

CO₂와 수온 증가에 대한 봄철 저수온기 팔당호 식물플랑크톤군집 변화

이가람 · 성은주 · 박혜진 · 박채홍 · 박명환 · 황순진*

건국대학교 환경과학과

Phytoplankton Community Change of Lake Paldang by Increasing CO₂ and Temperature during Spring Cold Water Season. Lee, Ka-Ram, Eun-Ju Sung, Hye-Jin Park, Chae-Hong Park, Myung-Hwan Park and Soon-Jin Hwang* (Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea)

Abstract This study investigated the influence of temperature and CO₂ increase on phytoplankton growth and community structure during cold water season (spring) in Lake Paldang, Korea. Four experimental treatments of temperature and CO₂ manipulation were prepared in the laboratory batch culture: (1) Control; ambient low temperature ($6 \pm 2^\circ\text{C}$) and low CO₂ (air level, 400 mg L^{-1}), (2) T1; low temperature and high CO₂ (800 mg L^{-1}), (3) T2; high temperature ($20 \pm 2^\circ\text{C}$) and low CO₂, (4) T3; high temperature and high CO₂. Algal growth experiment was carried out for 10 days under the light intensity of $70 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (L:D=24:0). The level of pH decreased in both T1 and T3, due to dissolution of added CO₂. The dominant phytoplankton species of ambient water, *Cyclotella meneghiniana* succeeded to *Fragilaria capucina* var. *gracilis* in high-temperature treatment groups (T2 and T3). Cyanobacteria were very rare at the beginning of the experiment, while *Oscillatoria limnetica* appeared in only high-temperature groups (T2 and T3) at 6~7th day. CO₂ addition in ambient temperature (T1) induced the highest phytoplankton growth, and thereby producing the highest average cell density of $3.27 \pm 0.33 \times 10^4 \text{ cells mL}^{-1}$, followed by T2 ($2.65 \pm 0.26 \times 10^4 \text{ cells mL}^{-1}$), T3 ($2.09 \pm 0.16 \times 10^4 \text{ cells mL}^{-1}$), and Control ($1.86 \pm 0.13 \times 10^4 \text{ cells mL}^{-1}$) ($F=7.167$, $p=0.000$). In summary, temperature increase changed the phytoplankton community structure and CO₂ increase promoted the phytoplankton growth during the cold spring season in Lake Paldang, suggesting a potential effect of climate change on freshwater phytoplankton.

Key words: CO₂, water temperature, phytoplankton community, cold water season, climate change

서 론

UN 기후변화협약이 온실가스로 정의한 이산화탄소 (CO₂), 메탄 (CH₄), 아산화질소 (N₂O), 수소불화탄소

(HFC), 과불화탄소 (PFC), 육불화황 (SF₆) 등은 기후변화를 유발하는 물질로서, 현재까지 보고된 많은 연구에 의해서 이들 온실가스에 의한 기후변화가 진행되고 있다는 것은 부정하기 어렵다. IPCC (Intergovernmental panel for climate change: 정부간 기후변화위원회)는 지구온난화에 의해 금세기 말까지 지구표면 온도가 1~4 °C 증가할 것이며, 아울러 대기 중 CO₂ 농도는 750 ppm 까지 증가할 것이라고 보고하였다 (IPCC, 2007). 또한 IPCC 보고서에 따르면, 지난 100년간 (1906~2005) 지

Manuscript received 13 May 2013, revised 10 July 2013,
revision accepted 28 December 2013
* Corresponding author: Tel: +82-2-450-3748, Fax: +82-2-456-5062,
E-mail: sjhwang@konkuk.ac.kr

© The Korean Society of Limnology. 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, provide the original work is properly cited.

구의 평균 기온은 0.74°C 증가하였고, 현재의 추세대로 화석연료 의존적인 인간 활동이 지속된다면 2100년경에는 지구의 평균 기온이 6.4°C 증가할 것으로 전망했다. 우리나라의 경우도 지난 100년간 지구의 평균 기온 증가의 2배가 넘는 1.5°C가 상승한 것으로 확인되었다 (Meteorological Research Institute, 2004).

기후변화의 가장 큰 원인인 지구온난화는 생태계 내 물리, 화학적 제반 특성을 변화시키고, 이에 따라 육상과 수생태계 내에 존재하던 생물에게도 영향을 미쳐 생물의 활성과 다양성에 변화를 주게 될 것으로 예상된다. 특히 수생태계에서 온도변화는 물이라는 매질의 특성상 육상생태계보다 변화가 매우 느리지만 일단 영향이 나타나면 그 파급효과는 훨씬 크게 된다. 예를 들면, 수온증가는 물의 물리화학적 특성에 가장 빠르고 민감하게 반응하는 1차생산자인 조류의 생리학적 상태를 변화시키고 나아가 생태학적으로 종조성과 천이에 영향을 미치며, 이에 따라 먹이사슬을 통해 최상위 영양단계에 있는 어류까지도 영향을 줄 수 있다 (Noiri *et al.*, 2005; Hutchins *et al.*, 2007).

일반적으로 부영양 온대수역에서 전형적인 조류 천이는 겨울과 봄에 규조류와 녹조류, 여름에 남조류와 녹조류, 가을에 남조류와 규조류가 우점 하는 양상을 나타낸다 (Hutchinson, 1957; Reynolds, 1984). 아울러 이러한 수역에서 조류와 함께 동물플랑크톤의 천이는 수생태계 내의 생물적 요인과 무생물적 요인간의 상호작용의 결과로 연속성을 갖기 때문에 예측이 가능한 것으로 이해되고 있다 (Reynolds, 1980; Sommer *et al.*, 1986). 그러나 기후변화에 따른 수온 상승으로 인해 여름철 고수온기의 조류 발달과 천이보다는 겨울철~봄철 저수온기에서의 영향이 더 클 것으로 예상된다 (Weyhenmeyer, 2001). 또한 겨울철의 전후에서의 전반적인 수온 상승에 따라 남조류와 같은 조류가 더욱 오랫동안 수계에 우점 할 가능성이 있다. 최근 우리나라 북한강 수계에서 겨울철 (2011년 11월)에 나타난 남조류 대발생은 늦가을~겨울 동안 평균기온의 상승과 함께 강수량 감소로 인한 체류시간의 증가 등과 관련된 기후변화의 영향이 어느 정도 있었던 것으로 추정되고 있다 (You *et al.*, 2013).

기후변화에 따른 수질과 생물의 영향에 대한 연구가 다양한 수계에서 진행되어 왔다. CO₂ 증가에 의한 조류 성장률 증가 (Wolf-Gladrow *et al.*, 1999; Hutchins *et al.*, 2007), 수온 증가에 따른 조류 우점종 변화 (Lomas and Gilbert, 1999), 수온증가에 따른 영양염과 조류 및 어류 등의 생물군집 변화 (McKee *et al.*, 2003) 그리고 수온 변화에 따른 조류 군집의 종조성과 성장률의 변화 (Noiri

et al., 2005) 등은 그러한 연구의 결과들이다. 최근에는 북유럽을 중심으로 기후변화에 따른 겨울철 온난화와 조류발생 및 천이에 대한 연구가 진행되었다. 스웨덴에서는 1990년대 이후 본격적인 겨울철 온난화에 따라 호수에서의 봄철 조류의 발생이 빨라지고, 이에 따른 여름철 조류 역시 더욱 빨리 발생하였다 (Weyhenmeyer, 2001). 이러한 시기에 장기간 관찰한 연구에 따르면, 북유럽의 겨울철 온난화는 인접한 북대서양의 식물플랑크톤 및 동물플랑크톤의 현존량 변화를 야기했고 또한 그 지역의 여러 담수호에서 먹이망 구조의 변화를 가져온 원인으로 결론을 내리고 있다 (Fromentin and Planque, 1996; Reid *et al.*, 1998; Straile and Geller, 1998; Belgrano *et al.*, 1999).

최근 세계적으로 기후변화에 따른 수중생물의 변화에 대한 연구가 증가하는 양상을 보이지만, 국내에서 기후변화에 의한 담수생태계의 영향 연구는 아직까지 극히 드물다. 본 연구는 호수생태계에서 기후변화의 생태학적 잠재 영향을 이해하기 위하여 상대적으로 환경적 변화에 대한 영향이 큰 저온기 식물플랑크톤 군집을 대상으로 성장과 군집변화에 미치는 수온과 CO₂ 증가의 영향을 분석하였다.

재료 및 방법

1. 시료채집 및 실험디자인

저수온기인 2012년 3월 5일 팔당호 경안천 하류 광동교 부근 (37°28'17.48"N, 127°17'37.00"E)의 표층수를 채수 하였으며, 환경요인은 다항목 수질측정기 (YSI 600QS-O-M, YSI Inc., USA)를 이용하여 현장에서 측정하였다.

실험실로 운반한 현장수는 실험 전에 망목 크기가 200 μm인 sieve를 이용하여 크기가 큰 동물플랑크톤을 제거하였다. 여과한 현장수를 250 mL 삼각플라스크에 150 mL씩 담아 120 rpm으로 진탕배양 하였다. 수온과 CO₂ 농도를 조절하여 네 가지 실험군으로 만들어 실험을 실시하였다: (1) Control; 저온(현장수온)과 저농도(공기중) CO₂ (6±2°C, 400 ppm), (2) T1; 저온과 고농도 CO₂ (6±2°C, 800 ppm), (3) T2; 고온과 저농도 CO₂ (20±2°C, 400 ppm), (4) T3; 고온과 고농도 CO₂ (20±2°C, 800 ppm) 등 네 가지 실험군을 만들었으며, 각 실험군마다 3반복으로 실험을 진행하였다. 고농도 CO₂ 실험군에는 800 ppm CO₂-Air 혼합가스를 주입하였고, 저농도 CO₂ 실험군에는 Air 펌프를 사용하여 실내공기를 주입

하였다. 배양의 광조건은 $70 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 광주기는 L:D =24:0.0으로 공급하였으며, 10일간의 배양기간 동안 매일 샘플링 하였다.

2. 시료의 측정 및 분석

배양액의 pH는 pH Meter (D-55, Horiba, Japan)를 이용하여 측정하였고, 수중 엽록소 *a* (Chl-*a*)와 영양염(질소, 인)은 실험 시작일과 마지막 일에 분석하였다. Chl-*a*는 시료를 Whatman GF/F로 여과하여 24시간 동안 4°C 암상태에서 90% Acetone 10 mL로 추출한 후 1,650 rpm에서 20분간 원심 분리하고(VS-5000N, Vision Scientific, Korea) 분광광도계 (Optizen 2010 UZ, MECASYS Inc., Korea)를 이용하여 흡광도를 측정한 후 Standard Methods (APHA, 2005)에 의거 농도를 계산하였다.

식물플랑크톤의 분류군과 세포밀도의 분석을 위해 매일 1 mL씩 시료를 채취하여 Lugol 용액으로 고정하고 균일하게 혼합시킨 다음 Sedgwick-Rafter chamber를 이용하여 광학현미경 (Axiostar plus, ZEISS, Germany) 400 배 하에서 검경 하였다. 식물플랑크톤은 주요 분류군별로 구분하여 선행연구문헌 (Komárek, 1991; Krammer and Lange-Bertalot, 1991; Chung, 1993; Sandgren *et al.*, 1995)을 참고하여 동정 · 계수하였다.

Table 1. Environmental characteristics of sampling site in Lake Paldang.

Parameter	Environmental characteristics
Temperature (°C)	6.0
pH	8.6
Electric conductivity ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	177
Dissolved oxygen (mg L^{-1})	15.4
Turbidity (NTU)	4.6
Total phytoplankton cell density (cells mL^{-1})	3,720
<i>Cyclotella meneghiniana</i> density (cells mL^{-1})	2,360

Table 2. Relative density of phytoplankton class and growth characteristics in each treatment, and statistic analysis among treatments; Alphabets (a, b) indicate significant difference between treatments by Turkey's THD test (n=3).

Parameter	Control	T1	T2	T3	F value	P value	
Relative density (%)	Bacillariaceae	87.66	88.59	87.09	84.47	0.714	0.549
	Chlorophyceae	10.20	8.88	9.04	11.68	1.114	0.355
	Cyanophyceae	0	0	2.31	2.12	2.732	0.056
	Others	2.15	2.53	1.56	1.72	0.305	0.821
	Growth peak timing	8 day	7 day	8 day	6 day	4.250	0.085
Growth rate (d^{-1})	0.425	0.523	0.508	0.450	0.265	0.850	
pH	7.60 ^{ab}	7.53 ^b	7.71 ^a	7.50 ^b	6.220	0.002	

시간에 따른 각 실험군별 식물플랑크톤의 성장률(μ)은 식물플랑크톤의 세포밀도가 지수적으로 증가하는 단계의 성장률을 아래 식과 같이 계산하였다 (APHA, 2005).

$$\mu (\text{d}^{-1}) = \ln (X_2/X_1) / (T_2 - T_1)$$

X_1 : 초기 세포밀도 (cells mL^{-1})

X_2 : T_2 시간 경과 후 세포밀도 (cells mL^{-1})

$(T_2 - T_1)$: 배양실험 경과 시간 (day)

3. 통계분석

실험군간 각 분석항목의 차이에 대한 통계적 유의성을 검증하기 위하여 일원분산분석 (one-way ANOVA)을 실시하였으며, 실험군간 차이는 Tukey's HSD test를 사용하여 사후검정 하였고, 유의 수준은 $P < 0.05$ 를 기준으로 하였다 (SPSS Inc., v. 18.0.0).

결 과

1. 현장 환경조건

조사일에 현장의 환경조건은 Table 1과 같이 나타났다. 수온 6.0°C , pH 8.6, EC $177 \mu\text{S cm}^{-1}$, DO 15.4 mg L^{-1} , 탁도 4.6 NTU 등 전반적으로 겨울의 수질상태를 반영하였다. 총 식물플랑크톤 밀도는 $3,720 \text{ cells mL}^{-1}$ 로 나타났다으며, 우점종은 *Cyclotella meneghiniana*로 전체의 식물플랑크톤의 63%를 차지하였다.

2. 식물플랑크톤 성장변화

수온과 CO_2 의 조건을 달리한 팔당호 식물플랑크톤은 실험군들 간에 성장율의 차이를 보였다. 현장수온에 CO_2 농도를 증가시킨 T1에서 식물플랑크톤의 성장률이

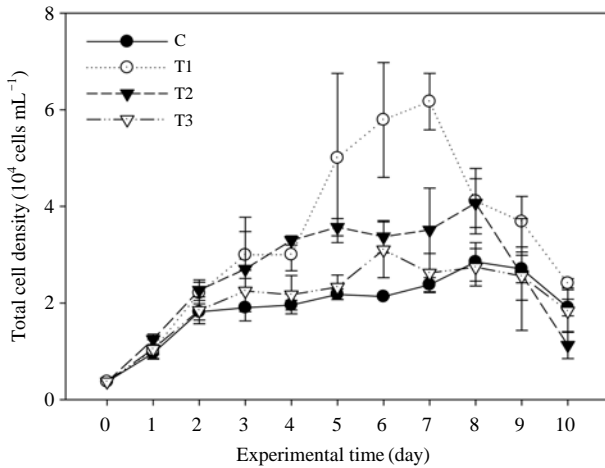


Fig. 1. Change of total cell density among different treatments during experimental period (C=Control, T1=high CO₂, T2=high temperature, T3=high CO₂ and temperature).

0.523 d⁻¹로 가장 높았으며, 그 다음으로 T2에서 0.508 d⁻¹, T3에서 0.450 d⁻¹, 대조군에서 0.425 d⁻¹의 순서로 나타났다(Table 2). 또한 각 실험군에서 최고성장이 일어나는 시점이 각각 다르게 나타났다. 대조군에서는 8일째 가장 높은 세포밀도를 보였으며, T1에서는 7일째, T2에서는 8일째 그리고 T3에서는 6일째 가장 높은 세포밀도를 보였다(Fig. 1, Table 2). 고농도 CO₂ 실험군에서 최고성장 시점이 1~2일 먼저 발생한 것으로 나타났다(Fig. 1, Table 2).

모든 실험군에서 CO₂의 용해로 인해 pH가 낮아졌으며, 특히 고농도의 CO₂를 주입한 T1과 T3에서 더 낮은 pH를 나타내었다(F=6.220, P=0.002)(Table 2).

3. 식물플랑크톤 군집변화

전체 실험기간 동안 우점한 식물플랑크톤 분류군은 모든 실험군에서 규조류로 조사되었으며, 그 외 녹조류, 남조류, 기타조류로서 유글레나, 황갈조류 등이 나타났다. 평균적으로 규조류가 85% 이상 우점하였고, 다음 녹조류가 약 10%, 기타조류가 약 2%의 평균 상대밀도를 나타내었으며, 고온조건을 처리한 실험군 T2, T3에서는 남조류가 약 2%의 평균 상대밀도를 나타내었다(Table 2).

현장수의 식물플랑크톤 주요 우점종은 중심돌말류(Centric diatoms) *Cyclotella meneghiniana*로 나타났으며, 전체식물플랑크톤 밀도의 63%를 차지하였다(Table 1). 배양이 진행되면서 고온 실험군(T2, T3)에서 깃돌말류(Pennate diatoms) *Fragilaria capucina* var. *gracilis*로

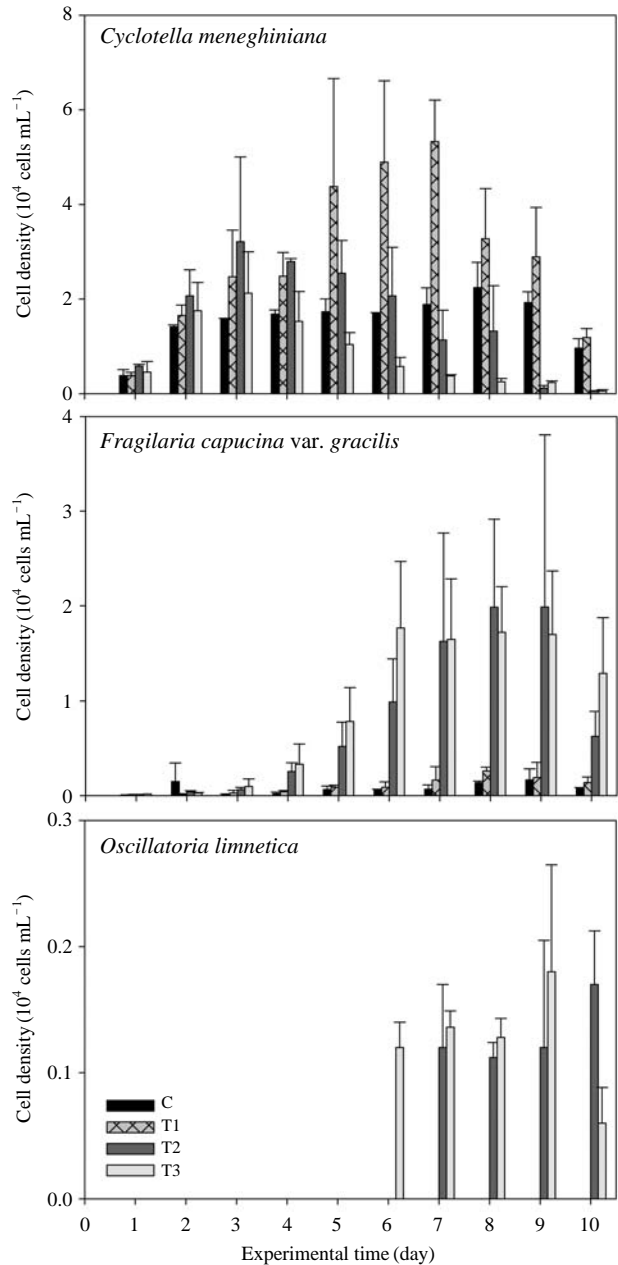


Fig. 2. Change of major phytoplankton among different treatments during the experimental period.

우점종의 천이가 나타났다. 실험 시작후 약 4~5일 째 천이가 시작되면서 *F. capucina* var. *gracilis*와 *C. meneghiniana* 각각 상대 밀도가 점차 변화하여 실험이 종료되는 시점에서는 *F. capucina* var. *gracilis*의 상대 밀도가 70%까지 상승하였다(Figs. 2, 3). 또한 실험이 진행됨에 따라 현장수에서는 드물게 나타났던 남조류 *Oscillatoria limnetica*가 온도를 증가시킨 T2와 T3에서 각각

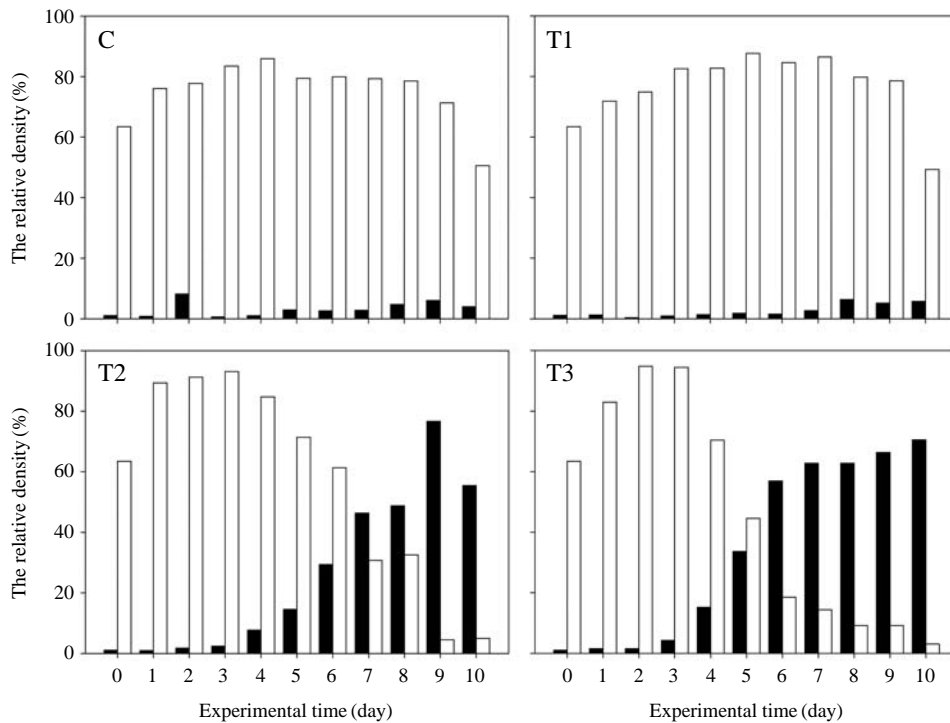


Fig. 3. The relative density change of dominant species (□: *Cyclotella meneghiniana*, ■: *Fragilaria capucina* var. *gracilis*) in different treatments.

1.7×10^3 cells mL^{-1} , 1.8×10^3 cells mL^{-1} 까지 나타났다 (Fig. 2).

고찰

본 연구에서는 기후변화와 관련되는 CO_2 와 수온의 증가가 식물플랑크톤 군집에 미치는 영향을 실험하였으며, 그 결과 CO_2 농도 증가는 식물플랑크톤의 성장에 그리고 수온증가는 식물플랑크톤의 군집구조 변화에 유의한 영향을 주는 것으로 나타났다. 특히 저온의 현장수에 CO_2 만 증가된 실험군(T1)이 전체 실험군 중 가장 높은 성장률과 세포밀도를 나타내었다(Table 2, Fig. 1). 실험대상 식물플랑크톤 군집은 현장수 조건에 적응되었기 때문에, 현장 온도조건에서 광합성을 촉진시킬 수 있는 CO_2 를 지속적으로 공급해준 T1 실험군에서 가장 높은 성장을 나타낸 것으로 보인다. 이러한 경향은 Feng *et al.* (2009)의 결과에서도 나타나는데, CO_2 만 증가된 실험군에서 가장 높은 규조류 세포밀도를 나타내었고, 온도와 CO_2 를 함께 증가시킨 실험군과 온도만 증가된 실험군, 그리고 대조군에서 모두 비슷한 세포밀도를 나타냈다. Hare *et al.* (2007)의 실험에서도 규조류의 지표

색소인 fucoxanthin이 CO_2 증가 실험군에서 가장 높게 나타났다. 또한 CO_2 농도에 따라 농도가 높아질수록 조류 성장 역시 높아지는 결과가 보고된 바 있다(Biswas *et al.*, 2011; Johnson *et al.*, 2013).

식물플랑크톤은 광합성을 위해 적절한 이산화탄소의 공급이 필요하므로 대기중 이산화탄소 수준(Graham *et al.*, 2009)에서 2배 정도의 농도 증가는 식물플랑크톤의 성장을 촉진하였다고 판단된다. 또한 선행연구 결과 CO_2 농도 증가는 부착규조류 군집의 성장을 촉진시켰으며, 과도한 증가(1,600 ppm)는 오히려 성장을 저해시킬 수 있었다(Park *et al.*, 2012).

이와는 달리 온도를 증가시킨 실험군에서는 세포성장보다는 종의 천이가 일어났다. 실험 대상지점인 팔당호의 식물플랑크톤은 기온이 비교적 낮은 봄과 가을 그리고 겨울에는 규조류가 우점하고 기온이 높은 여름에는 녹조류, 편모조류, 남조류가 우점하는 일반적인 천이 패턴을 보인다(Wetzel, 2001; Park and Jheong, 2003; Kim *et al.*, 2009). 저온기 동안 팔당호에 우점하는 규조류 중 가장 많이 출현하는 종은 *Cyclotella* spp.이며, *Fragilaria* spp.는 저온기중 비교적 기온이 높은 봄과 늦가을에 많이 나타나고, 수온이 증가함에 따라 녹조류, 남조류 밀도가 증가하는 것으로 알려졌다(Kim, 1996; Kim *et al.*,

2009). 이러한 천이과정과 종 조성은 본 연구에서 온도를 증가시킨 T2, T3에서 현장수내 우점종인 *C. meneghiniana*로부터 *F. capucina* var. *gracilis*로의 변화, 남조류의 상대밀도 증가 결과와 유사한 경향을 나타내었다. 또한 타 수계에서의 연구결과들을 살펴볼 때, 온도가 증가할 때 규조류 식물플랑크톤 군집에서 크기 20 μm 이하의 Nanophytoplankton이 우점하는 경향을 나타내었으며 (Hare *et al.*, 2007; Feng *et al.*, 2009), 와편모조류가 우점하는 식물플랑크톤 군집의 온도증가 실험에서 우점종이 규조류로 천이되고, 규조류 군집 또한 호온성 종이 크게 성장하여 (Lassen *et al.*, 2010) 온도에 따른 식물플랑크톤 군집 변화가 불규칙하게 나타나고 있다. 또한 북유럽 아이슬란드에서 온도에 따른 하천 식물플랑크톤 군집 변화 연구에서는 저온에서 남조류가 우점하며 고온에서 녹조, 규조류가 우점하는 형태를 보였다 (Gudmundsdottir *et al.*, 2011). 이와 같이 식물플랑크톤 군집의 종 조성은 지역적인 특성에 따라 차이가 나타나기 때문에 온도 변화에 대한 군집의 변화도 지역에 따라 차이가 나타난다. 또한 본 실험 결과를 기존연구와 비교하였을 때, 비록 현장의 식물플랑크톤에 대한 CO₂와 수온 증가의 영향을 실험한 연구는 없지만, 팔당호 식물플랑크톤을 이용한 성장 실험의 성장률(0.4~1.0 d⁻¹)과 본 실험의 성장률(0.4~0.5 d⁻¹)이 유사한 범위 내에 있으므로 (Choi *et al.*, 2003), 본 실험은 팔당호 식물플랑크톤의 성장 특성을 잘 나타낸다고 판단된다. 따라서 본 연구에서 나타난 수온증가에 따른 식물플랑크톤 군집 구조 변화는 팔당호 생태계의 특성으로 파악할 수 있다고 판단되나, 보다 정확한 이해를 위해서는 보다 심도 있는 비교적 장기간의 연구를 필요로 할 것이다.

CO₂와 온도를 같이 증가시킨 실험군(T3)이 다른 실험군(T1, T2)에 비해 낮은 식물플랑크톤 성장을 나타내었고, 동일하게 온도를 증가시킨 T2보다 성장은 더 낮았지만, 남조류의 발생과 종의 천이는 더 빨리 일어났다. 하지만 두 실험군(T2, T3) 간 종 천이 시기의 차이는 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다(P>0.05). 고온조건과 고농도 CO₂ 실험군(T3)에서는 성장을 촉진시키는 뚜렷한 CO₂의 영향이 나타나지 않았는데, 이는 고온조건에서 탄소의 용해도가 더 낮아지기 때문인 것으로 판단되었다. 비록 수중 탄소 농도 변화를 측정하지는 않았지만, 식물플랑크톤의 탄소축적작용에 사용되는 CO₂와 HCO₃⁻는 저온에서 더 높은 용해도를 가지기 때문인 것으로 판단된다(Beardall *et al.*, 1998). 하지만 선행연구 결과에 의하면, CO₂와 온도를 동시에 증가시켰을 때 식물플랑크톤 군집의 성장이 높게 나타났으며

(Feng *et al.*, 2009), 단일종 배양실험 역시 광합성을 촉진시키는 결과가 보고된 바 있다(Feng *et al.*, 2008). 또한 남조류 종에 따라 CO₂와 온도 변화의 영향 정도가 달라졌다(Fu *et al.*, 2007). 한편 해양의 깊은 수심에서 식물플랑크톤 군집은 대조군에 비해 CO₂와 온도를 동시에 증가시킨 실험군이 높은 성장을 보인 반면 대륙붕의 식물플랑크톤은 낮은 성장을 보이는 등(Hare *et al.*, 2007) 다양한 연구결과들이 보고되었다. 이러한 결과를 볼 때 CO₂와 온도의 잠재적인 상호작용과 영향에 대한 연구가 더욱 필요한 것으로 사료되었다.

결론적으로, CO₂ 농도의 증가는 식물플랑크톤 세포 성장을 촉진시켜 군집 밀도에 영향을 주며, 온도의 증가는 종의 천이를 유도하여 군집 구조 변화에 영향을 주었다. 본 연구의 결과는 저온기의 호수생태계 식물플랑크톤 군집에 대해 CO₂와 온도의 증가가 조류군집의 성장과 종 조성에 영향을 줄 수 있는 잠재성을 보여주었으며, 이와 관련하여 미래 기후변화에 대비하여 담수생태계의 변화를 효과적으로 관리하기 위한 지속적인 연구가 필요하다고 판단되었다.

적 요

본 연구에서는 봄철 저수온기 팔당호 수역의 식물플랑크톤을 이용하여 수온과 CO₂ 증가가 식물플랑크톤 군집에 미치는 영향을 분석하였다. 2012년 3월 팔당호 경안천하류 광동교 부근의 현장수를 이용하여 수온증가와 CO₂ 농도증가를 네 가지 실험군, (1) Control; 저온(현장수온)과 저농도(공기중) CO₂ (6±2°C, 400 ppm), (2) T1; 저온과 고농도 CO₂ (6±2°C, 800 ppm), (3) T2; 고온과 저농도 CO₂ (20±2°C, 400 ppm), (4) T3; 고온과 고농도 CO₂ (20±2°C, 800 ppm)으로 하여 각각 실험하였다. 가장 높은 조류성장을 보인 실험군은 T1으로 현장 온도 조건에 적응한 조류 군집에 CO₂를 첨가한 결과이다. 현장수의 주요 우점종은 *Cyclotella meneghiniana*로 나타났다. 시간이 진행됨에 따라 고온 실험군(T2, T3)에서는 중심돌말류 *Cyclotella meneghiniana*에서 깃돌말류 *Fragilaria capucina* var. *gracilis*로 우점종의 천이가 나타났다. 모든 실험군에서 규조류가 우점하였고, 고온 실험군 T2, T3에서 배양 후반기에 남조류가 출현하였다. 결론적으로, 저수온기 수온증가는 팔당호 식물플랑크톤 군집구조 변화에 영향을 주었으며, CO₂ 농도 증가는 식물플랑크톤의 성장을 촉진시켰다. 본 연구의 결과는 기후변화에 따라 담수생태계의 식물플랑크톤의 성장과 군

집변화의 잠재성을 보여주었으며, 앞으로 보다 심도 있는 연구의 필요성을 제기하였다.

사 사

본 연구는 2011년도 한강수계 환경기초조사사업(과제번호 1333-406-260)의 일환으로 수행되었음.

REFERENCES

- APHA. 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21st ed. American Public Health Association. Washington, D. C. USA.
- Beardall, J., A. Johnston and J. Raven. 1998. Environmental regulation of CO₂-concentrating mechanisms in microalgae. *Canadian Journal of Botany* **76**: 1010-1017.
- Belgrano, A., O. Lindahl and B. Hernroth. 1999. North Atlantic Oscillation (NAO) primary productivity and toxic phytoplankton in the Gullmar Fjord, Sweden (1985.96). *Proceedings of the Royal Society B* **266**: 425-430.
- Biswas, H., A. Cros, K. Yadav, V.V. Ramana, V.R. Prasad, T. Acharyya and P.V.R. Babu. 2011. The response of a natural phytoplankton community from the Godavari River Estuary to increasing CO₂ concentration during the pre-monsoon period. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **407**: 284-293.
- Choi, K.H., S.J. Hwang, H.S. Kim and M.S. Han. 2003. Temporal changes of limiting nutrients and phytoplankton growth rate in Lake Paldang. *Korean Journal of Limnological Society* **36**: 139-149.
- Chung, J. 1993. Illustration of the freshwater algae of Korea. Academybook, Seoul, Korea.
- Feng, Y., C.E. Hare, K. Leblanc, J.M. Rose, Y. Zhang, G.R. DiTullio, P. Lee, S. Wilhelm, J.M. Rowe and J. Sun. 2009. The effects of increased pCO₂ and temperature on the north Atlantic spring bloom: I. the phytoplankton community and biogeochemical response. *Marine Ecology Progress Series* **388**: 13-25.
- Feng, Y., M.E. Warner, Y. Zhang, J. Sun, F.X. Fu, J.M. Rose and D.A. Hutchins. 2008. Interactive effects of increased pCO₂, temperature and irradiance on the marine coccolithophore *Emiliania huxleyi* (Prymnesiophyceae). *European Journal of Phycology* **43**: 87-98.
- Fromentin, J.M. and B. Planque. 1996. *Calanus* and the environment in the eastern North Atlantic. II: Influence of the North Atlantic Oscillation on *C. finmarchicus* and *C. helgolandicus*. *Marine Ecology Progress Series* **134**: 111-118.
- Fu, F.X., M.E. Warner, Y. Zhang, Y. Feng and D.A. Hutchins. 2007. Effects of increased temperature and CO₂ on photosynthesis, growth, and elemental ratios in marine *synechococcus* and *prochlorococcus* (cyanobacteria). *Journal of Phycology* **43**: 485-496.
- Graham, L.E., J.M. Graham and L.W. Wilcox. 2009. The Roles of Algae in Biogeochemistry, p. 18-37. In: ALGAE (2nd ed.). Pearson Education, London, UK.
- Gudmundsdottir, R., G.M. Gislason, S. Palsson, J.S. Olafsson, A. Schomacker, N. Friberg, G. Woodward, E.R. Hannesdottir and B. Moss. 2011. Effects of temperature regime on primary producers in Icelandic geothermal streams. *Aquatic Botany* **95**: 278-286.
- Hare, C.E., K. Leblanc, G.R. DiTullio, R.M. Kudela, Y. Zhang, P.A. Lee, S. Riseman and D.A. Hutchins. 2007. Consequences of increased temperature and CO₂ for phytoplankton community structure in the Bering Sea. *Marine Ecology Progress Series* **352**: 9-16.
- Hutchins, D.A., F. Fu, Y. Zhang, M.E. Warner, Y. Feng, K. Portune, P.W. Bernhardt and M.R. Mullholland. 2007. CO₂ control of *trichodesmium* N₂ fixation, photosynthesis, growth rates, and elemental ratios: Implications for past, present, and future ocean biogeochemistry. *Limnology and Oceanography* **52**: 1293-1304.
- Hutchinson, G.E. 1957. A Treatise on Limnology. I. Geography, Physics, and Chemistry. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA.
- Johnson, V., C. Brownlee, R.E.M. Rickaby, M. Graziano, M. Milazzo and J. Hall-Spencer. 2013. Responses of marine benthic microalgae to elevated CO₂. *Marine Biology* **160**(8): 1813-1824.
- Kim, J.K., S.H. Lee, H.H. Bang and S.O. Hwang. 2009. Characteristics of algae occurrence in lake Paldang. *Journal of Korea Society of Environmental Engineers* **31**: 325-331.
- Kim, Y.J. 1996. Ecological study of phytoplankton community and trophic states using indicators in lake Paltang. *Korean Journal of Limnological Society* **29**: 323-345.
- Komárek, J. 1991. A review of water-bloom forming Microcystis species with regard to populations from Japan. *Archiv für Hydrobiologie Supplement, Algological Studies* **64**: 115-127.
- Krammer, K. and H. Lange-Bertalot. 1991. Bacillariophyceae. 3. Centrales, Fragilariaceae, Eunituaceae. Süßwasser-flora von Mitteleuropa. (2 Ed.) **2**(3): 1-576. Gustav Fischer, Stuttgart.
- Lassen, M.K., K.D. Nielsen, K. Richardson, K. Garde and L. Schlüter. 2010. The effects of temperature increases on a

- temperate phytoplankton community-A mesocosm climate change scenario. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* **383**: 79-88.
- Lomas, M.W. and P.M. Gilbert. 1999. Temperature regulation of nitrate uptake: A novel hypothesis about nitrate uptake and reduction in cool-water diatoms. *Limnology and Oceanography* **44**: 556-572.
- Meteorological Research Institute. 2004. The Korea climate change for 100 years and future outlook. Meteorological Research Institute, Seoul, Korea.
- McKee, D., D. Atkinson, S.E. Collings, J.W. Eaton, A.B. Gill, I. Harvey, K. Hatton, T. Heyes, D. Wilson and B. Moss. 2003. Response of freshwater microcosm communities to nutrients, fish, and elevated temperature during winter and summer. *Limnology and Oceanography* **48**: 707-722.
- Noiri, Y., I. Kudo, H. Kiyosawa, J. Nishioka and A. Tsuda. 2005. Influence of iron and temperature on growth, nutrient utilization ratios and phytoplankton species composition in the western subarctic Pacific Ocean during the SEEDS experiment. *Progress in Oceanography* **64**: 149-166.
- Park, H.J., B.H. Kim, D.S. Kong and S.J. Hwang. 2012. The effect of elevated CO₂ level on the water quality and periphytic algal community in indoor experimental channels. 2012 Korea Society of Limnology Congress. P-146.
- Park, H.K. and W.H. Jheong. 2003. Long-term changes of algal growth in Lake Paldang. *Journal of Korean Society on Water Quality* **19**: 673-684.
- Reid, P.C., M. Edwards, H.G. Hunt and A.J. Warner, 1998. Phytoplankton change in the North Atlantic. *Nature* **391**: 546-546.
- Reynolds, C.S. 1980. Phytoplankton assemblages and their periodicity in stratifying lake systems. *Ecography* **3**: 141-159.
- Reynolds, C.S. 1984. Phytoplankton periodicity: the interactions of form, function and environmental variability. *Freshwater Biology* **14**: 111-114.
- Sandgren, C.D., J.P. Smol and J. Kristianse. 1995. Chrysophyte algae. Ecology, phylogeny and development. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- Sommer, U., Z.M. Gliwicz, W. Lampert and A. Duncan. 1986. The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters. *Archiv für Hydrobiologie* **106**: 433-471.
- Straile, D. and W. Geller. 1998. The response of Daphnia to changes in trophic status and weather patterns: a case study from Lake Constance. *ICES Journal of Marine Science* **55**: 775-782.
- Wetzel, R.G. 2001. Planktonic communities: Algae and Cyanobacteria, p. 331-394. *In: Limnology: Lake and River Ecosystems* (3rd ed.). Academic Press, California, USA.
- Weyhenmeyer, G.A. 2001. Warmer Winters: Are Planktonic Algal Populations in Sweden's Largest Lakes Affected? *Ambio: A Journal of the Human Environment* **30**: 565-571.
- Wolf-Gladrow, D.A., U. Riebesell, S. Burkhardt and J. Bijma. 1999. Direct effects of CO₂ concentration on growth and isotopic composition of marine plankton. *Tellus* **51B**: 461-476.
- You, K.A., M.S. Byeon, S.J. Youn, S.J. Hwang and D.H. Rhew. 2013. Growth characteristics of blue-green algae (*Anabaena spiroides*) causing tastes and odors in the North Han River, Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **46**: 135-144.