

부남호·천수만의 갈수기와 강우기 수질 오염 특성과 식물플랑크톤의 공간 분포 특성

이민지, 서진영, 백승호*

한국해양과학기술원 위해성분석연구센터

Water quality characteristics and spatial distribution of phytoplankton during dry and rainy seasons in Bunam Lake and Cheonsu Bay, Korea

Minji Lee, Jin Young Seo and Seung Ho Baek*

Ecological Risk Research Divisions, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Geoje 53201, Republic of Korea

*Corresponding author

Seung Ho Baek

Tel. 055-639-8513

E-mail. baeksh@kiost.ac.kr

Received: 28 January 2021

First Revised: 31 March 2021

Second Revised: 8 May 2021

Third Revised: 17 May 2021

Revision accepted: 20 May 2021

Abstract: Since the construction of a dike in 1983, the water quality in the Bunam Lake has continued to deteriorate due to algal bloom caused by agricultural nutrient loading. Therefore, we evaluated the change in water quality and phytoplankton ecological characteristics in Bunam Lake and Cheonsu Bay, Korea. Water temperature, salinity, dissolved oxygen, chemical oxygen demand (COD), chlorophyll, and phytoplankton community were surveyed in April during the dry season and in July during the rainy season. As a result, during the dry period, phytoplankton proliferated greatly and stagnated in the Bunam Lake while a very high population of cyanobacteria *Oscillatoria* spp. (8.61×10^7 cells L^{-1}) was recorded. Most of the nutrients, except, nitrate and nitrite, were consumed due to the large growth of phytoplankton. However, during the rainy period, concentrations of ammonia, phosphate, silicate, nitrate, and nitrite, were very high towards the upper station due to the inflow of fresh water. Cyanobacteria *Oscillatoria* and *Microcystis* spp. were dominant in the Bunam Lake during the rainy period. Even in the Cheonsu Bay, cyanobacteria dominated due to the effect of discharge and diatoms, such as, *Chaetoceros* spp. and *Eucampia zodiacus*, which also proliferated significantly due to increased levels of nutrients. Since the eutrophication index was above 1 in Bunam Lake, it was classified as eutrophic water and the Cheonsu Bay was classified as eutrophic water only during the rainy season. In addition, a stagnant seawater-derived hypoxia water mass was observed at a depth of 8m in the Bunam Lake adjacent to the tide embankment and the COD concentration reached $206 \text{ mg } L^{-1}$ in the bottom layer at B3. Based on this result, it is considered that the water quality will continue to deteriorate if organic matters settle due to continuous inflow of nutrients and growth of organisms while the bottom water mass is stagnant.

Keywords: COD, Hypoxia, Nutrients, Eutrophication, Phytoplankton

서 론

하구역은 담수와 해수가 만나는 전이지대로 생산성이 매우 높은 유역이다. 조석의 영향으로 수위가 변하고, 담수와 해수로부터 퇴적물이 유입되어 하구 내에 축적되기 쉽다. 하구역은 영양염이 높은 담수의 공급과 수심이 얇은 퇴적물 속의 영양염이 쉽게 용출되어 1차 생산이 높으며, 먹이 연쇄를 통한 생물 생산성이 높다. 우리나라 서해안에서는 농지와 농업 및 공업용수 확보를 위해 지난 수십 년간 간척 및 연안 댐 건설 사업으로 인공 담수호가 형성되어 왔다. 상대적으로 규모가 큰 강의 하구를 막아 건설한 금강호, 영산호가 있고, 연안 내만의 일부를 막아 만들어진 아산호, 간월호, 부남호가 있다. 특히 조간대 외해를 직접 막아 건설한 새만금호와 시화호 같은 다른 유형의 인공 담수호도 형성되었다. 이러한 인공 담수호는 하천에 비해 저수 용량이 크지만 비점오염원으로부터 발생하는 오염 부하가 높은 단점을 가진다. 특히 강우 시 주변 지역에서 발생된 오염물질이 일시에 담수호로 유입되어 자연 자정작용이 느려져 오염물질이 축적되기 쉽다. 또한 하계 집중호우 발생 시 호수 주변 및 상류지역의 범람 방지를 위하여 담수를 대량으로 방류하게 되면 연안 환경에 급격한 물리 화학적인 변화를 초래한다(Moon *et al.* 1993; Lee *et al.* 2016). 본 연구 지역인 천수만은 어류 양식장뿐만 아니라 굴, 바지락, 낙지 어장이 잘 형성되어 있는데, 하계 연안 내만의 고수온과 빈산소수괴 형성과 강우기 담수 방류의 증가는 양식 수산생물의 스트레스 원인으로 지속적으로 지목되고 있다(Park *et al.* 2013). 특히, 2020년 하계 집중 강우에 의한 간월호와 부남호의 방류로 천수만 내측의 자연산 굴 폐사의 원인이 된 사례가 있다.

부남호는 천수만 북측에 위치하며 폭은 2~3 km, 길이는 13 km이고 총 저수 용량은 약 1억만톤이다. 하굿둑 건설 이후 본래 천수만에서 인공호수로 변화하였고, 호수 조성 이후 주변 경관은 물론 생태계 및 지역 주민들의 삶도 크게 변화되었다. 일반적인 하굿둑 건설 목적은 홍수 조절, 염해 방지, 수위 유지, 수산 자원의 보호 등이 있지만, 부남호 및 간월호는 대규모 농경지 확보를 위한 간척사업의 일환으로 하굿둑이 건설되었다. 하지만 이후 농업의 생산성 증대를 위해 사용된 비료 등에 의해 영양염이 과도하게 유입되어 호수의 수질이 심각하게 오염되었으며, 만성적 녹조류 변성으로 더이상 농업용수로도 사용이 불가할 정도로 본

래 기능을 상실하였다. 그중 부남호는 1982년 서산 B지구 방조제 건설 이후 38년간 담수화가 이루어진 상태이나, 지속적인 수질 악화로 수서생물의 서식지가 파괴되어 해수 유통에 따른 수질개선과 하구 생태 복원의 필요성이 특히 대두되고 있다. 해수 유통을 위한 담수 방류 전 시기에 따른 해양 수질 및 생물 변동 특성 조사가 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 갈수기와 강우기 부남호, 천수만의 수환경 특성과 식물플랑크톤 분포를 파악하고, 부남호 저층수의 오염 정도를 파악하고자 한다. 본 연구 결과는 향후 부남호 천수만의 해수 유통 및 하구 복원을 위한 기초자료로 활용될 것이다.

재료 및 방법

조사는 부남호와 천수만의 6개 정점에서 갈수기인 2019년 4월 10일과 강우기인 7월 29일에 수행되었다(Fig. 1). 4월 조사에서는 CTD (Ocean Seven 319; Idronaut Co., Brughiero, Italy)를 활용하여 전 수층의 수온과 염분을 측정하였으며, 수질측정기 (YSI 6600; YSI incorporated, USA)를 이용하여 용존산소를 측정하였다. 수질 및 식물플랑크톤 분석을 위해 표층수와 저층수를 5L PVC Niskin sampler (General Oceanics, Miami, FL, USA)를 이용해 각각 채수하였다. 표층과 저층수의 Chlorophyll-*a*, 용존 무기 영양염, 화학적 산소 요구량 (Chemical Oxygen Demand, COD)을 분석하였고, 식물플랑크톤 분석은 표층수를 이용하였다. Chlorophyll-*a* 농도와 각 영양염의 농도를 측정하기 위해서 표층수와 저층수 500 mL을 선상에서 Whatman GF/F 여과지 (47 mm diameter; pore size 0.7 μm)로 여과하였다. Chl. *a* 농도 측정을 위해 필터된 GF/F 여과지는 15 mL 튜브에 넣어 -20°C 에서 냉동 보관하였다. 영양염 분석은 GF/F 여과지를 이용하여 여과된 시료에 HgCl_2 를 첨가한 후 냉동 보관하였다(Kattner 1999). COD 분석용 시료는 산세척된 PE 병에 담은 후 냉동 보관하였다. Chl. *a* 농도는 형광측정기 (Turner BioSystems, Sunnyvale, CA, USA)를 이용하여 Parsons *et al.* (1984)의 분석법에 따라 분석하였다. 영양염 분석은 영양염 자동분석기 (Autoanalyzer QuikChem 8000; Lachat Instruments, Loveland, CO, USA)를 이용하여 분석하였고, 표준 해수 (RMNS, KANSO Technos Co., Ltd., Japanchemical Industries, Osaka, Japan)를 이용

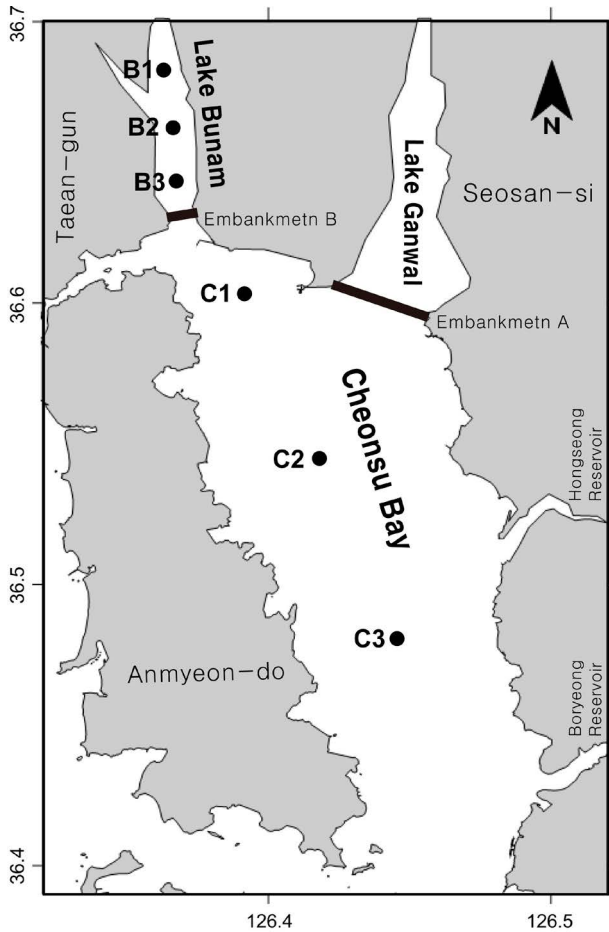


Fig. 1. Sampling sites on Bunam Lake and Cheonsu Bay.

하여 보정하였다. COD는 해양환경공정시험기준에 따라 알칼리성 과망간산칼륨법으로 실험실에서 측정하였다 (MLTM 2020). 식물플랑크톤 분석은 식물플랑크톤 네트 (망목 크기 20 μm)로 수직 예인 채집한 샘플과 500 mL의 표층수를 Lugol's solution을 이용하여 최종 농도 0.5%로 고정 후 50 mL로 농축한 샘플을 이용하였다. 종 동정 및 계수를 위해 시료를 Sedgewick-Rafter counting chamber에 100~300 μL 분주하여 광학 현미경하에서 200배 혹은 400배 배율로 관찰하였고, 종동정은 Tomas (1997), Hallegraeff *et al.* (2010), Omura *et al.* (2012)를 참고하였다. 부남호와 천수만의 수질 평가를 위해 부영양화 지수를 이용하였으며, 이는 Okaichi (1985)의 계산식 ((COD×DIN×DIP)/3.43)을 사용하였다.

결과 및 고찰

1. 수괴 분포 및 정체

연구 지역의 수온 분포 양상은 갈수기 천수만 외측으로 갈수록 수온이 하강하였고, 표층과 저층의 차이는 크지 않았다(Fig. 2A). 반면 부남호 B3 저층에서 수온이 최대 12.2°C로 높은 것이 특이적이었다. 염분은 수온과 동일하게 B3 정점의 약 8 m 수심부터 30 psu 이상으로 높게 나타났다(Fig. 2B). 수온과 염분 모두 B3 약 8 m 수심을 경계로 상부층에서는 담수 특성을 보였고, 하부층에서는 정체된 고온/고염의 수괴가 명확하게 구분되었다. 호수에 설치된 방조제는 담수 방류로 해양환경에 직/간접적인 영향을 줄 뿐만 아니라 강과 하구의 물리적 단절로 조류 약화 및 수괴 순환구조에 영향을 미친다(Jeong *et al.* 1999; Bang *et al.* 2013). 이러한 물리적 단절로 호수에 고립된 해수는 반영구적으로 정체되면서 얇은 수심에도 강하고 지속적인 성층을 형성하게 된다. 이러한 정체는 기수호나 기수역에서 염분약층 형성과 함께 흔히 발생하는 현상으로 상류에서 유입되는 오염물질이 쉽게 퇴적되고, 물의 정체에 의해 조류가 대량 증식하며 누적된 유기물이 분해되며 용존산소의 고갈현상이 나타난다(Gray *et al.* 2002; Choi *et al.* 2008). 강우기 부남호 저층수를 제외하면 부남호 평균 수온은 26.3°C로 천수만 전체 평균 25.7°C와 유사하였고, 부남호 B2의 저층에서 17.4°C의 낮은 수온이 관찰되었다(Fig. 2C). 강우기 염분은 부남호 전체 약 3~4 psu 범위로 일정하였고, 천수만 내측 C1 정점 표층에서 24.7 psu로 가장 낮았으며, 천수만 중앙 C2 정점 표층에서도 염분 26.2 psu로 부남호 및 간월호 방류에 따른 담수의 영향을 강하게 받았다(Fig. 2D). 용존 산소 농도는 갈수기 표층에서 평균 10.5 mg L⁻¹로 높게 나타났고(Fig. 3A), 이는 식물플랑크톤의 높은 생물량에 의한 활발한 광합성의 영향과 함께 하계임에도 불구하고 강우에 의한 담수 공급으로 상대적으로 낮은 수온이 유지된 영향으로 판단된다. 특이적으로 수괴가 정체되어 있던 부남호 B3 저층 용존 산소는 0.25 mg L⁻¹로 강한 빈산소수괴가 관찰되었다. 강우기 평균 용존 산소 농도는 7.39 mg L⁻¹였으며, 천수만 표층에서 비교적 높은 용존 산소 농도를 보였고 저층에서 최저 4.00 mg L⁻¹로 다소 낮았다(Fig. 3B).

갈수기 B3 정점의 저층수의 정체와 빈산소 수괴를 명확

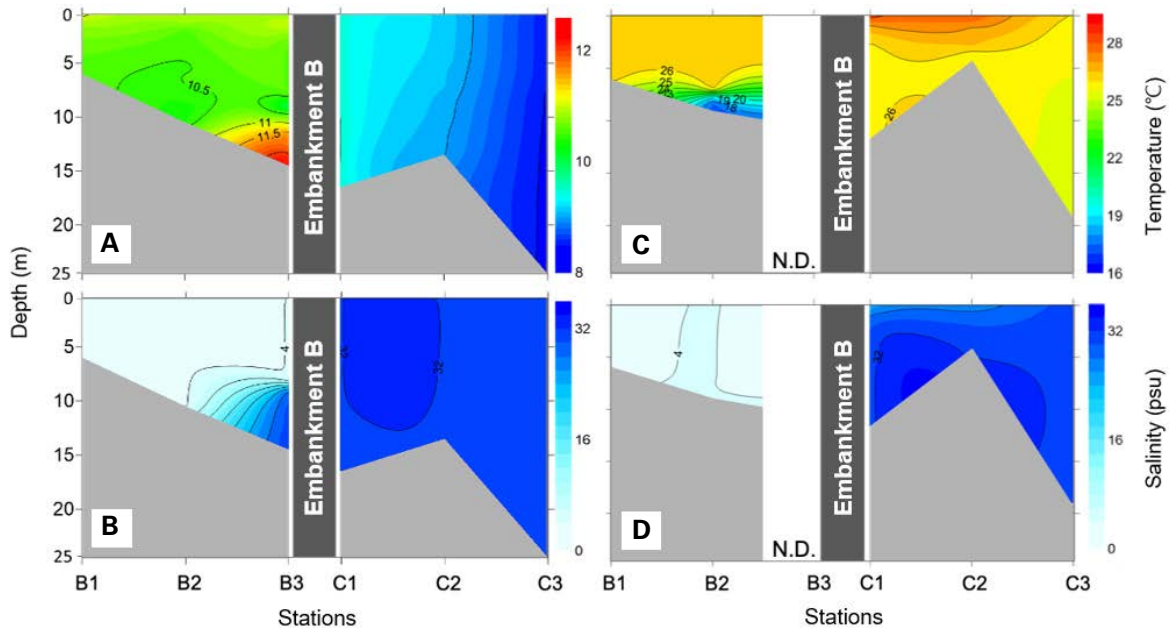


Fig. 2. Spatio-temporal variation of temperature and salinity during dry (A, B) and rainy (C, D) periods.

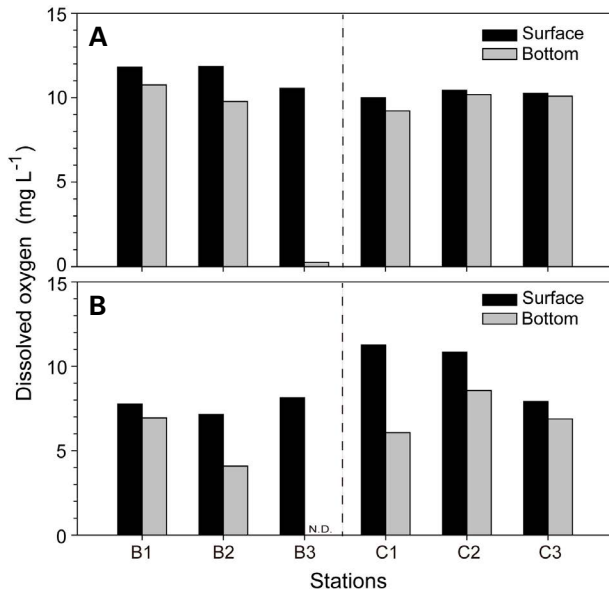


Fig. 3. Horizontal distribution of dissolved oxygen in surface and bottom water during dry (A) and rainy (B) periods.

히 확인하기 위해서 수직 조사를 수행하였다(Fig. 4). 표층 수온은 11.0°C였고, 7m 수심에서 10.4°C로 소폭 감소하였으나, 수심 13m에서 12.1°C로 다시 증가하는 특성을 보였다. 염분은 표층에서 4.50psu로 일반적인 담수호의 농도였으나, 7m를 기점으로 급격히 상승하여 10m 이하에서는 30

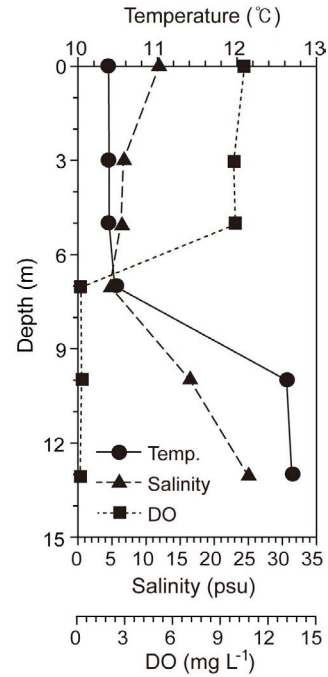


Fig. 4. Vertical profile of temperature, salinity, and dissolved oxygen at B3 during dry season.

psu 이상의 해수가 관찰되었고, 이는 CTD 결과에서도 동일하게 나타났다. 용존 산소 농도는 표층 10.6mg L⁻¹로 5m 까지 거의 일정하게 높은 상태로 유지되었으나, 수온과 염

분의 큰 변화가 없었던 7m 수심에서부터 용존 산소가 0.30 mg L⁻¹로 급격히 감소하였다. 이후 13m 저층까지 강한 빈산소수괴가 관찰되었다. 이는 육상으로부터 공급된 유기물과 대증식한 부유 생물의 사체 등이 수괴의 정체로 인해 바다로 빠져나가지 못하고 부남호 저층으로 다량 퇴적되었으며, 유기물이 분해되며 산소를 소모하지만, 표층으로부터 산소를 공급받지 못하여 강한 빈산소 수괴가 형성된 것으로 판단된다(Kwon *et al.* 2020). 또한, 표층에 비해 높은 저층 수온에도 불구하고, 고염도로 밀도가 높은 B3 저층 수괴는 계속해서 정체된 채로 유기물의 유입만 이루어지기 때문에 빈산소 수괴가 더욱 악화될 수밖에 없는 실정이다.

2. 식물플랑크톤 분포

호소의 유기물 축적에 가장 영향을 많이 주는 요인은 식물플랑크톤의 대증식이며, 하구 생물 생산력에 중요한 영향을 미치는 요인도 식물플랑크톤이다(Cloern 1987; Reavie *et al.* 2016). 식물플랑크톤 생체량을 대변하는 Chl. *a* 분석 결과 갈수기 부남호 B1과 B2에서 평균 Chl. *a* 농도가 약 180 µg L⁻¹로 매우 높게 나타났다(Fig. 5). B3 표층에서 62.1 µg L⁻¹로 점차 감소하였고, B3 저층과 천수만에서는 평균 9.00 µg L⁻¹로 낮았다. 갈수기 부남호 상류측에서

남조류 *Oscillatoria* spp.가 최대 8.92 × 10⁷ cells L⁻¹로 대증식하여 높은 Chl. *a* 농도를 보였다(Figs. 6, 7A). 부남호에서 *Oscillatoria* spp.가 전체 비율 중 평균 98% 이상의 비율로 극우점하였고, 외측으로 갈수록 기수에서 서식 가능한 규조류 *Skeletonema* spp.와 함께 *Scenedesmus* spp., *Monoraphidium* spp., *Ankistrodesmus* spp.와 같은 다양한 녹조류도 관찰되었다. 남조류 *Oscillatoria* sp.는 *Microcystis* sp., *Anabena* sp., *Aphanizomenon* sp. 등과 함께 환경부에서 지정한 유해 남조류로 한국에서 일어나는 녹조의 주요 원인종으로, 유해 남조류는 독소 물질을 배출하며 이를 직/간접적으로 섭취하거나 흡수할 시 수생생태계에 유해한 영향을 줄 수 있다(Kim *et al.* 1995). 갈수기 하구로 갈수록 식물플랑크톤 세포수는 급격히 낮아져, 천수만 표층에서는 평균 0.10 × 10⁷ cells L⁻¹로 낮은 세포수를 보였으며(Fig. 6A), 담수나 기수에서 출현하는 규조류 *Rhizosolenia delicatula*와 *Asterionella glacialis*가 우점하였다(Fig. 7B). 강우기 부남호 평균 식물플랑크톤 세포수는 3.86 × 10⁷ cells L⁻¹로 갈수기보다 낮았지만 여전히 높은 세포수를 유지하였다(Fig. 6B). 갈수기와 유사하게 주로 남조류 *Oscillatoria* spp.와 *Microcystis* spp.가 극우점하였으며, 녹조류와 은편모조류도 다수 출현하였다

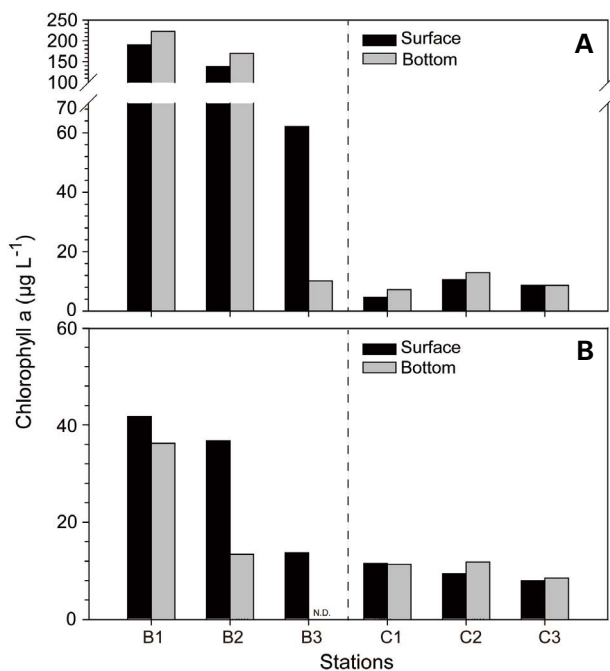


Fig. 5. Horizontal distribution of chlorophyll a in surface and bottom water during dry (A) and rainy (B) periods.

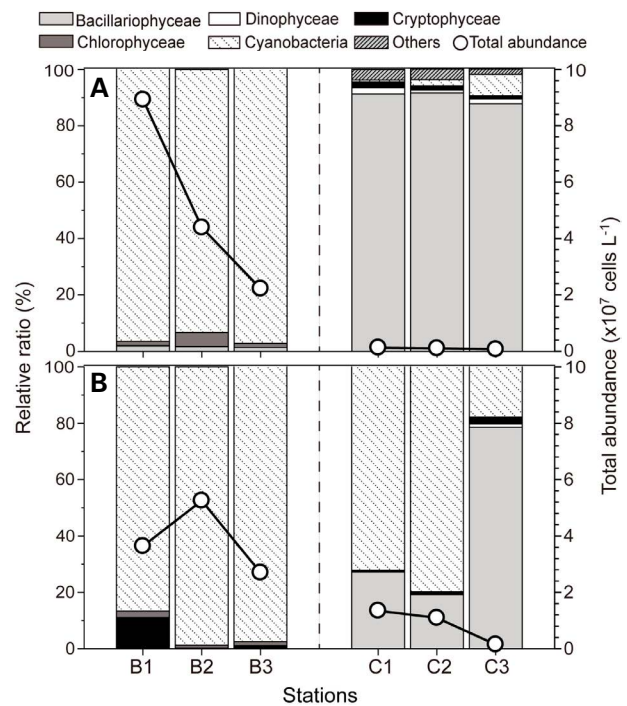


Fig. 6. Total abundance of phytoplankton and relative ratio during dry (A) and rainy (B) periods.

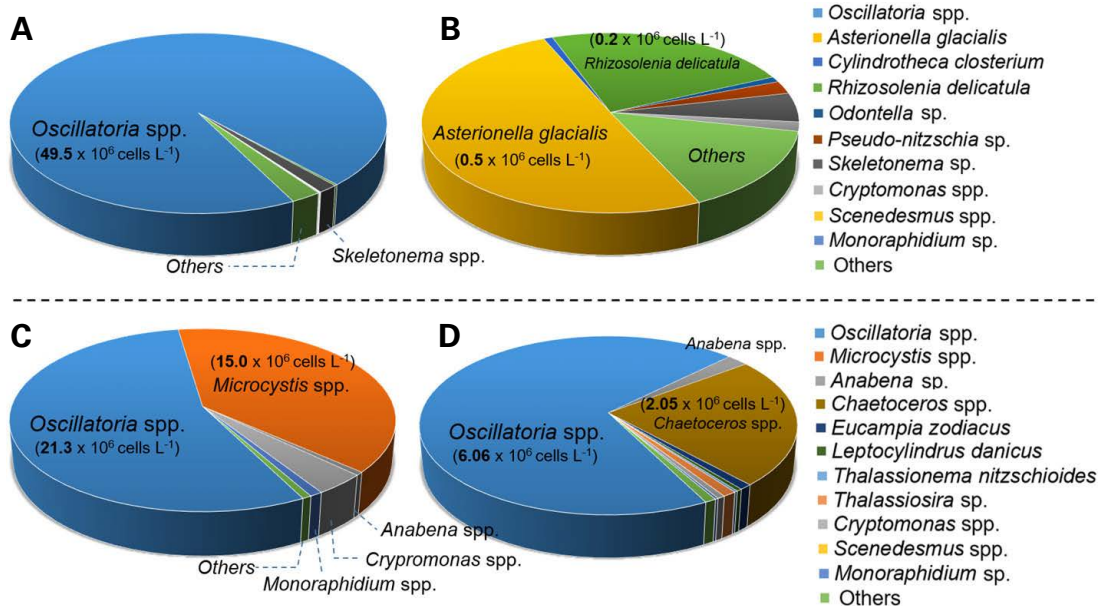


Fig. 7. Pie charts of the top 10 dominant phytoplankton average abundance in Bunam Lake (A, C) and Cheonsu Bay (B, D) during dry (A, B) and rainy (C, D) periods.

(Figs. 6, 7). 강우기 천수만에서 식물플랑크톤 세포수는 정점 C1 표층에서 $1.81 \times 10^7 \text{ cells L}^{-1}$ 로, 정점 C2의 표층에서도 $1.70 \times 10^7 \text{ cells L}^{-1}$ 로 비교적 높았다(Fig. 7C). 조사 시점에는 부남호의 방류가 이루어지지 않아 일반적인 하계 연안 내만의 염분 특성을 보였지만, 조사 전 방류 영향으로 C1과 C2에서 부남호의 우점종인 남조류 *Oscillatoria* spp., *Anabaena* spp.가 유입되어 천수만 식물플랑크톤 세포수에 크게 기여하였다(Fig. 7D). 천수만의 외측 정점인 B3에서는 해수 구조류인 *Cheatocheros* spp.가 가장 우점하였다. 결론적으로 부남호는 연중 높은 영양염의 영향으로 남조류를 중심으로 식물플랑크톤 대증식이 일어날 수 있는 환경이며, 생물의 지속적인 증식과 침강으로 인하여 부남호 저층은 유기물이 누적되어 빈산소수괴가 형성될 가능성이 매우 높았다. 반면 천수만은 강우기 부남호 및 간월호 방류의 영향으로 내측의 생물량이 높았으며, 이는 담수 방류시 부남호와 간월호에서 유입된 남조류와 녹조류가 일시적으로 내만에서 관찰되었기 때문이다. 하지만 시간 경과와 더불어 염분 적응이 어렵기 때문에 결과적으로 담수 방류에 의한 영양염 유입에 의하여 기존 내만에 일정하게 관찰된 구조류가 극우점하는 양상으로 변화될 것이다. 반면 상대적으로 영양염 유입이 적거나 해수 연직 혼합이 활발한 동계 갈수기에는 저층에서부터 공급된 영양염이 식물플랑크톤

증식에 긍정적인 요인으로 작용할 것으로 사료된다.

3. 영양염 분포 특성

무기 영양염 분석 결과, 갈수기에는 부남호 가장 내측인 B1의 표층에서 Nitrate + Nitrite 농도가 $15.4 \mu\text{M}$ 로 가장 높았다(Fig. 8A). 그에 반해 유기물이 극히 많이 축적되었던 B3 저층에서 Nitrate + Nitrite의 농도는 $0.20 \mu\text{M}$ 로 낮았다. 이는 저층의 혐기성 조건에서 유기물 분해로 증가한 Ammonia의 질산화과정이 저해되며, 혐기성 박테리아가 산소 대신 질소를 에너지원으로 사용하였기 때문이다(Canfield *et al.* 2005; Middleburg and Levin 2009). 천수만에서 Nitrate + Nitrite는 대부분 고갈되었으며 C1과 C2 표층에서는 식물플랑크톤 증식에 필요한 절대 영양염 농도인 $1.00 \mu\text{M}$ 이하로 식물플랑크톤 성장의 제한요인으로 작용하였다(Dortch and Whitledge 1992). C3 표층에서 $4.84 \mu\text{M}$, 저층 $9.81 \mu\text{M}$ 로 외측으로 갈수록 다소 증가하는 경향이 관찰되었다. 강우기 Nitrate + Nitrite는 부남호 B1 표층에서 $34.8 \mu\text{M}$ 로 가장 높았으며, C1 표층까지 높게 유지되었고 이후 감소하는 경향을 보였다.

특이적으로 Ammonia 농도는 갈수기 B3 저층 고립된 수괴에서 $1983 \mu\text{M}$ 로 극히 높게 관찰되었고, 다음으로 정점

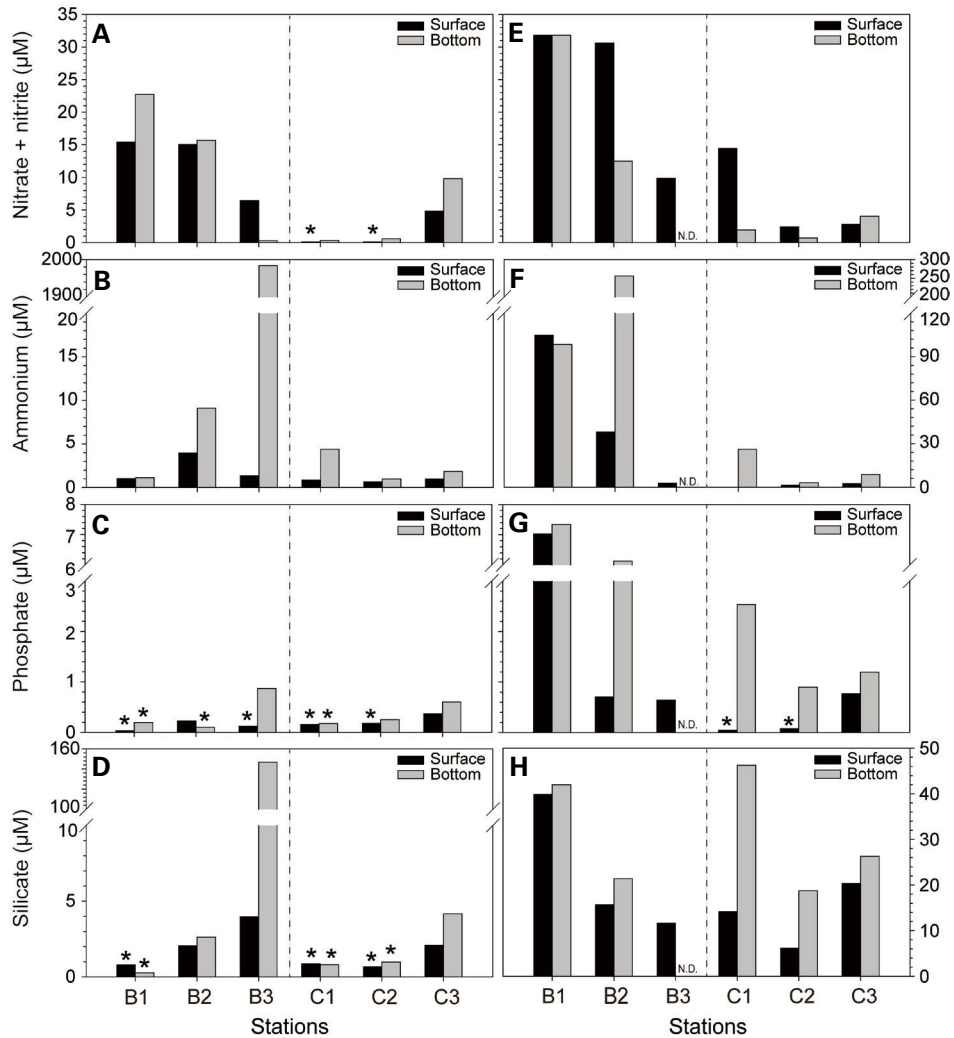


Fig. 8. Horizontal distribution of nutrient in surface and bottom water during dry (A, B, C, D) and rainy (E, F, G, H) periods. Asterisk indicates concentration below the nutrient limit.

B2 저층에서 9.11 μM, 그 외 정점에서는 5 μM 이하 농도를 유지하였다(Fig. 8B). 하계 강우기에도 B2 저층에서 256 μM로 매우 높은 값을 보였다. 부남호 저층에서의 극단적으로 높은 Ammonia 농도는 용존 산소 결핍에 따른 혐기 상태에서 유기물이 분해되며 황화수소와 함께 생성된 생태계에 부정적인 영향을 미치는 분해산물이다(Yoon *et al.* 2007). 시화호 해수 유통 전과 유사한 상태로 시화호 역시 저층에 누적된 유기물의 혐기성 분해에 따른 ammonification을 원인으로 생성된 후 빈산소 환경에서 더 이상 산화되지 못하여 약 360 μM에 달하는 높은 Ammonia 농도를 보였다(Park *et al.* 1997).

갈수기 Phosphate 농도는 전체 평균 0.27 μM로 매우 낮

았고, 식물플랑크톤 성장 제한 농도인 0.20 μM 이하의 농도도 천수만과 부남호 모두에서 다수 관찰되었다(Fig. 8C). 이는 갈수기 부남호에서 대증식한 식물플랑크톤이 Phosphate를 대폭 소모하였기 때문으로 사료된다. B3 저층 Phosphate 농도는 0.87 μM로 극히 높은 농도를 보였던 Ammonia, Silicate와 달리 비교적 낮은 값을 보였다. 일반적으로 저층이 산화 환경일 경우 저층 Phosphate는 퇴적물 내 철 산화물에 흡착되어 Phosphate 농도가 낮아진다(Moore and Reddy 1994). 하지만 빈산소 환경에서는 철 산화물이 환원되며 Phosphate가 수층으로 용출되거나, 수괴에서 상대적으로 안정적인 알루미늄과 결합하여 다시 퇴적물 내로 축적된다고 알려져 있다(Norton *et al.* 2008).

Choi *et al.* (2020)의 인 거동 연구에 따르면, 영산호의 빈산소 환경에서 Phosphate가 알루미늄과 결합하여 비교적 안정한 형태를 유지하며 수층으로의 용출되는 과정이 제한되었다고 보고하였다. 강우기에는 Phosphate가 부남호 상류 B1의 표층과 저층에서 7.02 μM , 7.33 μM 에 달하는 높은 농도를 보였다. 하지만 B2 표층 0.706 μM 로 빠르게 급감한 것은 식물플랑크톤 성장에 의해 표층에서 상당량 소모된 것으로 보인다. 해양에서의 Phosphate 공급은 담수 유입, 저층으로부터의 용출, 외해 또는 인간의 활동에 의한 유입 등 다양하다(Yoon *et al.* 2017). 본 연구 해역과 유사한 시화호(Park *et al.* 2003) 및 금강하구(Yang *et al.* 1999) 연구에서 질산염, 규산염뿐만 아니라 인산염 역시 담수로부터 강하게 유입된다고 보고되었다. 오염된 하구의 Phosphate 공급은 주로 인간의 활동으로 인한 영향이 크지만(Lee *et al.* 2013), 천수만 자체에서는 특별한 오염원이 상대적으로 적은 편이다. 갈수기와 강우기의 Phosphate 농도 차이가 컸으며, 갈수기보다 생물량이 적었고 담수 유입이 많았던 강우기 상류에서 Phosphate 농도가 매우 높고 하류로 갈수록 감소하는 것으로 보아, 본 해역은 담수 유입에 의해 Phosphate가 강하게 공급되는 지역으로 보인다. Park *et al.* (2006)의 연구에서도 천수만 권역은 담수 공급이 없을 시 인산염이 식물플랑크톤의 성장의 제한요인이며, 하절기 인공호수로부터 Phosphate가 유입될 경우 적조의 대발생이 우려되는 지역으로 보고하였다.

갈수기의 Silicate는 B3 저층을 제외하고 평균 1.76 μM 로 낮은 농도로(Fig. 8D), 하구입에도 불구하고 갈수기 담수 유입이 많지 않았기 때문에 Silicate 농도가 일반적인 하구나 호소에 비해 비교적 낮은 농도로 일부 정점에서는 식물플랑크톤 성장 제한 농도인 1.00 μM 이하로 측정되었다. 반면에, 수괴가 고립된 B3 저층에서의 Silicate 농도는 147 μM 로 매우 높았다. 부남호의 규조류는 담수로부터 유입되는 높은 규산염을 이용하여 남세균류와 함께 주로 우점하며, 방류시 일부 천수만으로 유입되는 것 외에는 대부분 부남호 내에서 침강된다. 따라서, B3 저층 유기물에 규조류가 상당량 기여할 것으로 보이며, 퇴적된 규조류는 환원 과정을 거쳐 수중 Silicate가 증가하게 된다(Kamatani and Riley 1979; Greenwood *et al.* 2001). 이러한 과정이 방조제 건설 이후 지속적으로 누적되어, 지금과 같은 극히 높은 Silicate 값을 보인 것으로 사료된다. 실제 본 연구팀에서 조사 결과에서도 저층수의 퇴적물 내 규조류의 휴면포자(resting

spore)가 대량 발견되었다(Lee, unpublished data). 강우기의 전체 평균 Silicate 농도는 23.9 μM 로, 강우의 영향을 받아 상류를 중심으로 높은 농도를 보였다. 다만 강우기 천수만에서는 규조류 세포수가 평균 $2.33 \times 10^6 \text{ cells L}^{-1}$ 로 비교적 높은 세포수를 보였기 때문에, 저층에 비해 표층에서 Silicate가 빠르게 소비된 것으로 사료된다. Lee *et al.* (2019)의 연구에서도 천수만에서 여름철 담수 방류에 의해 높은 영양염이 천수만으로 유입된 후 *Cheatocecos spp.*, *Eucampia zodiacus*와 같은 규조류가 주로 번성하여 만 내측 표층 유기물질을 증가시켰으며, 침강된 유기물질로 인해 저층 높은 영양염 농도와 잠재적 빈산소 수괴의 형성 가능성을 보고하였다.

결과적으로 천수만과 부남호는 영양염의 공급과 식물플랑크톤 대증식으로 인한 영양염 고갈, 수괴의 고립 및 수괴의 흐름으로 영양염 변동과 불균형이 극심한 지역이다. 요약하면, 부남호는 Nitrate + Nitrite가 풍부하며 비교적 부족한 Phosphate가 식물플랑크톤 성장을 제한하는 요인으로 작용할 수 있다. 하지만 강우 시 육상으로부터 Nitrate + Nitrite, Phosphate, Silicate를 강하게 공급받고, 이는 천수만의 생산성을 높이는 데 기여한다.

4. 화학적 산소 요구량

현재 부남호와 천수만의 오염 실태를 파악하고자 COD 분석을 수행하였다(Fig. 9). 갈수기 부남호 표층부 COD 농도는 16.9~21.9 mg L^{-1} 범위로, 2018년 같은 시기에 조사한 물환경정보시스템(<http://water.nier.go.kr/>)의 관측 결과인 15.6~18.8 mg L^{-1} 범위와 유사하였다. 부남호 정점 B1과 B2에서는 표층과 저층의 차이가 크지 않았으나, 빈산소 수괴가 강하게 형성된 B3 저층수에서 206 mg L^{-1} 로 극히 높은 COD 농도를 보였다. 천수만 COD 농도는 대부분 10 mg L^{-1} 이하로 낮았으며, C2의 저층에서 40 mg L^{-1} 로 다소 높았다. 일반적인 해양 환경에선 이렇게 높은 농도의 COD는 관찰되지 않지만, 본 조사 며칠 전 선박 유류오염사고 영향으로 일시적으로 천수만 C2 정점 주변에서 높게 나타난 것으로 확인하였다(CNI, unpublished data). 강우기 부남호 표층 COD 분석 결과는 14.80~18.66 mg L^{-1} 범위로 나타났다. 물환경정보시스템의 최근 3년 하계(8월) 평균 COD 농도는 18.7 mg L^{-1} 로 본 연구 결과와 유사하였다. 아울러, 부남호에서 천수만으로 갈수록 표층 COD 농도는 낮아지는 특성

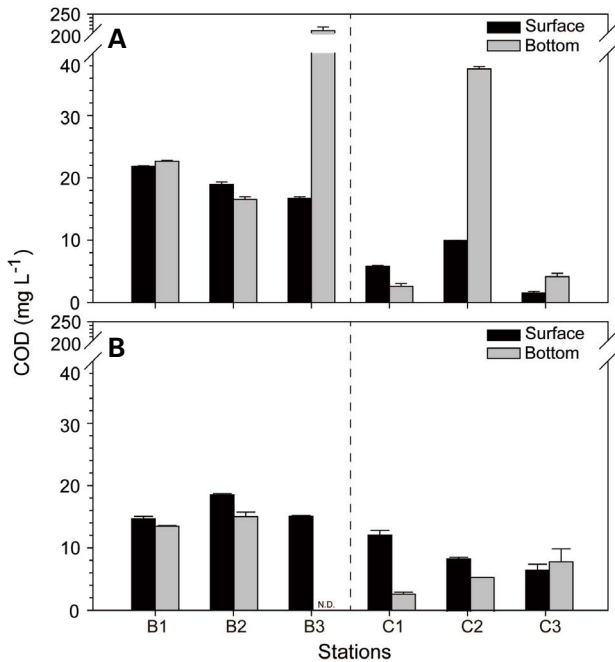


Fig. 9. Horizontal distribution of COD in surface and bottom water during dry (A) and rainy (B) periods.

을 보였고, 천수만 저층 COD 농도는 이와 반대로 외측 정점에서 내만으로 향할수록 증가하는 경향을 보였다. 충청남도 보건환경연구원의 부남호 수질(COD) 계절 조사 결과에 의하면, 정점 B3 인근 표층에서는 5월 9.50 mg L⁻¹, 9월 12.6 mg L⁻¹로 나타났고, 저층은 5월 264 mg L⁻¹, 9월 289 mg L⁻¹로 표층에 비해 20~30배 높게 나타나는 것으로 보고하였다(Kim et al. 2005a). 1980년대 부남호 건설 시 부남호소 내 물은 농업용수로 이용될 목적이 있었지만, 38년이 지난 최근까지 비농사용 비료 기원의 무기영양염이 과다 유입 및 누적되어, 만성화된 부영양화 호수로 변화하였다. 특히 부남호 저층수는 생물이 생존할 수 없을 정도로 심각하게 수질이 악화되었고, 더 이상 농업용수로도 활용이 어렵다고 보고된다(Lee et al. 2014). 2000년대 이후 충청남도에서는 호소로 유입되는 오염물질의 부하량을 감소시키기 위해 많은 노력과 비용을 투자하였지만 수질은 크게 개선되지 않았다(MOE 2018). 결과적으로 우리는 방조제 건설 이후 기존 해수가 부남호 저층에 잔존하며 표층 담수와 혼합되지 않아 강한 빈산소 수괴가 형성되었고, 산소 부족으로 계속해서 유입되는 유기물질의 활발한 분해가 일어나지 않고 누적되며 저층 수질이 계속해서 악화되고 있다는 과학적 근거자료를 처음으로 보고하게 되었다.

Table 1. Concentration of COD (mg L⁻¹), and Eutrophication index (E. Index) during dry and rainy seasons

Station	Depth	Dry season		Rainy season	
		COD	E. Index	COD	E. Index
B1	S	21.8	3.66	14.8	4144
	B	22.7	30.9	13.6	3786
B2	S	19.0	24.1	18.6	264
	B	16.5	12.2	15.1	7257
B3	S	16.7	4.65	15.2	36.1
	B	206	103279	N.D.	N.D.
C1	S	5.83	0.25	12.2	2.39
	B	2.61	0.62	2.65	55.0
C2	S	9.96	0.39	8.47	0.74
	B	375	4.26	5.49	5.42
C3	S	1.51	0.94	6.53	7.71
	B	4.16	8.52	7.87	34.9

S: surface water, B: Bottom water; Values in bold indicate that lower than 1

5. 부영양화지수

부영양화지수를 이용한 수질 평가 결과를 Table 1에 나타내었으며, 부영양화지수가 1보다 크면 부영양화가 진행된 상태를 의미한다(Okaichi 1985). 본 조사 결과 부남호는 전 시기, 전 정점에서 극심한 부영양화 상태로 평가되는 수치를 보였고, 천수만에서는 강우기 담수의 방류의 영향을 받아 부영양화 상태를 보이는 것으로 평가되었다. Kim et al. (2005b)의 연구에서 천수만은 일반적으로 부영양화 상태가 아니지만, 여름철 일부 지역에서 방류의 영향으로 부영양화지수가 1을 초과하며 부영양화 해역으로 평가되었다. 반면에 새만금 해역은 일반적으로 부영양화 해역이지만, 여름철에 식물플랑크톤이 번성하며 만으로 유입된 인을 대부분 소진하였기 때문에 부영양화 지수가 1보다 낮게 나타났다(Kim and Kim 2002). 따라서, 천수만은 갈수기보다 하계 강우기에 식물플랑크톤 생체량이 높았음에도 소모되는 영양염보다 부남호를 비롯한 주변의 호소로부터 대량으로 유입되는 영양염의 영향이 더 큰 해역이기 때문에 하계 부영양화지수가 높게 평가되었다.

적 요

부남호는 하굿둑 건설 이후 수질이 급격히 악화되어 농

업용수로 사용이 불가할 만큼 본래의 기능을 상실하였다. 따라서 해수 교환이나 유통의 필요성이 있으나, 극히 오염된 부남호의 물을 대량 방류할 시 문제가 야기될 수 있기 때문에 시기에 따른 환경 조사가 중요하다. 따라서 본 연구에서는 갈수기(4월)와 강우기(7월)에 천수만과 부남호의 수질 및 식물플랑크톤 분포 특성을 조사하였다. 갈수기에는 부유 생물이 정체되어 부남호 내에서 남조류 *Oscillatoria* spp. 세포수가 8.92×10^7 cells L⁻¹로 대증식하였고, Nitrate + Nitrite를 제외한 영양염 대부분이 소비되었다. 강우기에는 담수 유입의 영향으로 부남호에서 용존 영양염이 크게 증가하였고 부남호에서 식물플랑크톤이 대증식하였다. 강우기 방류의 영향으로 천수만 내측 역시 높은 농도의 생물량을 보였다. 강우기 부남호에서 우점했던 남조류 *Oscillatoria* spp.와 *Microcystis* spp.가 천수만 내측에서도 다수 출현하였으며, 해수에서는 *Cheatocecos* spp., *Eucampia zodiacus*와 같은 규조류가 빠르게 증식하였다. 부영양화 지수는 부남호 내측에서 1을 초과하여 부영양 해역으로 평가되었다. 천수만은 강우기에 담수 방류의 영향을 받을 경우 부영양화 해역으로 평가되었다. 특히 부남호 내 방조제에 인접한 B3 정점의 8m 이상 수심에서 정체된 해수 기원의 강한 빈산소 수괴가 관찰되었고, Nitrate + Nitrite를 제외한 영양염 농도가 극단적으로 높았다. 특히 COD 농도가 206 mg L⁻¹로 심하게 오염된 상태임을 확인하였다. 따라서 부남호는 지속적으로 육상기원의 영양염이 누적되며, 식물플랑크톤의 대발생과 침강으로 수질이 더욱 악화될 가능성이 높은 수역으로 판단되었고, 이를 근본적으로 해결하기 위해서는 해수유통을 통한 생태계 복원이 필수적이다.

사 사

본 논문은 한국해양과학기술원 ‘생지화학 순환 및 해양 환경변동 연구(E99912)’, 충청남도 ‘부남호 역간척에 따른 해양환경 영향분석 및 대응방안 마련 연구(PG52000)’의 지원을 받아 수행되었다.

REFERENCES

- Canfield DE, B Thamdrup and E Kristensen. 2005. Aquatic Geomicrobiology. Elsevier Academic Press. Cambridge, MA. p. 48.
- Choi KS, SW Kim, DS Kim, YT Oh, WM Heo, YK Lee and YS Park. 2008. Temporal and spatial distributions of basic water quality in the upper regions of brackish Lake Sihwa with a limited water exchange. Korean J. Ecol. Environ. 41:206-215.
- Choi JH, SU An, SH Kim, JH Shin, HJ Lee, JH Hyun and JS Mok. 2020. Biogeochemical properties of phosphorus during summer in the sediment of Yeongsan River, Lake and Estuary. J. Korean Soc. Mar. Environ. 23:286-296.
- Dortch Q and TE Whittedge. 1992. Does nitrogen or silicon limit phytoplankton production in the Mississippi River plume and nearby regions? Cont. Shelf Res. 12:1293-1309.
- Gray JS, RSS Wu and YY Or. 2002. Effects of hypoxia and organic enrichment on the coastal marine environment. Mar. Ecol. Prog. Ser. 238:249-279.
- Greenwood JE, VW Truesdale and AR Rendell. 2001. Biogenic silica dissolution in seawater - in vitro chemical kinetics. Prog. Oceanogr. 48:1-23.
- Hallegraeff GM, CJS Bolch, DRA Hill, I Jameson, JM LeRoi, A McMinn, S Murray, MF de Salas and K Saunders. 2010. Algae of Australia: Phytoplankton of Temperate Coastal Waters. CSIRO Publishing. Clayton, Australia.
- Kamatani A and JP Riley. 1979. Rate of dissolution of diatom silica walls in seawater. Mar. Biol. 55:29-35.
- Kattner G. 1999. Storage of dissolved inorganic nutrients in seawater: poisoning with mercuric chloride. Mar. Chem. 67:61-66.
- Kim BC, EK Kim, DJ Pyo, HD Park and WM Heo. 1995. Toxic cyanobacterial blooms in Korean lakes. J. Korean Soc. Water Environ. 11:231-237.
- Kim GJ, JS Go, CG Lee, JW Kim, IC Shin, NC Baek, HJ Song and HW Noh. 2005a. Water quality and sediment characteristics of Ganweol and Bunam lakes. J. CNIHE 15:51-74.
- Kim DS, DI Lim, SK Jeon and HS Jung. 2005b. Chemical characteristics and eutrophication in Cheonsu Bay, west coast of Korea. Ocean Polar Res. 27:45-58.
- Kim JG and YS Kim. 2002. Application of ecosystem model for eutrophication control in coastal sea of Saemankeum Area-1. Characteristics of water quality and nutrients released from sediments. Korean J. Fish Aquat. Sci. 35:348-355.
- Kwon YJ, SH Park and SJ Jin. 2020. Economic feasibility analysis of restoration project of the Bunam Lake in Cheonsu Bay. J. Environ. Pol. Admin. 28:163-183.
- Lee DK, KH Kim and JS Lee. 2016. Hypoxia and characteristics of nutrient distribution at the bottom water of Cheonsu Bay due to the discharge of eutrophicated artificial lake water. Korean Soc. Mar. Environ. Saf. 22:854-862.
- Lee JY, MS Choi and Y Song. 2019. Effect of freshwater discharge on the seawater quality (Nutrients, organic materials and trace metals) in Cheonsu Bay. The Sea 24:519-534.

- Lee SJ, SH Go and YI Kim. 2014. A Study on the Current Status of the Estuary in Chungcheongnam-do and the Plan to Restore Ecology. Chungnam Development Institute. Gongju, Korea. p. 147.
- Lee YJ, BK Jeong, YS Shin, SH Kim and KH Shin. 2013. Determination of the origin of particulate organic matter at the estuary of Youngsan River using stable isotope ratios. Korean J. Environ. Ecol. 46:175–184.
- Middleburg JJ and LA Levin. 2009. Coastal hypoxia and sediment biogeochemistry. Biogeosciences 6:1273–1293.
- MLTM. 2020. Standard Methods for Examination of Marine Environment. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs. Sejong, Korea.
- MOE. 2018. 2018 Groundwater Annual Report. Ministry of Environment. Sejong, Korea. p. 684.
- Moon CH, C Park and SY Lee. 1993. Nutrients and particulate organic matter in Asan Bay. Korean J. Fish Aquat. Sci. 26:173–181.
- Moore A and KR Reddy. 1994. Role of Eh and pH on phosphorus geochemistry in sediments of Lake Okeechobee, Florida. J. Am. Soc. Agron. 23:955–964.
- Norton SA, K Coolidge, A Amirbahman, R Bouchard, J Kopáček and R Reinhardt. 2008. Speciation of Al, Fe, and P in recent sediment from three lakes in Maine, USA. Sci. Total Environ. 404:276–283.
- Okaichi T. 1985. The Cause of Red-Tide in Neritic Water. Japan Fisheries Resources Conservation Association. Tokyo. pp. 58–75.
- Omura T, M Iwataki, VM Borja, H Takayama and Y Fukuyo. 2012. Marine Phytoplankton of the Western Pacific. Kouseisha Kouseikaku. Tokyo.
- Park JK, ES Kim, SR Cho, KT Kim and YC Park. 2003. Annual variation of water qualities in the Shihwa Lake. Ocean Polar Res. 25:459–468.
- Park SY, GS Park, HC Kim, PJ Kim, JP Kim, JH Park and SY Kim. 2006. Long-term Changes and Variational Characteristics of Water Quality in the Cheonsu Bay of Yellow Sea, Korea. J. Environ. Sci. Int. 15:447–459.
- Park SY, S Heo, J Yu, UK Hwang, JS Park, SM Lee and CM Kim. 2013. Temporal and spatial variations of water quality in the Cheonsu Bay of Yellow Sea, Korea. Korean Soc. Mar. Environ. Saf. 19:439–458.
- Park YC, JK Park, MW Han, SK Son, MK Kim and SH Huh. 1997. Biogeochemical study of dissolved organic and inorganic compounds under oxic/anoxic environment in Lake Shihwa. The Sea 2:53–68.
- Parsons TR, Y Maita and CM Lalli. 1984. A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis. Pergamon Press. New York. p. 22.
- Tomas CR. 1997. Identifying Marine Phytoplankton. Academic Press, Harcourt Brace and Company. Toronto, Canada. pp. 858.
- Yang JS, JY Jeong, JY Heo, SH Lee and JY Choi. 1999. Chemical mass balance of materials in the Keum River estuary: 1. Seasonal distribution of nutrients. The Sea 4:71–79.
- Yoon SC, SH Youn and YS Suh. 2017. The characteristics of spatio-temporal distribution on environmental factors after construction of artificial structure in the Nakdong River estuary. J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy 20:1–11.
- Yoon SP, RH Jung, YJ Kim, SS Kim, JS Lee, JS Park, WC Lee and WJ Choi. 2007. Characteristics of benthic environment and polychaete communities of Gamak Bay, Korea. The Sea 12:287–304.