Journal of Environmental Science International
35(10); 981~993; October 2026

pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503
https://doi.org/10.5322/JESI.2026.35.10.981

TECHNICAL NOTE

기후위기 시대 공공 수질 통계 정확도 향상을 위한 수질오염공정시험기준 개선 방향 제언: *Pediastrum* 속 사세포 판정을 중심으로

박종명 · 홍지원[1,2)*]

인천광역시 상수도사업본부 맑은물연구소, [1)]경북대학교 생물학과, [2)]경북대학교 신바이오소재연구소

Proposed Amendment to the Official Water Quality Testing Standards to Improve the Accuracy of Public Statistics During the Climate Crisis: Focus on Discrimination of Dead *Pediastrum* Cells

Jong Myong Park, Ji Won Hong[1,2)*]

Water Quality Research Institute, Waterworks Headquarters, Incheon 21316, Korea
[1)]Department of Biology, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea
[2)]Advanced Bio-Resource Research Center, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

Abstract

This study examined the scientific and administrative limitations of the current official water quality testing standard, the "Phytoplankton-Microscopic Counting Method (ES 04705.1c)," in the context of increasing variability of aquatic ecosystems associated with the climate crisis and proposed regulatory and policy measures to improve the accuracy of public water quality statistics. The green algal genus Pediastrum retains its morphology after cell death because of its rigid cell walls. During sudden increases in flow caused by extreme rainfall, dead cells may be resuspended in the upper water column, potentially leading to overestimation of phytoplankton abundance. Analysis of three water samples from the Han River showed that Pediastrum accounted for 89.1% of the total phytoplankton abundance during hydrological disturbances. However, morphological discrimination indicated that more than 45% of the counted Pediastrumcomprised dead cells and cell wall remnants. Such misclassification can distort ecological diversity indices and reduce the reliability of operational data used by water treatment plants. To improve statistical objectivity and the practical utility of monitoring data for water treatment, this study proposes an administrative amendment introducing a "dual reporting" method that separately records viable and dead cells. Furthermore, to enhance regulatory acceptability and field applicability, a stepwise guideline was developed as a draft partial amendment, with standard light microscopy-based morphological discrimination as the primary approach and selective application of erythrosin B staining to anomalous samples. This proposed amendment could provide a scientific and institutional basis for climate adaptation policies while improving the reliability of public water quality statistics and supporting proactive risk management at water treatment plants.

Key words : Official water quality test standards, *Pediastrum*, Dual reporting, Public statistical accuracy, Climate adaptation policy

Received 21 July, 2026; **Revised** 13 September, 2026;
Accepted 22 September, 2026
***Corresponding author** : Ji Won Hong, Department of Biology, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea
Phone : +82- 53-950-5344
E-mail : jwhong@knu.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

특정한 환경의 미생물 상은 그 환경이 처한 상황을 대변하므로, 미생물 군집의 종(species) 조성을 모니터링 하고 종별 분포 및 다양성 지수 등의 평가를 통하여 수계의 물리·화학적 상태 및 환경-생물간 혹은 생물 종 간의 상호작용에 대해 평가할 수 있다. 이는 세균(bacteria), 진균(fungi)과 더불어 조류(algae) 군집 또한 마찬가지이다. 조류를 포함한 미생물 군집(microbial community)은 통상적인 물리·화학적 분석이 놓치기 쉬운 '누적된 환경 변화의 역사'를 대변하는 생물지표(bioindicator)이다(Bade et al., 2007; McLellan et al., 2015; Møller et al., 2020; Oshun and Grantham, 2023). 수계 내 식물성 플랑크톤의 종 조성, 우점도, 다양성 지수(shannon Index 등) 는 부영양화, 유기물 오염, 기후변화 (수온 상승) 등 수계가 처한 환경적 스트레스를 정량적으로 구현하게 되므로, 국내에서도 다양한 연구들이 이어져 왔다(Thawabteh et al., 2023; Park et al., 2024).

한반도 담수 환경(freshwater environment)에 출현하는 녹조류(green algae), 규조류(diatom) 및 남조류(blue-green algae) 중 몇몇 종들은 조류 독소 생산(Thawabteh et al., 2023), 정수처리 공정에서 여과막 폐색 유발, 수돗물 이취미 유발 등의 부정적 영향을 미칠 수 있다(Palmer, 1959; Lanciotti et al., 2003; Park et al., 2014; Kumar, 2021). 또한 조류의 증감 그 자체는 총인(total phosphorus, T-P), 총질소(total nitrogen, T-N) 등의 유입으로 인한 결과이기도 하다. 따라서 조류 군집에 대한 모니터링은 수질 보호를 위한 공공 거버넌스에 있어 중요한 위치를 차지한다. 그러므로 우리나라에서는 수질오염공정시험기준 상에 시료 채취 및 이송 보관, 시험분석 절차 및 결과 보고의 기준이 엄격하게 성문화되어 있고, 시료 채취부터 측정 분석, 결과 보고 등의 전 과정에 있어 정도관리 체계 또한 엄격하게 준수되고 있다(Ministry of Environment, 2025; National Institute of Environmental Research, 2025).

그러나 최근 기후변화와 기후 위기에 의한 자연적 현상(극한 호우, 수변환경 토지피복도 저하 혹은 급작스러운 댐 방류 등) 에 의해 일부 녹조류 종의 계수에 있어 오차가 발생할 소지가 있는 것으로 보이는데, 이는 해당 녹조류 종의 구조적·생화학적 특성에서 기인한다. 대표적인 예로 훈장말 속(genera *Pediastrum*)은 구조적 특성상 대칭적인 기하학적 군체(colony)를 이루며, 견고하고 단단한 세포벽 구조로 되어 있어 물리·화학적 스트레스에 매우 강하다(Millington and Gawlik, 1967; Jankovská and Komárek, 2000; Zamaloa and Tell, 2005). 문제는 최근 빈발하는 극한 호우나 그로 인한 급작스럽고 인위적인 댐 방류 등으로 인해 수계 내 유속이 급증할 때, 퇴적되어 있던 *Pediastrum* 속의 사세포(dead cells) 및 빈 세포벽 구조물이 상층으로 일시에 재부유(resuspension) 된다는 점이다(Xiang et al., 2021; Anzani et al., 2026).

현행 수질오염공정시험기준(ES 04705.1c)의 식물성 플랑크톤 현미경 계수법은 이러한 사세포와 현시점 수계에서 실제 대사 활동을 하는 생세포(viable cells)를 판정하고 분리 계수하는 명확한 기준이 제시되어 있지 않다. 해당 기준은 외형적 동정법(identification)과 격자 내 계수(counting) 방법만을 규정하고 있을 뿐, 세포질(cytoplasm)의 잔존 유무나 엽록소(chlorophyll) 유출 여부에 따른 사세포 판정 가이드라인을 전혀 제공하지 않는다. 아울러 공정 시험 기준상의 참조 자료인 부록 '담수조류 분류표' 및 '담수조류 그림'은 2014년 이후 10년 이상 개정되지 않아 기후 위기로 인한 현시점의 수리·수문학적 변화와 이에 따른 조류 거동 특성을 반영하기에 역부족이다. 이처럼 명확한 판정 기준의 부재는 시험 결과의 최종 확정에 있어 분석기관의 운영 목적이나 분석자의 경험적·주관적 판단이 영향을 미치게 될 소지가 있다. 또한 생태학적 모니터링 측면에서는 기능이 상실된 'ghost biomass'가 실제 우점 조류 종으로 오인 계수됨으로써 실제 종 다양성 지수를 왜곡하고 연구 및 조사 데이터의 신뢰성을 저해할 수 있다. 이는 국가 조류 모니터링 데이터 전반의 객관성을 저해할 뿐만 아니라, 총인, 총질소 등 수질 인자와 연관되어 분석되는 chlorophyll-a 항목과의 연계 해석에 있어 통계적 착시와 왜곡을 유발하는 원인이 된다.

이에 본 연구에서는 *Pediastrum* 속 세포의 생화학적·구조적 특성과 기상 이변에 따른 재부유 메커니즘이 수질 모니터링 데이터에 미치는 오류를 시뮬레이션하고, 한강 수계 상수원 인접 구간 실증 데이터를 바탕으로 이를 검증하고자 한다. 나아가 데이터의 객관성 확보 및 적절한 수질 행정을 위해 생세포와 사세포를 구분하여 병기하는 이원화 기록 방식(dual reporting)을 제안

하고, 현장 실무 수용성을 고려한 사세포 판정 가이드라인의 제도적 고찰을 수행하여 공공 수질관리 체계의 정합성을 확보할 수 있는 개선 방향을 제언하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 사세포의 계수가 농도 산출에 미치는 영향 시뮬레이션

*Pediastrum*의 고유한 세포 특성, 특히 세포벽의 구성 성분, 기하학적 특성 및 분열 생장 특성이 측정오차를 유발하는 주요인으로 볼 수 있다. *Pediastrum* 속은 여러 개의 세포가 기하학적으로 대칭을 이루며 편평한 원반형 또는 구형의 군락을 형성하고, 바깥쪽으로 확장해 나가면서 4개, 8개, 16개, 32개, 64개 혹은 최대 128개의 세포가 하나의 군체를 이룬다(Millington, 1981). 이들은 생존성이 다하더라도 내부 기관과 광합성을 위한 chlorophyll만 소멸할 뿐, 구조적 뼈대는 그대로 혹은 다수의 셀 중 몇 개만 부서진 채로 수계의 퇴적층에서 수백 년간 보존되므로 고생물학적 가치를 지닐 정도로 구조적 보존성이 높다(Jankovská and Komárek, 2000; Zamaloa and Tell, 2005).

평상시 정체 수역에서 중력 침강하여 저서 층에 퇴적되어 있던 *Pediastrum* 사세포는, 극한 호우 및 댐 방류 시 발생하는 강한 전단 응력(shear stress)과 와류에 의해 상층으로 강제 재부유될 수 있으며, 그 구조적 특성으로 인해 침강은 저하된다(Xiang et al., 2021; Anzani et al., 2026). 세포질이 소실되어 물과의 밀도 차이가 극소화된 사세포는 Stokes의 법칙에 따라 침강 속도가 극도로 저하되는데, 관련 선행 연구에 따르면 기본적으로 Stokes의 법칙하에서 입자의 침강 속도는 세포 반지름의 제곱에 비례하기 때문에, 세포의 물리적 크기와 외형적 구조는 침강률을 결정짓는 핵심 변수라고 하였다(Xiang et al., 2021; Park et al., 2022). 단, 단세포 녹조류와 달리 *Pediastrum* 속은 세포들이 기하학적으로 대칭을 이루며 거대한 판상 군락을 형성하므로, 개별 세포의 사멸로 밀도가 급감한 상태에서도 군체 전체의 큰 입자 반경과 높은 형상 저항이 결합하여 침강 지연 현상이 수배 이상 증폭되는 역설적인 유체 역학적 결과를 낳는다. 따라서 사세포는 유속이 감소한 이후에도 상층 수생태계에 장시간 부유 상태를 유지하게 된다. 이처럼 '물리적 소요에 의한 재부유'와 '부유 장기화'의 결합이 환경 시료 내에서 총 조류 밀도 데이터 정확도를 저하하는 주원인이 된다.

한편, 현행 국립환경과학원 고시 수질오염공정시험기준(ES 04705.1c) '식물성 플랑크톤-현미경계수법'에 따르면, 식물성 플랑크톤의 정량 분석은 격자 내 세포수(cells/mL) 단위로 계수하는 것을 원칙으로 한다(Ministry of Environment, 2025). 군체를 형성하는 종의 경우, 현미경 시야 내에서 관찰된 총 군체의 수에 군체 당 평균 세포 수를 곱하거나 각 군체의 세포 수를 직접 합산하여 개체수 농도를 산출한다(Ministry of Environment, 2025). 조사한 격자 열 칸(10칸)에 각각 *Pediastrum* 사세포가 64 cells 형태로 관찰된 대부분의 격자 칸에서 발견되었다고 가정하고, 최종 농도를 다음과 같이 산출할 수 있다. 만약 극한 호우나 댐 방류로 인해 과거 저서 층에 축적되어 있던 사멸된 *Pediastrum* 군체가 대량으로 재부유될 경우, 농도 산출 공식에 미치는 수치적 왜곡될 것이다. 예를 들어, 세포질이 모두 소실되고 형태만 유지된 64-세포형 *Pediastrum* 군체 각 1개가 각각의 10개의 격자에서 관찰되었을 때, 이는 총 640-세포가 되며, 총 1,000칸(즉, 조류 농도 산출 기준인 1 mL에 대응하는) 에서는 그 100배(즉, 1,000개의 격자/10개의 격자) 인 총 64,000 cell이 관찰된 것이므로, 별도의 희석이나 농축 과정 없이 원액을 관찰하였을 때 최종 농도는 64,000 cells/mL로 도출되게 된다.

1) 세드윅-라프터(sedgwick-rafter, S-R) 챔버 표준 규격 기준

- 챔버 전체 부피: 1 mL (1,000 mm^3)
- 챔버 내측 면적: 가로 50 mm × 세로 20 mm (= 1,000 mm^2)
- 챔버 내부 깊이: 1 mm
- 바닥면 격자 구조: 가로 50줄, 세로 20줄로 구성된 총 1,000개의 격자 칸
- 격자 1칸당 부피: 가로 1 mm × 세로 1 mm × 깊이 1 mm = 1 mm^3

2) 현행 표준 결과 산출식(ES 04705.1c 기준) N = (C × 1,000) / (V × S)

- N: 원수 1 mL 당 식물성 플랑크톤 세포수(cells/mL)
- C: 검경 시 계수한 총 세포수(cells)
- V: 침강 챔버 주입에 사용된 실제 시료의 부피(mL)
- S: 현미경으로 검경한 총 격자 칸의 수(예: 1,000칸 중 100칸을 계수했다면 S = 100)

Table 1. Abundance and morphological viability distribution of the genus *Pediastrum* at Han River water system during the hydrological disturbance

Sampling sites	GPS coordinates	Total phytoplankton (cells/mL)	Total *Pediastrum* (cells/mL)	*Pediastrum* share (%)	Viable *Pediastrum* (cells/mL)	Dead *Pediastrum* (cells/mL)	Dead cell ratio (%)
Site 1	37°31'10.28"N 127°05'27.32"E	680	588	86.5	323	265	45.1
Site 2	37°31'07.47"N 127°05'08.04"E	520	440	84.6	242	198	45.0
Site 3	37°31'37.03"N 127°04'27.36"E	502	488	97.2	269	219	44.9
Mean ± SD		567.3 ± 98.0	505.3 ± 75.5	89.4 ± 6.8	278.0 ± 41.3	227.3 ± 34.3	45.0 ± 0.1

3) 산출결과

- 총 계수된 세포 수: 640 세포(64세포 형태 × 10칸)
- 조사한 격자 수: 10칸
- 농축(희석) 배수: N (실제 실험 값 대입 필요)
- 최종 농도 = 64,000 × n (cells/mL) [단, n은 농축 또는 희석 배수를 의미함]

이는 실제 수계의 생물학적 활성을 가진 세포가 아님에도 불구하고, 집중 강우나 댐의 방류에 의하여 단 몇 개의 군체 유입되더라도 정수장의 정수처리 실무자들은 수돗물 이취미 유발 물질 증가를 우려한 분말활성탄의 준비, 공정 운영 조건 변경 및 그를 위한 예산지출을 고민해야 할 정도로 수치상의 왜곡을 유발한다. 따라서 형태 구조적 내성이 강한 다세포 녹조류의 사세포 계수 여부는 환경 통계의 신뢰도와 직접적으로 직결되는 정량적 변수로 사료된다.

2.2. 현장 시료 채취 및 분석

상기와 같이 도출된 시뮬레이션 결과를 실증하기 위해 현장 시료를 채취하여 분석하였다. 실증 분석을 위해 수문학적 변동성이 극대화된 2024년 9월 5일, 한강 상수원 구간 인접 3개 지점에서 담수 시료를 지점당 3회씩 총 9개 채취하였다(Table 1). 시료 채취는 반돈(van dorn) 채수기를 이용하여 표층 하 0.5 m을 대상으로 수행하였고, 현장에서 즉시 차광한 폴리에틸렌 시료 병(1 L)에 분주한 후 루골 용액(lugol's solution)을 최종 농도 1%(v/v)가 되도록 첨가하여 세포를 암소 고정하였다.

고정된 시료는 실험실 이송 후 현행 수질오염공정시험기준(ES 04705.1c)에 의거하여 정량 분석을 수행하였다. 시료의 균질화를 위해 전도 교반을 20회 이상 충분히 실시한 후, 정확히 1 mL의 시료를 마이크로 피펫으로 취하여 세드윅-라프터 챔버(sedgwick-rafter chamber)에 주입하였다. 주입된 시료 내 플랑크톤 세포의 침강을 유도하기 위해 평탄한 암소 환경에서 30분 이상 정치하였다.

검경 및 정량 계수는 광학현미경(olympus BX53, Japan)을 사용하여 수행되었다. 분석원 간의 주관을 배제하고 통계적 대표성을 확보하기 위해, 무작위로 구획된 격자 열 칸(총 100칸) 이상을 대각선 및 지그재그 방향으로 가로지르며 배율 200배 및 400배 환경에서 반복 검경하였다(Schoen, 1988; Son, 2013). 특히 *Pediastrum* 속 군체 내의 세포질 잔존 여부와 형태학적 세부 구조의 시각적 식별력을 극대화하기 위해, 일반 투과형 백색광(bright-field) 모드와 현미경 콘덴서 상단에 녹색 필터(green filter, 546 nm)를 삽입한 모드를 실시간 교차 활용하여 동정 및 계수를 진행하였다. 최종 현존량 농도 계산은 2.1에 제시된 공정시험기준 공식을 적용하여 cells/mL 단위로 산출하였다.

또한 현행 공정시험기준(ES 04705.1c)에 따른 외형 중심의 '단순 계수 방식(A)'과 본 연구에서 제안하는 '생세포 선별 계수 방식(B)' 간의 정량적 오차 및 과다 산정(overestimation)의 통계적 유의성을 검증하기 위해 대응 표본 t-검정(paired t-test)을 실시하였다. 분석은 한강 3개 지점에서 채취한 총 9개의 담수 시료(지점별 3회 반복치)를 대상으로 수행되었다. 통계 분석의 수리적 검증을 위해 두 집단 간 차이의 평균(D)을 차이의 표준오차($S_D/\sqrt{n}$)로 나누어 t-값(t-statistic)을 산출하였다.

2.3. 생태학적 연구 수행 시 오차 유발 요인 추정

담수조류 군집 평가 시 사세포와 세포벽 잔재물을 분리하지 않고 조류 밀도 분석에 포함하는 것은 수생태계 모니터링 데이터의 신뢰성을 저해하는 가장 결정적인 오차 유발 요인이다. 이는 실제 대사 활동을 수행하는 활성 군집의 생태적 기능과 현시점의 수질 상태를 왜곡하여 해석하게 만드는 원인이 되므로, 정확한 환경 미생물 군집 분석을 위해서는 생세포와 사세포의 명확한 구분이 필수적이다. 구체적으로 사세포 및 잔재물 유입이 주요 군집 평가지표에 미치는 영향을 각각의 생물다양성 지수의 통계적 특성을 바탕으로 시뮬레이션해 보았을 때, 다음과 같은 수서 생태 다양성 지표의 오차를 유발할 수 있다.

종 풍부도(species richness): 종 풍부도란 특정 생물 군집이나 지역 내에 존재하는 서로 다른 생물 종의 총 개수로 정의되며, 종 수준뿐만 아니라 넓게는 문(phylum), 강(class), 목(order), 과(family) 등의 분류학적 다양성(taxonomic diversity)을 Margalef's richness (Dmg) 혹은 Menhinick's index (Dmn) 지수 등을 통하여 대수적으로 구현할 수 있다(Margalef, 1958; Whittaker, 1977). 이 지수가 사용되는 이는 생물 군집이 처한 환경조건 하에서 종 별 조성비는 달라질 수 있으므로, 환경이 급변하여 우점종이 멸종하더라도, 그 역할을 대체할 수 있는 다른 종들이 군집 내에 존재하므로 생태계 전체가 붕괴하지 않고 능동적으로 회복(생태적 탄력성) 할 수 있는 잠재력을 정량적으로 구현하는 것이다. 수계 내에서 사세포, 피각(frustule), *Pediastrum* 속의 빈 세포벽 등이 구분되지 아니한 채로 계수 항목에 포함될 경우, 특정 속(혹은 종)의 개체수가 인위적으로 증가할 수 있다. 이는 현시점의 수생환경 조건에서 생존 및 번식 중인 실제 생물상보다 통계적 종 풍부도 즉 생태계의 회복탄력성이 과대평가되는 오류로 연결될 수도 있다.

우점도(dominance)와 균등도(evenness): 우점도란 특정의 분류군이 해당 군집 내에서 얼마나 압도적인 영향력(차지하는 비율)을 가지고 있는가를 나타내는 지표이다. 대표적으로 심슨 지수(simpson index) [1-D]의 경우이며, 군집 내에서 무작위로 뽑은 두 개체가 같은 종일 확률을 정량적으로 산출한다(Lambshead et al., 1983; Mendes et al., 2008). 이 값이 1에 가까울수록 특정 종의 독점(우점도)이 심하다는 의미이다. 우점도가 너무 높은 생태계는 겉보기에는 풍요로워 보일 수 있으나, 환경의 급변이 발생하면 군집 생태계 전체가 무너지는 불안정성을 가진다. 본 연구에서 지적된 사항에 대하여, 특정 종의 개체수 비율(pi)이 허수로 부풀려짐에 따라 지수 값이 왜곡되며, 이는 역설적으로 현재 수생태계의 안정성(다양성)을 실제보다 과소평가하게 만드는 결과를 초래한다. 한편, 균등도란 군집 내에 존재하는 여러 종의 개체수가 얼마나 골고루, 일정하게 분배되어 있는가를 나타내는 지표이다. 모든 종의 개체수가 비슷할 때 균등도가 높다고 하며, 특정 종만 많고 나머지는 희귀하다면 균등도가 낮다고 해석한다. 과거 특정 시기에 대량 증식했던 우점종의 세포벽 잔재물이 물리적 요인(극한 호우 및 그로 인한 댐 방류 등) 으로 인해 한꺼번에 수계로 재유입되면, 해당 종의 개체수가 수치상으로 부풀려질 수 있다. 결과적으로 군집 내 종별 개체수 비율의 균형성을 나타내는 균등도 지수가 급격히 하락하거나, 특정 종에 대한 우점도가 과도하게 높게 나타나게 된다. 이는 환경 미생물 군집을 구성하는 생물종 간의 역학적 상호 관계(biological interaction)를 왜곡하여 해석하게 되는 오류를 유발할 수 있다.

Shannon-Weiner 다양성 지수(H'): 생태학에서 생물 군집의 다양성을 평가할 때 가장 널리 사용하는 지표로서, 단순히 종의 수(종 풍부도)뿐만 아니라, 각 종이 얼마나 골고루 섞여 있는지(종 균등도)를 동시에 반영하여 생태계의 복잡성과 건강도를 최종적으로 정량화한다(Lambshead et al., 1983; Mendes et al., 2008). 출현 종 수(S) 와 각 종의 상대적 비율(pi)을 동시에 반영하는 지수 H'의 경우, 이 사멸한 세포나 물리적으로 분쇄된 세포벽 잔재물이 새로운 독립된 종 또는 개체로 오인되어 계수될 위험이 크다. 이 경우 출현 종수(S)의 인위적 증가로 인해 현재 수계의 생태적 다양성이 실제보다 비정상적으로 높게 계산될 수 있다.

생태적 건강도(ecological health) 평가의 한계: 생태적 건강도 평가는 생태계의 구조적 온전성, 기능적 원활성, 그리고 외부로부터의 교란에 대한 회복탄력성을 종합적으로 진단하는 과정으로, 특히 한국에서는「물환경보전법」제9조의 3(수생태계 현황 조사 및 건강성 평가) 에 따라 국가(기후에너지환경부)가 전국 하천을 대상으로 의무 수행하는 법정 국가 모니터링(국가승인 통계) 제도이며, 생물 측정망 형태로 운영되고 있다(Costanza, 1997; Ministry of Environment, 2024; Kim et al., 2025).

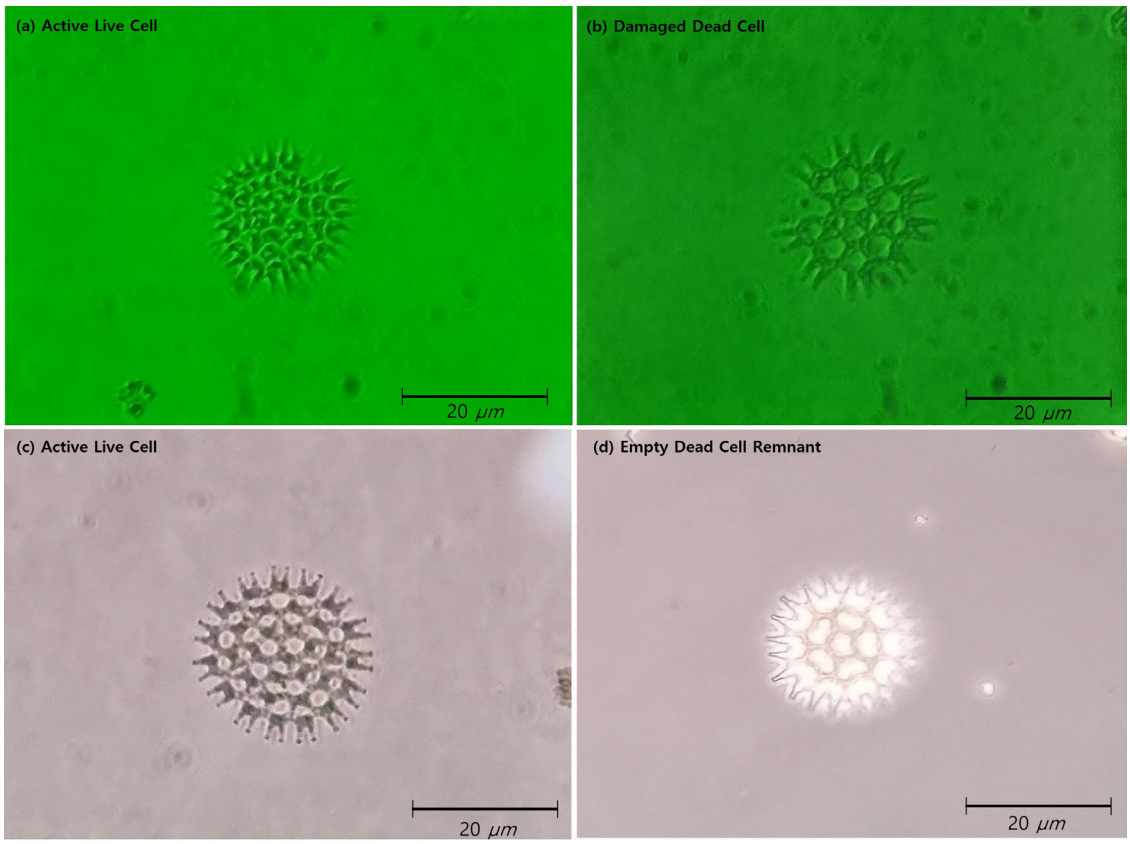


Fig. 1. Morphological distinction between active viable (live) cells and dead cell wall remnants of the genus *Pediastrum* sampled from the Han River water (400×). The top row represents observations under a green filter environment, comparing (a) an viable cell colony with complete structural density and (b) a damaged dead cell remnant exhibiting structural abrasion, cell wall fracture, and loss of intracellular protoplast due to physical turbulence. The bottom row represents standard light microscopy observations, comparing (c) an active viable cell colony filled with dense, dark protoplast and (d) a complete dead cell wall remnant (ghost cells) characterized by a transparent, empty cell wall network resulting from total chloroplast loss (Note: These specimen images were acquired using field-level digital imaging techniques to empirically verify immediate readability and practical applicability within the routine monitoring environments of water treatment plants).

*Pediastrum*의 사세포와 잔재물은 과거 수생환경의 누적된 오염 이력을 대변할 뿐, 현재 수계 내에서의 영양염류 소비, 산소 공급, 먹이사슬 내 일차 생산자로서의 물질 순환에는 전혀 기여하지 못한다. 따라서 이들을 포함한 다양성 지수와 생물학적 수질 평가지표는 현시점의 실시간 수질 상태를 반영하는 실효성 있는 지표로 활용하기 어렵다. 결과적으로 환경 행정가들이 오염되지 않은 수계를 오염 수계로, 혹은 그 반대로 오인하게 만들어 환경 규제 및 예산 집행의 효율성을 저해하는 상황으로 이어질 수 있다고 사료된다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 현장 시료에서 *Pediastrum* 속의 생·사세포 형태학적 특징 대조

기후 위기 대응형 수생환경 모니터링 체계 구축을 위해 한강 원수의 *Pediastrum* 속의 생세포와 사세포 잔재물의 형태학적 특징을 분석한 결과, 검경 조명 환경

(그린 필터 및 백색광) 에 따라 가시적인 차별성이 도출되었다(Fig. 1).

첫째, 그린 필터 환경 하에서 활성을 가진 생세포(Fig. 1a)는 군체의 2차원적 평면 구조가 완벽히 유지될 뿐만 아니라, 세포벽 내부가 어둡고 빽빽한 활성 원형질(protoplast) 및 엽록체 성분으로 균일하게 충만해 있었다. 반면, 물리적 충격을 받아 재부유 된 파손된 사세포(Fig. 1b)은 군체의 방사형 대칭 구조가 붕괴되어 일그러져 있었으며, 외곽 돌기(horn-like projection)의 마모·유실 및 세포벽 파열이 선명하다. 또한 세포질이 탈루되어 내부가 부분적으로 투명하게 비치는 공동화 현상이 확인되었다.

둘째, 일반 백색광을 조건으로 한 검경 분석 결과, 활성 세포로 구성된 군락은(Fig. 1c)는 루골 용액 고정에 의해 내부 엽록체가 갈색 및 어두운 색상으로 꽉 차 있는 대조를 보였다. 이와 대조적으로 사세포들은(Fig. 1d)은 세포질이 소실 및 탈루되어, 광학현미경의 빛이 세포 내부를 그대로 통과하는 빈 세포벽 구조를 띠고 있었다. 형태적 윤곽과 그물망 구조(cell wall network)는 온전하게 유지하고 있으나, 내부 원형질은 흔적조차 없이 투명하게 빛나는 형태학적 차이를 명확히 입증하였다.

현행 수질오염공정시험기준(ES 04705.1c) '식물성 플랑크톤-현미경계수법'의 단순 계수 방식을 적용할 경우, 분석원은 Fig. 1b의 파손된 껍질이나 Fig. 1d의 투명한 빈 세포벽 개체 역시 살아있는 *Pediastrum* 생물량으로 그대로 계수하게 된다.

본 연구 기간 중 수문학적 격변기에 한강 시료를 분석한 결과, 총 조류 밀도는 3지점 각각 3회 반복치의 평균으로서 680 cells/mL, 520 cells/mL, 502 cells/mL (평균 567 cells/mL)로 나타났으며 이 중 *Pediastrum* 속이 3지점 각각 3회 반복치의 평균으로서 588 cells/mL, 440 cells/mL, 488 cells/mL (평균 505.3 cells/mL)를 차지하여 전체 현존량의 89.1%라는 압도적인 우점률을 기록하였다. 조사 당시 한강 수계는 유역을 구성하는 댐들의 동시다발적인 수문 개방으로 인해 강한 수리적 전단 응력(hydraulic shear stress)과 flushing effect가 작용하였으며, 이에 따라 유속을 견디지 못한 다른 조류 종들은 대부분 수체에서 탈루되어 거의 출현하지 않는 전형적인 수문 교란 상태를 나타냈다.

그러나 압도적 우점종으로 계수된 *Pediastrum* 속 계수량 중 약 45.0% 이상(682 cell)이 실제 수질 이상을 유발하지 않는 사세포 및 세포벽 잔재물인 것으로 확증되었다(Table 1). 이는 현행 수질오염공정시험기준(ES 04705.1c) '식물성 플랑크톤-현미경계수법'의 단순 계수 방식을 그대로 적용할 경우, 시험자가 Fig. 1b의 파손된 껍질이나 Fig. 1d의 투명한 빈 세포벽 개체까지 모두 살아있는 활성 생물량으로 오인하게 될 경우 시험분석 결과의 왜곡 가능성을 보여준다. 그러한 경우 전체 현존량의 무려 45.0% 이상에 달하는 사세포 데이터가 현재 수체에서 이취미 유발 녹조가 증식 중인 것처럼 부풀려지는 해석상의 오류가 발생할 것이다. 실제 *Pediastrum* 속의 총 계수량(평균 505.3 cells/mL)과 형태학적 감별을 통해 도출된 생세포 농도(평균 278.0 cells/mL) 간의 오차를 수리적으로 검증하였는데, 분석 결과 두 집단 간의 평균 차이(D)는 227.3 cells/mL이었으며 차이의 표준편차(S_D)는 31.25로 나타났다. 샘플 수 9개에 따른 자유도(n-1) 8의 조건에서 산출된 최종 t-값(t-statistic)은 21.82로, 이는 오차범위보다 수십 배의 확실한 차이를 유발한다는 것을 보여준다. 유의수준 1%의 양측검정 임계치인 3.355를 크게 초과하였다. 이에 따른 유의확률은 $p < 0.01$ 수준에서 통계적으로 명백한 유의성이 인정된다. 이는 현행 단순 외형 중심의 계수가 실제 수계 내 활성 조류 밀도를 유의미하게 과다 산정하고 있으며, 본 연구에서 제시한 사세포를 고려한 스크리닝 방식이 통계적 착시나 시험분석 결과 표시의 오류를 제거하는 데 필수적임을 입증한다.

이와 같은 결과는 기후 위기 시대 극단적인 수문학적 교란 환경에서 견고한 세포벽을 지닌 녹조류가 유출되지 않고 상당 시간 상층부에 잔존하여 데이터 변동을 유발할 가능성이 있다는 것을 다수의 연구 결과를 고찰하여 본 연구의 '2.1. 사세포의 계수가 농도 산출에 미치는 영향 시뮬레이션'에서 제기하였는데, 이 가설이 그대로 입증된 것이다. 본 실증을 통해 확인된 무려 45.0%에 달하는 데이터의 오차는 공공 환경 통계의 신뢰도 저하뿐만 아니라 이 데이터를 실무적으로 활용해야 하는 정수처리 공정상의 행정적 오류를 초래하고 정수 공정 처리를 위한 예산을 낭비하는 결과를 초래하게 되므로, 생·사세포의 정밀한 분리 측정 안(安)에 대한 학술적·실무적 정당성이 매우 높다고 판단된다.

3.2. 수질 모니터링과 정수처리 공정의 요구를 동시에 만족하는 대안의 방향성

상기 3.1절에서 확인한 바와 같이, 현장 시료 내

Pediastrum 속 사세포의 대량 유입은 실제 활성 생물량을 왜곡할 가능성이 있다는 것이 실증되었다. 이러한 현장 분석 결과를 바탕으로, 환경 미생물 군집의 구조나 종 조성은 그 환경이 처한 물리·화학적 상태를 반영한다는 기존의 과학 기술적 입장을 고려할 때, *Pediastrum* 사세포의 증가 자체를 단순한 '측정 오류'로 치부해 무조건적으로 배제하는 것은 타당하지 않다. 사세포의 급격한 유입은 기후변화에 의한 극한 호우나 집중호우, 혹은 갑작스러운 유량 변동에 의해 '저서 퇴적물의 강한 재부유 현상'이 발생했음을 지시하는 신뢰성 높은 물리·생태학적 지표가 되기 때문이다.

나아가 이러한 사세포 유입 패턴은 역설적으로 수계 운영 측면에서 중요한 예측 모델의 근거가 될 수 있다. 하절기에 댐이나 유역에 축적되어 있던 유해 남조류나 이들이 생성한 조류 독소(microcystin 등)가 강한 유속에 의해 하류로 씻겨 내려갔을(flushing effect) 가능성을 시사하기 때문이다. 동시에 뒤이어 정수장의 착수정으로 유입될 고탁도 원수와 미세한 점토질, 저서성 물질에 대비하여 정수 공정 수처리제의 추가 투입이나 침전 공정의 자원을 선제적으로 재배치하는 의사결정 지원의 산술적 근거가 될 수 있다. 실제로 취수원에서 법적 검사 의무를 가지는 공공 기관의 광역 모니터링 외에도, 거대 하천을 상수원수로 삼는 광역시 규모의 정수장이나 지방 상수도 수질연구소에서는 자체적으로 취수구 유입 단계, 정수장 착수 단계, 정수 이후 단계에 대해 지속적인 조류 군집 모니터링을 실시하고 있다. 이들이 모니터링을 수행하는 목적은 단순히 생태학적 생물다양성을 평가하는 것을 넘어, 정수처리 공정의 운영 조건을 최적화하고 착수정의 준설 시기를 결정하는 등 실무적인 공정 제어에 있다. 만약 사세포가 다량 유입될 정도로 취수원의 퇴적층이 거칠게 부유했다면, 이는 망간(Mn)이나 유기물 등 정수처리에 부담을 주는 물질이 함께 유입되고 있음을 뜻하므로 정수장 운영 측면에서는 이 데이터를 반드시 인지하고 있어야 한다. 특히 녹조류인 *Pediastrum* 속은 대량 증식 및 사멸 과정에서 풀 비린내(grassy flavor)와 부패취(septic flavor) 등의 이취미를 유발하여 음용수의 심미적 품질을 크게 저하한다(Palmer, 1959; Lanciotti et al., 2003). 이들은 스포로폴레닌과 실리카 성분의 단단한 외벽과 기하학적 판상 군체 구조를 지니고 있어(Millington and Gawlik, 1967) 정수 공정 내 여과지 폐색(filter clogging)을 유발하는 대표적인 문제 조류이다. 세포질이 소실되어 저비중 특성을 갖는 사세포 잔재물은(Millington et al., 1988) 침전 공정에서 완전히 제거되지 않고 여과지로 직행하여 폐색을 가속화한다. 더욱이 극한 호우로 인해 저서 층에서 재부유 된 사세포 잔재물은 세포 붕괴 과정에서 유기 이취미 물질을 수중으로 다량 방출할 뿐만 아니라, 여과지를 폐색시켜 정수 효율을 저하하고 공정 내 유기물 정체를 유발하여(Park et al., 2014; Kumar, 2021) 이차적인 이취미 심화 문제를 야기한다. 따라서 정수장 운영 실무 측면에서 이들 사세포의 유입 경향을 정확히 파악하는 것은 이취미 대응 및 여과 공정 자원 배제를 위한 산술적 근거로서 필수적이다.

따라서 법적·행정적 기준이 되는 '조류 경보제 및 국가 환경 통계' 목적의 분석에서는 일차 생산성과 독소 위험도를 왜곡하는 사세포를 철저히 배제(또는 분리)하는 가이드라인이 필요하지만, '정수 공정 운영 및 수처리 실무' 목적의 분석에서는 이를 재부유 이벤트의 신호로 활용할 수 있도록 이원화된 기록 방식을 도입하는 것이 가장 현실적이고 과학적인 대안의 방향성이다. 즉, 공정시험기준 개정 시 사세포를 완전히 삭제하는 것이 아니라, 현미경 결과지에 생세포와 사세포를 구분하여 병기(dual reporting)하도록 제도를 설계해야 한다.

3.3. 수질오염공정시험기준 개정 방향성(안)

현행 식물성 플랑크톤 현미경계수법(ES 04705.1c)의 신뢰성을 제고하고, 국가 환경 통계와 정수장 실무 공정의 요구를 동시에 충족하기 위해 다음과 같은 조항 개정 및 신설(안)을 제안한다. 본 연구에서 제안하는 고시 개정안 및 신·구조문 대비표(Table 2)는 대한민국 법령 및 국회 입법의 표준 성문화 지침에 정합하도록 정교하게 설계되었다(National Assembly Secretariat, 2019; Ministry of Government Legislation, 2026).

1) **'8.0 결과 보고' 조항의 이원화 기재:** 현행 공정 시험법상 현미경 검경을 통해 산출된 식물성 플랑크톤의 세포 수(cells/mL)를 최종 농도로 기록한다. 개정안으로는, *Pediastrum* 속 등 견고한 세포벽 구조를 가져 사멸 후에도 원형이 유지되는 조류 종의 경우, 생세포와 사세포를 구분하여 각각 산출하고 이를 결과지에 병기하도록 한다. 통상적인 목적을 가진 시험분석 과정에서는 생세포 농도만을 기재하고 총 조류 밀도를 산출하되, 취수원 관리 및 정수 공정 대응을 위한 참고 지표로 사세포 농도를 기록하여 보고한다.

Table 2. Comparison between current and proposed provisions for the NIER notification

[Proposal for Partial Amendment of the Official Water Quality Test Standards: Phytoplankton-Microscopic Counting Method (ES 04705.1c), NIER Notification No. 2025-52]		
Current Provisions	**Proposed Amendments**	**Rationale & Justification**
8.0 Results Reporting. Measurement results shall be reported by entering them in the "Phytoplankton Counting Log.	8.0 Results Reporting. ----------	
〈Newly Established〉	**〈Paragraph Newly Established〉** 8.1 'Dual Reporting Method' For algal species that retain their original morphology even after death due to a rigid cell wall structure, such as the genus *Pediastrum*, viable cells and dead/empty cells must be calculated separately and reported concurrently on the results sheet (Dual Reporting). For public environmental statistics used to evaluate aquatic primary productivity, only the "viable cell" concentration shall be included, while the "dead cell" concentration shall be recorded and preserved as a reference indicator for intake water management and water treatment plant operation.	**[Ensuring Data Reliability]** To prevent the statistical illusion of overestimating the current active algal biomass caused by the resuspension of dead cells from the sediment during climate crisis events (e.g., extreme rainfall, dam discharge), and to provide operational data regarding high-turbidity raw water influx to water treatment practitioners.
[Note 1]~[Note 17](Omitted)	[Note 1] ~ [Note 17] (Same as current)	
〈Newly Established〉	[Note 18] Guidelines for Discriminating Dead Cells In principle, the discrimination of dead cells during microscopic counting shall be based on morphological signs. Considering the simultaneous analysis environment with other algal species and field applicability, it shall be applied stepwise as follows: A. Morphological Discrimination (Primary Principle): For routine analysis under a standard light microscope, cells of the genus *Pediastrum* showing ① complete loss or discoloration of intracellular chloroplasts (green to white/transparent), ② plasmolysis, or ③ a ratio of empty cell walls exceeding 50% within the colony shall be defined as dead cells and separated from the active counting target. B. Selective Application of Viability Staining (Anomalous Samples): Viability staining may be selectively applied at the analyst's discretion only for anomalous samples where visual discrimination is extremely ambiguous or immediately after extreme hydrological disturbances (e.g., concentrated rainfall, extreme rainfall, sudden dam discharge) where severe sediment resuspension is suspected. C. Minimizing Interference in Mixed Samples: To ensure objective counting, Erythrosin B staining—a water-soluble dye that selectively stains dead *Pediastrum* and other dead green algal cells in a distinct pink or red color under a standard light microscope without damaging the original morphology or color of viable cells (including other species)—is preferentially adopted over fluorescence staining methods (such as FDA) which carry risks of cyanobacterial autofluorescence interference and require expensive fluorescence microscopy equipment.	[Securing Objectivity and Reproducibility Among Analysts] To eliminate the subjective intervention of analysts and enhance data reproducibility by providing clear discrimination criteria. [Field Applicability and Prevention of Interference with Other Algal Species] To prevent the analysis workload caused by mandating universal staining for all samples, and to establish a practical and scientific standard capable of accurately screening only dead cells without interfering with the identification and counting of other species (e.g., cyanobacteria, diatoms) in mixed samples.
[Note 18] Freshwater Algae Classification Table and Phytoplankton Counting Log: Refer to Appendix	[Note 19] Freshwater Algae Classification Table and Phytoplankton Counting Log: Refer to Appendix.	[Prevention of Branch Numbering and Amendment of Note Numbers] Sequential adjustment of serial numbers and textual modification due to the newly established guideline [Note 18].

2) 주석 항목 내 사세포 판정 가이드라인 신설(안): 검경 시 사세포의 판정은 형태학적 징후를 기준으로 한다. ① 세포 내 엽록체(chloroplast)의 완전한 소실 또는 변색(녹색→백색/투명), ② 세포질 수축(plasmolysis), ③ 군체 내 빈 세포벽 비율이 50% 이상인 개체는 사세포로 정의한다. 단, 판정이 모호한 경우 광학현미경 하에서 생사 염색법(viability staining, 예: erythrosin B 또는 fluorescein diacetate (FDA) 염색 등) 을 선택적으로 적용하여 판정할 수 있도록 한다.

3.4. 규제 수용성 및 실행 가능성 분석

상기 제안된 개정 내용(안)에 따라, 본 연구에서 제안한 개정안을 실제 식물성 플랑크톤 법정 시험분석 기관 및 정수장 수질연구소 등 실무 현장에 적용했을 때의 기대효과와 한계점, 해결 방안은 다음과 같다. 이를 도출하는 목적은 통상적으로 입법 과정이나 정부의 규제 제·개정 단계에서 시행하는 입법 영향분석(legislative impact analysis) 및 규제영향분석(regulatory impact analysis, RIA)의 핵심 평가 항목들에 규제 수용성(regulatory acceptance)과 실행 가능성(feasibility)이 포함되기 때문이다.

첫째, 분석 업무 부하 및 효율성 관점으로, 현미경 검경 과정에서 생·사세포를 분리하여 계수하는 것은 분석원의 검경 시간을 소폭 증가시킬 수 있다. 그러나 *Pediastrum*은 세포 크기가 크고(보통 10~50 μm 이상), 세포질 소실 여부가 일반 광학현미경(400배율) 환경에서도 육안으로 명확히 구별되므로 숙련된 분석원에게 추가되는 부하는 미미하다. 염색법의 경우 전수 조사가 아닌 기후변화(극한 호우, 댐 방류) 직후의 '특이 시료'에 한해서만 선별적으로 적용하도록 지침을 설계하면 분석 효율성을 유지할 수 있다.

둘째, 데이터 활용의 유연성과 다목적 행정 실현의 가치를 고려하여야 한다. 시험분석 과정에서 사세포의 단순 배제 논리는 정수장 실무자들에게 취수원 저서 층 부유(망간, 고탁도 원수 유입 등) 이라는 중요한 물리적 전조 신호를 은폐하는 역효과가 있다. 제안된 이원화 기록 방식은 정수처리 공정 현장에는 고탁도·재부유 물질 유입에 대응할 수 있는 사전 예측 데이터로서 활용할 수 있으므로 정책의 다목적 유연성을 극대화한다.

셋째, 장비 및 비용적 측면의 현장 수용성의 관점에서, 중소 규모 지방 상수도나 영세 분석기관에 고가의 형광현미경이나 특수 염색 장비를 강제하는 것은 규제 부담이 될 수 있다. 따라서 고시 개정 시 일차적으로는 '형태학적 육안 판정'을 표준으로 삼고, 국립환경과학원이나 특·광역시급 수질연구소 등 표준 장비를 보유한 기관에 한해 형광/생사 염색법을 교정 도구로 활용하게 함으로써 현장의 비용적 진입 장벽을 완전히 해소할 수 있다.

결론적으로, 본 연구가 제안한 '형태학적 육안 판정 우선 원칙'과 '특이 시료 한정 선택적 에리스로신 염색법'은, 현장 시험 분석자들의 고도화된 숙련도와 기존 인프라를 그대로 활용할 수 있다는 점에서(행정) 입법 평가 시 가장 중요하게 여겨지는 규제 수용성과 현장 적용 가능성을 동시에 충족하는 실효성 있는 대안이라고 판단된다.

3.5. 사세포 판정 기준 도입을 위한 제도적 고려 사항 및 현장 수용성 제고 방안

기후 위기 대응형 수질 데이터의 신뢰성을 확보하기 위해 제시된 *Pediastrum* 속 사세포 판별 및 이원화 보고 체계가 실제 공공 모니터링 시스템에 안착하기 위해서는, 행정적 강제성보다는 현장 분석원들의 업무 부하와 시험 기준의 실효성에 대한 면밀한 제도적 검토가 선행되어야 한다. 국가 수질오염공정시험기준의 갑작스러운 개정은 일선 시험기관 및 정수처리 현장에 혼선을 초래할 수 있으므로, 본 연구에서는 향후 제도적 보완 시 검토되어야 할 단계적 가이드라인상의 예시를 제안하고자 한다(Table 2).

우선, 사세포 판별을 위한 현장 수용성(feasibility)을 극대화하기 위해 분석 업무의 효율성을 고려한 단계별 가이드라인 구축이 필요하다. 모든 현장 시료에 대해 무조건적인 염색법 적용을 의무화하는 것은 분석원의 업무 부하를 가중할 우려가 있다. 따라서 통상적인 경우의 분석 시에는 표준 광학현미경 하에서 엽록체의 완전 탈색, 원형질 분리, 또는 군체 내 빈 세포벽 비율(50% 이상) 등을 기준으로 삼는 '형태학적 판별법'을 제1원칙으로 설정하는 것이 합리적이다. 다만, 집중호우나 댐 방류 등 급격한 수문학적 변동 직후 세굴 현상으로 인해 육안 식별이 극도로 모호한 특이 시료에 한해서만 분석자의 재량에 따라 염색법을 선택적으로 적용하는 방안이 타당할 것으로 사료된다.

더불어, 선택적 염색법 도입 시 검출의 객관성과 재현성을 담보하기 위한 과학적 스크리닝 도구의 실효성 검

증도 요구된다. 선행 연구에서 제시된 FDA 등의 형광 염색법은 남조류 사세포의 자가형광(auto florescence) 간섭 가능성이 존재하고 고가의 장비가 필수적이어서 모니터링 적용에 한계가 있다. 반면, 수용성 색소인 erythrosin B를 활용할 경우 생세포 및 혼합 시료 내 타 생물 종(남조류, 규조류 등)의 고유 형태나 계수 작업에 간섭을 주지 않으면서 사세포만 선별적으로 분홍색으로 염색시키는 이점이 보고된 바 있다(Kim et al., 2016; Yewalkar et al., 2019).

결론적으로, 이러한 이원화 보고 및 사세포 판별 가이드라인은 즉각적인 법적 규제화보다는, 국가 수질 통계의 객관성을 점진적으로 회복하고 정수장 운영 실무자에게 고탁수 유입 시 선제적인 물리적 대응(filter clogging 예방 등) 데이터를 제공하는 발전적 보완책(reference indicator)으로 검토되는 것이 바람직할 것이다.

3.6. 기대효과

첫째, 기술적·실무적 측면에서, 정수장 공정 제어 최적화 및 이취미·여과지 폐색에 선제적으로 대응할 수 있다. 과거의 사세포 단순 소거 방식과 달리, 이원화 기록 방식을 통해 사세포 데이터를 보존함으로써 정수장 실무자들에게 취수원 저서 층 부유라는 강력한 물리적 전조 신호를 제공할 수 있다. *Pediastrum* 사세포의 급증은 향후 정수장으로 유입될 고탁도 원수, 미세 점토질, 저서성 유기물(망간 등)의 유입을 지시하므로, 정수장에서는 전처리 약품 투입량을 조절하고 침전 공정 자원을 선제적으로 재배치하는 등 실무적인 공정 제어를 최적화할 수 있다. 아울러 이 종의 단단한 외벽(스포로폴레닌/실리카 성분) 구조(Millington and Gawlik, 1967; Jankovská and Komárek, 2000)와 가벼운 저비중 특성으로 인해 발생하는 여과지 및 분리막의 물리적 폐색(filter clogging) 현상을 사전에 예측하여 역세척 주기를 과학적으로 조정할 수 있으며, 세포 붕괴 시 방출되는 풀 비린내 및 부패취 등의 이취미 유발 물질에 대해 고도정수처리 공정(오존 및 활성탄)을 선제적으로 가동할 수 있는 산술적 근거가 마련된다.

둘째, 경제적·행정적 관점에서 볼 때 수돗물 심미적 품질 향상 및 정수장 운영 비용 절감할 수 있다. 사세포 유입에 따른 여과지 폐색을 선제적으로 제어함으로써, 비정상적인 역세척 주기 단축으로 인해 소모되던 정수장 자체 용수와 막대한 펌핑 에너지를 절감하는 등 수처리 운영 비용을 크게 아낄 수 있다. 궁극적으로는 상수원수 유입 단계부터 철저히 계산된 공정 제어를 통해 수돗물의 고질적인 풀 비린내와 부패취 등 이취미 민원을 근본적으로 차단함으로써, 공공 급수 서비스에 대한 국민적 신뢰도를 높이고 안전하며 심미적으로 깨끗한 고품질의 수돗물을 안정적으로 공급하는 사회적 편익을 달성할 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 기후변화에 따른 극한 호우 및 급작스러운 댐 방류 등 수생태계의 물리적 변동성이 심화하는 현시점에서, 현행 수질오염공정시험기준(ES 04705.1c)의 식물성 플랑크톤 계수 방식이 가진 과학적·정책적 한계점을 분석하고 이에 대한 실무적 대안을 제안하고자 수행되었다. 연구를 통해 도출된 핵심 결론은 다음과 같다.

첫째, *Pediastrum* 속과 같이 구조적 내성이 강한 녹조류 군체는 사멸 후에도 원형을 유지한 채 저서 층에 잔존하므로, 기상 이변에 의한 강한 유속 발생 시 상층으로 재부유하여 수질 모니터링 데이터의 심각한 과다 산출을 유발한다. 현행 공정시험기준은 생세포와 사세포를 판정하는 명확한 분리 기준을 결여하고 있어, 생물학적 활성이 소실된 세포가 오히려 우점종으로 계수되는 환경 통계적 착시와 공공 행정의 낭비를 초래하고 있다.

둘째, 사세포의 계수 배제가 지녀야 할 정책적 정당성에도 불구하고, 이를 무조건적으로 데이터에서 소거하는 것은 정수장 공정 운영 측면에서 타당하지 않다. 사세포의 급격한 유입은 취수원 저서 퇴적물의 강한 재부유 현상을 지시하는 신뢰성 높은 물리·생태학적 전조 신호이기 때문이다. 이는 향후 정수장으로 유입될 고탁도 원수 및 저서성 유·무기물(망간 등)에 대비하여 정수장의 약품 투입 및 침전 공정 자원을 선제적으로 재배치할 수 있는 실무적 의사결정의 산술적 근거가 된다.

셋째, 데이터의 행정적 신뢰성과 정수 공정의 실무적 유용성을 동시에 만족하기 위한 현실적인 정책 대안은 현행 공정시험기준 내에 생세포와 사세포를 구분하여 병기하는 이원화 기록 방식을 도입하는 것이다. 이와 함께 현장 분석원들의 주관 개입을 방지하기 위해 엽록체 손실 및 세포질 수축 등을 기준으로 하는 '형태학적 사세포 판정 가이드라인'을 고시 주석 형태로 신설할 것을 제안한다.

결론적으로 본 연구에서 제안한 수질오염공정시험

기준의 개정은 단순한 실험 기법의 미시적 수정을 넘어, 기후 위기 시대의 수환경 모니터링 체계를 과학적으로 정밀화하는 필수적인 과정이다. 국가 환경 통계의 객관성을 확보하는 행정적 편익과 고탁도 유입에 대응하는 정수장 안전망 확보라는 실무적 편익을 동시에 달성함으로써, 향후 지속 가능한 국가 수자원 관리 및 기후 위기 시대 기후변화 적응 정책(climate adaptation policy) 수립에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

Anzani, H. S., Kantoush, S. A., Nguyen, B. Q., 2026, Sediment management in reservoirs: A Comprehensive review of processes, trapping efficiency, flushing techniques, and bypass solutions, Prog. Disaster. Sci., 30, 100556.

Bade, D. L., Carpenter, S. R., Cole, J. J., Pace, M. L., Kritzberg, E., Van de Bogert, M. C., Cory, R. M., McKnight, D. M., 2007, Sources and fates of dissolved organic carbon in lakes as determined by whole-lake carbon isotope additions, Biogeochemistry, 84(2), 115-129.

Costanza, R., 1997, Toward an operational definition of ecosystem health, in: Costanza, R. (ed.), Frontiers in Ecological Economics: Transdisciplinary essays by Robert Costanza, Edward Elgar Publishing, Cheltenham, United Kingdom, 115-132.

Jankovská, V., Komárek, J., 2000, Indicative value of *Pediastrum* and other coccal green algae in palaeoecology, Folia Geobot., 35, 59-82.

Kim, N. Y., Sim, Y. B., Park, S. R., Lee, K. L., You, K. A., Lee, H. Y., Hwang, S. J., 2025, Development of integrated assessment Index (IAI) for evaluating aquatic ecosystem health in Korean rivers, Korean J. Ecol. Environ., 58(5), 459-470.

Kim, S. I., Kim, H. J., Lee, H. J., Lee, K., Hong, D., Lim, H., Cho, K., Jung, N., Yi, Y. W., 2016, Application of a non-hazardous vital dye for cell counting with automated cell counters, Anal. Biochem., 492, 8-12.

Kumar, R., 2021, Enumeration of algal species creating problems in water reservoirs, water supplies and the possible solutions, Int. Res. J. Plant Sci., 12(4), 1-3.

Lambshead, P. J. D., Platt, H. M., Shaw, K. M., 1983, The detection of differences among assemblages of marine benthic species based on an assessment of dominance and diversity, J. Nat. Hist., 17, 859-874.

Lanciotti, E., Santini, C., Lupi, E., Burrini, D., 2003, Actinomycetes, cyanobacteria and algae causing tastes and odours in water of the River Arno used for the water supply of Florence, J. Water Supply Res. Technol. AQUA., 52(7), 489-500.

Margalef, R., 1958, Information theory in ecology, Gen. Syst., 3, 36-71.

McLellan, S. L., Fisher, J. C., Newton, R. J., 2015, The microbiome of urban waters, Int. Microbiol., 18(3), 141-149.

Mendes, R. S., Evangelista, L. R., Thomaz, S. M., Agostinho, A. A., Gomes, L. C., 2008, Unified index to measure ecological diversity and species rarity, Ecography, 31, 450-456.

Millington, W. F., Gawlik, S. R., 1967, Silica in the wall of *Pediastrum,* Nature, 216(5110), 68-68.

Millington, W. F., 1981, Form and Pattern in *Pediastrum,* in: Kiermayer, O. (ed.), Cytomorphogenesis in Plants, Cell Biology Monographs, vol. 8, Springer, Vienna, Austria.

Millington, W. F., Chang, S. R., Gawlik, S. R., 1988, Structure and function of the bristles of *Pediastrum boryanum* (Chlorophyceae), J. Phycol., 24(4), 512-518.

Ministry of Environment, 2024, Water environment conservation act (Statute No. 20349), National Law Information Center, Sejong, Korea.

Ministry of Environment, 2025, Official water quality test standards: ES 04705.1c (phytoplankton-microscopic counting method), National Institute of Environmental Research (NIER), Incheon, Korea.

Ministry of Government Legislation, 2026, Criteria for legislative drafting and review, Ministry of Government Legislation, Sejong, Korea, https://moleg.go.kr

Møller, T. E., van der Bilt, W. G. M., Roerdink, D. L., Jørgensen, S. L., 2020, Microbial community structure in arctic lake sediments reflect variations in holocene climate conditions, Front. Microbiol., 24(11), 1520.

National Assembly Secretariat, 2019, Theory and practice of legislative drafting, Seoul, Korea, https://assembly.go.kr

National Institute of Environmental Research, 2025, Regulations on the operation of quality control for environmental testing and inspection agencies (NIER Notification No. 2025-52), Incheon, Korea.

Oshun, M. I., Grantham, T. E., 2023, Leveraging species richness and ecological condition indices to guide systematic conservation planning, J. Environ. Manage., 1(341), 117970.

Palmer, C. M., 1959, Algae in water supplies: An Illustrated manual on the identification, significance, and control of algae in water supplies, Robert A. Taft Sanitary Engineering Center, Cincinnati, USA.

Park, J. B. K., Craggs, R. J., Shilton, A. N., 2014, Investigating the life-cycle and growth rate of *Pediastrum boryanum* dominated high rate algal ponds, Water Res., 60, 142-153.

Park, J. M., Kim, Y. K., Lee, A. H., Lee, H. J., Koh, Y. J., Jun, N. S., Kwack, W. S., 2024, Variations in algal distribution and diversity in oceanic island and inland freshwater reservoirs : A Step toward for securing diverse freshwater resources, J. Mar. Biosci. Biotechnol., 16(1), 63-68.

Schoen, S., 1988, Cell counting, in: Lobban, C. S., Chapman, D. J., Kremer, B. P. (eds.), Experimental Phycology: A Laboratory Manual, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 16-22.

Son, H. J., 2013, The analysis of phytoplankton community structure in the middle-lower part of the Nakdong river, J. Kor. Soc. Environ. Eng., 35(6), 430-435.

Thawabteh, A. M., Naseef, H. A., Karaman, D., Bufo, S. A., Scrano, L., Karaman, R., 2023, Understanding the risks of diffusion of cyanobacteria toxins in rivers, lakes, and potable water, Toxins (Basel), 15(9), 582.

Whittaker, R. H., 1977, Evolution of species diversity in land communities, Evol. Biol., 1, 1-67.

Xiang, L., Huang, X., Huang, C., Chen, X., Wang, H., Chen, J., Hu, Y., Sun, M., Xiao, Y., 2021, *Pediastrum* (Chlorophyceae) assemblages in surface lake sediments in China and western Mongolia and their environmental significance, Rev. Palaeobot. Palynol., 285, 104356.

Yewalkar, S., Wu, T., Kuan, D., Wang, Q., 2019, Applicability of differential fluorescein diacetate and propidium iodide fluorescence staining for monitoring algal growth and viability, Waste Dispos. Sustain. Energy, 1(3), 199-206.

Zamaloa, M., Tell, G., 2005, The fossil record of freshwater micro-algae *Pediastrum Meyen* (Chlorophyceae) in southern South America, J. Paleolimnol., 34, 433-444.

• Professor. Ji Won, Hong
Department of Biology, Kyungpook National University
jwhong@knu.ac.kr
• Ph. D. Jong Myong Park
Water Quality Research Institute, Waterworks Headquarters
eveningwater@korea.kr