Korean J. Limnol. 37 (1) : 26~35 (2004)

회야댐 저수지에서 물리·화학적 환경요인에 따른 식물플랑크톤과 세균 군집의 변화

김대균 · 최애란[1] · 이혜경[1] · 권오섭[1] · 김종설*

(울산대학교 화학·생명과학부, [1]인제대학교 환경시스템학부)

Community Dynamics of Phytoplankton and Bacteria as Affected by Physicochemical Environmental factors in Hoeya Dam Reservoir. ***Kim, Dae-Kyun, Ae-Ran Choi[1], Hye-Kyeong Lee[1], O-Seob Kwon[1] and Jongseol Kim* (Department of Biological Sciences, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea, [1]School of Environmental Science & Engineering, Inje University, Kimhae 621-749, Korea)***

We investigated the effect of physicochemical environmental factors on the community dynamics of phytoplanktons and bacteria at the Hoeya Dam Reservoir, a drinking water reservoir for Ulsan city. Water samples were collected and analyzed every two to four weeks at three sites along the reservoir from April to October, 2001. During the study period, the Secchi depths were between 0.4 and 3.5 m. At the surface layer of water column, temperature ranged 10.2~32.0°C, pH 7.3~9.6, dissolved oxygen 5.5~12.4 mg L^{-1}, BOD_5 0.8~5.0 mg L^{-1}, COD_{Mn} 3.7~10.0 mg L^{-1}, and Chl-*a* 8.9~60.9 mg m^{-3}. At the bottom layer, temperature varied 7.2~28.9°C, pH 7.1~9.3, dissolved oxygen 0.6~9.7 mg L^{-1}, BOD_5 0.8~4.5 mg L^{-1}, COD_{Mn} 3.9~10.0 mg L^{-1}, and Chl-*a* 4.3~81.9 mg m^{-3}. The numbers of phytoplanktons were 7.4×10^2~2.6×10^5 cells mL^{-1} at surface and 2.5×10^2~2.4×10^4 cells mL^{-1} at bottom, and were positively correlated with water temperature and Chl-*a* concentration. Genus *Stephanodiscus* and genus *Oscillatoria* dominated on April and on May, respectively. Cyanobacterial blooms of *Aphanizomenon, Microcystis, Anabaena* were observed from June to early September, and thereafter *Stephanodiscus* and *Aulacoseira* dominated again. Total microbial counts ranged 1.73×10^4~1.68×10^5 cells mL^{-1}, and were positively correlated with water temperature and phytoplankton counts at surface water. Heterotrophic plate counts (HPCs) ranged 30~4.1×10^3 CFU mL^{-1}, and were positively correlated with BOD_5 and NO_3^--N concentration at bottom water. Unlike the total microbial counts, the numbers of fecal coliforms and fecal streptococci as well as HPCs were higher at the bottom than the surface layer and were highest at the upper a site among the three sampling sites. Since the concentrations of fecal coliforms and streptococci were still high at the bottom of site c, where intake for water treatment plant is located, it appeared that special management of water treatment processes may be needed especially after strong rainfall.

Key words : phytoplankton, bacterial community, water quality, Hoeya Dam Reservoir

* Corresponding author: Tel: 052) 259-2387, Fax: 052) 259-1694, E-mail: jkim@mail.ulsan.ac.kr

서 론

회야댐 저수지는 유역면적 127 km^2, 총저수량 21,530,000 m^3, 유효저수량 17,700,000 m^3인 인공호로 하루 120,000 m^3의 생활용수를 공급하는 울산의 주상수원이다(울산광역시, 2002). 회야댐 저수지의 물은 회야강으로 유입되는 물과 낙동강의 원동취수장에서 취수되어 관로와 터널을 통해 공급되는 물로 이루어지는데, 저수지 상류지역의 개발과 낙동강 유입수의 수질 악화는 상수원의 수질에 직접 영향을 미치고 있다. 이의 대책으로 상류지역에 하수처리장을 건설하여 처리수를 댐 하류로 방류하고 있으나 비점오염원에 의한 영향과 갈수기 하천 유지용수의 부족에 따른 수질저하는 여전히 문제로 남으며, 낙동강 유입수를 또 다른 점오염원으로 볼 때 이에 대한 대책도 제한적이다. 회야댐 저수지는 이미 부영양 상태로 평가되고 있으며(이 등, 1996), 이에 따른 내부 자생 유기물 생산량의 증가가 수질에 나쁜 영향을 미칠 수 있다.

수환경에서 종속영양세균의 생장과 번성은 이용가능한 유기물과 무기영양물질의 농도, 온도 및 자외선과 같은 환경인자, 그리고 동물플랑크톤에 의한 포식 등에 의해 영향을 받는다(Wetzel, 2001). 오염물질이 호수 생태계로 지속적으로 유입되어 부영양화가 진행되면 1차 생산이 증가하며 식물플랑크톤의 대발생이 나타나기도 한다. 식물플랑크톤에 의해 생성된 유기물의 일부는 세포외로의 분비나 자가분해 등에 의해 용존 유기탄소로 유리되는데, 이 농도는 식물플랑크톤의 종조성 및 현존량과 관계가 깊다(Fogg, 1983; Fukushima *et al*., 1996). 유리된 용존 유기탄소는 종속영양세균에 의해 동화되어 동물플랑크톤에 의해 다시 섭식의 먹이연쇄로 돌아가는데, 이러한 microbial loop은 수생태계의 미생물먹이망에서 중요한 경로로 인식되고 있다(Azam *et al*., 1983; Cole *et al*., 1988).

국내의 담수환경에서 환경요인이나 식물플랑크톤의 변화에 따른 세균수 및 세균군집의 변동에 관한 많은 연구결과가 발표되고 있다(김 등, 1995; 김과 이, 1998; 김 등, 2000; 신 등, 2001; 빙 등, 2002; 홍 등, 2002). 하지만 대부분의 연구가 팔당호, 대청호, 소양호, 낙동강하구를 대상으로 하고 있으며, 생활용수를 공급하는 중소규모의 댐 저수지에서 식물플랑크톤의 종조성과 현존량 변화에 따른 종속영양세균의 동태에 관한 연구는 드물다. 호수의 규모와 특징에 따라 생물상의 변화는 차이가 있으므로 호수별로 독자적인 연구가 행해져야 하며, 또한 부영양화한 상수원의 경우 식물플랑크톤과 세균 군집의 증식에 따른 세균학적 수질의 변화에 대한 면밀한 조사가 효율적인 수질관리를 위해 꼭 필요하다. 따라서 본 연구에서는 회야강 유입수 외에 낙동강 원수가 같이 저수되는 독특한 수환경의 회야댐 저수지에서 물리·화학적 환경요인과 식물플랑크톤의 변동에 따른 세균 군집과 수질의 변화를 파악하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 조사지점

시료는 회야강 유입지점(a 지점), 낙동강 유입수 합류지점(b 지점), 및 취수탑(c 지점) 등 3개 조사지점에서, 2001년 4월부터 10월까지 2~4주 간격으로 표층수와 저층수를 구분하여 Van Dorn water sampler로 채수하였다(Fig. 1). 표층은 각 지점의 수심 0.3 m에서, 저층은 저질로부터 약 0.5 m 높은 수심에서 채수하였다. 조사기간의 평균 수심은 a 지점 5.5 m, b 지점 6.9 m, c 지점 14.8 m이었다(Table 1).

세균학적 수질분석을 위한 시료는 빛을 차단시킨 멸균된 유리병에 채수하였으며, 총 세균수 측정을 위한 시료는 현장에서 formalin을 첨가하여(1%, v/v) 고정하였다. 식물플랑크톤 분석을 위한 시료는 현장에서 Lugol 용액으로 고정하였으며, 출현 *Microcystis*의 종조성 분석을 위한 시료는 식물플랑크톤 net를 이용하여 채취한 후 현장에서 4%(v/v) 중성 formaldehyde 용액으로 고정하였다. 모든 시료는 냉장상태를 유지하면서 실험실로 운반하였다.

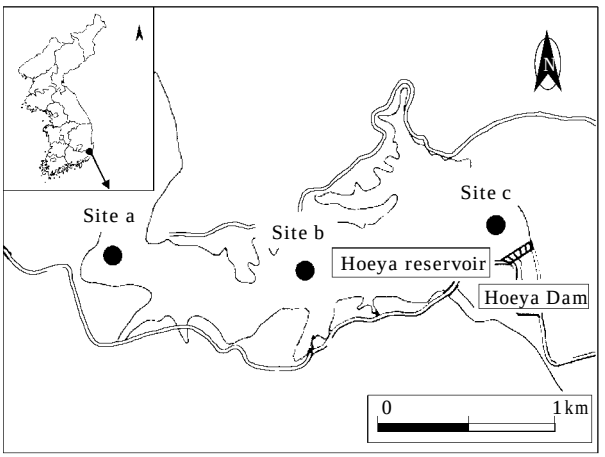

Fig. 1. Map showing the sampling sites at Hoeya Dam Reservoir.

Table 1. Average, maximum, and minimum values of physicochemical environmental parameters at Hoeya Dam Reservoir from April to October, 2001.

Parameters		Average±S.D. (Min./Max.)			
		Site a	Site b	Site c	Overall
Water temperature (°C)	S	23.3±6.0(11.4/30.3)	22.7±5.9(10.2/29.8)	22.6±6.4(10.8/32.0)	22.8±5.9
	B	21.1±5.9(9.8/27.9)	21.4±6.1(10.0/28.9)	20.1±6.1(7.2/27.9)	20.9±5.8
DO (mg L^{-1})	S	10.0±1.7(6.7/12.4)	9.0±1.7(6.3/11.4)	8.3±2.0(5.5/11.7)	9.1±1.9
	B	6.6±2.1(2.9/9.7)	6.3±2.0(3.8/9.5)	5.0±2.2(0.6/7.5)	6.0±2.2
Transparency (m)		1.1±0.9(0.4/3.5)	1.0±0.7(0.7/3.0)	1.0±0.5(0.5/2.2)	1.0±0.7
Water depth (m)		5.5±1.5(4.0/8.3)	6.9±3.5(3.5/14.7)	14.8±2.2(12.0/19.0)	9.1±4.8
pH	S	8.8±0.7(7.7/9.5)	8.5±0.7(7.6/9.4)	8.1±0.8(7.3/9.6)	8.5±0.8
	B	7.9±0.7(7.2/9.3)	7.6±0.5(7.2/8.7)	7.5±0.3(7.1/8.1)	7.7±0.5
SS (mg L^{-1})	S	10.2±6.4(4.1/22.8)	8.7±3.0(3.3/12.8)	8.4±3.0(4.1/13.3)	9.1±4.3
	B	38.7±32.0(12.8/101.0)	19.9±22.7(5.0/78.0)	11.6±4.9(3.2/20.5)	23.5±24.9
BOD_5 (mg L^{-1})	S	2.2±1.1(1.0/4.2)	2.0±0.8(1.1/3.5)	2.2±1.6(0.8/5.0)	2.1±1.2
	B	2.2±0.8(1.7/4.3)	1.4±0.5(0.8/2.1)	1.9±1.2(0.9/4.5)	1.8±0.9
COD_{Mn} (mg L^{-1})	S	7.5±1.6(5.2/10.0)	5.5±1.1(4.3/7.6)	5.8±1.8(3.7/9.0)	6.2±1.7
	B	6.7±1.5(5.0/10.0)	5.4±0.6(4.4/6.3)	5.0±0.7(3.9/6.0)	5.7±1.3
Chl-*a* (mg m^{-3})	S	33.1±14.1(17.9/60.9)	22.0±4.0(16.5/30.2)	19.4±9.8(8.9/42.2)	24.8±11.5
	B	32.5±20.8(8.1/81.9)	12.9±5.7(6.3/22.0)	12.2±5.2(4.3/21.3)	19.4±15.8
NH_3-N (μg L^{-1})	S	73±79(12/269)	84±101(13/291)	103±100(10/299)	86±92
	B	234±199(30/568)	201±189(15/590)	314±278(51/954)	251±224
NO_2^--N (μg L^{-1})	S	53±26(0/90)	64±36(19/137)	77±51(23/181)	64±39
	B	66±27(12/99)	75±40(19/142)	105±70(24/223)	82±50
NO_3^--N (mg L^{-1})	S	1.1±0.6(0.2/2.1)	1.5±0.7(0.7/2.9)	1.3±0.5(0.6/2.2)	1.3±0.6
	B	1.4±0.5(0.8/2.3)	1.4±0.5(0.5/2.0)	1.2±0.4(0.5/1.9)	1.3±0.5

S: surface water; B: bottom water

2. 물리 · 화학적 환경요인 분석

수온, 용존산소(DO), 투명도는 각각 온도계, DO meter (YSI, model 54A), 그리고 Secchi 원판을 사용하여 현장에서 측정하였다. pH, 부유물질(SS), 생물화학적 산소요구량(BOD_5), 아질산성 질소(NO_2^--N)는 시료를 실험실로 운반 후 즉시 측정하였다. 화학적 산소요구량(COD_{Mn}), 암모니아성 질소(NH_3-N), 질산성 질소(NO_3^--N), 엽록소 *a* (Chl-*a*), 총 인, 인산염 인, 총 유기탄소, 용존유기탄소의 분석은 48시간 내에 완료하였으며, 시료는 GF/C filter로 여과하여 4°C에서 보관하였다. 모든 측정항목은 환경부 수질오염공정시험방법과 APHA에 의거하여 분석하였다 (환경부, 2000; APHA, 1995). 총 인, 인산염 인, 총 유기탄소, 용존유기탄소의 경우 8월 이후의 시료에서만 유효한 측정값을 얻었다.

3. 식물플랑크톤 분석

침강시켜 농축한 시료를 1 mL 용량의 Sedgwick-Rafter chamber에 골고루 분산시킨 뒤 도립 현미경(Olympus, model CK2)으로 계수하였으며, 군체의 경우 군체당 평균 세포수를 측정한 후 군체의 수를 곱하여 개체수를 구하였다. 출현한 식물플랑크톤의 동정은 담수조류도감을 참고하였고(정, 1968; 정, 1993), *Microcystis*속은 cell diameter, colony condition에 근거하여 형태 분류하였다 (Watanabe, 1996; Lee *et al*., 1997).

각 조사지점에서의 다양성 지수와 우점도 지수는, 출현한 식물플랑크톤 속의 세포수 현존량에 기초하여 Quantan program을 사용하여 구하였다(Simpson, 1949; Shannon and Weaver, 1963).

4. 세균학적 분석

총 세균수는 현장에서 formalin으로 고정한 시료 2 mL을 polycarbonate membrane filter (pore size 0.2 μm, diameter 25 mm, Nuclepore co.)로 여과하고 1% acridine orange 2 mL로 2분간 염색한 후 형광현미경(Carl Zeiss, JENA 2-FL)으로 1,000× 배율에서 관찰하였다(Hobbie

et al., 1977). 일반세균은 희석한 시료를 표준한천배지(plate count agar)에 도말평판법과 혼합평판법으로 접종하여 35°C에서 48시간 배양한 후 계수하였다(APHA, 1995). 대장균군과 분원성 대장균군의 수는 5-시험관 최적확수(MPN) 시험법으로 측정하였으며, 확정시험은 각각 brilliant green lactose bile 액체배지(BGLB, Merck co.)와 EC 배지(Difco co.)를 사용하였다(APHA, 1995). 분원성 연쇄상구균은 시료별로 azide dextrose 액체배지(Merck co.)가 들어있는 5개의 삼각플라스크에 시료 50 mL을 접종하여 35°C에서 48시간 배양한 후, 생장이 확인된 배양액을 bile esculin azide 한천배지(Merck co.)에 획선 이식하여 갈색의 테두리가 있는 흑갈색의 집락이 형성되었을 경우 양성으로 판별하였다(환경부, 2002).

5. 상관분석

회야댐 저수지에서 물리·화학적 환경요인, 식물플랑크톤 개체수, 세균수 사이의 상호 관계를 파악하기 위해 Windows 용 SPSS v.10.0을 사용하여 Spearman의 순위상관계수(r_s)를 구하였다.

결과 및 고찰

1. 물리·화학적 환경요인

회야댐 저수지에서 조사기간 동안 측정한 물리·화학적 환경요인의 평균값, 최대값 및 최소값을 Table 1에, 환경요인간의 상관계수는 Table 2에 요약하였다. 수온의 평균값은 표층이 22.8°C, 저층이 20.9°C로 표층이 저층보다 높았으며, 8월 6일 c 지점의 표층에서 32.0°C로 최고치를, 4월 3일 동일지점의 저층에서 7.2°C로 최저치를 보였다. a 지점은 9.8～30.3°C, b 지점 10.0～29.8°C, c 지점 7.2～32.0°C의 범위였으며, 조사지점에 따른 표층의 수온 차이는 미미하였다. 용존산소는 a, b, c의 세 지점에서 각각 2.9～12.4 mg L^{-1}, 3.8～11.4 mg L^{-1}, 그리고 0.6～11.7 mg L^{-1}의 범위였고, 5월 7일 a 지점의 표층에서 12.4 mg L^{-1}로 최고치를, 8월 6일 c 지점의 저층에서 0.6 mg L^{-1}로 최저치를 기록하였다. 대체로 상류인 a 지점이 다른 두 지점보다 높았고, 동일지점에서는 표층이 저층보다 높았다. 세 지점 a, b, c에서 측정한 투명도의 평균값은 각각 1.1 m, 1.0 m, 1.0 m이었고, 전일 많은 비가 내린 8월 6일을 제외하고는 모두 1.1 m 이하로 매우 낮았다. 조사기간 동안 세 조사지점의 pH 평균값은 표층 8.5, 저층 7.7로 표층이 저층보다 높았으며, pH는 표층과 저층에서 용존산소와 양의 상관관계를, 저층에서는 수온과 음의 상관관계를 나타내었다. 부유물질의 평균 농도는 표층이 9.1 mg L^{-1}, 저층이 23.5 mg L^{-1}로 저층이 표층보다 높았으며, 회야강이 유입되는 a 지점의 저층이 다른 두 지점보다 특히 높았는데, 이는 강물의 부유물질이 주로 저층으로 유입됨을 보여준다. 세 조사지점의 BOD_5 평균값은 표층이 2.1 mg L^{-1}, 저층이 1.8 mg L^{-1}이었고, COD_{Mn}은 표층이 6.2 mg L^{-1}, 저층이 5.7 mg L^{-1}로, COD_{Mn}이 BOD_5보다 평균 3배 정도 높았으며, BOD_5와 COD_{Mn} 측정값의 상관계수는 표층과 저층에서 각각 0.42 ($p < 0.05$, $N = 30$)와 0.41 ($p < 0.05$, $N = 29$)이었다. 표층 BOD_5와 표층 COD_{Mn}는 표층 용존산소 및 표층 pH와 양의 상관관계를, 저층 BOD_5와 저층 COD_{Mn}는 저층 부유물질과 양의 상관관계를 보였다. 식물플랑크톤의 현존량을 반영하는 엽록소 *a*의 농도는, b와 c 지점에서는 표층이 저층보다 높았으나 수심이 가장 얕은 a 지점에서는 표층과 저층이 비슷하였고, 조사지점별로는 a 지점에서 가장 높았다. 표층에서 엽록소 *a*는 용존산소, pH, BOD_5, COD_{Mn}과 양의 상관관계를 나타내었고, 저층에서는 용존산소, pH, 부유물질과 양의 상관관계가 있었다. 세 지점에서 암모니아성 질소의 평균 농도는 표층이 86 μg L^{-1}, 저층이 251 μg L^{-1}로 저층이 표층보다 높았고, 저층 암모니아성 질소는 용존산소, pH, 엽록소 *a*와 유의성이 있는 음의 상관관계를, BOD_5와는 양의 상관관계를 보였다. 질산성 질소의 평균 농도는 표층과 저층에서 모두 1.3 mg L^{-1}로 측정되었으며, 질산성 질소가 무기질소화합물의 대부분을 차지하였다. 질산성 질소와 암모니아성 질소의 농도 사이에는 유의성이 있는 상관관계가 없었고, 표층 질산성 질소의 농도는 용존산소와 양의 상관관계를 보였고, 저층 질산성 질소는 BOD_5와 양의 상관관계를 보였다. 아질산성 질소의 평균 농도는 표층이 64 μg L^{-1}, 저층이 82 μg L^{-1}로 질산성 질소에 비해 매우 낮았다.

8월부터 측정한 총 인, 인산염 인, 총 유기탄소, 용존유기탄소에 대해 살펴보면, 총 인의 평균 농도는 표층에서 0.025 mg L^{-1}, 저층에서 0.029 mg L^{-1}로 측정되었고, 인산염인은 대부분 검출한계 이하의 값을 보였다. 총 유기탄소의 각 지점별 평균 농도는 a 지점에서 표층 4.1 mg L^{-1}, 저층 3.8 mg L^{-1}, b 지점에서 표층 5.0 mg L^{-1}, 저층 3.3 mg L^{-1}, 그리고 c 지점에서 표층 4.1 mg L^{-1}, 저층 3.8 mg L^{-1}로 측정되었고, 용존유기탄소의 평균 농도는 a 지점의 표층 3.1 mg L^{-1}, 저층 3.2 mg L^{-1}, b 지점의 표층 3.0 mg L^{-1}, 저층 2.9 mg L^{-1}, 그리고 c 지점의 표층과 저층에서 3.4 mg L^{-1}로 나타났다.

조사기간 동안 측정된 회야댐 저수지의 투명도, 엽록소

Table 2. Spearman's rank correlation coefficient between various parameters at Hoeya Dam Reservoir from April to October, 2001.

		DO	pH	SS	BOD_5	COD_{Mn}	Chl-*a*	NH_3	NO_3^-	# P	# C	TMC	HPC
Water temp.	S	−0.45*	−0.24	−0.07	0.11	0.09	0.02	−0.10	−0.42*	0.74**	0.81**	0.56**	−0.16
	B	−0.48**	−0.50**	0.07	−0.12	0.09	−0.05	0.10	−0.36	0.76**	0.74**	0.14	−0.06
DO	S		0.87**	0.28	0.52**	0.55**	0.44*	−0.03	0.42*	−0.21	−0.25	0.17	0.51**
	B		0.78**	0.08	−0.03	−0.33	0.44*	−0.48**	0.04	−0.31	−0.49**	−0.04	0.11
pH	S			0.28	0.57**	0.73**	0.55**	−0.12	0.31	−0.08	−0.07	0.22	0.32
	B			0.06	−0.12	−0.01	0.61**	−0.64**	−0.07	−0.29	−0.54**	−0.30	−0.23
SS	S				0.00	0.23	0.31	−0.33	0.10	0.06	−0.06	−0.08	0.08
	B				0.49**	0.45*	0.62**	−0.03	0.09	0.10	0.06	0.34	0.37*
BOD_5	S					0.42*	0.36*	0.01	0.30	−0.03	0.20	0.37*	0.34
	B					0.41*	0.22	0.42*	0.38*	−0.11	0.02	0.01	0.48**
COD_{Mn}	S						0.53**	−0.01	0.01	0.23	0.23	0.30	0.11
	B						0.30	0.24	0.21	0.19	0.26	0.13	0.01
Chl-*a*	S							−0.03	−0.09	0.25	0.16	0.28	0.20
	B							−0.40*	−0.03	0.15	−0.17	−0.05	0.18
NH_3	S								−0.15	−0.03	0.09	0.16	−0.10
	B								0.32	0.04	0.30	0.24	0.26
NO_3^-	S									−0.31	−0.34	−0.27	0.33
	B									−0.28	−0.14	−0.02	0.51**
# P	S										0.85**	0.55**	−0.01
	B										0.75**	0.13	0.05
# C	S											0.69**	−0.12
	B											0.37*	0.03
TMC	S												0.31
	B												0.20

*: $p < 0.05$; **: $p < 0.01$; N = 30 (S); N = 29 (B)
P: number of phytoplankton; # C: number of cyanobacteria; TMC: total microbial count; HPC: heterotrophic plate count; S: surface water; B: bottom water

a 및 총 인 농도를, 수계의 부영양 정도를 구분하는 Carlson의 지수 및 OECD의 기준치(OECD, 1974; Carlson, 1977)와 비교하였을 때, 상수원 전용으로 사용되는 회야댐 저수지는 부영양 또는 과영양 상태로 평가되었다. 특히 유기물 항목(COD_{Mn})과 부유물질의 경우, 취수탑이 위치한 c 지점에서는 상수원수 3급의 수준이었고 a 지점에서는 다른 두 지점보다 그 농도가 더욱 높았으며(Table 1), 상류로부터의 유입되는 물에 포함된 영양물질이 수질 부영양화에 미치는 영향이 큰 것으로 관찰되었다.

2. 식물플랑크톤

세 조사지점 a, b, c의 표층에서 전체 식물플랑크톤 세포수 현존량은 각각 $2.5 \times 10^3 \sim 1.3 \times 10^5$ cells mL^{-1}, $8.3 \times 10^2 \sim 8.6 \times 10^4$ cells mL^{-1}, 그리고 $7.4 \times 10^2 \sim 2.6 \times 10^5$ cells mL^{-1}의 범위였으며, 평균값은 c 지점이 3.9×10^4 cells mL^{-1}로 가장 높았고, a 지점 3.1×10^4 cells mL^{-1}, b 지점 2.3×10^4 cells mL^{-1}의 순이었다(Fig. 2). 저층의 경우 a 지점이 $2.5 \times 10^3 \sim 2.1 \times 10^4$ cells mL^{-1}, b 지점이 $3.6 \times 10^2 \sim 1.7 \times 10^4$ cells mL^{-1}, 그리고 c 지점이 $2.5 \times 10^2 \sim 2.4 \times 10^4$ cells mL^{-1}의 범위였으며, 평균값은 a 지점 8.7×10^3 cells mL^{-1}, b 지점 6.3×10^3 cells mL^{-1}, 그리고 c 지점이 7.4×10^3 cells mL^{-1}로 표층보다 3.6~5.3배 낮은 수치였다(Fig. 3).

조사기간 동안 회야댐 저수지에 출현한 식물플랑크톤은 총 27속으로, cyanobacteria 5속(*Anabaena, Aphanizomenon, Merismopedia, Microcystis, Oscillatoria*), chrysophyta 10속(*Asterionella, Aulacoseira, Cyclotella, Cymbella, Fragilaria, Melosira, Navicula, Nitzschia, Stephanodiscus, Synedra*), pyrrophyta 2속(*Peridinium, Ceratium*), cryptophyta 1속(*Cryptomonas*), euglenophyta 1속(*Euglena*), 그리고 chlorophyta 8속(*Actinastrum, Ankistrodesmus, Chlamydomonas, Chlorella, Eudorina, Pediastrum, Scenedesmus, Staurastrum*) 등

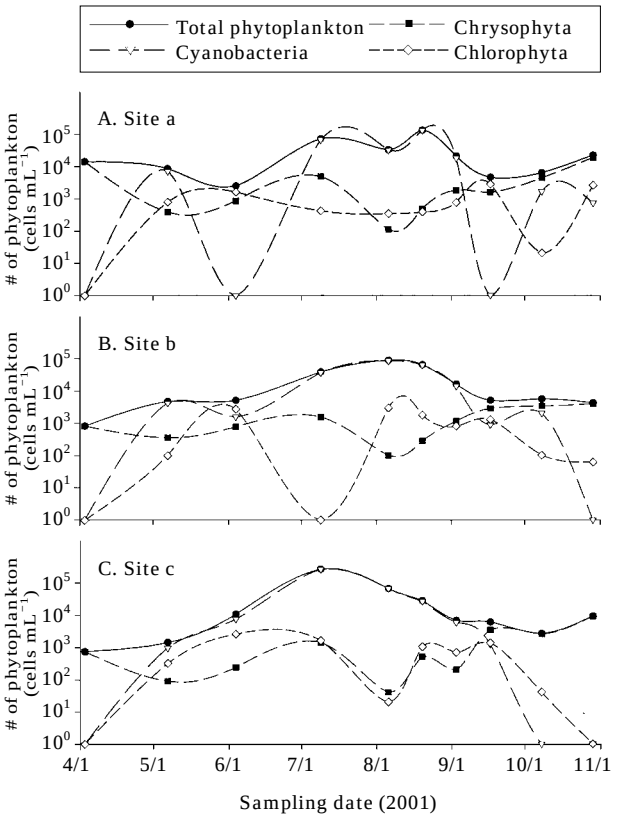

Fig. 2. Dynamics of phytoplankton populations at surface water of Hoeya Dam Reservoir from April to October, 2001.

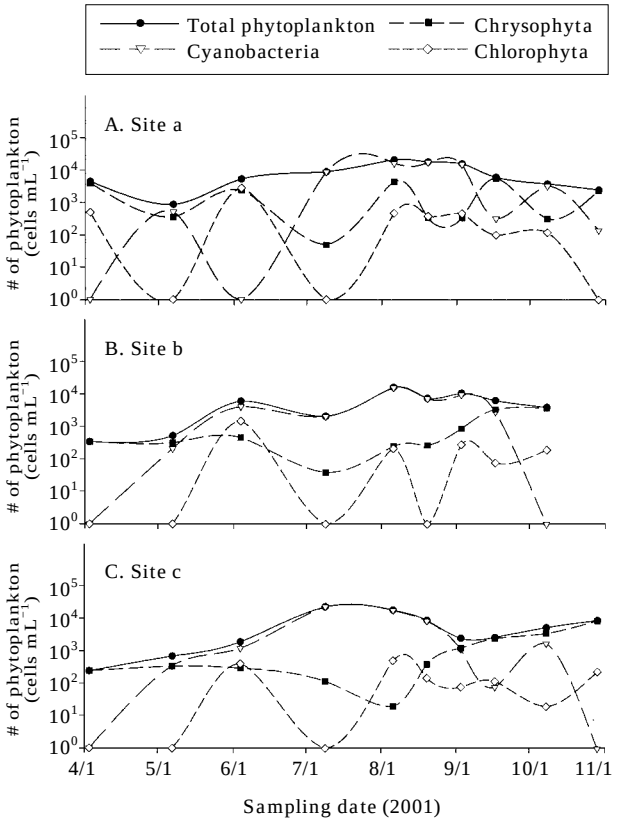

Fig. 3. Dynamics of phytoplankton populations at bottom water of Hoeya Dam Reservoir from April to October, 2001.

이었다. 4월에는 chrysophyta의 *Stephanodiscus*속이 우점하였고, cyanobacteria인 *Oscillatoria*속과 *Aphanizomenon*속이 5월에, 그리고 *Microcystis*속과 *Anabaena*속이 6월에 관찰되기 시작하여, 7월에서 9월 초에 걸쳐 *Aphanizomenon, Microcystis, Anabaena*의 대발생이 관찰되었다. 표층에서 cyanobacteria의 세포수 현존량은 7월에 전체 식물플랑크톤 현존량의 92.5～98.8%, 8월과 9월 초에도 86.5～99.7%를 차지하였고(Fig. 2), 이 기간동안에는 *Aphanizomenon*속이 주로 우점하여 *Microcystis*속이 우점하는 대청호와 차이를 보였다(김 등, 1995). 한편 c 지점의 표층에서는 *Microcystis*속이 6월과 7월에 우점하였는데, 조사기간 동안 microcystin은 검출되지 않았다. 9월 중순에는 다시 chrysophyta의 *Stephanodiscus*속과 chlorophyta의 *Eudorina*속이, 10월에는 chrysophyta의 *Aulacoseira*속이 주로 우점하였다(Fig. 2). 조사지점별 세포수 현존량의 변화양상을 보면, chrysophyta는 a, b, c 세 지점의 표층과 저층에서 비교적 일정하게 출현하였으나 cyanobacteria의 경우 a 지점에서는 7월과 8월에, b 지점과 c 지점에서는 5월부터 9월까지 특히 우점하였다(Figs. 2, 3). 이러한 결과는 상류의 강물이 직접 유입되는 a 지점의 경우 cyanobacteria 현존량 변화에는 계절의 영향과 함께 다른 외부 환경요인도 영향을 미침을 시사한다.

전체 식물플랑크톤 개체수(# P)와 cyanobacteria 개체수(# C)는 표층과 저층에서 수온과 강한 양의 상관관계를 보였다(Table 2). 한편 표층 chlorophyta 개체수와 수온과의 상관계수는 0.38 ($p < 0.05$, $N = 30$)로 양의 상관관계를 보였으나 표층 chrysophyta 개체수는 수온과 음의 상관관계 ($r_s = -0.38$, $p < 0.05$, $N = 30$)를 나타내었다. 대부분 cyanobacteria의 최적생장온도는 32～35°C로, 진핵조류의 최적생장온도보다 대개 높으며, 이러한 특성이 온대지역의 호수에서 cyanobacteria가 하절기에 우점하는데 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다(Castenholz, 2001; Wetzel, 2001). 한편, 식물플랑크톤 개체수 증가 및 여름철 cyanobacteria 대발생에 따른 BOD_5로 표현되는 유기물의 증가는 뚜렷하지 않았다. 회야댐 저수지에서 1

차 생산에 의한 내부생성유기물이 수중유기물의 농도에 기여하는 정도를 확인할 수 없었지만, a 지점 저층의 BOD_5와 COD_{Mn}값이 다른 두 지점에 비해 높고 체류시간이 비교적 짧은 중소규모의 상수원이라는 점에서 규모가 큰 대청호나 소양호에 비해 상대적으로 외부기원 유기물의 영향이 더 크다고 추측할 수 있다.

식물플랑크톤 속의 세포수 현존량을 근거로 구한 다양성 지수(Shannon and Weaver, 1963)의 최고치는 6월 4일 b 지점 표층에서의 0.84이었고, 다음은 9월 17일 a 지점의 표층에서 0.81로 나타났으며, 다양한 chlorophyta의 출현 때문으로 판단된다. 조사시기별 다양성 지수의 평균값은 5월과 6월, 그리고 9월에 0.53 이상의 비교적 높은 값을 보였고, 8월과 10월에는 0.40 이하의 낮은 값을 나타내었다. 식물플랑크톤 군집의 우점도 지수(Simpson, 1949)는 다양성 지수와 반대 양상을 보여 6월 4일 b 지점의 표층에서 0.17로 최저치를 기록하였고, 8월 6일과 20일 a 지점의 표층에서는 *Aphanizomenon*속의 대발생에 기인하여 각각 0.96과 0.97의 높은 값을 나타내었다. 4월 3일 a 지점의 표층에서도 0.89의 높은 우점도 지수를 보였는데, 이는 *Stephanodiscus*속의 높은 현존량에 따른 것으로 생각된다.

3. 세균수와 세균학적 수질

회야댐 저수지의 총 세균수는 7월 6일에 b 지점의 표층에서 1.68×10^5 cells mL^{-1}로 최고치를, 6월 4일에 a 지점의 저층에서 1.73×10^4 cells mL^{-1}로 최저치를 보였다(Fig. 4). 세 조사지점 모두 표층이 저층보다 높은 평균값을 보였고, 표층의 경우 여름철인 7월과 8월의 측정치가 대체로 높았다(Fig. 4). 표층 총 세균수(TMC)와 수온과의 상관계수는 0.56 ($p<0.01$, $N=30$)이었고, 저층 총 세균수는 수온과 유의성이 있는 상관관계가 없었으며(Table 2), 지점별로는 c 지점의 표층에서 수온과의 상관계수가 0.76 ($p<0.05$, $N=10$)으로 가장 높았다. 표층 총 세균수(TMC)와 표층 식물플랑크톤 개체수(# P)의 상관계수는 0.55 ($p<0.01$, $N=30$), 표층 cyanobacteria 개체수와의 상관계수는 0.69 ($p<0.01$, $N=30$)이었고, 저층보다는 표층에서 그 상관관계가 더욱 뚜렷하였다(Table 2). 총 세균수와 용존산소, pH, 부유물질, COD_{Mn}, 암모니아성 질소, 질산성 질소, 엽록소 *a*와는 유의성이 있는 상관관계가 없었다(Table 2).

신 등(2001)은 우리나라 주요 수계에서 조사된 총 세균수의 범위를 $3.0\times10^4\sim2.1\times10^7$ cells mL^{-1}로 정리하고 있다. 1998년 9월부터 1999년 8월까지 대청호의 4개 지점에서 측정한 총 세균수는 $1.2\times10^6\sim1.9\times10^7$ cells mL^{-1}로 7월 또는 8월에 최고치를 보였고, 비슷한 시기에 소양호에서의 측정값은 $1.2\times10^6\sim6.7\times10^6$ cells mL^{-1}로 7월에 그 수가 증가하기 시작하여 8월에 최고치를 기록하였다(김 등, 2000; 빙 등, 2002). 회야댐 저수지에서의 총 세균수 측정값도 대청호와 소양호에서와 마찬가지로 계절에 따라 변화하여 7월 또는 8월에 가장 높았으나 조사기간 동안 총 세균수의 범위는 표층의 경우 $2.02\times10^4\sim1.68\times10^5$ cells mL^{-1}로 두 호수와 비교하여 낮게 측정되었다. 일반적으로 자연수계에서 세균의 생장은 수온과 밀접한 관련성을 보여 수온이 높을 때 밀도와 활성이 증가하는 것으로 알려져 있다(Wetzel, 2001). 하지만 전체 식물플랑크톤 및 cyanobacteria 개체수도 수온과 높은 관련성을 보이기 때문에 회야댐 저수지에서 조사기간 동안

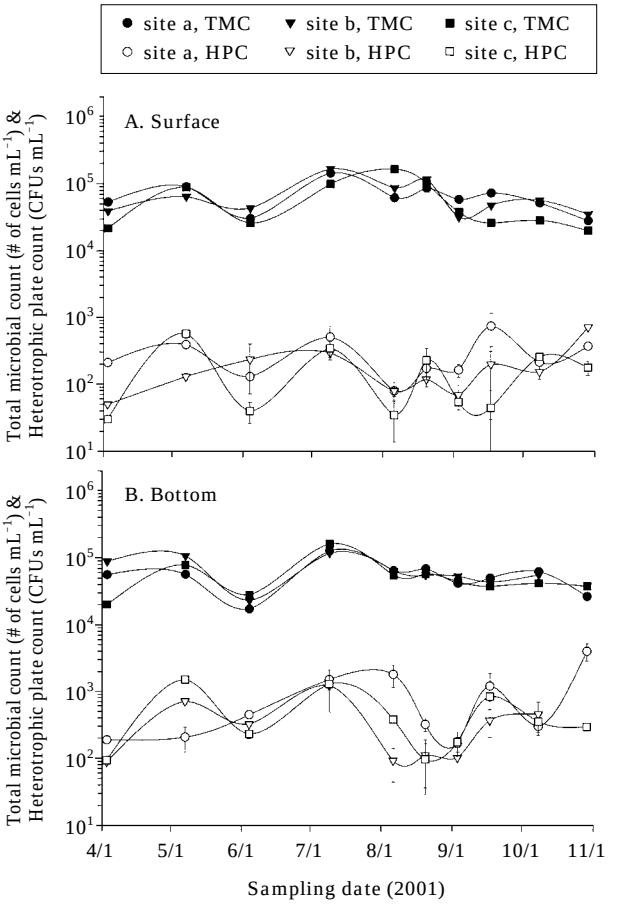

Fig. 4. Changes of direct total microbial counts (filled symbols) and heterotrophic plate counts (open symbols) at three sites of Hoeya Dam Reservoir from April to October, 2001. (A: surface water, B: bottom water)

관찰된 총 세균수의 변화를 수온의 직접적인 영향으로만 설명하기는 어렵다.

도말평판법으로 측정한 일반세균의 수는 10월 29일에 a 지점의 저층에서 4.1×10^3 CFU mL^{-1}로 최고치를, 4월 3일에 c 지점의 표층에서 30 CFU mL^{-1}로 최저치를 보였다 (Fig. 4). 조사지점별 일반세균수의 평균값은 표층이 $1.8\times10^2\sim3.0\times10^2$ CFU mL^{-1}, 저층이 $4.0\times10^2\sim1.0\times10^3$ CFU mL^{-1}의 범위로, a 지점이 다른 두 지점보다 높았고, 동일지점에서는 저층이 표층보다 높아 총 세균수와는 다른 양상을 보였다. 일반세균수의 총 세균수에 대한 비율은 8월 6일 c 지점의 표층에서 0.02%로 가장 낮았고, 10월 29일 a 지점의 저층에서 15%로 가장 높았으며, 일반세균수는 총 세균수와 유의성이 있는 상관관계가 없었다 (Fig. 4, Table 2). 한편 혼합평판법으로 측정한 일반세균수는 도말평판법으로 측정한 값에 비해 평균 1.8배 높았으며, 두 방법으로 측정한 일반세균수의 상관계수는 0.74 ($p<0.01$, $N=59$)로 양의 상관관계를 보였다.

일반세균수 (HPC)는 저층에서 부유물질, BOD_5, 질산성 질소와, 표층에서는 용존산소와 유의성이 있는 양의 상관관계를 보였으나, pH, COD_{Mn}, 암모니아성 질소, 엽록소 *a*와는 유의성이 있는 상관관계가 없었다 (Table 2). 또한 총 세균수의 경우와는 달리 일반세균수는 수온, 식물플랑크톤 개체수, cyanobacteria 개체수와도 유의성이 있는 상관관계가 없었는데 (Table 2), 이는 식물플랑크톤의 1차 생산에 의한 내부생성유기물이 일반세균으로 측정되는 종속영양성 세균의 생장을 촉진하지 못했거나 두 개체군이 서로 경쟁관계로 작용하였을 가능성을 보여준다. 김 등 (1995)은 대청호에서 유기물 분해세균의 활성이 cyanobacteria의 생장에 의해 억제됨을 보고하였으며, 이 현상을 *Microcystis*속이 분비하는 2차대사산물의 영향으로 설명하였는데, 회야댐 저수지의 경우에도 이러한 설명은 유효하리라 생각된다. 홍 등 (2002)은 봄철 천호지에서 세균군집 중 Cytophaga–Flavobacterium group이 cyanobacteria와 밀접한 관계를 가지고 변화함을 보고하였는데, cyanobacteria가 아니라 이들 group이 일반세균으로 측정되는 세균의 생장을 억제하였을 가능성도 여전히 있다. 이러한 결과는 조류가 번성하는 부영양 호수의 경우, 일반세균수가 전체적인 종속영양성 세균의 현황을 반영하는데 제한이 있음을 보여준다. 내부에서 생성되는 유기물의 종류와 양에 대한 정보, 그리고 내부생성유기물 및 외부기원유기물과 종속영양세균의 상호작용에 대한 조사가 회야댐 저수지의 미생물먹이망을 이해하는데 필요하리라 생각된다.

대장균군에 대한 추정시험의 결과 양성으로 나타난

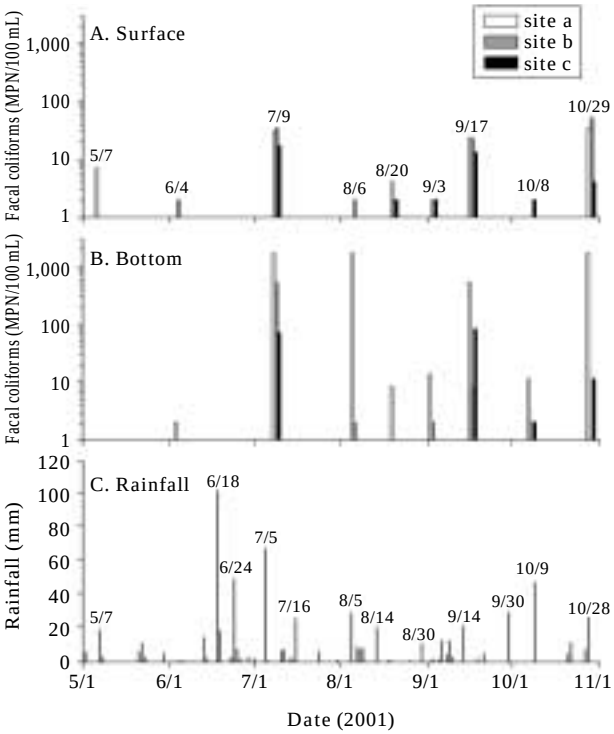

Fig. 5. The number of fecal coliforms at surface (A) and bottom (B) water of Hoeya Dam Reservoir, and daily rainfall (C) of Ulsan area from May to October, 2001.

MPN 시험관을 대상으로 분원성 대장균군과 대장균군에 대한 확정시험을 행하였다. 분원성 대장균군의 수는 a 지점이 다른 두 지점보다 높았고, 동일지점에서는 저층이 표층보다 대체로 높았으며, 7월 9일, 9월 17일, 10월 29일의 경우 세 조사지점 a, b, c의 표층과 저층 모두에서 분원성 대장균군이 확인되었다 (Fig. 5A, 5B). 대장균군의 수는 5월 7일 b 지점의 저층, 8월 6일 c 지점의 표층을 제외하고는 모두 2 MPN/100 mL 이상으로 측정되었으며, 분원성 대장균군과 유사하게 7월 9일, 9월 17일, 10월 29일에 특히 높았으며, 뚜렷한 계절적인 차이는 없었다. 조사기간 동안 울산지역에서 20 mm 이상의 강수량을 기록한 날은 6월 18일과 24일, 7월 5일과 16일, 8월 5일과 14일, 9월 14일과 30일, 10월 9일과 28일 등 모두 10일이었으며, 시료채취 1~3일 전에 많은 비가 내린 7월 9일, 8월 6일, 9월 17일, 10월 29일의 분원성 대장균군수가 그렇지 않은 5월 7일, 6월 4일, 8월 20일, 9월 3일, 10월 8일의 측정값에 비해 상대적으로 높았다 (Fig. 5). 이러한 결과는 분원성 대장균군이 상류로부터 강물을 통해 주로 저층으로 유입되며, 이의 농도는 강수량과 직접적인 관련성이 있어 비점오염원이 기여하는 정도가 클 것으로

Table 3. Number of positive tubes for fecal streptococci among five replicates.

		7 May	4 Jun.	9 Jul.	6 Aug.	20 Aug.	3 Sep.	17 Sep.	8 Oct.	29 Oct.
Site a	S	3	0	1	0	0	0	0	1	4
	B	0	3	5	5	4	0	1	1	5
Site b	S	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	B	0	1	5	0	0	0	2	0	–
Site c	S	0	0	2	0	2	0	0	0	0
	B	0	1	5	1	1	0	4	0	0

S: surface water; B: bottom water

생각된다.

분원성 연쇄상구균에 대한 확정시험의 결과를 살펴보면, a 지점에서는 9월 3일을 제외한 모든 조사일자에 양성으로 확인되었으며, b 지점과 c 지점에서는 9회의 조사일자 중 각각 4회와 5회 양성으로 판정되었다(Table 3). 시료별로 접종한 5개의 삼각플라스크 중 분원성 연쇄상구균에 대해 양성으로 판정된 수의 경우, a 지점의 저층이 평균 2.7로 가장 높았고, b 지점의 표층이 0.1로 가장 낮았으며, 조사지점별로는 a 지점이 가장 높았고 다음이 c 지점, 그리고 b 지점의 순서였으며, 동일지점에서는 저층이 표층보다 높았다(Table 3). 이러한 결과는 분원성 대장균군과 마찬가지로 분원성 연쇄상구균도 주로 강의 상류로부터 저층을 통해 직접 유입됨을 보여준다. 중소규모의 상수원인 회야댐 저수지의 경우, a 지점을 거쳐 유입된 분원성 대장균군과 분원성 연쇄상구균이 취수탑이 위치한 c 지점의 저층에서도 상당한 농도로 존재하며, 중간 수심에서 원수를 취수한다는 점을 고려할 때, 특히 비가 온 후 정수공정의 관리에 있어 특별한 주의가 필요함을 시사한다.

적 요

울산에 위치한 상수원인 회야댐 저수지에서 물리 · 화학적 환경요인에 따른 식물플랑크톤의 변동 및 세균수와 세균학적 수질의 변화를 파악하고자 저수지내 3개 지점의 표층과 저층에서 2001년 4월에서 10월까지 2～4주의 간격으로 채수하여 분석하였다. 조사기간 동안 투명도는 0.4～3.5 m, 표층에서 수온 10.2～32.0°C, 용존산소 5.5～12.4 mg L^{-1}, pH 7.3～9.6, BOD_5 0.8～5.0 mg L^{-1}, COD_{Mn} 3.7～10.0 mg L^{-1}, Chl-*a* 8.9～60.9 mg m^{-3}, 저층에서 수온 7.2～28.9°C, 용존산소 0.6～9.5 mg L^{-1}, pH 7.1～9.3, BOD_5 0.8～4.5 mg L^{-1}, COD_{Mn} 3.9～10.0 mg L^{-1}, Chl-*a* 4.3～81.9 mg m^{-3}의 범위였다. 식물플랑크톤 개체수는 표층 7.4×10^2～2.6×10^5 cells mL^{-1}, 저층 2.5×10^2～2.4×10^4 cells mL^{-1}의 범위였으며, 수온 및 Chl-*a*와 양의 상관관계를 보였다. 4월에는 *Stephanodiscus*속, 5월에는 *Oscillatoria*속이 우점하였고, 6월에서 9월 초에 걸쳐 *Aphanizomenon*, *Microcystis*, *Anabaena*의 대발생이 관찰되었으며, 9월 중순 이후 다시 *Stephanodiscus*속과 *Aulacoseira*속이 우점하였다. 총 세균수는 1.73×10^4～1.68×10^5 cells mL^{-1}의 범위로 표층이 저층보다 높았으며, 수온 및 식물플랑크톤 개체수와는 표층에서 양의 상관관계가 있었다. 일반세균수는 30～4.1×10^3 CFU mL^{-1}의 범위로, a 지점이 다른 두 지점보다 높았고, 저층이 표층보다 높아 총 세균수와는 다른 양상을 보였으며, 저층에서 BOD_5 및 NO_3^--N과 양의 상관관계를 나타내었다. 분원성 대장균군과 분원성 연쇄상구균의 경우 a 지점이 다른 두 지점보다 오염의 정도가 더 심했고, 저층이 표층보다 특히 높았으며, 비가 온 이후에는 취수탑이 위치한 c 지점의 저층에서도 상당한 농도로 검출되어 이를 고려한 정수공정의 관리가 필요하리라 생각된다.

사 사

이 연구는 2001년도 울산지역환경기술개발센터 연구비 지원으로 수행되었습니다.

인 용 문 헌

김동주, 홍선희, 최승익, 안태석. 2000. 소양호 세균군집 구조와 그 구조에 영향을 주는 환경요인. 한국미생물학회지 **36**: 136-141.

김명운, 김민호, 조장천, 김상종. 1995. Cyanobacteria의 증식에 따른 대청호 생태계내의 생물군집 변화. 한국육수학회지 **28**: 1-9.

김원진, 이혜주. 1998. 낙동강 하구의 환경요인과 미생물 분포.

한국육수학회지 **31**: 25-31.

빙선혜, 이상욱, 황순진, 오인혜. 2002. 대청호에서 계절에 따른 세균 군집 및 환경요인의 변화. 한국육수학회지 **35**: 71-78.

신재기, 박경미, 황순진, 조경제. 2001. 경안천과 팔당호에서 총 세균수의 분포 및 동태. 한국육수학회지 **34**: 119-125.

울산광역시. 2002. 환경백서.

이수식, 김영훈, 신만균. 1996. 회야댐 저수지의 부영양화 평가. 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp.553-556.

정영호. 1968. 한국동식물도감. 담수조류. 문교부, 서울.

정 준. 1993. 한국담수조류도감. 아카데미서적, 서울.

홍선희, 전선옥, 안태석, 안태영. 2002. 봄철 cyanobacteria가 우점한 천호지에서 세균군집구조의 변화. 한국미생물학회지 **38**: 287-292.

환경부. 2002. 먹는물수질공정시험방법. 환경부고시 2002-91.

환경부. 2000. 수질오염공정시험방법.

APHA. 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater, 19th ed. American Public Health Association, Washington, DC.

Azam, F., T. Fenchel, 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.

Carlson, R.E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnol. Oceanogr.* **22**: 361-379.

Castenholz, R.W. 2001. Phylum BX. Cyanobacteria, p. 473-599. *In*: Bergey's Manual of Systematic Bacteriology 2nd edition, vol. 1 (D.R. Boone and R.W. Castenholz, eds.). Springer-Verlag, New York.

Cole, J.J., F. Findlay and R.L. Pace. 1988. Bacterial production in fresh and salt water ecosystems: a cross-system overview. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **43**: 1-10.

Fogg, G.E. 1983. The ecological significance of extracellular products of phytoplankton photosynthesis. *Bot. Mar.* **26**: 3-14.

Fukushima, T., J. Park, A. Imai and K. Matsushige. 1996. Dissolved organic carbon in a eutrophic lake: dynamics, biodegradability and origin. *Aquat. Sci.* **58**: 139-157.

Hobbie, J.E., R.J. Daley and S. Japer. 1977. Use of nucleopore filters for counting bacteria by fluorescence microscopy. *Appl. Environ. Microbiol.* **33**: 1225-1228.

Lee J.A., A.R. Choi and M. Watanabe. 1997. Morphological variations in genus *Microcystis* (Cyanophyceae) in the Naktong River and its taxanomical implications. *Korean J. Phycol.* **12**: 147-157.

OECD. 1974. Report of the water management sector group on eutrophication control. Environment Directorate, OECD, Paris.

Shannon C.E. and W. Weaver. 1963. The mathematical theory of communication. University of Illinois Press, Urbana. p.177.

Simpson E.H. 1949. Measurement of diversity. *Nature* **163**: 1-688.

Watanabe, M. 1996. Isolation, cultivation and classification of bloom-forming *Microcystis* in Japan. p.13-34. *In*: *Toxic Microcystis* (Watanabe M.F., Harada K.-I., Carmichael W.W. and Fujiki H. eds), CRC Press, Tokyo.

Wetzel, R.G. 2001. Limnology: lake and river ecosystem, 3rd ed. Academic Press, San Diego.

(Manuscript received 2 January 2004,
Revision accepted 28 February 2004)