

낙동강 하류에서 식물플랑크톤 생산력과 수질 변화와의 관계

박 홍 기 · 정 종 문 · 박 재 림 · 홍 용 기*

부산광역시 상수도사업본부 수질검사소 · 신라대학교 환경학과 · 부경대학교 생물공학과
(1998년 9월 20일 접수)

The Relationship between Phytoplankton Productivity and Water Quality Changes in Downstream of Nakdong River

Hong-Ki Park, Chong-Mun Chung, Jae-Rim Bahk, and Yong-Ki Hong**

Water Quality Institute, Water Works HQ of Pusan Metropolitan City, Pusan 617-042, Korea

*Department of Environmental Science, Silla University, Pusan 617-736, Korea

**Department of Biotechnology, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea

(Manuscript received 20 September 1998)

The relationship between primary productivity and changes in water quality was investigated at Mulgum station, a site downstream of the Nakdong River, Korea. Phytoplankton production was characterized by blooms of *Microcystis aeruginosa* during the summer and *Stephanodiscus hantzschii* during the winter. Primary production and secondary production by bacterioplankton ranged from 1.5~53.5 mg-C/l/day and 0.1~0.3 mg-C/l/day, respectively. Distribution of total organic carbon appeared to be highly correlated with phytoplankton biomass, especially during blooms of *M. aeruginosa*, when particulate organic carbon was 81% of total organic carbon and the main source of organic materials supplied into the water. The correlation coefficient between chlorophyll-a and BOD was 0.86. Thus it was concluded that autochthonous phytoplankton mostly affected the BOD level. Total bacterial numbers were also highly correlated with chlorophyll-a ($r^2 = 0.84$) and the bacterial community appears to be regulated by phytoplankton biomass in this area.

Key words : phytoplankton, bloom, BOD, Nakdong River, TOC, total bacterial number

1. 서 론

식물플랑크톤은 현미경적 크기로서 수중 부유생활을 하며 chlorophyll 색소에 의한 광합성을 하는 하등식물군으로서 해수보다는 담수에 풍부하게 서식한다. 식물플랑크톤의 증식에 영향을 미치는 제요인들은 상당히 다양하고 이런 요인들이 복합적으로 작용하여 증식에 영향을 미치게 된다. 이러한 환경요인들 중 특히 영양염의 농도와 수온, 조도 그리고 광합성을 하는데 필요한 광량 등의 호조건하에서 양적인 증식을 일으켜 수면이 식물플랑크톤으로 뒤덮이는 수화현상 (bloom)을 일으켜 수중 생태계에서 1차 생산성을 촉진하기도 한다¹⁾. 수중 생태계에서 세균 군집이 이용할 수 있는 유기물의 원천은 육상으로부터 유래하는 외래 생성 유기물과 수층내의 식물플랑크톤이 생산하는 자체 생성 유기물들이 있다. 식물플랑크톤의 일차 생산물은 그 생물 자체의 입자상 유기물과 세포외 배출물 (exudate)인 용존성 유기물의 두가지 형태로 나타난다. 세균은 수중생태계의 먹이사슬에서 생산자와 분해자로서의 2가지 기능을 동시

에 수행하고 있으며 탄소 순환에 있어 일차적 agent로 활동하고 있다. 세균은 다른 생물이 쉽게 이용할 수 없는 용존 유기물 형태의 화학적 에너지를 동화하여 입자상 유기물인 세균 생물량으로 전환하며 이를 동물플랑크톤과 같은 높은 영양단계의 소비자들에 의해 포식됨으로써 세균이 생산자로서 참여하는 microbial loop가 이루어진다²⁾.

낙동강 하류에 위치하고 있는 물금 취수장은 유속이 거의 없고 식물플랑크톤이 증식하는 때가 많아 수색이 짙은 갈색과 녹색으로 변하는 현상을 볼 수 있다. 또한 낙동강은 전 수계에 걸쳐 수심이 대체로 얕아 식물플랑크톤의 서식에 유리한 조건을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 식물플랑크톤의 순수분리 및 방제기술의 개발 과제중 일차적으로 부영양호의 특징을 가지면서 식물플랑크톤이 대량 발생하고 있는 낙동강의 하류지점 중 물금 취수원을 대상으로 환경요인의 변화를 측정하고 이들과 식물플랑크톤 및 세균의 생산력과의 상관 관계를 우선 조사하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 조사지점 및 기간

년중 식물플랑크톤의 분포가 높은 낙동강 하류의 물금취수원 표층을 대상으로 1996년 7월부터 1997년 2월까지 월 1~2회 간격으로 실시하였다.

2.2 이화학적 조사

수온 및 pH는 온도계 및 pH meter (Orion, Model 260)로 현장에서 측정하였으며 알칼리도(alkalinity)는 채수 즉시 MR 혼합지시약(Methylred+Bromocresol green)을 넣어 0.02N 황산으로 적정하여 총 알칼리도에서 페놀프탈레인(Phenolphthalein) 알칼리도를 공제한 값을 일차 생산력식에 대입하였다³⁾. 용존산소(DO)는 Winkler-Azide변법⁴⁾으로 시료채취시 황산망간과 알칼리성 요오드-아지드화나트륨 용액을 넣어 고정된 후 실험실에서 적정하였고, 생물학적 산소요구량 (BOD)은 시료를 5일 동안 20℃로 저장하여 Winkler 변법에 따라 측정하였다. 또한 암모니아성 질소(NH₃-N)는 Indophenol법⁴⁾에 의해 흡광도 640nm에서 측정하였으며, 총 유기탄소(TOC)는 TOC analyzer (Shimadzu, TOC-5000)를 사용하여 정량하였다. 용존 유기탄소(DOC)는 glass fiber filter (GF/F, Whatman Co.)로 시료를 여과하여 총 유기탄소와 동일한 방법으로 측정하였으며⁴⁾, 입자상 유기탄소(POC)는 총 유기탄소 (TOC)와 용존 유기탄소 (DOC)의 차이로 산출하였다.

2.3 생물학적 조사

Chlorophyll 농도는 500 ml의 시료를 0.45 μm filter로 여과시킨 후 90% acetone 용액에서 24시간 chlorophyll을 추출하였다. 이때 chlorophyll의 불안정화를 막기 위하여 포화 MgCO₃용액으로 세척하였다. 추출된 용액을 4,000 rpm에서 10분간 원심분리한 후 상등액을 취해 각각 750, 664, 647, 630 nm에서의 흡광도를 측정하여 trichromatic method⁴⁾의 계산식에 따라 chlorophyll-a의 양을 계산하였다. 한편 표층수에서 측정된 chlorophyll-a 농도를 식물플랑크톤의 생물량으로 전환하기 위하여 50 g-C/g-Chlorophyll-a의 전환율을 곱하였다. 식물플랑크톤의 세포수는 표층수 1 l를 채수하여 15 μm 체로 걸러 최종적으로 20 ml되게 농축한 후, 중성 포르말린 1-2 ml으로 고정하여 Sedgwick-Rafter chamber로 계수하였으며 ml당 세포수로 환산하여 현존량으로 표시하였다. 군체를 이룬 종에 대하여는 개개의 세포수를 모두 계수하였다. 우점종을 생물량으로 환산하기 위하여 각 종의 평균체적을 측정하였다. 수 μm 규모에 대해서는 1000배의 배율을 이용하여 측정하였다. 조사기간 동안의 우점종인 *Stephanodiscus hantzschii*, *Melosira* spp. 그리고 *Microcystis aeruginosa* 경우 각각 471 μm³/cell, 1,508 μm³/cell, 291 μm³/cell의 평균체적으로 구하였으며, 탄소량으로 환산하기 위해서는 0.2 pg-C/μm³의 전환율을 사용하였다³⁾.

식물플랑크톤의 일차 생산력은 현장 C¹⁴ 배양법을 사용하였다⁵⁾. 표층에서 채취한 시료를 300ml의 light bottle 2개와 dark bottle 1개에 각각 분주한 후 각각 10

μCi의 NaH¹⁴CO₃ (55.0 mCi/mmol) 1ml를 bottle 바닥 부분부터 서서히 주입하고, 배양용기내에 기체층이 생기지 않도록 잘 밀봉하여 현장에서 정오경부터 3시간 동안 배양하였다⁶⁾. 배양된 시료는 1.2 μm와 0.2 μm의 filter로 연속여과한 후 여과지를 liquid scintillation counter (Hewlette-Packard Tri-Carb Liquid Scintillation Analyzer, Model 2500)로 측정하여 식물플랑크톤에 흡수된 ¹⁴C의 양으로 환산하였다.

세균의 생산력은 ³H-thymidine이 DNA에 들어가는 정도로 구하였다⁷⁾. 38 μm 체에 사전 여과한 시료 5ml에 [methyl-³H] thymidine (80.4 Ci/mmol)을 농도 별로 접종한 후 교반 배양기에서 in situ조건으로 1시간 배양하였다. Ice-cold 10% TCA용액 5ml를 첨가하여 반응을 종료시키고 0.2 μm filter로 여과하였다. 이 여지를 vial에 넣고 건조시킨 후 ethyl acetate 1 ml와 10 ml의 scintillation cocktail (Aquasol-2, Packard Co.)을 넣어 방사선량을 측정하였다. 얻어진 DPM (disintegrate per minute)값으로부터 Parsons의⁸⁾에 의한 식을 이용하여 incorporation된 thymidine의 양을 계산하였다. 생성 세균수로의 전환계수 2.0 x 10¹⁶ cells/mole thymidine를 채택하였고⁹⁾, 탄소량으로의 전환에는 2.0 x 10⁻¹³ g-C/μm³의 세균 체적당 탄소량과 평균 세포체적인 0.0865 μm³/cell을 곱한 1.73 x 10⁻¹⁴ g-C/cell의 전환율을 사용하였다.

총세균수용 시료는 현장에서 중성 포르말린으로 고정시키고 실험실로 운반하여 잘 흔든 후 1 ml를 취하여 Sudan black으로 미리 염색된 polycarbonate MF (0.2 μm)에 여과한 다음 0.05% acridine orange로 5분간 염색하여, 형광 현미경으로 세균수를 측정하였다. 종속영양세균은 R₂A agar (Difco.) 평판배지에 시료 1 ml를 도말한후 25℃ 배양기에서 14일간 배양하여 형성된 colony를 계수하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수질환경요인의 변화

수온은 생물의 활성을 지배하는 중요한 환경요인으로 미생물의 영양요구성의 정도를 변화시킬 뿐만 아니라 세포내의 생화학적 반응을 결정하기도 한다. 조사기간 동안의 수온의 변화는 7월부터 9월까지의 25℃ 이상의 수온을 유지하였고 10월부터 11월 사이에는 점차 감소를 보였으며 12월에서 2월까지의 4℃ 이내로 떨어졌다. 대부분의 수계는 생물의 생명활동에 적합한 pH 6~8 범위를 나타내지만 부영양화에 의한 수화현상이 심화되면 pH 9.5 이상 상승하는 경우가 많다. 조사기간 동안의 pH의 월별변화는 하계와 동계에 9.0 이상의 높은 수치를 나타냈는데 이는 부영양화의 결과로 하계의 *Microcystis aeruginosa*, 동계의 *Stephanodiscus hantzschii*에 의한 식물플랑크톤 등이 대량 증식하였기 때문인 것으로 생각되어진다(Fig. 1). 수중생물의 호흡과정에 있어 전자 수용체로 작용하는 중요한 환경요인인 용존산소의 경우에는 평균 10 mg/l 이상을 유지하였으며 용존 무기탄소량을 알기 위해 측정된 알칼리도는 최저 53.0 mg/l에서 최고 100.9 mg/l로 변화의 폭이 넓

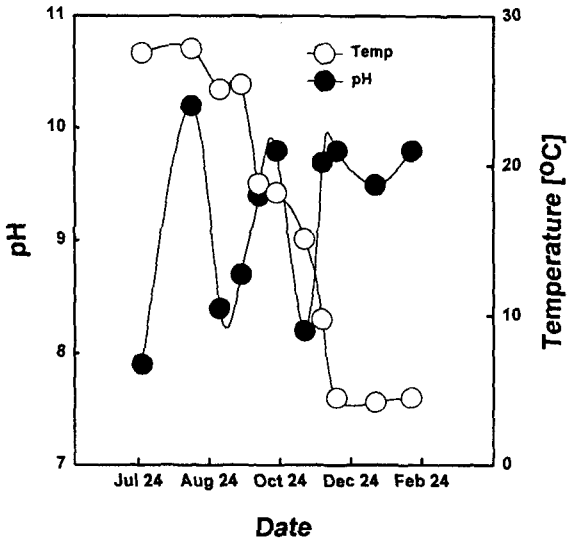


Fig. 1. Variation of pH and temperature at Mulgum.

었다(Fig. 2). 수질오염의 대표적인 오염지표인 BOD와 $\text{NH}_3\text{-N}$ 은 각각 2.6~10.1 mg/l과 0.02~0.75 mg/l 범위로 나타나 유기물의 오염이 심화된 것으로 나타났다(Fig. 3).

일반적으로 대부분의 용존 유기물은 난분해성 물질이라 생각되며 입자성 유기물보다 5-10배 풍부하게 존재한다고 알려져 있다¹⁰⁾. 이와 같은 용존 유기물의 전환은 자연수계에 존재하는 세균에 의해서 주로 이용될 수 있으므로 특히 중요하다. 조사기간 중 총세균수는 $8.6 \times 10^5 - 5.3 \times 10^6 \text{ cell/ml}$ 의 범위를 보여 R_2A agar배지에 성장한 colony 수를 헤아린 중속영양세균수 $2.8 \times 10^4 - 6.5 \times 10^5 \text{ cell/ml}$ 와 비슷한 경향을 보였다. 이것은 수계 생태계에 존재하는 유기물의 제거는 다른 어느 미생물보다 중속영양세균에 의한 것이 대부분인 것으로 판단된다. 또한 Rheinheimer¹¹⁾는 대체적으로 오염된 수계에서는 수온이 떨어지는 겨울에 총세균수가 오히려 증가한다고 하였는데 본 조사지역인 물금 취수원도 겨울이 여름보다 총세균수 및 중속영양세균수가 더 많이 오염되어 있음을 알 수 있었다. 그리고 세균에 의한 이차생산력은 조사기간 동안 0.132~0.326 mg-C/l/day로 나타났는데 이는 수온과 같은 생물 활성을 결정짓는 물리화학적 요인의 작용외에도 일차 생산에 의해 세균이 이용가능한 영양원인 유기탄소가 공급되었기 때문이라 생각되어진다.

3.2 식물플랑크톤의 분포

조사기간 동안의 식물플랑크톤의 주요 우점종의 계절적 변화는 Table 1에 나타내었다. *Microcystis aeruginosa*는 수온이 25°C를 초과한 8월에는 현존량이 $2.5 \times 10^8 \text{ cell/ml}$ 로 급격히 증가한 값을 보였으며 수온이 20°C 이하로 내려간 10월부터 급격한 감소를 보였다. 낙동강 수역에서 많이 분포하고 있는 종은 *M. gran-*

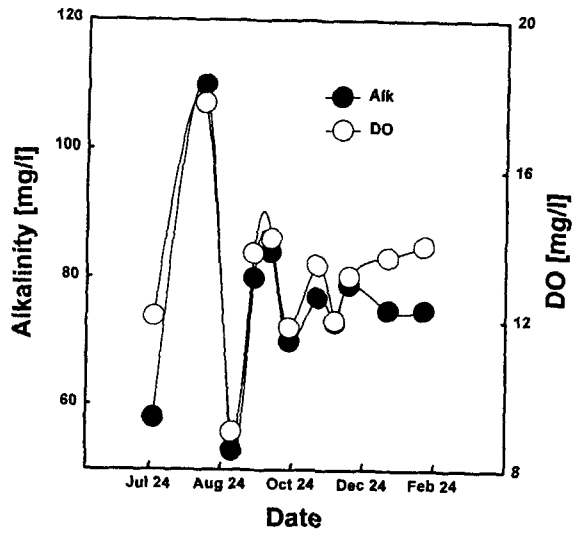


Fig. 2. Variation of alkalinity and DO concentrations at Mulgum.

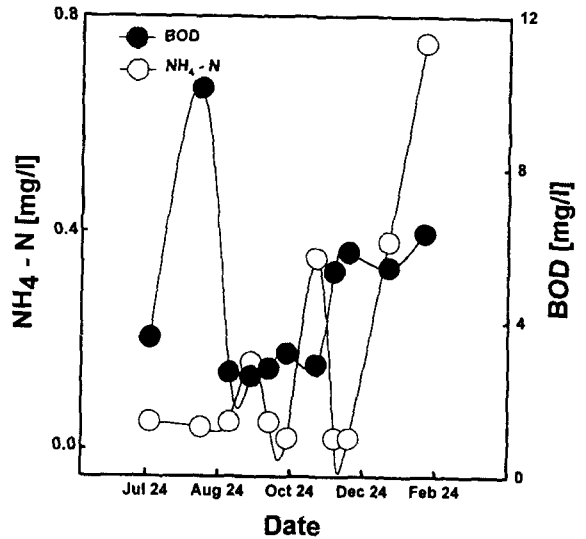


Fig. 3. Variation of $\text{NH}_4\text{-N}$ and BOD concentrations at Mulgum.

ulata var. *angustissima*와 *M. italica* 2종인데 특히 *M. italica*는 담수 수화 원인종으로 알려져 있다¹²⁾. 본 종의 현존량의 변화는 초여름에서 가을까지 증식하였다가 동계에는 감소하는 경향을 보였다. *Stephanodiscus hantzschii*는 수온이 10°C 이하인 동계에서 높은 현존량을 보여 낮은 수온에서도 증식 제한을 받지 않음을 알 수 있었다. 그외 *Actinastrum hantzschii* var. *fluviatile*, *Pediastrum boryanum* 등의 녹조류가 9월, 10월에 많이 출현하는 종으로 조사되었다. 조사결과 물금에서의 식물플랑크톤 천이치는 대표적으로 여름철에는 남조류인 *Microcystis aeruginosa*, 겨울철에는 규조류인 *Stephanodiscus hantzschii*의 blooming으로 특

Table 1. Dominant species of phytoplankton appearing in the Mulgum area, Nakdong River (cells/ml)

Dominant species Collection date	<i>Microcystis aeruginosa</i>	<i>Melosira</i> spp.	<i>Actinastrum hantzschii</i> var. <i>fluviatile</i>	<i>Pediastrum borynum</i>	<i>Fragilaria</i> spp.	<i>Stephanodiscus hantzschii</i>
July. 24, 1996	2.5×10^3	7.7×10^3	8.6×10^1	0	0	0
Aug. 8, 1996	2.5×10^3	1.3×10^2	0	0	0	0
Sep. 3, 1996	7.3×10^2	2.6×10^3	1.5×10^2	7.5×10^2	9.0×10^1	0
Sep. 20, 1996	6.0×10^3	2.5×10^3	4.5×10^2	3.2×10^2	4.2×10^1	0
Oct. 9, 1996	5.0×10^3	1.1×10^3	4.3×10^2	1.6×10^2	2.6×10^2	0
Oct. 23, 1996	0	3.1×10^3	1.5×10^2	6.2×10^2	5.1×10^3	0
Nov. 13, 1996	0	3.2×10^3	7.2×10^1	1.7×10^2	9.3×10^2	0
Nov. 27, 1996	0	9.1×10^2	0	2.2×10^2	2.0×10^2	1.4×10^4
Dec. 11, 1996	0	2.2×10^2	0	0	3.5×10^1	2.2×10^4
Jan. 17, 1997	0	1.1×10^3	0	0	0	1.5×10^4
Feb. 17, 1997	0	8.9×10^2	0	0	0	1.7×10^4

징지를 수 있었다.

3.3 식물플랑크톤과 총유기탄소와의 관계

표층시료에서 chlorophyll-a 농도로부터 계산된 식물플랑크톤의 생체량은 2.2~40.6 mg-C/l의 분포를 나타냈다. 세 우점종들의 개체수와 평균 체적으로부터 계산된 생물량의 경우에는 0.29~45.5 mg-C/l의 분포를 보여 chlorophyll-a로부터 계산된 경우와 거의 동일하였다. 한편 표층에서의 식물플랑크톤에 의한 일차 생산력은 1.5 mg-C/l day에서 최고 53.5 mg-C/l day까지 측정되었다. 일차 총생산량 중 용존 유기물의 형태로 수층에 공급되는 세포의 배출물(exudate)은 평균 46% 정도로 측정되었으며 식물플랑크톤의 대발생이 있었던 시기에는 19% 내외로 나타났다. 따라서 일차 생산에 의해 수층으로 유입되는 유기탄소의 대부분은 식물플랑크톤 생물량인 입자상 유기물이었다.

조사기간중 총유기탄소량은 평균 9.6 mg/l였으며 식물플랑크톤의 대량번식이 발생한 8월에는 20.6 mg/l로 최고값을 나타내었다. 총유기탄소량은 식물플랑크톤의 현존량으로 표시된 chlorophyll-a 농도의 변화와 비교적 높은 상관관계 ($r^2=0.70$)를 보여 수층내의 유기물의 증가가 표층수에서의 식물플랑크톤의 생물량 분포와 밀접한 관련이 있음을 알 수 있었다 (Fig. 4). 또한 총유기탄소중 입자상 유기탄소는 최저 37%에서 최고 81%의 변화를 보였는데 특히 일차생산이 활발한 시기에 그 비율이 높게 관찰되었다.

3.4 식물플랑크톤과 BOD와의 관계

식물플랑크톤의 현존량인 chlorophyll-a 농도와 BOD는 Fig. 5에서와 같이 높은 상관계수 ($r^2=0.86$)를 보였다. 유입 유기물이 유하과정에서 분해 감소 되거나 질소와 인과 같은 영양염류의 과부하로 식물플랑크톤의 과다 성장으로 BOD 농도가 증가하는 양상을 띠었다. 부영양화 하천의 BOD 농도는 외부의 각종 오염원으로부터 유입된 BOD 물질이외에 식물플랑크톤에 의한 자생 BOD 물질이 상당 부분 기여 할 것이 예상된다¹³⁾.

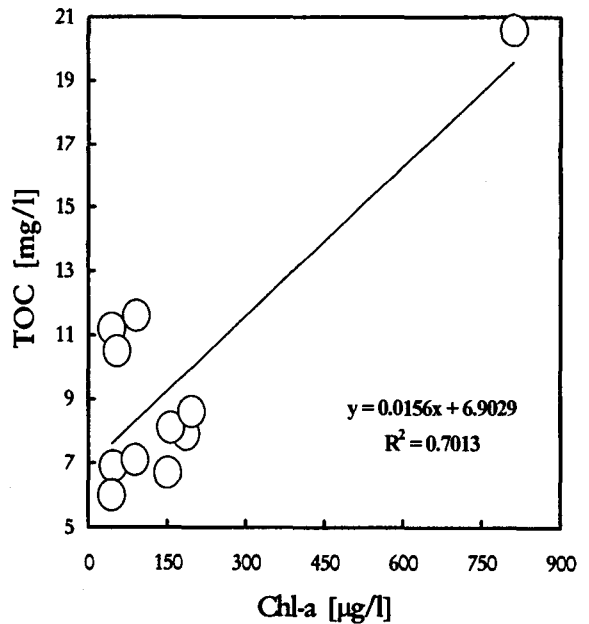


Fig. 4. Correlation between chlorophyll-a (chl-a) concentration and total organic carbon concentration(TOC).

3.5 식물플랑크톤과 세균 군집과의 관계

식물플랑크톤 현존량으로 표시된 chlorophyll-a와 세균 군집과의 관계는 chlorophyll-a값이 커짐에 따라 총세균수가 증가하는 경향으로 나타났다. 세균 군집의 크기는 식물플랑크톤의 일차 생산력과 비례하며 일차 생산력은 chlorophyll-a 농도와 비교적 높은 상관관계를 나타내고 있으므로 chlorophyll-a의 농도와 총세균수의 변화는 Fig. 6과 같이 $\log \text{total bacteria} = 6.105 + 0.486 \log \text{chl-a}$ 로 비례한다고 볼 수 있다¹⁴⁾. 이때 세균의 변화는 chlorophyll-a의 변화와 일치하기 때문에 ($r^2=0.84$) 물금 취수원 표층에서는 식물플랑크톤이 배출

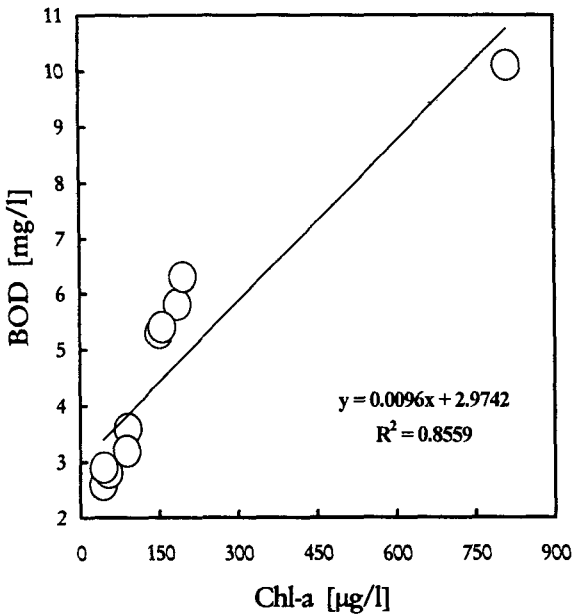


Fig. 5. Correlation between chlorophyll-a (chl-a) concentration and biochemical oxygen demand (BOD) concentration.

하는 유기물이 세균 군집의 크기를 조절하는 것으로 생각되어진다.

4. 결 론

낙동강 하류 물금지역의 식물플랑크톤 천이 하계에는 *Microcystis aeruginosa* 동계에는 *Stephanodiscus hantzschii*의 blooming으로 특징지을수 있었다. 식물플랑크톤에 의한 일차 생산력은 1.5-53.5 mg-C / l day를, 세균에 의한 이차 생산력은 0.132~0.326 mg-C / l day의 분포를 보였다. 총유기탄소량 분포는 식물플랑크톤 현존량인 chlorophyll-a와 높은 상관관계를 보였으며 ($r^2=0.70$), 특히 blooming 시기에는 일차생산에 의한 입자상유기물 (총 유기탄소량의 81%)은 수층으로 유입되는 주요 유기물 공급원이었다. 또한 chlorophyll-a와 BOD와의 관계는 상관계수 0.86으로 내부생산된 식물플랑크톤이 BOD에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 총세균수도 chlorophyll-a 농도와 높은 상관관계 ($r^2=0.84$)를 보여 세균 군집은 식물플랑크톤에 의해 조절되는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

- 1) 박원훈. 1991. 호수 만입부에서의 조류 대량 증식 제어기술 개발. 과학기술처 보고서, 45-46pp.
- 2) Azam, F., T. Frenchel, J.G., Field, J.S., Gray, L. A. Meyer-Reil and F. Thingstad. 1983. The ecological role of water-column microbes in the sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 10, 257-263.
- 3) Wetzel, R.G. and G.E. Likens. 1991. Lim-

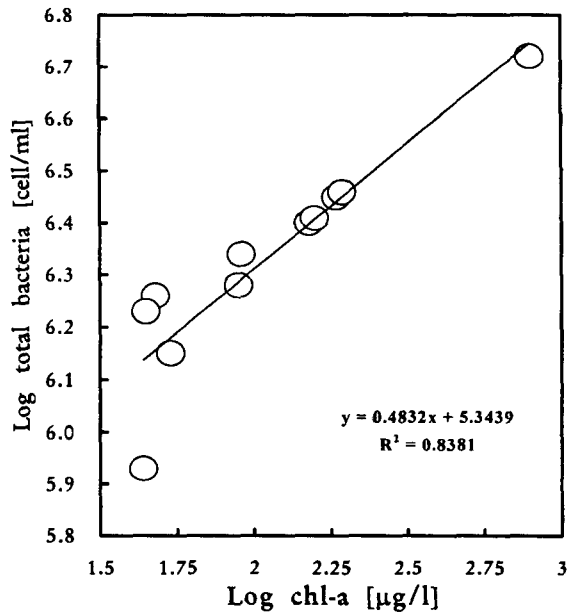


Fig. 6. Correlation between chlorophyll-a (chl-a) concentration and total bacterial number.

nological Analysis. 2nd ed. Springer-Verlag, New York, 767pp.

- 4) APHA. 1992. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. APHA-AWWA-WPCF, New York.
- 5) Steemann Nielsen, E. 1952. The use of radioactive carbon(¹⁴C) for measuring organic production in the sea. *J. Cons. Perm. Int. Explor. Mer.* 18, 117-140pp
- 6) Boney, A.D. 1976. Phytoplankton : The institute of biology's studies in biology. No. 52. Edward Arnold, London, 117pp.
- 7) Fuhrman, J.A. and F. Azam. 1982. Thymidine incorporation as a measure of heterotrophic bacterio-plankton production in marine surface waters: evaluation and field results. *Mar. Bio.*, 66, 109-120pp
- 8) Parsons, T.R., Y. Maita, and C.M. Lalli. 1984. A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis. Pergamon, Elmsford, New York, 173pp.
- 9) Bell, R.T., G.M. Ahlgren, and I. Ahlgren. 1983. Estimating bacterioplankton production by the [³H]thymidine incorporation in a eutrophic Swedish Lake. *Appl. Environ. Microbiol.*, 45, 1709-1721pp
- 10) Chrzanowski, T.H. and J.G. Hubbard. 1988. Primary and bacterial secondary production in a south-western reservoir. *Appl. Environ.*

- Microbiol., 54, 661-669.pp
- 11) Rheinheimer, G. 1985. Aquatic Microbiology. John Willy and Sons, New York 262pp
- 12) 정영호. 1968. 한국동식물 도감. 문교부. 147-148pp.
- 13) 신성교, 이수웅, 박청길. 1996. 낙동강에서 chlorophyll-a와 BOD의 상관관계. 한국수질보전학회지, 12, 369-375pp
- 14) Bird, D.F. and J, Kalf. 1984. Empirical relationship between bacteria abundance and chlorophyll concentration in fresh and marine water. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 41, 1015-1023.pp