

소양호 수중 생태계에서의 세균 생체물질량의 분포

김명운 · 강찬수 · 김상중
서울대학교 자연과학대학 미생물학과

Distribution of bacterial biomass in the water column of Soyang Lake

Kim, Myeong Woon, Chansu Kang and Sang-Jong Kim

Department of Microbiology, College of Natural Sciences, Seoul National University

ABSTRACT: Microbiological parameters such as bacterial biovolume and biomass in Soyang Reservoir was statistically analyzed with the physico-chemical environmental factors. Analysis of correlation and multiple regression showed that temperature affects most of microbiological parameters. Variations of total bacterial number, total bacterial biovolume and saprophyte number were highly correlated with the concentrations of chlorophyll a and pheophytin a. Bacterial production by the ^3H -thymidine incorporation rate was largely affected by Seston. It suggests that microbiological factors such as bacterial biovolume and bacterial biomass were controlled by the concentration of seston and distribution of phytoplankton which acts as carbon and energy source for the bacterial community in the water column of Soyang Reservoir.

KEY WORDS □ Bacterial biomass, AODC, Bacterial production, Soyang Lake

수생 생태계에서의 미생물은 유기물질의 분해자로서의 역할 이외에도 전체 생물군집에 있어서의 에너지 및 탄소물질 순환의 고리로서 작용한다 (Ehrlich, 1985; Sherr & Sherr, 1988). 미생물의 탄소순환에 있어서의 역할은 1차 생산자의 체외 배출물인 exudate를 uptake하여 세균 생체물질량(생물량)으로 전환함으로써 microflagellate나 ciliate 등에게 food source를 제공하는데 있다 (Scavia, 1988; Turner *et al.*, 1988; Fenchel, 1986). 세균 생물량의 영양단계에서의 중요성은 빈영양상태인 수생 생태계에서 낮은 농도의 용존 유기물질을 축적하여 상위의 생물군집에 전달함으로써 더욱 강조되어진다. 미생물 군집의 생물량이 생태계에서 차지하는 위치를 정확히 파악하기 위하여는 세균 생물량의 정량적인 측정이 우선 요구되어지며 이러한 정량적인 토대위에서 세균 군집 구성의 배경이 되는 제반 물리화학적 환경요인과의

관계를 규명하는 작업이 필요하다.

미생물 군집의 구조와 환경요인과의 관계에 관한 연구는 1차생산 및 세균 구성, 세균 군집의 생리적 활성도 등에 미치는 환경요인에 관한 것들과 (Väätänen, 1980a,b; Pedros-Alio, 1983; Goulder, 1986; Keller, 1989), 아울러 세균 체적으로부터 얻어지는 생물량의 정량을 위한 정확한 conversion factor 등에 관한 연구들이 최근에 진행되고있다 (Albright & McCrae, 1987; Norland *et al.*, 1987; Chrzanowski *et al.*, 1988). 세균 체적 및 세균 생물량이 여러가지 외부 환경요인에 의해 조절되어지고 이러한 세균 생물량이 전체 수생 생태계의 물질순환에 있어 주요한 요인으로 작용한다고 할 때, 그 관계를 분석하는 것은 생태계 이해에 있어 중요한 사항임에도 불구하고 이에 관한 연구는 국내에서는 물론 국제적으로도 매우 빈약한 실정이다.

본 연구에서는 빈-중 영양상태인 소양호에서 측정된 여러 물리화학적 요인들과 세균 생물량 및 세균 생산량 등 미생물학적인 요인들과의 상호 작용을 이해하기 위하여 통계적인 방법에 의하여 분석하였다.

재료 및 방법

조사대상지역

강원도 춘성군에 위치하여 한강의 홍수 조절과 수력발전을 담당하는 소양강 다목적댐 주변의 5개 지점을 대상으로 하여 수심별로 총 10개 정점에서 1987년 3월부터 1988년 6월까지 총 10회의 현장조사를 행하여 얻은 자료를 중심으로 분석하였으며 Site 4에서 1988년 9월 22일부터 3시간 간격으로 30시간 동안 측정되어진 일일 변화자료들을 대상으로 상관관계 분석을 수행하였다(Fig.1).

물리화학적 환경요인의 측정

현장에서 수온의 측정과 함께, 멸균된 Bach water sampler를 사용하여 채수한 시료를 pore

size 0.45 μm 의 membrane filter를 사용하여 여과한 후 standard method(APHA-AWWA-WPC-CE, 1985)에 따라 암모니아염 질소($\text{NH}_4^+\text{-N}$), 아질산염 질소($\text{NO}_2^-\text{-N}$), 질산염 질소($\text{NO}_3^-\text{-N}$) 및 인산염 인($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)의 양을 발색 반응을 통하여 spectrophotometer(Shimazu, UV-160)로 정량하였다. Glass fiber filter(GF/C, $\phi 25\text{mm}$)를 사용하여 시료 500ml 씩을 여과하여 전후의 무게로부터 건조질량을 측정하여 seston의 양을 구하였으며 Winkler azide modification 방법을 사용하여 현장에서 고정된 시료의 용존산소량을 측정하였다. 엽록소 a의 양은 500ml의 시료를 0.45 μm 의 membrane filter를 사용하여 여과한 후 filter를 90% acetone 용액에서 24시간 추출하여 추출액을 원심분리 후 상층액을 750, 664, 647 및 630 nm에서 흡광도를 측정한 후 계산으로서 구하였다. 측정 후 추출액 5ml에 0.1N HCl 50 μl 로서 pH를 3 이하로 낮추어 엽록소를 pheophytin a로 전환하여 665nm에서 흡광도를 측정함으로써 총 pheophytin a의 양을 구하였다.

미생물학적 요인 조사

현장에서 formalin 2%의 농도로 고정된 시료 중 1ml을 sudan black B로 미리 염색된 0.2 μm polycarbonate membrane filter에 여과한 후 0.05% acridine orange로 5분간 염색, 공기 중에서 건조하여 형광현미경(Balplan, Bausch & Lomb)하에서 세균 크기에 따라 계수하였다(Watson *et al.*, 1977). 30 field의 세균수로부터의 평균값에 배율에 따른 conversion factor를 곱하여 총 세균수를 구하였으며 크기에 따른 총 1001개의 구형세균과 1557개의 간형세균의 부피를 구하여 각 구간별 크기에 따른 평균 세포 체적을 구하였다. 각 세포의 체적은 구형세균의 경우 세포의 형태를 완전구형으로, 간형세균인 경우는 양 끝의 반구 및 중앙부분의 원통형으로 이루어진 것으로 가정하고 계산하였다(Albright and McCrae, 1987). 측정되어진 각 구간별 세균 평균 체적의 factor는 Table 1과 같다. 구해진 각 구간별 세포의 평균체적을 크기별로 계수된 세균수에 곱하여 총 세균 체적을 구하였고 총 세균 체적을 총 세균수로 나누어 세균 평균체적을 계산하였다. 또한 각 구간별로 구해진 세균 체적량에

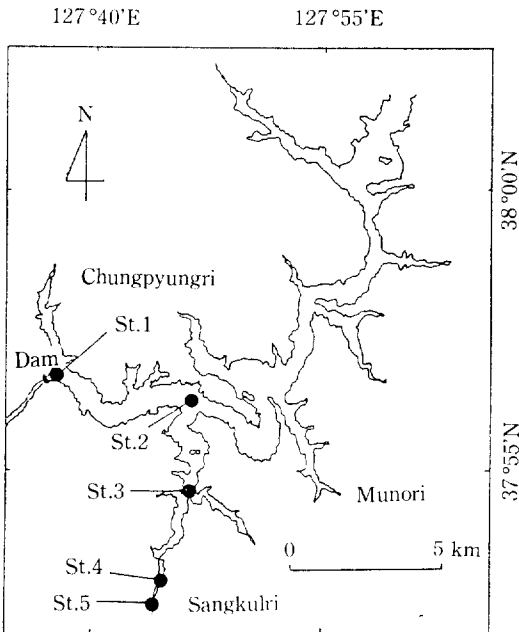


Fig. 1. Map of research area and sampling sites. Sampling depths of each site are as follows. St.1; 2, 30 and 80m; St.2; 2, 30 and 50m; St.3; 2 and 30m; St.4; 2m; St.5; surface.

Table 1. Measured conversion factors for the calculation of Bacterial Biovolume in Soyang Reservoir.

size classes of diameter/length (μm)	factor (μm^3)	
	rod	cocci
0.5	0.01517	
0.5-1.0	0.10610	0.05997
1.0-1.5	1.01230	0.20819
1.5-2.0		0.28612
2.0-2.5		0.38735
2.5-3.0		0.42098
3.0		0.70669

conversion factor $0.121 \text{ pg-C}/\mu\text{m}^3$ 을 적용하여 총 세균 생물량을 구하였다.

^3H -thymidine 이 DNA 에 incorporation 되는 정도에 의해 측정되는 세균의 생산량은 Fuhrman 과 Azam 의 방법에 의해 측정하였으며 1.4×10^{18} cells/mmol thymidine-incorporated 의 conversion factor 를 사용하여 bacterial cell production rate 를 구하였고(Fuhrman & Azam, 1982) bacterial cell production rate 를 총 세균수로 나누어서 doubling time 를 구하였다. 유기물질 분해 세균수인 saprophyte number 는 중류수로 대체된 Zobell's 2216E agar medium 에 1 ml 의 시료를 pour plate method 로 접종하여 25°C에서 14 일간 배양한 후 계수하였다.

통계분석

물리화학적 요인과 미생물학적인 요인 사이의 상관계수를 Pearson correlation coefficient 로 95% 의 유의 수준에서 구하였다. 각각의 미생물학적 요인에 대하여 모든 환경요인을 대상으로 가능한 모든 회귀 모형을 설정하여 결정계수(R^2) 및 수정 결정계수(\bar{R}^2)와 Mallows 의 C_p 를 검토, 적절한 회귀식을 결정하였으며 결정된 회귀식은 분산 분석을 통하여 적절성을 최종 검토하였다(허, 1986). 한편 선형 회귀의 통계적 적절성을 위하여 사전에 각 요인들을 정규분포에 가깝도록 변환하였다(Sokal & Rohlf, 1981). 모든 통계적 분석은 SAS(Statistical Analysis System) Package 를 사용하였으며 이용된 computer 는 IBM-XT

personal computer 와 IBM 3090/150 system(서울대학교 전자 계산소)이었다.

결 과

조사대상 요인들의 기본 일변량 통계량 중 최대 최소값 및 평균, 표준편차들은 Table 2에 나타난 바와 같다. 수온, seston, 영양염류 등의 요인들은 전반적으로 커다란 변화를 보였다. 특히 인산염, seston 및 pheophytin a 등 1 차 생산량과 관계되는 요인들이 커다란 변동계수를 보였다. 이에 따른 미생물학적 요인들도 큰 변화가 관찰되었다. 상대적으로 direct counting에 의한 총 세균수나 세균 생물량의 변화들이 thymidine incorporation rate에 의한 세균 생산량이나 콜로니생성 세균수(saprophyte number) 등의 요인들에 비하여 적은 변화가 관찰되었다. 전반적으로 측정된 각 요인들은 지역 및 깊이에 따른 차이가 뚜렷하게 나타났으며 인산염, 엽록소 a, seston 값과, 이에 따른 세균 이차생산량 및 세균수의 최대값들이 지역적으로는 정점 4 및 상층에서, 계절적으로는 봄과 가을에 관찰되었다. 측정된 물리화학적 및 생물학적 요인들의 상관관계는 Table 3에서 볼 수 있다.

수온, 염류 등 물리화학적 요인에 대한 총 세균수, 세균 체적 등 미생물학적 요인의 상관관계는 유의 수준 95%에서 각각의 미생물학적 요인에 대하여 인산염을 제외한 물리 화학적 요인들과는 비교적 높은 상관관계를 보였으며 대부분의 요인들이 양의 상관관계를 보였다. 총 세균수는 수온과 엽록소 a, 아질산염과 양의 상관관계를 보였으며, 세균 체적은 수온, 암모늄염, 엽록소 a 및 pheophytin a와 양의 상관관계를 나타내었다. 여러 물리화학적 환경요인들 중 특히 수온과 seston, pheophytin a가 미생물학적 요인들과 많은 상관관계를 나타내었다. 이 중 seston 이 thymidine incorporation rate 를 이용한 세균 생산량과 이로부터 산출되어진 doubling time 과 상관관계를 나타내었으며, 엽록소 a와 pheophytin a가 direct count 에 의한 미생물학적 요인들과 높은 상관관계를 나타내었고 그 밖의 영양 염류의 농도는 두드러진 경향을 나타내지 못하였다. 기타 saprophyte 와 관련된 parameter 들이 pheophytin a 와 밀접한

Table 2. Variation of parameters determined at Soyang Reservoir.

parameters	range (Min-Max)	mean	standard deviation	coefficient of variation
AODC (10^5 cells/ml)	3.52- 42.21	13.59	7.79	57.28
Biovol ($10^3\mu\text{m}^3/\text{ml}$)	33.82- 462.31	118.29	84.67	71.58
Biomass ($\mu\text{g-C/l}$)	5.38- 74.58	20.56	14.14	68.78
Mbiovol ($10^{-2}\mu\text{m}^3/\text{cell}$)	4.02- 18.39	8.67	3.59	41.36
Bac-Pro (10^6 cells/hr/l)	0.13- 120.67	6.49	16.69	252.03
Double (hr)	22.57-9177.90	1307.00	1569.15	120.06
Sapro (10^2 CFU/ml)	0.14- 290.00	18.84	45.81	243.18
%sapro ($10^{-3}\%$)	1.41-1388.06	123.48	231.94	187.83
Temp ($^{\circ}\text{C}$)	2.00- 24.00	10.61	6.81	64.22
DO (mg/l)	5.43- 13.14	9.94	1.48	14.93
NH_4 ($\mu\text{g/l}$)	0.39- 23.76	5.99	4.19	69.99
NO_2 ($\mu\text{g/l}$)	0.20- 12.06	3.07	2.51	81.64
NO_3 ($\mu\text{g/l}$)	22.50- 558.91	186.60	100.38	53.79
PO_4 ($\mu\text{g/l}$)	0.55- 75.67	10.85	13.21	121.72
Seston (mg/l)	0.05- 80.83	3.49	8.86	254.20
Chl a (mg/m ³)	0.23- 53.30	9.40	8.62	91.69
Pheo a (mg/m ³)	1.04- 629.19	73.61	132.47	179.98

Abbreviations: AODC; Total bacterial number by acridine orange direct count, Biovol; Bacterial biovolume, Mbiovol; Mean biovolume, Bac-Pro; Bacterial Production, Double; Doubling time, Sapro; Number of saprophytes, %sapro; proportion of saprophyte number to the total bacterial number, DO; Dissolved oxygen, Chla; Chlorophyll a, Pheoa; Pheo-phytin a.

Table 3. Spearman rank correlation coefficient between physico-chemical factors and microbiological parameters in Soyang Reservoir. Number of observations are given in parentheses and all values are significant at $P < 0.05$.

	AODC	Biovol	Biomass	Mbiovol	Bac-Pro	Double	Sapro	%sapro
Temp	0.51* (74)	0.50* (74)	0.49* (74)		0.30 (72)		0.24 (74)	
DO					0.27 (57)	-0.42* (47)		
NH_4		0.22 (79)						
NO_2	0.25 (88)							
NO_3				-0.29 (79)				
PO_4								
Seston				-0.26 (71)	0.33* (80)	-0.34 (82)		
Chl a	0.28* (88)	0.25* (88)						
Pheo a		0.48* (77)	0.37* (77)	0.44* (67)			0.31* (77)	0.26 (74)

*: Significant at $P < 0.01$.

Abbreviations of parameters are in Table 1.

Table 4. Normalization of parameters measured in Soyang Reservoir.

parameters	untransformed				parameters	transformed			
	S.D.	skewness	kurtosis	normality		S.D.	skewness	kurtosis	normality
AODC	7.79	1.5290	2.0824	0.8344	ln(AODC)	0.51	0.3689	-0.0753	0.9641
Biovol	84.67	1.9557	4.2785	0.7942	ln(Biovol)	0.61	0.4690	-0.3295	0.9580
Biomass	14.14	1.9387	3.7897	0.7814	ln(Biomass)	0.57	0.5957	-0.0493	0.9563
Mbiovol	3.59	1.0875	0.6949	0.8882	ln(Mbiovol)	0.39	0.3175	-0.5910	0.9579
Bac-Pro	16.69	5.2898	31.2939	0.3992	ln(Bac-Pro)	1.47	0.6652	0.0122	0.9485
Double	1596.2	2.3895	7.4163	0.7452	ln(Double)	1.33	-0.4333	-0.3918	0.9611
Temp	6.81	0.7827	-0.9783	0.8091	ln(Temp)	0.63	0.2517	-1.1183	0.8935
DO	1.48	-0.7751	0.8404	0.9557					
NH ₄	4.19	1.1305	2.4892	0.9158	ln(NH ₄)	0.88	-0.8191	0.1634	0.9276
NO ₂	2.51	1.1721	1.5068	0.9034	ln(NO ₂)	0.79	-0.6058	0.4052	0.9694
NO ₃	100.38	0.8650	1.5609	0.9476	ln(NO ₃)	0.64	-0.8424	0.3805	0.9316
PO ₄	13.21	3.0751	11.9404	0.6810	ln(PO ₄)	1.10	-0.1484	-0.3086	0.9752
Seston	8.86	8.2286	72.1527	0.2874	ln(Seston)	0.58	-0.1663	2.3150	0.9800
Chla	8.62	2.9355	11.1530	0.7229	ln($\sqrt{\text{Chla}}$)	0.48	-1.0964	2.0999	0.9142
Pheoa	132.47	2.7004	6.5519	0.5501	ln(Pheoa)	1.53	-0.0455	-0.1060	0.9363

S.D.: Standard Deviation.

Abbreviations of parameters are in Table 1.

Table 5. Result of multiple regression with transformed parameters.

dependent variable	parameter estimates of independent variable									
	ln(Temp)	DO	ln(NH ₄)	ln(NO ₂)	ln(NO ₃)	ln(PO ₄)	ln(Seston)	ln($\sqrt{\text{Chla}}$)	ln(Pheoa)	Constant
ln(AODC)	0.1743	-0.0432			-0.3276	-0.0226		0.4816	-0.2465	4.3351
ln(Biovol)	0.1344	-0.0309	0.3104	0.0993				0.2480		3.5165
ln(Biomass)	0.1657	-0.0456	0.0994		-0.3166			0.2636	-0.1327	4.2837
ln(Mbiovol)			0.1749	-0.0594			-0.0439		0.1583	1.3464
ln(Bac-Pro)		0.2223		0.4372	-0.4056	-0.5969	0.1797	1.4620	-0.7859	0.7911
ln(Double)		-0.2575	0.0557	-0.3542		0.5644	-0.3343		0.1868	8.7175

Abbreviations of parameters are in Table 1.

상관관계를 나타내었고, 총 세균 체적은 질산염 및 seston 과 음의 상관관계를 보였다.

Table 2에서 알 수 있듯이 각 요인들의 변이가 크고 정규성으로부터의 편차가 크므로 회귀식을 결정하기 위하여 변수들을 Table 4와 같이 정규 분포에 가깝도록 변환하였다. 용존산소량과 엽록소 a를 제외한 모든 변수들을 natural logarithm 값으로 변환하였고 엽록소 a는 평방근의 natural logarithm으로 변환하였다. 변수 변환결과 대부분의 변수들이 90% 이상의 정규도와 표준편차 0, 왜도 및 첨도 0의 주변으로 수렴되었다.

변환된 변수요인들에 의해 각 요인간의 적절한 중회귀식을 구하였으며 (Table 5), 분산 분석결과 각 중회귀 모델의 검정유의 수준은 99% 이상으로 0.6292에서 0.8015 사이의 결정계수 (R²)를 보였다 (Table 6).

중회귀식으로부터 대부분의 환경요인들이 미생물학적 요인들에 영향을 미치는 것을 알 수 있었으며 특히 세균 생산량과 엽록소 a 사이의 관계가 계수량의 절대값 1 이상으로 상대적으로 높은 영향을, 용존산소량과 부유물질량 및 pheophytin a의 농도가 다양하게 영향을 미치는 것을 관찰할 수 있

Table 6. Analysis of Variance (ANOVA) for each regression model.

dependent variable of model	F value	prob.>F	Root MSE	R-square
ln(AODC)	7.176	0.0007	0.9097	0.7339
ln(Biovol)	7.146	0.0007	0.2744	0.6528
ln(Biomass)	5.091	0.0032	0.2201	0.6292
ln(Mbiovol)	10.775	0.0001	0.1876	0.6830
ln(Bac-Pro)	9.710	0.0001	0.5873	0.7999
ln(Double)	8.602	0.0002	0.5959	0.7414

MSE: Mean squared error.

prob.>F: significant probability.

Abbreviations of parameters are in Table 1.

었다. 이러한 사실들은 Table 3의 상관관계 결과와도 일정 정도 일치한다. 전반적으로 총 세균수 및 총 세균 체적 등의 증가요인들은 수온과 엽록소 a의 양, 암모니아염의 증가와 pheophytin a 양의 감소로 설명되어지며, 세균 2차 생산량의 증가요

인은 산소와 아질산염, 엽록소 a 양의 증가와 질산염 및 암모니아염, pheophytin a의 감소로 설명되어질 수 있다. 세균의 doubling time의 증가요인은 용존산소와 아질산염, seston 양의 감소와 인산염, pheophytin a의 증가로 설명할 수 있으며 이러한 사실은 세균 생산량의 증가요인과 반대의 경향이며, 동일한 요인들로 세균 생산력이 증가될 때 분열 시간의 감소, 즉 세균 활성도의 증가가 동시에 나타남을 알 수 있다.

고 찰

소양호는 수지형 인공호로서 체류시간이 길고 지역 및 깊이마다 수괴의 특성이 다양하게 변화하며 동절기 동안에는 수온 약층의 파괴로 수괴의 혼합이 일어나는 특징을 가지고 있다(조 등, 1987; 김 등, 1985).

이러한 대상지역의 특성이 각 요인들의 일변량 통계량들이 커다란 변이를 나타내는 주된 이유이

Table 7. Spearman rank correlation coefficient between physico-chemical factors and microbiological parameters at site 4 in Soyang Reservoir. Number of observations are given in parentheses and all values are significant at $P < 0.05$.

	AODC	Biovol	Biomass	Mbiovol	Bac-Pro	Double	Sapro	%sapro
Temp	0.61* (19)	0.64* (19)	0.57 (19)					
DO	-0.73* (17)	-0.77* (17)	-0.71* (17)					
NH ₄		0.49 (19)						
NO ₂		0.45 (20)						
NO ₃	0.56 (20)	0.66* (20)	0.51 (20)					
PO ₄	0.82* (17)	0.76* (17)			-0.47 (17)			
Seston					0.66* (19)			
Chl a					0.59* (20)			
Pheo a		-0.46 (19)			0.52 (19)			

*: Significant at $P < 0.01$.

Abbreviations of parameters are in Table 1.

며 (Table 2), 통계적 분석에 있어서의 정밀성 감소의 요인으로 작용한다. 정점 4는 연중 조류의 대발생이 빈번하게 일어나는 지역으로서 1차 생산에 있어서의 제한요인으로 작용하는 인산염의 공급에 의한 식물성 플랑크톤의 번식과 이에 따른 엽록소 a 등의 요인들이 세균 생물량 및 생산량 증가에 영향을 미치고 이러한 현상이 표층수의 계절에 따른 큰 폭의 변화와 함께 작용, 전체 통계량의 변이에 또한 영향을 주는 것으로 보여진다. 이러한 사실은 정점 4에서 측정된 값들만으로 상관관계 분석을 수행한 결과인 Table 7로부터 알 수 있다. 즉, 전체 정점에서 발견되지 않았던 인산염과 기타 영양 염류와의 상관관계가 정점 4로부터 관찰되었으며 세균 생산량과 seston 이외에 세균 생산량과 엽록소 a, pheophytin a 사이의 상관관계도 관찰되어 전체 조사대상지역 중 다른 지역에 비하여 볼 때 독특한 생태학적 현상이 진행되고 있음을 알 수 있다.

수온과 미생물학적인 요인들이 밀접한 상관관계를 보이는 것은 일반적으로 관찰되는 현상으로 (Väätänen, 1980c; Chrzanowski *et al.*, 1988) 이는 미생물의 enzyme activity 등 생리적 활성도에 영향을 주어 전반적인 세균 군집의 특성을 조절하게 된다. seston 과 pheophytin 의 미생물학적 요인과의 높은 상관성은 미생물이 영양 공급원으로서 부유성 유기물질 등을 이용함으로써 나타나는 결과로 보인다.

총 세균수와 세균 체적, 세균 생물량이 엽록소 a 나 pheophytin a 와 상관관계를 보이면서도, ^3H -thymidine incorporation rate 방법에 의해 측정된 세균 생산량이 엽록소 a 및 pheophytin a 와 상관관계를 나타내지 않고 seston 과 상관관계를 보인 것은 소양호에서의 세균 군집의 활성이 식물성 플랑크톤으로부터 유출된 유기물에 의해 빠르고 직접적인 영향을 받기보다는, 지속적인 상태로 공급되어 지는 탄소원으로서의 식물성 플랑크톤의 영향을 받는 것으로 사료되어진다. 이러한 사실은 빈 영양상태인 소양호의 경우에 식물성 플랑크톤으로부터 제공되어지는 유기물이 세균 군집이 이용하기 쉬운 용존유기물 (DOM) 이기 보다는 다양한 POM (Particulated Organic Material) 의 형태임을 시사하여주며 (Lancelot and Billen, 1985),

이러한 POM 이 지속적인 세균 군집의 활성유지에 크게 기여하는 것으로 보인다 (Mcknight *et al.*, 1988). 세균과 식물성 플랑크톤과의 관계를 밝히기 위하여 소양호에서 식물성 플랑크톤의 blooming 이 일어난 시기에 측정된 algal exudate 에 의한 세균 생산량은 총 세균 생산량의 34.9% 를 차지하였는데 (unpublished data), 이는 위의 사실을 뒷받침한다.

Table 3에서 인산염의 농도가 미생물 요인들과 특정한 상관관계를 보여주지 못하는 결과는 인이 소양호 수계에서 1차 생산에 가장 중요한 제한요인으로 작용한다는 보고에 비추어 볼 때 (김, 1987), 인이 연중 낮은 농도로 존재하여 미생물학적인 요인들에게 큰 영향을 미치지 못하는 까닭으로 추정되며, 연중 빈번한 식물성 플랑크톤의 대발생이 일어나는 지역인 정점 4에서 인과의 상관관계가 발견된 결과 (Table 7)가 이를 뒷받침하여 준다.

총 세균수와 세균 생물량의 증가는 수온 (회귀계수 = $+0.1344 \sim +0.1743$) 과 더불어 식물성 플랑크톤 (회귀계수 = $+0.2480 \sim +1.4620$) 의 1차 생산에 의존하는 것으로 회귀식의 결과 나타났는데 (Table 5), 이러한 미생물 활성의 증가결과가 다량의 질산염을 소비 (회귀계수 = $+0.3166 \sim -0.4650$) 하여 암모니아염의 농도증가 (회귀계수 = $+0.0994 \sim +0.3104$) 를 유발시킴을 알 수 있다 (Wheeler & Kirchman, 1986; Suttle & Harrison, 1988; Johnstone & Jones, 1988).

엽록소 a 의 증가요인과 pheophytin a 의 감소요인이 같은 회귀식에서 발견되는 것은 엽록소 a 와 pheophytin a 의 비율이 식물성 플랑크톤의 생리적 활성도를 나타내는 지표로 사용될 수 있음에 미루어 볼 때 (APHA-AWWA-WPCE, 1985), 식물성 플랑크톤이 생리적으로 호조건에 있을 때 세균 군집에 영향을 나타낸 결과로 사료되어지며, 그 증거로서 다른 미생물학적 요인들도 엽록소 a 와 pheophytin a 의 현존량에 영향을 받고 있음을 회귀 분석의 식으로부터 알 수 있다. 이러한 사실은 direct count 된 세균 농도와 식물성 플랑크톤의 엽록소 a 사이에 높은 상관관계가 존재한다는 보고와 일치한다 (Goulder, 1986).

이상의 결과에서 볼 때, 소양호 수중생태계에서

의 세균 체적과 생물량의 변화는 물리화학적인 환경요인의 변화와 높은 상관을 보인다. 특히 식물성 플랑크톤의 활성과 관련된 엽록소 a 나 pheophytin a 와 함께 seston 의 농도 변화에 의해

큰 영향을 받고 있다는 분석결과는 세균의 탄소 및 에너지원으로 이용되는 수중 유기물의 농도 및 종류에 의해 수중 세균의 체적과 생물량이 크게 제한되고 있음을 시사하여 준다.

적 요

소양호에서 측정된 세균 체적, 세균 생물량 및 세균 생산량 등의 미생물학적인 요인의 변화에 미치는 물리화학적 환경요인의 영향을 통계학적 방법으로 분석을 하였다. 상관관계 분석과 중회귀 분석 결과 수온은 대부분의 미생물학적 요인에 폭넓은 영향을 미침을 알 수 있었다. 총 세균수, 세균 체적, 세균 생물량 및 saprophyte 수의 변화는 엽록소 a 와 pheophytin a 의 존재와 높은 상관관계를, ³H-thymidine incorporation rate 에 의해 측정된 세균 생산량은 seston 의 농도에 큰 영향을 받는 것으로 분석되었다. 소양호 수중생태계에서의 세균 체적 및 세균 생물량의 미생물학적 요인은 미생물 군집에게 탄소와 에너지원으로 작용하는 유기물질의 제공원인 식물성 플랑크톤의 분포와 seston 의 농도에 의해 조절되고 있음을 시사하여 준다.

사 사

본 연구는 1988년도 서울대학교 대우 학술연구비 지원에 의해 수행되었음.

참고문헌

1. 김범철, 1987. 소양호 식물 플랑크톤의 생태학적 연구, 박사학위 논문, 서울대학교 해양학과.
2. 김범철, 조규송, 안태석, 1985. 소양호의 일차생산 및 환경요인의 수평적 변이, 한국육수학회지, **18**, 1-10.
3. 조규송, 안태석, 김범철, 이동훈, 1987. Cluster analysis 에 의한 소양호의 수체 분석, 한국육수학회지, **20**, 161-169.
4. 허명희, 1986. SAS 회귀 분석. 자유아카데미, 서울.
5. Albright, L.J. and S.K. McCrase. 1987. Annual cycle of bacterial specific biovolume in Howe Sound; a Canadian west coast fjord sound. *Appl. Environ. Microbiol.* **53**: 2739-2744.
6. APHA-AWWA-WPCE. 1985. Standard methods for the examination of water and wastewater. 16th ed. AWWA. Dencer Co.
7. Chrzanowski, T.H., R.D. Crotty and G.J. Hubbard. 1988. Seasonal variation in cell volume of epilimnetic bacteria. *Microb. Ecol.* **16**: 155-163.
8. Fhalich, H.L. 1985. The position of bacteria and their products in food weds. *In: Bacteria in nature*, vol.1 E.R. Leadbetter & J.S. Poin-dexter (ed.). Plenum Press, N.Y.
9. Fenchel, T. 1986. The ecology of heterotrophic microflagellates. *In: advances in microbial ecology*. K.C. Marshall (ed.). **9**: 57-97.
10. Johnson, B.H. and R.D. Jones. 1988. Physiological effects of long-term energy source deprivation on the survival of a marine chemolithotrophic ammonium-oxidizing bacterium. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **49**: 295-303.
11. Goulder, R. 1986. Seasonal variation in the abundance and heterotrophic activity of suspended bacteria in two lowland rivers. *Freshwater Biol.* **16**: 21-37.
12. Keller, A.A. 1989. Modelling the effects of temperature, light and nutrients on primary productivity: An empericaland a mechanistic approach compared. *Limnol. Oceanor.* **34**: 82-95.
13. Lancelot, C and G. Billen. 1985. Carbon-nitrogen relationships in nutrient metabolism of coastal marine ecosystems. *In: Advances in aquatic microbiology*, Vol.3. H.W. Jannasch & P.J. Williams ed. p 263-321. Academic Press. London.
14. Mcknight, D.M., K.A. Thorn and R.L. Wer-shaw. 1988. Repid changes in dissolved humic

- substances in Spirt Lake and south Fork Castle Lake. Washington. *Limnol. Oceanogr.* **33**: 1527-1541.
15. Pedros-Alio, C., E. Montesinos and R. Guerrero. 1983. Factors determining annual changes in bacterial photosynthetic pigments in holomictic lake Ciso, Spain. *Appl. Environ. Microbiol.* **46**: 999-1006.
 16. SAS/STAT Guide for personal computers. 1985. Version 6 edition. SAS Institute.
 17. Scavia, T. 1988. On the role of bacteria in secondary production. *Limnol. Oceanogr.* **33**: 1220-1224.
 18. Sherr, E. and B. Sherr. 1988. Role of microbes in pelagic food webs: A revised concept. *Limnol. Oceanogr.* **33**: 225-227.
 19. Sokal, R.R. and F.J. Rohlf. 1981. Biometry. 2nd ed. Freeman, N.Y.
 20. Suttle, C.A. and P.J. Harrison. 1988. Ammonium and phosphate uptake kinetics of size-fractionated plankton from an oligotrophic freshwater lake. *J. Plankton Res.* **10**: 133-149.
 21. Turner, J.F., P.A. Tester and R.L. Ferguson. 1988. The marine cladoceran *Penilia avirostris* and the "microbial loop" of pelagic food webs. *Limnol. Oceanogr.* **33**: 245-255.
 22. Väätänen, P. 1980a. Effects of environmental factors on the microbial populations in brackish waters off the southern coast of Finland. *Appl. Environ. Microbiol.* **40**: 48-54.
 23. Väätänen, P. 1980b. Factor analysis of the impact of the environment on microbial communities in the Tvarmine area, Southern coast of Finland. *Appl. Environ. Microbiol.* **40**: 55-61.
 24. Väätänen, P. 1980c. Microbial parameters for differentiating between coastal and open waters in the northern Baltic Proper and the Gulf of Finland. *J. Appl. Bacteriol.* **49**: 455-462.
 25. Watson, S.W., J.T. Novitsky, H.L. Quindy and F.W. Valios. 1977. Determination of bacterial number and biomass in the marine environment. *Appl. Environ. Microbiol.* **33**: 940-946.
 26. Wheeler, P.A. and D.L. Kirchman. 1986. Utilization of inorganic nitrogen by bacteria in marine systems. *Limnol. Oceanogr.* **31**: 998-1009.

(Received May 26, 1989)