

팔당호의 생태학적 연구 4. 경안천 하류의 영양염 및 입자태 유기물 거동과 식물플랑크톤의 천이

한 명 수^{1,2,3,*} · 홍 성 수^{2,3} · 어 윤 열^{1,4}

(¹한양대학교 생명과학과, ²물환경생태복원 국가지정연구소, ³한양대학교 환경과학과, ⁴광동중학교)

Ecological Studies on Pal'tang River-Reservoir System in Korea. 4. Dynamics on Inorganic nutrients, POM and Phytoplankton Succession in the Lower Stream Kyungan. Han, Myung-Soo^{1,2,3,*}, Sung-Su Hong^{2,3} and Yun-Yeol Auh^{1,4} (¹Dept. of Life Science, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea; ²National Research Laboratory for Water Environmental Ecology & Restoration, ³Dept. of Environmental Science Hanyang University, Seoul 133-791, Korea; ⁴Kwang-Dong Middle School, Namyangju 473-860, Kyunggi, Korea)

In order to understand the relationship between succession of phytoplankton community structure and inorganic nutrients and particulate organic matters, a one station in Kyungan stream in Korea during the dry season was chosen. Water samplings were carried out once a week from 18 August to 13 November 1993. The DIN concentration distributed always abundantly, however, phosphate and silicate gradually reduced during the period. Phytoplankton community had a peak chlorophyll *a* concentration of 90.6 µg/l in late summer (21 August 1993) and a second peak of 29.7 µg/l in autumn (2 October 1993). After then late autumn was characterized by relatively low chlorophyll *a* concentration of 15~16 µg/l. Seasonal fluctuation of chlorophyll *a* concentrations were correlated with measured POC and PON concentrations: phytoplankton blooming may be a major factor controlling POC and PON concentrations in this ecosystem. Phosphate plays an most important role as a limiting factor of phytoplankton growth. However, when Si/P ratio low, silicate may be a more critical limiting factor than phosphate. Shifts of P-limitation to Si-limitation the succession of dominant phytoplankton can in duce: diatom to cyanobacteria such as *Anabaena*, *Microcystis* and *Oscillatoria*.

Key words : Pal'tang river-reservoir system, Inorganic nutrients, POM, DIN/P ratio, Si/P ratio, Phytoplankton succession

서 론

팔당호가 갖고 있는 다목적 기능 중에서 가장 중요한 것은 수도권 지역의 상수원 공급이지만, 댐 축조 이후

유역의 산업활동과 인구증가로 인하여 점차 부영양화 되어왔다(김 등, 1989; 한 등, 1993, 1995, 1999; Kong, 1997). 팔당호의 수질은 체류시간이 길어지는 갈수기인 봄철과 가을철에 크게 악화된다. 특히, 경안천의 하류는 팔당호의 지류 중에서도 가장 체류시간이 길고 부영양

*Corresponding author: Tel: 02) 2290-0956, 1704, Fax: 02) 2296-1741, E-mail: hanms@hanyang.ac.kr

화 되어있어 팔당호의 수질에 가장 큰 영향을 미치고 있다(Kong, 1997; 한 등, 1999). 일반적으로 부영양화된 호수에서 식물플랑크톤의 계절적 천이양상은 소형 편모류, 규조(봄), 군체성 녹조(이른 여름), 남조(여름~가을)의 연속성을 나타내며 낸다(Reynolds, 1984). 부영양화에 의한 팔당호의 식물플랑크톤 우점종 변화는 규조류 우점에서 녹조류를 포함한 갈편모조류와 남조류의 우점 현상이 관찰되고 있으며 유해 및 유독성 남조류의 bloom이 하계와 추계에 경안천의 하류에서 집중적으로 매년 발생하고 있다(한 등, 1995; 김, 1998; 이, 1998; 홍, 2001).

남조류의 bloom은 수중에 이취미를 발생시키거나 독소를 발생시켜 음용수 공급을 위한 수질관리에 많은 문제점을 야기시킨다(Carmichael and Falconer, 1993; Thompson and Rhee, 1993). 국내에서도 남조류의 bloom이 경관을 해치거나, 독소를 생산하여 수질관리의 어려움 겪고 있다(Lee et al., 1998; 오 등, 1999). 따라서 수질관리를 위한 남조류의 bloom 메커니즘을 규명하는 것은 매우 중요한 과제이지만, 아직까지 경안천 하류에 있어서의 남조류의 bloom 메커니즘에 관한 이해는 거의 이루어지지 않은 실정이다. 저자들은 첫째, 경안천의 남조류 bloom에 영향을 미치는 요인은 무엇인가? 둘째, 유기물입자(Particulate Organic Matter, POM)의 동태는 유역부하에 의한 것인가? 아니면 내부부하에 의한 자체 생산인가? 에 대한 답을 얻기 위하여 우선 가을철 수계 내의 유기물 입자와 영양염 동태에 미치는 환경요인은 무엇이며, 이들과 남조류의 bloom과의 상관 관계를 밝히고자 하였다.

재료 및 방법

1. 조사수역의 개황

팔당호의 지류인 경안천은 광주군과 이천군에서 발원하며 지역의 암질은 변성암이 대부분이고 흑운모, 편마암, 석영, 장석질, 석마암으로 되어있고 동쪽으로는 양자산과 남쪽의 시공산, 태화산에 의해 북으로 흘러 들어 팔당호로 유입된다(한국지질도, 1978). 팔당호의 3개 지류 중 하나인 경안천의 길이는 49.6 km로 북한강(317.5 km)이나 남한강(382.2 km)에 비해 매우 짧은 하천이다(Kong, 1997). 유역주변에는 골프장을 포함한 유락시설과 축산 농가들이 밀집되어 있으며 수도권에 인접해 있어 인구 증가로 인해 오염이 가중되고 있다(경기개발연구원, 1997). 경안천은 남한강, 북한강과 비교해서 동일

거리 상으로 볼 때 높은 고지대와 짧은 하천으로 인해 하천 폭은 좁고 경사도는 다른 지류보다 경사가 높아 유속이 매우 빠른 것으로 보고되어 있으나(한국수문조사월보, 1993), 경안천 하류에서는 급격히 유속이 감소하여 갈수기에는 정체가 심한 특징을 보인다.

또한 경안천 유역은 계절별로 기온, 강수량, 일조량이 뚜렷하게 나타난다. 계절풍 기후대에 속해 있는 조사 지역의 기온변화는 월별로 큰 차이를 보이는데 8월, 9월, 10월, 11월 평균기온은 각각 20.8°C, 15.6°C, 6.3°C, -6.0°C로 월 평균 8.9°C의 기온 차를 보였다(Fig. 2). 호소수의 수온은 겨울에 결빙되고 여름에 25°C까지 상승하며 수계의 수직혼합이 거의 연중 일어나지만, 하계의 고수온기에 약한 수온 약층을 형성하기도 한다.

2. 이화학적 분석

본 조사는 경안천 하류의 광동교 부근에서 실시하였으며(Fig. 1) 8월 18일부터 11월 13일까지 주 1회의 간격으로 총 14회에 걸쳐 표층수를 채수하였다. 시료는 5 l Van-Dorn 채수기를 사용하여 채수하였다. 식물플랑크톤의 생물량은 chlorophyll a에 의한 방법과 현존량에 의한 방법으로 측정하였다. Chlorophyll a를 측정하기 위한 시료는 GF/F로 여과한 후 냉장운반 하였으며, 냉암소에서 90% 아세톤을 이용하여 24시간 동안 색소를 추출한 후, UV-VIS Spectrophotometer (Pharmacia, LKB Biochrom 4060)로 분석하였다. 입자태 유기탄소(POC)와 입자태 유기질소(PON)을 분석하기 위하여 450°C에서 회화 시킨 유리섬유여과지(GF/C filter, 직경 47 mm)를 이용하여 현장에서 500 ml의 시료를 여과한 후 분석 시까지 냉동 보관하였다. 분석은 건조 연소법으로 여과지를 50°C에서 24시간 동안 건조 후 CHN analyzer (Perkin Elmer-2400)로 측정하였다. 입자태 인(PP)은 TP (Total P)에서 TDP (Total Dissolved Phosphorus)를 빼어서 계산하였다. TP는 여과하지 않은 시료를 이용하여 측정하며, TDP는 여과된 시료를 이용하여 분석하였다(Menzel and Corwin, 1965). 또한, 여과된 시료를 이용한 질산염(NO₃), 아질산염(NO₂), 암모니아(NH₄), 규산염(SiO₂) 및 인산염(PO₄)의 측정을 위하여 현장 채집 후 냉장 운반하였으며, 이들 중 암모니아는 현장에서 채집 즉시 2% phenol로 고정하여 냉장 운반하였다. 시료의 분석은 Standard Method (APHA, 1992)를 따라 행하였으며 분석기기는 Spectrophotometer (Pharmacia, LKB Biochrom 4060)를 사용하였다. 건조된 여과시료를 2부분으로 나누어서 한 부분은 총인을 측정하고 나머지 부



Fig. 1. Sampling station of Kyungan Stream in Korea.

분은 무기 인을 측정하여 유기 인은 총인에서 무기 인을 빼어서 계산하였다. 식물플랑크톤의 검정시료는 1 l 정도를 현장에서 바로 고정하여 실험실로 운반 후 침전법에 따라 시료를 농축시킨 후, Sedgwick-Rafter Counting Chamber를 사용하여 현미경의 저배율(×200) 하에서 식물플랑크톤의 현존량을 계수하였으며, 군집구조 분석을 위한 동정은 고배율(×400, ×1000) 하에서 행하였다.

결 과

1. 강수량과 무기 영양염류 동태

갈수기의 강수량과 무기 영양염 동태는 그림 2와 같다. 조사기간동안 강수량은 매우 적었으며, 최고 10 mm 이상의 강수량이 내린 시기는 8월 21일(27 mm), 9월 17일(82 mm), 10월 22일(10 mm) 그리고 11월 13일(36 mm)의 4번이었으며, 이외의 강우 시기에는 5 mm 이하의 적은 강우량을 보였다. 1993년 8월 18일부터 11월 13일까지 표층의 질산성 영양염(DIN = NH₄⁺-N, NO₂⁻-N, NO₃⁻-N)은 최저 45.8 μg atm/l(9월 18일)부

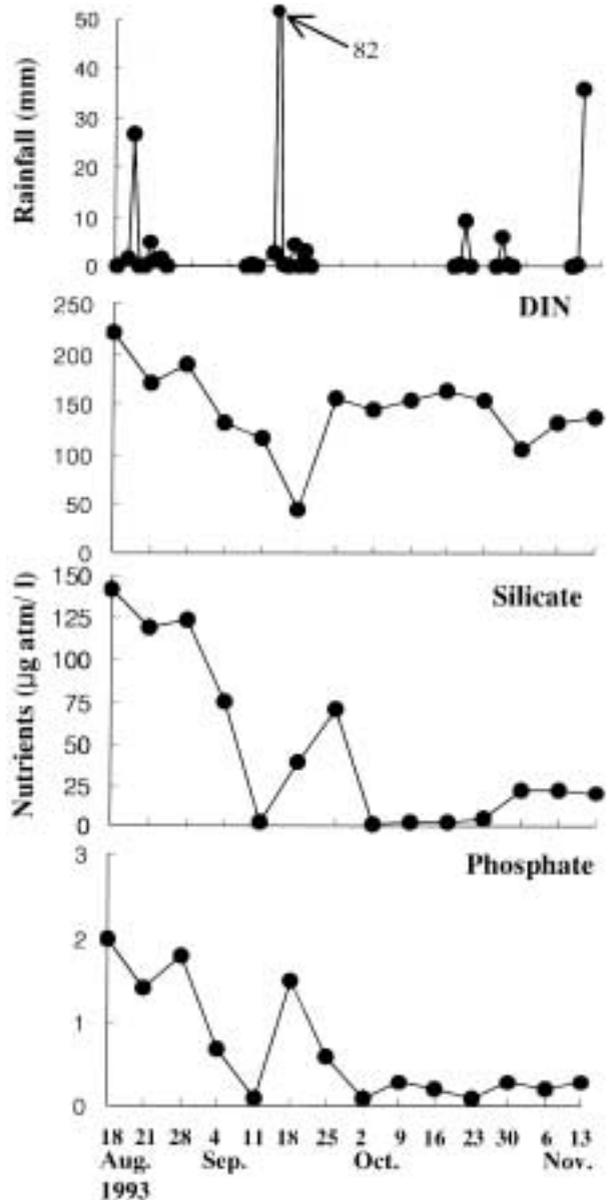


Fig. 2. Seasonal fluctuation of rainfall, inorganic nutrients as DIN (Dissolved Inorganic Nutrients), phosphate and silicate in surface waters of Kyungan Stream in Korea from August 18 to November 13, 1993.

터 최고 221.3 μg atm/l(8월 18일)까지 매우 고농도로 분포하였다. 인산염은 부영양화 수역으로서는 비교적 낮은 농도 분포를 보여 최저 0.1 μg atm/l(9월 11일, 10월 2일 및 10월 23일)에서 최고 1.8 μg atm/l(8월 28일)까지 변화하였으며, 10월 중순 이후 인산염의 농도는 상대적으로 감소하였다. 규산염은 DIN과 인산염에 비해 농도변화가 매우 심하였고, 10월 중순 이후 현저한 감소를

보이는 것이 큰 특징이다. 최저 $1.0 \mu\text{g atm/l}$ (10월 2일)에서 최고 $142.2 \mu\text{g atm/l}$ (8월 18일)까지 변화하였으며, 9월 11일과 10월 중순에 일시적으로 고갈되는 현상을 보였다. 강우량과 영양염(인산염과 규산염) 분포와의 관계를 검토하였을 때, Fig. 3에서와 같이 8월 중순과 9월 중순은 강우 이후에 높은 농도 분포를 보이지만, 10월 이후부터는 수온의 저하와 함께 강우도 감소하고, 인산염과 규산염의 농도 분포도 큰 폭으로 감소하였다. 그러나, 질산성 질산염은 항상 풍부하였고 인산염 보다 수심에서 수백 배 이상의 높은 농도 분포를 보였다.

2. Chlorophyll a와 유기물 입자태의 동태

1993년 8월 18일부터 93년 11월13일 까지 경안천의 표층에 대한 chlorophyll a의 농도 변화는 Fig. 3과 같다. Chlorophyll a의 값은 1993년 8월 21일 $90.6 \mu\text{g/l}$ 로 최대 값을 보였다. 10월 중순 이후부터는 $15 \sim 16 \mu\text{g/l}$ 의 값을 유지하였다 (Fig. 3).

입자태 유기탄소, 입자태 유기질소 및 입자태 유기인의 동태는 Fig. 3과 같다. 입자태 유기탄소는 최저 $86.3 \mu\text{g atm/l}$ (8월 18일)부터 최고 $426.7 \mu\text{g atm/l}$ (8월 21일)까지 가장 풍부하게 분포하였다. 입자태 유기질소는 $4.6 \mu\text{g atm/l}$ (8월 18일)에서 최고 $60.8 \mu\text{g atm/l}$ (8월 21일)까지 변화하였다. 입자태 유기인의 농도는 입자태 유기탄소와 입자태 유기질소에 비하여 상대적으로 매우 낮은 농도 분포를 보여 $0.3 \mu\text{g atm/l}$ (8월 21일)에서 최고 $1.4 \mu\text{g atm/l}$ (10월 2일)까지 변화하였고, 변화폭도 상대적으로 매우 낮았다. 입자태 유기탄소 및 질소 농도변화는 8월 21일과 10월 2일의 2번의 피크를 보였는데, 이것은 Fig. 2에서 관찰된 바와 같이 8월 21일은 강우에 의해 영향을 받은 듯하나, 10월 2일의 피크는 강우와는 상관관계가 없는 듯하다. 본 자료는 늦여름에서 늦가을까지의 갈수기의 조사 결과였기 때문에 강우와 무기 영양염 분포 그리고 강우와 입자태 유기물의 분포와의 상관관계를 보다 정확히 파악하기 위해서는 우기를 포함한 장기적인 모니터링 조사가 요구된다.

3. DIN/P atom ratio와 Si/P atom ratio

DIN/P ratio와 Si/P ratio의 변화는 그림 4와 같다. DIN/P ratio는 전 조사시간을 통하여 항상 31 (9월 18일)에서 1545 (10월 23일)까지 변하고 있어, 경안천에서는 항상 인산염이 제한 인자로 작용한다는 것을 의미한다. 그러나, Si/P ratio의 변화 패턴으로 보면 9월 11일 ~ 18일 사이에는 $26.4 \sim 28.0$ 그리고 10월 2일 ~ 16일 사

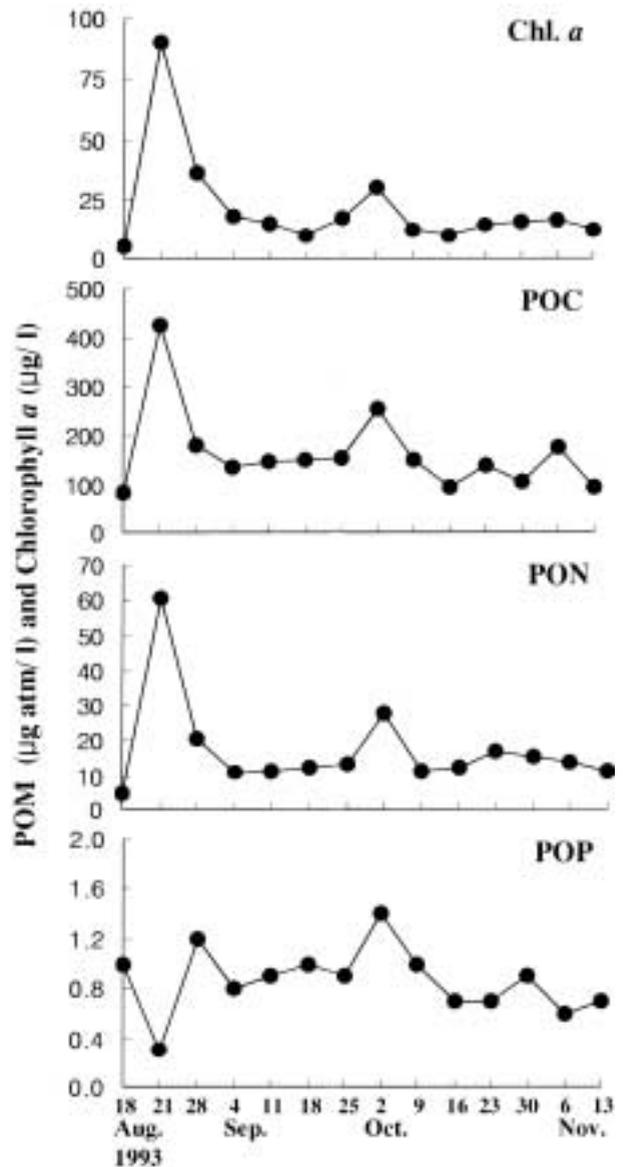


Fig. 3. Seasonal fluctuation of chlorophyll a and POM as POC and PON in surface waters of Kyungan Stream in Korea from August 18 to November 13, 1993.

이에서는 $7.7 \sim 14.0$ 의 낮은 Si/P ratio를 보였다. 이러한 결과는 인이 제한인자로 작용하지만, 때로는 인보다는 규산염이 제한 인자로 작용할 수 있다는 것을 의미한다.

4. 식물플랑크톤

조사기간 중 출현한 식물플랑크톤의 분류군 별 출현종 수는 7개 분류군에 99종이었으며, 이들은 규조류 (Bacillariophyceae)가 26종, 녹조류 (Chlorophyceae)가

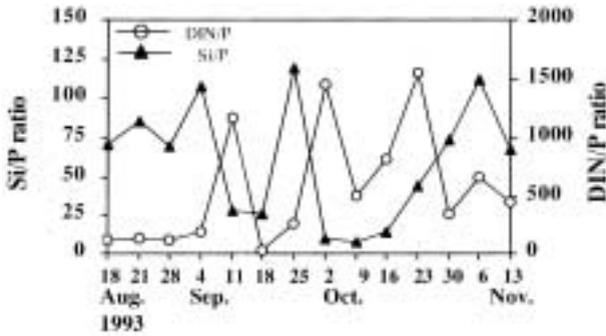


Fig. 4. Changes of DIN/P ratio and Si/P ratio in surface waters of Kyungan Stream in Korea from August 18 to November 13, 1993.

53종, 남조류(Cyanophyceae)가 10종, 유글레나류(Euglenophyceae)가 4종, 와편모조류(Dinophyceae)가 2종, 황색편모조류(Chrysophyceae)가 1종, 갈편모조류(Cryptophyceae)가 3종으로 구성되었다.

조사기간동안 관찰된 식물플랑크톤에 대하여 규조류와 남조류 그리고 녹조류를 포함한 나머지 분류군의 3 그룹으로 나누어 현존량의 변화를 상대적으로 분석하였다(Fig. 5). 조사기간동안 표층과 저층간의 식물플랑크톤 현존량 차이는 8월을 제외한 나머지 모든 시기에 걸쳐 큰 차이가 없었다. 조사의 후반인 가을철로 가면서 식물플랑크톤의 전체 현존량은 4×10^5 cells/l 이하로 점점 감소하였으며 표층의 규조류의 점유율은 10월 23일(20%)을 제외하고 전체 현존량의 70% 이상 차지하고 우점하였으며 저층에서도 유사하게 관찰되었다. 반면, 녹조류를 포함한 나머지 분류군의 점유율은 늦은 여름철에서 가을철로 들어가면서 점점 쇠퇴하는 현상을 보였다(그림 5). 이 과정에서 남조류는 9월 중순과 10월 중순에 걸쳐 두번의 우점이 관찰되었다. 이 외에 황색편모조류, 유글레나류 그리고 와편모조류는 생물량이 적었고, 간헐적으로 출현하였다.

이들 분류군이 우점할 때, 구체적인 종의 구성을 파악하기 위하여 출현 종 중에서 1×10^6 cells/l 이상으로 총 현존량의 10% 이상을 점유하는 종을 우점종으로 정하여 Tabel 1에 정리하였다. 8월에는 *Eudorina*와 *Micractinium*의 녹조류가 우점 하였으며, 9월 11일에 일시적으로 *Microcystis*의 남조류로 천이된 후 바로 *Aulacoseira granulata*의 규조류가 9월 18일부터 10월 9일 까지 우점하다가 10월 16일 에는 뚜렷한 우점종이 관찰되지 않았다. 이후 10월 23일 *Microcystis*의 일시적 출현 후 다시 *Aulacoseira granulata*가 우점종으로 천이 되었다.

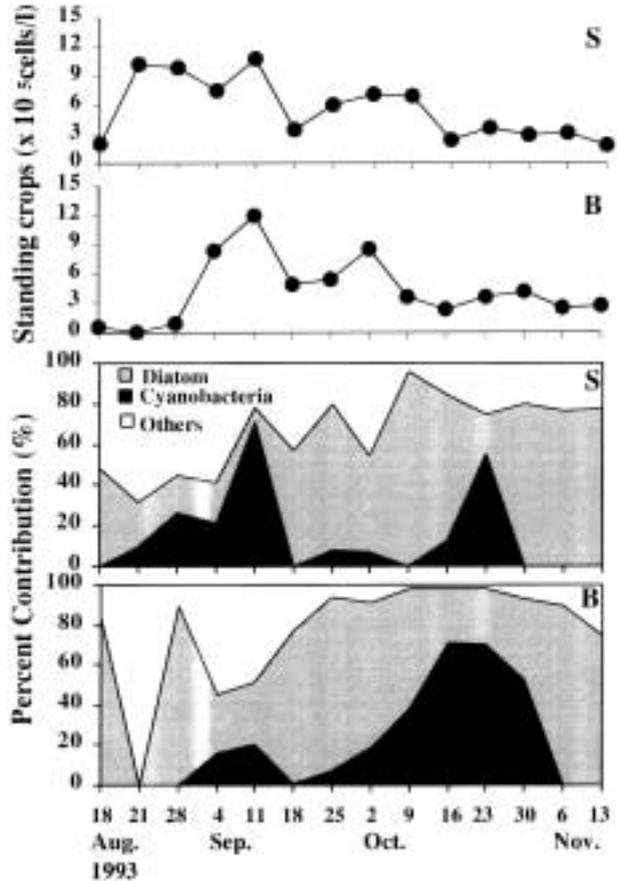


Fig. 5. The percentage contribution (%) and standing crops ($\times 10^5$ cells/l) at the diatom and the cyanobacteria in the estimated total phytoplankton cells in surface (S) and bottom (B) waters of Kyungan Stream in Korea from August 18 to November 13, 1993.

즉, 8월의 녹조류 우점에서 가을로 접어들면서 규조류와 남조류가 우점하나, 남조류의 bloom이 돌발적으로 나타나는 현상을 보였다. 전체적으로 정리하면 인산염이 제한 인자로 작용하는 시기에는 규조류가 우점하고 있었으며, 규산염이 제한인자로 작용하는 시기(9월 11일 ~ 18일, 10월 2일 ~ 16일)에는 남조류와 녹조류 등의 편모조류가 우점하는 현상이 관찰되었다. 특히, 남조류 중에서 *Anabaena*, *Microcystis* 및 *Oscillatoria*가 우점종으로 관찰되었다(Table 1). 식물플랑크톤의 총 현존량 중에서 남조류가 차지하는 비율은 10월 16일 저층에서 최대 71%로 관찰되었고, 남조류의 경우는 상층보다는 하층에서 더 우점하는 경향을 보였다.

Table 1. Dominant species (over 10⁶ cells/l and 10% of total phytoplankton) in the surface and bottom waters of Kyungan Stream from August 18 to November 13, 1993.

Date	Species (%)	
	Surface	Bottom
18 August	<i>Eudorina</i> sp. (23) <i>Cyclotella</i> sp. (10)	
21 August	<i>Merismopedia</i> sp. (10) <i>Pandorina</i> sp. (14)	<i>Micractinium</i> sp. (88)
28 August	<i>Micractinium</i> sp. (33) <i>Merismopedia elegans</i> (24)	<i>Actinastrum hantzschii</i> (12) <i>Micractinium</i> sp. (17)
4 September	<i>Aulacoseira granulata</i> (15) <i>Micractinium</i> sp. (21)	<i>Oscillatoria</i> sp. (16)
11 September	<i>Microcystis</i> sp.(58)	<i>Actinastrum hantzschii</i> (20) <i>Micractinium</i> sp (10) <i>Microcystis</i> sp. (20)
18 September	<i>Aulacoseira granulata</i> (30)	<i>Cyclotella</i> sp. (27)
25 September	<i>Aulacoseira granulata</i> (40) <i>Aulacoseira italica</i> (21)	
2 October	<i>Aulacoseira granulata</i> (37)	<i>Anabaena menderi</i> (19)
9 October	<i>Aulacoseira granulata</i> (78)	<i>Microcystis viridis</i> (38)
16 October		<i>Oscillatoria</i> sp. (49)
23 October	<i>Microcystis</i> sp. (50)	<i>Microcystis viridis</i> (50)
30 October	<i>Aulacoseira granulata</i> (40)	
6 November	<i>Aulacoseira granulata</i> (38)	

고 찰

경안천을 포함한 팔당호는 전형적으로 인의 제한 수역으로 알려져 있으며(한 등 1993; 홍, 2001), 경안천의 광동교 부근에서 농밀한 남조류의 대발생이 발생되고 있음이 본 연구에서 관찰되었다. 남조류 중에서도 질소 고정 능력이 있는 *Anabaena*와 질소 고정능력이 없는 *Microcystis*가 함께 출현하였다(Fig. 4와 Table 1). 이와 같이 질소가 풍부하고, 인이 제한 되에도 불구하고 남조류의 발생이 일어나는 현상은 소양호에서도 허 등(1992)에 의하여 관찰된 바 있다. 질소원이 풍부함에도 불구하고 갈수기에 경안천의 광동교 부근에 남조류가 우점하는 현상은 어떻게 설명 할 수 있을까? 우선, 남조류가 우점할 수 있는 환경조건은 1) 질소원이 결핍되었을 때의 상대적으로 유리한 성장조건이 이루어졌을 때(Horne and Goldman, 1972; Barica *et al.*, 1980; Tezuka, 1985), 2) 동물플랑크톤의 포식압 효과(Sarnelle, 1993; Gasiunaite and Olenina, 1998), 3) 영양염의 유용도(nutrient availability) (Sakshaug and Olsen, 1986; Han *et al.*, 1994)를 생각할 수 있다. 첫 번째의 경우는 질소

가 부족 혹은 결핍되었을 때, 질소 고정 능력을 갖고 있는 *Anabaena* 혹은 *Aphanizomenon bloom*의 현상은 설명할 수 있다. 그러나 경안천의 경우는 질소가 풍부하였으며, 또한 질소고정 능력이 없는 *Microcystis*도 *Anabaena*와 함께 bloom을 형성하였다는 점으로 보아 충분한 설명이 될 수 없을 것이다. 두번째의 경우인 동물플랑크톤의 포식압 효과에 대한 설명은 일반적으로 몸체가 큰 동물플랑크톤(*Daphnia*)이 우점하는 수역보다는 몸체가 작은 동물플랑크톤(*Bosmina*, rotifer와 작은 calanoid copepods)이 우점하는 수역에서 식물플랑크톤의 생물량과 일차생산력은 높으며, 평균 동물플랑크톤의 크기와 일차생산력은 역 상관 관계라고 알려져 있다(Kitchell and Carpenter, 1996). 또한 Gasiunaite and Olenina (1998)는 Kurši Marios lagoon (southeastern Baltic Sea)에서 갑각류의 포식압 증가로 인해 작은 녹조류와 규조류의 성장을 제한하였으며 이러한 효과는 사슬형태의 남조류의 대발생을 유발하였다고 보고하였다. 하지만 본 조사지역을 대상으로 동물플랑크톤에 대한 활용 가능한 연구자료가 없어 앞으로 남조류에 대한 동물플랑크톤의 섭식 효과에 대한 본격적인 연구가 필요함을 제언하고자 한다. 세 번째 설명은 본 연구의 결

과를 이용하여 설득력 있는 설명을 할 수 있다. 즉 경안천은 갈수기에 항상 인 제한을 받는 하천임에도 불구하고 때때로 규산염이 1~2.8 $\mu\text{g atm/l}$ 의 낮은 농도까지 고갈되는 현상이 발생되었으며 (Fig. 2), 이 때의 Si/P ratio도 아주 낮게 관찰되었다 (Fig. 4). 즉, 갈수기에 수중의 고갈된 인산염과 규산염의 농도는 식물플랑크톤의 최저 생장에 요구되는 반포화 상수 (half saturation constant) (Nielsen and Jorgensen, 1991) 이하 (phosphorous: < 1 $\mu\text{g atm/l}$; silicate: < 3 $\mu\text{g atm/l}$) 까지 고갈되었다. Kilham (1986) 등은 규조류는 높은 Si:P ratio (74~313 by moles)에서 우점하였지만, 반면 녹조류는 낮은 Si:P ratios (0.9~4.6 by moles)에서 우점 하였다고 보고 하였다. 본 조사결과도 이와 유사하게 인산염과 규산염이 함께 고갈되었을 경우, 규조류보다는 남조류가 더욱 우점 하는 현상이 그림 5에서 관찰되었다. 다시 말하면, Si/P ratio가 낮은 시기인 (9월 중순과 10월)에는 전체 식물플랑크톤 중 녹조류나 남조류의 점유율이 높아지고 Si/P ratio가 높아질 경우 (11월 이후)에는 규조류의 점유율이 높아지고 있음이 관찰되었다. 이것은 인산염 보다 규산염이 제한인자로 작용하면 규조류 보다 녹조류나 남조류의 생장이 유리할 수 있음을 의미한다 (Wetzel, 1983).

본 조사에서도 이 시기의 규산염의 농도는 1~4.4 $\mu\text{g atm/l}$ 의 비교적 저농도로 관찰되었으며 인산염 농도 변화 뿐만 아니라 규산염의 농도 변화도 식물플랑크톤의 군집구조 변화에 매우 중요한 역할을 하고 있을 것으로 사료된다. 이와 같이 본 조사지점에서 갈수기에 남조류의 대발생을 유발하는 원인은 체류시간의 증가에 따른 수체의 안정화와 더불어 식물플랑크톤의 영양염 요구 특성의 차이가 규조류의 우점에서 남조류 우점으로 천이 되는 중요한 요인으로 작용하였을 것으로 사료된다. 다만 이러한 영양염 요구특성에 대한 보다 확실한 결론을 얻기 위하여서는 식물플랑크톤의 천이 기간과 천이 시기의 전과 후에 대상 식물플랑크톤의 생체의 화학적 성분분석, 현장수의 화학적 구성비의 조사 (Tezuka, 1989b; 한 등, 1993)와 실험실에서의 영양염 구배에 따른 식물플랑크톤의 천이 실험이 요구된다.

본 연구에서 chlorophyll a의 증가에 따라 입자태 유기질소 및 입자태 유기탄소의 양이 증가하고 있음이 뚜렷하게 밝혀졌다. 이것은 경안천의 유기물 오염은 주로 조류의 번성으로 인한 자체생성 유기물이 주된 원인임을 의미한다. 이 결과는 기존의 팔당호의 유기물 생산력 중 70%는 식물플랑크톤에 의한다는 보고 (김과 김, 1990)와도 일치한다. 더욱이, 한 등 (1999)은 팔당호의 3

개 지류 중 경안천의 유기물 생산력이 가장 높고, 80년대 후반에 비해 90년대 후반에는 chlorophyll a 값은 약 2배, 기초생산력은 약 5배가 증가하였다고 보고하고 있으며, 경안천의 유기물 생산력은 국내에서 녹조 대발생으로 인하여 가장 유기물 오염이 심각한 낙동강의 약 70% 정도에 미치는 생산력으로서 팔당호의 유기물 오염은 날로 악화되고 있음을 반영하고 있다.

일본의 Biwa호에서의 인의 공급은 주로 수중 식물플랑크톤의 분해와 용출에 의한 재순환 작용으로 내생적 기원에 의하여 공급되고 있다고 보고되었다 (Tezuka, 1988; 1989a, b). 반면 본 조사지역에서의 인산염과 규산염의 공급은 내생적으로 기원되지 않으며 대부분 강우에 의하여 외부로부터 공급되고 있었다 (홍, 2001). 이 결과는 본 조사지역에서 인의 분포는 식물플랑크톤의 bloom이후에 분해에 의하여 식물플랑크톤의 세포내 인이 수중으로 공급되는 양은 거의 무시될 수 있음을 암시한다. 따라서 팔당호의 유기물 생산을 억제하기 위하여서는 외부기원 인산염 유입량의 제어 뿐만 아니라 규산염의 역할도 매우 중요하다는 것을 강조할 수 있고, 또한 호소의 생산력을 조절하기 위한 생태계 모델링과 호소의 수질관리를 위하여 규산염의 동태와 모니터링이 매우 중요한 측정 항목이 되어야 할 것이다 (Thompson and Hosja, 1996).

적 요

팔당호 지류인 경안천의 입자태 및 무기 영양염의 동태와 이들이 식물플랑크톤의 군집구조의 천이에 미치는 영향을 규명하기 위하여 1993년 8월 18일부터 11월 13일까지 주 1회의 조사를 14주 동안에 걸쳐서 수행하였다. 질산성 질산염은 조사기간 중 항상 풍부하였고 인산염과 규산염은 갈수기에 급격히 감소하는 경향을 보였다. Chlorophyll a의 값은 1993년 8월 21일 90.6 $\mu\text{g/l}$ 로 최대 값이 관찰되었으며 10월 중순 이후부터는 15~16 $\mu\text{g/l}$ 을 유지하였다. 입자태 유기탄소와 입자태 유기질소는 매우 풍부한데 비해, 입자태 유기인의 농도는 최저 0.3 $\mu\text{g atm/l}$ 의 낮은 농도 분포를 보였으며, 입자태 유기탄소 및 유기질소의 변화양상은 chlorophyll a의 변화양상과 잘 일치하였으며, 이것은 입자태 유기탄소 및 질소는 식물플랑크톤의 성장에 의한 내생적 공급에 의존함을 의미한다. 이와는 반대로 경안천의 인의 공급은 외부로부터 공급되고 있으며, 항상 인산염이 식물플랑크톤의 제한인자로 작용하지만, 때때로 낮은 Si/P ratio를 나타

내어 규산염의 고갈 현상이 관찰되었다. 이 결과는 때로는 식물플랑크톤의 성장에 인산염 보다는 규산염이 제한 인자로 작용한다는 것을 암시한다. 인산염이 제한 인자로 작용하는 시기에는 규조류가 우점하고 있었으며, 규산염이 제한인자로 작용하는 시기(9월 11~18일, 10월 2~16일)에는 남조류와 녹조류가 우점 하였다. 특히, 남조류 중에서 *Anabaena*, *Microcystis* 및 *Oscillatoria*가 우점종으로 출현하였다.

사 사

본 논문은 과학기술부의 국가지정연구실 사업(2000-N-NL-01-C-290)으로 수행되었음.

인 용 문 헌

- 경기개발연구원. 1997. 팔당상수원 수질개선 방안에 관한 연구. 9-14p.
- 김동섭, 김범철. 1990. 팔당호의 일차생산. 한국육수학회지 **23**: 167-179.
- 김범철, 김동섭, 권오길. 1989. 팔당호의 부영양화 실태. 수질보존학회지 **12**: 39-46.
- 김용재. 1998. 팔당댐호의 식물플랑크톤 군집의 생태적 특성. 한국육수학회지. **31**: 225-234.
- 오희목, 반용호, 박대균, 이진환, 맹주선. 1999. 대청호내 *cyanobacteria*에 의한 취기물질 생산. 한국육수학회지 **32**: 81-188.
- 이동석. 1998. 경안천 식물플랑크톤의 일차생산력과 증별생산력의 계절적변화. 석사학위논문. 한양대학교, 서울. 31-51p.
- 한국수문조사월보. 1993. 건설부.
- 한국지질도. 1978. 자원개발연구소.
- 한명수, 유재근, 유광일, 공동수. 1993. 팔당호의 생태학적 연구 1. 수질의 연변화: 과거와 현재. 한국육수학회지 **26**: 124-149.
- 한명수, 어윤열, 유재근, 유광일, 최영길. 1995. 팔당호의 생태학적 연구 2. 식물플랑크톤의 군집구조의 변화. 한국육수학회지 **28**: 335-344.
- 한명수, 이동석, 유재근, 박동철, 유광일. 1999. 팔당호의 생태학적 연구 3. 식물플랑크톤의 일차생산력과 광합성 모델 parameters. 한국육수학회지 **32**: 8-15.
- 허우명, 김범철, 조규송. 1991. 소양호 부영양화에 따른 N/P 비의 변화와 남조류 bloom. 한국육수학회지 **24**: 283-288.
- 홍성수. 2001. 수도권 상수원 수질과 부영양화에 관한 환경생태적 연구. 석사학위논문, 한양대학교, 서울. 16-24p.
- APHA-AWWA-WPCF. 1992. Standard methods for the examination of water and wastewater. 18th ed., APHA-AWWA-WPCF. Washington D.C.
- Barica, J.H., Kling and J. Gibson. 1980. Experimental Manipulation of algal bloom composition by nitrogen addition. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **37**: 1175-1183.
- Carmichael, W.W. and I.R. Falconer. 1993. Diseases related to freshwater blue-green algal toxins, and control measures. *In: Algal Toxins in Seafood and Drinking Water* (I.R. Falconer, ed.). Academic Press, New York. 187-209p.
- Gasiunaite, Z.R. and I. Olenina. 1998. Zooplankton-phytoplankton interactions: a possible explanation of the seasonal succession in the Kurši Marios lagoo. *Hydrobiol.* **363**: 333-339.
- Han, M.-S., Y.-K. Kim and J.-K. Jeon. 1994. Changes in phytoplankton community structure in the two different hydrobiological conditions of semi-enclosed Chinhae Bay, Korea. *Bull. Palnkton Soc. Jap.* **41**: 43-56.
- Horne, A.J. and C.R. Goldman. 1972. Nitrogen fixation in Clear Lake, California. II. Synoptic studies on the autumn *Anabaena* bloom. *Limnol. Oceanogr.* **17**: 693-703.
- Kilham, S.S. and R.E. Hecky. 1986. Hypothesized resource relationships among African planktonic diatoms. *Limnol. Oceanogr.* **31**: 1169-1181.
- Kitchell, J.F. and S.R. Carpenter. 1996. Cascading trophic interactions. *In: S.R. Carpenter & J.F. Kitchell (eds.), The Trophic Cascade in Lakes.* Cambridge University Press: 1-14pp.
- Kong, D.S. 1997. Limnological and ecological characteristics of a river-reservoir (Pal'tang), Korea. *Kor. J. Lim.* **30** (supplement): 524-535.
- Lee, J.A., V.C. Srivastava, A.R. Choi, W. Kim and M.J. Park. 1998. Composition of Microcystin from Cyanobacterial Water Blooms of the Sonaktong Reservoir, Korea. *Korean, J. Limnol.* **31**: 251-257.
- Menzel, D.W. and N. Corwin. 1965. The measurement of total phosphorus in seawater based on the liberation of organically bound fractions by persulfate oxidation. *Limnol. Oceanogr.* **10**: 280-282.
- Nielsen and Jorgensen. 1991. Handbook of Ecological Parameters and Ecotoxicology. Elsevier, NewYork.
- Sakshaug, E. and Y. Olsen. 1986. Nutrient status of phytoplankton blooms in Norwegian waters and algal strategies for nutrient competition. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **43**: 389-396.
- Sarnelle, O. 1993. Herbivore effects on phytoplankton succession in a eutrophic lake. *Ecol. Monogr.* **63**: 129-149.

- Tezuka, Y. 1985. Rainfall as a factor regulating the appearance of Anabena Bloom in the South Basin of Lake Biwa. *Jap. J. Lim.* **46**: 8-14.
- Tezuka, Y. 1988. Phosphorus as a possible factor stimulating the appearance of Anabena bloom in the south basin of Lake Biwa. *Jap. J. Lim.* **49**: 201-204.
- Tezuka, Y. 1989a. The C : N : P ratio of *Microcystis* and *Anabaena* (blue-green algae) and its importance for nutrient regeneration by aerobic decomposition. *Jap. J. Limnol.* **50**: 149-155.
- Tezuka, Y. 1989b. The C : N : P ratio of phytoplankton determines the relative amounts of dissolved inorganic nitrogen and phosphorus released during aerobic decomposition. *Hydrobiologia* **173**: 55-62.
- Thompson, P.A. and W. Hosja. 1996. Nutrient limitation of phytoplankton in the upper Swan River estuary, Western Australia. *Mar. Freshwat. Res.* **47**: 659-667.
- Thompson, P.A. and G.-Y. Rhee. 1993. Phytoplankton responses to eutrophication, *In Phycological Perspectives of Water Pollution* (Rai and Gaur, eds.). Springer-Verlag Pub., New York. 125-166p.
- Wetzel, R.G. 1983. *Limnology*. 2nd. Ed. Saunders Coll. Publ. NY.

(Received 13 Sep. 2001, Manuscript accepted 21 Dec. 2001)