Korean J. Limnol. 37 (3) : 263~271 (2004)

체류시간이 서로 다른 부영양 수계에서 플랑크톤군집의 생태학적 특성

이 욱 세 · 한 명 수*

(한양대학교 생명과학과)

Community Structure of Plankton in Eutrophic Water Systems with Different Residence Time. ***Lee, WS and MS Han* (Department of Life Science, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea)***

To collect the basic ecological information about the microbial food webs in eutrophic water system with different residence time, the monthly variation of bacterioplankon (bacteria and small-sized cyanobacteria) and nanoplankton (phytoplankton and protists) were examined from December 2000 to September 2001. Kyungan stream is shorter in resident time (ca. 5.4 d) than Seokchon reservoir (ca. 72 d), even though they showed the same pattern in precipitation. With the basic environments, we examined the biomass (standing crops and its carbon content) of each plankton collected from the surface water. Large-sized planktons flourished in the time of low temperature, while small planktons were in the time of the high temperature period. Especially, in the Kyungan stream with much disturbance by rainfall and outflow, high diversity showed in term of species and cell morphology, compared to that of Seokchon lake. The time-lag relationship remarkably showed between phytoplankton and bacteria in Seokchon reservoir, and between protists and bacteria in Kyungan stream, respectively.

Key words : Microbial food web, bacterioplankton, nanoplankton, residence time

서 론

수서생태계내 에너지흐름은 식물플랑크톤에서 동물플랑크톤를 거쳐 어류 등으로 이어지는 단순한 먹이사슬 개념에서 수중 내 영양염, 박테리아, heterotrophic nanoflagellates (HNFs), 섬모충 등을 거쳐 동물플랑크톤, 어류로 이어지는 이른바 'microbial loop' 개념(Azam *et al.*, 1983)이 도입되면서 수중생태계의 에너지 흐름이나 물질 순환에 대한 보다 정확한 이해가 가능하게 되었다. 수중 내 박테리아의 증식과 DOC사이의 관계에 있어서, 조류나 다른 생물들이 분비하거나 혹은 박테리아에 의해 분해되면서 나오는 DOC의 많은 부분이 박테리아에 의해 이용되기 때문에 DOC가 박테리아 성장에 매우 직접적인 영향을 주는 요인이며(Bratbak *et al.*, 1984), 식물플랑크톤 일차생산의 약 50%가 DOC로 전환된다고 알려져 왔다(Small *et al.*, 1989). 동시에 박테리아 밀도는 주로 HNF와 같은 종속영양편모조류(Bloem and Bar, 1989)나 섬모충플랑크톤(Anderson and Sorensen, 1986; Sherr and Sherr, 1987) 등에 의해 조절되며 이들은 다시 상위 인자인 동물플랑크톤이나 어류에 의해 조절된다.

1960년대 이후 국내에서 동,식물플랑크톤을 포함한 어류 등의 시 · 공간적 분포에 대한 단편적인 보고는 무수히 많다. 그러나 수중 microbial loop의 주된 구성요소인

* Corresponding author: Tel: 02) 2290-1704, Fax: 02) 2296-1741, E-mail: hanms@hanyang.ac.kr

영양염(DOC), bacteria, cyanobacteria, HNF, autotrophic nanoflagellates (ANFs), phytoplankton, ciliate, zooplankton 등의 조사를 통한 수계 내 에너지흐름을 해석하려는 시도는 외국에(Takamura *et al.*, 1996; Hwang and Heath, 1997; Nakano and Kawabata, 2000; Nakano *et al.*, 2001) 비하여 매우 빈약한 편이다. 따라서 특정수계에서 미세먹이망 구성요소들의 분포나 역할, 그리고 지금까지 동정이나 계수가 어려웠던 소형플랑크톤(예, HNF, ciliate) 등에 대한 새로운 동정법의 개발 및 적용을 통하여 이들의 보다 정확한 역할이나 특성을 연구할 필요가 있다고 판단된다.

본 연구는 체류시간이 서로 다른 부영양 수계(경안천; 5.4일, 석촌호수; 72일)를 선정하여 각 수계 내 bacterioplankton 및 nanoplankton의 분포 및 현존량의 시간적 변동을 파악하고자 2000년 12월부터 2001년 9월까지 월 1회 또는 2회씩 생물조사와 환경요인조사를 병행하여 실시하였다.

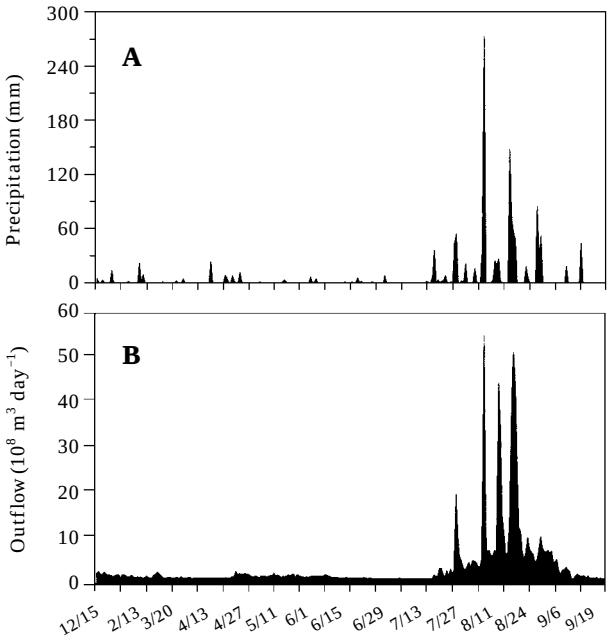

Fig. 1. Annual precipitation (A) and outflow of Pal'tang Dam (B) from December 2000 to September 2001.

재료 및 방법

1. 조사기간 및 지점

조사는 2000년 12월 15일부터 2001년 9월 20일까지 각 수계에 대한 일정한 시간(경안천: AM 1000～1100/석촌호수: PM 1300～1400)에 실시하였으며, 춘계～추계는 매주 1회씩 채집하였으며, 동계에는 월 1～2회씩(12～1월: 1회씩/2월: 2회씩) 실시하였다. 수계 1은 팔당호의 3개 지류 중 하나인 경안천으로서 수심이 낮고 하절기에는 강우와 팔당댐 방류에 의해 빠른 속도로 수체가 이동되며(0.5～3일), 겨울철에는 상당시간 동안 결빙되며 매년 3월초순쯤에 해빙된다. 상류에서 많은 유기물과 비점오염의 유입으로 인하여 팔당호의 부영양화에 크게 영향을 주고 있다(국립환경연구원, 1988; 한 등, 1995a,b). 조사지점은 경안천을 가로지는 광동교 교량의 중앙지점으로 다리위에서 직접 채수기를 내려 채수하였다. 평균수심은 약 4.3 m이고 유속은 10 cm sec^{-1}이었다. 수계 2는 행정구역상 서울시 송파구 잠실에 위치한 석촌호수이며 자연증발과 지하유출로 인한 수량감소를 보충하기 위해 한강 본류로부터 펌프를 이용하여 수위가 일정하게 유지되는 정체형 호소이다(권, 1997). 조사지점은 석촌호소(서측호)의 가장자리에서 직접 채수하였으며, 평균수심은 2.4 m이고 체류시간은 약 100일 정도이다.

2. 이화학적 환경요인

시료채집은 각 수역의 표층(0.3～0.5 m)에서 5 L 용 Van-Dorn 채수기(Niskin, General Oceanics)를 이용하여 실시하였다. 수온과 전도도는 Chlorotech (ACL1150-D, Alec Electronics, Japan)를 이용하였고, pH는 portable pH meter (290A, Orion, USA)를 이용하여 현장에서 직접 측정하였다. Chlorophyll *a* 농도는 250 mL을 GF/F (Whatman)로 여과한 후 90% cold-acetone 용액으로 24시간동안 냉암실에서 색소를 추출하여 UV/Visible Spectrophotometer (HP 8453, Hewlett Packard, USA)를 이용하여 측정하였다. 강우량 자료는 기상청 양평군과 서울시 자료를 사용하였으며(Fig. 1A), 팔당댐 방류수량은 (주)한국수력원자력(2001)의 자료를 참고하였다(Fig. 1B). 석촌호수의 방류수량은 한양대 자연과학연구소(2001)의 유입수량과 보유수량의 자료를 참고하였다.

3. 플랑크톤 현존량

박테리아의 현존량을 계산하기 위하여 채수된 시료를 300 mL 폴리에틸렌 채집병에 담은 후, glutaraldehyde용액으로 고정(1% final conc.)하여 실험실로 운반하였다. 고정한 시료를 DAPI (6-diamidino-2-phenylindole) 염색법(Sherr and Sherr 1988)을 이용하여 프레파라트를 만들었다. 제작된 프레파라트는 형광현미경의 blue filter

(09-450～490, FT510, LP520. Zeiss)를 이용하여 bright blue를 보이는 세포의 밀도를 측정하였다. 또한 남조류는 형광현미경 Green filter에서 적색을 보인 소형세포와 Lugol로 고정하여 2시간 이상 침전한 후 도립현미경하에서 계수한 군체 또는 사상형 남조의 합을 총 현존량으로 하였다. HNF (heterotrophic nanoflagellates)는 시료를 glutaraldehyde용액 (1% final concentration)으로 고정하고 FITC (fluorescein isothiocyanate) 염색법 (Sherr and Sherr 1988)에 따라 형광현미경 (Axioplane, Zeiss)하에서 각각의 세포수를 계수하였다. Phytoplankton의 현존량을 계산하기 위해 현장수를 300 mL 폴리에틸렌 채집병에 넣고 1% Lugol액으로 고정하여 12시간 이상 침전한 다음, 도립현미경하에서 계수하였다. 섬모충플랑크톤은 시료를 Bouin's solution으로 고정한 후, QPS (quantitative protargol stain) 방법 (Suzuki, 2000)에 따라 영구표본을 만들고 광학현미경 (Axioplan, Zeiss)하에서 검경하였다. 각 플랑크톤의 탄소생체량을 구하기 위하여 생물의 크기를 측정하고, 이를 토대로 체적을 구한 다음 환산식을 적용하였다. 박테리아는 세포당 20 fgC의 환산치 (Lee and Fuhrman, 1987)를 적용하였으며, 남조류는 150 fgC $cell^{-1}$ (Waterbury *et al.*, 1986)를, 남조류 이외 세포는 직경이 4 μm 이하인 경우, C = 0.22 × cell volume (Mullin *et al.*, 1966), 직경이 4 μm 이상인 경우에는 $Log_{10}C = 0.866 \times log_{10}V - 0.460$ (Strathmann, 1967)의 환산식을 각각 이용하였다.

결 과

1. 이화학적 환경요인

조사기간동안 수온은 두 수계 모두 전형적인 온대수역의 특징인 뚜렷한 계절성이 보였으며, 수계간 차이는 거의 보이지 않았다 (Fig. 2A). 다만 하절기 (7～8월) 동안에는 석촌호가 경안천보다 약 1～2°C 정도 높았는데 이는 전자는 서울시내에 위치하여 도심대기의 영향을 받은 반면, 후자는 높은 산으로 둘러싸인 stream에 가까운 수역이 원인으로 판단된다. pH는 경안천에서는 계절 또는 강우에 따라 크게 변동한 반면, 석촌호에서는 시간에 따라 전체적으로 서서히 증가하는 양상을 보였다 (Fig. 2B). 특히 석촌호의 경우 2000년 7월부터 9월까지 8.1～9.9까지 급격한 증가를 보였는데, 이는 하절기의 수온과 영양염에 의한 *Anabaena*, *Microcystis* 등의 남조발생이 원인으로 판단된다. 이에 반해 경안천은 강우가 집중되었던 하절기에는 비교적 낮은 반면 오히려 춘계 (4～5월)에 높았는데 (9.5), 규조 *Stephanodiscus* sp.의 대발생이 원인으로 판단된다. 조사기간 중 경안천의 전기 전도도는 석촌호에 비해 2～4배 이상의 높은 수치를 보였다. 특히 강우가 집중되었던 7～8월에 가장 낮았으며, 석촌호는 년중 변화폭이 작았다 (Fig. 2C).

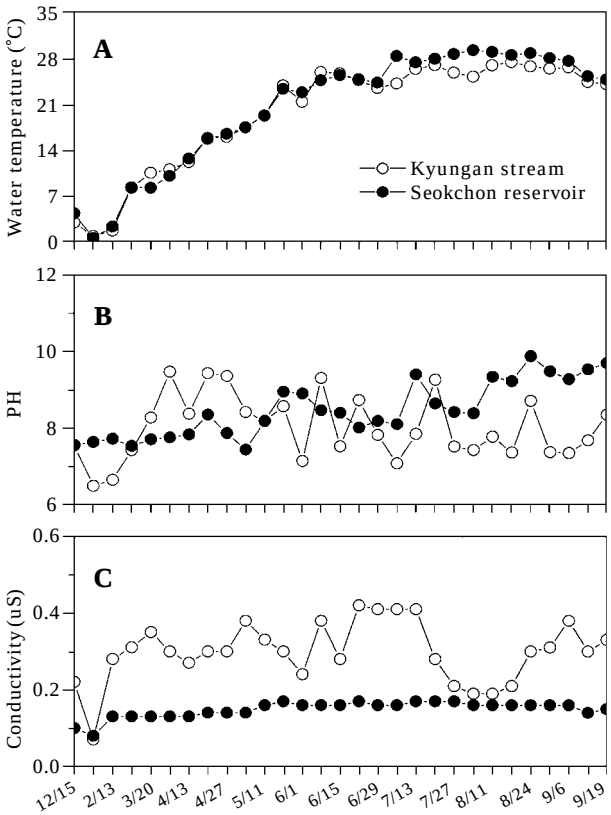

Fig. 2. Water temperature (A), pH (B), and electric conductivity (C) in Kyungan stream and Seokchon reservoir from December 2000 to September 2001.

2. 박테리아 (heterotrophic bacteria) 현존량

조사기간동안 두 지점의 박테리아 밀도변화는 수온의 변화와 유사한 패턴을 보였다. 경안천의 경우, 전체적으로는 $6.3 \times 10^6 \sim 1.5 \times 10^8$ cells mL^{-1}의 범위를 보였는데, 10°C 이하의 저온기 (12～4월)에는 3×10^7 cells mL^{-1} 이하의 낮은 밀도를, 고온기 (7월 초순～중순)에는 최고치 (1.5×10^8 cells mL^{-1})를 보였다. 이들은 다시 강우이후 수온감소와 함께 급격한 감소를 보여 8～9월까지 $3 \sim 5 \times 10^7$ cells mL^{-1}를 나타냈다 (Fig. 3A). 탄소생체량은 세포밀도와 거의 유사한 패턴을 보였는데, 최대밀도를 보인 고온기에 3×10^6 pgC mL^{-1}를 나타냈다 (Fig. 3B). 석촌호수의 박테리아 밀도는 경안천과 거의 유사하였으며, 전체적으

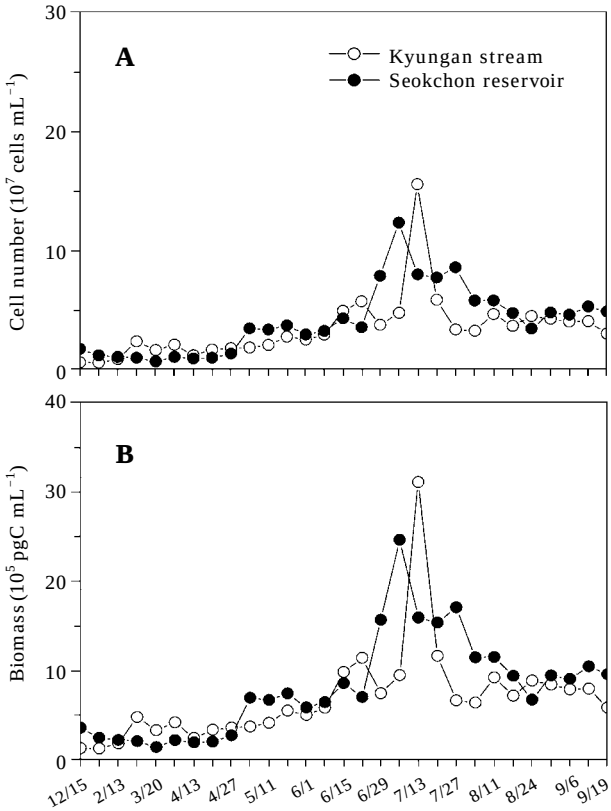

Fig. 3. Monthly variation of standing crops (A) and carbon biomass (B) of heterotrophic bacteria in Kyungan stream and Seokchon reservoir from December 2000 to September 2001.

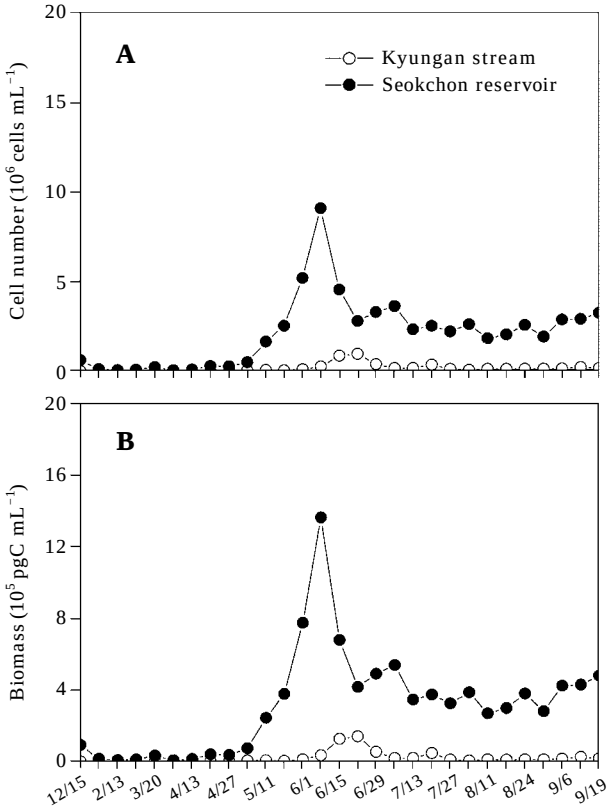

Fig. 4. Monthly variation of standing crops (A) and carbon biomass (B) of cyanobacteria in Kyungan stream and Seokchon reservoir from December 2000 to September 2001.

로 $7.1\times10^6\sim1.2\times10^8$ cells mL^{-1}의 범위를 보였다. 저온기에는 2×10^7 cells mL^{-1} 이하의 낮은 밀도를 나타냈으며, 7월 6일에 최고치(1.2×10^8 cells mL^{-1})를 보였는데 경안천에 비해 다소 낮았다. 탄소생체량 역시 경안천과 유사하였으며 최대밀도를 보인 시기에 2.5×10^6 pg C mL^{-1}으로 나타났다. 비록 조사기간 중 최고밀도를 보였던 시기는 두 지점간에 약 1주일정도 차이가 있었는데, 7월 13일을 제외하고는 고온기 동안(7~8월)의 평균밀도는 석촌호수가 더 높았다. 이는 경안천이 잦은 강우로 인하여 도심에 위치한 석촌호수보다 수온이 1~2도 정도 낮았던 것이 주된 원인으로 판단된다.

3. 남조(Cyanobacteria) 현존량

조사기간동안(5~9월) 남조류의 변동은 유사하였으나 현존량은 두 지점간에 큰 차이를 보였다. 두 지점의 현존량 변동은 수온변화와 유사한 패턴을 보였으며, 최고 밀도를 보인 시기는 경안천의 경우는 6월 22일(9×10^5 cells mL^{-1})인 반면, 석촌호수는 이보다 2주 빠른 6월 8일(9.1×10^6 cells mL^{-1})이었다(Fig. 4A). 특히, 5월초순부터 *Microcystis*가 우점하였던 석촌호수는 같은 시기에 경안천의 최고 10배 이상 높은 밀도를 나타냈으며, 이러한 경향은 9월말까지 지속되었다. 이러한 차이는 정체형 호소인 석촌호수가 경안천에 비해 소형 군체형 남조류가 많았으며, 경안천은 잦은 강우와 팔당댐 방류로 인하여 수체이동이 빨라져 정체성 남조류 밀도가 낮았던 것으로 판단되었다. 두 지점의 탄소생체량은 현존량의 변화와 거의 유사하였으나 두 지점에서 6월 초~중순에 높은 밀도를 나타냈던 남조류가 큰 폭으로 증가하거나 감소하지 않고 일정하게 유지되는 것은 7~8월의 집중 강우에 의한 것으로 판단된다(Fig. 4B).

4. 식물플랑크톤(Eukaryotic Autrotrophs) 현존량

경안천 식물플랑크톤의 현존량은 전체적으로 $1.5\times104\sim3.8\times10^5$ cells mL^{-1}의 범위로 나타났다(Fig. 5A).

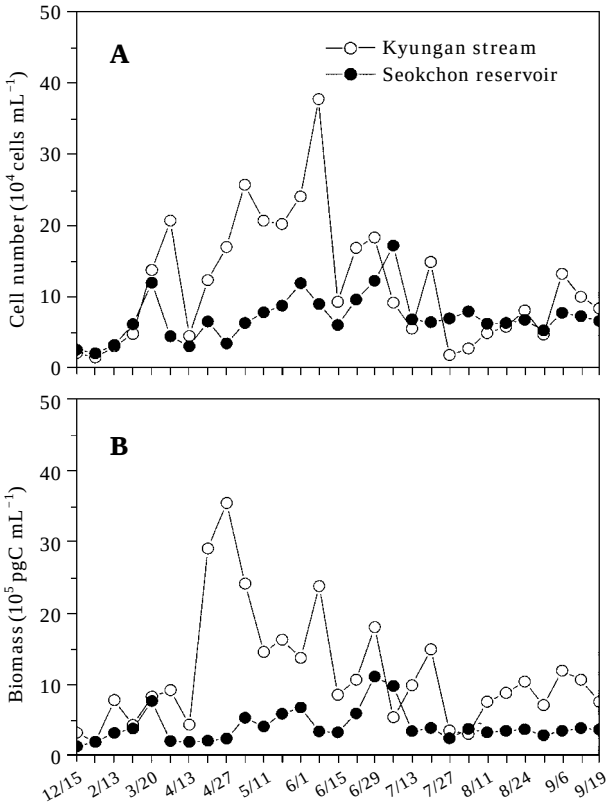

Fig. 5. Monthly variation of abundance (A) and carbon biomass (B) of phytoplankton (eukaryotic autotrophs) in Kyungan stream and Seokchon reservoir from December 2000 to September 2001.

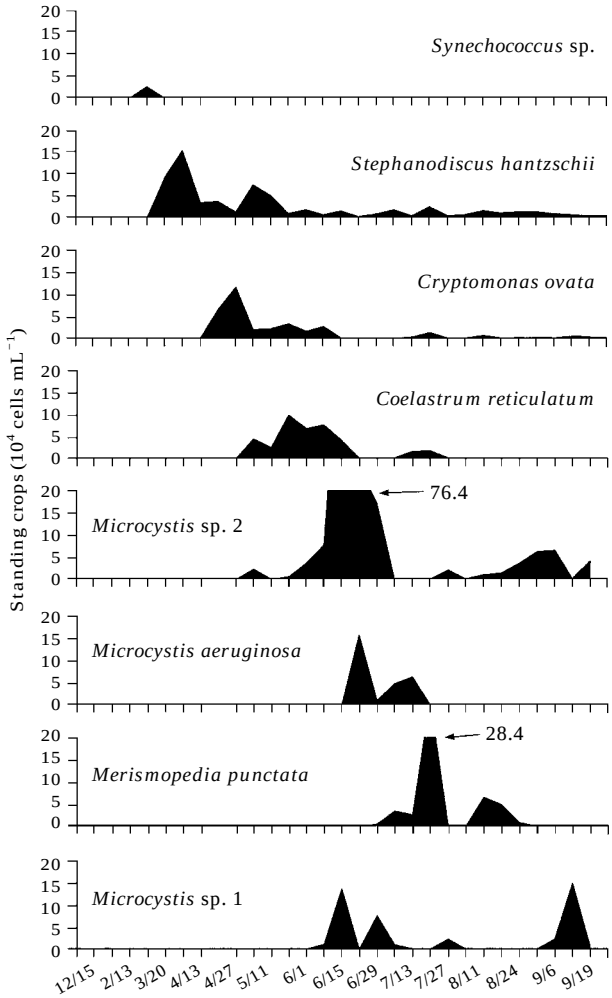

Fig. 6. Monthly variation of abundance of dorminant species in Kyungan stream from December 2000 to September 2001.

특히 12월부터 4월초까지 급격한 밀도증가를 보였다가 고온기로 갈수록 서서히 감소하였다. 이 시기는 주로 규조 *Stephanodiscus* sp., *Cryptomonas* sp., *Coelastrum* sp., 등이 우점하였던 시기로서 현존량의 대부분을 차지하였다. 그 이후는 석촌호수와 거의 비슷하거나 오히려 낮았으나 탄소생체량은 높았다(Fig. 5B). 이는 세포크기와 관련된 것으로서 석촌호수가 *Microcystis*나 *Merismopedia*가 우점한 반면, 경안천은 또한 석촌호수에 비해 이 시기까지 규조 *Stephanodiscus* sp., *Cryptomonas* sp.가 지속적으로 출현하였기 때문이다. 결국 경안천에 비해 소형군체형 남조가 우점하였던 석촌호수는 비록 높은 현존량을 나타냈지만 세포크기가 작아 탄소생체량은 경안천에 낮았던 것으로 판단된다. 한편, 조사기간동안 두 지점에서 출현한 식물플랑크톤의 변화는 큰 차이를 보였다. 경안천에서 출현한 식물플랑크톤은 189종, 3 미동정종을 포함하여 총 192종이 출현하였다. 시기별로는 3월부터 *Synechococcus* sp. 3, *Stephanodiscus* sp., *Cryptomonas ovata*, *Coelastrum reticulatum*가 우점적으로 출현하여 spring bloom를 일으켰으며, 6월 중순부터 남조류 *Microcystis* sp. 1, *Microcystis* sp. 2가 우점하였으며, 이후로는, *Microcystis aeruginosa* (6.2×10^4 cells mL^{-1}), *Merismopedia punctata* (2.8×10^5 cells mL^{-1})가 우점하였고, 9월 중순에는 다시 *Microcystis* sp. 1이 다시 급격하게 증가하였다. 결국, 경안천의 식물플랑크톤은 겨울철에 독립형 남조, 춘계에 규조와 녹조, 그리고 추계에 군집형 남조가 우점하는 계절적 변동을 보였다(Fig. 6). 이에 반해 비교적 수계가 정체된 석촌호수에서는 조사기간동안 총 147종이 출현하였는데, 저온기(12~4월)에 *Phormidium* sp. 2가 우점하였으며, 5월부터 *Microcystis* sp. 1가 우점하여 9월까지 지속적으로 출현하였다. 6월초부터 출현된 *Microcystis* sp. 2는 9월초에 최고치(2.4×10^6 cells mL^{-1})를 보였고, 모든 계절에서 남조가 우점하였다(Fig. 7).

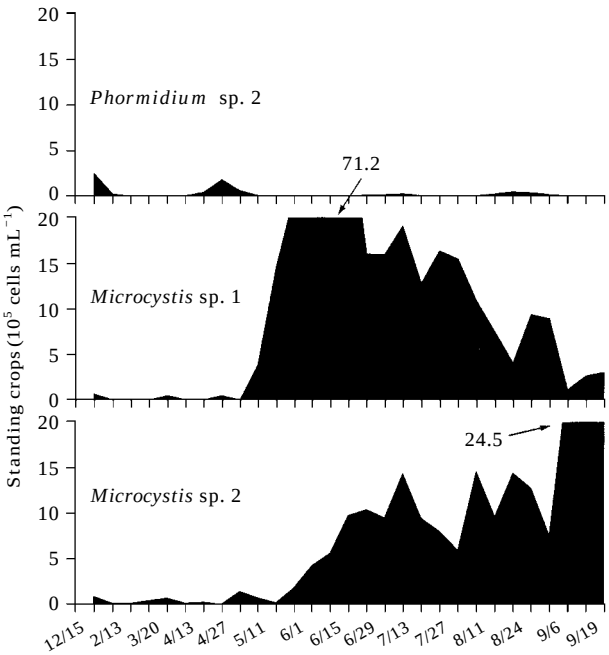

Fig. 7. Monthly variation of abundance of dorminant species in Seokchon reservoir from December 2000 to September 2001.

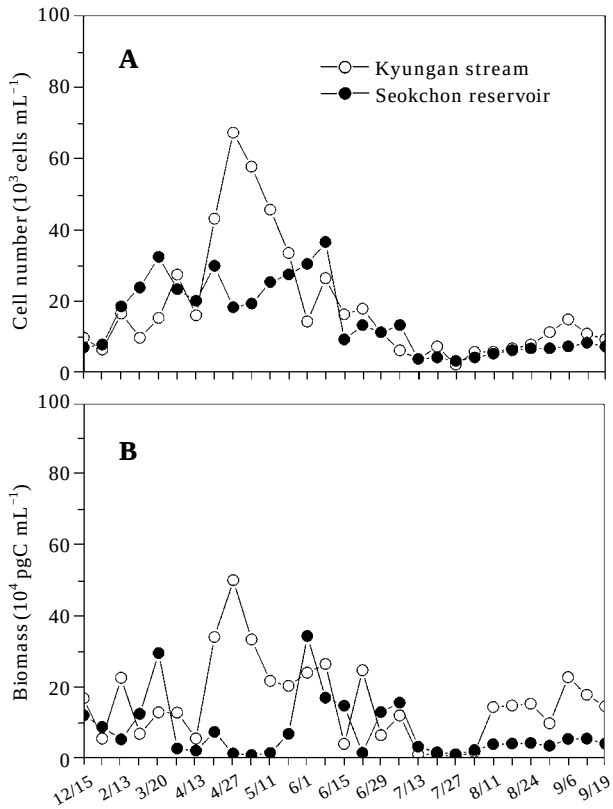

Fig. 8. Monthly variation of abundance (A) and carbon biomass (B) of protist (eukarytoic heterotrophs) in Kyungan stream and Seokchon reservoir from December 2000 to September 2001.

5. Protist (Eukaryotic Heterotrophs)의 현존량

경안천의 Protist는 4월말부터~6월초순까지 높은 밀도(최고치, 4월 27일, 6.7×10^4 cells mL^{-1})를 나타냈으며, 6월중순부터 강우가 잦은 9월까지는 서서히 감소하는 패턴을 보였다. 탄소생체량 역시 현존량과 비슷한 패턴을 보였으나 고온기 동안에 출현된 종들이 저온기보다 비교적 크기가 큰 것으로 판단되었다(Fig. 8). 석촌호수의 경우, 3월말~6월초(3월 20일, 3.2×104 cells mL^{-1}; 4월 20일, 3.0×104 cells mL^{-1}; 6월 7일, 3.7×104 cells mL^{-1}) 기간동안 높은 밀도를 보인 반면, 강우가 잦은 7월부터는 낮은 밀도를 나타냈다. 탄소생체량은 전체적으로 유사한 패턴을 보였으나, 경안천과 비슷하게 고온기 종들이 저온기보다 크기가 큰 것으로 판단되었다(Fig. 8). 전체적으로 두 조사지점에서 Protist는 저온기에 높은 밀도를 보인 반면 크기는 작은 것으로 판단되었으며, 강우가 잦은 고온기 동안에는 밀도가 낮은 특성을 보였다.

고 찰

조사기간동안 두 수계의 플랑크톤은 강우가 잦은 우기보다 갈수기(저온기)동안에 높은 현존량을 보였다. 또한 세포크기가 작은 bacterioplankton (bacteria, cyanobacteria)은 고온기 동안(6~7월)에 높은 밀도를 보인 반면, 비교적 큰 nanoplankton (phytoplankton, protists)은 저온기 동안(4~6월)에 높았다. 그러나 강우기(7~9월까지)에는 현존량이 감소하거나 갈수기만큼 증가하지 않았다. 이는 강우로 인한 수온 감소와 빠른 수체이동이 주된 원인으로 판단되며, 경안천에서 더욱 뚜렷하였는데, 1997년도 연구(Hong *et al.*, 2002)와 일치하였다. 두 조사지점의 플랑크톤 현존량의 변화는 bacteria의 경우 수계간의 큰 차이를 보이지 않았으나, nanoplankton은 경안천에서 높은 밀도를 보인 반면, cyanobacteria는 석촌호수에서 높은 밀도를 보였다. 이는 비록 두 수계가 모두 부영양상태(한양대, 2001; Hong *et al.*, 2002)이고, 유사한 강우패턴을 갖고 있지만, 경안천의 경우, 짧은 체류시간(5.4일), 북한강과 남한강 지류의 혼합 등으로 인한 수체 및 수질 변화가 심하여 다양한 플랑크톤의 분포가 가능한 반면, 석촌호수는 상대적으로 긴 체류시간(약 72일)에 의한 수체안정 및 동일시기에 경안천에 비해 높은 수온(1~2°C) 등이 bacterioplankton의 성장에 유리하게 작용했을 것

으로 사료되었다(Horne and Goldman, 1994; Takamura *et al.*, 1996). 한편, 석촌호수에서 6월말~7월초에 대발생하였던 남조 *Microcystis* sp. 1는 경안천에서는 같은 시기에 낮은 밀도를 보였으며, *Microcystis* sp. 2은 조사기간 동안 강우에 상관없이 석촌호수에서 높은 밀도를 보인 반면, 경안천에서는 6월 22일에 한 차례만 대발생을 일으킨 후 계속하여 낮은 밀도를 유지하였다. 특히 두 남조류의 초기발생시기 및 밀도면에서 크게 차이를 보였는데, 석촌호수는 이미 겨울철(12월말) 부터 낮은 밀도를 보이기 시작한 반면, 경안천에서는 4월말이나 6월초에 비로서 출현하는 등, 수온이 거의 동일한 시기부터 종 출현 특성이 다르게 나타났다.

두 수계간의 뚜렷한 차이를 보인 것은 환경요인은 전도도와 pH였다. 경안천의 전기전도도는 강우가 가장 집중했던 시기를 제외하고는 석촌호수보다 약 2배이상 높은 수준이었다. 이는 지속적인 북한강과 남한강 유입, 또는 고온기 강우에 의한 희석에도 불구하고 상류의 각종 농, 공업 및 생활하수의 유입이 주된 원인으로서(Hong *et al.*, 2002), 상류의 점 또는 비점오염원의 관리가 시급함을 시사해준다 하겠다. 한편 pH는 저온기에는(4~6월) 경안천에서, 고온기에는(6~8월) 석촌호수에서 각각 높았는데 이는 주로 조류성장과 밀접한 관계를 보이는 것으로 해석된다. 경안천의 경우, 저온-갈수기 동안(3월 해빙과 함께) 높은 영양염의 유입으로 말미암아 *Stephanodiscus*, *Cryptomonas*, *Cyclotella* 등의 높은 성장이 주요 원인으로 사료되며, 잦은 강우시기에는 조류의 밀도감소에 의해 중성 pH 범위를 보였다. 특히 석촌호수의 경우, 저온기동안(12~5월중순)에는 남조류 밀도가 낮았으나, 고온기(6월초)에 접어들면서 급격한 남조대발생으로 인하여 pH가 꾸준히 증가하였다. 이처럼 남조의 증가에 의한 pH 증가는 경안천에서도 비슷하였다. 남조 *Microcystis* sp. 2 (6월 22일)와 *Merismopedia punctata* (7월20일)가 최고치(9.2)를 보였던 시기에 경안천 pH는 오히려 석촌호수보다 높거나 비슷한 수준이었다. 이상의 결과로부터, 남조류에 의한 pH 증가 및 잦은 강우에 의한 수체이동이 다른 조류나 플랑크톤군집에 어떠한 영향을 줄 것인지 보다 세밀한 연구가 요구되었다.

경안천과 석촌호수에서 미세먹이망의 특성은 뚜렷한 차이점을 보였다. 경안천에서는 저온기 (4~6월) 동안 phytoplankton bloom에도 불구하고 bacteria는 크게 변동(증가 또는 감소)되지 않았으며 수온변화와 유사한 경향을 나타냈다. 반대로 박테리아의 최고밀도를 보인 시기(7월 7일: 경안천, 7월 13일: 석촌호수)에도 각 수계의 phytoplankton의 감소 또는 증가를 보이지 않았다. 한편 석촌호수에서는 phytoplankton증가(3월) 및 bacteria의 감소(4월)를 보였으며, 강우기에는 뚜렷하지는 않았지만 유사한 경향을 보였다. 또한 두 수계에서 남조 cyanobacteria의 증가(6월 1일, 6월 22일)에 이은 박테리아의 증가가 뚜렷하였다. 결국 박테리아와 phytoplankton간의 관계에 있어서 비교적 세포크기가 작은 소형 남조류가 크기가 큰 phytoplankotn보다 밀접한 관계를 갖는 것으로 사료되었다. 이러한 이유는 경안천은 지속적인 북한강/남한강의 유입으로 인하여 독립영양세포에서 배출된 DOC가 수체이동과 함께 빠르게 이동됨으로서 박테리아의 성장에는 크게 기여하지 못하고 수온에 의존된 것으로 판단되었다(Horne and Goldman, 1994). 이에 반해 석촌호수는 비교적 안정된 수체(72일 체류시간)를 유지함으로서 식물플랑크톤에서 배출된 DOC가 수온증가와 함께 박테리아 성장에 크게 기여한 것으로 밝혀졌다. 이러한 특징은 경안천에서 박테리아가 최고생체량을 보인 이후, 수온감소에 따라 급격하게 감소하는 특징을 보인 반면, 석촌호수에서는 박테리아의 성장이후 비교적 서서히 감소하는 점에서도 나타났는데, 결국 수체이동이 미세먹이망의 에너지흐름에 매우 큰 영향을 미치는 것으로 사료되었다. 한편 두 수계의 Protists의 년중 변화는 크게는 phytoplankton의 변화에 유사한 경향을 보였으며, phytoplankton이나 cyanobacteria보다 박테리아의 변동에 매우 밀접하게 관련되었다. 이러한 경향은 두 수계 공히 관찰되었으며, 저온기나 특히 강우기에도 모두 뚜렷하게 나타났다. 이러한 결과는 수계내 미세먹이망은 수체이동에 의해 크게 지배를 받기는 하나 박테리아와 phytoplankton (cyanobacteria를 포함한)보다 박테리아와 protists간에 더욱 밀접한 관계를 가지고 있으며, 수체이동이 빠른 경안천에서는 박테리아보다 운동성이 강한 protists에 의한 에너지 전달이 보다 효율적임을 시사해 주었다. 문 등(2004)은 경안천에서 조류발생시 먹이섭식에 따른 섬모충플랑크톤의 분포는 bacteriovores보다 planktivores가 더 높다는 사실을 보고한 바 있다.

두 수계에서 출현된 플랑크톤의 개체수와 탄소생체량의 변화는 bacterioplankton에서는 큰 차이를 보이지 않은 반면, nanoplankton에서는 차이를 나타냈다. 이러한 현상은 년중 대부분 남조가 우점하였던 석촌호수보다 다양한 우점종이 출현한 경안천에서 뚜렷하였다. 경안천에서 최대 phytoplankton밀도(6월 22일, 1.1×10^6 cells mL^{-1})를 보였던 시기의 탄소생체량은 1.5×10^6 pgC mL^{-1}에 불과했으며 우점종은 *Microcystis*인 반면, 밀도는 비록 적었으나 4월말 탄소생체량이 4.1×10^6 pgC mL^{-1}로 최고치를 보였던 시기의 우점종은 *Cryptomonas ovata*로 나타났다.

한편, 석촌호수에서는 저온기(4~5월말)동안 높은 개체수를 보였던 시기에 조사기간중 가장 낮은 탄소생체량을 나타낸 것은 다른 시기보다 저온기 동안에 크기가 작은 bacteriovores인 *Halteria* 속이 높게 출현하였기 때문이다. 이러한 현상은 수계의 특성에 따른 플랑크톤 종 출현이나 분포의 차이로서 bacterioplankton보다 nanoplankton이 수계의 물리적인 현상에 민감하게 반응함을 시사해 주고 있지만(Jurgens and Simek, 2000), 조사기간동안 수계가 비교적 불안정한 경안천에서 보다 높은 현존량 및 탄소생체량을 보인 반면, 수계가 안정되고 지속적인 남조류가 발생하였던 석촌호수에서 낮은 탄소생체량을 나타내는지 추후 연구가 필요하다.

적 요

체류시간이 서로 다른 두 부영양 수계에서 미소먹이망의 생태학적 정보를 파악하고자, 기초적 환경요인과 bacterioplankton 및 nanoplankton의 현존량 및 탄소생체량을 각각 조사하였다. 조사기간동안 두 수계 공히 강우는 주로 7월에서 9월에 집중하였으며, 수온 역시 큰 차이는 없었다. 두 수계의 플랑크톤 군집은 공히 저온기 동안에는 비교적 세포크기가 큰 nanoplankton이 우점한 반면, 고온기 동안에는 소형 bacterioplankton이 높은 현존량을 나타냈다. 그러나 비교적 수계가 안정된 석촌호수에서는 강우에 큰 영향을 받지 않은 반면, 경안천에서 nanoplankton은 현존량은 물론 탄소생체량의 다양한 변화를 보였다. 두 수계의 미세먹이망은 석촌호수에서는 박테리아와 phytoplankton 또는 cyanobacteria간에 밀접한 분포 관계를 보인 반면, 경안천에서는 박테리아와 protist 사이에 뚜렷한 먹이관계를 보였다. 또한 경안천에서 개체수와 탄소생체량간의 비대칭적인 현상이 뚜렷하였다. 따라서 경안천의 미세먹이망은 수온이나 영양물질보다 강우에 의한 빠른 체류시간에 의해 강하게 영향을 받고 있지만, 안정된 수계에 비해 bacterioplankton보다 nanoplankton 들의 높은 성장과 종 다양성을 유도하였다.

사 사

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업(2000-N-NL-01-C-290)에 의하여 수행되었습니다.

참 고 문 헌

국립환경연구원. 1988. 팔당 상수원 보호 종합대책에 관한 연구(I). NIER No. 88-15-240.

권오열. 1997. 석촌호수의 수질 모델링. 서울산업대학교 논문집. **45**: 177-187.

문은영, 김영옥, 김백호, 공동수, 한명수. 2004. 팔당호 섬모충플랑크톤의 분류 및 생태학적 연구. 한국육수학회지. **37**: 149-179.

한명수, 류재근, 유광일, 공동수. 1995a. 팔당호의 생태학적 연구 1. 수질의 연변화: 과거와 현재. 한국육수학회지. **26**: 141-149.

한명수, 어윤열, 유재근, 유광일, 최영길. 1995b. 팔당호의 생태학적 연구 2. 식물플랑크톤의 군집 구조의 변화. 한국육수학회지. **28**: 335-344.

한양대학교 자연과학연구소(2001). 석촌호수 수질관리 종합대책에 관한 연구용역 최종보고서.

Anderson, P. and H. M. Sorensen. 1986. Population dynamics and trophic coupling in pelagic microorganisms in eutrophic coastal waters. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **33**: 99-109.

Azam, F., T. Fenchel, J.G. Field, R.L.A. Meyer and F. Thingstad. 1983. The ecological role of water-column microbes in the sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **10**: 257-263.

Bloem, J. and G.M.B. Bar. 1989. Bacterial activity and protozoan grazing potential in a stratified lake. *Limnol. Oceanogr.* **34**: 291-309.

Bratbak, G. and I. Dundras. 1984. Bacterial dry-matter content and biomass estimation. *Appl. Environ. Microbiol.* **48**: 755-757.

Horne, A.J. and C.R. Goldman. 1994. Limnology. McGraw-Hill, Inc.

Hong S.S., S.W. Bang., Y.O. Kim and M.S. Han. 2002. Effects of rainfall on the hyrological conditions and phytoplankton community structure in the riverine zone of the Pal'tang reservoir, Korea. *J. Freshwater Ecol.* **17**: 507-520.

Hwang S.J. and R.T. Heath. 1997. The distribution of protozoa across a trophic gradient, factors controlling their abundance and importance in the plankton food web. *J. Plankton Res.* **19**: 491-518

Jurgens, K. and K. Simek. 2000. Functional response and particle size selection of Halteria df. Grandinella, a common freshwater oligotrichous ciliate. *Aquat Microb Ecol.* **22**: 57-68.

Lee, J.J. and J.A. Fuhrman. 1987. Relationships between biovolume and biomass of naturally derived marine pacterioplankton. *Appl. Environ. Microbiol.* **53**: 1298-1303.

Mullin, M.M., P.R. Sloan and R.W. Eppley. 1966. Relationship between carbon content, cell volume, and area in phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.* **11**: 307-310.

Nakano, S. and Z. Kawabata. 2000. Changes in cell volume

of bacteria and heterotrophic nanoflagellates in a hypereutrophic pond. *Hydrobiologia*. **428**: 197–203.

Nakano, S., P. Manage, Y. Nishibe and Z. Kawabata. 2001. Trophic linkage among heterotrophic nanoflagellates, ciliate and metazoan zooplankton in a hypertrophic pond. *Aquat. Microb. Ecol*. **25**: 259–270.

Sherr, E. and B. Sherr. 1988. Role of microbes in pelagic food webs: a revised concept. *Limnol. Oceanogr*. **33**: 1225–1227.

Small, L.F., M.R. Landry and R.W. Eppley. 1989. Role of plankton in the carbon and nitrogen budgets of Santa Monica Basin, California. *Mar. Ecol. Prog. Ser*. **56**: 57–74.

Strathmann, R.R. 1967. Estimating the organic carbon content of phytoplankton from cell volume or plasma volume. *Limnol. Oceanogr*. **12**: 411–418.

Suzuki, T. 2000. Role of planktonic ciliates in partitioning of carbon flux in the ocean. *Oceanographic Soc. Japan*. **9**: 27–40.

Takamura, N., Y. Ishikawa, H. Mikami, H. Mikami, Y. Fujita, S. Higuchi, H. Murase, S. Yamanaka, Y. Nanjyo, T. Igari and T. Fukushima. 1996. Abundance of bacteria, picophytoplankton, nanoflagellates and ciliates in relation to chlorophyll *a* and nutrient concentrations in 34 Japanese waters. *Jpn. J. Limnol*. **57**: 245–259.

Waterbury, J.B., S.W. Watson, F.W. Valois and D.G. Franks. 1986. Biological and ecological characterization of the marine unicellular cyanobacterium *Synechococcus*. *Can. Bull. Fish. Aquat. Sci*. **214**: 71–120.

(Manuscript received 20 July 2004,
Revision accepted 28 August 2004)