

낙동강의 식물플랑크톤 우점종의 분포특성 및 수온과의 상관성

유재정* · 이혜진 · 이경락 · 류희성 · 황정화 · 신라영 · 천세억

국립환경과학원 낙동강물환경연구소

Relationship between Distribution of the Dominant Phytoplankton Species and Water Temperature in the Nakdong River, Korea. Yu, Jae Jeong*, Hye Jin Lee, Kyung Lak Lee, Heuy Seong Lyu, Jeong Wha Whang, La Young Shin and Se Uk Chen (Nakdong River Water Environmental Research Center, National Institute of Environment Research)

Abstract The construction of eight large weirs in the Nakdong River, Korea, caused a decrease in the water flow velocity and several physical changes to the water environment. Here, changes in phyto- and zooplankton communities and water quality in the areas near the eight weirs were investigated from 2011 to 2013, and relationships between phytoplankton abundances and environmental factors were analyzed. Special emphasis was given to the succession patterns in algal abundance based on temperature fluctuations. At the eight weirs, 24 dominant species were found. The most abundant phytoplankton species was *Stephanodiscus* sp. (39.4% of dominant frequency). Cyanobacteria of the genus *Microcystis* dominated during the summer, with a dominant frequency of 8.5% and cell abundance ratio of 36.6%. Significant correlations were observed between temperature and abundance of eight of the main dominant species; seven species showed positive correlations with temperature. *Stephanodiscus* sp., however, showed a negative correlation with temperature ($r = -0.26, p < 0.01$). In addition, this species showed a significant negative correlation with the dominant algal species *Aulacoseira granulata* and *Aphanizomenon flos-aquae*, with the zooplankton *Copepoda* and with Cladocera. On the contrary, seven other dominant species of algae showed significant positive correlations with zooplankton. Thus, we showed that the seasonal succession of plankton communities in the Nakdong River was related to the water temperature changes.

Key words: blue-green algae, environmental factors, dominant species, water blooms, water temperature

서론

낙동강은 산업화와 도시화의 과정을 거치면서 인위적인 압력에 의한 시간적, 공간적 환경조건이 자주 변해왔다. 특히 2012년에 8개의 보가 설치되면서 식물플랑크톤 증가에 의한 상수원 수질악화에 대한 우려가 높다. 식물

플랑크톤이 대량증식 하면 용존산소 고갈, 투명도 감소, 생물다양성 파괴, 종조성 및 우점종 변화, 독성영양 등 많은 문제를 야기한다(Xin *et al.*, 2011). 이러한 문제의 효과적인 관리를 위해서는 수화현상은 언제 시작하며 그 규모는 어느 정도인지 예측하는 것은 중요하다. 낙동강에는 규조류에 의한 봄철수화와 남조류에 의한 여름철수화가 대표적이다(Ha *et al.*, 2003; Joung *et al.*, 2013). 수화현상은 어떤 하나의 환경조건에 따라 일어나는 것이 아니고 다양한 환경조건에 의해 일어난다(Heisler *et al.*, 2008). 화석연료의 연소로 인해 지구의 기온이 20세

Manuscript received 27 June 2014, revised 17 November 2014,

revision accepted 25 November 2014

* Corresponding author: Tel: +82-54-950-9730, Fax: +82-54-956-9707,

E-mail: youjj@korea.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.

기에 있어 1°C가 상승한 것으로 보고되고 있다(IPCC, 2007). 자연상태에서 식물플랑크톤의 군집은 조류의 성장율에 있어서 기온상승의 영향을 지속적으로 받을 것이지만 그 정도는 조류 종에 따라 다르게 나타난다(Raven and Geider, 1988). 수온이 상승하면 남조류는 성장율이 높아지고 물의 점도감소로 부유조절이 쉬워지며, 영양염이 조류 세포표면으로 확산이 용이하게 되는 등 남조류 성장에 유리한 조건이 된다(Vogel, 1996). 또한 수온상승에 의해 성층화현상이 가속화되어 영양염 제한이 증가하고(Boyce *et al.*, 2010; Moran *et al.*, 2011) 수온의 변화에 따라 식물플랑크톤의 다양성이 변하며 중간 경쟁에 있어서도 변화가 생긴다. Burgmer *et al.* (2011)의 실험실 연구에서 높은 온도에서는 경쟁적 배제가 보다 신속하게 일어나 종풍부도가 감소하는 것으로 보고하였다. 광합성을 하는 식물플랑크톤에 있어서 빛은 제한요인이 될 수 있어 빛을 효과적으로 이용하는 기구를 가지고 있다. 그러나 낮은 광도는 남조류의 우점을 억제할 수 있는 것으로 보고되고 있다(Karl *et al.*, 2003).

최근에 낙동강의 식물플랑크톤 연구는 하류에 집중되어 있었다(Chung *et al.*, 1994; Moon *et al.*, 2001; Son, 2013; Son, 2013; Jung *et al.*, 2013). 보가 설치된 지금은 수심이 깊어지고 유속이 느려져 정체형 하천이 되었지만 유역의 오염원은 지속적으로 하천에 유입되는 특성을 지니고 있다. 낙동강은 물리적 환경변화에 따라 수질 및 수생태계의 변화가 불가피하게 되었지만 식물플랑크톤의 군집구조 변화특성을 판단할 수 있는 우점종의 시간적, 공간적 변화패턴 등 체계적인 연구가 부족하다. 낙동강의 상주보에서부터 합천창녕보까지의 8개에 보에 대해 2011년부터 2013년까지 수온, 적산일사량, 영양염 농도, 식물플랑크톤 군집분포, 기타 수질조사 결과를 이용하여 우점종의 천이특성과 수온과의 상관성, 우점종 상호 간의 영향 등을 분석하고자 본 연구를 실시하였다.

재료 및 방법

1. 대상지점 및 조사시기

본 조사는 낙동강 8개 보의 상류 2 km 지점에서 실시하였다(Fig. 1). 조사시기는 2011년 1월부터 2013년 12월까지이며, 월 2회 조사를 실시하였다. 상주보에서 창녕합안보까지의 구간거리는 177.8 km이므로 평균 보 구간 거리는 25.4 km이다.

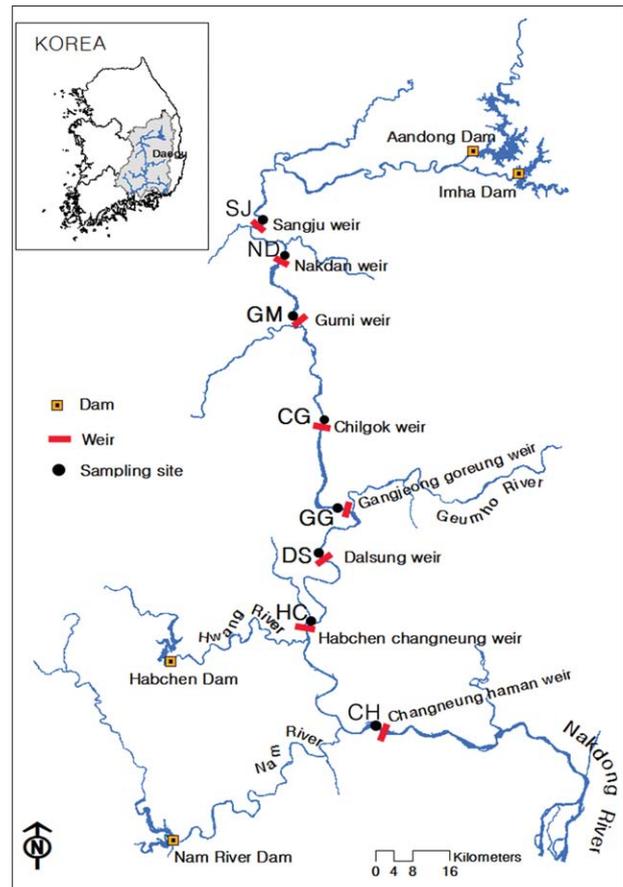


Fig. 1. Sampling sites in the Nakdong River, Korea.

2. 물리·화학적 조사 및 조류조사

기상현황은 조사지점과 인접한 5개 기상관측소(상주, 구미, 대구, 합천, 부산)의 평균기온과 강수량 등의 자료를 활용하였으며 적산일사량은 대구기상대 및 부산지방기상청 관측자료를 이용하였다. 보 구간의 수리·수문 현황조사는 국가 수자원관리 종합정보 홈페이지 (<http://www.wamis.go.kr>) 자료를 활용하였다.

수질항목 중 수온, pH, 전기전도도, DO, 탁도 등은 시료 채수 시 YSI 556 MPS (YSI) 장비를 이용하여 현장에서 측정하였으며, 시료는 하천의 횡단면을 기준으로 중앙의 수심 0.5 m 지점에서 Ruttner water sampler (Hydrobios, Germany, 1000 mL)를 이용하여 4 L 채수하였다. 채수된 시료는 냉온 보관하여 실험실까지 운반하였다. 식물플랑크톤 분석을 위한 시료는 Lugol's solution으로 현장에서 고정하고 실험실로 옮겨 48시간 이상 침강시킨 후 상등액을 제거하고 5배 이상 농축하여 사용하였다. 동물플랑크톤 분석을 위한 시료는 5 L를 채취하여 망목

64 μm 플랑크톤 sieve를 이용하여 100 mL로 농축하였으며 5% sucrose-formalin solution (Haney and Hall, 1972)로 즉시 고정된 후 실험실로 운반하였다. SS는 Whatman GF/C glass fiber filter를 사용하였으며 105~110°C로 건조하였다. BOD₅는 20°C에서 5일 동안 dilution and seeding method (EPAC, 2002)로서 분석하였으며 COD_{Mn}는 potassium permanganate method로 분석하였다. 인산염인(PO₄-P)과 총인(TP)은 molybdate blue method와 ascorbic acid reduction method 및 spectrophotometry법으로 분석하였다. 암모니아성질소(NH₃-N), 질산성질소(NO₃-N), 총질소(TN) 등은 각각 indophenol blue method, ionchromatography method and persulfate oxidation method 등으로 분석하였다. Chl.a 농도는 extraction methods를 사용하여 90% acetone (Wetzel and Likens, 1991)에서 흡광분석법으로 분석하였다. 식물플랑크톤 조사는 광학현미경(M1, Carl Zeiss)을 이용하여 200배~400배로 검경하였다. 각 분류군은 종별로 동정한 후 세포수를 계수하고 현존량(biomass)은 단위부피(mL)당 세포수로 산출하였다. 식물플랑크톤의 종 동정은 한국담수조류도감(정, 1993)과 일본 담수조류도감(Hirose and Yamagishi, 1977) 등에 따라 실시하였다. 동물플랑크톤 분석은 SMZ-U (Carl Zeiss)와 M1 (Carl Zeiss)으로 10~100배율로 동정하였다.

3. 통계분석

자료의 변수의 비교는 정규분포의 경우는 one-way analysis of variance (ANOVA)으로 수행했으며, 그렇지 않은 경우는 Kruskal-Wallis ANOVA를 이용해 수행되었다 (SIGMASTAT, version 12). 환경인자와 식물플랑크톤 현존량과의 상호 관계는 Pearson's correlation을 이용하여 평가하였다. 상관성 평가 대상 우점종은 우점빈도가 3% 이상으로 나타난 *Stephanodiscus* sp., *Microcystis* sp., *Rhodomonas* sp., *Cyclotella* sp., *Aulacoseira granulata*, *Aphanizomenon flos-aquae*, *Fragilaria crotonensis*, *Merismopedia* sp. 등 8개 종으로 하였으며 동물플랑크톤의 상관성 분석대상은 윤충류(Rotifera), 요각류(Copepoda), 지각류(Cladocera) 등이다.

결과 및 고찰

1. 기상 및 수질변화

조사기간 동안의 수질현황은 Fig. 2와 같다. 현장 조사

시 측정된 수온은 대구지역의 GG지점이 16.7°C로서 가장 높았고 가장 상류에 위치하고 있는 SJ지점에서 14.9°C로서 가장 낮았다. 전기전도도는 하수처리장 방류수 유입이 많은 CG지점과 DS지점에서 각각 246.8 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 및 355.18 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 로 높았다. BOD는 SJ~CG구간의 평균농도가 1.8~2.0 mg L^{-1} 이었으며 중·하류 지점인 GG~CH 구간에서는 2.2~2.4 mg L^{-1} 로 평균치보다 다소 높았다. 총인(TP)농도는 조사기간 전체 평균은 0.091 mg L^{-1} 이었으며, 조사지점별 최소농도는 0.019~0.039 mg L^{-1} 의 범위였고, 최고농도는 0.291~0.373 mg L^{-1} 로 나타났다. Chl.a 평균농도는 DS지점이 31.9 mg m^{-3} 으로서 가장 높게 나타났다.

2. 우점종 천이 및 현존량 변화

2011년부터 2013년까지 조사시기별 낙동강의 총 우점종수는 9종이며 분류군별로는 규조류 4종, 남조류 4종 및 은편모조류 1종이다(Table 1). 우점빈도는 *Stephanodiscus* sp.가 50.0%로 가장 높았고 *Cyclotella* spp. 15.3%, *Microcystis* sp. 9.7%의 순서였다. *Stephanodiscus* sp.의 우점은 겨울부터 시작하여 5월까지 지속이 되었다.

Table 2는 Table 1의 조사결과를 8개의 보 단위로 평가한 것이다. 보 단위로 평가한 우점종수는 총 24종류 있었고 규조류 9종류, 남조류 8종류, 녹조류 5종류, 와편모조류 1종류, 유글레나 1종류 등이었다. *Microcystis* sp.의 우점빈도는 DS지점에서 15.3%으로서 가장 높았고 상류 지점에서는 낮았다. *Anabaena* sp., *Oscillatoria* sp. 등 사상체 남조류의 우점은 상류에서 높았고 하류에서는 *Aphanizomenon flos-aquae*의 우점빈도가 높았다.

보 단위의 우점종별 우점빈도 및 현존량 우점률의 평가결과(Table 3) *Stephanodiscus* sp.는 우점빈도는 39.6%를 나타냈고 현존량의 우점은 58.6%으로 나타났다. 평균 현존량 우점율이 가장 높은 종은 녹조류 *Oedogonium* sp.의 59.3%였으나 우점빈도는 0.4%였다. 부착조류인 *Oedogonium* sp.의 우점은 2013년 6월 및 7월의 강수의 영향으로 지류에서 유입된 것이 원인인 것으로 판단된다. *Stephanodiscus* sp.는 2012년 3월 상반기에 GG지점에서 97.6%의 최대 현존량 우점율을 보였고 이때 총 조류 출현종수는 18종으로 낮았다. *Microcystis* sp.는 2013년 8월 상반기에 GG지점에서 84.3%의 현존량 우점율을 나타냈고 이때 총 출현종수는 15종이었다. 그동안 낙동강의 보 설치 이후에는 연구결과가 없으며, 보 설치 이전의 연구결과와 비교하면, Moon *et al.* (2001)은 낙동강 중·하류의 식물플랑크톤 군집구조 연구결과 42속 76종이었다고 하였으며 이들은 규조류 51.3%, 녹조류

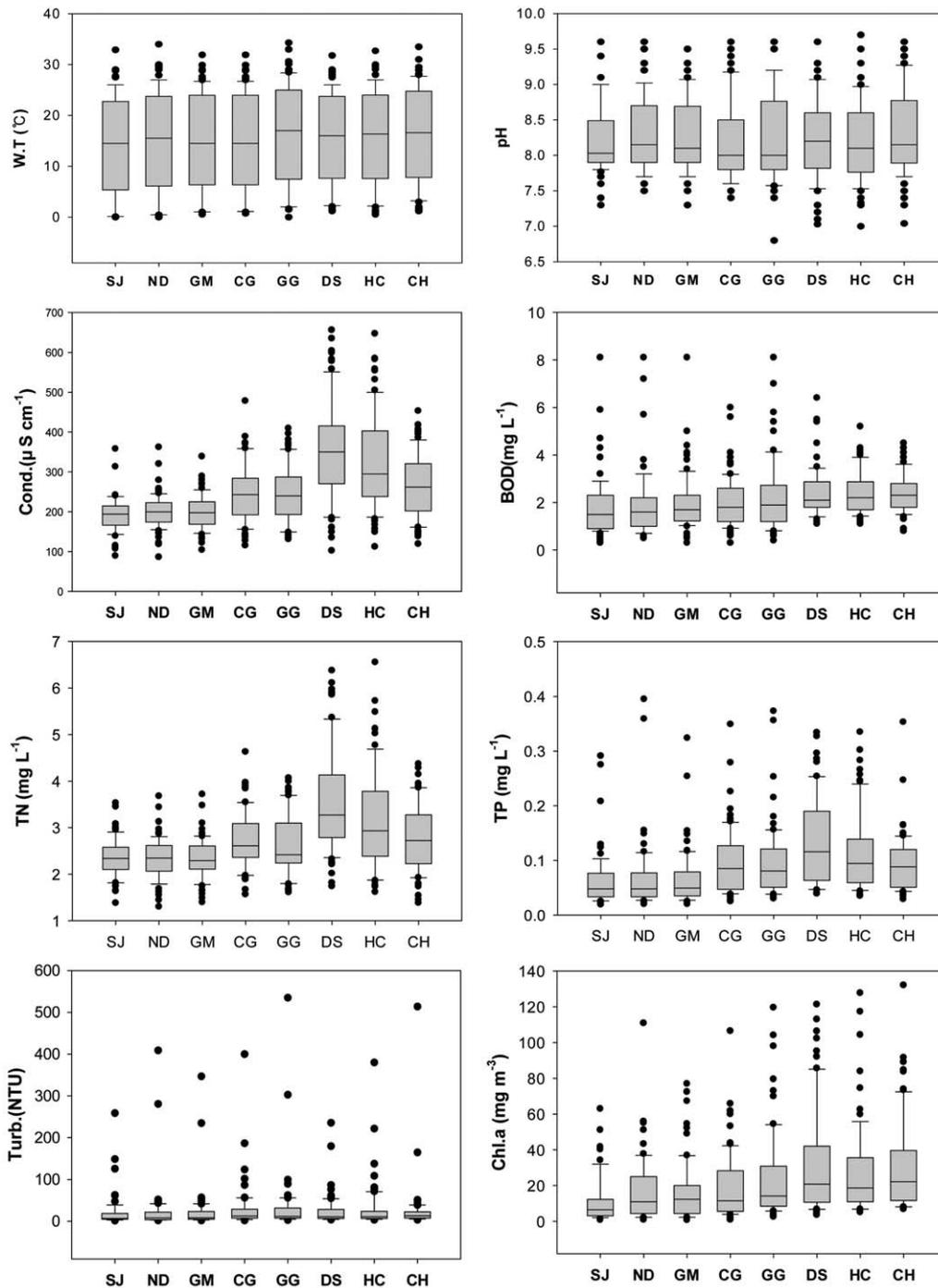


Fig. 2. Variations in the average water quality at each survey site in the Nakdong River, from 2011 to 2013 (n=72).

32.9% 및 남조류 5.3%로 구성되어 있었다고 했다. Jung *et al.* (2013)은 물금지점에서 식물플랑크톤 생물량에 대한 기후변화의 영향에 관한 연구를 하였는데 부영양화 상태인 물금지점은 특히 겨울과 봄에 영양염의 농도가 높았고, 11월부터 3월까지 *Stephanodiscus*가 83.9%의

우점율을 보였다고 했다.

3. 식물플랑크톤 밀도와 수온 및 일사량과의 상관성

온대몬순 기후에 속하는 낙동강의 수온은 시간에 따른

Table 1. Monthly changes in abundance ratio of dominant species in the Nakdong River from 2011 to 2013.

Month	2011		2012		2013	
	Dominant Species	%	Dominant Species	%	Dominant Species	%
Jan. 1	<i>Stephanodiscus</i> sp.	75.3	<i>Stephanodiscus</i> sp.	70.8	<i>Stephanodiscus</i> sp.	65.4
Jan. 2	<i>Stephanodiscus</i> sp.	71.6	<i>Stephanodiscus</i> sp.	76.1	<i>Stephanodiscus</i> sp.	65.4
Feb. 1	<i>Stephanodiscus</i> sp.	63.3	<i>Stephanodiscus</i> sp.	81.7	<i>Stephanodiscus</i> sp.	54.2
Feb. 2	<i>Stephanodiscus</i> sp.	66.0	<i>Stephanodiscus</i> sp.	88.6	<i>Stephanodiscus</i> sp.	69.4
Mar. 1	<i>Stephanodiscus</i> sp.	72.5	<i>Stephanodiscus</i> sp.	92.4	<i>Stephanodiscus</i> sp.	89.0
Mar. 2	<i>Stephanodiscus</i> sp.	91.7	<i>Stephanodiscus</i> sp.	89.2	<i>Stephanodiscus</i> sp.	66.8
Apr. 1	<i>Stephanodiscus</i> sp.	76.7	<i>Stephanodiscus</i> sp.	67.3	<i>Stephanodiscus</i> sp.	41.4
Apr. 2	<i>Stephanodiscus</i> sp.	64.4	<i>Stephanodiscus</i> sp.	47.5	<i>Stephanodiscus</i> sp.	28.6
May 1	<i>Stephanodiscus</i> sp.	69.3	<i>Cyclotella</i> sp.	24.6	<i>Stephanodiscus</i> sp.	19.6
May 2	<i>Stephanodiscus</i> sp.	33.2	<i>Rhodomonas</i> sp.	15.8	<i>Fragilaria crotonensis</i>	39.3
Jun. 1	<i>Fragilaria crotonensis</i>	24.0	<i>Rhodomonas</i> sp.	17.6	<i>Microcystis</i> sp.	18.1
Jun. 2	<i>Cyclotella</i> sp.	27.9	<i>Merismopedia</i> sp.	35.7	<i>Aulacoseira granulata</i>	8.9
Jul. 1	<i>Stephanodiscus</i> sp.	58.2	<i>Rhodomonas</i> sp.	14.2	<i>Aulacoseira granulata</i>	8.9
Jul. 2	<i>Merismopedia</i> sp.	30.0	<i>Merismopedia</i> spp.	9.6	<i>Microcystis</i> sp.	45.7
Aug. 1	<i>Cyclotella</i> sp.	14.9	<i>Aulacoseira granulata</i>	15.3	<i>Microcystis</i> sp.	43.5
Aug. 2	<i>Cyclotella</i> sp.	16.9	<i>Rhodomonas</i> sp.	11.6	<i>Microcystis</i> sp.	47.8
Sep. 1	<i>Cyclotella</i> sp.	37.4	<i>Cyclotella</i> sp.	9.9	<i>Microcystis</i> sp.	40.9
Sep. 2	<i>Merismopedia</i> sp.	46.4	<i>Rhodomonas</i> sp.	43.0	<i>Pseudanabaena</i> sp.	52.0
Oct. 1	<i>Cyclotella</i> sp.	28.6	<i>Cyclotella</i> spp.	33.5	<i>Microcystis</i> sp.	15.7
Oct. 2	<i>Cyclotella</i> sp.	40.6	<i>Aulacoseira granulata</i>	45.9	<i>Stephanodiscus</i> sp.	17.6
Nov. 1	<i>Cyclotella</i> sp.	39.8	<i>Cyclotella</i> sp.	17.3	<i>Microcystis</i> sp.	16.6
Nov. 2	<i>Stephanodiscus</i> sp.	41.0	<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	38.3	<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	27.3
Dec. 1	<i>Stephanodiscus</i> sp.	58.2	<i>Stephanodiscus</i> sp.	34.0	<i>Stephanodiscus</i> sp.	47.5
Dec. 2	<i>Stephanodiscus</i> sp.	75.2	<i>Stephanodiscus</i> sp.	55.1	<i>Stephanodiscus</i> sp.	51.1

계절성을 보여주었으나 공간에 따른 차이는 Kruskal-Wallis ANOVA 차이검정 결과 통계적 유의성이 없었다. 우점종의 수온과의 상관성 분석결과 수온과 음의 상관성을 보인 것은 *Stephanodiscus* sp. 1개 종($r = -0.26$, $p < 0.01$)이었으며 나머지 7개 종은 상관계수가 0.08 ~ 0.28 범위로서 양의 상관성이 유의하게 나타냈다(Table 4). India의 Mahanadi 강에서도 오염도와 식물플랑크톤과의 상관성 연구(Unni and Pawar, 2000)에서도 우점종들이 수온과 강한 양의 상관성을 보여주었다고 하였다. 낙동강에서 *Stephanodiscus* sp.가 음의 상관성을 보인 것은 봄철 수화현상을 보이기 때문이며 저온 적응성이 강한 *Cyclotella* sp. *Fragilaria* sp. *Aulacoseira* sp. 등의 규조류가 수온과 양의 상관성을 보인 것은 이들이 남조류가 대량발생하는 하절기에도 강한 적응성을 가지기 때문이다(Monica et al., 2007). 그러나 우점종의 수온에 따른 계절성뿐만 아니라 계절성이 있는 다른 환경요인과의 상관성도 중요하게 되는데, Linda et al. (2001)은 Scotland의 Loch Leven호에서 *Aulacoseira* spp.와 윤충류인 *Trichocerca pusilla*의 상관성 연구에서 *Aulacoseira* spp.의 풍부도는 *T. pusilla*의 현존량과 밀접한 관계를 가진다고 하였으며, 때로는 이용가능한 용존규소의 농도도 강한 영향을 미친다고 하였다. 우점종들은 환경요인에

대한 반응성이 상호 다르나 자료에 한계가 있으며 낙동강에서 조류 종별 환경요인과의 반응성에 대한 추가적인 연구가 필요한 실정이다.

낙동강에서 수온 변화에 따른 우점종의 개체수 변화는 Fig. 3에 온도 분포별 box plot으로 나타내었다. *Stephanodiscus* sp.는 2~18°C의 범위에서 개체밀도가 높게 나타났고 2°C 이하에서는 2,000 cells mL⁻¹ 이하의 적은 밀도를 보였으며 2.5~5.0°C 사이에서는 20,000 cells mL⁻¹ 까지 높은 성장을 하였고 5~7°C 사이에서는 *Rhodomonas* sp.와 *Aphanizomenon flos-aquae*의 개체밀도가 높아지면서 5,000 cells mL⁻¹ 이하로 다시 감소하는 특성을 보였다. *Stephanodiscus* sp.는 8~12°C 범위에서 최대 밀도를 보여 이 시기에 봄철 수화(spring blooming) 현상이 나타났으며 수온이 12°C 이상이 되면 개체밀도는 7,000 cells mL⁻¹ 이하로 감소하였고 이때 개체밀도가 증가하는 종은 *Cyclotella* sp.와 *Fragilaria crotonensis*였다. 또한 이 시기에 동물플랑크톤 중 지각류의 성장이 높아지기 시작하였으며 요각류의 개체밀도는 대체로 적었고 윤충류는 8°C 정도에서 시작하여 지속적으로 높은 개체밀도를 보였다. 18°C 이상이 되면 *Stephanodiscus* sp.의 밀도는 대부분 1,500 cells mL⁻¹ 이하로 감소하였고 이때 *Rhodomonas* sp., *Cyclotella* sp., *Aulacoseira gran-*

Table 2. Monthly variation of dominant species in each weir in the Nakdong River from 2011 to 2013.

Month	SJ			ND			GM			CG			GG			DS			HC			CH		
	'11	'12	'13	'11	'12	'13	'11	'12	'13	'11	'12	'13	'11	'12	'13	'11	'12	'13	'11	'12	'13	'11	'12	'13
Jan. 1	○	♣	-	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣
Jan. 2	○	♣	-	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣
Feb. 1	○	♣	△	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣
Feb. 2	○	×	×	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣
Mar. 1	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Mar. 2	○	♣	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Apr. 1	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Apr. 2	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
May 1	○	♣	△	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
May 2	○	⊕	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Jun. 1	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣
Jun. 2	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣
Jul. 1	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣
Jul. 2	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣
Aug. 1	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣
Aug. 2	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣
Sep. 1	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣
Sep. 2	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣
Oct. 1	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣
Oct. 2	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣
Nov. 1	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣
Nov. 2	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣
Dec. 1	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣
Dec. 2	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣	♣

○: *Stephanodiscus* sp., □: *Cyclotella* spp., ⊙: *Aulacoseira* spp., ⊠: *Fragilaria crotonensis*, ⊡: *Fragilaria crotonensis*, ⊣: *Nitzschia* sp., ⊤: *Asterionella formosa*, △: *Achnanthes* sp., ×: *Cymbella* sp., ◆: *Microcystis* sp., ▼: *Anabaena* sp., ◇: *Aphanizomenon flos-aquae*, *: *Pseudanabaena* sp., ▣: *Oscillatoria* sp., ♡: *Merismopedia* sp., ∅: *Phormidium* sp., ⊖: *Aphanocapsa delicatissima*, ⊞: *Chlamydomonas* sp., ⊞: *Coelastrum* sp., #: *Pandorina morum*, ⊕: *Scenedesmus quadricauda*, ★: *Oedogonium* sp., △: *Rhodomonas* sp., ♡: *Peridinium* sp., “-” missing data

Table 3. Frequency and biomass ratio of dominant species in the Nakdong River from 2011 to 2013 (n=568).

Dominant species	Dominant frequency (%)	Abundance ratio (%)
<i>Stephanodiscus</i> sp.	226 (39.6)	58.6
<i>Cyclotella</i> sp.	87 (15.3)	31.1
<i>Microcystis</i> sp.	48 (8.5)	36.6
<i>Rhodomonas</i> sp.	39 (6.9)	30.6
<i>Aulacoseira granulata</i>	37 (6.5)	32.3
<i>Fragilaria crotonensis</i>	27 (4.7)	14
<i>Merismopedia</i> sp.	19 (3.3)	34.5
<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	16 (2.8)	37.6
<i>Nabucula</i> sp.	14 (2.4)	25.4
<i>Pseudanabaena</i> sp.	13 (2.3)	41.1
<i>Anabaena</i> sp.	5 (0.9)	33.8
<i>Cymbella</i> sp.	5 (0.9)	25.2
<i>Nitzschia</i> sp.	4 (0.7)	25.8
<i>Asterionella formosa</i>	4 (0.7)	37.6
<i>Oscillatoria</i> sp.	4 (0.7)	18
<i>Phormidium</i> sp.	4 (0.7)	23.6
<i>Achnanthes</i> sp.	2 (0.4)	14.4
<i>Chlamydomonas</i> sp.	2 (0.4)	43.4
<i>Coelastrum</i> sp.	2 (0.4)	31.7
<i>Oedogonium</i> sp.	2 (0.4)	59.3
<i>Pandorina morum</i>	2 (0.4)	29.6
<i>Peridinium</i> sp.	2 (0.4)	22.3
<i>Aphanocapsa delicatissima</i>	2 (0.4)	16.1
<i>Cryptomonas</i> sp.	1 (0.2)	18.6
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	1 (0.2)	10.1

ulata 등이 우점을 하고 있었다. 그동안 낙동강의 *Stephanodiscus* sp.는 하류를 중심으로 연구되었는데, Ha *et al.* (2003)은 낙동강 물금지점에서 *Stephanodiscus* sp. 현존량은 11월부터 증가하기 시작하며 1월부터 2월까지 최대치가 된다고 하였으며, 낮은 온도와 체류시간 증가에 의한 동물플랑크톤의 감소가 이들 종의 증가원인이라고 하였고 15°C 이상부터 감소하기 시작하는 것은 유량증가, 동물플랑크톤의 증가, 용존규소의 감소 등이라고 하였다. *Microcystis* sp.는 *Stephanodiscus* sp.가 약화되는 18°C부터 증가속도가 높아져 2,000 cells mL⁻¹ 이하의 개체밀도를 유지하다가 25°C 이상이 되면 10,000 cells mL⁻¹를 초과하기 시작하고 28°C 이상에서부터 현저하게 증가하여 수화현상을 나타내고 있었다. *Microcystis* sp.는 25°C 이상에서 최적으로 광합성을 하여 성장하고(Robart and Zohary, 1987; Reynolds, 2006), 30°C 이상에서는 다른 진핵생물보다 경쟁력이 우수하다. Xia *et al.* (2011)은 *Microcystis* sp.의 수화현상은 25°C 이상일 때 일어나고 최대성장율은 28~32°C일 때 일어난다고 했으며 35°C 이상에서도 뚜렷한 감소가 보이지 않았다고 했다. *Microcystis* sp.는 강한 햇빛에 적응성이 강하고 광합성을 위하여 가장 좋은 위치를 선점하는 능력 때문에(Yoshimasa, 2009) 낙동강에서 하절기에 우점하는 것으로

Table 4. Pearson's correlation coefficients among dominant species, water temperature, and accumulated radiation (n=563).

Dominant species	Correlation coefficient	
	Water temperature	Accumulated solar radiation
<i>Stephanodiscus</i> sp.	-0.26**	0
<i>Microcystis</i> sp.	0.24**	0.08
<i>Rhodomonas</i> sp.	0.22**	0.09*
<i>Cyclotella</i> spp.	0.15**	-0.08
<i>Aulacoseira</i> spp.	0.28**	-0.08
<i>Aphanizomenon flos-aquae</i> ,	0.08**	-0.05
<i>Fragilaria crotonensis</i>	0.12**	0.03
<i>Merismopedia</i> sp.	0.22**	0.08

*p value < 0.05, **p value < 0.01

판단된다. *Aphanizomenon flos-aquae*은 가을 및 겨울철의 5~15°C 범위에서 높은 성장을 이루었고 봄철 및 여름철에는 25~30°C 범위에서 밀도가 증가하여 광범위한 온도적응성을 보였다. *Aphanizomenon flos-aquae*은 높은 온도를 좋아하나 *Microcystis* sp.나 *Anabaena* sp. 밀도가 높아지면 현존량 증가속도가 감소하며 이것은 영양염 섭취 경쟁과 관련이 되는 것으로 판단이 된다(Yoshimasa, 2009).

Rhodomonas sp.는 8~26°C 수온범위에서 개체밀도가 높았으며 저온과 고온의 광범위한 영역에 적응하고 있었다. *Cyclotella* sp.는 16~27°C의 수온범위에서 높은 밀도를 보였고 27°C 이상에서는 개체수 밀도가 1,000 cells mL⁻¹ 이하로 낮아졌다. *Fragilaria crotonensis*는 0°C 내외의 저온에서도 출현을 하였으나 20~25°C 수온범위에서 높은 성장을 이루었으며 27°C 이상의 온도에서는 500 cells mL⁻¹ 이하의 낮은 밀도를 보이고 있었다. *Cyclotella* sp.와 *Fragilaria crotonensis*는 낙동강에서 모든 계절에 가장 잘 적응하는 종이였다. 그러나 Moniac *et al.* (2007)은 *Cyclotella* sp.는 환경변수에 상관성이 낮았고 *Fragilaria crotonensis*는 수리·수문 조건이나 nitrate 및 용존규소 농도 등 환경변수에 신속한 반응성을 보여 주며 변화한다고 하였다. *Aulacoseira granulata*는 12~20°C의 수온범위에서 높은 성장을 이루었다. 5°C 이상에서도 낮은 수준에서 개체밀도가 증가하기 시작하였으며 30°C 이상의 높은 수온에도 출현율이 높았다. *Merismopedia* sp.는 22~30°C 범위에서 밀도가 높게 나타났는데, 20°C까지는 출현을 거의 하지 않았으며 22°C 내외에서 출현하기 시작하여 높은 온도까지 적응을 하고 있으나 출현 개체수는 매우 불규칙한 분포를 보였다.

분석대상 식물플랑크톤 중 중에 적산일사량과 유의한 상관성을 보인 것은(r=0.09, p<0.05) *Rhodomonas* sp.

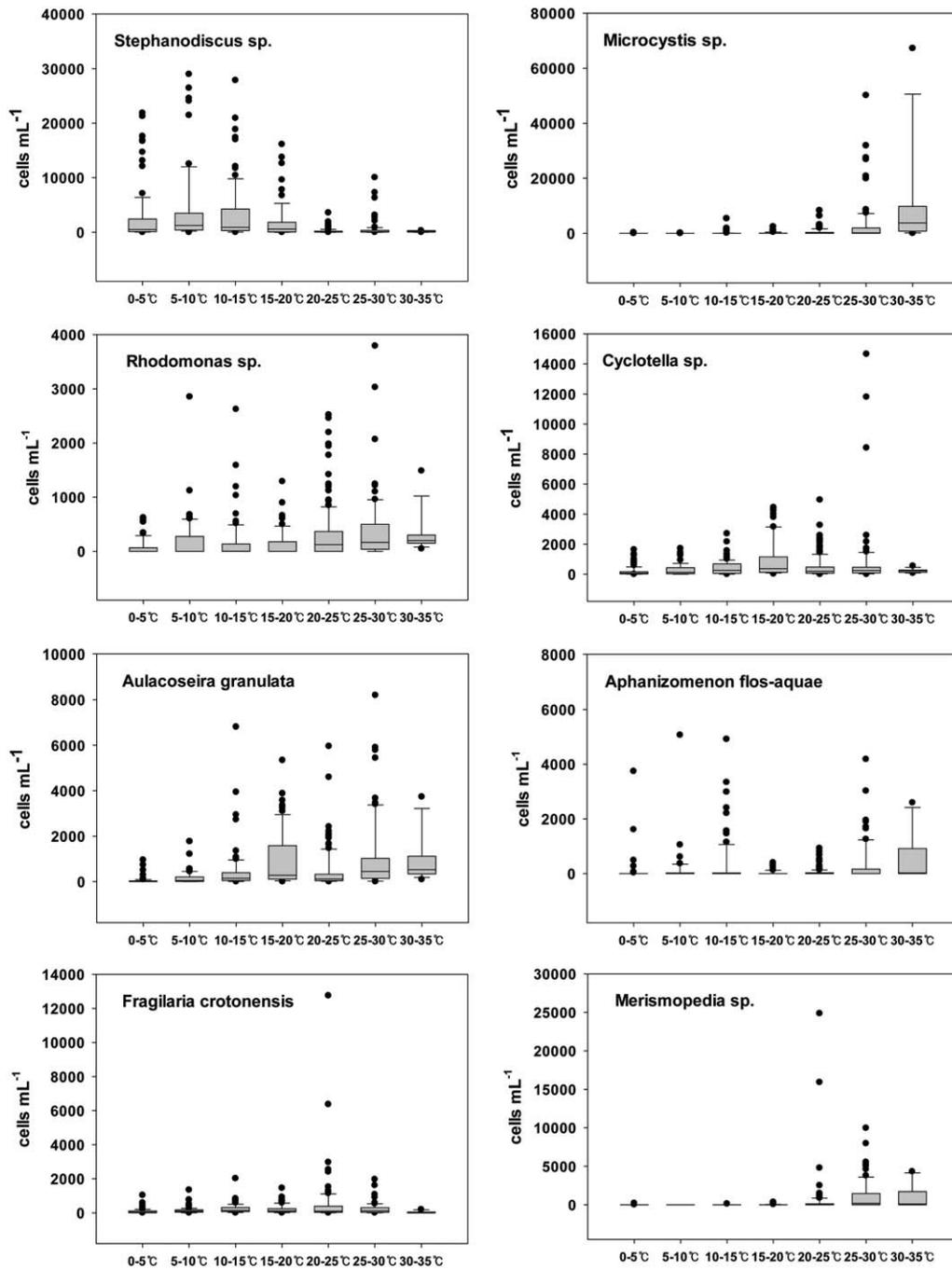


Fig. 3. Phytoplankton abundance of dominant species at different water temperatures in the Nakdong River, from 2011 to 2013 (n=72).

1개 종이었으며 (Table 4), 나머지 종은 유의한 상관성이 나타나지 않았다.

4. 주요 식물플랑크톤 우점종 상호 간 및 동물플랑크톤과의 상관성

수생태계 내에 존재하는 생물종은 공간점유, 섭식활동

등에 있어서 생물종 상호 간의 경쟁 (competition), 중립 (neutralism), 공생 (commensalism)의 상호 관계가 존재한다. 낙동강의 식물플랑크톤이 우점할 때 중간 또는 동물성플랑크톤 (Zooplankton) 상호 간에 어떠한 관계가 있는지 개체밀도의 상관성을 이용하여 알아보았다 (Table 5).

Table 5. Pearson's correlation coefficients between dominant species and zooplankton (n=576).

	STD	MCT	RDN	CTL	ASR	APZ	FGL	MMP	RTF	CPP	CLC
STD ^a	1										
MCT ^b	-0.07	1									
RDN ^c	-0.05	0.12**	1								
CTL ^d	0.02	0.03	-0.01	1							
ASR ^e	-0.12**	0.30**	0.09*	0.17**	1						
APZ ^f	-0.09*	0.18**	0.12**	0.01	0.12**	1					
FGL ^g	-0.04	-0.04	0	-0.01	0.09*	0	1				
MMP ^h	-0.06	0.16**	0.03	0.20**	0.15**	0.07	0.05	1			
RTF ⁱ	-0.04	0.07	0.20**	0.10*	0.22**	0.03	0.11**	0.11*	1		
CPP ^j	-0.11**	0.08	0.07	0.01	0.14**	0.05	0.01	0.04	0.23**	1	
CLC ^k	-0.09*	0.20**	0.30**	0	0.16**	0.18**	0.06	0.07	0.33**	0.22**	1

*p value < 0.05, **p value < 0.01,

^a*Stephanodiscus* sp., ^b*Microcystis* sp., ^c*Rhodomonas* sp., ^d*Cyclotella* spp., ^e*Aulacoseira* spp., ^f*Aphanizomenon flos-aquae*, ^g*Fragilaria crotonensis*, ^h*Merismopedia* sp., ⁱRotifera, ^jCopepoda, ^kCladocera

낙동강에서 식물플랑크톤의 천이는 *Stephanodiscus* sp.의 봄철 우점 다음에 *Aulacoseira granulata*, *Fragilaria crotonensis*, *Cyclotella* sp. 등이 주로 우점하였으나 *Stephanodiscus* sp.와의 음의 상관성이 유의하게 나타난 것은 *Aulacoseira granulata*와 *Aphanizomenon flos-aquae* 등 2개 종이였다 (Table 5). 그러나 이들 2개 종은 수온과 양의 상관성을 보이고 있으며 따라서 낙동강에서 이들이 *Stephanodiscus* sp.와 상호 억제적 경쟁 (mutual inhibition competition) 관계에 있는지는 명확하지 않으나 *Aulacoseira granulata*는 *Stephanodiscus* sp. 수화 종료 시기에 우점하는 대표종이라 할 수 있다. *Stephanodiscus* sp.와 음의 상관성을 나타낸 동물성플랑크톤은 요각류 ($r = -0.11$, $p < 0.01$)와 지각류 ($r = -0.09$, $p < 0.05$)였다. 이들 생물종도 수온과 양의 상관성이 유의하게 나타나고 있어 *Stephanodiscus* sp.와의 음의 상관성이 환경요인에 의한 것인지 섭식자, 피식자 관계에 의한 상호 억제 경쟁관계에 있는지 명확하지 않다. 그러나 율충류도 수온과의 양의 상관성이 강했으나 ($r = 0.30$, $p < 0.01$) *Stephanodiscus* sp.와는 상관성이 유의하게 나타나지 않은 것으로 보아 요각류와 지각류가 *Stephanodiscus* sp.의 성장억제에 어느 정도 기여하고 있을 것으로 추정된다. *Microcystis* sp.는 다른 우점종과 대부분 양의 상관성으로 나타나고 있었는데 이는 *Microcystis* sp.는 고수온기에 고밀도로 성장하며 이 시기는 다른 종의 성장도 왕성하기 때문인 것으로 추정이 된다. Table 2에서 보는 바와 같이 *Microcystis* sp.의 현존량 우점율이 비교적 낮으며, 이는 *Microcystis* sp.의 증식이 다른 생물종의 성장에 영향이 적을 것으로 추정이 되나 우점율이 84.3%로 나타난 2013년 8월의 강정보에서 식물플랑크톤의 총 출현 종 수는 15종으로 평균치보다 낮았으며, 따라서 *Micro-*

cystis sp.의 대량증식은 다른 종의 성장에 영향을 미칠 것으로 보인다. *Microcystis* sp.가 지각류와는 양의 상관성이 유의하게 나타났으며 ($r = 0.20$, $p < 0.01$), 율충류와 요각류와는 상관성이 유의하지 않았다. 이는 이들 생물종이 유해조류로 알려진 (Qiu *et al.*, 2002; Orr *et al.*, 2004) *Microcystis* sp.를 섭식에 의해 개체밀도를 억제시키는 효과가 약한 것으로 추정이 되며 이에 대한 정확한 메카니즘의 연구가 필요하다고 하겠다. 기타 우점종 상호 간에 음의 상관성이 유의하게 분석된 식물플랑크톤종은 없었다. 이번 분석대상 우점종 중 동물성플랑크톤과 음의 상관성이 유의하게 나타난 것은 *Stephanodiscus* sp. 뿐이었다. 식물플랑크톤의 천이에 있어서 우점종 상호 간의 생물학적 영향에 대해서는 아직 밝혀진 것이 없어 이에 대한 보다 많은 연구가 필요한 실정이다. Christopher *et al.* (2014)는 부영양 호소에서 식물플랑크톤의 우점과 동물플랑크톤 현존량과의 관계에 대한 연구에서 남조류의 우점은 생태계 기능 및 군집의 역전에 중요한 역할을 한다고 했으며, Jing *et al.* (2013)은 남조류의 밀도가 상승하면 동물플랑크톤의 생체 크기가 작게 되는 등 동물플랑크톤의 군집의 형태에 영향을 준다고 했다. Linda *et al.* (2001)은 *Trichocerca pusilla*의 현존량은 *Aulacoseira* spp.의 현존량이 높아지면 높아지나 그러나 이러한 현상이 항상 일치하는 것은 아니라고 하였다. Chang *et al.* (2014)은 동물플랑크톤의 계절적 천이는 물리적으로 수온, 강수량의 영향인 것으로 추정을 하지만 이용가능 먹이와 조성 등 생물학적 영향은 아직 분명한 것이 없으며 논쟁 중이라고 했다. 따라서 낙동강에서는 생물종 상호 간의 관계가 종의 천이에 어떠한 영향을 미치는지 보다 정밀한 연구가 필요하다고 하겠다.

적 요

본 연구에서는 낙동강의 상주보에서부터 합천창녕보까지의 8개에 보에 대해 2011년부터 2013년 까지의 수온, 적산일사량, 영양염 농도, 식물플랑크톤 군집분포, 기타 수질조사 결과를 이용하여 식물플랑크톤 우점종의 천이특성과 수온과의 상관성, 우점종 상호 간의 영향 등에 대해 고찰하였다. 8개 보 단위의 별 우점종 평가에 있어 총 25개 종이 우점하고 있었다. 봄철에 대발생하는 *Stephanodiscus* sp.는 우점빈도가 39.4%로서 가장 높았으며 현존량 우점율은 58.6%였다. 여름철에 대발생하는 *Microcystis* sp.의 우점빈도는 8.5%였고 현존량 우점율은 36.6%였다. 8개 조사지점의 수온차이는 평균 1.83°C로서 지점별 차이는 통계적으로 유의하지 않았다. 분석대상 우점종 중 수온과 음의 상관성을 보인 것은 *Stephanodiscus* sp. 1개 종($r = -0.26, p < 0.01$)이었으며 나머지 7개 종은 양의 상관성이 유의하게 나타냈다($r = 0.08 \sim 0.28$). *Stephanodiscus* sp.는 2~18°C의 수온범위에서 높은 개체밀도를 보였고 2°C 이하에서는 2,000 cells ml⁻¹ 이하의 적은 개체밀도를 보였다. *Stephanodiscus* sp.의 봄철 수화현상 다음에 우점하는 종은 *Aulacoseira granulata*, *Fragilaria crotonensis*, *Cyclotella* sp. 등이었으며, *Microcystis* sp.는 *Stephanodiscus* sp.의 개체밀도가 감소되는 18°C 정도에서 개체수 증가속도가 높아졌으며, 수온이 25°C 이상이 되면 10,000 cells mL⁻¹를 초과하기 시작하고 28°C 이상에서부터 현저하게 증가하여 수화현상이 나타났다. 낙동강에서 광범위한 수온 영역에 적응하고 있는 종은 *Cyclotella* sp., *Aulacoseira granulata*, *Fragilaria crotonensis* 등이었다. 적산일사량과 유의한 상관성을 보인 것은 *Aulacoseira granulata* 1개 종이었다.

Stephanodiscus sp.는 분석대상 우점종 중에 *Aulacoseira granulata* 및 *Aphanizomenon flos-aquae* 종과의 상관계수가 각각 -0.12 및 -0.09로서 ($p < 0.05$) 음의 상관성이 유의하게 나타났다. *Stephanodiscus* sp.는 동물성플랑크톤의 요각류($r = -0.11, p < 0.01$), 지각류($r = -0.09, p < 0.05$) 등과 음이 상관성이 유의하게 나타났다. 따라서 *Stephanodiscus* sp.는 낙동강에서 동물성플랑크톤의 중요한 섭식원이 되고 있을 것으로 추정된다. 여름철 최대 우점종인 *Microcystis* sp.는 음의 상관성을 나타낸 다른 우점종은 없었다.

사 사

본 연구는 낙동강수계관리위원회의 낙동강수계 환경기초조사사업으로 추진하는 “낙동강수계 보 구간 수생태계 모니터링”사업(2010~2013)의 결과를 반영하여 작성되었으며 이에 감사를 드립니다.

REFERENCES

- Boyce, D.G., M.R. Lewis and B. Worm. 2010. Global phytoplankton decline over the past century. *Nature* **466**: 591-596.
- Burgmer, T. and H. Hillebrand. 2011. Temperature mean and variance alter phytoplankton biomass and biodiversity in a long-term microcosm experiment. *Oikos* **120**(6): 922-933.
- Chang, C.W., F.K. Shiah, J.T. Wu, T. Miki and C.H. Hsieh. 2014. The role of food availability and phytoplankton community dynamics in the seasonal succession of zooplankton community in a subtropical reservoir. *Limnologia* **46**: 131-138.
- Christopher, T.F., H. Hillebrand, J. Adam, W. Heathcote, H. Stanley and A. Downing. 2014. Cyanobacteria dominance influences resource use efficiency and community turnover in phytoplankton and zooplankton communities. *Ecology Letters* **17**: 464-474.
- Chung, J., H.S. Kim and Y.J. Kim. 1994. Structure of phytoplankton community in the Nakdong River Estuary Dam. *Korean Journal of Limnology* **27**(1): 33-46.
- Heisler, J.P., J. Gilbert, J. Burkholder, D. Anderson, W. Cochlan, W. Dennison, Q. Dortch, C.J. Gobler, C. Heil, E. Humphries, A. Lewitus, R. Magnien, H. Marshall, K. Sellner, D. Stockwell and M. Suddleson. 2008. Eutrophication and harmful algal blooms: ascientific consensus. *Harmful Algae* **8**: 3-13.
- IPCC. 2007. A report of working group 1 of the intergovernmental panel on climate change. Summary for policymakers and technical summary.
- Jing, Z., X. Ping, T. Min, G. Longgen, C. Jun, L. Li, X.Z. Zhang and L. Zhang. 2013. The impact of fish predation and cyanobacteria on zooplankton size structure in 96 subtropical lakes. *PLOS ONE* **8**(10): 1-15.
- Joung, S.H., H.K. Park and S.H. Lee. 2013. Effect of climate change for diatom bloom at winter and spring season in Mulegeum station of the Nakdong River, South Korea. *Korean Society of Water Environment* **29**(2): 155-164.
- Karl, E.H., R.T. Janes, T.L. East and V.H. Smith. 2003. N:P ratios, light limitation, and cyanobacterial dominance in a subtropical lake impacted by non-point source nutrient pollution. *Environmental Pollution* **122**: 379-390.

- Monica, T., F. Corradini, A. Boscaini and D. Calliari. 2007. Weather-driven ecology of planktonic diatoms in Lake Tovel (Trentino, Italy). *Hydrobiologia* **578**: 147-156.
- Moon, S.G., J.M. Chung and C.M. Choi. 2001. The structure of phytoplankton community in the middle-lower part of the Nakdong River. *Korean Environmental Sciences Society* **10**(1): 41-45.
- Moran, X.A.G., L.U. Angel, C.D. Alejandra and W.K.W. Li. 2011. Increasing importance of small phytoplankton in a warmer ocean. *Global Change Biology* **16**(3): 1137-1144.
- Nilssen, J.P. 1984. Trophic lakes-functional ecology and future development: the need for a process-orientated approach. *Hydrobiologia* **113**: 231-242.
- Orr, P.T., G.J. Jones and G.B. Douglas. 2004. Response of cultured *Microcystis aeruginosa* from the Swan river Australia, to elevated salt concentration and consequences for bloom and toxin management in estuaries. *Marine Freshwater Resources* **55**: 277-283.
- Qiu, B.S. and K.S. Gao. 2002. Effects of CO₂ enrichment on the bloom-forming cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* (Cyanophyceae): physiological responses and relationships with the availability of dissolved inorganic carbon. *Journal of Phycology* **38**: 721-729.
- Raben, J.A. and R.J. Geider. 1988. Temperature and algal growth. *New Phytologist* **110**: 441-461.
- Reynolds, C.S. 1987. The response of phytoplankton communities to changing lake environments. *Aquatic Sciences* **49**: 220-236.
- Robarts, R.D. and T. Zohary. 1987. Temperature effects on photosynthetic capacity, respiration, and growth rates of bloom-forming cyanobacteria, New Zeal. *Journal of Marine & Freshwater Research* **21**: 391-399.
- Son, H.J. 2013. Changes of dominant phytoplankton community in downstream of the Nakdong river: from 2002 to 2012. *Korean Society of Environmental Engineers* **35**(4): 289-293.
- Son, H.J. 2013. The analysis of phytoplankton community structure in the middle-lower part of the Nakdong River. *Korean Society of Environmental Engineers* **35**(6): 430-435.
- Unni, K.S. and S. Pawar. 2000. The phytoplankton along a pollution in the river Mahanadi (M.P. state) India-multivariate approach. *Hydrobiologia* **430**: 87-96.
- Vogel, S. 1996. Life in moving fluids: The physical biology of flow. Princeton Univ. Press. Princeton, NJ : 84.
- Xia, L., X. Lu and C. Yuwei. 2011. The effects of temperature and nutrient ratios on *Microcystis* blooms in Lake Taihu, China: An 11-year investigation. *Harmful Algae* **10**: 337-343.
- Xin, W., H. Chunbo, Z. Feng, F. Chuanping and Y. Yingnan. 2011. Inhibition of the growth of two blue-green algae species (*Microcystis aeruginosa* and *Anabaena spiroides*) by acidification treatments using carbon dioxide. *Biore-source Technology* **102**: 5742-5748.
- Yoshida, T., M. Kagami, G.T. Bahadur and J. Urabe. 2001. Seasonal succession of zooplankton in the north basin of Lake Biwa. *Aquatic Ecology* **35**: 19-29.
- Yoshimasa, Y. 2009. Environmental factors that determine the occurrence and seasonal dynamics of *Aphanizomenon flos-aquae*. *Journal of Limnology* **68**(1): 122-132.
- Zohary, T., J. Erez, M. Gophen, F.I. Berman and M. Stiller. 1994. Seasonality of stable carbon isotopes within the pelagic food web of Lake Kinneret. *Limnology and Oceanography* **39**: 1030-1043.