

<https://doi.org/10.15433/ksmb.2024.16.1.063>

ISSN 2383-5400 (Online)

## 섬 및 내륙 담수지 내 조류 분포 및 다양성 변화 조사 : 다양한 담수원 확보를 위한 첫걸음

### Variations in algal distribution and diversity in oceanic island and inland freshwater reservoirs : a step toward for securing diverse freshwater resources

박종명, 김유경, 이아현, 이희정, 고연자, 전남수, 곽완순\*

Jong Myong Park, Yoo-Kyeong Kim, A Hyun Lee, Hee-Jeong Lee, Yeon-Ja Koh, Nam-Soo Jun, Wan-Soon Kwack\*

인천광역시 상수도사업본부 맑은물연구소, 인천 21316, 대한민국

Water Quality Research Institute, Waterworks Headquarters, Incheon 21316, Republic of Korea  
(Received 14 May 2024, Revised 23 May 2024, Accepted 23 May 2024)

**Abstract** This study analyzed the distribution, diversity, and density variation of algal clusters in a freshwater reservoir from an oceanic island and a traditional inland water system to gain insights on future marine freshwater resource management. In the Paldang water system (Han River), despite the upstream Paldang Dam and the downstream Jamsil underwater reservoir being in the same meteorological zone, their algae density patterns varied inversely. The distinct algal cluster structure (diversity/dominance) of Paldang was altered in the downstream reservoir, suggesting that physical devices aid algae management in traditional water systems. In contrast, 24 out of 35 genera (63.2%) identified in the Jeolgol Reservoir (Baeknyeong Island) were unique, lacking regulatory mechanisms, and existing in a complex ecotone. The desmid Chlorophyceae *Cosmarium*, adapted to higher photosynthetic stress and low temperatures, dominated in January (38.04%) and August (86.45%) during the periods of extreme photosynthetic stress. Jeolgol's annual algal cluster structure (H' 2.097; D 0.259; S' 35) demonstrated higher stability than Paldang (H' 1.125; D 0.448; S' 13) and the Jamsil underwater reservoir (H' 1.078; D 0.469; S' 12), maintaining an H' above 1.5 even during midwinters. No evidence of TN/TP inflow from surrounding soils was observed, even during torrential rainfalls, with phosphorus being the limiting factor for algal growth. TOC, BOD, chlorophyll-a, and turbidity peaked during *Cosmarium* bloom. Future climate change is expected to cause fluctuations in algal clusters and related water quality factors. The complex transitional nature of the Jeolgol Reservoir, its algal diversity, and the interspecies interactions contribute to the high stability of its algal community.

**Keywords :** Climate change, ecotone, freshwater algae, freshwater reservoir, microbial diversity, water resources

## 서 론

먹는물은 인류생존을 위한 자원이지만, 가속화되는 기후변화는 한반도를 포함한 다양한 국가에서 수자원

\* Corresponding author  
Phone: 032-720-2201 Fax: 032-440-8740  
E-mail: tksrkd66@korea.kr

This is an open-access journal distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

고갈을 야기하고 있다[47]. 때문에 지표 및 지하수, 용천수 등 기존의 수자원 이외에 정수처리가 가능한 다양한 유형의 수자원이 확보되어야 하며[39], 그 과정에서 먹는물 원천으로서의 수질관리 방안을 확립하기 위한 노력도 필요하다. 한반도는 삼면이 바다로 접하여 다양한 규모의 해양도서가 분포하며[24], 일부는 거주민을 위한 자체 담수원을 확보하고 수질관리를 위한 모니터링이 실시된다. 지상에 노출된 담수원의 경우 조류(algae)가 그 대상에 포함되기도 한다. 조류는 수질개선, 전 지구적 물질순환 등 긍정적 효과와 함께 정수공정 폐색, 독성물질 분비로 인한 수생태계 위협, 이취미 발생 등 담수자원 관리상의 난해함을 초래하기도 한다[57].

한편 생물자원에 대한 연구가 가속화되면서 한반도에 분포하는 담수권, 해양 및 전이지대 미생물상 조성 및 다양성을 구명한 연구 결과들이 축적되고 있다[2]. 이러한 연구 결과들을 요약하면 첫째, 수서미생물상은 그들의 서식 환경을 둘러싼 지질, 수질, 기상 및 기후요인의 영향에 따라 특징적인 극상군집을 형성한다[34]. 둘째, 환경특성이 동일해도 서식환경의 지리생태학적 격리에 의해 차별적인 수서미생물상이 형성될 수 있다[40-42]. 셋째, 전이지대 중 하구언, 갯벌처럼 환경요인의 격렬한 변화로 인해 수서미생물 군집에 미치는 선택압이 일정치 않은 경우, 끊임없는 천이를 유발하는 등 군집의 불안정성을 초래한다[43, 59]. 전통적 수자원인 하천수는 산간지역, 인구정주지역, 농토 등 다양한 환경영향하에 있으며 집중호우에 의한 지형변화, 유속변동, 댐 방류로 인해 수서미생물 군집에 환경 스트레스를 지속 유발하는 전이지대[59]로 구분될 수 있다.

이러한 내륙 하천수는 기후 및 기상요인이 온화한 내륙에 속하므로, 기상요인 및 그 영향하에 있는 수질인자가 조류군집에 주된 영향을 미친다. 따라서 하천수를 대상으로 기상/수질요인 및 조류군집 간의 관계를 규명하는 연구가 이루어졌다[51, 53]. 기상요인은 계절적 패턴이 강하므로 조류군집은 일정한 주기로 예측가능한 천이를 겪는데, 하절기는 남조와 녹조가, 봄철은 규조류가 우점하여 상수원 관리와 수처리 공정의 어려움을 야기한다. 따라서 기상을

예측하여 단시간 내의 조류거동을 예측하고 행정자원 준비를 위한 시간을 확보하고자 하는 것이 그러한 연구들의 궁극적 목표가 된다(www.news1.kr/articles/5046307). 그러나 이러한 기술은 기상/수질요인이 예측가능한 내륙 하천수에 적용이 용이한 것이며, 해양도서 담수권에도 적용가능 할지에 대한 과학적 연구가 필요하다. 그간 한반도 자연환경을 대상으로 한 생태학적 연구들에서 해양도서의 미생물상은 해양성기후 혹은 지질사적 요인의 영향을 우세하게 받는 것으로 보고되었으므로[40], 해양도서 담수권을 둘러싼 환경적 요인과 조류군집과의 연관해석이 필요하다.

한반도 대표적 해양도인 백령도에는 상당한 인구가 정주하며 자체 담수원으로 절골저수지를 확보하고 있다. 기후변화 및 그로 인한 수자원 부족에 대비한 담수원 확보 측면에서 기존 내륙 수계(한강 팔당수계)와 해양 담수호(절골저수지)의 조류군집 분류군 조성, 다양성 지수(Margalef's richness, Menhinick's index, Shannon's diversity, Simpson's 및 Shannon's equitability index[25, 29, 30, 31, 52, 58]) 및 군집 밀도를 월간 단위로 조사하고 그들의 월간 변화양상을 비교분석 하였다. 또한 조류군집을 둘러싼 환경요인(수질, 지질, 기상 및 기후인자)과의 상호관계를 분석하기 위하여 수질요인으로서 생물화학적 산소요구량(biochemical oxygen demand, BOD), 총유기탄소량(total organic carbon, TOC), 총인(total phosphorus, TP), 총질소(total nitrogen, TN), Chlorophyll-a, 용존산소량(dissolved oxygen, DO) 및 탁도를, 해양성 기후/기상 요인으로서 온도, 강우, 일사, 해무, 일조 지표 및 해양으로부터의 염소이온 및 붕소의 유입 여부를 평가하였다. 지질사적 영향요인으로서 문헌 고찰을 실시하고 그에 따라 수중의 철(Fe)성분을 분석하였다.

이를 통해 첫째, 내륙 하천수 대비 해양 담수권이 가지는 조류관리 상의 강점과 약점을 도출하고 차별적 관리의 필요성을 제안한다. 둘째, 절골저수지를 둘러싼 기후, 기상, 지질, 수질인자와 조류군집의 상호작용을 분석하고, 조류군집에 주된 영향을 미치는 환경인자를 동정(identification)한다. 셋째, 동정된 기

후기상 인자들을 고려하여 가속화되는 기후변화에 따른 절골저수지 조류군집 및 수질변화를 예측하고, 필요한 추가적인 연구방향을 제안한다. 부가적으로, 차별적 조류관리가 필요하다고 판단되어 조류관리 기술들이 미래에 적용되는 경우[7] 본 연구를 통해 얻어진 다양성 지수들은 조류관리 수단의 효과성을 판단하는 과학적, 정량적 지표로 사용될 수 있다.

**재료 및 방법**

**연구지점**

기존의 내륙 수계 대비 해양도서 담수권의 조류군집 구조 및 환경요인 간의 상호작용 규명을 위해 한강(팔당수계) 및 백령도 절골저수지(Fig. 1-C)를 연구대상으로 설정하였다(Table 1). 절골저수지는 백령도 서남해안에 위치하며, 수도권 상수원인 한강수계와 직선거리로 300km 이상 분리되어 있고 해안선과 최소 30km 이상 해류로서 격리되어 신생대 말기로부터 지리생태학적 격리를 겪고 있다. 절골저수지는 섬 봉우리에서 해안가로 흘러가는 몇 개 하천수를 해안가에서 막아 세워진 인위적 호소이다[50]. 수면면적은 0.21km<sup>2</sup>, 최대수심 5.5m로 작은 규모의 호소

Table 1. Sampling site information

Ecotone type	Administrative location	Reservoir name	Watershed area (km <sup>2</sup> )	Global positioning system coordination
Oceanic islands	Baengnyeong-myeon, Ongjin-Gun (Baengnyeong Islands)	Jeolgol reservoir	0.7	N37°55'18.0", E124°38'48.2"
Inland riverstream	Baealmi-dong, Hanam-si, Gyeonggi-do	Paldang reservoir	158.7	N37°31'22.8", E127°16'40.8"
	Sincheon-dong, Songpa-gu, Seoul	Jamsil underwater reservoir	6.45	N37°31'22.8", E127°05'28.66"

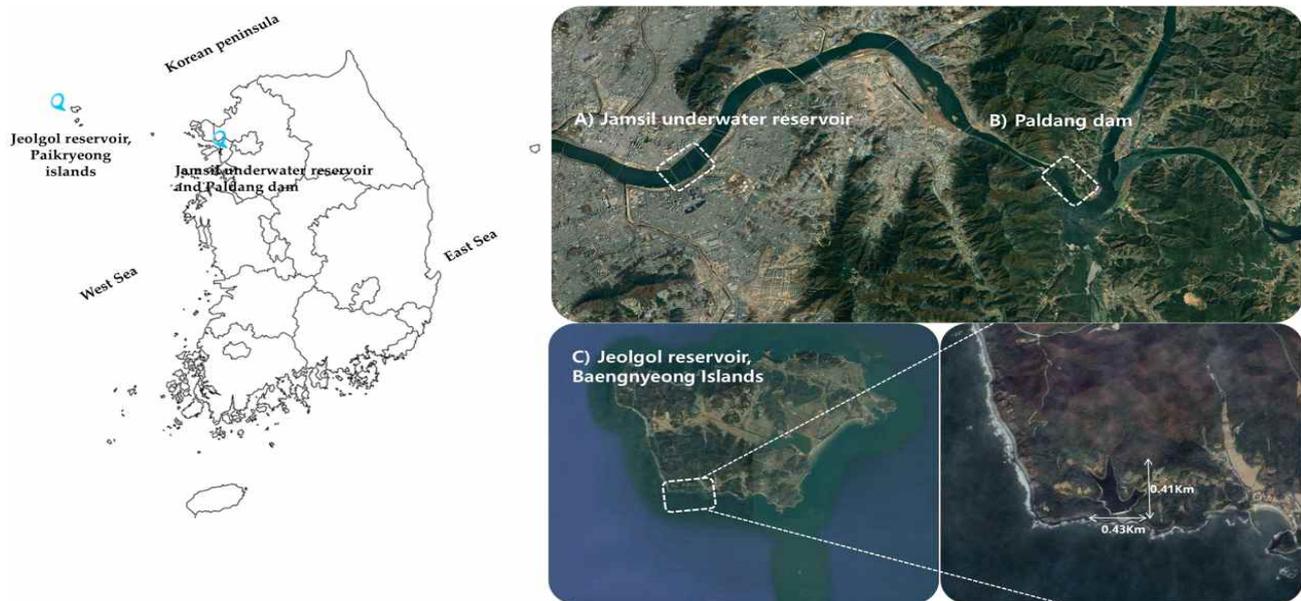


Fig 1. Aerial view location of sampling site

The aerial images were collected using the Google Earth program (version 7.3.3) and modified for this study. Sampling sites are highlighted with white line. The application altitude of figure A) and B) is 30.64 km, the figure C) is 20.01 km. A) Jamsil underwater reservoir and B) Paldang reservoir and C) The Jeolgol Reservoir located in the west side of the Baeknyeong islands

이다[50].

팔당호(Fig. 1-B)는 한강의 다목적 댐이며 상수원 공급, 수력발전이 주 임무이다. 겨울부터 초여름까지의 갈수기에도 일일 약 1,000 Ton 내외의 하천수가 지속 유입되고 있으나, 홍수조절 기능은 없고 물의 흐름을 잠깐 지연시키는 기능만 있으므로 유입량을 수력발전 시스템을 통해 방류하면서 한계저수량 이하로 유지한다. 홍수 조절기능은 미약하므로 집중호우 및 장마철에는 평상시 열 배 이상의 유량으로 유입과 방류가 이루어진다. 잠실수중보(Fig. 1-A)는 팔당호 하류에 위치하며, 인위적 수중보로서 일정 수위를 유지하여 수도권 취수량 유지 기능을 한다. 조류군집 연구에 있어 팔당호와 팔당호 하류에 위치한 팔당수계(한강) 각 지점에서 별도로 조사가 이루어지기도 했다[19]. 그러나 2021년 이후 가속화된 기후변화로 인해 국지성 집중호우가 빈발하고, 이로 인한 팔당댐의 급작스런 대규모 방류는 팔당호 및 그 하류의 유해조류를 일시에 해결하기도 하였으므로, 본 연구에서는 팔당댐 및 잠실수중보의 조류군집 안정성을 비교하여 이러한 수계 상하방의 물리적 교란이 조류 생태에 미치는 영향을 파악하고자 한다.

### 샘플링

팔당호의 경우 팔당댐 상단에 위치한 팔당 제1 취수장에서, 하방의 잠실수중보에서는 수중보 남단지역에 위치한 풍납취수장에서 시료를 채취하였다. 백령도 절골저수지는 저수지 동쪽 고지대에 위치한 백령취수장에서 시료를 취하였다. 각각의 담수시료를 4L 고밀도폴리에틸렌(High Density Poly Ethylene) 채수용기의 headspace까지 가득 채운 후 4°C 조건을 유지하여 신속하게 실험실로 운반하였다. 조사 기간으로는 2021년 1월~2022년 12월 매달 일정간격으로 샘플링을 계획했으나, 백령도는 지정학적 사유로 인해 2021년에만 실시되었다.

### 분리동정 및 정량

현미경을 이용한 동정 및 세포수 정량분석을 실시하였다. 현미경 관찰을 위한 고정액으로는 요오드화

칼륨(potassium iodide) 20.0 g을 정제수 200 ml에 녹인 후 요오드(iodine) 10.0 g을 추가로 녹인 것을 정제수를 가해 1,000ml로 하여 제조하였다. 이를 검체 10 ml 당 한방울씩 떨어뜨리고 교반하여 세포를 고정하고, 이 액 1.3ml을 혈구계수기에 점적하고 현미경(x200, x400)으로 1구획마다 계수하는 것을 무작위로 10구획 반복하였다. 각각 조류 세포 크기, 형태, 색상을 기준으로 하여 형태학적 동정을 실시하였다[48, 53]. 형태학적 동정을 실시한 이후에는 동정된 속 별로 계수하여 시료 1ml당 총 세포수로 환산하여 정량하였다. 형태학적 동정 이후 군집구조 파악을 위한 분류체계 조사는 NCBI (National Center for Biotechnology Information) taxonomy database (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/gene>)를 사용하였다.

### 생물다양성 분석

관찰된 조류의 속 차원의 다양성을 분석하였다. 풍부도는 Margalef's richness (Dmg) 및 Menhinick's index (Dmn)를, 다양성 지수 도출은 Shannon's diversity index (H'), Simpson's index (1-D) 및 Shannon's equitability index (EH)를 적용하여 연/월 단위, 담수지별 군집상태를 비교하였다[25, 29, 30, 31, 52, 58].

### 환경요인 분석

절골저수지 조류군집을 둘러싼 환경요인인 기후, 기상, 수질, 지질요인 분석을 위해 아래와 같이 데이터를 도출하였다.

기후요인 분석을 위해 해양성 기후 특이적인 기상 데이터를 기상자료개방포털([data.kma.go.kr/data](http://data.kma.go.kr/data))로부터 추출하였으며, 이들은 종관기상관측(automated synoptic observing system; ASOS)자료로서 백령도 및 서울특별시 ASOS 장비에 의해 측정된 값이다. 2021년 1월부터 조류군집 분석이 실시되었음을 감안하여 2020년 12월 ~ 2021년 12월까지의 월간 데이터를 분석대상으로 하였다. 이는 리비히의 법칙에 의해 탄소, 질소, 인의 비율이 적정상태(106:16:1)를 유지할 경우 2-3일마다 반복증식하여 한달 내 1,000마리 이상 증식 가능하기 때문이며, 2021년 1월의 군집에 영향을 미치는 1달 전의 기상요인을 파악하기 위함

이다[18]. 기상데이터는 기온 (평균, 평균최고, 평균 최저, 최고 및 최저기온), 강우 (월합계, 최다, 일최다 및 시간당 최고 강수량), 풍속 (평균, 최대 및 최대순간풍속), 일조/ 일사지표 (월별합계일조시간, 월일조율, 월별합계일사량) 및 안개 (해무) 로서 해양성 기후를 특성을 반영한 인자들이다. 한편 태양광이 해양표면으로부터 반사되는 환경적 스트레스를 판단하기 위해 월별합계일사량을 월별합계일조시간으로 나누어 단위면적 · 단위일조 시간당 일사량

(MJ/m<sup>2</sup>/Hr)을 산출하였다.

수질요인 측정을 위해 조류생장과 관련된 항목으로 총인(Total Phosphorus; T-P), 총질소(Total nitrogen; T-N), 생물화학적산소요구량 (Biochemical oxygen demands; BOD), 용존산소량 (Dissolved oxygen ; DO), 총유기탄소량 (Total organic carbon; TOC), chlorophyll-a를 월별로 분석하였으며, 해무로 인한 절골저수지 내부로의 해수성분 유입을 판단하기 위해 준금속류인 붕소(boron) 및 이온류인 염소

Table 2. Taxonomic location of algae native to the Jeolgol Reservoir

Kingdom	Phylum	Class	Order	Family	Genera			
Bacteria	Cyanobacteriota	Cyanophyceae	Chroococcales	Microcystaceae	<i>Microcystis</i>			
			Pseudanabaenales	Pseudanabaenaceae	<i>Pseudanabaena</i>			
Eukaryota Viridiplantae (greenplants)	Chlorophyta	Chlorophyceae	Chlamydomonadales	Haematococcaceae	<i>Haematococcus</i>			
				Volvocaceae	<i>Eudorina</i>			
					<i>Gonium</i>			
			Sphaeropleales	Scenedesmaceae	Hydrodictyceae	<i>Pediastrum</i>		
					<i>Coelastrum</i>			
					<i>Scenedesmus</i>			
			Cyanophyceae	Synechococcales	Nephrocytiaceae	<i>Tetraedron</i>		
						<i>Tetrallantos</i>		
						<i>Nephrocytium</i>		
			Trebouxiophyceae	Chlorellales	Merismopediaceae	<i>Merismopedia</i>		
						<i>Micractinium</i>		
			Klebsormidiophyceae	Klebsormidiales	Oocystaceae	<i>Oocystis</i>		
					incertae sedis	<i>Crucigenia</i>		
					Elakatotrichaceae	<i>Elakatothrix</i>		
			Streptophyta	Zygnemophyceae	Desmidiiales (desmids)	Desmidiaceae	<i>Staurastrum</i>	
<i>Cosmarium</i>								
Bacillariophyceae	Zygnematales	Zygnemataceae			<i>Mougeotia</i>			
	Bacillariales	Bacillariaceae			<i>Nitzschia</i>			
	Cymbellales	Cymbellaceae			<i>Cymbella</i>			
Bacillariophyta	Coccinodiscophyceae	Naviculales	Naviculaceae	<i>Navicula</i>				
				Aulacoseirales	Aulacoseiraceae	<i>Aulacoseira</i>		
		Stephanodiscales	Stephanodiscaceae	<i>Cyclotella</i>				
				<i>Stephanodiscus</i>				
Eukaryota	Fragilariophyceae	Fragilariales	Fragilariaceae	<i>Asterionella</i>				
				<i>Diatoma</i>				
				<i>Fragilaria</i>				
				<i>Synedra</i>				
				Gyrista	Chrysophyceae	Chromulinales	Dinobryaceae	<i>Dinodryon</i>
						Synurales	Mallomonadaceae	<i>Mallomonas</i>
						Cryptomonadales	Cryptomonadaceae	<i>Cryptomonas</i>
Dinoflagellata	Dinophyceae	Thalassiosiphysales	Catenulaceae	<i>Amphora</i>				
				Peridinales	Peridiniaceae	<i>Peridinium</i>		
Euglenozoa	Euglenida	Euglenales	Euglenaceae	<i>Euglena</i>				
Number of taxa	7	13	22	26	34			

Table 3. Taxonomic location of algae native to the inland freshwater (Paldang water system)

Kingdom	Phylum	Class	Order	Family	Genera	Jamsil Underwater reservoir		Paldang reservoir		
						2021	2022	2021	2022	
Bacteria	Cyanobacteria	Cyanophyceae	Nostocales	Aphanizomenonaceae	<i>Aphanizomenon</i>	○		○		
				Nostocales	<i>Anabaena</i>	○	○	○	○	
			Oscillatoriales	Oscillatoriaceae	<i>Oscillatoria</i>		○		○	
			Synechococcales	Pseudanabaenaceae	<i>Pseudanabaena</i>				○	
Eukaryota	Bacillariophyta	Bacillariophyceae	Bacillariales	Bacillariaceae	<i>Nitzschia</i>	○	○	○	○	
			Cymbellales	Cymbellaceae	<i>Cymbella</i>		○			
			Naviculales	Naviculaceae	<i>Navicula</i>	○	○	○	○	
		Coscinodiscophyceae	Aulacoseirales	Aulacoseiraceae	<i>Aulacoseira</i>	○	○	○	○	
			Stephanodiscals	Stephanodiscaceae	<i>Cyclotella</i> <i>Stephanodiscus</i>	○	○	○	○	
		Fragilariophyceae	Fragilariales	Fragilariaceae	<i>Asterionella</i>	○	○	○	○	
					<i>Fragilaria</i>	○	○	○	○	
					<i>Synedra</i>	○	○	○	○	
		Gyrista	Bacillariophyceae	Rhizosoleniales	Rhizosoleniaceae	<i>Rhizosolenia</i>				○
			Chrysophyceae	Chromulinales	Dinobryaceae	<i>Dinobryon</i>		○		○
Synurales	Mallomonadaceae	<i>Mallomonas</i>					○			
Eukaryota Viridiplantae (greenplants)	Chlorophyta	Chlorophyceae	Chlamydomonadales	Volvocaceae	<i>Eudorina</i>				○	
					<i>Gonium</i>		○		○	
			Sphaeropleales	Hydrodictyceae	<i>Pediastrum</i>	○		○	○	
					<i>Scenedesmus</i>	○	○	○	○	
					<i>Actinastrum</i>	○	○	○	○	
Trebouxiophyceae	Chlorellales	Chlorellaceae	<i>Micractinium</i>		○	○	○			

(chloride ion)를 분석하였다. 한편 지질요인과의 연관성 파악을 위해 현재까지의 국내외 학계에 보고된 백령도 지질사적 연구 자료 및 그에 따른 고철질암의 영향을 추정하기 위하여 금속류인 철(Fe)을 분석하였다. 모든 분석법은 American Public Health Association (APHA) 전문자료 및 대한민국 수질오염 공정시험기준을 적용하였다[4, 13, 21, 33, 49].

**결과 및 고찰**

**분류군 추이**

지리생태학적으로 내륙 수계와 분리된 절골저수지에서는 총 34개의 조류속이 동정되었으며(Table 2) 7문, 13강, 22목, 26과에 속한다. 절골저수지는 내륙 수계 대비 해양성 기후 영향에까지 노출된 복잡한 전이지대로서 다양한 조류 속들이 자리잡게 되었

으며, 이로 인해 높은 풍부도를 보였다. 한편 팔당호에서는 2년간 각각 14속(2021년), 20속(2022년)이 동정되었으며(Table 3) 2년 통틀어 4문, 8강, 15과에 속하였다. 2021년에 팔당호에서 분포하였던 Aphanizomenonaceae과 (*Aphanizomenon* 속)는 2022년에 출현하지 않았고, Oscillatoriaceae과 (*Oscillatoria* 속), Pseudanabaenaceae과 (*Pseudanabaena* 속), Volvocaceae과 (*Eudorina*, *Gonium* 속), Dinobryaceae과 (*Dinobryon* 속), Mallomonadaceae과 (*Mallomonas* 속), Rhizosoleniaceae과 (*Rhizosolenia* 속)들이 새롭게 동정되었다. 한편 팔당호 하방의 잠실수중보에서는 2년간 각각 13속(2021년), 16속(2022년)이 동정되었으며(Table 3), 2021년 확인되지 않은 Gyrista 문 (*Dinobryon* 속)이 2022년도에 확인되었다. 팔당호에서 2021년 대비 2022년 증가된 수치의 속 풍부도 (genera richness, S')를 보임에 따라 하방에 위치한

잠실수중보에서의 풍부도 및 출현 속의 규모 또한 증가되었다. 다만 팔당호보다 잠실수중보 풍부도가 상대적으로 낮은 현상은 팔당호 댐 방류와 같은 물리적인 인자가 하류 군집의 안정성에 어떠한 영향을 미치기 때문으로 판단된다.

**생물다양성 추이**

절골저수지는 연단위 샤논다양성(H') 값이 2.0 이상으로, 군집의 안정성이 매우 높다(Table 4, Fig. 2). 한편 D값의 경우 절골저수지는 연간 0.259, 동일한 해 잠실수중보는 0.469로서(Table 4, Fig. 2) 절골저수지에서 특정 조류에 의한 우점도가 상대적으로 낮다. 한편 절골저수지 연평균 E<sub>H</sub>값은 0.595로서 같은 해 잠실수중보 0.434 대비 30% 이상 높은 값을 보였고, H' 값은 2.097로서 잠실수중보의 1.078보다 2배 정도의 값을, D<sub>mg</sub>의 경우 모두 3배 이상의 수치를

도출하여(Table 4, Fig. 2) 절골저수지 조류군집의 다양성은 팔당수계 대비 매우 풍부하고 이에따라 높은 군집의 안정성을 확보하고 있다.

이러한 특성은 월별 다양성 지수 분포에서도 동일한 패턴인데(Table 5, Fig. 3), 계절요인으로 인해 조류밀도가 극히 낮은 4월을 제외하고는 절골저수지 H' 값 변동이 최소값 1.225(10월) ~ 최대값 1.934(3월)의 분포를, 잠실수중보는 최소값 0.152 (8월) ~ 최대값 0.936(12월)의 분포를 보인다. 따라서 절골저수지 군집안정도는 연평균 수치가 한강수계 보다 상대적으로 높으며, 월간 변동폭도 적다. 또한 절골저수지 조류군집은 그들을 둘러싼 환경의 변화에 군집구조가 반응하여 변화되기는 하지만 (예: 1월, 8월), 그러한 요인의 소멸 시 다시 안정된 상태의 극상군집을 회복하는 능력이 탁월하였다.

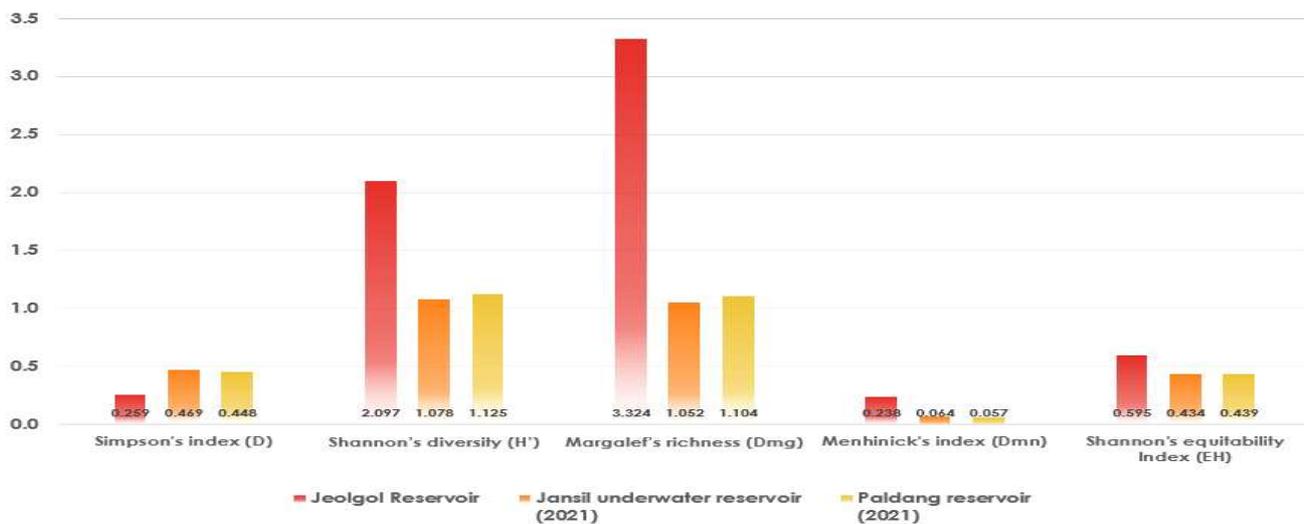


Fig. 2. Diversity of the algae clusters native to the each reservoir (2021)

Table 4. Annual microbial diversity of the algae native to the each sampling sites

Diversity indices	Jeoggol Reservoir	Jamsil underwater reservoir (2021)	Paldang reservoir (2021)	Jamsil underwater reservoir (2022)	Paldang reservoir (2022)
Cell density (/ml)	20,488	34,704	52,654	18,081	19,192
Richness (S')	34	12	13	15	19
Simpson's index (D)	0.259	0.469	0.448	0.257	0.243
Shannon's diversity (H')	2.097	1.078	1.125	1.348	1.750
Margalef's richness (D <sub>mg</sub> )	3.324	1.052	1.104	1.428	1.825
Menhinick's index (D <sub>mn</sub> )	0.238	0.064	0.057	0.112	0.137
Shannon's equitability Index (E <sub>H</sub> )	0.595	0.434	0.439	0.498	0.594

Table 5. Monthly variation of diversity, richness and dominances per each sampling sites

Sampling sites	Diversity indices	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	
Jeolgol Reservoir	Cell density (/ml)	2,730	1,008	804	315	354	754	1,296	9,292	542	300	750	2,342	
	Richness (S)	12	10	13	4	12	9	13	10	7	7	11	14	
	Simpson's index (D)	0.226	0.235	0.188	0.593	0.187	0.208	0.142	0.818	0.427	0.301	0.301	0.194	0.335
	Shannon's diversity (H')	1.790	1.640	1.934	0.740	1.835	1.759	2.141	0.489	1.225	1.448	1.448	1.890	1.623
	Margalef's richness (Dmg)	1.390	1.301	1.794	0.521	1.874	1.208	1.674	0.985	0.953	1.052	1.052	1.511	1.675
	Menhinick's index (Dmn)	0.230	0.315	0.459	0.225	0.638	0.328	0.361	0.104	0.301	0.404	0.404	0.402	0.289
	Shannon's equitability Index (E <sub>H</sub> )	0.720	0.712	0.754	0.534	0.738	0.801	0.835	0.212	0.630	0.744	0.744	0.788	0.615
	Cell density (/ml)	677	14,065	11,258	2,600	1,377	835	1,031	615	792	373	373	235	846
	Richness (S)	4	5	4	6	5	6	8	4	5	4	4	3	5
	Simpson's index (D)	0.773	0.553	0.910	0.446	0.741	0.324	0.597	0.292	0.499	0.464	0.464	0.936	0.418
	Shannon's diversity (H')	0.349	0.420	0.149	0.530	0.371	0.685	0.414	0.936	0.590	0.647	0.647	0.152	0.151
	Margalef's richness (Dmg)	0.460	0.419	0.322	0.636	0.553	0.743	1.009	0.467	0.599	0.507	0.507	0.366	0.593
	Menhinick's index (Dmn)	0.154	0.042	0.038	0.118	0.135	0.208	0.249	0.161	0.178	0.207	0.207	0.196	0.172
	Shannon's equitability Index (E <sub>H</sub> )	0.252	0.261	0.107	0.296	0.231	0.382	0.199	0.675	0.367	0.467	0.467	0.138	0.094
Jamsil underwater reservoir (2021)	Cell density (/ml)	685	4,469	2,315	4,427	427	50	546	3,100	500	712	173	677	
	Richness (S)	4	4	6	6	6	3	10	11	7	6	5	8	
	Simpson's index (D)	0.415	0.462	0.526	0.437	0.359	0.722	0.247	0.591	0.178	0.571	0.683	0.431	
	Shannon's diversity (H')	0.971	0.853	0.948	0.971	1.245	0.536	1.762	1.514	1.798	0.903	0.703	1.243	
	Margalef's richness (Dmg)	0.459	0.357	0.645	0.596	0.826	0.511	1.428	1.244	0.965	0.761	0.776	1.074	
	Menhinick's index (Dmn)	0.153	0.06	0.125	0.090	0.29	0.424	0.428	0.198	0.313	0.225	0.38	0.307	
	Shannon's equitability Index (E <sub>H</sub> )	0.700	0.615	0.529	0.542	0.695	0.488	0.765	0.631	0.924	0.504	0.437	0.598	
	Cell density (/ml)	515	1,142	1,304	765	4,196	1,396	365	454	2,515	2,558	3,477	504	
	Richness (S)	7	10	8	6	14	10	3	6	5	8	5	4	
	Simpson's index (D)	0.935	0.628	0.832	0.523	0.689	0.408	0.288	0.324	0.346	0.649	0.986	0.607	
	Shannon's diversity (H')	0.173	0.585	0.349	0.857	0.669	1.208	1.492	1.418	1.356	0.716	0.041	0.748	
	Margalef's richness (Dmg)	0.961	1.278	0.976	0.753	1.558	1.243	0.339	0.817	0.511	0.892	0.491	0.482	
	Menhinick's index (Dmn)	0.308	0.296	0.222	0.217	0.216	0.268	0.157	0.282	0.100	0.158	0.085	0.178	
	Shannon's equitability Index (E <sub>H</sub> )	0.089	0.254	0.168	0.478	0.253	0.525	1.358	0.791	0.843	0.344	0.025	0.540	
Cell density (/ml)	1,212	562	1,788	1,227	342	1,988	554	2,196	2,692	22,319	14,558	3,215		
Paldang reservoir (2022)	Richness (S)	6	2	6	8	7	8	6	5	5	5	5	4	
	Simpson's index (D)	0.533	0.619	0.495	0.526	0.312	0.476	0.401	0.462	0.413	0.500	0.718	0.477	
	Shannon's diversity (H')	0.777	0.748	1.088	0.854	1.301	0.803	1.362	1.320	1.127	1.012	0.74	1.144	
	Margalef's richness (Dmg)	0.704	0.158	0.892	0.511	0.817	0.339	1.243	1.558	0.753	0.976	1.278	0.961	
	Menhinick's index (Dmn)	0.172	0.084	0.158	0.100	0.282	0.157	0.268	0.216	0.217	0.222	0.296	0.308	
	Shannon's equitability Index (E <sub>H</sub> )	0.434	1.079	0.607	0.411	0.669	0.386	0.760	0.820	0.077	0.629	0.460	0.825	

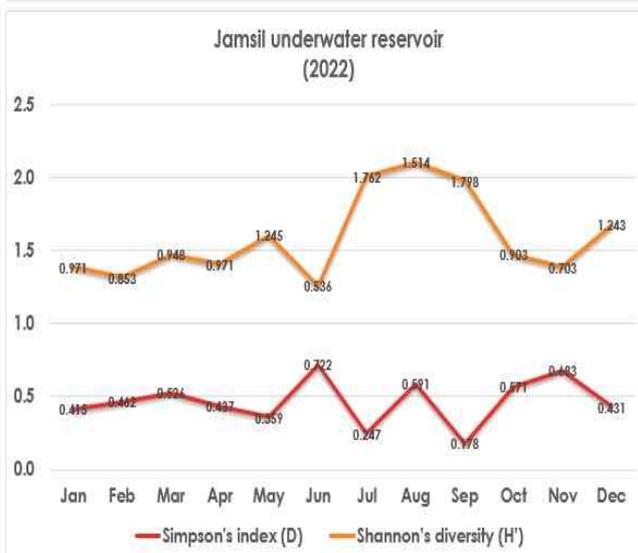
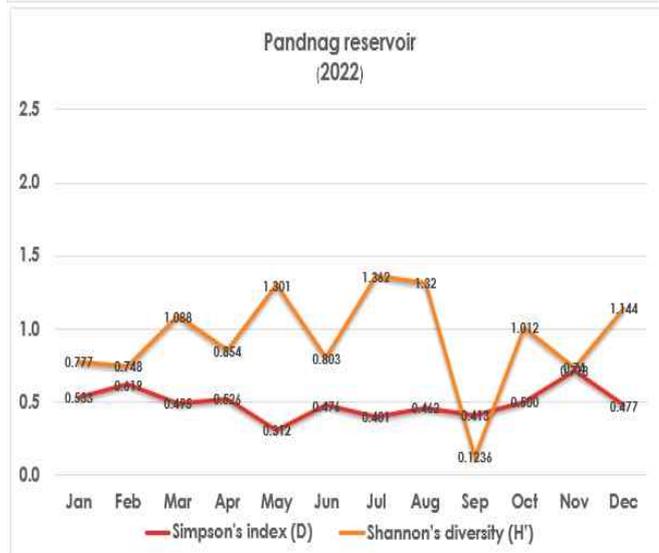
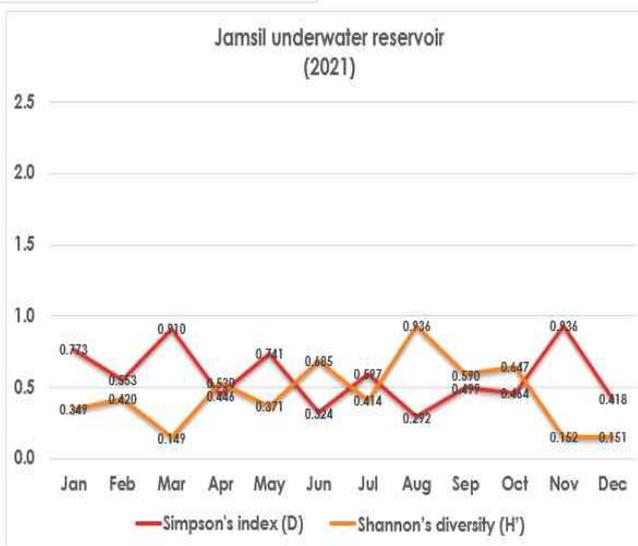
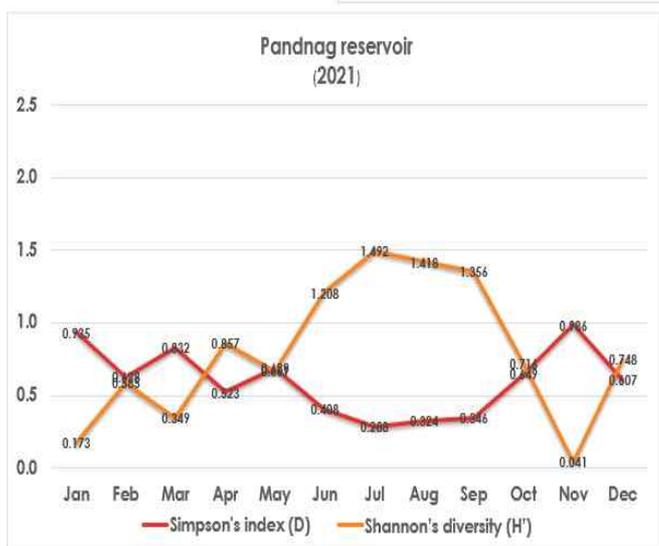
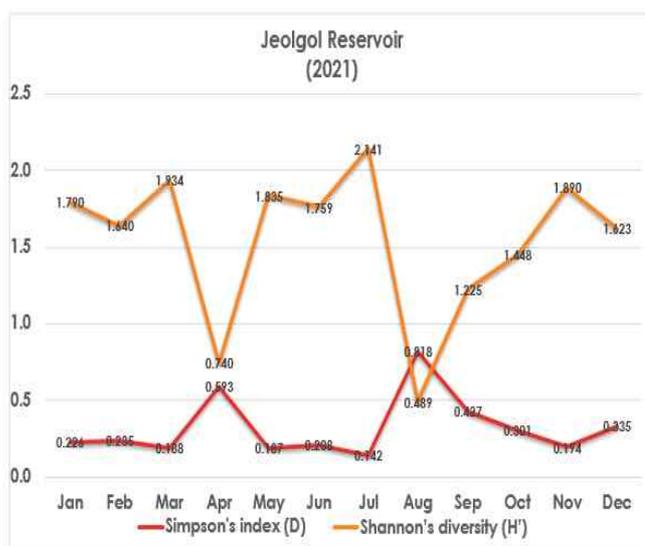


Fig. 3. Diversity variation of the algae clusters native to the each reservoir

**조류밀도 추이**

팔당호로의 하천수 유입, 그로 인한 지속적인 방류, 하방에 위치한 잠실수중보의 물리적 교란이 조류군집에 미치는 영향을 파악하기 위해 다양성 변화 (Fig. 3), 조류밀도 변화(Fig. 4-A,B)를 분석하고 두 지점의 월별 증감 패턴을 구현하였다(Fig. 4-C,D).

2021년 팔당호는 봄철 최고 조류밀도를 기록했고 (5월 4,196/ml), 밀도수 증가의 주요인은 정수공정 여과지 누출을 유발하는 규조류 (*Cyclotella* 속), 폐색을 유발하는 규조류 (*Asterionella* 속)의 급격한 증가이며, 동절기 이후 해빙으로 인해 무기물이 유입된 영

향으로 판단된다. 그러나 2022년 팔당호는 다른 양상으로서 가을철 최고 조류밀도 (10월 22,319/ml)를 기록했으며 이는 여과지 폐색성 *Aulacoseira* 속, *Fragilaria* 속 및 *Synedra* 속의 증가와 함께 이취미 유발성 *Oscillatoria* 속의 출현 및 증가에 따른 것이다. 두 해간 이러한 차이는 강우패턴, 토양유출 등 연간 기상요인의 차이에 의한 것으로 사료된다. 그러나 이러한 환경요인 변화로 인한 팔당호의 변동과는 달리 2년간 하방의 잠실수중보에서는 항시 해빙 기인 2~3월 규조류로 인한 최대 조류밀도를 나타내었다. 2022년에는 봄철에 규조류의 증가가 있다가

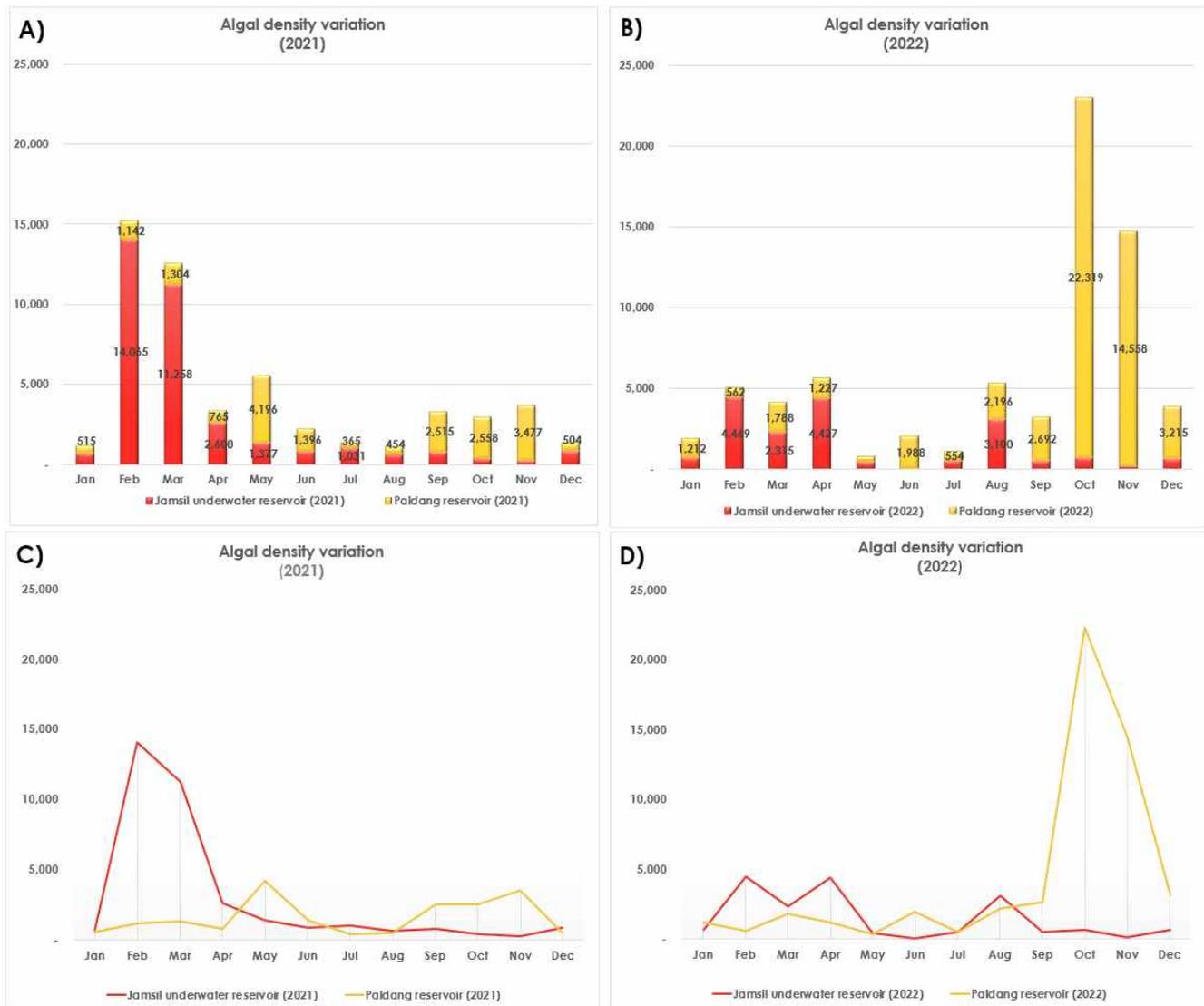


Fig. 4. Algal density variation in Paldang water system (2021~2022) A and B showing density variation in each month, C and D showing pattern of increasing and decreasing

4~6월에 전체 조류밀도가 급감하고, 기온이 상승하는 하절기인 7~9월에 연간 최대 조류밀도를 나타내며, 이 기간 풍부도  $S'$  값과  $E_H$  값은 급감한다. 한편 팔당호에서 조류 속 개수가 감소하더라도 동일한 기간 하방에 위치한 잠실수중보에서는 다시 출현 속의 개수가 증가됨과 동시에 조류밀도는 잠실수중보에서 일정 감소하여 환경요인에 의해 조성된 팔당호의 특징적인 군집구조는 교란되었다. 이는 팔당댐의 지속적 방류, 수중보 상단에서의 물리적인 교란이 특정 조류의 우점 혹은 과밀을 해소시키는 조절자 역할을 하기 때문인 것으로 추정된다. 이러한 효과로 인해 팔당호와 잠실수중보 지점이 동일한 기상요인에 노출됨에도 불구하고, 하류인 잠실수중보의 다양성과 우점도 지수값은 팔당호에 비해 변화의 진폭이 작고 안정한 패턴을 보이고 있다(Fig 3).

한편 조류군집에 물리적 조절효과는 유해 남조류 통제에도 영향 미치고 있는 것으로 추정된다. 2022년 8월 팔당호의 *Oscillatoria* 속 밀도가 415/ml을 기록했으나, 동일시기 잠실수중보에서는 211/ml로 감소한다. 또한 여과지 폐색을 유발하는 *Asterionella* 속, *Aulacoseira* 속 등의 규조류 또한 잠실수중보에서 밀도가 상당량 감소하여 규조류 과밀을 억제하는 효과도 확인되었다. 전반적으로 물의 물리적인 요동은 탁도를 증가시켜 광선을 차단하고, 세포의 안정적인 분열기회를 차단하며, 규소 등의 무기물질을 이용할 기회를 교란하는 것으로 추정된다.

한편 이러한 추정을 확증하기 위해 팔당호와 하방에 위치한 잠실수중보의 연간 조류밀도 증감패턴(Fig. 4-C,D)을 구현해 보았다. 팔당호와 잠실수중보는 직선거리 20km 이내 근거리에 위치하여 동일한 기상영향권 하에 있다. 일반적인 자연 하천 구조라면 동일한 기상영향 아래에서 두 지점의 조류밀도가 증가하고 감소하는 것은 어느 정도 비례 관계에 있거나 유사한 패턴을 보여야 하는데, 오히려 팔당호의 조류밀도가 증가하면 잠실수중보는 감소하고, 팔당호에서 감소하면 잠실수중보에서 증가하는 반대 양상을 보인다. 이러한 양상은 결국 계절에 따른 하천수 유입량 변화와 더불어 팔당댐의 방류량 조절에 따른 인위적 결과임을 의미한다. 더불어 그러한 조

절효과는 내륙으로 부터 유입량과 강우량이 충분히 확보되는 계절에 가능할 것이며, 이상기후로 인해 하절기 강우량 및 팔당호 방류량이 급감할 경우 이러한 조절효과가 감소할 것이며, 유해조류 문제를 해결할 기회는 감소하게 될 수도 있다. 그러한 이유로 2021년도 8~9월 유해조류 경보가 발령되었으며, 이후 집중호우 및 대규모 방류를 통해 조류경보가 해결될 수 있었다. 한편 내륙하천과 달리 절골저수지와 같은 호소수의 경우 그러한 조절요인이 없어 군집구조 내에서 어떠한 생태학적 강점이 있을 수 있는지 평가되어야 한다.

### 절골저수지 자생 조류군집 특성화 군집안정성

따라서 본 연구에서는 절골저수지가 처한 '복잡한 전이지대 환경에서 유발되는 조류 분류군의 다양성'과 '조류 분류군 간의 경쟁 등 생태학적 상호작용'이 군집 내에서 유해 중 등 특정 조류의 과밀을 억제하고 담수지 관리상에 강점이 될 가능성이 있는지 고찰할 것이다. 이를 위해 절골저수지와 한강수계에서 '하절기 기상에 의한 군집구조 교란' 이후 '군집 안정성 회복력'를 비교해 봄으로써 '절골저수지 조류 군집의 안정성'을 판단할 수 있다.

팔당호와 잠실수중보에서 하절기 기상특성에서 유래된 조류군집의 천이 이후 군집의 안정성이 변화하는 패턴은 절골호소와 명확한 차이가 있다(Fig. 3, Table 5). 2022년 잠실수중보에서는 유해남조류로서 *Oscillatoria* 속이 7월(D' 0.247, H' 1.762, 조류밀도 542/ml)에 출현하지 않다가 8월(D' 0.591, H' 1.514, 조류밀도 3,100/ml)에 출현하였으며, 출현량은 211/ml를 기록하였다. 8월에 출현한 전체 속의 수( $S'$ )가 11개로서 연간 최대치에 달했으며, 개체수도 전월 약 500/ml 대비 3,100/ml로 급증하였는데, 이때 전체 조류밀도 증가에 가장 기여한 것은 규조류인 *Aulacoseira* 속이다. *Aulacoseira* 속의 극적인 증식으로 인해 군집 H' 값은 8월에 감소하고 D는 상승했다. 이들 규조류가 소멸된 것은 9월(D 0.178, H 1.798, 조류밀도 500/ml)이지만, 이때부터 연말까지 전체 출현 속( $S'$ )과 다양성은 이전의 수준으로 회복되지

못하였다(Fig. 3)

이는 절골저수지에서 하절기에 대변성하였던 녹조 및 남조가 가을로 접어들면서 소멸되고, 이와 동시에 전체 조류의 속(S') 및 H' 값이 급상승하면서 (10월 1.448, 11월 1.890, 12월 1.623) 겨울 내 조류군집의 안정성이 높은 수준을 유지(Fig. 3)하는 것과는 차별적인 양상이다. 사실 백령도의 조류군집 안정성은 기상요인이 강화되는 몇 개 기간(4월 및 8월, Fig. 3)을 제외하고는 늘 높은 다양성을 회복하거나 유지해 왔으며, 이는 한강 내륙 수계의 전이지대적 요소에 더해 해양성기후의 영향, 지질학적 요인의 영향까지 받아 이들에 적용된 조류 종까지 저수지 환경에 존재하기 때문일 것으로 판단된다. 수서미생물상의 전이지대를 구성하는 환경요인이 다양해 질수록 그러한 다양한 환경요인에 최적화된 미생물 종들이 군집을 구성하므로, 그로인한 군집의 안정성은 증가할 수 밖에 없다. 한반도 수서환경 연구에서 서해 대양에 위치한 해양도서 담수권이 내륙평야 담수지보다 균류 속(fungal genera) 다양성과 군집 안정성이 높다는 연구사례가 지속 보고되고 있다[35, 36, 40].

이처럼 절골저수지의 군집 안정성을 회복하는 능력은 절골저수지 조류군집을 구성하는 다양한 조류 속들간의 생태학적 상호작용의 결과일 것이며, 이러한 절골저수지 우수한 생태학적 안정성은 연간 유량 변동이 적고 저수량이 작은 절골저수지에서 태양광 차단, 살조제 투입 등과 같은 어떠한 특정의 관리방식이 적용되었을 때 유해조류의 통제 효과[7]가 내륙 수계에 비해 효과가 뚜렷하게 확인될 가능성을 보여준다. 그간의 학술적, 기술적 자료를 검토했을 때 조류 통제 방안 적용 시 명확한 효과가 있다고 판단하는 근거는 유해조류의 개체수 감소를 비롯해 미소 군집에서의 H' 값 증가, Dmg와 S' 값 증가, D 값 감소이다[3, 6, 14, 15]. 높은 안정성을 띠는 것으로 평가되는 경우 특정의 오염된 상황이 오염되기 전의 본래의 상태로 복구되었다고 판단하는 지표가 된다 [26, 37, 38, 41, 43-45]. 이때 본 연구에서 제시한 군집 구조 및 다양성 지수들은 조류 군집 안정성 회복을 평가하는 정량적 지표가 될 것이다.

**분류군의 고유성**

한편 백령도 절골저수지와 잠실수중보의 지리 생태학적 격리가 출현하는 속의 분포에 어떠한 영향을 미치고 있는지 판단하였다[28](Fig. 5).

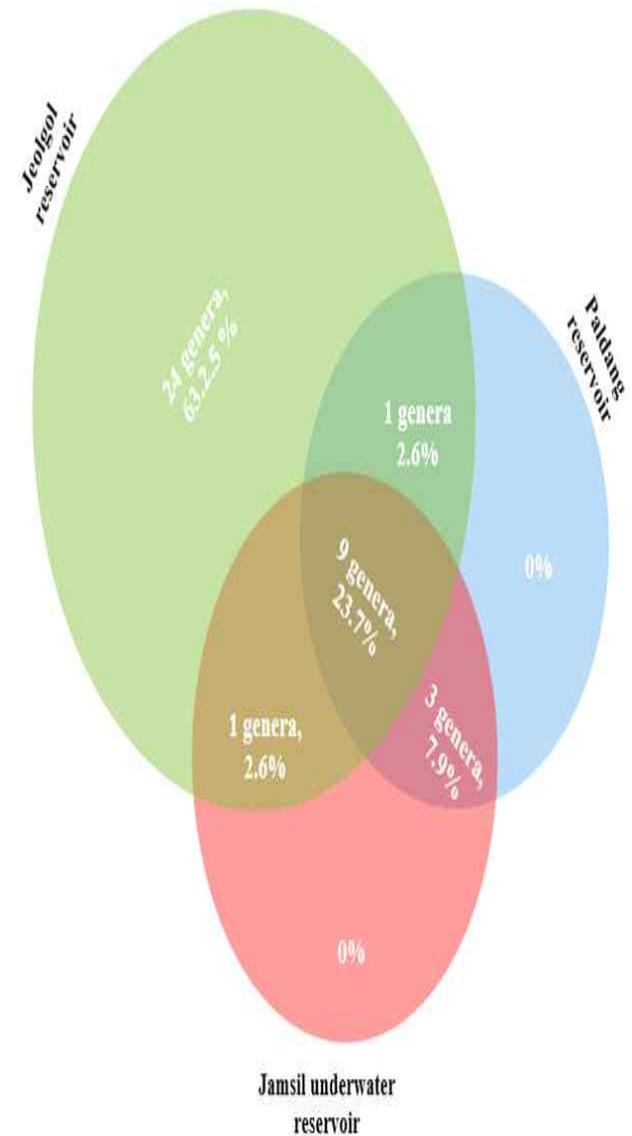


Fig. 5. Geo-ecological segregation and resulting uniqueness taxa distribution of the Jeolgol algal cluster

절골저수지 출현 중 34개 가운데 65.8%에 해당하는 25속이 해양 도서 담수원인 절골저수지에서만 독립적으로 확인되었다(Fig. 6, Supplement Figure S1).

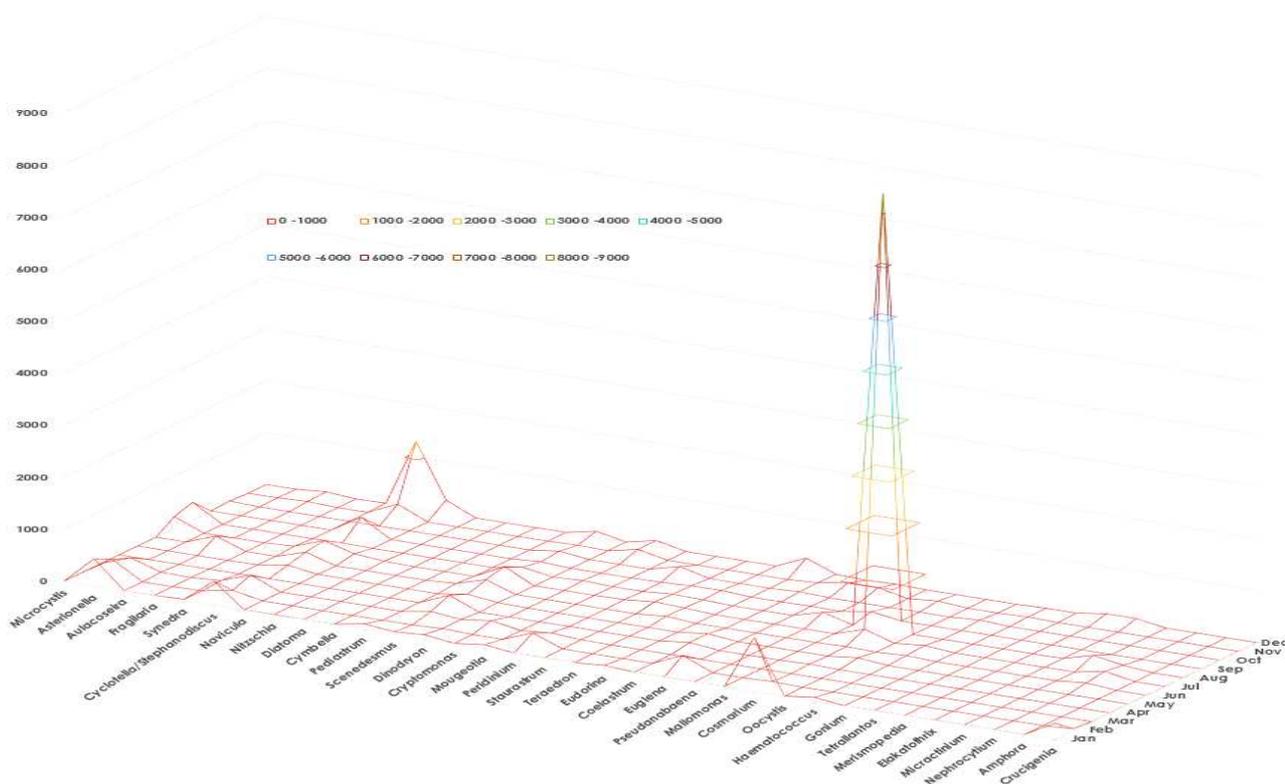
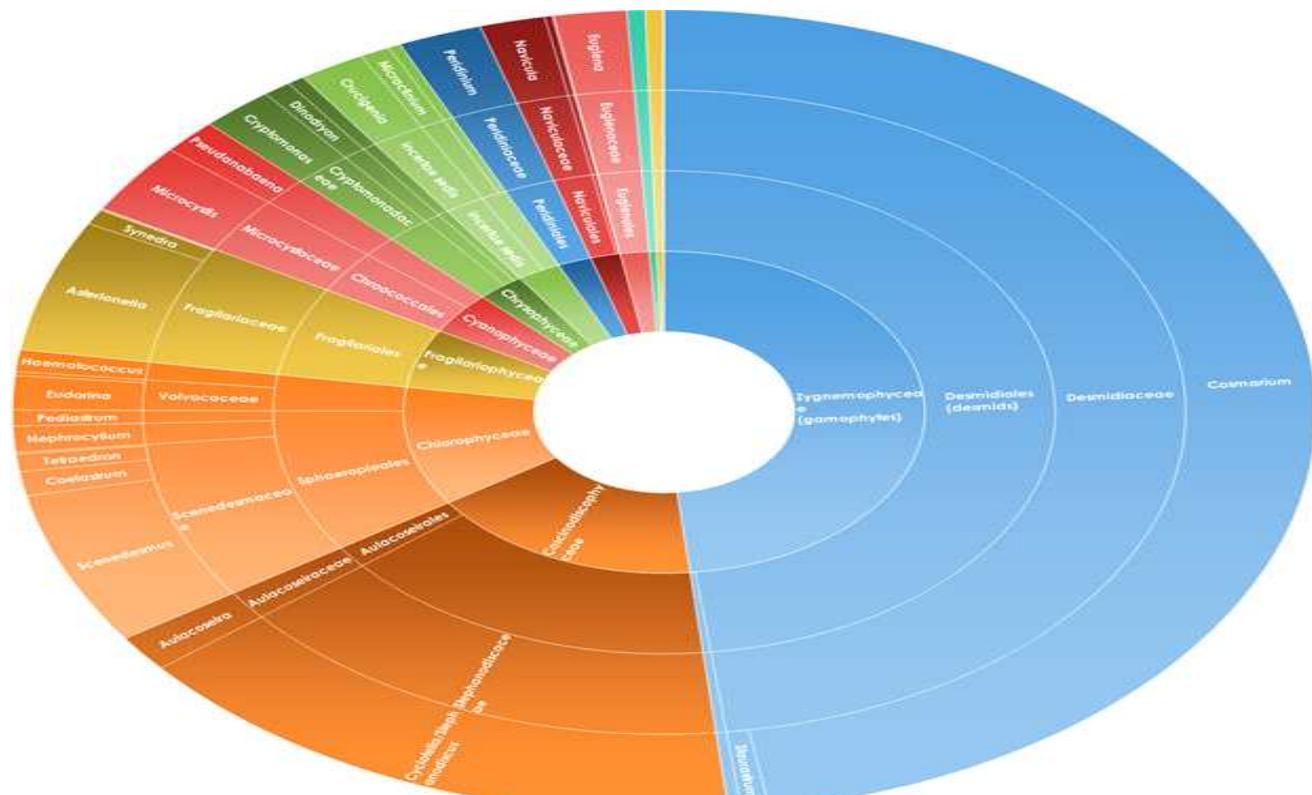


Fig. 6. Variances in abundance and dominance of each algal genera by month



Supplement Figure S1. Algal taxa composition native to the Jeolgol Reservoir (Occurred taxon and resulting dominance). The order of the sunburst chart is Class, Order, Family, and Genera from the inside out

이러한 분류군들이 2021~2022년 내륙 수계에서 동정되지 않았고 절골저수지 군집구조가 안정적인 극상군집을 조성한다는 점을 감안하면 이미 지리생태학적 격리에 의한 차별적인 군집 조성이 확보되었음을 알 수 있다. 절골저수지에서 차별적으로 출현한 속은 *Amphora*, *Coelastrum*, *Cosmarium*, *Crucigenia*, *Cryptomonas*, *Diatoma*, *Dinodryon*, *Elakatothrix*, *Euglena*, *Haematococcus*, *Merismopedia*, *Microcystis*, *Mougeotia*, *Nephrocytium*, *Oocystis*, *Pediastrum*, *Peridinium*, *Staurastrum*, *Stephanodiscus*, *Tetraedron*, *Tetralantos* 이며, 상당수는 국제학계에 해양생물종으로 등록되었다(World Register of Marine Species). *Cryptomonas* 속은 한반도 각지 및 오스트레일리아 해양지역에서 분포가 보고되었으나[9], 한반도 서북해양에서는 보고된 바가 없다.

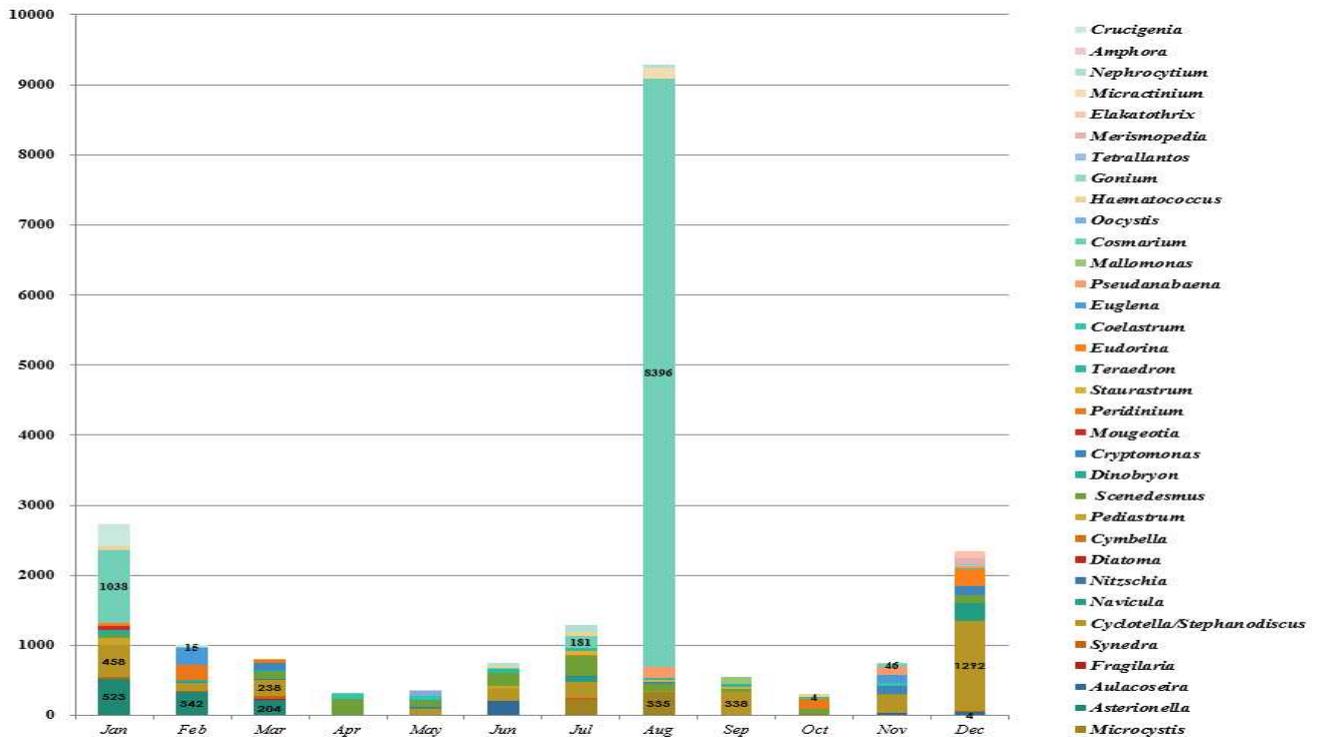
**기후요인과의 관계**

해양성 기후하의 해양도서는 사방의 해수면에서 반사되는 태양광과 자외선으로 인해 늘 광선에 의한 극심한 스트레스에 노출되어 있다. 또한 수륙간 비열차이로 인한 강한 해륙풍, 거센 호우, 해무, 파랑은

수서환경의 폭기, 교란 및 염분침투를 유발한다 [40-45]. 특히 해무는 해면에 부유하는 염분을 핵으로 하여 발생하므로, 백령도의 잦은 해무는 해양성 기후의 영향을 극대화 될 것으로 사료된다.

절골저수지는 해변(beach)에 차단막을 세워 담수를 가두었고, 전방의 해변에는 해안사구 및 자생 사구식생 등이 거의 형성되지 않아 해수 침투에 노출된 상태이며, 때문에 절골저수지는 생태학적으로 해양의 영향으로부터 섬의 식생과 인구집락을 보호하는 전이지대 및 배후습지의 역할까지 일부 수행할 것으로 사료된다. 절골저수지의 해수성분 침투의 가능성으로는, 2021년 절골저수지의 붕소는 0.02 ~ 0.03 mg/l 의 분포를, 팔당수계는 0.01 ~ 0.02 mg/l 의 분포를 보였고, 염소이온은 절골저수지 36.4 ~ 44.3 mg/l 의 분포를, 팔당수계는 그보다 매우 낮은 13.0 ~ 25.0 mg/l 의 분포를 보인 것이 그 근거가 된다 (Table 6).

절골저수지 연간 조류변동을 살펴보면 (Supplement Figure S2), 하절기 *Microcystis* 속이 7월 (227/ml) ~ 8월(335/ml)에 출현하였고, 8월에 최대치를 보이다가 9월에 소멸하였다. *Microcystis* 속의 출



**Supplement Figure S2.** Algal cluster structure native to the Jeolgol Reservoir (Emergence and dominance of *Cosmarium* sp.)

현과 함께 남조류 (*Pseudanabaena* 속) 및 녹조류 (*Cosmarium*, *Micractinium*, *Nephrocytium*, *Scenedesmus* 속)도 증가세를 보였다. 8월에는 연간 조류 최대밀도가 기록되었으며, 이는 주로 *Cosmarium* 속 (8,396/ml)의 번성 때문이다(Fig. 6). 따라서 이들의 밀도가 증가된 것은 하절기 온도 및 태양광의 증가로 인한 것으로 추정된다.

한편 1월에는 연간 2번 째로 높은 조류 밀도를 기록하는데, 이때의 조류밀도는 2,730/ml로서 일부 규조류도 연간 최대 개체수를 기록하였으나, 전체조류 밀도 증가의 주된 원인은 *Cosmarium* 속이 1,038/ml을 기록하여 30%를 차지하였기 때문이다. 이때의 증가된 규조류와 *Cosmarium* 속은 2~3월에 감소하여, 4월 에는 소멸한다. *Cosmarium* 속의 통상적인 최적 온도는 21°C, 25 ~ 30°C로 알려져 있는데, 수심이 얇은 절골호소에서 수온 4°C(Table 6) 및 대기온도 - 11.9°C(Supplement Table S1)로서 연중 최저기온을 기록하는 1월에 우점도가 1,038/ml로서 38.03%를 차지하는 것은 *Cosmarium* 속이 저온 및 온도변화에 대한 유전적 적응성과 관련된 것으로 판단된다.

*Cosmarium* 속은 매우 특징적으로 자외선에 대한 내성, 태양광선의 과다한 광합성 스트레스로부터 내성을 가지는 능력이 있으며[56], 다른 조류에 비해 강한 광선에 내성이 진화적으로 확보되어 있음이 과학적으로 확인되고 있다[54, 55]. 내륙 기후대에 속하는 팔당수계에서 녹조 및 남조의 증식이 최대화되는 시기에도 특정 남녹조의 선택적 증가가 *Cosmarium* 속처럼 폭발적인 경우가 없었고, 절골저수지에서도 녹조/남조류들 중 *Cosmarium* 속만 급격히 증가하였으므로, 중위도에 속한 백령도일지라도 절골저수지에서는 극한적인 환경이 조성될수 있다는 것을 의미한다. 한반도의 담수환경에 있어 *Cosmarium* 속의 이러한 특징적이고 차별적 지리생태적 분포에 대해 국제학계에 보고된 바가 없어, 본 연구는 유의한 결과로 판단된다.

## 기상요인과의 관계

Figure 6에서는 절골저수지에서 평상시에는 균일하고 안정적인 군집조성을 보이다가, 특정 시기 (1월, 8월)에 특정 속(*Cosmarium*)의 집중도와 우점도가 극단적으로 상향하는 모습을 보여주며, 관련된 환경요인 소멸 후 빠른 속도로 감소하여 군집의 안정성이 높은 수치로 정상화 되는 모습을 보여주고 있다. 이러한 극단적인 군집변화는 기상 요인 및 그

영향 하에 있는 수질 요인이라기 보다 기후요인의 영향일 가능성이 크므로, 이러한 군집현상이 발생된 시기와 해당 시기의 기후요인(Supplement Table S1, S2)을 비교 분석하여 시간적 선후관계를 도출할 수 있다.

기상데이터 추이분석결과 백령도 환경은 이제까지 수서미생물학 관련된 학술자료들과 동일한 해양성기후의 특징을 보였다. 연간 강수량은 백령도가 한강수계 대비 하절기 (6, 8, 9월)에 집중되는 경향을 보였으며, 일최다 강우량은 백령도 131.6 mm로 서울 77.4 mm의 1.7배 이상을 보여 강우는 급작스럽고 집중되는 경향을 보였다. 평균풍속, 최대풍속, 최대순간풍속은 백령도가 서울과 동일하거나 최대 2.6배의 차이를 보였다. 평균기온은 백령도의 경우 - 1 ~ 23 °C 분포를, 서울은 이보다 넓은 - 2.4 °C ~ 28.4 °C의 분포를 보였다. 최고기온은 백령도 31.7 °C, 서울 33.7°C, 최저기온은 백령도 - 11.9°C 서울 - 18.6°C로서 해수의 비열로 인해 백령도 기온편차는 내륙대비 적다 (Supplement Table S1, S2).

일조 및 일사지표를 살펴보면, 서울과 백령도는 동일한 북위선(Table 1, Fig. 1)에 위치하지만 해양성 기후대에 속하는 백령도는 월누적 일조시간이 봄철과 겨울철에는 서울 대비 극히 낮고, 하절기에는 높다. 해당 시기 두 지점 간 강우량이 거의 없었던 것을 감안하면, 이는 해양성기후의 전형인 해무의 영향으로 판단된다. 반대로 하절기 백령도 일조시간이 한강수계 대비 긴 것은 해양성기후의 영향으로 단시간에 집중된 호우 때문일 것이다. 한편 연간 총 일조시간은 백령도 2229.3시간, 서울은 2190.1시간이며 단위면적당 연간 합계일사량은 백령도 5425.1 MJ/m<sup>2</sup> 서울은 5151.7 MJ/m<sup>2</sup>로서 절골저수지로 유입되거나 광합성에 의한 탄소고정을 유발하는 총 태양광 에너지량이 더욱 크다. 월별 합계일조시간, 월간 합계일사량은 봄철(12월, 1월, 2월, 3월, 7월, 11월, 12월) 백령도가 낮으나, 도출된 단위시간/면적당 일사량 (MJ/m<sup>2</sup>/hr)은 이와 반대로 12월, 1월, 2월 3월, 7월, 11월, 12월에 백령도가 서울 대비 월등히 높다. 특히 12월, 1월 백령도 1.885(MJ/m<sup>2</sup>/hr), 수도권 1.358(MJ/m<sup>2</sup>/hr)로서 백령도가 봄 및 겨울철 한강수계 대비 31~38% 강한 태양광에 노출되어 있고, 6월 또한 백령도가 수도권 대비 10% 이상 강하였다 (Supplement Table S1, S2). 이는 광스트레스에 대한 유전적 내성이 있는 *Cosmarium* 속의 생존과 번성에 호의적인 환경인자가 되었을 것이다.

Supplement Table S1. Weather data related to oceanic climates (continueud)

Date	Aver. Temp.(°C)		Aver. Max. Temp.(°C)		Aver. Min. Temp.(°C)		Max. Temp.(°C)		Min. Temp.(°C)		Total precipitation (mm)		Highest daily precipitation (mm)		Max. precipitation /hr (mm)		Aver. wind speed (m/s)		Max. wind speed (m/s)		Max. instantaneous wind speed (m/s)	
	Baeng nyeong	Seoul	Baeng nyeong	Seoul	Baeng nyeong	Seoul	Baeng nyeong	Seoul	Baeng nyeong	Seoul	Baeng nyeong	Seoul	Baeng nyeong	Seoul	Baeng nyeong	Seoul	Baeng nyeong	Baeng nyeong	Baeng nyeong	Baeng nyeong	Baeng nyeong	Baeng nyeong
Dec, 2020	2.4	- 0.3	4.9	3.9	0.1	- 4.2	10.5	11.4	- 10.0	- 12.9	9.1	4.6	3.6	2.9	-	5.3	2.2	15.6	6.5	23.1	11.7	
Jan, 2021	- 1	- 2.4	1.8	2.2	- 3.6	- 6.8	9.4	13.9	- 11.9	- 18.6	64.5	18.9	13.7	9.2	-	4.9	2.5	17.1	8.7	26.9	17.5	
Feb, 2021	2.1	2.7	5.6	7.9	- 1.0	- 2.2	12.9	17.4	- 9.1	- 10.6	4.6	7.1	1.8	3.4	-	5.2	2.6	16.4	7.5	23.6	15.8	
Mar, 2021	6.1	9.0	9.4	14.8	3.3	4.3	17.1	22.9	- 0.9	- 1.2	68.0	110.9	37.7	67.5	-	3.7	2.4	12.1	6.9	17.3	14.8	
Apr, 2021	10.9	14.2	14.8	19.5	7.9	9.5	20.2	28.2	4.6	3.1	67.1	124.1	41.5	56.2	9.6	11.5	4.0	2.6	13.8	7.1	20.4	12.5
May, 2021	14.5	17.1	18.3	21.9	10.8	12.8	23.1	30.8	6.1	7.3	67.3	183.1	14.4	66.9	5.9	11.3	3.8	2.4	12.7	8.4	22.9	16.0
Jun, 2021	18.7	22.8	22.5	27.6	15.9	18.9	27.1	31.6	12.3	13.3	178.5	104.6	131.6	38.2	19.4	37.7	2.9	2.2	12.3	7.8	18.5	15.0
Jul, 2021	24.0	28.1	27.4	32.2	21.2	24.6	31.7	36.5	17.5	19.6	39.7	168.3	32.3	67.4	8.6	65.7	2.8	2.0	9.6	7.4	16.4	16.5
Aug, 2021	23.6	25.9	26.5	29.7	21.3	22.8	28.8	33.7	18.2	18.1	346.4	211.2	81.1	77.4	38.6	27.9	2.7	2.1	10.0	8.3	16.2	16.4
Sep, 2021	21.4	22.6	24.1	26.9	19.1	18.8	26.7	30.3	15.6	16.0	164.4	131.0	42.1	68.1	26.1	27.1	3.4	2.3	14.1	7.1	21.9	12.5
Oct, 2021	16.1	15.6	18.7	20.5	13.6	11.6	24.2	28.8	6.2	1.3	60.7	57.0	32.9	14.2	17.9	12.7	4.1	2.1	16.0	10.6	24.3	20.9
Nov, 2021	10.2	8.2	13.5	13.1	7.3	4.0	19.5	21.3	1.4	- 3.7	46.2	62.4	18.7	27.2	0.5	4.9	2.1	18.3	9.3	26.1	16.6	
Dec, 2021	3.50	0.6	6.5	5.1	0.7	- 3.5	11.5	13.3	- 10.0	- 15.5	12.4	7.9	3.6	2.8	-	5.7	2.3	18.4	8.1	26.0	15.2	

Supplement Table S2. Weather data related to oceanic climates

Date	Monthly total daylight hours (hr)		Rate of sunlight / month (%)		Total solar radiation/month (MJ/m <sup>2</sup> )		Amount of solar radiation per sunlight hours per month(MJ/m <sup>2</sup> /hr)		Monthly total daily hour ratio (%)		Ratio of Total solar radiation per month (Baengnyeong/Seoul)*100 (%)		Ratio of solar radiation per time (Baengnyeong/Seoul)*100 (%)	
	Baeng nyeong	Seoul	Baeng nyeong	Seoul	Baeng nyeong	Seoul	Baeng nyeong	Seoul	Baeng nyeong	Seoul	Baeng nyeong	Seoul	Baeng nyeong	Seoul
Dec, 2020	111.1	203.6	37.4	68.2	209.4	276.4	1.9	1.4	54.6	75.8	138.8			
Jan, 2021	114.8	176.4	37.5	59.3	231.3	270.3	2.0	1.5	65.1	85.6	131.5			
Feb, 2021	176.4	181.0	58.3	59.7	345.4	348.6	2.0	1.9	97.5	99.1	101.7			
Mar, 2021	205.2	213.0	55.3	57.4	485.2	476.9	2.4	2.2	96.3	101.7	105.6			
Apr, 2021	238.5	208.6	60.2	52.7	601.5	558.3	2.5	2.7	114.3	107.7	94.2			
May, 2021	248.8	203.7	56.4	46.3	682.2	570.5	2.7	2.8	122.1	119.6	97.9			
Jun, 2021	173.3	185.5	39.1	42.0	577.3	563.4	3.3	3.0	93.4	102.5	109.7			
Jul, 2021	242.3	195.2	53.9	43.5	649.8	578.3	2.7	3.0	124.1	112.4	90.5			
Aug, 2021	175.6	127.3	41.6	30.2	505.3	428.9	2.9	3.4	137.9	117.8	85.4			
Sep, 2021	211.8	182.0	56.8	48.8	504.8	474.1	2.4	2.6	116.4	106.5	91.5			
Oct, 2021	193.4	168.4	55.7	48.4	393.7	353.6	2.0	2.1	114.8	111.3	96.9			
Nov, 2021	129.2	163.6	42.4	53.6	238.0	271.6	1.8	1.7	79.0	87.6	110.9			
Dec, 2021	120.0	185.4	40.4	62.1	210.8	257.3	1.8	1.4	64.7	81.9	126.6			

또한 이후 7월에는 월별 합계일조시간이 백령도가 한강수계 대비 24% 이상, 합계일사량은 17% 이상 높아 이러한 요인들이 6월에 생태학적으로 유리한 위치에 있던 *Cosmarium*의 8월 초 대증식을 유발하였을 것으로 판단된다.

한편 8월에는 백령도의 연간 강우량이 극도로 집중되는 시기로서 월 누적량 364 mm를 기록하고, 이에 따라 일조량이 급감되어 일조관련 기상지표들이 모두 감소하여 9월 초 녹조류 감소로 이어졌을 것으로 판단된다. 따라서 절골저수지의 조류군집은 해양성 기후기상의 영향에 크게 노출되어 있고, 대번성과 소멸이 매우 단시간 내에 진행되는 것 또한(Fig. 6) 해양성 기후 특유의 급격한 기상변화에 따른 것으로 판단된다. 일조지표 증가 시 녹조류도 일부 증가하였으나 (*Haematococcus* 301/ml, *Mougeotia* 65/ml, *Pediastrum* 100/ml), *Cosmarium* 속의 우점도에 비해 유의적인 수치가 아니며, 제한된 수서생태계에서 *Cosmarium* 속이 녹조류 간 생태학적 경쟁 관계에서 우위를 차지하였다.

이처럼 해양도서 담수권에서는 극한적 환경요인 그 자체에 더해 환경요인 변화가 극심하고 급격한 것 또한 해양도서 자생미생물 군집변화에 환경스트레스 및 그로인한 자연선택압의 원인이 된다. 국내 외적으로 수서미생물상의 계절적 변화에 대한 연구가 다수 이루어지는데, 본 연구의 사례처럼 해양 담

수권에서의 수서미생물상 천이가 급격히 발생하는 것을 감안할 때 계절적 추이보다는 월별 추이와 같은 조금 더 조밀한 간격의 조사가 필요할 것이다.

### 수질요인과의 관계

조류증식을 유발하는 수질인자인 총인(total phosphorus; T-P), 총질소(total nitrogen; T-N)의 정량분석 결과와 조류증식간의 관계를 분석하고, 기후요인과 관련하여 하절기 국지성 호우로 인한 주변 토양으로부터의 인과 질소성분 저수지 유입을 판단하였다. 또한 조류활동과 관련된 수질요인인 BOD, TOC, chlorophyll-a, 탁도의 변동을 분석하였다(Table 6, 7).

T-P 연간 분포는 ND ~ 0.017 mg/l 범위이며, 하절기 최대강우량이 기록된 8월 0.008 mg/l, 9월 0.010 mg/l 이다. T-N 연간 분포는 0.633 mg/l ~ 1.302 mg/l 이며, 역시 집중호우 기간 이후 1.000 mg/l 이하의 값을 보였고, 강우량이 최저를 기록한 시기이면서 농업 활동이 이루어지지 않는 1월에 최대치인 1.302 mg/l 를 기록하였으므로 주변의 농토에서 호소수 내로 과량의 질소와 인이 흘러든다는 징후가 없다.

한편 리비히의 법칙에 의해 조류증식을 위한 탄소-질소-인의 비율은 통상 106:16:1이며, 부영양화를 유발하는 인의 농도는 0.020 ~ 0.030 mg/l 이상이 되어야 하지만[18] 절골저수지 T-P 농도는 1년 내내 그 이하를 유지했다. 질소/인 비율 또한 1년 내내 16

Table 6. Water quality factor of the Jeolgol Reservoir

	Water temp(°C)	BOD (mg/l)	DO (mg/l)	T-P (mg/l)	T-N (mg/l)	Chlorophyll-a (mg/m <sup>3</sup> )	Turbidity (NTU)	Chloride (mg/l)	Fe (mg/l)	Boron (mg/l)	TOC (mg/l)
Jan, 2021	4.0	2.3	13.0	0.017	1.302	10.1	2.14	43.6	0.36	0.02	8.57
Feb, 2021	6.0	2.3	10.5	0.013	1.095	3.8	1.14	43.5	0.44	0.02	7.64
Mar, 2021	8.0	1.1	10.5	0.013	1.093	2.0	1.03	43.6	0.39	0.02	6.79
Apr, 2021	11.0	1.0	11.1	0.003	0.949	1.5	0.83	41.3	0.22	0.03	6.80
May, 2021	15.0	1.5	10.2	0.009	1.254	1.9	0.84	43.3	0.10	0.03	6.70
Jun, 2021	19.0	2.3	8.5	ND	0.774	3.8	1.48	43.9	ND	0.02	6.31
Jul, 2021	24.0	2.0	9.4	0.011	1.116	0.6	2.06	42.4	ND	0.02	7.84
Aug, 2021	28.0	3.8	8.7	0.008	0.654	3.1	7.71	44.3	0.33	0.03	8.80
Sep, 2021	26.0	1.4	7.2	0.010	0.885	10.4	2.83	37.5	0.13	0.03	7.46
Oct, 2021	24.5	2.5	7.9	0.011	0.633	9.3	4.27	36.4	0.17	0.03	7.05
Nov, 2021	18.5	1.6	8.0	0.008	0.847	2.1	0.94	37.5	0.47	0.03	6.17
Dec, 2021	11.0	3.6	11.1	0.011	0.931	4.0	1.95	39.4	1.27	0.03	7.09

Table 7. Water quality factor of the Paldang reservoir

	Water temp(°C)	BOD (mg/l)	DO (mg/l)	T-P (mg/l)	T-N (mg/l)	Chlorophyll-a (mg/m <sup>3</sup> )	Turbidity (NTU)	Chloride (mg/l)	Fe (mg/l)	Boron (mg/l)	TOC (mg/l)
Jan, 2021	1.9	1.6	14.0	0.016	2.416	7.6	2.25	15.3	ND	0.01	1.42
Feb, 2021	2.3	1.4	13.8	0.017	2.253	11.7	2.82	17.0	0.08	0.01	1.24
Mar, 2021	4.3	1.9	13.0	0.010	2.461	17.0	5.57	25.0	0.15	0.01	1.84
Apr, 2021	10.9	1.3	11.8	0.001	1.856	9.7	3.28	17.0	0.07	0.02	1.57
May, 2021	15.8	1.2	10.8	0.013	1.894	4.4	2.95	17.0	0.10	0.01	2.07
Jun, 2021	21.2	1.8	10.2	0.016	2.061	20.4	3.72	17.0	0.09	0.01	2.48
Jul, 2021	22.8	1.3	8.6	0.012	1.761	9.0	3.91	15.0	0.14	0.01	2.27
Aug, 2021	27.9	1.1	7.6	0.012	1.934	2.2	3.58	14.0	0.17	0.02	1.73
Sep, 2021	22.5	0.7	7.5	0.031	1.885	10.2	8.10	13.0	0.24	0.02	3.42
Oct, 2021	23.5	2.1	9.3	0.021	1.868	11.7	2.25	16.0	0.07	0.02	2.53
Nov, 2021	15.4	1.8	10.3	0.005	1.861	10.1	2.14	15.0	0.09	0.02	1.90
Dec, 2021	7.7	1.4	11.7	0.006	2.010	11.4	3.18	22.0	0.16	0.02	1.89

이상을 유지하였으므로 인이 조류증식의 제한요소이다. 따라서 저온, 온도변화 및 일사량 이외에도 제한된 영양인자로 인해 녹조류 간의 종간 경쟁과 *Cosmarium* 속의 선택적 우점이 발생하였을 것으로 판단된다.

Chlorophyll-a 연간농도는 0.3 ~ 10.4 mg/m<sup>3</sup>의 분포를 보였으며 *Cosmarium* 속의 대변성 및 소멸시작 시점인 1월(10.1 mg/m<sup>3</sup>)과 9월(10.4 mg/m<sup>3</sup>)에 연간 최대농도를 기록했고 그 외 시점에서는 낮은 수치를 보였다. TOC 연간농도는 6.17 ~ 8.80 mg/l의 분포를 보이면서 *Cosmarium* 대변성 시점인 1월(8.57 mg/l), 8월(8.8 mg/l) 최대값을 기록했고, 그 외 시점에는 급감했다. 탁도 연간농도는 0.83 ~ 7.71 NTU의 분포를 보였으며, *Cosmarium* 대변성 시점인 1월 (2.14 NTU), 8월 (7.71 NTU)에 최대값을 나타냈다. 한편 총인, 총질소와 TOC 값의 대수적 관련성이 낮았다. 이처럼 녹조류의 활동을 통한 빈영양 호소수 TOC의 증가는 국내외 적으로 지속 보고되어왔다[1, 20]. 한편 BOD 연간농도는 1.0 ~ 3.8mg/l의 분포를 보였으며, *Cosmarium* 대변성 기간 1월(2.3 mg/l), 8월(3.8 mg/l)에 최대값이 도출되었다. 녹조류는 광합성 미생물로서, BOD 측정조건(암소, 20°C, 5일간)을 야간으로 인식하여 용존산소와 유기탄소를 소모하므로 녹조의 최대밀도 시점에서 가장 높게 측정된 것으로 판단된다.

결론적으로 2021년 질소/인의 함량은 1년 내내 빈

약하고, 하절기 국지성 집중호우로 주변 농경지에서 유입가능성도 낮으며, TOC 함량은 팔당수계 대비 3배 이상 높은 것은 해양성 기후로서 높은 일사량 지표들에 의해 태양 에너지가 녹조류 탄소동화작용(CO<sub>2</sub> assimilation)을 통해 그대로 호소수에 유기탄소의 형태로 축적이 되고 있다는 것을 의미한다. 특히 1월과 같이 최저기온이 -11.9°C 까지 떨어지는 상황에서 호수면은 동결하였을 가능성이 높고, 그럼에도 불구하고 *Cosmarium* 속은 저온내성을 바탕으로 타 녹조와의 경쟁에서 우위를 차지하면서 호수에 제한된 질소, 인을 독식하고 광합성을 하면서 총유기탄소를 방출하였을 것이다.

### 기후변화에 따른 조류군집 및 수질변화 예측

백령도는 최근 10년 내 연간 최대 100일까지 해무가 발생하는 것으로 보고되고 있으며, 해양성 기후에만 해당하는 특이한 기상현상으로서 수륙 기온차, 낮과 밤의 온도차, 습도 분포, 해수면 변화, 계절풍, 황사 등 다양한 기상요인이 복합적으로 작용하여 생성되는 것으로 그 예측이 일반적인 기상요인에 비해 매우 까다롭다[32]. 내륙의 한강수계가 통과하는 서울 지역은 연간 안개 발생일수가 2021년 4일, 2022년 5일, 2023년 7일을 기록했으나, 백령도는 각각 65일, 85일, 86일로서 발생일수가 10배 이상이며(Fig. 7), 따라서 절골저수지 조류증식의 원동력이 되는 일사

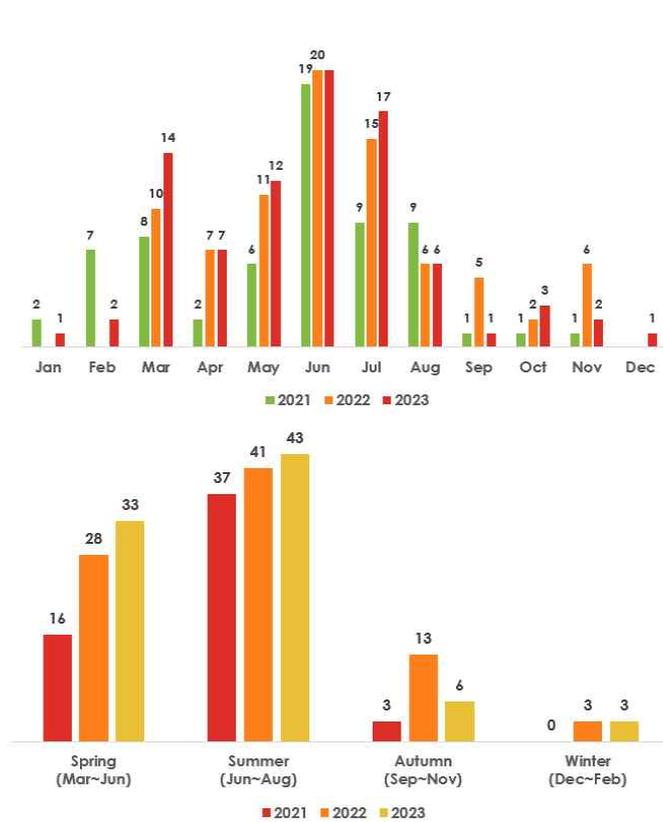


Fig. 7. Variation of sea-fog occurrence according to climate change around the Baeknyeong islands (2021~2023), the Data were obtained from KMA websites (data.kma.go.kr/data) and it was reconstructed for this study

지표에 해무가 미치는 영향은 지대하다.

해무는 해상에 부유하는 염분입자가 중심핵으로 작용하여 주변 수분을 포집하여 발생하는 것으로, 내륙에서는 대기 중 수분이 포화상태에서만 발생하지만 해양성 기후에서는 염분의 역할로 인해 습도가 80%만 되어도 해무가 형성된다[23]. 이때문에 해무는 도서지역 및 해안지대로 대량의 염분 침투를 촉발하며, 이로 인해 통상 해안 고등식생은 염생식물 위주의 분포를 보이며, 절골저수지 (중화동) 또한 인우점식생으로서 염분 내성을 가지면서 내륙방향의 인구정주지역으로 염분침투 방지 역할을 수행하는 *Pinus thunbergii*이 우점한다[22].

최근 3년간 백령도의 해무 발생 상황을 고찰하면 2021년 동절기인 2020년 12월 (0일), 2021년 1월 (2일) 해무일수는 최저를 기록하다가 점차 증가하여 6월에는 최고일수(19일)를 기록하고 그 이후 7~10월에 걸쳐 급감하면서 7월에 합계일조시간이 최대에

달한다(Fig. 7). 이는 시간적 선후관계로서 2021년 1월, 8월의 *Cosmarium* 대변성과 일치한다. 한편 2022년도에는 이러한 패턴이 더욱 심화되어 동절기에는 해무발생이 없으나 봄철 2021년 대비 급증하고, 7~10월 해무일수도 2021년 대비 급증하였으며, 2023년도 에도 증가세는 계속된다. 결과적으로 최근 3년간 해무의 발생은 사계절 각각에 대해 모두 증가하여 왔다(Fig. 7). 한편 수질요인 (Table 6, 7)을 살펴보면 절골저수지의 염소이온 및 붕소의 측정값이 한강 대비 2~3배 높은 수치를 보였다. 특히 연중 해무발생이 급감하는 9~12월에 이르러 염소이온의 농도가 40 mg/l 이하로 감소하는 것은 이는 동일한 담수권임에도 불구하고 절골저수지 내로 해무로 인한 해수성분의 유입이 지속되고 있을 가능성이 높은 것으로서, 기후변화에 의한 수질변화를 지속적으로 모니터링할 필요가 있을 것이다.

2011년 수행된 「지구온난화에 대한 한반도 연안 환경 기상변화 연구」 [32])를 고찰하면 서해안 수면 온도 및 수면깊이는 지속 상승하고 강우량 및 해무일수도 증가할 것으로 예측한다. 1990년대 대비 2000년대에 해무일수가 뚜렷이 증가했고, 이는 미래에도 계속될 것으로 예측한다. 2021~2023년 백령도 해무발생 일수가 극적으로 증가한 것(Fig. 7)이 이러한 기후변화의 결과인지 본 연구가 입증할 수는 없다. 그러나 해안지역에서 해무일수 증가는 상기 연구로서 예측된 기후변화의 전반적인 흐름과 동일한 것으로, 2021년부터 절골저수지 대상 조류군집 구조와 일조지표, 해무발생 현황을 연관해석하여 기후변화로 인한 장기적인 절골저수지 조류군집 변화를 예측할 수 있을 것이다. 최근 기후변화로 인한 해무관련사고 증가에 대응하기 위해 해무예측예보시스템이 개발되고 있어 관련 연구가 용이할 수 있을 것으로 사료된다.

부가적으로, 본 연구가 구명한 바와 같이 절골저수지 주요 수질인자는 조류군집이 주도하는 정도가 크므로, 기후변화 해무발생에 따른 장기적인 수질요인의 변동도 어느 정도 예측할 수 있을 것이다. 2021년 이후 해무로 인한 일사지표 감소는 조류군집에서 특정 속의 우점도를 낮추고 균등도를 증가시킬 것이

며, 일반적으로 알려진 녹조의 증가 시기에 탁도, TOC, BOD, Chlorophyll-a 증가폭은 서서히 감소할 것으로 예상된다. 또한 염분을 다량 함유한 해수의 증가는 호소수 내로의 해수성분(즉, 염소이온 혹은 붕소) 유입을 증가시킬 것으로 예상되고, 이는 해양성 기후의 변화로 인해 해양 담수원의 관리에 있어 현재와는 어느 정도 차별화된 전략이 필요할 것임을 암시한다.

### 지질요인과의 관계

한반도의 수서미생물상 연구들에서 지질조성, 토양성상과 미생물상의 연관성에 대해 지속적으로 보고되고 있다[35, 36, 40, 41, 43, 44]. 백령도는 국가지질공원으로 지정되어 있고 이를 기반으로 2024년 현재 UNESCO 세계자연유산 등재를 목표로 하고 있으므로 백령도의 천연 지질상태를 자연그대로 보전하도록 노력하고 있다. 이 때문에 미래 절골저수지 수환경 및 조류군집의 관리 필요성이 부각될 경우에 대비해 절골저수지를 둘러싼 지질사적 배경을 검토하고 이를 중심으로 한 수질모니터링을 병행해야 한다. 과거 절골저수지 저서 환경영향평가 연구에서 저서 퇴적토가 호소수의 수질 특히 철, 색도에 큰 영향을 준다고 평가되었으며, 이러한 퇴적토의 유래가 되는 모암은 백령도 고유의 지질구조로부터 비롯된 것으로 추정하였다[46]. 그 이후 지질에 대한 별도의 연구는 이루어지지 않다가, 최근 UNESCO 세계자연유산 등재를 위해 백령도 지질조사를 체계적으로 실시하고 국제학계[8]에 보고되었다. 이에 앞서 한국지질자원연구원에서는 2021년 백령도를 포함한 국가차원 지질조사를 실시했으며, 이에 따르면 절골저수지가 위치한 백령도 서남쪽 지점은 선캄브리아대 중화동층이 분포하는 곳으로[17], 세일(silt)과 이암으로 구성되며 얇은 엽리(엽층)가 반복되므로 경도가 낮고 표면 타포니가 발달해 있다. 타포니는 해양성 기후대에 위치한 퇴적암에 해수의 염분이 결정화하면서 그 영향으로 철분과 같은 광물이 빠져나가 확장되는 구멍이며, 금속 부식흔이 남는다. 한편 저수지 일대에서는 중화동층을 구성하는 암석인 고철질암이 관찰(Mg, Fe를 높은 밀도로 포함)되고

있다[17].

절골저수지에서 동쪽인 중화포구 방향으로 전진할 경우 현무암 대지가 분포하며[10] 지질사적 요인으로 인해 형성된 신생대 후기 현무암 지질은 silicate, Mg, Ca, Fe를 고함량으로 포함한다. 현무암들은 빈영양 환경에서도 육상 및 수상 식물계의 생장을 촉진하여 전통적 무기비료로 사용해 왔다[27]. 또한 대기중 이산화탄소를 흡수해 탄산염으로 고정하면서[5] 이들을 식물생장을 위한 탄소원으로 제공하기도 한다[11, 16]. Silicate는 인위적으로 건설된 담수호에서 규조류의 번성을 촉진하며[12] Mg 및 Ca는 광합성에 필요한 엽록소 구성 분자이다.

해양도서 식수용 저수지의 해외 연구사례를 고찰하면, 해양성 기후로 인해 지질구조로부터 비인위적 중금속(Zn, Al, Co, Ti, Fe, Si) 유입량 증가가 유발되며, 이로 인해 탁도 증가 및 광합성 억제를 유발하고, 봄철 해빙으로 인해 이러한 현상이 가속화되며, 이로 인해 봄철 규조류의 극적인 증가로 이어진다고 보고되었다[12]. 그간의 한반도 해양 도서 미생물상 연구 결과를 고찰하면, 본토에서 멀리 떨어진 다수의 해양도가 화산활동 및 그로 인한 용기로 형성되었으며 백령도의 경우에도 얇은 해저의 퇴적층이 용기되어 형성된 자연사를 가진다. 2021년 연간 절골저수지 수중 철 농도는 최대 1.27 mg/l의 값을 보였는데(Table 6), 추후 지질사적 요인과의 관련성을 분석할 필요가 있다.

### 결론

본 연구에서는 기후변화 대비 다양한 담수자원 확보 및 조류군집 관리를 위해 기존 내륙 수계와 한반도 해양도서에 위치한 절골저수지의 조류군집 구조를 비교분석하였으며, 이를 통해 기존 내륙 수계 대비 조류관리 상의 강점을 도출하였다. 또한 담수자원 확보의 측면에서 절골저수지 조류군집에 미치는 기상, 기후, 수질, 지질요인을 파악하고, 미래 기후변화에 따른 영향까지 파악하고자 하였다. 해양담수권은 복잡한 전이지대로서 내륙 수계 대비 출현종은 다양하였고, 군집다양성 지수는 높았으며, 특정 분류군의 우점도는 낮게 유지되어 군집의 안정성이 내

륙 수계 대비 매우 높았다. 따라서 내륙 수계 처럼 댐 방류, 수중보에 의한 물리적 교란과 같은 인위적 물리적 조절기전이 없다는 것은 해양 호소수의 약점이지만, 복잡한 전이지대로서 해양도서에 위치한 호소수는 다양한 조류 속 간의 복잡한 상호작용을 바탕으로 군집의 안정성이 올라가므로 추후 기후변화로 인한 별도의 조류억제 방안 적용시 그 효과가 높을 것으로 예상된다. 한편 이러한 과정에서 본 연구에서 도출된 다양성 통계수치는 미래 조류통제 방안 적용시 효과성 판단의 정량적 지표를 제공할 것이다.

해양도서로서 절골저수지는 해양성기후의 영향을 받으며, 해안지대 특유의 일사지표 증가시기(1, 8월)에 조류군집에 강한 자연선택압을 가해 광스트레스 및 온도변화에 유전적 내성이 확보된 *Cosmarium* 속의 선택적 우점을 유도하였으며, 이러한 군집구조는 주요 수질지표의 변화에 지대한 영향을 미치고 있다. 절골저수지는 연중 빈영양 상태를 유지하였으며, 인이 조류증식의 제한요인이다. 거친 해양성 기후 및 그로인한 집중호우로 질소, 인의 토양유출 징후는 없었으며, 해무로 인한 해수성분 침투가 수질인자에 영향을 미치고 있다. 한편 기후변화의 일환으로 2021년 ~2023년 해무일수의 급격한 증가로 인해 절골저수지 조류군집의 변화가 예상되며, 그에 따라 수질인자도 변화할 것으로 예상되어 2021년부터 절골저수지 조류군집 및 기후기상 요인의 연관분석 연구가 필요하다.

조류군집 상태를 정량화된 수치로 구현되는 다양성 지수는 조류관리에 있어 제한된 행정자원을 배분하고, 미래 적용될 조류통제 기법의 효과를 평가하는 등 과학적 의사결정을 지원하는 지표의 하나로 사용될 수 있을 것이다. 부가적으로 기후변화에 대비하여 한반도 자생식물상 및 미생물과의 상호작용에 대하여 국가차원의 모니터링이 이루어지고 있는데, 조류는 기본적으로 단세포 특성을 가지므로 그들의 군집구조는 기후변화에 의한 영향을 빠르고 민감하게 반영할 것으로 생각된다. 조류군집에 대한 모니터링을 바탕으로 추후 기후변화가 식생환경에 어떠한 영향을 미칠지 추론할 수 있을 것이다.

## 참고문헌

1. Bade, D.L., Carpenter, S.R., Cole, J.J., Pace, M.L., Kritzbeg, E., Van de Bogert, M.C., Cory, R.M. and McKnight, D.M. 2007. Sources and fates of dissolved organic carbon in lakes as determined by whole-lake carbon isotope additions. *Biogeochemistry* **84**, 115 - 129.
2. Bae, Y.J., Cho, K.J., Min, G.S., Kim, B.J., Hyun, J.O., Lee, J.H., Lee, H.B., Yoon, J.H., Hwang, J.M. and Yum, J.H. 2021. Review of the Korean indigenous species investigation project (2006-2020) by the National Institute of Biological Resources under the Ministry of Environment, Republic of Korea. *Korean J. Environ. Biol.* **39(1)**, 119 - 135.
3. Baek, S.H., Son, M., Kim, Y.O., Cho, H., Chung, I.K. and Park, B.S. 2019. Can algicide (the thiazolidinedione derivative TD49) truly contribute to the restoration of microbial communities? *Environ. Res.* **173**, 517 - 527.
4. Baird, R.B., Eaton, A.D. and Rice, E.W. 2015. Standard methods for the examination of water & wastewater (21st ed), Washington, DC: American Public Health Association, American Water Works Association.
5. Beerling, D.J., Kantzas, E.P., Lomas, M.R., Wade, P., Eufrazio, R.M., Renforth, P., Sarkar, B., Andrews, M.G., James, R.H., Pearce, C.R., Mercure, J.F., Pollitt, H., Holden, P.B., Edwards, N.R., Khanna, M., Koh, L., Quegan, S., Pidgeon, N.F., Janssens, I.A., Hansen, J. and Banwart, S.A. 2020. Potential for large-scale CO<sub>2</sub> removal via enhanced rock weathering with croplands. *Nature* **583(7815)**, 242 - 248.
6. Byun, J.H., Joo, J.H., Kim, B.H. and Han, M.S. 2015. Application possibility of naphthoquinone derivative Nq 4-6 for mitigation of winter Diatom bloom. *Ecol. Resil. Infrastruct.* **2(3)**, 224 - 236.
7. Cheng, K., Zhao, K., Zhang, R. and Guo, J. 2024. Progress on control of harmful algae by sustained-release technology of allelochemical: A review. *Sci Total Environ.* **918**, 170364.
8. Cho, D.L., Peng, P., Lee, S.H., Park, J.Y., Seo, I., Sun, F., Li, Q. and Zhang, Y. 2023. Identify vestiges of large igneous provinces in deep time: A 0.9 Ga case from North China (Sino-Korean) craton. *Precambrian Res.* **398**, 107220.
9. Choi, B.M., Son, M.S., Kim, J.I. and Shin, W.G. 2013.

- Taxonomy and phylogeny of the genus *Cryptomonas* (Cryptophyceae, Cryptophyta) from Korea. *Algae*. **28(4)**, 307 - 330.
10. Choi, S.H. 2022. Mantle source lithologies of late cenozoic basaltic rocks and two varieties of enriched mantle in the Korean Peninsula. *Korean J. Mineral. Petrol.* **35(3)**, 183 - 197.
11. Edwards, D.P., Lim, F., James, R.H., Pearce, C.R., Scholes, J., Freckleton, R.P. and Beerling, D.J. 2017. Climate change mitigation: potential benefits and pitfalls of enhanced rock weathering in tropical agriculture. *Biol Lett.* **13(4)**, 20160715.
12. Eiriksdottir, E.S., Oelkers, E.H., Hardardottir, J. and Gislason, S.R. 2017. The impact of damming on riverine fluxes to the ocean: A case study from Eastern Iceland. *Water Res.* **15(113)**, 124-138.
13. ISO technical committee. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. (3rd ed). Washington DC: American National Standards Institute; 2017.
14. Joo, J.H., Park, B.S., Kim, S.H. and Han, M.S. 2020. Superiority comparison of biologically derived algicidal substances (naphthoquinone derivative) with other optional agents using microcosm experiments. *Korean J. Environ. Biol.* **38(1)**, 114 - 126.
15. Joo, J.H., Park, C.S., Choi, H.J., Lee, H.W. and Han, M.S. 2017. A field application feasibility of biologically derived substances (Naphthoquinone Derivate: NQ 2-0) for the mitigation of harmful cyanobacterial blooms. *Ecol. Resil. Infrastruct.* **4(3)**, 130 - 141.
16. Kelland, M.E., Wade, P.W., Lewis, A.L. Taylor, L.L., Sarkar, B., Andrews, M.G., Lomas, M.R., Cotton, T.E.A., Kemp, S.J., James, R.H., Pearce, C.R., Hartley, S.E., Hodson, M.E., Leake, J.R., Banwart, S.A. and Beerling, D.J. 2020. Increased yield and CO<sub>2</sub> sequestration potential with the C4 cereal *Sorghum bicolor* cultivated in basaltic rock dust-amended agricultural soil. *Glob. Chang. Biol.* **26(6)**, 3658 - 3676.
17. KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources). 2021. Geological survey in the Korean Peninsula and publication of the geological maps.
18. Kim, B.C., Sa, S.H. and Lee, Y.K. 2007. The limiting nutrient of eutrophication in reservoirs of Korea and the suggestion of a reinforced phosphorus standard for sewage treatment effluent. *J. Korean Soc. Water Environ.* **23(4)**, 512-517.
19. Kim, B.H., Choi, J.Y., Hwang, S.J. and Han, M.S. 2004. Influences of nutrient deficiency on the phytoplankton community in Pal'tang reservoir, Korea. *Korean J. Limnol.* **37(1)**, 47 - 56.
20. Kim, J.W. and Cho, Y.G. 2021. A study on the short-term water quality change in the lower Yeongsan River. *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy.* **24(2)**, 72-79.
21. Kim, K.D., Heo, M.K. and Seo, Y.C. 2006. Evaluation of manual and automated methods in total nitrogen (TN) and Total Phosphorus (TP) Analysis (1) - TN Analysis. *J. Environ. Anal. Health. Toxicol.* **9(3)**, 199-207.
22. Kim, T.W. 1992. Floristic study of Baekryong and Yeonpyong Island within Ongjin Gun, Kyonggi Province. *Seoul National Univ. Col. of Agric. Rec.* **12**, 30-46.
23. KMA (Korea Meteorological Administration). 2015. Analyzing major fog cases to understand fog analysis techniques and forecasting methods. Hands-on Weather forecasting technology 27:1-24([https://www.kma.go.kr/down/e-learning/hands/hands\\_36.pdf](https://www.kma.go.kr/down/e-learning/hands/hands_36.pdf)).
24. Kong, W.S and David, W. 1993. The plant geography of Korea with an emphasis on the alpine zones. In *Geobotany*, Springer: New York, NY, USA, 1993.
25. Lambshead, P.J.D., Platt, H.M. and 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.
26. Lee, H., Lee, D.W., Kwon, S.L., Heo, Y.M., Jang, S., Kwon, B.O., Khim, J.S., Kim, G.H. and Kim, J.J. 2019. Importance of functional diversity in assessing the recovery of the microbial community after the Hebei Spirit oil spill in Korea. *Environ. Int.* **128**, 89-94.
27. Lewis, A.L., Sarkar, B., Wade, P., Kemp, S.J., Hodson, M.E., Taylor, L.L., Yeong, K.L., Davies, K., Nelson, P.N., Bird, M.I., Kantola, I.B., Masters, M.D., DeLucia, E., Leake, J.R., Banwart, S.A. and Beerling, D.J. 2021. Effects of mineralogy, chemistry and physical properties of basalts on carbon capture potential and plant-nutrient element release via enhanced weathering. *Appl. Geochem.* **132**, 105023.
28. Li, J., Hou, L., Zhang, G., Cheng, L. and Liu, Y. 2024. Comparative analysis of rhizosphere and endosphere fungal communities in healthy and diseased Faba Bean plants.

- J. Fungi*. **10(1)**, 84.
29. Margalef, R. 1958. Information theory in ecology. *Gen. Syst.* **3**, 36 - 71.
  30. Mendes, R.S., Evangelista, L.R., Thomaz, S.M., Agostinho, A.A. and Gomes, L.C. 2008. Unified index to measure ecological diversity and species rarity. *Ecography* **31**, 450 - 456.
  31. Mengistu, A.A. 2022. Endophytes: Colonization, behaviour, and their role in defense mechanism. *Int. J. Microbiol.* **22**, 6927219.
  32. MOE (Ministry of Environment), Republic of Korea. 2011. Settlement of Global and International Environmental Issue: R&D on Impact Analysis and Quantitative Prediction Technology for Coastal Environment & Meteorology with Global Warming.
  33. MOE (Ministry of Environment), Republic of Korea. 2020. Environmental testing and inspection act (Act No. 17326).
  34. Møller, T.E., van der Bilt, W.G.M., Roerdink, D.L. and Jørgensen, S.L. 2020. Microbial community structure in arctic lake sediments reflect variations in Holocene Climate conditions. *Front. Microbiol.* **24(11)**, 1520.
  35. NIBR(National Institute of Biological Resources). 2017a. Establishment of infrastructure for securing soil microbial diversity information (1). Microorganism Resources Division, Biological Resources Research Department.
  36. NIBR(National Institute of Biological Resources). 2017b. Microbial community analysis and culture collection from animal and plant in Dokdo (1). Biological Resources Utilization Department.
  37. NIE(National Institute of Environmental, Republic of Korea). 2009. Research on coastal landscape and the conservational strategy (27 - 29), Ministry of Environment: Sejong, Republic of Korea.
  38. Oshun, M.I. and Grantham, T.E. 2023. Leveraging species richness and ecological condition indices to guide systematic conservation planning. *J Environ. Manage.* **1(341)**, 117970.
  39. Ouyang, Y., Wan, Y., Jin, W., Leininger, T.D., Feng, G. and Han, Y. 2021 Impact of climate change on groundwater resource in a region with a fast depletion rate: the Mississippi Embayment. *J. Water Clim. Chang.* **12(6)**, 2245 - 2255.
  40. Park, J.M., Hong, J.W., Lee, W., Lee, B.H. and You, Y.H. 2020. Fungal clusters and their uniqueness in geographically segregated wetlands: A step forward to marsh conservation for a wealth of future fungal resources. *Mycobiology.* **48(5)**, 351 - 363.
  41. Park, J.M., Hong, J.W., Lee, W., Lee, B.H. and You, Y.H. 2021a. Geographical isolation and root-associated fungi in the marine terrains: A step toward establishing a strategy for acquiring unique microbial resources. *Mycobiology.* **49(3)**, 235 - 248.
  42. Park, J.M., Hong, J.W., Son, J.S., Hwang, Y.J., Cho, H.M., You, Y.H. and Ghim, S.Y. 2018. A strategy for securing unique microbial resources – Focusing on Dokdo islands-derived microbial resources. *Isr. J. Ecol. Evol.* **64**, 1 - 15.
  43. Park, J.M., Hong, J.W., You, Y.H. and Kim, J.G. 2021b. Endophytic fungi of emersed halophytes in river deltas and tidal flats of the Korean Ramsar wetlands. *J. Mar. Sci. Eng.* **9(4)**, 430.
  44. Park, J.M., Kwak, T.W., Hong, J.W. and You, Y.H. 2023a. Root-Layer fungi native to four volcanic topographies on conserved ocean islands: another clue to facilitate access to newer natural microbial resources in the extreme terrains. *Sustainability.* **15(17)**, 12824.
  45. Park, J.M. and You, Y.H. 2023b. Culturable endophyte fungi of the well-conserved coastal dune vegetation located on the East coast of the Korean peninsula. *J. Mar. Sci. Eng.* **11(4)**, 734
  46. Park, S.H., Park, W.S., Kim, C.H., Park, J.G., Kim, W.H., Chang, Y.Y., Jeong, J.H. and Lee, S.Y. 2010. Impact of the geochemical characteristics and potential contaminants source of surrounding soil on contamination of a reservoir in an island (I) - evaluation of potential liquation by sediment. *J EIA.* **19**, 2010-04.
  47. Rossati, A. 2017. Global warming and its health impact. *Int. J. Occup. Environ. Med.* **8(1)**, 7 - 20.
  48. Schoen, S. 1988. Cell counting, In Experimental phycology a laboratory manual, Christopher, S. L., David, J. C. and Bruno
  49. Seo, Y.C., Heo, M.K., Choe, S.H., Song, K.B. and Kim, K.D. 2007. Evaluation of manual and automated methods in total nitrogen and total phosphorus Analysis(2)- TP analysis. *J. Environ. Anal. Health Toxicol.* **10(1)**, 29 - 36
  50. Shin, J.K., Lee, H.S., Hur, J. and Park, J.C. 2006.

- Eutrophication and freshwater red-tide algae on early impoundment stage of Jeolgol Reservoir in the Paikryeong island, West Sea of South Korea. *Korean J. Limnol.* **39(2)**, 271 - 283.
51. Shin, Y.K. 2013. A ecological study of phytoplankton community in the Geum River Estuary. *KJEE* **46(4)**, 524-540.
52. Smith, R.L. 1974. Ecology and Field Biology, 2nd ed; Harper & Row: New York, NY, USA, p. 251.
53. 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.
54. Stamenković, M. and Hanelt, D. 2013a. Adaptation of growth and photosynthesis to certain temperature regimes is an indicator for the geographical distribution of *Cosmarium* strains (Zygnematophyceae, Streptophyta). *Eur. J. Phycol.* **48(1)**, 116 - 127.
55. Stamenković, M. and Hanelt, D. 2013b. Protection strategies of *Cosmarium* strains (Zygnematophyceae, Streptophyta) isolated from various geographic regions against excessive photosynthetically active radiation. *Photochem. Photobiol.* **89(4)**, 900 - 910.
56. Stamenković, M. and Hanelt, D. 2017. Geographic distribution and ecophysiological adaptations of desmids (Zygnematophyceae, Streptophyta) in relation to PAR, UV radiation and temperature: a review. *Hydrobiologia.* **787**, 1 - 26.
57. Thawabteh, A.M., Naseef, H.A., Karaman, D., Bufo, S.A., Scrano, L. and Karaman, R. 2023. Understanding the risks of diffusion of cyanobacteria toxins in rivers, lakes, and potable water. *Toxins (Basel)*. **15(9)**, 582.
58. Whittaker, R.H. 1977. Evolution of species diversity in land communities. *Evol. Biol.* **1**, 1 - 67.
59. You, Y.H., Park, J.M., Park, J.H. and Kim, J.G. 2016. Endophyte distribution and comparative analysis of diversity in wetlands showing contrasting geomorphic conditions. *Symbiosis* **69**, 21 - 36.