태계 불균형의 결과로서, 오염물질은 호기성 환경에서 수중생물의 영양으로 해결하고, 수중생물의 생태환경 개선으로 끊어진 먹이사슬이 연결되어 생태계 불균형을 해소될 수 있도록 하였다.

수처리에서 효과가 입증된 초미세기포 분사의 응



구분	주요 특성	비고
천적생물 (미생물) 살포	-적정 천적생물(미생물)을 선택적으로 배양, 살포할 수 있다. -배양시설과 지속적인 노력이 요구된다.	생태적
기존 장치 (버블분사, 나노버블, 제트스트리머)	-물리적 기술로서 친환경 공법이다. -기계장치가 단순하여 이동설치 및 확장이 용이하다. -부유 설치되어 계절적 수위변화에 영향을 받지 않는다. -분사류, 용존산소 공급 및 미세기포 효과가 있다. -같은 지점(인근)에서 흡입, 분사되어 재순환이 우려된다.	물리적
수리특성 개선 (전층순환)	-기존의 버블분사 장치의 장점과 일치한다. -녹조발생 수역에서 수중생물의 생태환경을 회복시킨다. -지속 가능한 기술이다. -수리특성 개선으로 수중 생태계를 안정화한다. -생태환경, 수질환경, 퇴적환경 등을 개선한다. -오랫동안 정체되어 어렵다고 여겨졌던 심층 환경을 개선한다.	융복합

용기술 개발에 집중하여, 용존산소 공급과 대류 순환으로 해결할 수 있는 전층순환 장치를 개발하였다. 이 장치는 수면에 부유 설치하여 초미세기포를 포함시켜 분사하며, 흡입관로는 심층까지 연장하였다. 기존의 초미세기포 분사 장치와 비슷한 형태이지만 작은 운용기술의 변경으로 수리특성 및 생태특성은 획기적으로 개선되었다.

전층순환 장치에 의한 호수의 수리 및 생태특성은 다음과 같이 나타난다.

저온의 심층수에 미세기포를 포함시켜 수면으로 분사되고, 표층수와 혼합되고 수평과 연직으로의 대류 순환은 밀도평형이 이루어질 때까지 계속된다. 심층수는 관로에 의해 정확하게 수면으로 순환되며, 심층은 새롭게 치환된다. 오랫동안 정체되어 어렵다고 여겨졌던 심층수가 순환되고, 심층 및 퇴적층에도 용존산소가 공급되어 수계 전체가 호기성 환경으로 개선된다.

또한, 심층수는 수면에서 햇빛에 살균 및 호기성 환경으로 변경되어 생태계의 불균형이 초래됐던 유용 미생물과 동물플랑크톤(포식자) 등의 생태환경이 개선되어 빠른 증식으로 먹이사슬의 안정된 연결고리가 회복된다. 자연에는 유용 미생물과 천적생물(포식자)은 항상 존재하며 이들의 생태환경이 개선되면 빠르게 증식되기 때문이다. 결국 오염물질은 호기성 분해로 먹이사슬에 의해 포식자까지 농축, 집적되어 제거된다. 생태계 순환이 원활히 이루어지고, 동적 생태평형을 유지하기 위해서는 유역에서 인간 활동에 의해 유입되는 순환물질의 잉여량은 수계 밖으로 제거된다.

이에 따라 녹조발생 수역의 수리특성을 인위적으로 변경하여 수중생물의 안정된 생태계에 의해 수계의 순환구조가 정상화되는 것이다. 수계의 생태 단계별 기능을 강화하여 자연환경의 지속성과 안정성이 높아지며, 이후 상위 포식자까지 안정된 먹이사슬이 연결되며, 어긋났던 생태계를 정상화시키고 결과적으로 자연환경의 건강성이 회복하게 된다.

### 나. 기술의 우수성

녹조가 발생된 수계에서 인위적으로 수리특성을 개선하여 생태계를 복원하는 융복합 기술이 타 녹조 제거 기술과 차별화 되는 가장 큰 이유는 자연의 건강성 회복에 있다. 즉, 인간 활동으로 어긋난 수질, 생태, 퇴적환경 등을 정상화하여 동적 생태평형을 이루는 신기술이다.

해양에서 제트분사 엔진의 해경선 및 어업관리선 등이 적조방제에 탁월한 효과를 보이고 있으며, 세계적으로 유명한 어장은 용승류가 나타나는 수역에서 잘 발달하고 있다. 또한, 녹조는 수중생태계의 기본요소로서 자연계에서 '제거'대상이 아니라 '관리'대상이다.

이러한 기본 개념을 바탕으로 친환경 녹조방제의 융복합 기술이 고안되었으며, 다음과 같은 특성이 있다.

- ①수리특성 변화는 용존산소 공급과 대류 순환이다. 수면에 부유되어 심층수에 초미세기포를 포함시켜 수면으로 분사된다. 수면의 분사류는 초미세기포 효과와 용존산소 공급으로 호기성 환경으로 개선된다. 또한 저온의 분사류는 표층수와 혼합되고, 수평과 연직으로의 대류 순환은 밀도평형이 이루어 질 때까지 계속된다.
- ②수중생물의 생태환경 개선으로 먹이사슬이 안정화되었다. 영양물질이 포함된 심층수는 햇빛에 살균 및 용존산소 공급으로 유용 미생물, 식물플랑크톤, 동물플랑크톤 및 포식자(먹이사슬) 등이 번성하여 어긋난 생태계가 복원된다. 호소에서 부영양화된 오염물질은 분해되고 생태계에 흡수되어 먹이사슬로 농축, 집적되어 제거된다.
- ③녹조생물은 초미세기포, 수온 및 포식자 등에 의해 관리된다. 분사류에 포함된 초미세기포는 오랫동안 수중에 머물며 녹조생물의 번식을 억제하고, 저온의 분사류는 성층화 해소와 녹조생물의 군체형성을 방해하며, 포식자의 생태환경이 개선된다.
- ④대상 수계의 가장 큰 변화는 오랫동안 정체되어



어렵다고 여겨졌던 심층 및 퇴적환경 개선이다. 심층수는 관로에 의해 정확히 표층의 수면으로 순환되며, 심층은 새롭게 치환된다. 대류 순환에 의해 새롭게 형성되는 심층수는 호기성 환경으로 수중식물과 저서생물의 생태환경을 개선한다. 이에 따라 호소 전체의 수질, 생태, 퇴적환경이 정상화되어 동적 생태평형이 이루어진다.

## 5. 결론

수리특성과 생태특성에 의한 각각의 녹조제어 기술은 국내외에서 많이 개발되어 적용되어 왔으나 이의 융복합 기술로 개발된 사례는 아직 보고되지 않았으며, 외국에서도 성공한 사례는 없는 것으로 알려져 있다.

본 기술의 가장 큰 장점은 녹조발생 수역에서 녹조관리 효과도 있지만, 장기적으로 생태 순환구조를 정상화시켜 환경변화에 대한 저항성을 증가시킴으로 인해 예방과 조절기능이 강화된다. 결국 본 기술로 인하여 녹조가 생태계의 기본요소로 포함되어 '녹조라떼'의 개념이 사라지게 될 수도 있다.

수리특성과 생태특성이 결합된 융복합 기술은 지금까지 녹조방제를 위해 개발되어 왔던 다양한 물

리·생물·화학적 기술들의 유해성과 한시효과 등의 적용 한계를 극복하고, 지속 가능한 기술로써 기존 기술을 대체하는 신기술이다.

녹조발생 이후 방제대책에 치중한 기존의 녹조관리에 대응하여 예방기능과 생태 구조의 근원적 체질개선을 통한 기술로 인간 활동으로 불균형이 우려되는 다양한 수계의 생태환경에서 활용이 가능할 것이다.

오염된 호소의 수질개선 및 유지관리를 위해서는 체류시간이 짧을수록 좋다. 일반적으로 체류시간을 단축하기 위한 교환율(순환율)은 5~10일 정도로 계획하는 것이 권장될 수 있다.

유역으로부터 영양염류가 꾸준히 유입되는 상황에서는 동적 생태평형을 유지하기 위해 물질순환의 잉여량은 수계 밖으로 제거되어야 하며, 이를 위해서는 녹조발생 수역의 생태기능과 구조를 정확히 이해하고, 최적의 운영/관리 방안을 수립하여, 효율적 관리를 위해 유용한 수산자원 활용, 내수면 어업 등을 연계하는 것도 좋은 방법이 될 수 있을 것이다.

본 기술은 녹조를 생태계 기본요소에 포함시켜 녹조로 인한 인문·사회적, 경제적, 산업적 피해를 원천봉쇄할 수 있는 친환경 기술로, 녹조발생 수역을 건강한 수역으로 변화시켜 레저, 휴식, 친수, 생태학습장 등 다양한 공간으로서 부가가치를 가질 수 있게 한다.



- 강찬수 2014. 7.27. 녹조 제거, 기술은 있지만 비용 엄청나. 중앙일보
- 남귀숙 2012. 9. 6. 포식성 천적생물을 이용한 녹조방제기술로 녹조 제거. 한국농어촌공사 농어촌연구원
- 남귀숙 2013. 7. 1. 녹조! 손상된 생태기능 회복으로 해결! -천적생물을 이용한 녹조제어 기술 개발-. RRI 포커스 제14호. 한국농어촌공사 농어촌연구원
- 더 사이언스 타임즈 2018. 2.11. 늘어만 가는 녹조현상, 원인은?
- 변규덕 외 2016. 5. 30. 국내하천/호수에 적용된 조류저감기술의 조사 및 평가. 대한환경공학회지. 제38권 7호.
- 워터저널 2015. 8. 5 녹조, 박멸·제거 대신 과학기술로 다스려야. 워터저널 2015년 8월호 이슈&토론
- 양시천 2017. 11.13. "녹조라떼" 원인과 대책-남세균(시아노박테리아)의 대 번식 원인과 대책. 오마이뉴스
- 윤신영 2012. 9 '녹조라떼'위기! 4대강이 원인일까. 긴급진단 - 한반도 조류비상! 과학동아 2012년 9월호
- 이슬기 2012.8.28. 녹조현상, 없앨 수 있는 방법은?. 한겨레 미래&과학
- 이영규 2015. 8. 28. 경기도 '녹조'제거 획기적인 방법 찾았다. 아시아 경제
- 정수근 2018. 2.12. 늙은 어부의 탄식 "낙동강 어민들 제발 좀 살려주이소". 오마이뉴스
- 한겨레 2013. 9. 3. 녹조를 원천 본쇄하라...-예방·제거기술의 진화-.