

낙동강 중·하류에서 식물플랑크톤과 세균의 계절적 동태

박재림·하경·손연주·주기재
신라대학교 환경학과, 부산대학교 생물학과
(2000년 11월 29일 접수)

Seasonal Variation in the Phytoplankton and Bacterial Fauna in the Mid to Lower Reaches of the Nakdong River

Jae-Rim Bahk, Kyong Ha, Yeon-Ju Son and Gea-Jae Joo
Dept. of Environmental Science, Silla University, Pusan, 617-736, Korea
Dept. of Biology, Pusan National University, Pusan, 609-735, Korea
(Manuscript received 29 November, 2000)

Investigations were carried out to observe the seasonal succession of phytoplankton, and viable counts of bacteria from the mid to lower reaches of Nakdong River. An intensive monitoring was conducted from May to December 1999 biweekly at 6 sites in a main channel and 3 tributaries. Although there are several sites with high nutrient loading from the basin, all of study sites showed mesotrophic states owing to high discharge (June~September). Relatively low algal biomass and CFUs (mean of chl. *a*, $12.3 \pm 11.5 \mu\text{g}/\ell$, CFUs : 1.8×10^7) were observed during the rainy season. The diatom population was dominant (over 85% of total community) year-long with peaks (*Stephanodiscus hantzschii*) in the fall and winter. Dominance of blue-green algal groups during the summer was not observed in the summer. Microorganisms peaked in the summer and fall (June~September), affected mainly by the inputs of phytoplankton and nutrients. Biomass of phytoplankton and CFU counts were higher in the Kumho River than the other tributaries and main channel.

Key words : Bacteria, phytoplankton, Nakdong River, seasonal variation, viable counts

1. 서 론

수서 생태계 내의 식물플랑크톤 군집과 박테리아는 먹이사슬 내에서 기초를 이루는 1차 생산자와 에너지원을 재생산하는 분해자로서 중요한 역할을 담당하고 있다. 식물플랑크톤 군집은 호수나 강 등 생태계 내의 물리(기후, 유량, 수온, 빛)·화학(전기전도도, 수소이온농도, 용존 산소, 영양염류 농도)·생물학적 요소(경쟁, 포식, 기생)에 따라 계절적으로 군집조성과 우점종이 변화되는 천이과정(succession)을 거치게 된다.^{1,2)} 특히, 유속이 느리고 영양염류의 농도가 높은 강에서는 유량이 부족한 갈수기에 크게 번성하는 특정 식물플랑크톤 군집으로 인해, 원수자체의 수질을 악화시켜 수자원으로서의 가치를 떨어뜨리고 있다.

세균은 수서 생태계에서 유기물질 분해자(degradator) 및 환원자(reducer)로서 유기물을 이산화탄소나 무기염류 등으로 전환하여 생태계를 유지하는 물질순환과 에너지 흐름의 측면에서 중요한 역할을 한다.^{3,4)} 이외에도, 박테리아-식물플랑크톤-동물플랑크톤 등의 피식·포식관계로 이루어진 미생물 먹이회과 탄소 순환에서 중요한 연

결 고리로 작용하고 있으며^{5,6)} 수서 생태계 내 생체량의 상당부분을 차지하고 있다.⁷⁾ 박테리아 군집의 성장은 물리·화학적 요인(온도, 영양염류 등)에 의해 영향을 받으며⁸⁾, 특히, 수계의 영양상태^{1,9)}와 식물플랑크톤 군집의 생체량의 변화¹⁰⁾에 영향을 받는 것으로 보고되고 있다.

본 연구가 이루어진 낙동강은 지난 30~40년 간 강 유역 전체가 물리·화학적으로 크게 손상되어 강 생태계의 구조와 기능이 크게 변화된 상태이다.¹¹⁾ 중·하류의 지류에 건설된 다목적 댐과 1987년 건설된 하구둑으로부터의 인위적인 유량 조절과 하류에 밀집된 취수 원에서의 취수로 인해 수괴의 정체가 가속화 되어 갈수기에는 저수지 성향을 띠는 '강-저수지 혼합형태(river-reservoir hybrid type)'의 특성을 보이고 있으며, 공단이 밀집한 중류 역으로부터 처리되지 않은 영양물질의 지속적인 유입으로 과영양 단계를 넘어선 심각한 부영양화 상태에 있다.¹²⁾ 낙동강 전역에서 가장 많은 물리·화학·생태적 변화가 진행된 지역은 하구둑 상부지역이다. 하구둑 건설이후, 담수화 된 하구둑 상부에서는 부영양화가 가속화되어, 수질의 악화는 물론 강 생태계의 구조

와 기능의 변화까지 초래되었다. 지난 7~8년 간 낙동강 하류 지역은 갈수기 식물플랑크톤 군집의 대거 번성으로 인한 부영양화로 연중 심각한 수질 오염문제를 야기하고 있다. 특히, 1년 중 6개월 이상 *Microcystis*와 *Stephanodiscus*로 대표되는 식물플랑크톤의 수화현상(water bloom)이 관찰되어 낙동강 하류 지역에 있는 많은 취수원(물금, 매리 등)에서 정수과정에 어려움을 주고 있으며, 건강상 장애를 유발하여, 사회·경제적으로 심각한 문제로 대두되고 있다.¹³⁾

지난 10년 간, 낙동강 수질 전반에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔으며, 최근, 동·식물 플랑크톤의 생태, 생체량의 분포, 천이에 관한 연구가 주된 과제로 대두되기 시작했다.^{14)~16)} 그러나, 미생물 먹이환 내의 복잡한 에너지 흐름과 구성원 상호간의 직·간접적인 영향의 중요성이 대두됨에도 불구하고 전체적인 미생물 먹이환 내에서 일어날 수 있는 상호관계에 대한 연구는 미진했을 뿐 아니라, 생태계의 에너지 전환과정에서 중요한 역할을 담당하는 박테리아와 식물플랑크톤과의 연계 연구도 거의 이루어지지 않은 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 부산시 취수원인 낙동강 중·하류와 지류에서 식물플랑크톤과 박테리아의 계절적·공간적 분포를 밝히고자 한다.

2. 조사지점 및 조사시기

2.1. 조사지점 및 조사시기

2.1.1. 조사지점

낙동강은 한반도의 동남부(동경 127° 29'~129° 18', 북위 35° 03'~36° 13')에 위치하고 있으며, 강원도 태백시 황지에서 발원하여 경상남북도를 거쳐 남해로 유입되는 우리 나라 제 2의 하천이다. 낙동강 본류의 유로 연장은 약 526 km로 남한에서 가장 길고, 총 유역면적은 23,817km²로 우리 나라 국토의 약 24%를 차지한다.

낙동강 유역은 온순 기후의 특성을 보여, 매년 6월 말부터 7월 초 사이에 여름 초기 강우가 관찰된다. 낙동강 하류역의 연평균 강우량은 1,272mm이고, 연 강우량의 60% 이상을 차지하는 여름(6~9월)의 우수기와 겨울(12~2월) 갈수기로 구분된다. 연평균 기온은 12~16°C이고, 1년 중 가장 추운 1월의 평균기온이 2.5°C, 가장 더운 8월이 평균 29~30°C이다.¹⁷⁾

낙동강은 남한의 주요 강들과는 달리 원만한 경사도로 인해 하구에 잘 발달된 삼각주가 형성되었고, 1,000만에 가까운 인구가 생활하는 영남지방의 식수원 및 공업용수원으로서 그 중요성이 매우 높다. 낙동강 본류와 지류에는 5개의 댐이 건설되었으며, 현재 밀양댐이 건설 중에 있다. 또한, 해수유입을 막기 위한 하구둑 건설(1987년 11월)로 하류지역이 담수화 되었으며 부영양화가 가속화되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 낙동강 중·하류에서 각 지점의 특성을 반영할 수 있는 9개 지점(본류 6지점, 지류 3지점)을 선정하여 조사하였다. 조사지점의 위치는 Fig. 1과 같고 지류인 경우 본류와 합류되는 지점(1~2km 이내)을 선정하였다.

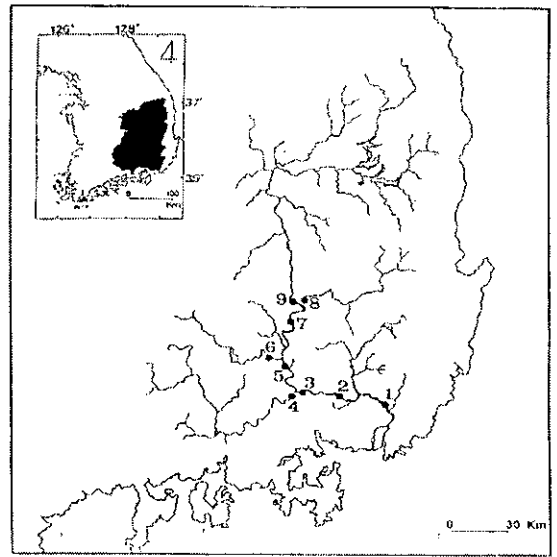


Fig. 1. Map showing the sample sites for the longitudinal distribution of phyto plankton community dynamics in mid to lower reaches of Nakdong River(1: Mulgum(RK 27), 2: Hanam(RK 54), 3: Namji(RK 83), 4: Nam River(RK 92), 5: Jukpo(RK 107), 6: Hwang River(RK 121), 7: Koryong(RK 149), 8: Kumho River(RK 169), 9: Waekwan(RK 182)).

- 1(물금, RK* 27) : 경상남도 양산군 물금면(물금 취수장)
 - 2(하남, RK 54) : 경상남도 밀양시 하남읍(수산대교)
 - 3(남지, RK 83) : 경상남도 함안군 칠서면 계내리(남지교)
 - 4(남강, RK 92) : 경상남도 함안군 대산면 구혜리(송도교)
 - 5(적포, RK 107) : 경상남도 함천군 천덕면 양진리(적포교)
 - 6(황강, RK 121) : 경상남도 함천군 적중면 죽고리(황강교)
 - 7(고령, RK 149) : 경상북도 고령군 성산면 삼대리(고령교)
 - 8(금호강, RK 169) : 대구광역시 달서구 파산동(강창교)
 - 9(왜관, RK 182) : 경상북도 성주군 선남면 선원리(성주대교)
- (*RK: River Kilometer, 하구둑으로부터 조사지점까지의 거리)

2.1.2. 조사시기

1999년 5월부터 12월까지 2주 간격으로 부산·경남 인근의 주요 취수원인 낙동강 중·하류 9개 조사 지점에서 식물플랑크톤 군집과 박테리아 분포를 조사하고, 이와 함께 육수학적 특성도 조사하였다.

2.2. 연구방법

2.2.1. 강수량, 유량 및 이화학적 환경요인 조사

조사기간의 강수량 자료는 낙동강 중·하류 유역권 내에 직접적인 영향을 미치는 지점인 대구, 진주, 함천, 밀양지역의 기상대 및 관측소에서 측정된 일일 강수량 자료를 사용하였다. 유량자료는 물금 지점의 수위변동에 직접적인 영향을 미치는 것으로 판단되는 삼랑진(낙동강 하구 둑으로부터 49km 상부지점)에서 측정된 자료를 이용하였다.

조사지점의 물리적(수온, 탁도)·화학적(전기전도도, 알칼리도, 용존산소, pH 및 영양염류 농도) 요인들은 현장 및 실험실 내에서 분석하였다. 수온은 DO meter (Model 58, YSI, USA)의 온도계로 현장에서 측정하고, pH는 pH meter (Model 250A, Orion, USA)로 측정하였으며, 탁도는 turbidity meter (Turbidimeter Model 20012, HF Scientific, inc.)를 사용하여 측정하였다. 전기전도도는 conductivity meter (YSI 30 conductivity meter, YSI, USA)를 이용하여 현장에서 측정하였고, 알칼리도는 적정법에 따라 측정하였다. 용존산소는 DO meter (Model 58, YSI, USA)를 이용하여 현장에서 직접 측정하고 Winkler method¹⁸⁾로 현장에서 시료를 고정한 후 실험실로 운반하여 측정하였다.

영양염류 중 총질소(TN), 총인(TP)농도는 원수를 이용하였고, 질산성 질소(NO₃⁻-N), 암모니아성 질소(NH₄⁻-N), 인산염 인(PO₄³⁻-P)은 원수 샘플을 0.45 μm Whatman 유리섬유여과지(GF/F)로 여과시킨 시료를 사용하였으며, 규산(SiO₂)의 경우는 원수 샘플을 0.45 μm Whatman 유리섬유여과지(GF/F)로 여과시켜 냉동보관한 시료를 사용하는 경우, 반드시 24시간 이상 해동시켜 규산이 완전히 reactive form으로 전환시킨 샘플로 측정하였다.¹⁸⁾ 영양염류 분석시에는 Wetzel과 Likens¹⁸⁾에 제시된 방법과 Lachat Ion Analyzer(Lachat Instrument, QuikChem 8000, USA, method No.: TN, 10-107-06-2-E; TP, 10-115-01-1-F; NO₃⁻-N, 10-107-04-1-0; NH₄⁻-N, 10-107-06-10-B; PO₄³⁻-P, 10-115-01-1-B; TN, 10-107-06-2-E; TP, 10-115-01-1-E; SiO₂, 10-114-27-1-A)를 이용하여 측정하였다.

2.2.2. 식물플랑크톤 분석

식물플랑크톤의 생체량(chl. *a*)은 시료 100ml을 0.45 μm membrane filters(MFS, A045A047A, Advantec MFS, Inc., USA)로 여과하여, 냉동 보관하였다가, Monochromatic method에 따라 측정하였다.¹⁸⁾ 식물플랑크톤의 종 조성 및 계수를 위해서는 수심 1 m 지점에서 채수한 시료 100 ml을 Lugol's 용액으로 고정시킨 후 이중 10 ml을 24시간 동안 settling chamber(체적: 10ml, 직경: 2.5 cm)에 침전시켜 두었다가 Zeiss IM 도립현미경 (Telaval 31, Carl Zeiss, Germany)으로 400배(× 400)에서 20 필드 이상 계수하여, ml당 개체수로 환산하였다.¹⁹⁾ *Microcystis* 종의 경우는 세포의 크기가 2~3μm로 아주 작고 보통 100~500개 정도의 세포가 군체를 이루어 존재하고 있어 세포 계수에 상당한 어려움이 있었지만, 세포 단위로 계수하였다. 식물플랑크톤은 모두 종별로 가로, 세로, 높이 측정을 통한 종별 평균 체적에 의한 생체량을 측정하였다.¹⁸⁾ 세포의 평균 체적은 10~25개의 개별 종의 체적을 평균한 값이다. 식물플랑크톤의 동정은 Prescott,²⁰⁾ Foged,²¹⁾ Cassie,²²⁾ Round *et al.*²³⁾ 및 정²⁴⁾의 도감을 참고하였으며, *Microcystis* 속의 동정은 Komarek 방식^{25,26)}을 따랐다.

2.2.3. 생균수

세균의 생균수(viable counts) 측정은 원수를 미리 준비된 멸균 회석용액에 단계별로 회석하면서, nutrient agar plate에 도말하여 배양하였다. 채집된 물에 존재하는 생균수를 현장에서 단계별로 회석하였다. 회석 단계당 2개의 nutrient agar plate에 시료 0.5~1 ml을 smear한 후 인큐베이터(25°C, 24±2hrs)에 배양하여 CFU (Colony Forming Unit/ml)를 산정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 조사지점의 이·화학적 특성

본 조사기간 동안 6월말부터 시작된 2~3일 간격의 여름철 집중강우와 이로 인한 지류에서의 충분한 유량이 유지되어, 예년에 비해²⁷⁾ 중·하류 전체에서 비교적 양호한 수질상태를 나타내었다(Table 1). 전 조사지점에서 pH (전 조사지점의 평균: 7.4±0.2), 전기전도도(221±127 μS/cm), 알칼리도(29±8.6 mg/ℓ)는 예년에 비해 낮은 값을 보여주었다. 그러나, 탁도는 집중강우 중 토사 유입으로 인해 전 지점에서 비교적 높은 값을 나타내었다(14.7±4.1).

본류에서 조사된 수온의 범위는 2.9~31.6°C로 전형적인 온대지방의 계절적 수온 특성을 나타내었다. 동일 시기의 지점별 평균수온의 차이는 1~2°C내외로 거의 없었다. 7월에는 잦은 강우로 인해 다른 해의 동일시기에 비해 3~5°C 낮은 수온을 보였으며, 겨울철 결빙현상은 나타나지 않았다.¹⁵⁾ 지류의 경우 남강, 황강, 금호강의 평균 수온이 19±8.2, 16.9±5.5, 19.6±7.2°C로 금호강의 평균 수온이 가장 높은 것으로 나타났다. 이러한 수온의 계절적 변화는 조사지점 강 생태계의 생물적 구성 요소들(식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 어류 등)의 성장에 중요한 물리적 요소로 작용한 것으로 추측된다.

낙동강의 평균 탁도 범위는 8.5~20.5 NTU로 변화의 폭이 아주 컸으며, 예년에 비해 1.5~2배 정도의 높은 값을 나타내었다. 지점별 평균 탁도는 물굽 8.5±4.1, 하남 16.7±18.5, 남지 16.1±17.8, 적포 14.2±7.7, 고령 20.5±27, 왜관 18±19.9 NTU로 적포~하남지점, 즉 하류로 내려갈수록 증가하는 일반적인 변화양상을 보여주었다. 예년 조사²⁷⁾에 의하면 높은 탁도 시기는 빈번한 강우시기와 조류 번성(algal bloom)시기로 구분되었는데, 본 조사에서는 대부분 강우시기와 일치하는 것으로 나타났다. 왜관 지점은 수질이 양호하고 오염원 유입이 없음에도 불구하고, 15 NTU를 초과하는 날이 총 18회의 조사 중 10회로 나타났다. 이는 조사지점 부근의 골재채취작업으로 인해 하상의 교란과 토사의 지속적 유입이 원인인 것으로 추측된다. 전 조사 지점에서 여름 초기강우(6월 중순)와 장마가 지속되었던 시기(8월 말~9월)와 조사 당일 높은 강우가 관찰되었던 시기(99년 5월 6일, 6월 17일, 7월 29일, 9월 22일)에서 높은 탁도값을 나타내었는데, 이는 강우에 의해 유량의 증가와 하상의 교란, 토사의 지속적 유입이 증폭되어 나타났기 때문으로 보인다.

pH와 DO값은 우리 나라의 다른 4대강에 비해서 비교적 높은 값을 나타내었으며, 이들 값의 계절적 변화는 식물플랑크톤 생체량의 변화 패턴과 거의 유사하게 나타

Table 1. Summary of the physico-chemical parameters in the 6 sites of main channel and 3 tributaries in the Nakdong River(May-December, 1999). Mean \pm SD(min.-max.)

Parameter (unit)	Mulgum (RK27)	Ilanam (RK 54)	Namji (RK 83)	Jukpo (RK 107)	Koryong (RK 149)	Waekwan (RK 182)	Nam R (RK 92)	Ihwag R (RK 121)	Kumho R (RK 169)
Water temp (°C)	17.6 \pm 7.9 (2.9-26.6)	18.7 \pm 7.8 (2.4-27.2)	18.2 \pm 7.5 (3.7-27.8)	18.2 \pm 7.5 (3.9-29)	18.9 \pm 7.8 (7-31.4)	18.7 \pm 7.9 (4.8-31.6)	19.0 \pm 8.2 (3.3-27.4)	16.9 \pm 5.5 (7.3-24.7)	19.6 \pm 7.2 (7.1-29.8)
Turbidity (NTU)	8.5 \pm 4.1 (4.2-21.0)	16.7 \pm 18.5 (3.8-19.3)	16.1 \pm 17.8 (2.5-61.2)	14.2 \pm 7.7 (3.6-27.7)	20.5 \pm 27 (3.3-123.8)	18.0 \pm 19.9 (1.59-50)	16.7 \pm 38.8 (2.6-17.1)	12.1 \pm 6.1 (2.9-23.8)	9.1 \pm 6.9 (5.1-24.7)
pH	7.8 \pm 0.6 (6.74-9.2)	7.5 \pm 0.7 (5.54-8.4)	7.2 \pm 0.4 (6.2-7.68)	7.4 \pm 0.4 (6.2-8.0)	7.4 \pm 0.4 (6.7-8.2)	7.5 \pm 0.5 (6.8-8.4)	7.3 \pm 0.4 (6.2-7.75)	7.2 \pm 0.3 (6.7-7.94)	7.4 \pm 0.4 (6.36-7.8)
DO (mg/ℓ)	9.35 \pm 2.7 (4.5-14.9)	8.9 \pm 2.5 (5.0-11.5)	8.6 \pm 2.2 (4.8-13.4)	8.9 \pm 2.7 (3.4-13.8)	8.0 \pm 2.0 (6.2-11.4)	9.2 \pm 2.3 (6.1-12.6)	9.0 \pm 2.0 (6-12.9)	8.9 \pm 2.1 (3.6-12.0)	8.7-3.1 (5.2-16.2)
Conductivity (μ S/cm)	196 \pm 2.4 (89-330)	195 \pm 69.8 (89-234)	199 \pm 73.9 (79-288)	233 \pm 85.8 (74-370)	251 \pm 91.0 (80-363)	173 \pm 48.1 (76-275)	135 \pm 68.1 (161-290)	78.2 \pm 24 (61-160)	533 \pm 319 (110-1400)
Chl.a (μ g/ℓ)	14 \pm 8.9 (3.5-4.1)	13.2 \pm 0.6 (0.4-33.8)	11.5 \pm 10.3 (0.2-26.2)	11.8 \pm 9.4 (0.9-29.1)	10.9 \pm 9.6 (0.6-25.2)	27.9 \pm 6.6 (0.1-34.8)	15.6 \pm 1.47 (1.5-36.2)	2.0 \pm 0.3 (0.2-4.8)	21.5 \pm 26.2 (0.5-96.5)
TN(mg/ℓ)	3.2 \pm 0.84	3.8 \pm 0.98	4.0 \pm 1.3	4.6 \pm 1.5	4.7 \pm 1.52	3.5 \pm 0.73	3.1 \pm 1.18	2.1 \pm 0.48	8.7 \pm 3.8
NO ₃ ⁻ -N(mg/ℓ)	2.4 \pm 0.54	2.6 \pm 0.72	2.9 \pm 1.1	3.5 \pm 1.62	3.5 \pm 1.5	2.6 \pm 0.79	1.8 \pm 0.55	1.4 \pm 0.42	4.8 \pm 3.2
NH ₄ ⁺ -N(mg/ℓ)	0.05 \pm 0.1	0.05 \pm 0.1	0.06 \pm 0.06	0.06 \pm 0.05	0.13 \pm 0.2	0.05 \pm 0.05	0.10 \pm 0.11	0.07 \pm 0.19	0.36 \pm 0.37
TP(mg/ℓ)	0.13 \pm 0.09	0.15 \pm 0.1	0.17 \pm 0.07	0.18 \pm 0.1	0.29 \pm 0.4	0.14 \pm 0.07	0.15 \pm 0.12	0.12 \pm 0.08	0.44 \pm 0.22
PO ₄ ³⁻ -P(mg/ℓ)	0.05 \pm 0.03	0.07 \pm 0.05	0.06 \pm 0.03	0.07 \pm 0.1	0.09 \pm 0.04	0.04 \pm 0.03	0.05 \pm 0.05	0.03 \pm 0.02	0.32 \pm 0.15
SiO ₂ (mg/ℓ)	8.0 \pm 4.81	10.6 \pm 5.1	10.2 \pm 3.7	10.3 \pm 3.6	10.2 \pm 4.2	10.1 \pm 3.7	8.3 \pm 4.8	10.3 \pm 2.9	12 \pm 5.4

났다.²⁷⁾ pH의 범위는 조사기간동안 본류 6지점에서는 평균 7.5 \pm 0.2(5.5~9.2)로 지점별 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 지류에서도 평균 7.3 \pm 0.1(6.2~7.9)로 나타나 지점별 차이는 거의 없었다. 본류의 지점별 DO(%)값은 물금 95 \pm 19.9, 하남 90 \pm 13.9, 남지 88.8 \pm 14.2, 적포 92.5 \pm 7.5, 고령 89.6 \pm 19, 왜관 95.7 \pm 17.6으로 물금과 왜관 지점에서 비교적 높은 값을 나타낸 것을 제외하고는 본류의 다른 지점에서는 큰 차이가 없었다. 반면, 각 지점의 계절별 차이는 비교적 뚜렷한 것으로 나타났으나, 식물플랑크톤의 일시적 번성시기인 6월 말~7월 중순에는 전 지점에서 포화도 이상의 높은 DO(%) 값(106~126%)을, 강우가 빈번하게 관찰된 시기에는 70~80% 정도의 낮은 값을 나타내었다. 특히, DO 값의 뚜렷한 전이가 10월 초(99년 10월 7일)~10월 말(99년 10월 20일) 사이에 관찰되었는데, 2주 동안에 전 지점 평균이 70.3 \pm 11.5% (범위: 50~78)에서 102 \pm 8.7%(범위: 94~117)로 급격한 증가를 보였다. 용존산소(DO)는 가을과 겨울이 봄과 여름보다 대체로 높게 나타났다. 여름철에 낮은 용존산소 값이 관찰된 이유는 여름철에 잦은 강우로 인한 토사유입과 영양물질의 유입으로 인한 것으로 생각되며, 봄철에 낮은 용존산소값을 보이는 이유는 규조군집의 활발한 증식으로 인해 수표면위를 조류 군집들이 덮게 되어 용존산소의 부족 현상이 현저하게 나타난 것으로 생각된다.

본류의 지점별 전기전도도 값은 물금 196 \pm 62.4, 하남 195 \pm 62.8, 남지 199 \pm 73.9, 적포 233 \pm 85.8, 고령 251 \pm

91, 왜관 173 \pm 48.1 μ S/cm로 나타났고, 지류의 경우 남강 135 \pm 68.1, 황강 78.2 \pm 24, 금호강 533 \pm 319 μ S/cm로 나타났다. 조사기간 중 전기전도도 값은 전 조사지점에서 강우에 의해 높은 탁도를 보였던 시기(99년 5월 6일, 7월 29일, 8월 26일)에 전반적으로 낮은 값을 보였으며, 50NTU 이상의 값을 보였던 99년 9월 22일에는 전기전도도 값이 70~90 μ S/cm인 연중 최저 값을 나타내었는데, 이는 풍부한 유량에 의한 희석 때문²⁷⁾으로 보인다. 반면, *Stephanodiscus*의 번성이 시작되었던 99년 10월 20일에는 본류의 전체지점에서 250~300 μ S/cm이상의 높은 값을 보였으며, 12월까지 이 값은 지속되었는데, 이 시기는 수괴 정체에 의한 전기전도도의 증가²⁷⁾로 추측된다. 지점별로는 고령 지점에서 가장 높은 값이 나타났으며, 이는 오염된 지류(금호강: 532 \pm 319 μ S/cm)의 유입 효과 때문이다. 금호강에서의 높은 전기전도도 값은 수괴의 정체보다는 도시의 생활하수 및 주변공단으로부터 폐수유입의 영향을 크게 받는 것으로 보이며, 계절적 변화의 일관성도 미약한 것으로 나타났다.

영양염류 농도의 경우, 총 질소의 농도는 본류의 각 지점의 평균 3.9mg/ℓ로 예년 조사보다 1~2mg/ℓ 정도 낮은 반면, 총인 농도는 평균 0.19mg/ℓ로 예년과 비슷한 값을 보였다.¹⁷⁾ 총인 농도는 고령지점에서 측정된 농도가 다른 지점들보다도 100 μ g/ℓ 정도 높게 나타났는데, 이는 폐수 속에 다량 함유된 인을 포함한 지류(금호강)의 유입효과로 보인다. 규산(SiO₂) 농도의 경우는 예년 조사 평균 5.4mg/ℓ에 비해 본 조사에서는 9.9mg/ℓ로 약

2배의 높은 값을 나타내었으며, 총 변화 범위도 0.19~21.9mg/l로 계절별, 지점별로 뚜렷한 증감양상을 보였다. 강 생태계에서 규소의 농도는 연중 일정하다고 일반적으로 알려져 있으나^{28)~30)} 댐과 하구 등의 건설로 인해 수문학적 요소에 영향을 크게 받는 본 조사지점인 낙동강의 경우는 강우 패턴과 규조 군집 번성 정도에 따라 SiO₂의 농도도 계절별로 뚜렷이 변화된 것으로 사료된다.³¹⁾ 또한, 전 조사지점에서 예년보다 2배 높은 값을 보인 것은 강우에 의한 유량 증가시기에 토사의 유입과 함께 규소 성분도 다량 함유되어 이동되었기 때문으로 추측된다.

금호강의 전기전도도와 식물플랑크톤의 생체량(chl. a)은 전 계절동안 다른 조사 지점들보다 월등히 높아 제대로 처리되지 않은 폐수로 인한 오염정도가 심각하며, 총인과 인산염 인 역시 다른 지점들보다 훨씬 높은 상태를 알 수 있었다. 금호강 이외의 지점에서 특이하게 많은 오염치를 나타낸 곳은, 5월의 물금과 왜관 지점의 인산(PO₄³⁻-P)과 암모니아성 질소(NH₄⁺-N)가 다른 계절보다 현저히 높게 나타났다. 또한, 본 조사에서 낙동강 하류 물금 지점의 경우는 강의 하류에 위치하고 있다는 점, 낮은 경사, 부산, 경남, 양산 지역에서의 지속적인 취수로 인한 유량 감소, 오염된 지류(금호강)로부터 지속적인 영양염류 유입 등에도 불구하고, 예년에 비해 연중 양호한 수질을 나타내었다. 그러나, 10월 중순 이후 유량 부족으로 인한 수괴 정체, 중류로부터 영양염류(특히, 규소)의 유입, 3~14℃ 정도의 수온 등으로 인해 *Stephanodiscus* 군집의 번성이 시작되었다. 예년에 비해서는 1달 정도 앞당겨 발생하였는데, 다음해 2~3월까지 본격적으로 bloom을 일으킬 것을 감안하면 부영양화로 인한 수질 문제를 해결하기 위해 이 종의 생리·생태적인 특성 등이 심도 있게 연구되어야 할 것으로 보인다.

3.2. 식물플랑크톤 생체량의 변화

조사기간 평균 식물플랑크톤의 생체량(전 조사지점의 평균 chl. a, 12.3±11.5µg/l)은 예년 값에 못 미치는 수준이었으며, 여름철 남조군집의 번성현상도 뚜렷하게 관찰되지 않았다. 본류 6개 지점에서 식물플랑크톤의 생체량은 빈번한 강우에 의해 예년 평균 생체량의 1/2~1/3 정도의 값으로 나타났다(Fig. 2).^{27,32)} 예년의 조사³³⁾에서는 남지 이남의 하류에서는 평균 30~35µg/l 정도의 값을 나타내었으나, 1999년은 늦봄에서 초가을까지 잦은 강우와 특히, 여름철 3~5일 간격의 반복적인 집중강우가 집중 수역에서 발생함에 따라 식물플랑크톤 생체량은 평균 12.3±11.5µg/l로 낮게 나타났다. 특히, 예년 조사에 의하면 물금 지점은 여름철(6~9월) 남조군집의 번성과 겨울철(12~3월) 규조군집의 번성으로 인해 1년 중 6개월 정도가 50µg/l 이상의 높은 생체량이 관찰되었던 지점이다.³⁴⁾ 그러나 본 조사에서는 여름철 빈번한 강우로 인한 식물플랑크톤의 희석으로 비교적 낮은 생체량을 보였으며, 예년과 같은 남조(*Microcystis* spp.) 번성현상도 관찰되지 않았다.

낙동강 중·하류 본류의 지점별 식물플랑크톤 생체량의 평균 농도는 크게 차이가 나지는 않았지만 연중 하류로 향할수록 일반적으로 증가하는 양상을 보였다. 이는

영양물질의 유입증가와 취수 등으로 인한 수괴 정체로 식물플랑크톤 생체량이 증가한 것으로 보이며, 이러한 경향은 갈수기 유량이 부족한 시기일수록 뚜렷하게 나타났다.

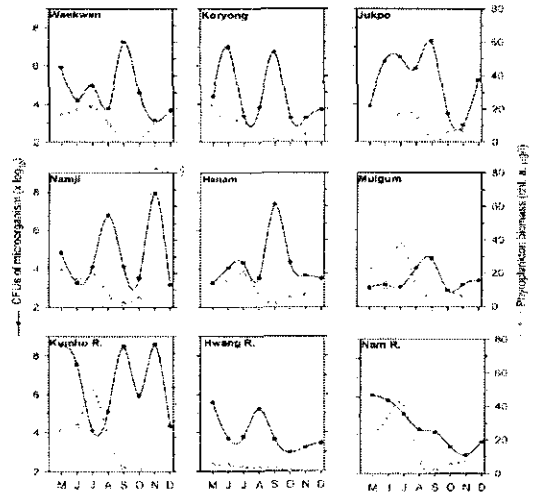


Fig. 2. Seasonal changes in viable counts of bacteria(CFU) and algal biomass(chl. a) in the Nakdong River.

1996년부터 1997년까지의 조사³¹⁾에 따르면 평균 생체량의 농도는 물금 62±113 µg/l (n=26), 남지 33±20 µg/l (n=25), 적포 24±21 µg/l (n=25), 고령 22±16 µg/l (n=25), 왜관 12±8 µg/l (n=26)으로, 하류로 향할수록 생체량의 평균값과 변화폭이 뚜렷이 증가하는 경향을 보였다. 왜관 지점에서는 비교적 낮은 값을 보인 반면, 금호강이 합류하면서 고령지점에서부터 비교적 높은 값이 측정되었고, 그 이후 적포, 남지, 물금으로 진행되면서 수체 시간이 길어짐에 따라 생체량의 증가가 관찰되는 것으로 나타났다.

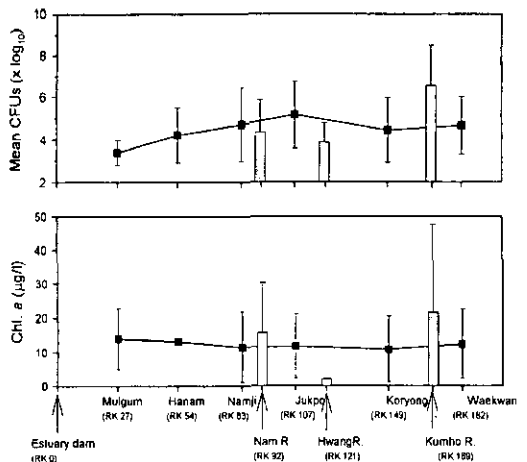


Fig. 3. Annual mean of bacteria and chl. a in the 6 sites of main channel and 3 tributaries of the Nakdong River

본 조사에서는 예년조사³³⁾에 비해 중·하류에서 뚜렷한 차이를 보이지는 않았으나, 강우 및 유량과 식물플랑크톤 생체량과는 뚜렷한 음의 관계를 보여주었다. 강우가 빈번히 관찰되어 높은 탁도와 낮은 전기전도도를 보였던 조사일(99년 7월 29일, 8월 26일)에는 본류 6개 조사지점에서 평균 8.4 $\mu\text{g}/\ell$, 4.2 $\mu\text{g}/\ell$ 를 나타내었으며, 99년 9월 22일에는 전 지점 평균값이 1.1 $\mu\text{g}/\ell$ 로 강우에 의한 유량증가로 인한 뚜렷한 식물플랑크톤의 희석 현상을 보여주었다. 낙동강의 세 지류지점에서는 황강의 생체량이 2.0 \pm 0.3 $\mu\text{g}/\ell$ 로 가장 낮았고, 금호강의 생체량이 21.5 \pm 26.2 $\mu\text{g}/\ell$ 로 가장 높게 나타났는데(Table 1), 이는 유량보다는 주변으로 유입되는 영양염류의 유입에 의해 크게 영향을 받는 것으로 보인다. 남강은 예년에 비해 증가하는 경향을 나타내었으며, 지류의 유입으로 인한 영향을 강하게 받아 본류의 식물플랑크톤 생체량은 증가(금호강 유입이후 고령지점; 남강 유입이후 남지 지점에서의 증가), 혹은 감소(황강 유입이후 적포 지점에서의 감소)되는 것으로 추측된다.

3.3. 세균 생균수와 식물플랑크톤 생체량의 비교

조사기간 5월부터 12월까지 낙동강 중·하류에서 세균의 평균 생균수(viable counts)는 계절별 변화가 뚜렷하게 나타났으며, 지점별로는 금호강에서 가장 높게 나타났으며, 남지, 적포 지점 순으로 세균 오염도가 높았고, 물금 지점에서 가장 낮게 검출되었다(Fig. 4). 세균 평균은 대부분의 지점에서 9월과 11월에 높은 값을 보여주었으며, 식물플랑크톤 생체량의 변화와 비교한 결과가 이 시기는 식물플랑크톤 생체량 값이 peak를 보였다가 떨어지는 시기였다. 월별, 지역별 최고치를 나타낸 5월의 금호강, 9월의 금호강과 적포, 11월의 금호강과 남지가 2.0 \times 10⁸ CFUs 이상으로 나타났고, 최저는 황강(11월), 물금(5, 6, 7, 10, 11월), 하남(5월), 남지(6, 12월), 고령(10, 11월), 왜관(11월)지점에서 2.0 \times 10³ CFUs 이하로 나타났다.

본류의 경우, 물금 지점에서 생균수는 9월에 조류 생체량은 7월에 최고값을 나타내었으며, 조류 생체량과 생균수의 계절적 변화 양상은 반비례 관계를 보여주었다. 남지 지점에서는 5~7월에는 생균수 및 조류 생체량의 변화양상이 유사한 경향을 보였으나, 생균수가 8월부터 증가하기 시작하여 11월에 최고값을 보였으며, 그후 급격한 감소를 보였다. 적포 지점은 7월과 9월에 높은 생균수 값을 나타내었으며, 강우의 영향으로 9월 이후 급감하다가 11월에 증가하는 패턴을 보여주었다. 생체량은 6월말~7월에 증가하였다가, 9월에 급격히 감소 한후 10월말부터 다시 증가하기 시작하였다. 고령 지점은 생균수가 6월과 9월에 두차례의 최고값을 보였으며, 조류 생체량은 7월에 최고값을 나타낸 후 계속 감소하다가 11월에 미비한 증가를 보여주었다. 왜관 지점은 생균수가 7월과 9월에 최고값을 보였으며, 이후 극심한 감소를 보이다가 11월부터 다시 증가했고, 생체량은 7월에 최고값을 보이다가 9월과 10월에 최저값을 나타내면서 11월부터 증가하기 시작하였다.

지류지점의 경우는 지점별로 뚜렷한 일관성을 보이지는 않았으나, 영양단계별로 가장 오염의 정도가 심한 금호강에서는 높은 값과 뚜렷한 계절적 변화도 관찰되었지만, 빈영양단계인 황강 지점은 다른 조사지점들에 비해

서 비교적 낮은 값을 나타내었다. 지점별로 비교해보면, 남강은 5월에 생균수가 최고값을 보인 이후, 점차 감소하는 경향을 보였고, 조류 생체량의 경우는 6~7월에 최고값을 나타냈다. 황강 지점은 8월에 생균수가 최고값을 나타내다가 점차 감소, 이후 11월에 증가하는 패턴을 보였으며, 조류 생체량은 5월 이후 뚜렷한 계절적 증감 현상을 보이지 않았다. 금호강 지점에서는 생균수가 5월 이후 급격히 감소하다가 9월에 최고값을 보였으며, 11월에 다시 한차례의 증가 현상을 보였으며, 조류 생체량은 7월에 한차례의 최고치를 나타낼 뿐 그 후로는 계속 감소하는 경향을 보였다. 전 지점에서 식물플랑크톤 생체량이 일단 감소 이후 증가하는 시기에 생균수의 감소가 따르는 유사성을 보였다. 생균수는 지점별로 차이가 있었는데, 이는 식물플랑크톤에 의한 영향 외에 오염물질(영양염류 농도, 금속이온 등)의 유입의 영향도 있었던 것으로 추측된다.

이상의 결과에서 생균수 및 생체량은 황강, 물금, 남강 순으로 증가하여 황강의 수질이 가장 양호함을 알 수 있었으며, 물금은 생균수와 생체량에 있어서 모두 낮은 값을 나타내었는데, 이는 잦은 강우와 유량의 증가에 의한 것으로 생각된다. 6월과 7월의 잦은 강우현상을 감안 하더라도 남지와 금호강의 11월 생균수가 \times 10⁸ CFUs단위로 가장 높게 나타났으며, 조사 지점 중 왜관, 고령, 적포는 금호강 유입 이후의 중류 지역임에도 불구하고 최고치가 \times 10⁷CFUs수준에 머물렀다. 생균수는 지점에 따라 이중 혹은 삼중 peak를 나타낸 것은 매 2주일에 1회의 값을 평균한 값이므로 판독이 용이한 부드러운 곡선을 나타내지 않고 뚜렷한 peak가 많이 나타난 것으로 생각된다.

3.4. 식물플랑크톤 군집조성(물금을 중심으로)

낙동강 하류의 식물플랑크톤 군집은 규조군집의 우점양상이 뚜렷하게 관찰되었다(Fig. 4).예년의 조사^{13,33)}에서는 여름철 남조 군집, 겨울철 규조 군집 변성의 bipeak양상을 나타내었는데 반해, 본 조사에서는 남조군집(*Microcystis aeruginosa*, *M. ichthyoblaste*)이 아주 소량 관찰되었다. 반면, 조사 기간 동안 규조군집이 우점하였으며(전체 군집의 85%차지), 여름철에도 강우로 인한 규소(SiO₂)의 지속적인 공급으로 인해 비교적 높은 밀도를 나타내었다.

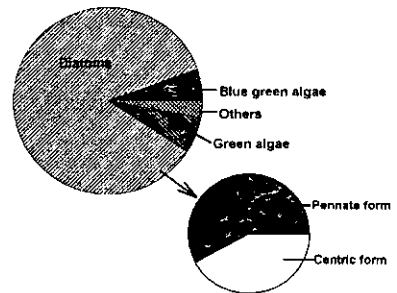


Fig. 4. Relative abundance of phytoplankton community (based on cell biovolume) in the lower reaches of the Nakdong River(Mulgum) during the study period (May to December, 1999).

총 195종이 동정되었으며, 총 출현 종 빈도의 0.5% 이상을 차지하는 우점종으로는 총 17종으로 나타났다 (Table 2). 이 중 *Synedra acus*, *Stephanodiscus hantzschii*, *Fragilaria crotonensis*, *Aulacoseira granulata*, *M. ichthyoblabe* 순으로 출현하여 예년의 조사¹³⁾와는 다소 차이가 있었는데, 이는 풍부한 유량으로 인한 영양염류의 희석 등에 기인한 것으로 추측된다.

Table 2. Dominant species over 0.5% of total cell numbers in the lower Nakdong River(Mulgum) during the study period(May-December, 1999)

Division	Dominant taxon	%
Green algae	<i>Actinastrum hantzschii</i>	1.1
	<i>Scenedesmus ellipsodeus</i>	0.8
Cryptomonads Daitoms	<i>Cryptomonads crosa</i>	2.1
	<i>Cyclotella kutizingia</i>	1.8
	<i>C. meneghiniana</i>	3.3
	<i>Fragillaria crotonensis</i>	9.7
	<i>Aulacoseira distans</i>	1.0
	<i>A. granulata</i>	8.6
	<i>A. italica</i>	5.4
	<i>Nitzschia</i> sp.	1.1
	<i>Stephanodiscus hantzschii</i>	12.6
	<i>Synedra acus</i>	19.7
<i>S. ulna</i>	0.5	
Blue-green algae	<i>Anabaena flos-aquae</i>	1.1
	<i>Microcystis aeruginosa</i>	2.5
	<i>M. ichthyoblabe</i>	5.6
	<i>Oscillatoria angustissima</i>	1.3

규조군집은 크게 침상형(pennatic form)과 원형(centric form)으로 구분되는데, 본 조사지점인 물금에서는 세포체적(biovolume)으로 환산하면, 침상형 규조는 58%로 원형 규조는 42%로 나타났다. 우점하는 침상형 규조종으로는 대형 *Synedra acus*(길이: 80~150 μ m), *Synedra ulna*, *Fragilaria crotonensis* 등을 들 수 있다. 원형 규조로는 주로 겨울에 우점하는 소형 *Stephanodiscus hantzschii*(직경: 10~13 μ m), *Aulacoseira distans*, *A. granulata*, *A. italica*, *Cyclotella kutizingia*, *C. meneghiniana* 등으로 나타났다.

규조군집 내에서도 규소농도의 계절적인 변화에 따라 우점종의 변화가 뚜렷하게 나타났다. 특히 대형 규조인 *Synedra*, *Fragilaria*, *Aulacoseira* 속은 규소의 양이 비교적 높은 여름~초 가을철에 우점하는 현상이 관찰되었다. 규조 종의 천이에 미치는 규소(SiO₂)의 중요성에 대해서는 1995년 봄철 microcosm 실험³¹⁾에서 *Fragilaria crotonensis*, *Synedra acus* 등은 규소를 충분히 첨가해 준 처리군에서 단독 우점을 차지한다는 결과에서 증명된 바가 있다. 소형 규조인 *Stephanodiscus hantzschii*는 예년에 갈수기인 겨울철~이른 봄(12월 초~3월 중순)까지 단일종 우점(bloom)을 일으킨다고 알려진 데 반해³²⁾, 본 조사에서는 30~40일 정도 이른 10월말부터 밀도가 증가한 것으로 나타났다. 이 종은 전세계 특히, 유럽과 호주,

일본의 부영양화 상태의 강(Nagara River, Meuse River)에서 갈수기 수온이 낮은 시기(보통 10~15 $^{\circ}$ C)에 우점하는 종으로 알려져 있다. 그러나, 낙동강 하류는 조사가 이루어진 세계의 다른 강들보다 훨씬 더 수온이 낮은 시기(4~8 $^{\circ}$ C)에 3~4배 높은 밀도로 번성하는 것으로 나타났다.³⁰⁾ 이는 낙동강 하류역이 1987년 하구 독 건설과 농·공업 용수를 위한 취수량의 증가로 인해 수괴의 정체와 유속이 감소되고 있으며, 중류 오염원으로부터 영양 염류와 기타 오염 물질이 축적되고 있기 때문으로 생각된다. 특히, 겨울에서 봄 사이 강우가 부족한 시기에는 유량과 유속의 감소가 더욱 더 심각해져 하류지역은 호수화 된 결과 규조군집의 번성 등이 유발되어 겨울철 낙동강의 수질을 악화시키는 주된 원인이 되었던 것으로 보인다.

낙동강 중·하류에서도 연중 규조군집이 우점하는 것으로 나타나 중·하류의 구간이 200 km 정도로 비교적 긴 연장임에도 불구하고 출현 군집에는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 출현 군집에 있어서도 물금 지점에서의 현황과 마찬가지로 계절에 따라 우점 규조군집에 차이가 있었으며, 예년에 비해 여름철 3~5일 간격의 빈번한 강우로 인하여 여름철 *Microcystis* spp.에 의한 수화(bloom) 현상도 관찰되지 않았다. 그러나, 규조군집 내에서도 중류인 왜관, 고령, 적포 지점에서는 침상형 규조가 우점하는 반면, 남지 지점에서는 원형 규조군집이 우세하는 것으로 나타났는데, 이는 중류와 하류에서의 유량, 유속, 영양염류 농도의 차이 등에 기인한 것으로 생각된다.

4. 결 론

1999년 5월부터 12월까지 2주 간격으로 부산 경남 일원의 주요한 취수원인 낙동강 중·하류 9지점(본류 6지점, 지류 3지점)에서 식물플랑크톤과 세균 군집의 계절적 동태와 이에 수반되는 기초 이·화학적 특성을 조사하였다. 본 조사기간 동안 6월 초부터 시작된 여름철 집중강우가 9월 초까지 지속되었고 이로 인한 충분한 유량 공급으로 인해 오염원이 밀집된 중류 지류에서 다량의 영양염류가 공급됨에도 불구하고 예년에 비해 중·하류 전체에서 비교적 양호한 수질상태를 나타내었다. 식물플랑크톤 생체량과 세균의 밀도도 풍부한 유량에 의한 희석으로 예년조사에 비해 낮은 값을 나타내었다. 조사기간 평균 식물플랑크톤의 생체량은 전 조사지점의 평균 chl. a 값이 12.3 \pm 11.5 μ g/l였으며, 주요 출현군집은 규조로 전체 군집의 85%를 차지하여 연중 우점하는 것으로 나타났다. 생균수는 전 지점 평균 1.8 \times 10⁷CFUs로, 여름~초가을(6~9월)에 높은 값이 관찰되었으며, 식물플랑크톤 밀도와 영양염류물질의 유입 등에 영향을 받아 식물플랑크톤 생체량의 증가가 관찰된 이후 생균수가 증가하는 패턴이 전 조사 지점에서 관찰되었다. 지류 지점의 경우, 오염물질의 유입에 의해 식물플랑크톤 생체량과 세균밀도 모두 급호강, 남강, 황강 지점 순으로 나타났고, 물금 지점에서 최저로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 신라대학교 부설 낙동강 연구원의 지원(1999년)과 부산대학교 학술연구조성비(4년 과제)의 지원으로 이루어졌으며, 낙동강 중·하류 채집을 도와준 부산대학교 육수학 실험실원에게 감사드립니다.

참고 문헌

- 1) Hutchinson, G. E., 1967, A treatise on limnology, vol. 2: Introduction to lake biology and the limnoplankton. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1115pp.
- 2) Sommer, U.(ed), 1989, Plankton Ecology, Springer-Verlag, Berlin, 358pp.
- 3) Azam, F. and R. E. Hodson, 1977, Size distribution and activity of marine microheterotrophs, *Limnol. Oceanogr.*, 22, 492~501.
- 4) Odum, E. P.(ed), 1971, Fundamentals of Ecology, W.B. Saunders Co., Philadelphia, 540pp.
- 5) Pace M. and J. D. Orcutt, 1981, The relative importance of protozoans, rotifers, and crustaceans in a freshwater zooplankton community, *Limnol. Oceanogr.*, 26, 822~830.
- 6) Palumbo A. V., R. L. Ferguson and P. A. Rublee, 1984, Size of suspended bacterial cells and association of heterotrophic activity with size fractions of particles in estuarine and coastal waters, *Appl. Environ. Microbiol.*, 48, 157~164.
- 7) Lovell C. R. and A. Knopka, 1985, Primary and bacterial production in two dimictic Indiana lakes, *Appl. Environ. Microbiol.*, 49, 485~491.
- 8) Wimpenny, J. R. T., R. W. Lovitt and J. P. Coombs, 1980, Laboratory model systems for the investigation of spatially and temporally organised microbial ecosystems, *In: J.H. Slater, R. Whittenbury and J.W.T. Wimpenny(eds.), Microbes in Their Natural Environments.* pp. 67~117. Cambridge Univ. Press, London.
- 9) Fuhrman, J. A. and F. Azam, 1980, Bacterioplankton secondary production estimates for coastal waters of British Columbia, Antarctica and California, *Appl. Environ. Microbiol.*, 39, 1085~1095.
- 10) Bird, D. F. and J. Kalf, 1984, Empirical relationships between bacterial abundance and chlorophyll concentration in fresh and marine waters, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 42, 1015~1023.
- 11) 주기재, 하경, 1999, 낙동강 수계 생태계의 구조와 기능, 낙동강 연구논총 1, 107-120.
- 12) 주기재, 김현우, 하경, 1997, 하천 생태학의 발전과 우리 나라 하천 연구의 현황, 한국생태학회지, 20, 69-78.
- 13) Ha, K., E. A. Cho, H.W. Kim and G.J. Joo, 1999, *Microcystis* bloom formation in the lower Nakdong River in South Korea: Importance of hydro dynamics and nutrient loading, *Mar. Freshwater Res.*, 50, 89~94.
- 14) Cho, K. J., I. K. Chung and J. A. Lee, 1993, Seasonal dynamics of phytoplankton community in the Nakdong River estuary, *Korea J. Phycol.*, 8(1), 15~28.
- 15) Kim, H. W., K. Ha and G. J. Joo, 1998, Eutrophication of the lower Nakdong River after the construction of an estuarine dam in 1987, *Int. Rev. Hydrobiol.*, 83, 65~72.
- 16) Kim, H. W., S. J. Hwang and G. J. Joo, 2000, Zooplankton grazing on bacteria and phytoplankton in a regulated large river (Nakdong River, Korea), *J. of Plankton Res.*, 22(8), 1559~1577.
- 17) Kim, H. W., G. J. Joo and N. Walz, 2001, Zooplankton dynamics in the hyper-eutrophic Nakdong River system (Korea) regulated by an estuary dam and side channels, *Internat. Rev. Hydrobiol.*, 86(1), 127~143.
- 18) Wetzel, R. G. and G. E. Likens, 1991, *Limnological Analyses* (second Edition). New York, 391pp.
- 19) Utermöhl, H., 1958, Zur Vervollkommnung der quantitativen phytoplankton, *Methodik. Mitt. Internat. Verein. Limnol.*, 9, 1~38.
- 20) Prescott, G. W., 1973, *Algae of the Western Great Lakes area*, Revised Edition, Otto Koeltz Science Publishers, 977pp.
- 21) Foged, E., 1978, *Diatoms in Eastern Australia*, J. Cramer, 243pp.
- 22) Cassie, V., 1989, A contribution to the study of New Zealand Diatoms, J. Cramer, 266pp.
- 23) Round, F.E., R.M. Crawford and D.G. Mann, 1990, *The diatoms*, Cambridge University Press, 384pp.
- 24) 정준, 1993, 한국산 담수조류 도감, 아카데미 서적, 496pp.
- 25) Komarek, J. 1958, Die taxonomische revision der planktischen blauagen der Tschechoslowakei. *In: Komarek J. and Ettl H.(eds), Algologische Studien*, Praha, pp. 10~206.
- 26) Komarek, J. 1994, Current trends and species delimitation in the cyanoprokaryote taxonomy, *Algological Studies*, 75, 11~29.
- 27) Joo, G. J., H. W. Kim, K. Ha and J. K. Kim, 1997, Long-term trend of the eutrophication of the lower Nakdong River. *Kor. J. Limnol.*, 30, 472~480.
- 28) Decamps, H., J. Capblanq and J. N. Tourenq. 1984, Tee. pp. 207-236, *In: B.A. Whitton (ed.), Ecology of European Rivers*. Blackwell Sci. Pub. Oxford. 724pp.
- 29) Edwards, A. M. C. and P. S. Liss, 1973, Evidence

- for buffering of dissolved silicon in fresh waters. *Nature*, 243, 341~342.
- 30) Obeng, L. E., 1981, Man's Impact on Tropical Rivers. pp. 265-288, *In*: Lock, M.A. and D.D. Williams.(eds.), *Perspectives in Running Water Ecology*. Plenum Press, New York, 430pp.
- 31) Ha, K, G. J. Joo, 2000, Role of silica in phytoplankton succession: An enclosure experiment in the downstream Nakdong River(Mulgum), Kor. *J. Ecol.*, 23(4), 299-307.
- 32) 주가재, 1995, 낙동강 생태연구(1957-1994), 도서출판 금정, 177pp.
- 33) Ha, K, 1999, Phytoplankton community dynamics and *Microcystis* bloom development in a hypertrophic river (Nakdong River, Korea), Ph. D. dissertation, Pusan National University, 140pp.
- 34) Ha, K, H.W. Kim and G.J. Joo, 1998, The phytoplankton succession in the lower part of hypertrophic Nakdong River(Mulgum), South Korea, *Hydrobiologia*, 369/370, 217~227.