Korean Journal of Environmental Biology

Note

https://doi.org/10.11626/KJEB.2019.37.3.433

Korean J. Environ. Biol.
37(3) : 433-445 (2019)
ISSN 1226-9999 (print)
ISSN 2287-7851 (online)

농업용 호소의 조류 발생 진단을 위한 간편 도구의 개발

남귀숙*, 이승헌, 조현정[1], 박주현[1], 조영철[2]

한국농어촌공사 농어촌연구원, [1]동문이엔티(주), [2]충북대학교 환경공학과

Development of simple tools for algal bloom diagnosis in agricultural lakes

Gui-Sook Nam*, Seung-Heon Lee, Hyun-Jung Jo[1], Joo-Hyun Park[1] and Young-Cheol Cho[2]

Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation (KRC), Ansan 15634, Republic of Korea
[1]R&D Center, Dongmoonent Co., Ltd, Seoul 08377, Republic of Korea
[2]Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Republic of Korea

***Corresponding author**
Gui-Sook Nam
Tel. 031-400-1829
E-mail. leo612@ekr.or.kr

Received: 4 September 2019
Revised: 19 September 2019
Revision accepted: 19 September 2019

Abstract: This study was designed to develop simple tools to easily and efficiently predict the occurrence of algal bloom in agricultural lakes. Physicochemical water quality parameters were examined to reflect the phytoplankton productivity in 182 samples collected from 15 agricultural lakes from April to October 2018. Total phytoplankton abundance was significantly correlated with chlorophyll-*a* (Chl-*a*) ($r=0.666$) and Secchi depth (SD) ($r=-0.351$). The abundances of cyanobacteria and harmful cyanobacteria were also correlated with Chl-*a* ($r=0.664$, $r=0.353$) and SD ($r=-0.340$, $r=-0.338$), respectively, but not with total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP). The Chl-*a* concentration was correlated with SD ($r=-0.434$), showing a higher similarity than phytoplankton abundance. Therefore, Chl-*a* and SD were selected as diagnostic factors for algal bloom prediction, instead of analyzing the standing crop of harmful cyanobacteria used in algae alarm systems. Specifically, accurate diagnoses were made using real-time SD measurements. The algal bloom diagnostic tool is an inverse cone-shaped container with an algal bloom diagnosis chart that modified SD and turbidity measurement methods. Lake water was collected to observe the number of rings visible in the container or the number indicated in each ring, depending on the degree of algal bloom,and to determine the final stage of algal blooming by comparison to the colorimetric level on the diagnosis chart. For an accurate diagnosis, we presented 4-step diagnostic criteria based on the concentration of Chl-*a* and the number of rings and a fan-shaped algal bloom diagnosis chart with Hexa code names. This tool eliminated the variables and errors of previous methods and the results were easily interpreted. This study is expected to facilitate the diagnosis of algal bloom in agricultural lakes and the establishment of an efficient algal bloom management plan.

Keywords: agricultural lake, algal bloom, diagnostic tool, harmful cyanobacteria, phytoplankton

서 론

우리나라는 강우가 하계에 집중되는 뚜렷한 기후적 특성과 국토의 대부분이 산지로 구성되어 있는 지형적 특성에 의해 수자원확보가 어렵다(Cho *et al.* 2017). 우리나라 수자원이용량 중 약 48%를 차지하고 있는 농업용수의 확보를 위해 전국 17,423개소의 농업용 호소가 운영되고 있으며, 약 95%가 50만 톤 미만의 소규모 저수지로서 시군지자체에서 대부분 관리하고, 중규모 이상의 저수지와 담수호로서 3,400여 개소는 농림축산식품부와 한국농어촌공사에서 관리하고 있다(MAFRA 2018). 이러한 호수나 저수지와 같은 폐쇄성의 정수계는 비교적 장시간에 걸쳐 영양염류를 포함한 많은 오염원이 축적되어 부영양화가 쉽게 이루어지고(Wetzel 1999), 이에 따른 조류발생 빈도가 높을 수 있다.

녹조현상은 부영양화, 체류시간, 수온, 광도 등 여러 가지 요인의 복합적인 작용으로 저수지, 상수원 댐 및 하천 등에서 발생하는 계절적인 현상으로(NIER 2017), 직접적으로는 이취미와 독소를 발생시키며, 간접적으로는 물고기 대량 폐사, 생물상 변화, 수처리 비용증가 등 생태계 건강성은 물론 용수의 질을 떨어뜨리고, 경제적 손실을 야기한다(Wetzel 1999; Smith 2003; Cho *et al.* 2017). 특히, 급격한 사회발전으로 인한 도시화심화, 인구증가, 농경지활용 등에 따라 남조류의 성장 및 지속시간을 직접적으로 결정하는 영양염류가 과다 유입되면서 녹조현상이 빈번하게 발생하고 있다(KEC 2012; Cho *et al.* 2017). 남조류 중 *Microcystis*, *Oscillatoria*, *Anabaena*, *Aphanizomenon* 등은 냄새물질인 지오스민(Geosmin), 2-MIB를 배출하며, 간독소인 마이크로시스틴(microcystin) 또는 신경독소인 아나톡신(anatoxin) 물질을 미량 배출한다(NIER 2014). 지오스민과 2-MIB는 인체에 직접적인 영향을 미치지는 않지만 물에서 곰팡이 냄새, 흙냄새, 비린내 등의 이취를 유발하여 수질문제를 일으키므로 어업활동과 친수활동에 제약을 받는 등 국민들의 삶의 질 저하가 초래될 수 있다(Cho *et al.* 2016). 이와 같이 유해 남조류의 대발생은 호소의 건전한 생태적 기능과 친수성, 이수목적 등에 약영향을 미치므로 수질관리의 주된 대상으로 부각되고 있다(Hwang 2003).

이들 유해 조류의 관리를 위해 환경부에서는 전국 28개 하천, 호소를 대상으로 상수원 구간과 친수환경구간으로 구분하여 조류경보제를 운영하고 있다. 상수원 구간은 관심, 경계, 조류 대발생 단계로, 친수활동구간에서는 관심, 경계 단계로 구분하여 유해 남조류 4개 속(*Microcystis*, *Oscillatoria*, *Anabaena*, *Aphanizomenon*)의 세포수 합을 기준항목으로 분석하여 관리하고 있다(NIER 2017). 그러나, 전국에 산재하는 다수의 농업용 호소에 대해서는 조류발생 정도를 동일한 방법으로 전수를 관리하기에는 어려운 실정이다. 농업용 호소의 조류발생 현황 파악은 전체 농업용수량의 78.4%에 해당되는 농업용수 수질측정망 지구 985개 호소에서 Chl-*a* 항목을 연 4회 분석하고 있으며(MAFRA 2018), 나머지 농업용 호소에 대해서는 육안관찰을 통해 관심, 주의, 경계, 심각 등으로 구분하여 급수기인 4~9월에 녹조예찰, 상시감시 활동을 진행하고 있다(KRC 2019). 이러한 녹조예찰 방법은 조사자의 주관적인 판단이 개입될 수 있고 편차도 클 수 있는 한계가 있다. 그동안 녹조진단을 위해 이미 많은 장비들이 개발되어 왔으나 기존 구축되어 있는 조류분석기와 현장용 센서형 조류측정기 등은 고가이며, 조작 및 측정방법이 복잡하여 현장에서 비전공자 또는 일반인이 조작, 측정, 운영하기 어렵고 조류 대발생 및 스컴 발생시 모니터링이 불가능한 한계를 가지고 있다(KRC 2018). 따라서, 농업용 호소의 녹조발생을 간편하고, 효율적으로 진단할 수 있으며, 녹조에 대한 전문적 지식이 없는 수면관리자가 현장에서 관찰하고 객관적으로 수치화하여 진단할 수 있는 도구진단방법의 개발이 필요하게 되었다.

이를 위해 농업용 호소의 조류발생 특성을 파악하고자 15개 농업용 호소를 대상으로 총조류의 현존량과 환경부 조류경보제 관리항목인 유해 남조류(harmful cyanobacteria) 현존량을 분석하고, 투명도(Secchi Depth; SD), 총유기탄소(Total Organic Carbon; TOC), 총질소(Total Nitrogen; TN), 총인(Total Phosphorous; TP), 부유물질(Suspended Solid; SS), 엽록소 *a* 농도(Chlorophyll *a*; Chl-*a*) 등의 이화학적 항목을 분석하여 조류 현존량과 각 이화학적 항목 등의 실측 데이터를 통계 처리하여 상관관계를 분석함으로써 적용 방안과 가능성을 파악하고자 하였다. 그 결과를 바탕으로 농업용 호소의 녹조발생 원인이 되는 유해 남조류 세포수와 상관성이 높은 적정한 항목을 선발하고 이를 이용한 간단한 녹조진단 도구를 고안하였다. 아울러 녹조예찰에 필요한 수치화와 녹조발생정도를 좀 더 자세히 진단할 수 있는 녹조진단 조견표를 작성하여 현장 적용 가능성을 파악하고자 하였다.

 ©2019. Korean Society of Environmental Biology.

재료 및 방법

1. 대상 호소 및 조사 시기

본 연구의 조사대상 호소는 전국 농업용 호소 18천여 개소 중 주요 저수지로 집중 관리되고 있는 농업용수 수질 측정망지구 985개소의 최근 3년간 TOC 항목에 대해 수질환경기준 III 등급 이상을 나타내는 농업용 호소 15개소이며, 주로 경기, 인천, 충남, 전북 지역에 분포하고 있다(Fig. 1). Table 1에 각 호소의 위도, 경도 좌표와 유역면적, 호소용량, 수면적, 평균수심을 나타내었다. 유역면적은 0.73~18.84 km^2의 범위이며, 수면적은 0.10~1.19 km^2, 호소용량 $315\times10^3\,m^3$~$6{,}214\times10^3\,m^3$으로 중소규모 농업용 호소에 해당된다. 특히, 평균수심이 2.4~7.3 m로 조류발생에 유리한 비교적 저수심의 호소들로 구성되어 있다.

본 연구는 조류가 주로 발생하는 시기로서 2018년 4월~10월에 이르기까지 2~4회 빈도의 조사를 실시하였으며, 각 호소에서 조사지점은 호 유입부와 중앙부, 하류 제방 앞을 각 정점으로 하여 총 182개의 시료를 채취하였다.

2. 이화학적 특성 및 조류 현존량 분석

각 호소의 이화학적 특성 분석을 위해 현장측정 항목인 수온, pH, DO, 전기전도도는 다항목 수질 측정기(YSI 5700, YSI Inc., USA)를 이용하여 분석하였으며, 수질시료는 표층수를 채취하여 냉장 보관 상태로 신속히 실험실로 옮긴 후 TOC, TN, TP, SS 및 Chl-*a* 등의 항목을 수질오염공정시험기준(ME 2017)에 준하여 분석하였다. 또한, 투명도판을 이용하여 SD를 측정하였으며, 조류 현존량 분석 시료는 채취 후 고정하여 분석하였다. 조류의 종조성 및 현존량을 분석하기 위한 정량분석은 수질오염공정시험기준 ES 04705.1b "식물성플랑크톤-현미경계수법"에 따라 Sedgwick-Rafter 계수판을 이용하여 정립현미경(×200)에

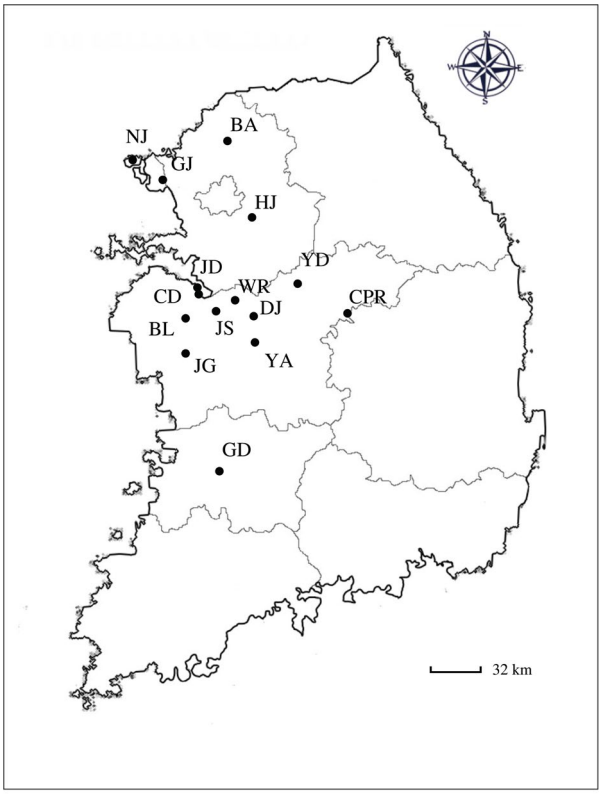


Fig. 1. Locations of agricultural reservoirs used in this study.

Table 1. Location and hydrological description of study sites

Name	Location		Watershed area (km^2)	Surface area (km^2)	Water capacity ($\times10^6\,m^3$)	Mean depth (m)
KJ	37°39′6.48″N	126°28′25.00″E	15.11	0.57	4.180	7.3
YA	36°36′38.16″N	127°14′41.38″E	16.20	0.87	4.868	5.6
HJ	37°23′56.80″N	127°13′21.08″E	7.10	0.15	0.483	3.2
DJ	36°44′17.91″N	127°12′57.89″E	3.83	0.16	0.739	4.6
WL	36°50′42.72″N	127°4′34.47″E	4.21	0.22	0.524	2.4
JD	36°54′49.55″N	126°44′54.68″E	2.34	0.16	0.587	3.7
BL	36°43′40.02″N	126°39′15.94″E	8.40	0.21	1.065	5.1
KD	35°42′21.86″N	126°54′33.15″E	0.73	0.10	0.315	3.2
BA	37°54′59.52″N	126°59′50.80″E	3.40	0.14	0.967	6.9
CPR	36°12′48.00″N	128°0′52.00″E	10.00	0.18	0.665	3.7
YD	36°51′23.84″N	127°52′42.79″E	5.35	0.18	0.644	3.6
NJ	37°46′58.00″N	126°13′42.80″E	18.84	1.19	6.214	5.2
JS	36°47′4.47″N	126°53′51.12″E	1.43	0.24	0.615	2.6
CD	36°54′10.74″N	126°44′31.46″E	4.70	0.24	1.026	4.3
JK	36°29′50.71″N	126°40′15.45″E	10.64	0.30	1.284	4.3

서 관찰하였으며, 조류는 남조류, 녹조류, 규조류, 편모조류의 4개의 그룹으로 구분하였고, 별도로 유해 남조류 군을 분류하고(Metcalf and Codd 2012), 분류군별 세포수 분석 및 분류군 분석을 시행하였다(ME 2017).

3. 녹조진단 요소 항목 선발

간편 진단 도구에 활용할 수 있는 신뢰성과 재현성 높은 녹조진단 지표를 발굴하기 위해서는 농업용 호소의 조류발생 특성에 기반한 과학적 근거를 토대로 해야 한다. 이를 위해 15개 농업용 호소의 다양한 조류발생 조건에서 총 182개의 시료를 바탕으로 총 조류수, 남조류 세포수, Chl-*a*, SD 등 조류개체수와 수질이화학적 항목의 상관관계를 분석하였다. 본 연구에서 조류와 수질요인들 간의 상관관계를 알아보는 통계분석은 SPSS ver. 12.0프로그램을 사용하여 Pearson's correlation 분석을 실시하였다.

4. 간이 녹조진단 도구의 개발

농업용 호소의 상시 녹조예찰을 통해 효율적인 녹조관리를 위해서는 다음과 같은 주안점으로 간이 녹조진단 도구를 개발하고자 하였다.

- 사용에 전문적 지식이 필요 없으며, 시설관리자 누구나 사용할 수 있어야 한다.
- 녹조 판단 결과가 주관적이지 않아야 한다.
- 측정하는 사람에 관계없이 결과 재현성이 높아야 한다.
- 현장에서 즉시 진단 가능하여야 한다.
- 도구의 사용방법 및 유지관리가 어렵지 않아야 한다.
- 제작비용이 저렴하고 관리비용이 들지 않아야 한다.

5. 녹조진단 조견표 제작 및 녹조발생정도 판별 방법

녹조진단 도구를 이용한 녹조진단 결과를 Chl-*a*와 비교 판독할 수 있는 표준곡선을 작성하여 녹조발생 진단 정확도 및 신뢰성을 분석하였으며, 녹조발생 단계 판정에 적합한 관리기준을 설정하였다. 또한, 각 녹조발생 단계별로 판단할 수 있는 "녹조진단 조견표"는 ColorHexa (Munsell Color, Pantone, USA)를 통하여 각 단계의 색을 판별하여 코드명을 찾아가도록 하였으며, 휴대가 간편하고 색도 비교가 용이하도록 제작하여 평가하였다. 그리고 녹조발생 정도 판별 방법은 녹조진단 도구에서 보이는 색을 Hexa 코드명으로 색의 절대값을 표시한 녹조진단 조견표와 대조하여 동일색도에 해당하는 단계를 제시하도록 하였다.

결과 및 고찰

1. 농업용 호소의 이화학적 특성 및 녹조원인 조류의 밀도 분포

2018년 4월~10월까지 조사한 15개 농업용 호소의 수온, pH, EC, DO, TOC, COD, SS, Chl-*a*, TN, TP, 총 조류밀도 및 유해 남조류 분포 특성은 Table 2와 같다. 조사기간 중 수온 분포는 24.6±4.7°C (15.5~36.1°C)로 조류발생에 적합하였으며, SD 0.7±0.3 m (0.1~1.3 m), EC 276.8±128.9 μS·cm^{-1} (72~706 μS·cm^{-1}), TOC 6.9±2.7 mg·L^{-1} (2.1~17.0 mg·L^{-1}), COD 13.2±6.7 mg·L^{-1} (3.0~40.8 mg·L^{-1}), Chl-*a* 70.2±88.7 mg·m^{-3} (0.7~593.7 mg·m^{-3})로 전반적으로 조류가 발생할 수 있는 수질 이화학적 환경을 나타내고 있었다. 이와 같은 환경에서 발생된 조류의 현존량 분포를 보면 총 조류 세포수 0.02~211.00×10^4 cells·mL^{-1} (24.86±41.32×10^4 cells·mL^{-1}), 유해 남조류 세포수 N.D.~207.83×10^4 cells·mL^{-1} (21.79±41.66×10^4 cells·mL^{-1})의 범위로 저밀도에서 고밀도 수준의 다양한 조류발생 상황을 보여주고 있다. 하지만 대부분의 시기에서 Horne and Goldman (1994)이 제시한 녹조발생기준 5,000 cells·mL^{-1}을 상회하고 있으며, 평균값 역시 이보다

Table 2. Characteristics of water environment factors in 15 agricultural reservoirs from April to October 2018

Parameter	Water temp. (°C)	SD (m)	pH	EC (μS·cm^{-1})	DO (mg·L^{-1})	TOC (mg·L^{-1})	COD (mg·L^{-1})	SS (mg·L^{-1})	Chl-*a* (mg·m^{-3})	TN (mg·L^{-1})	TP (mg·L^{-1})	Total phytoplankton (×10^4 cells·mL^{-1})	Harmful cyanobacteria (×10^4 cells·mL^{-1})
Ave.	24.6	0.7	9.2	276.8	10.9	6.9	13.2	16.3	70.2	2.064	0.098	24.86	21.79
S.D.	4.7	0.3	0.9	128.9	4.3	2.7	6.7	18.5	88.7	1.123	0.090	41.32	41.66
Min	15.5	0.1	6.0	72.0	3.3	2.1	3.0	0.8	0.7	0.439	0.018	0.02	N.D.
Max	36.1	1.3	11.0	706.0	23.2	17.0	40.8	137.5	593.7	6.370	0.743	211.00	207.83

Water temp.: Water temperature, SD: Secchi depth, EC: Electric conductivity, DO: Dissolved oxygen, TOC: Total organic carbon, COD: Chemical oxygen demand, SS: Suspended solid, Chl-*a*: chlorophyll-*a*, TN: Total nitrogen and TP: Total phosphorus

 ©2019. Korean Society of Environmental Biology.

높은 수준을 나타내었다. 또한, 총 조류 세포수와 유해 남조류 세포수의 평균값 차이가 크지 않아 총 조류 세포수의 대부분이 유해 남조류로 구성되어 있음을 알 수 있었다.

2. 조류의 종별 분포특성

2018년 4월부터 10월까지 15개 농업용 호소에서 채취된 182개의 시료에서 출현한 조류 종은 총 76종이었으며, 녹조류가 37종으로 가장 많고, 규조류와 남조류가 각각 21종, 10종이 출현하였다. 편모조류로 분류되는 유글레나류, 와편모조류, 황색편모조류, 갈색편모조류가 8종 출현하였다(Table 3). 특히 유해남조류로 지정된 4개종은 모두 출현하고 있으며, 출현빈도는 *Oscillatoria* spp.가 총 182개 시료 중 134개 시료에서 출현하여 73%의 출현율로 가장 높았고, *Microcystis* spp.가 약 41%의 출현율을 *Anabaena* spp.와 *Aphanizomenon* spp.는 비교적 낮은 출현빈도를 보였다. 녹조류 중에서는 *Chlorella* spp. 118회, *Chlamydomonas* spp. 110회, *Scenedesmus* spp. 109회 등으로 자주 출현하였으며, 규조류는 *Cyclotella* spp. 90회, *Stephanodiscus* spp. 89회, *Nitzschia* spp. 71회 등으로 출현하였다. 그 외에도 *Trachelomonas* spp. 131회, *Cryptomonas* spp. 60회 등 편모조류들도 일부시기 자주 출현하는 것으로 나타났다.

최대 출현 개체수는 남조류인 *Merismopedium* spp.가 13.3×10^6 cells · mL^{-1}로 가장 높은 값을 보였으며, 유해 남조류로서 *Microcystis* spp. 2.2×10^6 cells · mL^{-1}, *Oscillatoria* spp. 2.1×10^6 cells · mL^{-1}로 그 다음 순위를 차지하였다. 출현종별 평균개체수를 보면 역시 *Merismopedium* spp.가 53.8×10^4 cells · mL^{-1}로 가장 높은 값을 보였고, 유해 남조류로서 *Oscillatoria* spp. (20.7×10^4 cells · mL^{-1}), *Microcystis* spp. (18.8×10^4 cells · mL^{-1}) 등이 높은 개체밀도를 나타내었다. 그 외 유해 남조류로서 *Aphanizomenon* spp.과 *Anabaena* spp.도 각각 평균 3.7×10^4 cells · mL^{-1}, 3.1×10^4 cells · mL^{-1} 정도의 비교적 낮은 분포율을 보여주어 농업용 호소에서 녹조관리를 위한 주요 유해 남조류는 *Oscillatoria* spp.와 *Microcystis* spp.인 것으로 판단하였다.

3. 식물플랑크톤과 TN, TP, Chl-*a*, SD 상관성 분석

녹조를 유발하는 남조류의 생장은 다양한 물리화학적 또는 생물학적 요인에 의해 영향을 받는다. 현재까지 알려진 바에 따르면 수온, 광량, 및 체류시간이 남조류의 생장과 밀접한 물리학적 요인이며, 인과 질소와 같은 영양염류의 농도가 남조류의 생장에 직접적인 제한 요인으로 알려져 있다(Schindler *et al.* 2008).

농업용 호소에서 식물플랑크톤 현존량을 반영할 수 있는 수질 이화학적 항목을 살펴보고자 조류 현존량과 TN,

Table 3. Appearance frequency and standing crops of phytoplankton

Phytoplankton taxa	Species name	Appearance frequency	Standing crops of phytoplankton (cells · mL^{-1})		
			Max.	Min.	Average
Harmful cyanobacteria	*Anabaena* sp.	15	109,474	1,473	30,795
	Aphanizomenon sp.	4	82,800	1,937	36,800
	Microcystis sp.	74	2,173,684	97	188,073
	Oscillatoria sp.	134	2,078,348	211	206,919
Cyanophyta	*Aphanocapsa* sp.	18	61,495	655	15,399
	Aphanothece sp.	4	1,792	145	587
	Coelosphaerium sp.	1	21,004	21,004	21,004
	Gloeocapsa sp.	8	10,802	218	3,112
	Merismopedium sp.	28	13,250,000	581	537,793
	Synechocystis sp.	14	30,021	55	6,316
Chlorophyta	*Acanthococcus* sp.	6	3,928	158	1,610
	Actinastrum sp.	1	9,303	9,303	9,303
	Ankistrodesmus sp.	8	1,453	48	805
	Chlamydomonas sp.	110	125,000	53	3,726
	Chlorella sp.	118	87,289	53	5,127
	Chlorogonium sp.	1	1,053	1,053	1,053
	Chodatella sp.	19	6,547	55	1,444
	Chromulina sp.	1	53	53	53
	Closterium sp.	5	3,819	109	1,986
	Coelastrum sp.	34	68,758	291	8,915
	Cosmarium sp.	37	4,842	97	1,295

Table 3. Continued

Phytoplankton taxa	Species name	Appearance frequency	Standing crops of phytoplankton (cells · mL^{-1})		
			Max.	Min.	Average
Chlorophyta	*Crucigenia* sp.	5	4,910	1,418	2,952
	Dictyosphaerium sp.	11	5,456	158	2,087
	Eudorina sp.	1	14,545	14,545	14,545
	Franceia sp.	1	436	436	436
	Gloeocystis sp.	33	6,219	143	2,175
	Golenkinia sp.	7	2,273	263	1,113
	Kirchneriella sp.	52	4,211	53	906
	Mesotaenium sp.	2	1,053	105	579
	Micractinium sp.	5	51,579	968	16,589
	Monoraphidium sp.	59	12,589	89	1,898
	Nephrocytium sp.	2	1,091	194	643
	Oocystis sp.	46	4,286	48	848
	Palmella sp.	1	1,309	1,309	1,309
	Pandorina sp.	8	12,632	48	4,257
	Pediastrum sp.	19	20,076	291	6,089
	Phacotus sp.	1	1,053	1,053	1,053
	Scenedesmus sp.	109	33,120	53	4,628
	Schroederia sp.	64	2,946	53	704
	Sphaerocystis sp.	3	11,293	556	6,913
	Staurastrum sp.	44	4,364	48	957
	Staurogenia sp.	1	4,364	4,364	4,364
	Stichococcus sp.	1	218	218	218
	Tetraedron sp.	11	4,842	484	1,420
	Tetrastrum sp.	11	3,874	436	1,931
	Treubaria sp.	10	909	48	355
	Trochiscia sp.	3	526	53	225
Bacillariophyta	*Achnanthes* sp.	3	222	53	110
	Asterionella sp.	17	26,341	48	4,362
	Atteya zachariasi	2	222	196	209
	Aulacoseira sp.	51	22,727	55	2,982
	Cocconeis sp.	37	1,964	53	433
	Coronastrum sp.	8	2,182	194	1,315
	Cyclotella sp.	90	188,217	53	7,212
	Diatoma sp.	6	484	48	284
	Diploneis sp.	2	1,053	53	553
	Eunotia sp.	1	6,316	6,316	6,316
	Fragilaria sp.	2	218	211	215
	Gomphonema sp.	4	546	109	263
	Hannaea sp.	1	109	109	109
	Meridion sp.	2	9,474	8,947	9,211
	Melosira sp.	3	1,053	491	690
	Navicula sp.	54	55,200	48	3,905
	Nitzschia sp.	71	8,445	48	1,132
	Stephanodiscus sp.	89	14,528	109	2,059
	Surirella sp.	4	218	48	103
	Symbella sp.	4	1,091	48	335
	Synedra sp.	42	11,457	48	2,164
Euglenophyta	*Euglena* sp.	17	10,653	48	1,561
	Phacus sp.	5	2,727	526	1,268
	Trachelomonas sp.	131	10,911	53	1,444
Dinophyta	*Ceratium hirundinella*	3	546	158	417
	Peridinium sp.	12	982	48	479
Cryptophyta	*Cryptomonas* sp.	60	18,400	53	2,594
Chrysophyta	*Chrysococcus* sp.	1	48	48	48
	Dinobryon divergens	1	211	211	211

 ©2019. Korean Society of Environmental Biology.

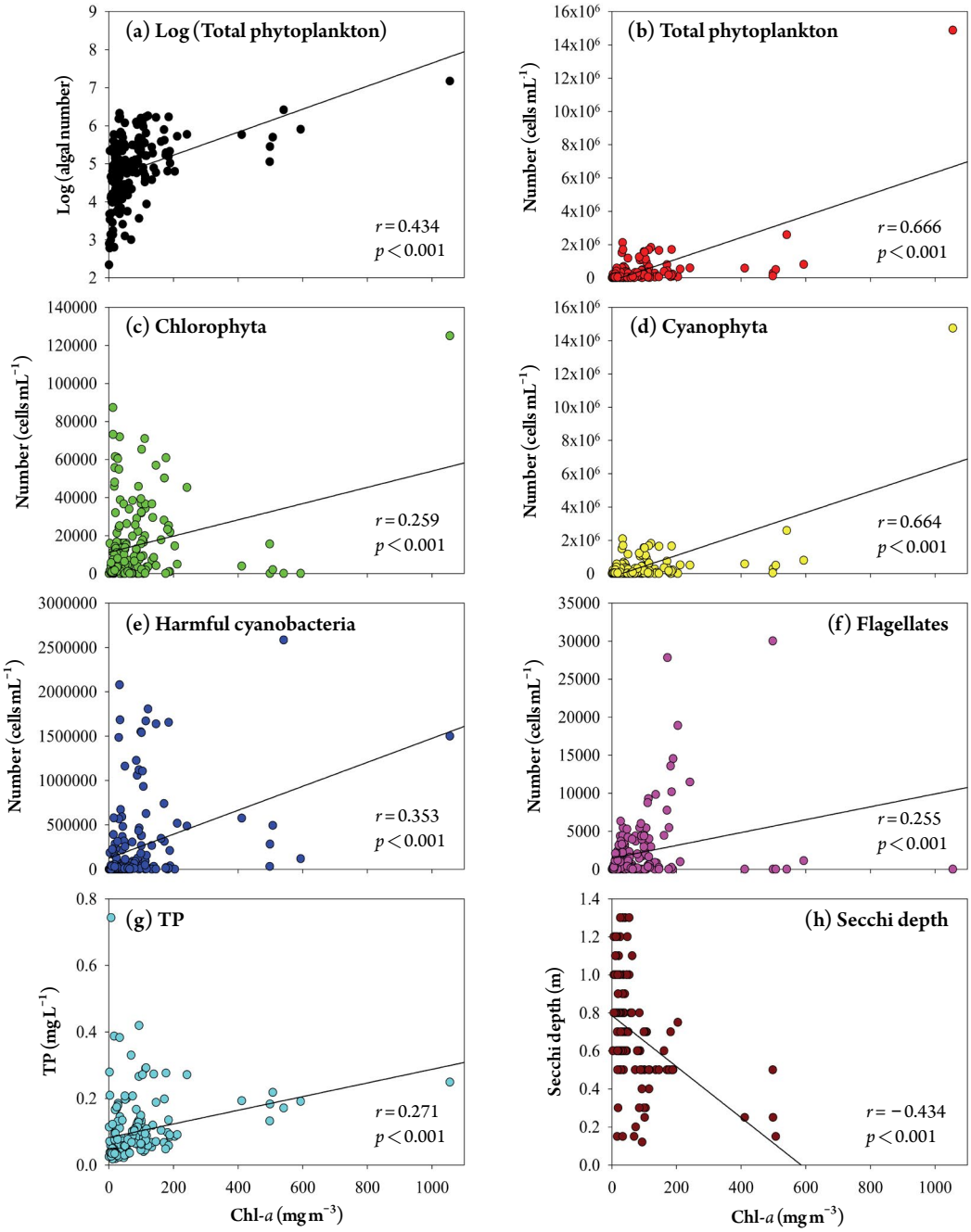


Fig. 2. Correlation of Chl-*a*, algal cell count and SD.

TP, Chl-*a*, SD 등의 상관계수(r)를 분석하였다(Fig. 2, Table 4).

총 조류 현존량은 남조류와 $r=1.0$의 일치성을 보이는 매우 강한 상관관계를 나타냈으며, 유해 남조류 $r=0.559$, 녹조류 $r=0.370$로 중상관관계를 보여주고 있어 농업용 호소에서 총 조류 현존량은 남조류 또는 유해 남조류 현존량을 반영하고 있음을 알 수 있었다. 총 조류 현존량과 이화학적 지표와의 상관관계를 보면 Chl-*a*와 $r=0.666$의 높은 상관관계를 보여주었고, 또한, SD와 $r=-0.351$의 부의 중상관관계를 보여주어 Chl-*a*와 SD 항목 역시 총 조류 현

Table 4. Correlation analysis with algal distribution and physiochemical factors (TN, TP, Chl-*a*, SD)

Parameter	Total phytoplankton	Bacillariophyta	Chlorophyta	Cyanophyta	Harmful cyanobacteria	Flagellates	TN	TP	Chl-*a*	SD
Total phytoplankton	1									
Bacillariophyta	−0.036 (0.631)	1								
Chlorophyta	0.370 (<0.0001)	0.304 (<0.0001)	1							
Cyanophyta	1.000 (<0.0001)	−0.063 (0.401)	0.347 (<0.0001)	1						
Harmful cyanobacteria	0.559 (<0.0001)	−0.106 (0.156)	−0.004 (0.955)	0.563 (<0.0001)	1					
Flagellates	−0.006 (0.934)	0.263 (0.000)	0.271 (0.000)	−0.020 (0.787	0.036 (0.627)	1				
TN	−0.003 (0.973)	−0.044 (0.554)	−0.027 (0.714)	−0.001 (0.988)	−0.115 (0.122)	0.022 (0.765)	1			
TP	0.137 (0.066)	−0.079 (0.288)	0.003 (0.966)	0.138 (0.062)	0.082 (0.272)	0.086 (0.247)	0.360 (<0.0001)	1		
Chl-*a*	0.666 (<0.0001)	0.042 (0.575)	0.259 (0.000)	0.664 (<0.0001)	0.353 (<0.0001)	0.255 (0.001)	−0.010 (0.896)	0.271 (0.000)	1	
SD	−0.351 (0.000)	0.073 (0.437)	−0.224 (0.016)	−0.340 (0.000)	−0.338 (0.000)	−0.123 (0.193)	−0.291 (0.002)	−0.678 (<0.0001)	−0.434 (<0.0001)	1

※The number in parentheses is *p*-value.

존량을 반영하였다.

남조류와 유해 남조류의 현존량 역시 이화학적 항목 중 Chl-*a*와 각각 $r=0.664$, 0.353으로 중상관관계를, SD와는 각각 $r=-0.340$, -0.338로 부의 중상관관계를 나타내어, 총 조류 현존량과 유사한 결과를 보여주었다. 반면 조류 현존량과 TN, TP의 항목과는 유의한 상관관계가 나타나지 않았다.

TN은 TP와 $r=0.360$, SD와 $r=-0.291$의 약상관관계를 보여주었으며, TP는 TN 외에 Chl-*a*와 0.271의 약상관관계를 보인 반면, SD와는 $r=-0.678$의 부의 중상관관계를 나타내었다. TN의 경우 국내 농업용 저수지에서 조체를 구성하는 유기 질소에 비해 질산염질소(NO_3-N)의 농도가 높기 때문에 Chl-*a*의 농도와 상관관계가 약한 것으로 알려져 있다. TP는 용존성 형태보다는 조체에 포함된 입자성 유기인의 비율이 높기 때문에, 조류 생물량의 지표인 Chl-*a*의 농도와 상관계수가 다소 높게 나타난 것으로 판단된다.

Chl-*a*의 농도와 상관관계를 나타내는 항목은 앞서 언급했듯이 총 조류, 남조류, 유해 남조류, 녹조류 등의 순으로 상관관계($p<0.05$)를 보여주었으며, SD와 −0.434, TP와 0.271의 상관관계를 보여주었다.

SD는 TP와 가장 높은 상관계수를 보여주었으며, Chl-*a*, 총 조류, 남조류, 유해 남조류 순으로 부의 중상관관계가 있음을 보여주었다.

4. 녹조진단 요소 항목 선정

농업용 호소의 녹조진단 요소항목을 선정하기 위해 15개소 182개 지점에 대한 조류분포 특성과 SD, Chl-*a* 등의 항목에 대해 상관관계 등을 비교 분석한 결과(Table 5), 총 조류 현존량과 남조류는 거의 동일한 수준의 상관관계를 보였으며, 유해 남조류, Chl-*a*와는 중상관관계를 보였고, SD와도 유의한 상관관계를 보여주었다. 유해 남조류 현존량은 남조류 현존량과 중상관관계를 보여주었고, Chl-*a*와 SD와는 유의한 약상관관계를 보이고 있어 총 조류 현존량, 유해 남조류 현존량을 대신하여 Chl-*a*, SD 등을 진단항목으로 사용가능할 것으로 판단되었다. 또한, Chl-*a* 항목에 대한 총 조류 현존량과 남조류 현존량이 $r=0.664$~0.666으로 중상관관계를, 유해 남조류 현존량과도 $r=0.353$의 유의한 상관성을 보이고 있으며, Chl-*a*와 SD 간의 상관

 ©2019. Korean Society of Environmental Biology.

Table 5. Correlation of algal species and Chl-*a*

Total phytoplankton	Cyanophyta	Bacillariophyta	Chlorophyta	Flagellates	Harmful cyanobacteria	*Microcystis* sp.	*Oscillatoria* sp.	SD	TP
0.666***	0.664***	0.042	0.259***	0.255***	0.353***	0.280***	0.240**	−0.434***	0.271***

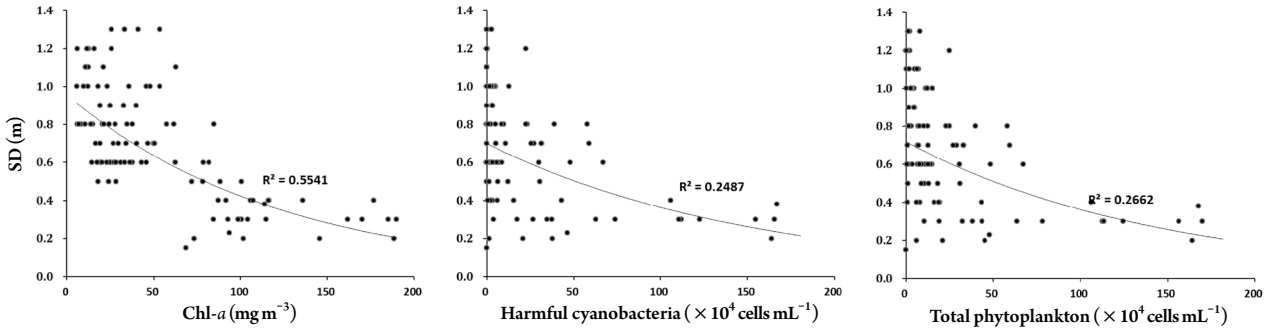


Fig. 3. Relationship between Chl-*a*, harmful cyanobacteria, total phytoplankton and SD.

관계 역시 $r=-0.434$로 유의성 있는 약상관관계를 보여주었다. KRF (2017)이 수중에서 측정되는 특정색소를 통해 남조류 생체량을 계측하는 원리로 개발한 남조류 실시간 계측 센서의 현장 적용성을 평가한 결과와 비교하면 탁도 ($n=40$, $R^2=0.0274$), Chl-*a* ($n=25$, $R^2=0.3701$)로서 본 연구의 SD가 Chl-*a* ($n=182$, $R^2=0.5541$), 유해남조류 ($n=182$, $R^2=0.2487$), 총 조류 현존량 ($n=182$, $R^2=0.2662$)의 값과 비교하면 SD를 이용한 녹조발생 진단방법이 상대적으로 더 높은 유사도를 보여주는 것으로 나타났다 (Fig. 3). 따라서 환경부 조류 경보제에서 사용하는 유해 남조류 현존량 분석을 대신하여 녹조예찰을 위한 진단 요소항목으로 Chl-*a*와 SD를 선정하고 실시간 실측값을 이용하여 진단을 할 경우, 그 결과에 대한 유의성이 있는 것으로 판단되었다.

5. 녹조진단 간편도구 개발 및 판단기준

농업용 호소의 녹조 상황을 파악하기 위해 유해 남조류 현존량 측정 대신 Chl-*a*와 SD를 이용하여 간편하게 녹조진단을 할 수 있는 도구를 개발하고, 아울러 녹조발생상황을 객관화 할 수 있는 지표를 함께 제시하여 녹조관리 방안 수립에 기초자료를 제공하고자 하였다.

본 연구에서 개발하고자 하는 녹조진단 도구는 SD와 탁도 측정의 방법을 변형하여 0.6 m 깊이의 뒤집어진 원뿔 모양의 용기로서 가로 주름형의 실리콘재질로 접었다 폈다가 가능하여 휴대가 간편하도록 제작하였다. 도구의 사양은 상단 지름 300 mm, 하단 지름 70 mm, 높이 600 mm, 원형환의 수 8개, 용기를 접었을 때 높이 50~60 mm 이내, 재질은 흰색의 실리콘으로 설계하여 제작하였다 (Figs. 4, 5). 또한, 강우 시 탁도 발생과 구분하기 위해 조류발생 정도에 따른 색도를 단계별로 표시하여 녹조 판단 조견표를 제시하였다. 도구의 구성은 접어서 보관 가능한 역원뿔형의 용기와 녹조 판단 조견표, 휴대용 가방 등이다. 도구의 장점은 현장수를 채취하여 즉각 판단이 가능하고, 보정 등의 유지관리가 필요 없다는 점이다. 녹조진단방법은 현장에서 용기에 직접 시료를 샘플링하고, 녹조발생 정도에 따른 투명도와 탁도에 따라 용기 내에 보이는 원형환의 개수를 계수하거나 각 원형환에 표시된 숫자를 관찰하고 (Fig. 6), 조류의 색도는 녹조판단조견표와 비교하여 최종 녹조단계를 판별하도록 하였다.

농림축산식품부와 한국농어촌공사는 농업용 호소의 녹조발생 정도를 육안으로 관찰하여 크게 4단계로 진단하여 왔다. 육안 판별에 방식을 정량화 방식으로 전환하여 Chl-*a* 농도에 근거한 4단계 진단표를 제시하였다. Table 6은 농업용수 수질오염재난 대응 현장조치 행동매뉴얼에 제시된 4단계 녹조예찰 기준과 본 연구에서 제시한 각 단계별 Chl-*a* 농도 기준과 도구를 이용한 원형환의 수를 나타낸 것이다.

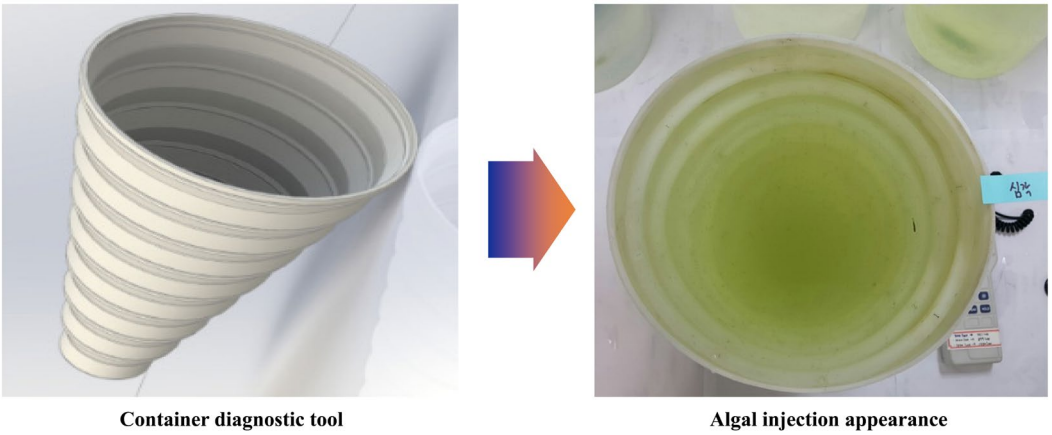


Fig. 4. Conceptual diagram of 3D container diagnostic tool and algal injection appearance.

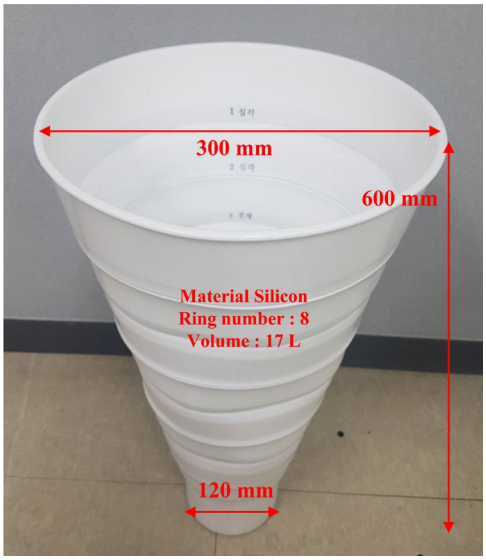


Fig. 5. Description of diagnostic tool (Container).

Table 6. Comparison four level criteria for algal bloom management

Level	Description of each criteria for algal bloom management	
	Chl-*a* (mg·m^{-3})	Diagnosis (Ring number)
Attention	≤20	6–8
Caution	≤35	4–5
Alert	≤70	2–3
Serious	>100	1

6. 녹조진단 판별법 및 적용방법

녹조진단 도구의 역삼각뿔 용기 내부에는 일정간격으로 수평의 8개 원형환과 각 원형환에 대한 번호를 위에서부터 순차적으로 표시하여 투명도와 탁도에 따라 보이는 원형환의 수가 원형환에 표기된 숫자와 동일하도록 하여 판독하기 용이하게 하였다.

즉, 역원뿔형의 용기에 현장수를 채취하여 담고, 위에서 내려다봤을 때 투명도 및 탁도에 따라 보이는 원형환의 수를 세거나 해당되는 원형환에 표기된 숫자를 읽어 녹조발생 단계를 판독하고, 아울러 용기 내 색도를 녹조발생 단계(관심, 주의, 경계, 심각)별로 표기된 녹조진단 조견표와 동일색도를 비교하는 등 2가지 방법으로 녹조단계를 판단한다. 이때의 2가지 결과를 비교하여 탁도 발생 등 다른 요인에 의한 결과는 배제하고, 높은 단계를 녹조발생단계로 최종 진단한다.

진단 도구의 현장 적용성 향상을 위해 농업용 호소의 녹조원인 유해 남조류로서 출현빈도가 절대적으로 높은 *Microcystis* sp., *Oscillatoria* sp.를 대상으로 실험실에서 대량 배양하여 현존량과 Chl-*a* 농도에 대응한 원형환의 수와 그에 따른 진단 결과를 Fig. 7, Table 7에 나타내었다.

진단 도구와 함께 제시되는 녹조진단 조견표에는 Chl-*a* 농도에 근거한 4단계 기준에 따라 실험실에서 배양한 대표 유해 남조류 2종(*Oscillatoria* sp., *Microcystis* sp.)과 녹조발생이 빈번한 대표 농업용 호소로서 HJ, CD, WS 등 3개 저수지의 현장수를 이용하여 각 단계별 색도를 판별할 수 있도록 조견표를 제작하였다. 녹조진단 조견표의 제작은 각 단계를 시료수를 용기에 담고 사진촬영 및 육안으로 색을 관찰한 후 ColorHexa를 통하여 각 단계의 색을 판별하여 코드명을 찾아가도록 하였으며, Hexa 코드명이 표기된

 ©2019. Korean Society of Environmental Biology.

No.	Level	Chl-*a* (mg·m^{-3})
6−8	Attention	20
4−5	Caution	35
2−3	Alert	70
1	Serious	over 100

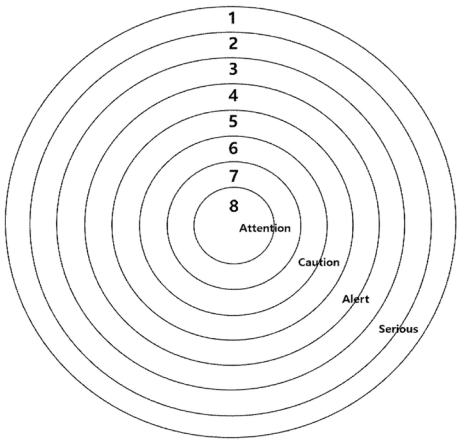


Fig. 6. Method of determining the level of algal using the diagnostic tool.

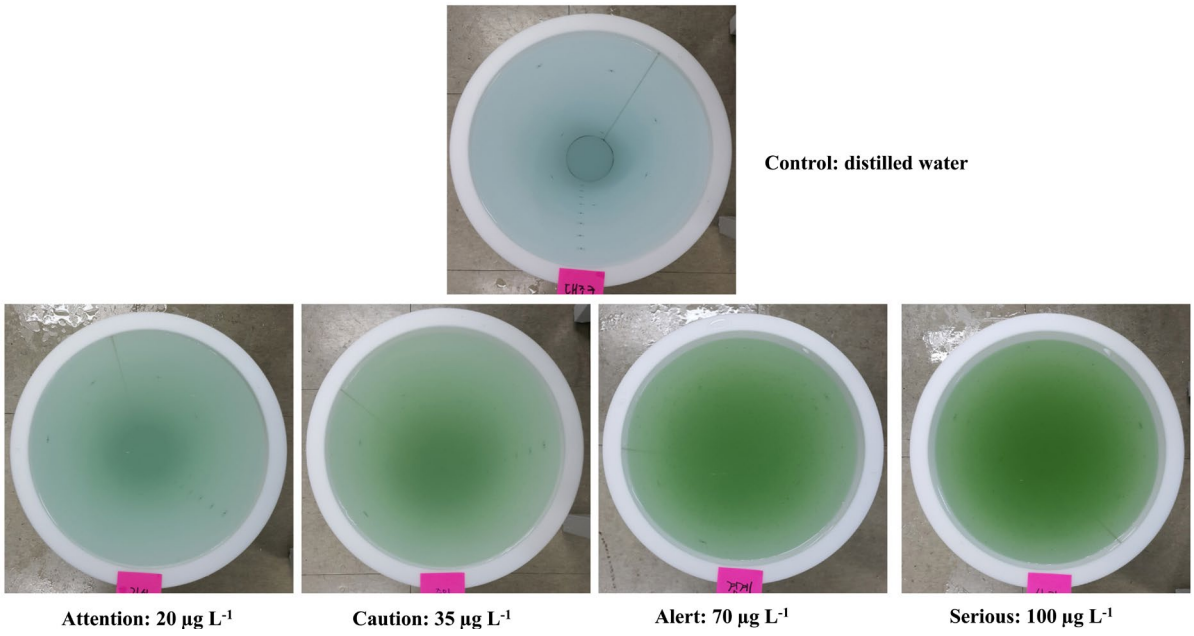


Fig. 7. Discrimination of algal blooming grade (*Oscillatoria* sp.) by diagnostic tool.

Table 7. Results of the diagnostic tool identification of the *Oscillatoria* sp. and *Microcystis* sp.

Level	Chl-*a* (mg·m^{-3})	Harmful cyanobacteria	
		Oscillatoria sp.	*Microcystis* sp.
Control (Tap water)	N.D.	8*	8
Attention	≤20	6	7
Caution	≤35	4	5
Alert	≤70	2	3
Serious	>100	1	1

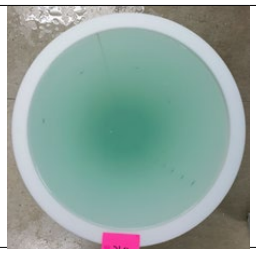
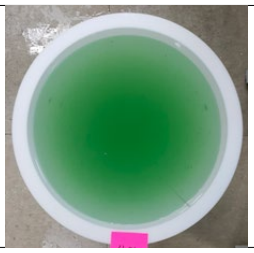
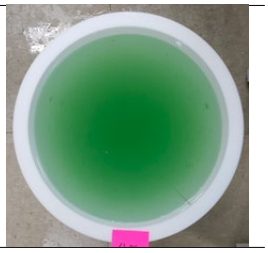
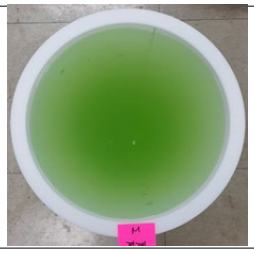
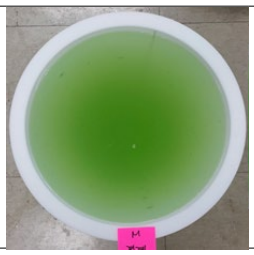
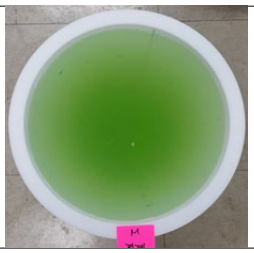
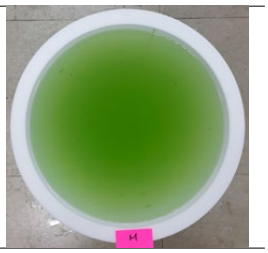
*Each number means the number of showing ring according to transparency.

부채모양의 조견표를 제작하여 휴대가 간편하도록 하였다(Fig. 8, Table 8).

실제 농업용 호소 적용 시에는 녹조진단 도구로서 원뿔형의 용기에 호소수를 담고 투명도에 따라 보이는 원형환의 수를 판독하고, 녹조판단조견표를 이용하여 같은 색도를 찾아 녹조단계를 판단하면 되므로, 사용자의 지식정도에 상관없이 객관적이며 동일한 결과를 얻을 수 있고, 2가지 방법을 병행하여 1가지 방법에 따른 변수와 오차를 보완하는 등 판단의 편리함을 함께 제공하였다.

Fig. 8. Diagnosis chart of algal blooming grade by an easy diagnostic tool.

Table 8. Hexa codes of diagnosis chart for algal blooming grade

Species	Attention	Caution	Alert	Serious
Oscillatoria sp.				
Code	#c0e2d3	#87a190	#6c9274	#5e8758
Microcystis sp.				
Code	#a6d4a9	#869c78	#779157	#6c8945

아울러 본 도구의 장점으로 육안관찰법의 한계를 극복하고, 광학계측기 또는 식물플랑크톤 현존량 계수법 등의 방법에 비해 비용 경제적이며 시간과 인력 소모가 적다는 점을 들 수 있으며, 간단하고 편리한 녹조진단으로 객관적인 자료를 확보함으로써 효율적인 녹조관리방안을 수립하고, 녹조로부터 안전하고 건강한 농업용수 확보에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 향후, 본 도구의 현장적용 결과를 토대로 정확도와 신뢰도를 추가분석하여 제시할 예정이다.

 ©2019. Korean Society of Environmental Biology.

적 요

본 연구는 농업용 호소의 녹조발생을 간편하고, 효율적으로 진단할 수 있는 도구를 개발하고자 하였다. 2018년 4월~10월 동안 15개 농업용 호소에서 채취된 182개의 시료를 이용하여 식물플랑크톤 현존량을 반영할 수 있는 수질 이화학적 항목을 살펴보고자 식물플랑크톤과 TN, TP, Chl-*a*, SD 등의 상관계수(r)를 분석한 결과, 총 식물플랑크톤 현존량은 Chl-*a* ($r=0.666$), SD ($r=-0.351$)와 높은 상관관계, 남조류와 유해 남조류 현존량 역시 Chl-*a*과 각각 $r=0.664$, $r=0.353$, SD와 각각 $r=-0.340$, $r=-0.338$로 유의성 있는 상관관계를 보여주었으나 TN, TP의 항목과는 유의한 상관관계가 나타나지 않았다. Chl-*a* 농도는 SD와 $r=-0.434$의 상관관계를 보여주어 식물플랑크톤 현존량보다 높은 유사성을 나타냈으므로, 조류경보제에서 사용하는 유해 남조류 현존량 분석을 대신하여 녹조예찰을 위한 진단 요소항목으로 Chl-*a*와 SD를 선정하고 실시간 SD 실측 값을 이용하여 진단을 할 경우 그 결과에 대한 유의성이 있는 것으로 판단되었다. 녹조진단 도구는 SD와 탁도 측정 방법을 변형한 역원뿔 모양의 용기와 녹조판단조견표로 구성되어 있으며, 현장수를 채취하여 녹조발생 정도에 따라 용기 내에 보이는 원형환의 개수 또는 각 원형환에 표시된 숫자를 관찰하고, 조류의 색도를 녹조판단조견표와 비교하여 최종 녹조단계를 판별할 수 있도록 하였다. 또한, 정확한 진단을 위해 Chl-*a* 농도와 원형환의 수에 근거한 4단계 진단 기준과 Hexa 코드명이 표기된 부채모양의 조견표를 제시하여 한가지 방법에 따른 변수와 오차를 보완하고 판단의 편리성을 함께 제공하였다. 이를 통해 농업용 호소의 녹조진단을 용이하게 할 수 있을 것으로 기대되며, 녹조관리방안 수립을 효율화하여 녹조로부터 안전하고 건강한 농업용수 확보가 가능할 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 2018년 한국농어촌공사 자체자금 연구개발사업 지원으로 수행되었음.

REFERENCES

Cho YC, SJ Jin, HJ Choi, MH Ryu and SH Yoo. 2016. Estimation of the aesthetic and environmental costs of algal bloom. Environ. Policy 12:227–246.

Cho HJ, JE Na, MH Jung and HY Lee. 2017. Relationship between phytoplankton community and water quality in Lakes in Jeonnam using SOM. Korean J. Ecol. Environ. 50:148–156.

Horne AJ and CR Goldman. 1994. Limnology. McGraw-Hill Inc., New York. p. 576.

Hwang SJ, CG Yoon and SK Kweon. 2003. Water quality and limnology of Korean reservoirs. Paddy Water Environ. 1:43–52.

KEC. 2012. Algal Removal Technique for Advanced Safety of Aquatic Ecosystem. Korea Environment Corporation, Incheon.

KRF. 2017. Application and development of model of artificial neural network based on long term ecological data. Korea Research Foundation, Daejeon.

Metcalf JS and GA Codd. 2012. Cyanotoxins. pp. 651–675. In Ecology of Cyanobacteria II: Their Diversity in Space and Time, Whitton BA (eds.). Springer, Dordrecht.

MAFRA. 2018. Annual Survey Report of Agricultural Water Quality on Measuring Network. Ministry of Agriculture, Food, and Rural Affairs, Sejong.

ME. 2017. Water Pollution Standard Method. Ministry of Environment, Sejong.

NIER. 2014. Characteristics of Cyanobacterial Toxin Production and Management Strategies of These Toxins (I). National Institute of Environmental Research, Incheon.

NIER. 2017. Manual for Operation of Algae Alarm System. National Institute of Environmental Research, Incheon. pp. 1–5.

Schindler DW, RE Hecky, DL Findlay, MP Stainton, BR Parker, MJ Paterson, KG Beaty, M Lyng and SE 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.

Smith VH. 2003. Eutrophication of freshwater and coastal marine ecosystems: A global problem. Environ. Sci. Pollut. Res. 10:1–14.

Wetzel RG. 1999. Limnology: Lake and River Ecosystems, 3rd eds. Academic Press, Sandiego, USA. p. 1006.