

경안천과 팔당호에서 총세균수의 분포 및 동태

신재기* · 박경미 · 황순진 · 조경제¹

(건국대학교 지역생태시스템공학과, 서울 143-701, ¹인제대학교 환경시스템학부, 김해 621-749)

Distribution and Dynamics of the Total Bacterial Number in the Kyongan Stream and Paltang Reservoir. Shin, Jae-Ki*, Kyung-Mi Park, Soon-Jin Hwang and Kyung-Je Cho¹ (Department of Biological Systems Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, ¹School of Environmental Science and Engineering, Inje University, Kimhae 621-749, Korea)

Total bacterial density was investigated in the main stream and tributaries of the Kyongan Stream and inlet parts of Paltang Reservoir from September 2000 to February 2001 by acridine orange direct count (AODC) method. Total bacterial number in the Kyongan Stream was mainly under influence of the effluent discharge of sewage wastewater treatment plant (SWTP) located in the upstream or downstream. Decreasing rate with water flowing distance (km) in the main stream is 0.13×10^6 cells/ml, and it was estimated to much accumulating quantity on the stream bed during transport to downstream. Average values of total bacterial number in September~October, November and December~February were range $1.74 \sim 3.10 \times 10^6$, $1.86 \sim 7.30 \times 10^6$ and $4.56 \sim 8.75 \times 10^6$ cells/ml, respectively, and were high at low temperature than that of high temperature period. Total bacterial number was more abundant at below 10°C with 2.1~3.0 folds than at above 10°C. Water quality by total bacterial number was classify to eutrophic and the potential of wastewater treated effluent for the microbial contamination assessed to very high. The results of this study indicate that the management of point source, SWTP effluent, is urgent to mitigate bacterial impact of Paltang Reservoir as well as the Kyongan Stream.

Key words : Kyongan Stream, Total bacterial number, Paltang Reservoir, Point source, Sewage wastewater treatment plant (SWTP)

서 론

수중에서 미생물은 계절, 장소 및 영양상태에 따라 현존량과 생산성을 달리할 뿐만 아니라 최종 분해자로서 물질 순환과 에너지 공급 차원에서 매우 중요하다 (Wright, 1978; Sorokin, 1999). 또한 오염원으로부터 각종 유기물과 영양염이 다량 유입됨으로 인해 수질이 부영양화 될수록 미생물 개체수는 급증하여 오염의 척도가 될 수 있고, 총세균 생물량은 우수 또는 정수의 구배

와 서식환경에 의한 시스템 차이에 따라 변화가 커 수환경을 평가함에 있어 유용한 재료가 될 수 있다(안과이, 1988; 안과 정, 1996; Wetzel, 1983). 일반적으로, 담수에서 미생물의 성장과 활성에 미치는 주요 환경인자로는 광, 수온, DO, pH, 기질, 효소, 피식 및 수문 등 물리적, 화학적 또는 생물학적으로 다양하게 존재하나 특히 온도에 대한 계절적인 영향은 매우 민감하여 세포밀도는 수온이 낮을 때보다 수온이 높을 때에 크고, 미생물의 개체수 증가 등 풍부성을 결정할 수도 있다(Novak, 1974; Esener *et al.*, 1981; Mayo and Noike, 1996).

* Corresponding author: Tel: 011-870-6121, Fax: 02) 456-5062, E-mail: jaekishin@hanmail.net

세균과 식물플랑크톤을 포함한 미생물 밀도는 오염원의 영향으로 하천 하류로 갈수록 더욱 증가되는 양상을 보이고(신 등, 2000), 저수지에서는 유동성의 감소, 체류시간의 증가 등으로 인하여 하천과 수환경 구조가 다르며 유입하천의 오염 부하량이 저수지의 수질을 좌우하게 된다(Kennedy and Walker, 1990). 유속이 느린 하천이나 정체수역인 저수지에서 미생물 생물량의 증감은 외부로부터 유입되는 유기물 뿐만 아니라 내부생성 유기물 양에 의한 영향이 크다(김 등, 1995; 신 등, 2000). 하천의 중·하류에는 도시화와 인구 집중현상 및 생활수준의 향상으로 용수 수요가 급증하고 그 만큼 각종 오·폐수 증가로 수질오염은 심화되고 있다(OECD, 1982; UN, 1992; 신, 1998; 환경부, 1999).

수질이 부영양화됨에 따른 미생물과 식물플랑크톤의 세포밀도에 미치는 영향은 홍수기에는 희석효과로 미약하지만 유량이 빈약한 저수기 또는 갈수기에는 식물플랑크톤의 대발생과 같은 생물학적 현상에서 뚜렷이 나타나고 있다(조와 신, 1998; 신 등, 2000). 특히 갈수기에 국내 하천의 수질악화 요인에는 하수처리장의 배출수와 하천에 횡단으로 설치된 수중보 등의 구조물이 매우 중요한 것으로 지적되고 있으며(신 등, 2000), 이에 대한 미생물학적 평가도 필요하다.

국내에서 총세균수에 관한 연구는 대부분 저수지를 중심으로 이루어졌으며, 하천과 하수처리장 배출수에 대한 연구는 전무한 실정에 있다. 따라서 본 연구는 경안천과 팔당호의 주요 지점에서 2000년 9월부터 2001년 2월까지 미생물과 관련된 환경요인을 조사하였고 하수처리장의 방류수가 총세균수의 분포 및 동태에 미치는 영향을 평가하였다.

재료 및 방법

1. 조사지 개황

경안천은 한강의 지류로서 북한강 및 남한강과 더불어 팔당호의 주요 유입하천으로 서울·경기지역을 포함하는 수도권 상수원의 수질에 직·간접적으로 영향을 미친다(Fig. 1). 상류(고천교, KOC)부터 하류의 팔당호 유입부(광동교, KWA)까지 유하거리는 약 31 km이며, 하천의 경사는 우리나라 다른 하천과 마찬가지로 하류로 갈수록 완만하고 갈수기에는 평균 수심이 1 m 이하이다. 총 조사지점은 23개이며 조사지점간에는 1~3개의 수중보가 축조되어 있고, 하수처리장(sewage wastewater treatment plant, SWTP)이 하천 본류(SAM~CHO,

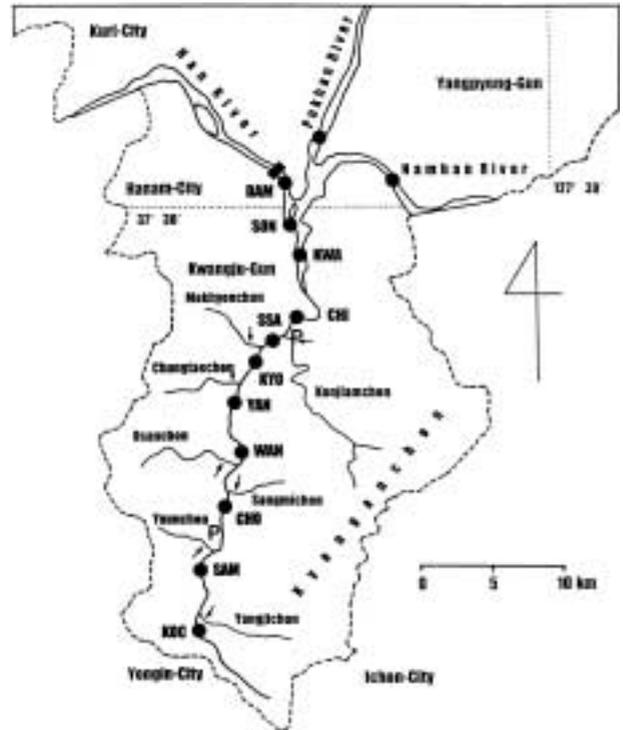


Fig. 1. Map showing sampling locations for the survey of total bacteria from upstream to downstream of the Kyongan Stream and Paltang Reservoir. P symbols and arrows indicate district sewage wastewater treatment plant (SWTP) and sampling point of each tributary, respectively.

SSA~CHI 구간)와 유입지천의 중상류부에 위치하고 있다.

본류와 유입지류의 주변에는 중·소도시 뿐만 아니라 농경과 축산을 주종으로 하는 농가들이 밀집되어 있다. 경안천은 다양한 오염원으로부터 노출된 전형적인 농촌과 도시근교에 위치한 중소하천에 해당한다. 하천 상·하류의 본류에서 수문 특성을 고려할 때, 고천교(KOC)~지월교(CHI)구간에서는 유속이 육안으로 관찰되나 부분적으로 본류와 지류의 수중보에 근접한 곳의 상부와 하류의 팔당호 유입부인 광동교(KWA)지점에서는 홍수기와 팔당호댐 수문조작 시기를 제외하고는 물의 유동이 없는 반 폐쇄적 정체수역을 이루고 있다.

본 연구는 팔당호 지류인 경안천 상·하류구간의 본류 11개 지점-고천교(KOC), 삼계교(SAM), 초부교(CHO), 왕산교(WAN), 양벌대교(YAN), 경안교(KYO), 쌍령교(SSA), 지월교(CHI), 광동교(KWA), 선착장(SON) 및 팔당호 댐(DAM) 부근-과 유입지천의 최하류부 7개 지점(양지천, 유운천, 상미천, 오산천, 중대천, 목현천 및

곤지암천), 생활하수 배수로 (Yongin(D), SAM~CHO 구간) 1개지점, 하수처리장 (P) 2개지점 (Yongin(S), Kwangju (S)) 및 북한강(양수대교), 남한강(제탄리) 각각 1개 지점의 총 23개지점 (Fig. 1)에서 조사하였다.

2. 수환경 요인

수환경 요인 중 수온과 DO는 YSI 59 meter, pH, 전기전도도 및 탁도는 각각 Orion 230A meter, Conductometer LF191-WTW 및 Lamotte model BH-I로 현장에서 측정하였다. 시료는 조사지점에 따라 하상의 중심부에서 직접 채수하거나 또는 Van Dorn 채수기로 표층(30 cm 수심)에서 채수하였다. 특히 1~2월에는 저수지 내의 수체가 완전 결빙되어 빙상에서 직경 약 0.5~1 m를 절단하여 채수하였다.

3. 총세균수

총세균 계수를 위한 시료 용기는 200 ml 갈색유리병 (Corning, disposable sterile)을 사용하였다. 시료는 미리 0.2 μm membrane filter (ϕ 25 mm, Millipore)로 여과 멸균한 formalin (Aldrich Co.)으로 최종 2%가 되도록 현장에서 고정하였다. 알루미늄 호일로 싸 후 cooling box에 담아 12시간 이내에 실험실로 옮겼다. 운반한 시료는 즉시 0.2 μm nuclepore polycarbonate filter (ϕ 25 mm, Whatman)에 여과하였고, 1% acridine orange 용액으로 염색 후 건조시켜 형광현미경의 1,000 \times 배율로 직접 계수하는 AODC법 (Hobbie *et al.*, 1977)으로 하였다. 표본 (slide)은 시료당 3개를 준비하였고, 총세균수는 한 표본당 최소한 20 fields 또는 300~500개체 이상 계수한 후

ml당 평균 세포수로 산정하였다.

결과 및 고찰

1. 수환경 요인

본 연구기간 동안 경안천과 팔당호에서 수온 분포는 0.6~19.9 $^{\circ}\text{C}$ 범위였고 경안천 본류와 저수지의 수온이 유입지류보다 0.6 $^{\circ}\text{C}$ 높았다 (Table 1). 수온은 10월과 11월부터 감소하기 시작하여 2월에 최저를 기록하였다. 하천과 저수지의 가장자리가 12월부터 얼기 시작하여 1~2월에는 수표면이 완전 결빙상태를 이루었다. DO는 7.1~19.9 mg O₂/l 범위로서 평균값은 13.2 mg O₂/l이었고 대부분 포화 또는 과포화 상태였다. DO 농도는 수온 증감과 반대로 고수온기에서 저수온기로 갈수록 높아지는 경향을 보였다. pH는 6.8~9.5 범위로서 평균값은 7.6이었고 경안천의 본류와 그 지류보다 저수지가 다소 높았다. 이것은 유수와 정수의 차이와 담수조류의 광합성이 원인으로 추정된다 (신 등, 2000).

전기전도도는 다른 수질 항목에 비해 차이가 매우 컸고, 상류에서 하류로 갈수록 급격하게 감소되는 경향이 뚜렷하였다. 경안천의 본류, 지류 및 팔당호에서 평균값 (범위)이 각각 541 (194~945) $\mu\text{S}/\text{cm}$, 312 (118~547) $\mu\text{S}/\text{cm}$ 및 167 (79~362) $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로서 본류는 지류와 저수지에 비해 1.7~3.2배 높았다 (Table 1). 본류에서 전기전도도의 증감에는 하수처리장의 배출수 (평균 952 $\mu\text{S}/\text{cm}$)에 의한 영향이 절대적이었고 이것은 선행 연구결과 (Uba, 1995)와 유사하였다. 탁도는 본류와 지류에서 평균값이 각각 6.3 NTU와 6.2 NTU로서 차이가 없었고, 저

Table 1. Average composition for each environmental parameters in the Kyongan Stream and Paltang Reservoir from September, 2000 to February, 2001. \pm : Standard deviation. Parenthesis indicate maximum and minimum value, respectively.

Parameters\Systems	Main stream	Tributary	Reservoir	SWTP* effluent
Water temperature ($^{\circ}\text{C}$)	8.4 \pm 6.6 (19.2/1.3)	7.8 \pm 6.4 (19.6/0.9)	8.4 \pm 7.0 (19.9/0.6)	-
Dissolved oxygen (mg O ₂ /l)	12.8 \pm 3.4 (19.7/7.3)	13.4 \pm 3.6 (19.9/7.1)	13.3 \pm 3.6 (19.9/8.5)	-
pH	7.4 \pm 0.2 (8.1/7.0)	7.6 \pm 0.6 (9.5/6.8)	7.9 \pm 0.5 (8.9/7.1)	-
Conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	541 \pm 214 (945/194)	312 \pm 109 (547/118)	167 \pm 77 (362/79)	952 \pm 446 (1,635/432)
Turbidity (NTU)	6.3 \pm 7.1 (44.8/1.9)	6.2 \pm 13.8 (82.8/0.3)	4.1 \pm 3.9 (17.1/1.0)	14.6 \pm 24.8 (81.7/1.3)
Total bacterial number ($\times 10^6$ cells/ml)	3.91 \pm 2.18 (8.60/0.16)	3.17 \pm 2.01 (8.30/0.23)	4.05 \pm 2.14 (8.10/0.59)	8.04 \pm 4.85 (20.00/2.60)

* Sewage wastewater treatment plant.

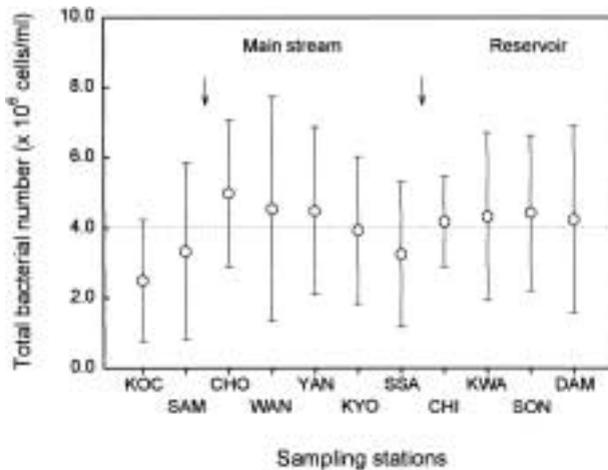


Fig. 2. Spatial variations of total bacterial number in the Kyongan Stream and Paltang Reservoir. Vertical bars, dotted line and arrows indicate standard deviation, mean level and inflowing point of SWTP effluents, respectively.

수지는 4.12 NTU로서 하천의 66% 수준이었다 (Table 1). 반면에 하수처리장과 생활하수로의 배출수에 의해 공급되는 탁도는 평균값이 14.6 NTU로서 월등히 높아 하천의 본류에 미치는 영향이 매우 클 것으로 추정되었고, 특히 생활하수 수로로부터 나오는 배출수의 탁도는 81.7 NTU로서 본류의 탁도에 비해 13배나 높았다 (Table 1).

2. 총세균수 분포 및 변동

경안천 본류와 팔당호의 주요지점에서 측정된 총세균수의 평균값과 표준편차를 나타낸 것은 Fig. 2와 같다. 총세균수는 상류인 KOC에서 평균값(범위)이 2.49×10^6 cells/ml ($0.73 \sim 5.60 \times 10^6$ cells/ml)로서 가장 낮았고, CHO에서 급격하게 증가하여 평균값(범위)이 4.92×10^6 cells/ml ($2.60 \sim 7.90 \times 10^6$ cells/ml)로서 가장 높았다 (Fig. 2). 이후 하류의 SSA (3.24×10^6 cells/ml)까지 유하하면서 CHO에 비해 34.1%가 감소하였으나, CHI에서 4.17×10^6 cells/ml로 다시 증가하는 경향을 보였다. 반면에, 팔당호의 KWA, SON 및 DAM에서는 평균값이 4.32×10^6 cells/ml로서 저수지 내부의 정점간에는 큰 차이가 없었다 (Fig. 2).

경안천의 본류에서 총세균수의 증감은 상류와 하류에 각각 위치한 하수처리장과 생활하수 수로의 배출수가 주요 요인으로 작용하여 SAM~CHO 구간과 SSA~CHI 구간에서 큰 폭으로 증가하는 양상이 현저하였다. 또한 하천 본류의 전 구간에서 평균값 (4.01×10^6 cells/ml)을

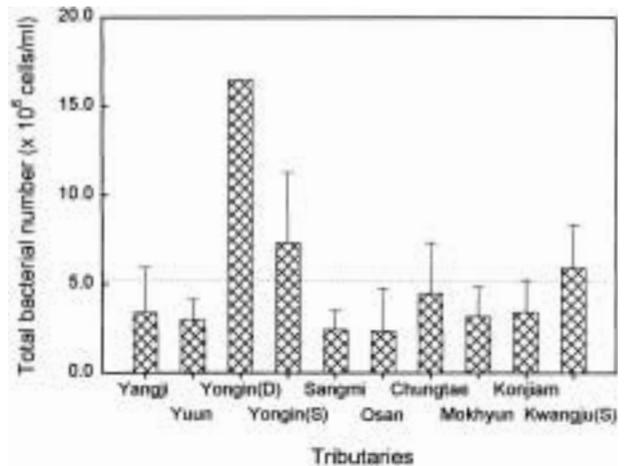


Fig. 3. Spatial distributions of total bacterial number in the tributaries of the Kyongan Stream. Vertical bars and dotted line indicate standard deviation and mean level, respectively.

상회하는 것은 배출수가 유입되고 난 직후에만 관찰되어 이에 대한 영향은 지배적임을 시사하였다 (Fig. 2). 평균 세포수로 본 유하거리 (km)당 총세균수의 소멸량은 0.13×10^6 cells/ml로 계산되었다. 지류로부터 유입되는 유량에 의해 희석되거나 본류 구간에 위치한 수 개의 수중보 구간에서 침강하여 축적되기 때문으로 추정된다.

유입지류에서 측정된 총세균수의 분포는 Fig. 3과 같으며, 유입수간에 그 차이는 매우 커 본류에 미치는 영향이 뚜렷하게 구분되었다. 지류에서 총세균수는 $0.23 \sim 8.30 \times 10^6$ cells/ml 범위였고 평균 세포수는 5.19×10^6 cells/ml이었다. 특히 용인생활하수로, 용인하수처리장 및 광주하수처리장의 배출수가 각각 16.50 , 7.32 및 5.93×10^6 cells/ml로서 평균값을 상회하였고, 반면에 삼미천과 오산천이 각각 2.42 , 2.36×10^6 cells/ml로서 상대적으로 낮았다 (Fig. 3).

3. 배출수의 영향

배출수를 제외한 경안천의 본류, 지류 및 팔당호에서 측정된 총세균수를 수온 변화에 따라 구분하여 나타낸 것은 Fig. 4 및 Table 2와 같다. 총세균수의 분포는 수온 10°C 를 기준으로 차이가 매우 커 뚜렷하게 구분되었다. 총세균수의 평균값은 9~10월, 11월 및 12~2월에 각각 $1.74 \sim 3.10 \times 10^6$, $1.86 \sim 7.30 \times 10^6$ 및 $4.56 \sim 8.75 \times 10^6$ cells/ml 범위로서 세균 생물량은 고수온기에 적고 저수온기에 오히려 증가하는 양상을 보였다 (Fig. 4). 또한 경

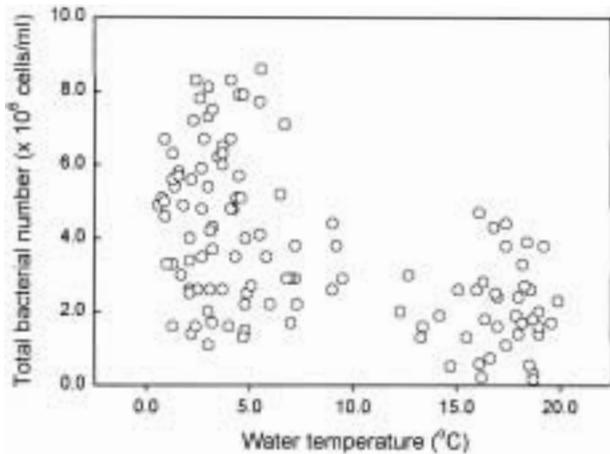


Fig. 4. Relationship between water temperature and total bacterial number in the Kyongan Stream and Paltang Reservoir. N = 120.

Table 2. Comparison of total bacterial abundance according to water temperature differences in the Kyongan Stream and Paltang Reservoir. \pm : Standard deviation. Unit : $\times 10^6$ cells/ml

Water systems \ Temperature	Above 10°C (September ~ October)	Near 10°C (November)	Below 10°C (December ~ February)
Main stream	2.45 \pm 1.34	3.50 \pm 1.63	5.10 \pm 2.10
Tributary	1.74 \pm 0.89	1.86 \pm 0.57	4.56 \pm 1.84
Reservoir	1.85 \pm 0.89	3.43 \pm 0.72	5.58 \pm 1.50
SWTP* effluent	3.10 \pm 0.51	7.30	8.75 \pm 2.27

* Sewage wastewater treatment plant.

안천 본류, 지류, 팔당호 및 하수처리장 배출수에서 관찰된 총세균수는 수온이 10°C 이하인 시기 (12~2월)가 10°C 이상인 시기 (9~10월)보다 각각 2.1배, 2.6배, 3.0배 및 2.8배 증가하였다 (Table 2).

자연 수계에서 세균의 생장은 주요 환경요인 중 수온과 밀접한 관련성을 보이고 있어 수온이 높을 때 그 밀도는 크게 증가하고 활성도도 향상된다 (Wetzel, 1983). 본 연구에서 하계~추계에 총세균수가 감소한 것은, 수온이 높은 9~10월은 강우에 의한 유량이 증가되는 시기로서 하천과 저수지의 총세균수 분포와 변동에 희석 효과가 크게 작용하였을 것으로 생각되나 미생물의 활성은 고수온기에 왕성하므로 상대적으로 하수처리장의 배출수에 의한 유출 영향은 적었던 것도 주요한 원인을 들 수가 있었다 (Table 1, 2). 반면에 저수온기로 갈수록 총세균수가 증가하는 것은 하수처리장과 생활하수 수로의 점오염원으로부터 배출되는 총세균수의 농도와 밀접한 관련성 (김 등, 1996)이 관찰되어 이에 대한 후속 연구가 필요한 것으로 판단되었다.

4. 수질 평가

총세균수의 밀도는 수질의 오염도나 영양상태를 가늠하는데 매우 유용한 도구가 될 수가 있다 (Martins *et al.*, 1995). 총세균수가 0.05~0.50 $\times 10^6$, 0.45~1.40 $\times 10^6$ 및 2.20~12.30 $\times 10^6$ cells/ml을 각각 빈영양, 중영양 및 부영양으로 평가하는 기준 (Wetzel, 1983; Rheinheimer, 1985)을 적용할 때, 경안천 본류, 지류, 팔당호 및 하수처

Table 3. Comparison of the total bacterial number observed at different inland waters of Korea.

Locality	Study period	Total bacterial number ($\times 10^6$ cells/ml)	Analytical method	References	
Chunchon Reservoir	198?	0.22~0.57	DAPI	안 등 (1988)	
Paltang Reservoir	1987~1988	0.93~3.15	DAPI	안과 조 (1989)	
	2000~2001	0.59~8.10	AODC	This study	
Paro Reservoir	1987	0.03~1.31	DAPI	안과 이 (1988), 안 등 (1988)	
Small ponds*	1995	0.30~2.30	AODC	안과 정 (1996)	
Soyang Reservoir	1987~1988	0.35~4.22	AODC	강과 김 (1989)	
	198?	0.38~2.11	DAPI	안 등 (1988)	
	1990	0.40~4.70	AODC	최 등 (1997)	
	1994	0.50~3.40	AODC	안 등 (1995)	
Taechong Reservoir	1993	1.80~21.1	AODC	김 등 (1995)	
Uiam Reservoir	198?	0.16~1.13	DAPI	안 등 (1988)	
Kyongan Stream	- main stream	2000~2001	0.16~8.60	AODC	This study
	- tributary	2000~2001	0.23~8.30	AODC	This study
	SWTP** effluent	2000~2001	2.60~20.0	AODC	This study

* : Ponds are in Kangwon National University, ** : Sewage Wastewater Treatment Plant.

리장 배출수에서 조사된 총세균수의 평균값은 $3.17 \sim 8.04 \times 10^6$ cells/ml 범위로서 부영양상태를 가리켰다. 반면에 배출수를 제외한 경안천 유입지류와 팔당호는 9~10월 또는 11월에 각각 $1.74 \sim 1.86 \times 10^6$ cells/ml, 1.85×10^6 cells/ml로서 중영양 또는 부영양 초기상태로 볼 수 있어 계절적인 영향도 다소 관찰되었다.

우리나라 주요 수계에서 조사된 총세균수의 선행연구 결과를 정리한 것은 Table 3과 같다. 저수지의 총세균수 범위는 $0.03 \sim 21.1 \times 10^6$ cells/ml로서 변화 폭이 매우 컸고 그 차이는 무려 700배를 초과하였다. 본 연구 결과에서 경안천은 다른 수계에 비해 미생물 오염이 가장 심각하였고 팔당호는 중간값으로 비교할 때, 안과 조(1989)에 의한 10년 전 결과보다도 2.1배 정도 증가하였다(Table 3). 하수처리장 배출수에서 관찰된 총세균수는 김 등(1995)이 배출수 영향으로 하계에 남조류 *Microcystis*속 조류가 대발생하는 수역인 대청호의 육천천 하류에서 관찰된 것과 유사하여 점오염원인 배출수는 경안천의 본류 뿐만 아니라 하류의 팔당호에 미칠 수 있는 잠재력이 매우 큼을 시사하였다.

사 사

본 논문은 2000년 한국학술진흥재단의 연구비(KRF-2000-DA0031)에 의하여 연구되었음.

적 요

경안천과 팔당호 주요 유입부에서 2000년 9월부터 2001년 2월까지 수중 총세균수의 분포 및 변동을 조사하였다. 경안천 본류에서 총세균수는 하수처리장 배출수가 유입될 때 뚜렷이 증가하였다. 경안천 본류에서 유하거리(km)당 총세균의 소멸량은 0.13×10^6 cells/ml로서 하류로 이동되면서 하상에 침강 소멸되는 양이 상당하였다. 총세균수의 변동은 9~10월, 11월 및 12~2월에 평균값이 각각 $1.74 \sim 3.10 \times 10^6$ cells/ml, $1.86 \sim 7.30 \times 10^6$ cells/ml 및 $4.56 \sim 8.75 \times 10^6$ cells/ml 범위로서 세균의 생물량은 고수온기에 적었고 저수온기에 오히려 증가하였다. 총세균수는 수온이 $>10^\circ\text{C}$ 인 시기(9~10월)보다 $<10^\circ\text{C}$ 인 저수온기(12~2월)에 2.1~3.0배 풍부하였다. 총세균수로 평가하였을 때 수질은 부영양상태였고 하수처리장 배출수는 경안천과 팔당호의 미생물 오염에 대한 가장 큰 source로 평가되었다. 경안천 뿐만 아니라 팔당호의 상수원 수질을 보호하기 위해서는 하수처리장

배출수 관리에 대한 대책 마련이 매우 시급한 것으로 판단되었다.

인 용 문 헌

- 강찬수, 김상중. 1989. 소양호에서의 세균 군집의 분포 및 생리적 활성의 연중 변화, 한국육수학회지 **22**: 199-211.
- 김명운, 김민호, 조장천, 김상중. 1995. Cyanobacteria의 증식에 따른 대청호 생태계내의 생물군집 변화, 한국육수학회지 **28**: 1-9.
- 김철호, 이희준, 최영길, 박영식, 이기성, 최철일. 1996. 대청호 및 금강 수계의 중속영양미생물 분포와 세포외 효소 활성도의 계절적 변화, 한국육수학회지 **29**: 17-28.
- 신재기. 1998. 낙동강 부영양화에 따른 담수조류의 생태학적 연구. 인제대학교 박사학위 논문, 202pp.
- 신재기, 조경제. 2000. 생물검정에 의한 남조류 *Microcystis*가 수질에 미치는 영향, 한국환경과학회지 **9**: 267-273.
- 신재기, 조주래, 황순진, 조경제. 2000. 경안천~팔당호의 부영양화와 수질오염 특성, 한국육수학회지 **33**: 387-394.
- 안태석, 이동훈. 1988. 파로호 수중생태계에서의 미생물 분포 및 활성도, 한국미생물학회지 **26**: 230-236.
- 안태석, 이동훈, 김범철, 조규승. 1988. 한강상류 인공호에서의 미생물 분포와 활성도에 관하여, 한국육수학회지 **21**: 143-150.
- 안태석, 정미정. 1996. 수생관속식물이 우점하는 호수에서 부유세균과 부착세균 개체수의 계절적 변화, 한국육수학회지 **29**: 197-203.
- 안태석, 정미정, 이은주, 조규승. 1995. 소양호에서 세균군집 크기에 미치는 플랑크톤의 영향, 한국육수학회지 **28**: 219-224.
- 안태석, 조규승. 1989. 팔당호의 미생물 분포 및 활성도, 한국수질보전학회지 **5**: 30-34.
- 조경제, 신재기. 1998. 낙동강 하류에서 동·하계 무기 N·P 영양염류와 식물플랑크톤의 동태, 한국육수학회지 **31**: 67-75.
- 최승익, 변명섭, 안태석. 1997. 소양호에서 총세균수의 분포, 한국육수학회지 **30**: 377-383.
- 환경부. 1999. 환경백서. 653pp.
- APHA, AWWA, WEF. 1992. Standard methods for the examination of water and wastewater, 18th ed. American Public Health Association, Washington, DC.
- Esener, A.A., J.A. Roels and N.W.F. Kossen. 1981. The influence of temperature on the maximum specific growth rate of *Klebsiella pneumoniae*. *Biotechnol. Bioengng.* **23**: 1401-1405.
- Hobbie, J.E., R.J. Daley and S. Jasper. 1977. Use of nucleopore filters for counting bacteria by fluorescence microscopy. *Appl. Environ. Microbiol.* **33**: 1225-1228.

- Kennedy, R.H. and W.W. Walker, 1990. Reservoir nutrient dynamics. In: Thornton, K.W., B.L. Kimmel and F.E. Payne, (eds.) *Reservoir limnology: ecological perspectives*. John Wiley & Sons, Inc. New York, NY. pp. 109–131.
- Martins, M.T., M.I.Z. Sato, M.N. Alves, N.C. Stoppe, V.M. Prado and P.S. Sanchez. 1995. Assessment of microbiological quality for swimming pools in South America. *Wat. Res.* **29**: 2417–2420.
- Mayo, A.W. and T. Noike. 1996. Effects of temperature and pH on the growth of heterotrophic bacteria in waste stabilization ponds. *Wat. Res.* **30**: 447–455.
- Novak, J.T. 1974. Temperature–substrate interactions in biological treatment. *J. Wat. Pollut. Control Fed.* **46**: 1984–1994.
- OECD. 1982. *Eutrophication of waters. Monitoring, assessment and control*. Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, France. 154pp.
- Rheinheimer, G. 1985. *Aquatic microbiology*. 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc. Chichester. pp. 158–159.
- Sorokin, Y.I. 1999. *Aquatic microbial ecology, A textbook for students in environmental sciences*. Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands. 248pp.
- Uba, B.N. 1995. Nutrient status of wastewater fertilizer–factory–waste discharge equalization basin. *Bioresource Technology* **51**: 135–142.
- UN (United Nations). 1992. *Protection of inland waters against eutrophication*. New York, ECE/ENVWA/26. 29pp.
- Wetzel, R.G. 1983. *Limnology*. Saunders College Publishing. pp. 487–518.
- Wright, R.T. 1978. Measurement and significance of specific activity in the heterotrophic bacteria of natural waters. *Appl. Environ. Microbiol.* **36**: 297–305.

(Received 10 May 2001, Manuscript accepted 5 June 2001)