

서낙동강에서 플랑크톤 번성이 TOC에 미치는 영향 관계 연구

이유정[†] · 최성화 · 정경원 · 박정옥 · 조정구
물환경생태과

Dynamics of TOC Affected by Plankton Communities in the SeoNakdong River, Busan

Lee You-jung[†], Choi Seong-hwa, Jung Kyung-won, Park Jung-ok, Cho Jung-goo
Aquatic Environment & Ecology Division

Abstract

Total organic matter is one of the important factors to manage riverine system and is composed with autothchonous organic matter and allochthonous organic matter. The composition and carbon biomass of plankton taxonomic groups contribute mainly to the autothchonous organic matter in the reservoirs or lakes. In this study, temporal variation of physicochemical parameters-DO, T-N, T-P, TOC and chlorophyll concentration and plankton taxonomic groups and community were investigated in reservoir-river, Seonakdong river from January to December, 2014. *Stephanodiscus hantzschii*, Bacillariophyceae, dominated in winter and chlorophyll concentration was low because of above 50 of N/P ratio. In spring, rotifera of zooplankton community grew rapidly and phytoplankton composition decreased. *Microcystis aeruginosa*, Cyanophyceae, flourished to water bloom from May to September. The correlation of TOC and chlorophyll was low to $r=0.416(p<0.05)$ in 2014 but during cyanobacterial water bloom in summer, indicated to high $r=0.985(p<0.02)$. TOC was affected by Cyanophyceae during water bloom in summer before strong rainfall. Our results illustrate that plankton taxonomic groups and carbon biomass respond quickly to hydrological, meteorological and trophic changes and affect autothchonous organic matter of TOC concentration.

Key Words : TOC, Chl-*a* concentration, plankton carbon biomass, SeoNakdong river

서 론

물 속의 부유하거나 침전되는 유기물질은 기원에 따라 유역에서 유입되는 외부기원유기물(allochthonous organic matter)과 식물플랑크톤, 부착조류 및 수생식물 등에 의한 내부에서 생산되는 내부생성유기물(autothchonous organic matter)로 나눌 수 있다. 이 중 내부생성유기물은 일반적으로 정체수역을 이루는 호수, 하천 하류 및 하구연 등에서 수중 생물의 1차 생산에 주로 기인한다^{1),2),3)}. 또한, 수계로 유입된 유기물은 분해 특성에 따라

생분해성(biodegradable)과 난분해성(refractory)으로 구분되는데 분해가 잘 일어나는 생분해성은 주로 아미노산과 단백질, 탄수화물 등의 저분자 물질로 구성되어 박테리아에 의해 분해가 용이하나 난분해성은 주로 분해가 어려운 부식물질(humic substance)로 구성되어 있으며 토양과 수체 내에 약 70 % ~ 80 %를 차지한다^{4),5)}. 즉 수 중 유기물은 유역의 특성, 계절적 영향 및 영양상태 등에 의해 구성 비율이 다르게 나타난다. 수체의 체류시간이 길거나 부영양화가 진행될수록 전체 유기물 부하 중 1차 생산에 의한 생분해성 유기물의 기여도가 높을 수 있으나 강우시에는 유역으로부터 유입된 난분해성 유기물질

[†] Corresponding author, E-mail : youjung202@korea.kr
Tel : +82-51-309-2938, Fax : 82-51-309-2969

의 기여도가 증가할 수 있다.

플랑크톤은 수생태계 먹이망의 1차 단계에 기여하며 생태계 전체의 생물 활동에 쓰이는 에너지와 물질을 근본적으로 제공하고 있다^(6,7). 플랑크톤 군집의 구성과 군집구조는 주변 환경의 물리화학적 변화에 민감하게 반응하기 때문에 수생태계의 상태를 반영해주는 생물학적 지표로 이용되고 있다^(8,9,10). 따라서, 수체의 부영양화가 심화되거나 환경 조건의 변화에 동식물플랑크톤의 번성 정도가 달라지며 내부생성유기물량에 많은 영향을 미친다⁽¹¹⁾.

서낙동강은 상하류의 수문에 의해 23.84일의 긴 체류시간으로 물의 자유로운 흐름이 방해받아 수체가 정체되고 부영양화가 심한 호소형 하천이다. 이에 서낙동강에 대한 연구는 다양하게 이루어졌다. 강의 부영양화와 정체수역 특성에 따른 수질의 동태^(12,13,14), 중금속 분포^(15,16,17), 플랑크톤 군집과 대변성^(18,19), 수생식물^(20,21), 수질 개선 방안⁽²²⁾ 등에 관해 많은 연구가 되었다. 하지만 서낙동강에 대한 유기물 거동이나 내부 또는 외부기원유기물질에 대한 연구가 미흡한 실정이다. 또한, 국내에서는 플랑크톤의 시공간적 분포 특성을 위주로 한 연구가 활발히 진행되고 있으나^(23,24,25,26,27,28) 플랑크톤 생체량의 유기물 기여도에 대한 연구는 거의 보고되지 않았다.

따라서, 본 연구는 환경변화를 반영하고 있는 동식물플랑크톤의 종 조성 및 군집을 조사하여 탄소 생물량으로 환산하였고 분석된 TOC 농도를 이용하여 플랑크톤에 의한 내부생성유기물에 대한 기여도를 파악함으로써 수체의 수질 관리에 대한 기본 자료가 될 수 있고 수질 관리 목표 설정에 중요한 판단 기준을 제공하고자 하는 데 그 목적이 있다.

재료 및 방법

연구대상 개요

서낙동강은 상류에 대저수문과 하류에 녹산수문이 위치하여 하천의 흐름이 원활하지 못하고 정체수역이 형성되는 호소형 하천이다. 서낙동강 유역은 맥도강, 평강천 등의 국가 하천과 조만강, 신어천 등의 15개 지방 하천으로 유역을 형성하고 있으며 유역면적은 303.09 km², 유로연장 18.5 km, 유역 폭은 최대거리 동서 약 19.8 km, 남북 약 19.5 km로 원형에 가까운 형태를 나타내고 있으며 이 외에도 자연적으로 형성된 소하천과 농업용수용 농수로가 복잡하게 형성되어 있다⁽²⁹⁾. 본 연구에서는 서낙동강 상류에서 하류까지 본류 내 3개 지점을 선정하여 조사하였으며 자세한 위치는 Fig. 1과 같다.

물리화학적 환경요인

모든 시료는 2014년 1월부터 12월까지 월 1회로 총 12회에 걸쳐 표층에서 채수하였다. 채취한 시료는 현장측정기(YSI 556MPS, USA)를 이용하여 수온, 용존산소(DO) 등을 현장에서 측정하였고 4℃이하의 냉암조건에 보관하여 실험실로 운반하였다. 수질오염공정시험기준⁽³⁰⁾, Limnological Analyses⁽³¹⁾, Standard Method⁽³²⁾에 준하여 총유기탄탄소(TOC), 총질소(T-N), 총인(T-P), 클로로필-a를 분석하였다. TOC는 TOC analyzer(TOC-L, Shimadzu, Japan)를 이용하여 비정화성 유기탄소법으로 분석하였고 T-N과 T-P는 연속흐름에 의한 측정법(AACS-V, BLTEC)으로 측정하였으며 클로로필-a 농도는 90% 아세트용액에서 엽록소를 추출하여 UV-Spectrophotometer(UV-2450, Shimadzu, Japan)으로 측정된 흡광도를

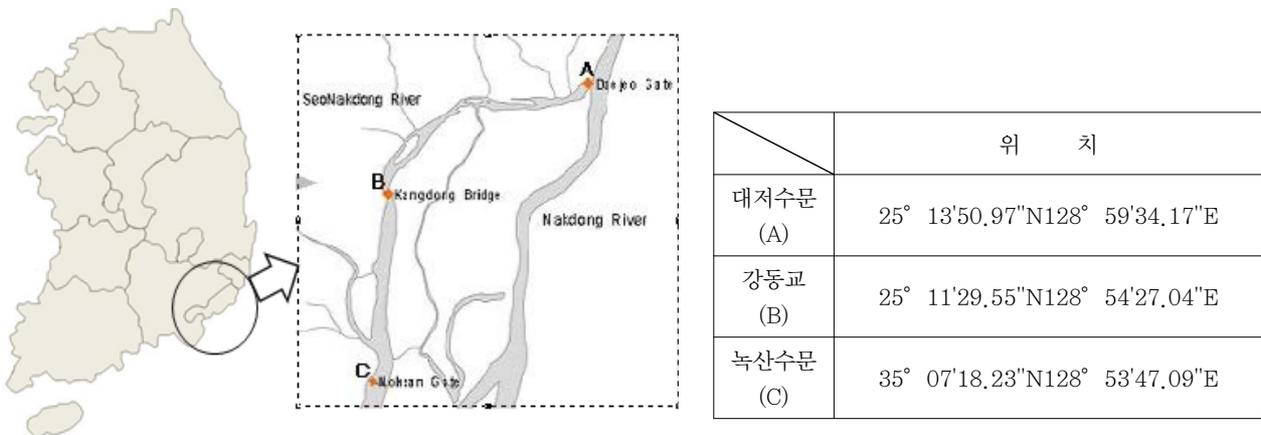


Fig. 1. Map of study sites in the SeoNakdong river.

얻어 계산하였다. 강수량은 국가 수자원관리 종합시스템²⁹⁾ 및 기상청³³⁾에 게재된 운영정보 자료를 참고하였다.

동식물플랑크톤 군집 조사

동식물플랑크톤은 표층수 2 L를 채수하여 Lugol 용액으로 고정한 후 10 μm -pore size 체로 걸러 20 mL로 농축하였다. 이 후 균질한 농축 시료 1mL을 Sedgwick-Rafter counting chamber에 넣고 광학현미경(AXIO imager A2, ZEISS, Germany)으로 200배 ~ 400배을 하에 가능한 모든 플랑크톤을 동정하였다. 식물플랑크톤의 종 구성과 군집은 남조류, 규조류, 녹조류, 편모조류로 분류하여 한국담수조류도감³⁴⁾, Freshwater algae of North America³⁵⁾, <http://www.algaebase.org>³⁶⁾를 참고하여 동정하고 계수하였다. 식물플랑크톤의 탄소생물량은 동정시 출현종의 모양과 사이즈를 측정하여 Kellar *et al.*(1980)³⁷⁾, Helmut(1999)³⁸⁾, Jun *et al.*(2003)³⁹⁾이 제시한 공식으로 세포체적(V , μm^3)을 계산하였고 호소환경조사지침⁴⁰⁾, Strathmann(1967)⁴¹⁾에 의해 제시된 식에 세포체적을 탄소량($\mu\text{g C/L}$)으로 환산하였다. 동물플랑크톤은 윤충류, 지각류, 요각류로 구분하여 한국담수동물플랑크톤도감⁴²⁾, Balcer *et al.*(1984)⁴³⁾, Edward(1984)⁴⁴⁾에 따라 동정된 출현종의 모양과 사이즈를 측정하였다. 윤충류는 Downing and Rigler(1984)⁴⁵⁾, Edward(1984)⁴⁴⁾에 의한 식으로 체적(V , μm^3)을 계산한 후 비중 1.025로 가정하여 습중량을 구하고 습중량의 10 %를 건중량으로 하였다. 그러나 윤충류 *Asplanchna*는 다른 종에 비해 수분함량이 많아 습중량의 4 %를 건중량으로 하였다⁴⁶⁾. 지각류와 요각류의 건중량은 Length-Dry weight 관계식으로 계산하였다⁴⁷⁾. 동물플랑크톤의 탄소생물량($\mu\text{g C/L}$)은 동물플랑크톤 건중량의 48 %로 구하였다⁴⁸⁾.

분석 자료의 처리

조사된 결과들의 도표는 SigmaPlot (10.0 for Windows)을 이용하였고, 각 조사 항목 간의 상관관계 분석은 Pearson's correlation analysis로 통계적 유의성은 $P < 0.05$ 을 기준으로 평가하였다.(SPSS 10.0)

결과 및 고찰

물리화학적 환경 요인

조사 기간 동안의 물리화학적 환경요인은 Fig. 2에 나타

났다. 강수량은 1693.1 mm로 평년(1981년 ~ 2010년) 1519.1 mm보다 많았고 계절적으로 여름철에 연강수량의 약 51 %로 평년과 유사하였으나, 8월에 642.2 mm로 연강수량의 약 38 %를 차지하는 집중 강우현상이 있었다. 수온은 각 조사지점간의 큰 차이를 보이지 않았고 1월에 2.5 $^{\circ}\text{C}$ 로 가장 낮았고 7월 ~ 9월에 25 $^{\circ}\text{C}$ 이상으로 높게 조사되었다. 용존산소(DO)는 저수온기인 1월~3월, 12월에 높았고 고수온기인 6월 ~ 9월에 낮았다. 총유기탄소(TOC)는 평균 (3.6 \pm 1.3) mg/L였으며 4월과 6월 ~ 8월에 높게 나타났다. 영양염류는 계절적 변동을 뚜렷하게 반영하지 못하였으며 총질소(T-N)는 평균 (2.601 \pm 0.85) mg/L였으며 6월 ~ 8월에 다른 시기에 비해 낮았으나 총인(T-P)는 평균 (0.098 \pm 0.17) mg/L로 T-N 분포와 달리 여름철인 6월 ~ 8월에 높게 조사되었다.

N/P ratio는 1월에 286으로 가장 높았고 8월과 10월 10 미만으로 나타났다. N/P < 10이면 질소가 조류생장 제한인자이고 N/P > 10이면 인이 조류생장 제한인자임을 고려하면 서낙동강은 8월과 10월을 제외하고는 영양염류 중 인이 주요 조류생장 제한 인자인 것으로 판단할 수 있었다. 클로로필-*a* 농도는 여름철인 6월과 7월에 가장 높게 조사되었다.(Fig. 3) 일반적으로 서낙동강은 주로 겨울철에 높은 농도의 클로로필-*a* 농도가 보고되는 것과 달리^{25), 26), 27), 28), 49)} 본 연구에서는 수온이 낮은 1월 ~ 2월에 클로로필-*a* 농도가 낮은 이유는 다른 물리화학적 환경요인보다 N/P ratio가 50 이상으로 인이 조류 생장 제한요인으로 작용했기 때문인 것으로 판단된다.

동식물플랑크톤 종 구성 및 군집 변화

식물플랑크톤의 현존량에 의한 종구성 및 군집 구조는 Fig. 4에 나타났다. 수온이 상승하는 시기인 여름철에 남조류가 우점하였고 연중 규조류, 녹조류가 출현하였다. 1월 ~ 3월에 규조류 *Stephanodiscus hantzschii*, *Synedra acus*, *Cyclotella meneghiniana* 등이 0.7 \pm 0.06의 높은 우점을 나타낸 후 5월~9월에 남조류 *Microcystis aeruginosa*, *Microcystis wagenbergii* 등이 0.5 \pm 0.10로 우점하였으나 이 밖에 *Aulacoseira italica*, *Aulacoseira granulata f. spiralis*, *Fragillaria crotonensis* 등이 조사되었다.(표 1) 동물플랑크톤은 윤충류가 연중 출현하여 우점도지수 0.5 \pm 0.10으로 조사되었으며 *Brachionus calyciflorus*, *Polyarthra euryptera*, *Keratella cochlearis*, *Trichocerca capucina*가 주로 나타났다. 4월, 5월과 11월에 지각류인 *Bosmina longirostris*가 일시적으로 증가하였으며 요각류인 Nauplius와 *Cyclops*

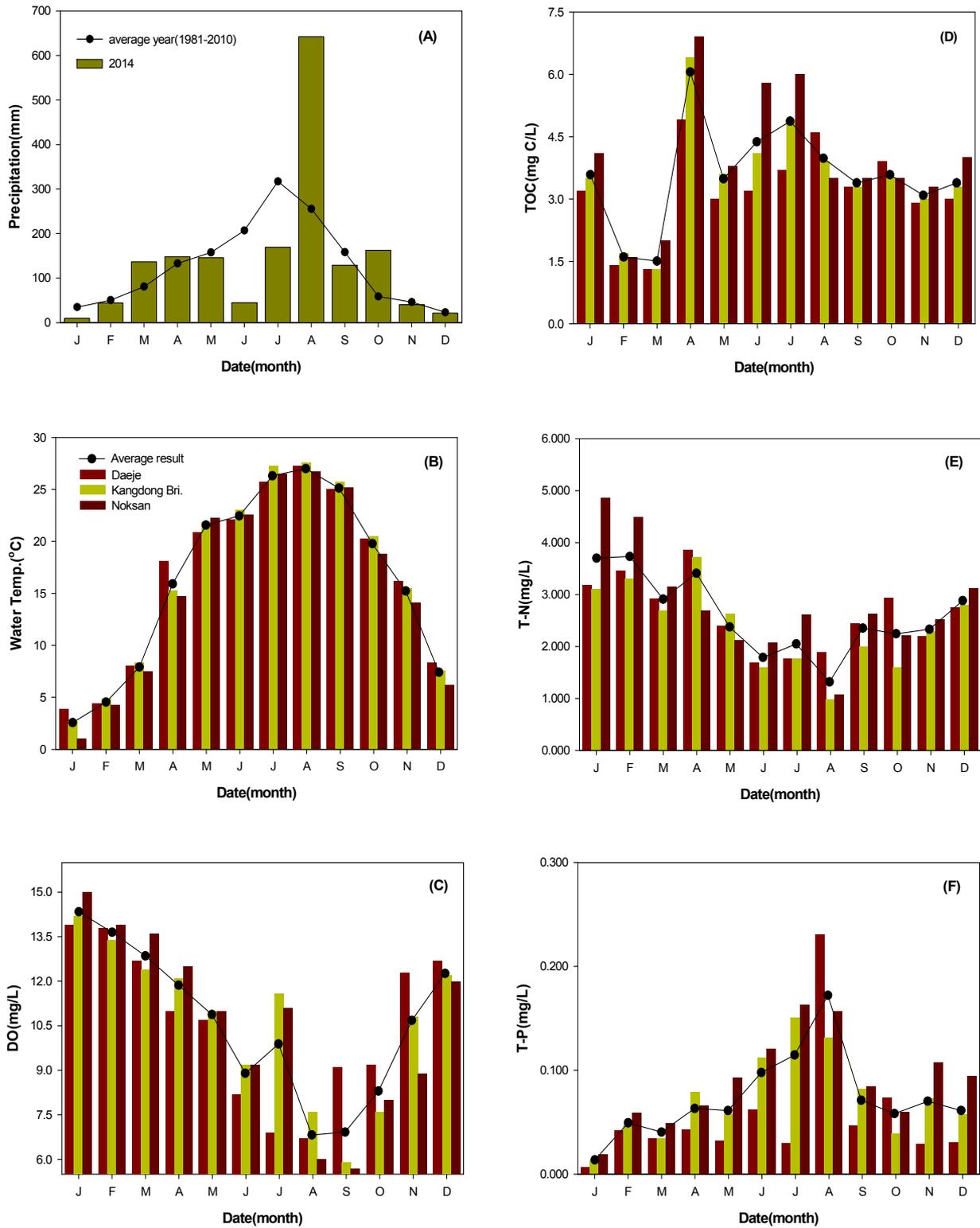


Fig. 2. Temporal variation in Precipitation(A), Water temperature(B), DO(C), TOC(D) T-N(E) and T-P(F) at station Daejea, Kangdong Bri. and Noksan.

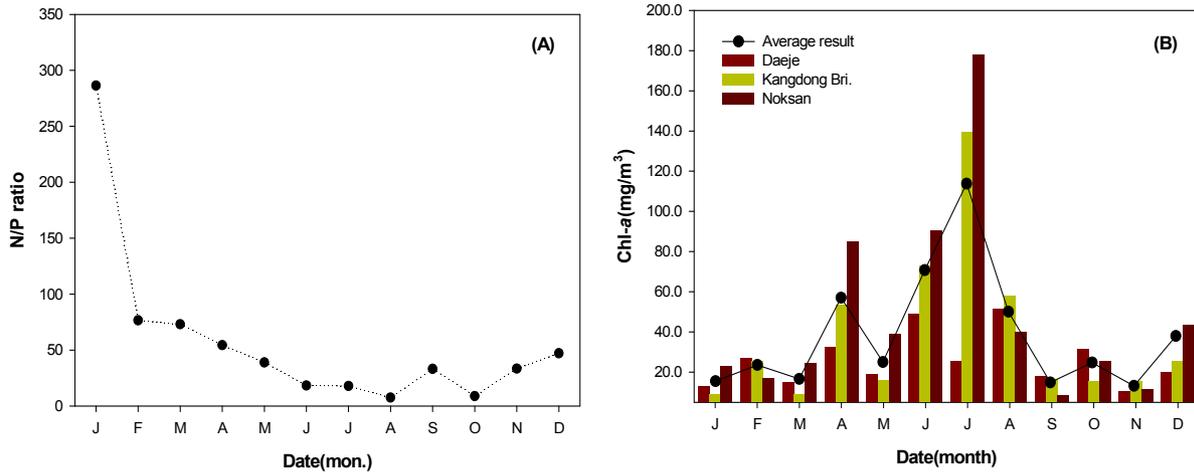


Fig. 3. Temporal variation in N/P ratio(A) and Chl-a(B) at station Daejea, Kangdong Bri, and Noksan.

속이 조사되었으나 20% 미만의 낮은 비율을 차지하였다.(Fig. 5) 동물플랑크톤의 군집이 특히 4월 ~ 5월과 9 ~ 11월에 증가할 때 식물플랑크톤의 현존량은 급격히 감소하는 것을 볼 수 있었으며 이는 Wetzel (2001)²⁾에서 보였던 동물플랑크톤의 식물플랑크톤에 대한 섭식활동으로 일시적 청수현상(Clear Water Phase)을 일으키는 것과 동일한 현상이 일어나는 것으로 볼 수 있었다.(Fig. 6)

탄소 생물량에 의한 동식물플랑크톤의 우점 비율은 현존량에 의한 우점종과 다소 달랐으며 이는 김 등(2005)⁵⁰⁾와 엄 등(2006)⁵¹⁾의 연구와 유사한 결과였다.(표 2) 식물플랑크톤의 경우, 1월 ~ 4월, 12월에 규조류 *Stephanodiscus hantzschii*, *Synedra acus*, *Synedra ulna*, *Aulacoseira italica*, *Cyclotella meneghiniana*가 우점하여 현존량에 의한 우점종과 유사하였으나 이후

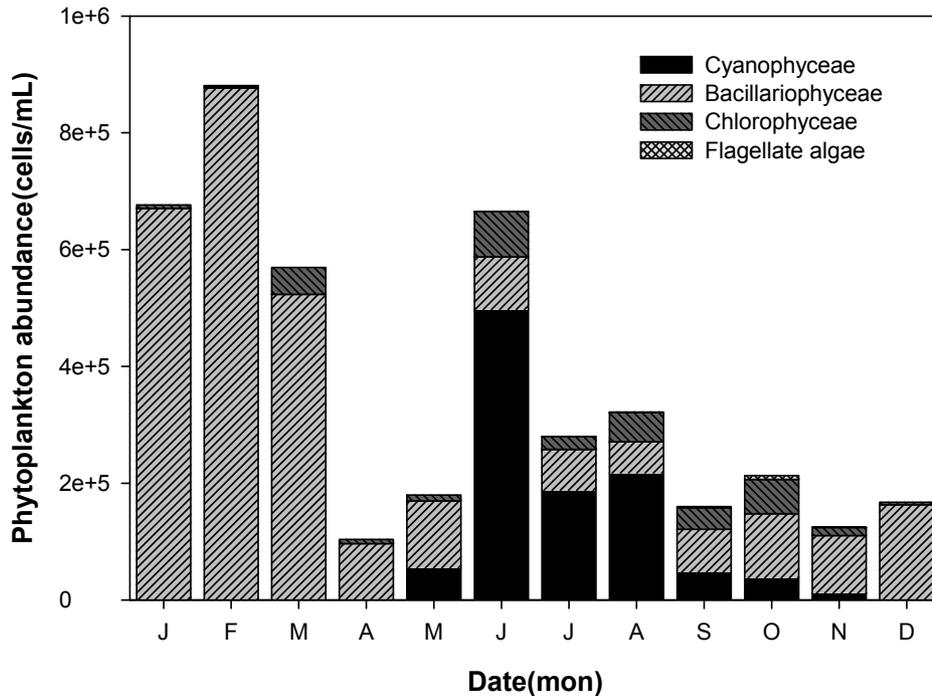


Fig. 4. Temporal variation of phytoplankton community abundance in SeoNakdong river in 2014.

5월 ~ 11월까지 남조류 *Microcystis aeruginosa*, *Anabaena flos-aquae*, *Anabaena spiroides*, *Microcystis wegenbergii* 등이 지속적으로 나타나면서 우점을 보였다. 동물플랑크톤은 현존량에 의한 우점종 구

성과 상당히 달리 지각류 *Bosmina longirostris*와 요각류 *Cyclops* 속이 연중 높게 나타났으며 개체 밀도에 비해 소형인 윤충류 *Polyarthra euryptera*, *Keratella cochlearis*가 6월과 8월, 12월에 높게 조사되었다.

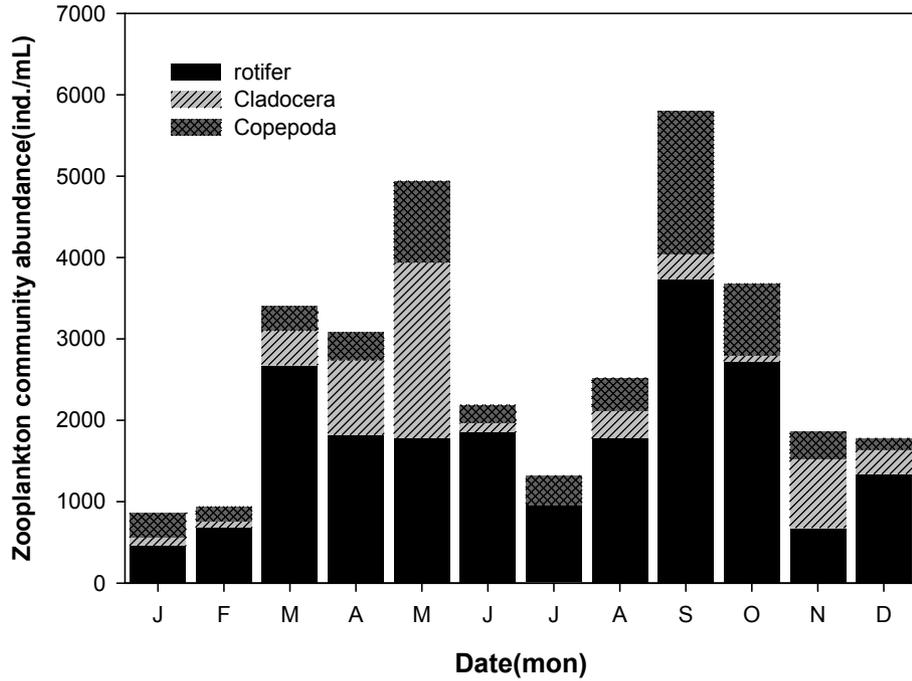


Fig. 5. Temporal variation of zooplankton community abundance in SeoNakdong river in 2014.

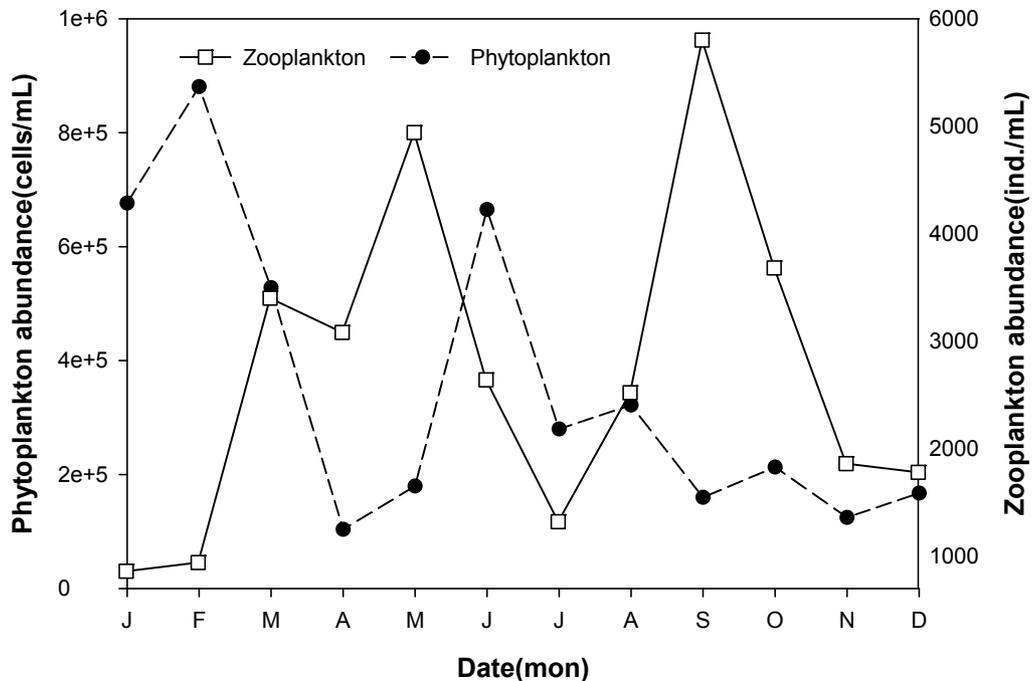


Fig. 6. Comparison between phytoplankton abundance and zooplankton abundance.

Table 1. Zooplankton and phytoplankton abundances of dominant species in the SeoNakdong river from Jan. to Dec., 2014

	The 1 st dominant species(%)		The 2 nd dominant species(%)	
	Phytoplankton	Zooplankton	Phytoplankton	Zooplankton
Jan.	<i>Stephanodiscus hantzschii</i> (79%)	<i>Polyarthra euryptera</i> (28%)	<i>Cyclotella meneghiniana</i> (4%)	Nauplius(23%)
Feb.	<i>Stephanodiscus hantzschii</i> (59%)	<i>Brachionus calyciflorus</i> (21%)	<i>Synedra acus</i> (13%)	<i>Polyarthra euryptera</i> (21%)
Mar.	<i>Stephanodiscus hantzschii</i> (66%)	<i>Polyarthra euryptera</i> (42%)	<i>Synedra acus</i> (18%)	<i>Brachionus calyciflorus</i> (14%)
Apr.	<i>Synedra acus</i> (60%)	<i>Keratella cochlearis</i> (38%)	<i>Aulacoseira italica</i> (13%)	<i>Bosmina longirostris</i> (30%)
May	<i>Microcystis aeruginosa</i> (31%)	<i>Bosmina longirostris</i> (42%)	<i>Aulacoseira granulata f. spiralis</i> (30%)	<i>Cyclops copepoda</i> (13%)
Jun.	<i>Microcystis aeruginosa</i> (41%)	<i>Keratella cochlearis</i> (48%)	<i>Microcystis itchyoblabe</i> (20%)	<i>Keratella valga</i> (18%)
Jul.	<i>Microcystis aeruginosa</i> (29%)	<i>Keratella cochlearis</i> (32%)	<i>Microcystis wegenbergii</i> (18%)	Nauplius(17%)
Aug.	<i>Microcystis aeruginosa</i> (32%)	<i>Polyarthra euryptera</i> (46%)	<i>Microcystis wegenbergii</i> (18%)	<i>Bosmina longirostris</i> (13%)
Sep.	<i>Aulacoseira granulata f. spiralis</i> (20%)	<i>Polyarthra euryptera</i> (30%)	<i>Microcystis aeruginosa</i> (16%)	<i>Keratella cochlearis</i> (29%)
Oct.	<i>Aulacoseira granulata f. spiralis</i> (10%)	<i>Keratella cochlearis</i> (27%)	<i>Cyclotella meneghiniana</i> (5%)	Nauplius(9%)
Nov.	<i>Aulacoseira granulata f. spiralis</i> (57%)	<i>Bosmina longirostris</i> (44%)	<i>Fragillaria crotonensis</i> (5%)	<i>Polyarthra euryptera</i> (13%)
Dec.	<i>Cyclotella meneghiniana</i> (68%)	<i>Keratella cochlearis</i> (37%)	<i>Aulacoseira italica</i> (8%)	<i>Bosmina longirostris</i> (15%)

Table 2. Zooplankton and phytoplankton carbon biomass of dominant species in the SeoNakdong river from Jan. to Dec., 2014

	The 1 st dominant species(%)		The 2 nd dominant species(%)	
	Phytoplankton	Zooplankton	Phytoplankton	Zooplankton
Jan.	<i>Stephanodiscus hantzschii</i> (66%)	<i>Bosmina longirostris</i> (51%)	<i>Synedra ulna</i> (14%)	<i>Cyclops copepoda</i> (28%)
Feb.	<i>Stephanodiscus hantzschii</i> (48%)	<i>Cyclops copepoda</i> (45%)	<i>Synedra acus</i> (23%)	<i>Bosmina longirostris</i> (41%)
Mar.	<i>Stephanodiscus hantzschii</i> (49%)	<i>Bosmina longirostris</i> (51%)	<i>Synedra acus</i> (27%)	<i>Cyclops copepoda</i> (22%)
Apr.	<i>Synedra acus</i> (62%)	<i>Bosmina longirostris</i> (78%)	<i>Aulacoseira italica</i> (7%)	<i>Cyclops copepoda</i> (16%)
May	<i>Microcystis aeruginosa</i> (84%)	<i>Bosmina longirostris</i> (79%)	<i>Aulacoseira italica f. spiralis</i> (1%)	<i>Cyclops copepoda</i> (14%)
Jun.	<i>Microcystis aeruginosa</i> (49%)	<i>Cyclops copepoda</i> (30%)	<i>Microcystis wegenbergii</i> (17%)	<i>Keratella cochlearis</i> (16%)
Jul.	<i>Microcystis aeruginosa</i> (26%)	<i>Cyclops copepoda</i> (49%)	<i>Microcystis wegenbergii</i> (19%)	Nauplius(19%)
Aug.	<i>Microcystis aeruginosa</i> (24%)	<i>Bosmina longirostris</i> (70%)	<i>Anabaena flos-aquae</i> (21%)	<i>Polyarthra euryptera</i> (9%)
Sep.	<i>Anabaena spiroides</i> (27%)	<i>Bosmina longirostris</i> (30%)	<i>Microcystis aeruginosa</i> (24%)	<i>Cyclops copepoda</i> (23%)
Oct.	<i>Anabaena macrospora</i> (58%)	<i>Cyclops copepoda</i> (24%)	<i>Microcystis aeruginosa</i> (13%)	Nauplius(22%)
Nov.	<i>Anabaena spiroides</i> (56%)	<i>Bosmina longirostris</i> (87%)	<i>Anabaena macrospora</i> (26%)	<i>Cyclops copepoda</i> (6%)
Dec.	<i>Cyclotella meneghiniana</i> (49%)	<i>Bosmina longirostris</i> (68%)	<i>Aulacoseira italica</i> (7%)	<i>Keratella cochlearis</i> (6%)

TOC와 클로로필-a 농도, 플랑크톤 탄소량과 상관성

서낙동강 수계 내의 월별 TOC 농도에 대한 클로로필-a 농도 변화를 Fig. 7에 나타냈다. 조사 기간 동안의 TOC와 클로로필 농도의 상관도는 $r = 0.418$ (t-test, $p < 0.05$)로 낮게 나타났다. 국내외 담수 및 해양에서 연구한 클로로필과 TOC(DOC + POC)의 높은 상관성과 상반된 결과로 이는 주로 강우에 의한 외부 오염부하의 증가, 계절적 영향, 영양상태 및 동물플랑크톤의 섭식 작용, 박테리아의 분해 등이 영향을 미친 것으로 사료되었다(Fig. 7(A))^{52), 53)}. 겨울철에서 봄철로 계절이 바뀌면서 수온이

상승하는 3월 ~ 5월에 클로로필 농도와 TOC 농도가 특히 상관성이 떨어지는 것은 동물플랑크톤의 식물플랑크톤에 대한 섭식 활동이 커지면서 동물플랑크톤의 현존량이 식물플랑크톤의 현존량을 대체하여 클로로필 농도가 낮아져도 TOC 농도는 영향을 덜 받는 것으로 볼 수 있었다. 이는 동물플랑크톤 중 크기가 비교적 큰 요각류와 지각류는 몸집이 작은 윤충류보다 개체당 높은 섭식율을 가짐으로 상대적으로 낮은 밀도에도 식물플랑크톤에 상당한 포식압을 주며 일반적으로 몸집이 큰 지각류가 윤충류보다 더욱 효과적으로 식물플랑크톤의 생물량을 조절할 수 있

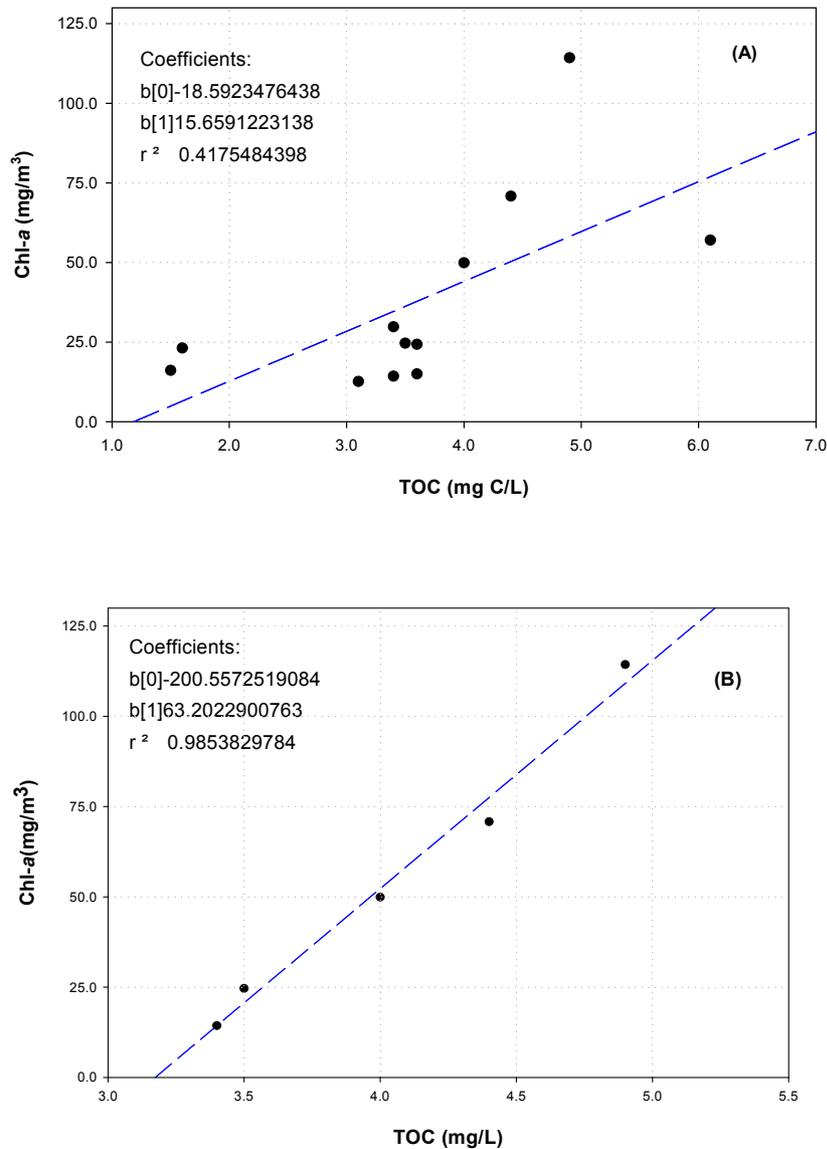


Fig. 7. Variation of chlorophyll concentration along TOC concentration in the year 2014 (A) and variation of chlorophyll concentration along TOC concentration from May to September (B).

음에 기인한다.^{54),55)} 그러나, 6월 ~ 9월에 클로로필과 TOC의 관계는 $r = 0.985$ (t-test, $p < 0.02$)로 높은 상관 관계를 보임으로 하절기에 남조류의 번성이 TOC 농도에 영향을 미친 것으로 판단되었다. 식물플랑크톤의 대번성이 일어나서 용존유기물질 부하와 비례하며 식물플랑크톤의 대증식의 산물로 분해과정에서 유기물질이 생성되는 것으로 보는 Ochiai *et al.*(1979)⁵⁶⁾와 Morten *et al.*(2000)⁵⁷⁾의 연구와 유사한 결과를 얻었다.(Fig. 7(B)) 식물플랑크톤 군집별 TOC 기여도를 보면 5월 ~ 11월까지의 남조류의 탄소 생물량이 가장 많은 영향을 미쳤으

며 동물플랑크톤의 군집 중에서는 3월 ~ 5월과 11월 ~ 12월에 지각류의 탄소 생물량이 TOC에 미치는 영향이 가장 컸다.(Fig. 8) 동식물 플랑크톤의 TOC에 대한 기여율은 1월, 10월과 12월에 10 % 미만으로 낮은 비율을 보였고 5월에 55 %의 가장 높은 비중을 차지하였다.(Fig. 9) 이는 환경 변화를 반영하여 동식물 플랑크톤의 종조성과 군집에 변화가 생기게 되어 유기물질량에 대한 기여에 변동이 생기는 것으로 파악할 수 있었다. 특히, 강우시 유역으로부터 유입되는 외부기원유기물의 부하량에 따라 TOC 농도가 영향을 받는 것으로⁵⁸⁾ 6월 ~ 8월에

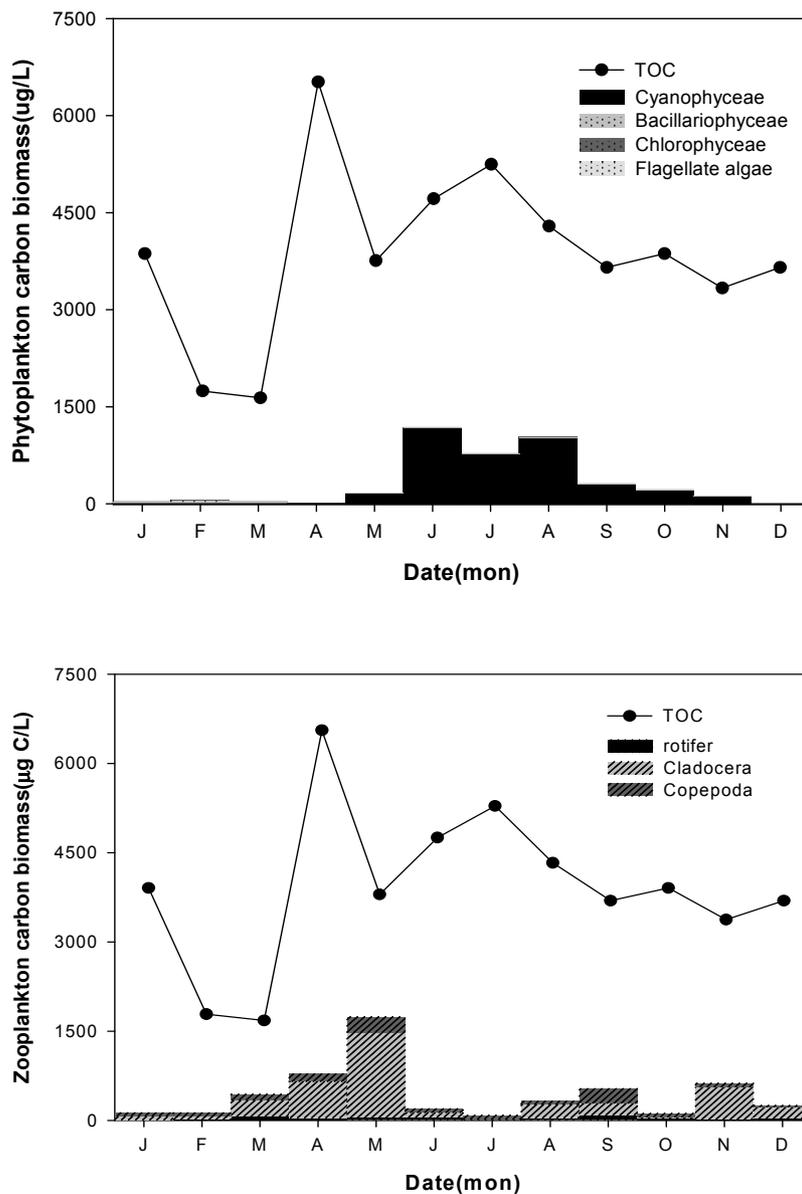


Fig. 8. Comparison the phytoplankton community carbon biomass and zooplankton community carbon biomass along TOC concentration.

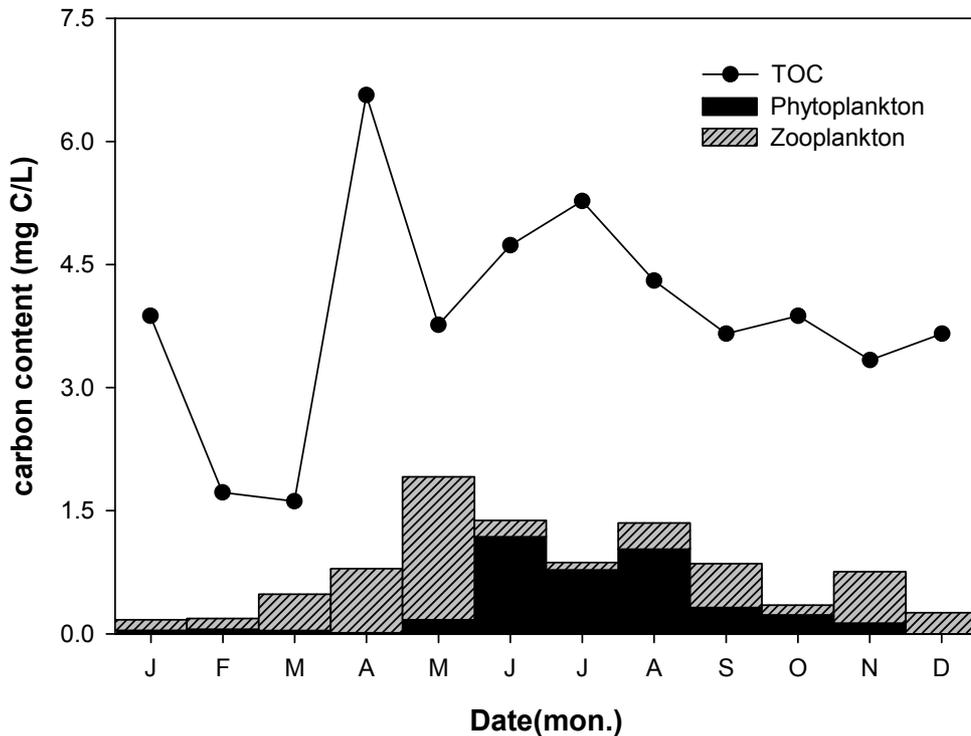


Fig. 9. Temporal average variation of phytoplankton carbon biomass and zooplankton carbon biomass along TOC concentration at the 3 stations of the SeoNakdong river.

Microcystis aeruginosa, *Microcystis wegenbergii*, *Anabaena flos-aquae*, *Anabaena spiroides* 등 남조류의 대번성이 일어났으나 30 % 내외의 기여율을 보인 것은 하절기 집중 강우에 의한 외부기원유기물에 의한 영향이 있었던 것으로 판단되었다.

이상의 결과로 서낙동강 수계에서 영양염류는 계절적으로 뚜렷한 차이를 나타내지 못했으나 긴 체류 시간과 함께 봄철 수온 상승에 따른 동물플랑크톤의 섭식압으로 식물플랑크톤의 현존량이 감소하고 동물플랑크톤의 현존량이 증가하면서 내부생성유기물에 영향을 미쳤다. 또한, 하절기 남조류에 의한 식물플랑크톤 대발생이 내부기원유기물 기여도를 증가시키기도 하였으나 집중 호우에 의한 수체 외부의 영향도 나타났다. 따라서, 수계 내의 동식물 플랑크톤의 Microbial loop에 따른 생물학적 요인과 강우 등의 기상학적, 계절적 환경요인, 영양 물질의 동태에 따라 다양하고 복합적으로 내·외부기원유기물이 TOC농도에 영향을 미침으로 볼 수 있었으며 이러한 결과로 비추어볼 때 보다 지속적인 모니터링을 수행하여 체계적이고 정확한 정보 축적에 따른 수질 관리 방향을 제시할 필요가 있을 것으로 판단된다.

결론

부산지역 수계 중 상하류 수문에 의해 물의 흐름이 자유롭지 못한 대표적 호소형 하천인 서낙동강에서 환경변화를 반영하는 동식물플랑크톤 중 조성 및 군집 특성을 파악하고 이에 의한 내부생성유기물의 기여도를 TOC 농도에 대해 파악하고자 하였다.

1. 영양염류는 계절적 변동을 뚜렷하게 반영하지 못하는 경향이 있었다. N/P ratio는 1월에 286으로 가장 높았고 8월과 10월 10 미만으로 나타났다. 클로로필-a 농도는 6월과 7월에 가장 높게 조사되었으나 수온이 낮은 1월 ~ 2월에 많은 서낙동강 식물플랑크톤 연구와 달리 낮게 조사되었으며 이는 주로 인이 조류생장 제한요인으로 작용했을 것으로 판단된다.
2. 규조류 *Stephanodiscus hantzschii* 등이 1월 ~ 3월에 0.7 ± 0.06 의 높은 우점을 나타냈으며 5월 ~ 9월에 남조류 *Microcystis aeruginosa* 등이 0.5 ± 0.10 로 우점하였다. 동물플랑크톤은 윤충류가 연중 출현하여 우점도지수 0.5 ± 0.10 이었으며 *Brachionus calyciflorus*, *Polyarthra euryptera*, *Keratella cochlearis*가 주로 나타났다. 4월, 5월과 11월에 지

각류인 *Bosmina longirostris*가 일시적으로 증가하였으며 요각류인 Nauplius와 *Cyclops* 속이 조사되었으나 20 % 미만의 낮은 비율을 차지하였다.

3. 조사기간 동안의 TOC와 클로로필 농도의 상관도는 $r=0.418$ (t -test, $p < 0.05$)로 낮게 나타났다. 그러나, 6월 ~ 9월에 클로로필과 TOC의 관계는 $r=0.985$ (t -test, $p < 0.02$)로 높은 상관관계를 보임으로 하절기에 남조류의 번성이 TOC 농도에 영향을 미친 것으로 판단되었다.
4. 식물플랑크톤 군집 중 5월 ~ 11월까지 남조류의 탄소 생물량이 TOC에 가장 많은 영향을 미쳤으며 동물플랑크톤의 군집 중에서는 3월 ~ 5월과 11월 ~ 12월에 각각의 탄소 생물량이 TOC에 미치는 영향이 가장 컸다. 동식물 플랑크톤의 TOC에 대한 기여율은 1월과 10월, 12월에 10 % 미만으로 낮은 비율을 보였고 5월에 55 %의 가장 높은 비중을 차지하였다. 이는 물리화학적 환경적 요인이 영향을 미치는 것으로 특히, 강우에 의한 외부기원유기물의 부하량에 따라 TOC 농도가 영향을 받았음을 알 수 있었다.

따라서, 이상의 결과로 서낙동강 수계에서 동식물플랑크톤의 Microbial loop에 따른 생물학적 요인과 강우 등의 기상학적, 계절적 환경요인, 영양 물질의 동태에 따라 다양하고 복합적으로 내·외부기원유기물이 TOC농도에 영향을 미침으로 볼 수 있었으며 이러한 결과로 비추어볼 때 보다 지속적인 모니터링을 수행하여 체계적이고 정확한 정보 축적에 따른 수질 관리 방향을 제시할 필요가 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Owens, N.J.R., "Natural variation in ^{15}N in the marine environment", *Advances in Marine Biology*, 24, pp.390~451(1987).
2. Wetzel, R.G., *Limnology Lake and River Ecosystems(3rd ed.)*, Academic Press(2001).
3. Sharpe, Z., *Principles of isotope geochemistry*, Prentice Hall, USA(2007).
4. Larson, R.A., J.M. Hufnal Jr., "Oxidative polymerization of dissolved phenols by soluble and insoluble inorganic species", *Limnol. Oceanogr.*, 25, pp.505~512(1980).
5. Hessen, D.O., L.J. Tranvik, *Aquatic humic substances-ecology and biogeochemistry*, Springer-Verlag, Berlin(1998).
6. Kim, H.W., K.H. Chang, K.S. Jeong, G.J. Joo, "The spring metazooplankton dynamics in the river-reservoir hybrid system(Nakdong River, Korea):Its role in controlling the phytoplankton biomass", *Korea J. Limnol.*, 36, pp.420~426(2003).
7. Keckeis, S., C. Baranyi, T. Hein, C. Holarek, P. Riedler, F. Schiemer, "The significance of zooplankton grazing in a floodplain system of the River Danube", *J. Plankton Res.*, 25, pp.243~253(2003).
8. Leppard, G.G., M. Munawar, "The ultrastructural indicators of aquatic ecosystem health", *J. Aquat. Anim. Health*, 1, pp.309~317(1992).
9. Cairn, J., P.V., McCormick, B.R., Niederlehner, "A propose framework for developing indicators of ecosystem health", *Hydrobiologia*, 263, pp.1~44(1993).
10. Bianchi, F., F. Acri, F.B. Aubry, A. Berton, A. Boldrin, E. Camatti, D. Cassin, A. Comaschi, "Can plankton communities be considered as bio-indicators of water quality in the Lagoon of Venice?", *Mar. Pollut. Bull., Pollution Bulletin*, 46, pp.964~971(2003).
11. 환경부, *조류전문가 포럼 운영을 통한 조류관리체계 개선 연구 최종보고서*(2013).
12. Kim, Y., "Chemical and bacteriological water quality of the Sonakdong River", *Bull. Korean Fish Society*, 19(4), pp.347~355(1986).
13. Park, H., S. Yoo, B. Lee, J. Jeong, H. An, W. Park, "Pollution characteristics and application of river sediment of the Western Nakdong River", *Korean J. Environmental Health Society*, 27(1), pp.51~55(2001).
14. Lee, N., Y. Kim, J. Kwon, C. Shin, "Two dimensional numerical modeling of water quality variation by gates operation in the Seonakdong River", *J. the Korean Society of Water and Wastewater*, 21(1), pp.101~112(2007).
15. Park, H.J., J.K. Park, W.W. Park, "The distribution characteristics of heavy metals in the water, sediment and soil along the West

- Nakdong River”, *J. the Korean Environmental Sciences Society*, 3(4), pp.409~416(1994).
16. Hwang, S.C., B.H. Lee, W.W. Park, Y.E. Cheong, H.J. Park, S.U. Jeong, “A study on the relation between riverbed structure and pollutant concentration in down stream of Nakdong River”, *J. the Korean Environmental Sciences Society*, 6(5), pp.513~520(1997).
 17. We, S.U., C.H. Yoon, B.Y. Min, “Horizontal distributions and their ecotoxicological implications relating to PCBs, DDTs, HCHs and HCB in sediments in the West Nakdong River”, *J. Life Science*, 22(3), pp.332~339(2012).
 18. Jeon, S.I., S.J. Cho, “Primary productivity of phytoplankton in the shallow and hypertrophic river(Seonakdong River)”, *Korean J. Limnol. Society*, 37(1), pp.57~63(2004).
 19. 김보경, 이상래, 이진애, 정익교, “분자모니터링을 이용한 서낙동강과 남해 연안 플랑크톤 군집 분석”, *한국해양학회*, 15(1), pp.25~35(2010).
 20. 윤해순, 김구연, 김승환, 이원화, 이기철, “서낙동강 수질의 이화학적 특성과 수생관속식물의 분포”, *한국생태학회지*, 25(3), pp.165~173(2002).
 21. 김구연, 김지윤, “서낙동강 분류 및 낙동강 둔치 습지의 수생식물 생물량 분포”, *한국하천호소학회*, 47(1), pp.62~69(2014).
 22. 강태욱, 이상호, “서낙동강 호소형 하천의 수질 개선 방안에 대한 비교 분석”, *한국방재학회*, 13(3), pp.227~237(2013).
 23. 한명수, 어윤열, 유재근, 유광일, 최영길, “팔당호의 생태학적 연구 2. 식물플랑크톤의 군집 구조의 변화”, *한국육수학회지*, 28, pp.335~344(1995).
 24. 한명수, 이동석, 유근재, 박용철, 유광일, “팔당호의 생태학적 연구 3. 식물플랑크톤의 일차생산력과 광합성 모델 parameters”, *한국육수학회지*, 32, pp.8~15(1999).
 25. 이정호, 권정남, 양상용, “낙동강의 식물플랑크톤 군집의 계절 변화”, *Algae*, 17(4), pp.267~273(2002).
 26. 이옥희, 이선애, 신재기, 조경제, “서낙동강-조만강에서 식물플랑크톤의 변동과 수질 부영양화”, *한국환경과학회 학술발표논문집*(2002.5월).
 27. 최철만, 문성기, “서낙동강의 식물플랑크톤상과 군집 동태”, *한국환경과학회 학술발표논문집*(2005.5월).
 28. 서정관, 이혜진, 정익교, “낙동강 하류부에서 *Stephanodiscus*속의 의한 수화 발생시 미생물 먹이망 군집 동태”, *Korean J. environ. Biol.*, 28(3), pp.172~178(2010).
 29. 국토교통부, <http://www.wamis.go.kr>, 한국하천 일람(2012.1월).
 30. 환경부, *수질오염공정시험기준*(2012).
 31. Wetzel and Likens, *Limnological Analyses*(3rd ed.), Springer, USA(2000).
 32. APHA-AWWA-WEF, *Standard methods for the examination of water and wastewater*(22th ed.), APHA-AWWA-WEF, Washington D.C., USA(2012).
 33. 기상청, <http://www.kma.go.kr>
 34. 정용, *한국담수조류도감*, 아카데미서적(1993).
 35. John D.W., Robert G.S., *Freshwater algae of North America-Ecology and Classification*, Academic Press, USA(2003).
 36. AlgaeBASE, <http://www.algaebase.org>
 37. Kellar, P.E., S.A. Paulson, L.J. Paulson, *Methods for biological, chemical and physical analyses in reservoirs*, Technical Report, Lake Mead Limnological research center, Uni. Nevada, Las Vegas, USA(1980).
 38. Helmut, H., “Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae”, *J. Phycol.*, 35, pp.403~424(1999).
 39. Jun, S., Dongyan, L., “Geometric models for calculating cell biovolume and surface area for phytoplankton”, *J. of Plankton Res.*, 25, pp.1331~1346(2003).
 40. 환경부, *호소환경조사지침*(2013).
 41. Strathmann, R.R., “Estimating the organic carbon content of phytoplankton from cell volume or plasma volume”, *Limnol. Oceanogr.*, 12, pp.411~418(1967).
 42. 조규송, *한국담수동물플랑크톤 도감*, 아카데미서적(1993).
 43. Balcer, M.D., N.L. Korda, S.I. Dodson, *Zooplankton of the great lakes. A guide to the identification and ecology of the common crustacean species*, the university of wisconsin Press(1984).

44. Edward M., *The estimation of the abundance and biomass of zooplankton in samples*(1984).
45. Downing, J.A., F.H.R. Rigler, *A manual on methods for the assessment of secondary productivity in freshwaters*, Blackwell Scientific Publications(1984).
46. Dumont, H.J., I.V. De velde, S. Dumont, "The dry weight estimate of biomass in a selection of cladocera, copepoda and rotifera from the plankton, periphyton and benthos of continental waters", *Oecologia*, 19(1), pp.75~97(1975).
47. Culver, D.A., M.M. Boucherie, D.J. Bean, J.W. Fletcher, "Biomass of freshwater crustacean zooplankton from length-weight regressions", *Canadian J. Fisheries and Aquatic Sciences*, 42(8), pp.1380~1390(1985).
48. Andersen, A., D.O. Hessen, "Carbon, nitrogen and phosphorus contents of freshwater zooplankton", *Limnol. Oceanogr.*, 36(4), pp.807~814(1991).
49. 환경부, *조류전문가 포럼 운영을 통한 조류관리체계 개선 연구 최종보고서*(2013).
50. 김호섭, 공동수, 황순진, "얕은 부영양 저수지의 동식물플랑크톤 군집 변화 특성", *Korean J. Limnol.*, 38(1), pp.18~29(2005).
51. 엄성화, 황순진, "팔당호 생태계에서 동물플랑크톤과 식물플랑크톤의 섭식관계", *Korean J. Limnol.*, 39(3), pp.390~401(2006).
52. Gordon, T.T., J. Way, M.I. Scranton, "Planktonic carbon cycling and transport in surface waters of the highly urbanized Hudson River Estuary", *Limnol. Oceanogr.*, 48(5), pp.1779~1795(2003).
53. Marta, R., R. Coma, J.-M. Gili, "Seasonal variation of particulate organic carbon, dissolved organic carbon and the contribution of microbial communities to the live particulate organic carbon in a shallow near-bottom ecosystem at the Northeastern Mediterranean Sea", *J. Plankton Res.*, 21(6), pp.1077~1100(1999).
54. 김상훈, 박혜경, 변명섭, 전명진, 정동일, "팔당호 동물플랑크톤 시·공간적 분포" *한국물환경학회·대한상하수도학회 공동춘계학술발표 논문집*, pp.289~292(2003).
55. Dawidowicz, P. "Effectiveness of phytoplankton control by large-bodied and small-bodied zooplankton", *Hydrobiologia*, 200(201), pp.43~47(1990).
56. Ochiai, M, T. Nakajima, T. Hanya, "Seasonal fluctuations of dissolved organic matter in Lake Nakanuma", *Jpn J. Limnol.*, 40(185), pp.185~190(1979).
57. Morten, S., N.H. Borch, B. Riemam, "Dynamics of biodegradable DOC produced freshwater plankton communities", *Aquatic microbial Ecol.*, 23, pp.73~83(2000).
58. Nemeth, A., J. Paolini, R. Herrera, *Carbon transport in the Orinoco River: Preliminary results*, In: *SCOPE/UNEP Transport of carbon and Minerals in Major World Rivers*, 52 (Degens, E.T. ed.), University of Hamburg(1982).