

시화호 유역에서 배수시스템별 하천수의 비옥도 비교

신재기 · 황순진* · 김동섭¹ · 강창근²

(건국대학교 지역건설환경공학과, ¹한국수자원공사 수자원연구원, ²국립수산과학원 환경관리과)

Comparison of the Fertility of Stream Waters Depending on the Drainage Systems in the Lake Shihwa Watershed, Korea. *Shin, Jae-Ki, Soon-Jin Hwang*, Dong-Sup Kim¹ and Chang-Keun Kang²* (Department of Biological Systems Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea; ¹Water Resources Research Institute, Korea Water Resources Corporation (KOWACO), Taejon 305-390, Korea; ²Division of Environmental Management, National Fisheries Research & Development Institute (NFRDI), Pusan 619-902, Korea)

The fertility of stream water in major streams of the Lake Shihwa Watershed was compared using water analyses and algal growth potential test (AGPT) in typical drought seasons from December 2001 to April 2002. The water quality varied considerably depending on streams. These streams were very rich in inorganic nutrients that the nutrient levels and characteristics of each stream could be easily determined. Through AGPT, 63.6% of growth was observed in the average values of each stream, with non-growth accounting for 36.4%. AGPT results showed that 40.9% of the 22 stations were in hypertrophic condition and 54.5% in eutrophic condition. AGPT values were significantly correlated with TIN, NH₄, and SRP ($p < 0.001$); compared to other nutrients, however, they were more related to SRP and NH₄. Moreover, the values increased with high concentration of N and P and low N/P ratios. Nonetheless, the values were more dependent on P concentration than N concentration. This suggests that the effect of P on the water quality of lake situated in downstream may serve as a potential indicator of phytoplankton development. Depending on the drainage pattern of streams, the wastewaters of wastewater treatment plant (WwTP) and untreated wastewater (UTW) were found to have 53.4% and 46.6%, respectively, of TIN, 51.9% and 48.1% of NH₄, 62.9% and 37.1% of NO₃, 62.6% and 37.4% of SRP, and 44.1% and 55.9% of SRSi. The AGPT value was 51.1% in WwTP wastewater and 48.9% in UTW wastewater, the concentration of WwTP wastewater was slightly higher. For untreated wastewaters flowing into the constructed wetland and into the lake, TIN accounts for 43.0% and 57.0%, respectively, of nitrogen components, NH₄ 44.4% and 55.6%, NO₃ 39.6% and 60.4%, SRP 53.5% and 46.5%, and SRSi 52.3% and 47.7%, respectively. The AGPT value was 58.0% in the constructed wetland and 42.0% in Lake Shihwa; the concentration in streams flowing into the wetland was slightly higher. Therefore, persistent and large development of phytoplankton in Lake Shihwa cannot be prevented unless a measure to phytoplankton control is implemented. This is because the concentration of nutrients in specific streams flowing into the lake is very high, even though the inflow of water is low.

Key words : water quality, algal growth potential test (AGPT), stream, lake, nitrogen,

* Corresponding author: Tel: (02) 450-3748, Fax: (02) 456-5062, E-mail: sjhwang@konkuk.ac.kr

하천과 호수의 유역을 중심으로 볼 때, 하천의 상류에서 하류로 갈수록 유역 면적이 확장됨과 동시에 물 이용에 대한 배수량이 증가하게 되고 (Thornton *et al.*, 1990; Wetzel, 2001), 도시화와 인구 과밀화는 오염원의 규모를 발달시키게 하는 중요한 요인이 된다 (OECD, 1982; UN, 1992; 신 등, 2001). 따라서, 이들 하천으로부터 유출되는 수질이 고농도일 때, 하류에 위치한 호수는 부영양화의 과정을 필연적으로 겪게 되고, 수중 생태계에 다양한 변화를 수반하는 심각한 결과를 초래하게 된다. 이러한 결과는 무엇보다도 영양염의 과잉 공급으로 인한 호수의 하천 유입부에서 만성적인 식물플랑크톤의 대발생 현상이 대표적인 예가 될 수 있다 (신 등, 2000a, b).

시화호는 연안을 인접하고 있고, 10년전 농경지와 농공용수의 확보를 목적으로 간척 활동에 의해 인위적으로 조성되었으나, 담수호의 기능은 실패하여 현재는 국내 최대의 기수호 (brackish-water lake)에 해당한다 (신 등, 2000a, b). 담수 초기부터 1997년 7월 하순까지 수질 부영양화는 극심하였고, 이후 호수의 수질 개선을 위하여 갑문을 통해 조석에 따라 해수 교환이 현재까지 주기적으로 이루어지고 있다. 또한, 유역은 수도권의 중소 위성도시가 형성되어 있고, 공단 중심의 산업단지가 포함되어 있다. 따라서 생활 및 공단 하폐수의 발생량이 많고, 오염도가 매우 우려되는 지역으로 볼 수가 있다. 반면에, 호수의 수질개선대책 일환으로 호수로 유입되던 하천수가 2000년부터 배수 패턴을 달리하여 하수처리장과 인공습지에서 상당량 수처리가 이루어지고 있고, 현재 미처리된 일부 하수가 하천을 통해 호수로 직접 유입되는 실정에 있다. 따라서 효과적인 호수 관리를 위해서는 이에 대한 평가가 추가적으로 선행될 필요가 있을 것으로 본다.

시화호와 유역하천을 통해 수환경 연구는 다양한 분야에서 많은 연구가 있었으나, 배수 구조별 수질 평가는 거의 없었다. 따라서, 본 연구는 해수 교환 이후에도 호수의 중상류 또는 전수역에서 시공간적으로 식물플랑크톤의 발생이 여전히 문제가 되고 있어, 우선적으로 갈수기에 호수로 유입되는 하천수의 잠재적 영향을 파악하기 위해 수중 영양염과 AGPT를 중심으로 유입하천의 비옥도를 비교하였다. 이에 대한 연구 결과는 향후 호수 및 유역 관리에 유용한 자료로 활용되기를 기대한다.

시화호 유역 (126° 31'E ~ 127° 00'E, 37° 11'N ~ 37° 23'N)은 서해안 경기만과 아산만 사이에 위치하고 있다 (Fig. 1). 하천의 유로 연장은 10 km 내외로 짧고, 이에 반해 하천의 폭은 비교적 넓은 편이다. 유역면적은 420.0 km² (88.1%)이고, 호수 면적은 56.5 km² (11.9%)으

로써 총 면적은 476.5 km²이다. 또한, 유역면적 중에서 내륙 면적은 249.0 km² (총 면적의 52.0%에 해당)으로써, 농경지가 36.1%, 임야가 40.8%, 주거지 및 공공지가 23.1%를 차지하고 있다. 유역내 인구는 60만명 (2001년 기준)이 거주하고 있다.

유역에 위치한 주요 하천은 신길천, 화정천, 안산천, 구룡천, 반월천, 동화천, 삼화천 및 문산천의 자연 하천이 7개 있고, 인공하천 (수로)은 시화간선수로, 임시차집수로, 반월토구, 반월외곽수로, 본오배수구 및 구룡천 등 16개가 위치하고 있다. 이 중에서 대부분의 하천이 개방천이나 반월토구는 콘크리트의 복개천으로서 전량 하수처리장으로 송수되고 있다. 반면에, 반월천, 동화천 및 삼화천은 시화호 상류에 조성된 인공 습지로 유입된 후 수처리되어 호수로 최종 배수되며, 그 외 하천수는 하구에서 호수로 직접 유입되고 있다. 또한, 본오배수구는 다른 하천에 비해 유량이 매우 적었다. 시화호 유역에서 2001년 기준으로 과거 10년의 기후자료로 본 평균 강수량은 12~4월동안 연 강수량의 12%를 차지하여 전형적인 갈수기에 속하였다 (기상청, 2001).

시화호 유역의 유입하천과 수로를 대상으로 한 조사는 2001년 12월부터 2002년 4월까지 월 1회 수행되었다. 조사 지점은 시화간선수로 (SHG) 1~4의 4개 지점, 반월토구 (PAT) 1~7의 7개 지점과 임시차집수로 (TGW), 신길천 (SHI), 반월외곽수로 (PAW), 화정천 (HWA), 안산천 (ANS), 구룡천 (KUR), 화정천과 안산천 합류 후 하류 지점 (HWA+ANS), 본오배수구 (PON), 반월천 (PAN), 동화천 (TON) 및 삼화천 (SAM)의 각 1개 지점으로 총 22개 이었고, 하천과 수로의 최하류에서 시료를 채수하였다.

수질분석과 AGPT를 위한 시료는 하상의 중앙에서 직접 채수하였고, 아이스 박스에 담아 실험실로 운반 후 즉시 여과 전처리 하였다. 수중 N·P 및 Si 무기영양염은 시료를 Whatman GF/F에 여과한 후 Strickland and Parsons (1972)와 APHA *et al.* (1995)의 방법에 따라 각각 분석하였다. NH₄는 phenol-alcohol 용액, sodium nitroprusside, sodium citrate 및 sodium hypochlorite을 혼합한 시약으로 비색 정량하였다. NO₃는 시료를 Cu로 코팅 충전된 Cadmium column에 통과시켜 NO₃를 NO₂로 환원 후, sulfanilamide와 N-(1-naphthyl)-ethylenediamine dihydrochloride (NED)시약으로 발색시켜 정량하였다. 용존 무기인 (soluble reactive phosphorus, SRP)은 ammonium molybdate와 potassium antimonyl tartrate를 처리하여 Sb-phosphomolybdate 복합체로 환원시키고, ascorbic acid로 비색 정량하였다. 용존 규소 (Soluble reactive silicon, SRSi)는 ammonium paramoly-

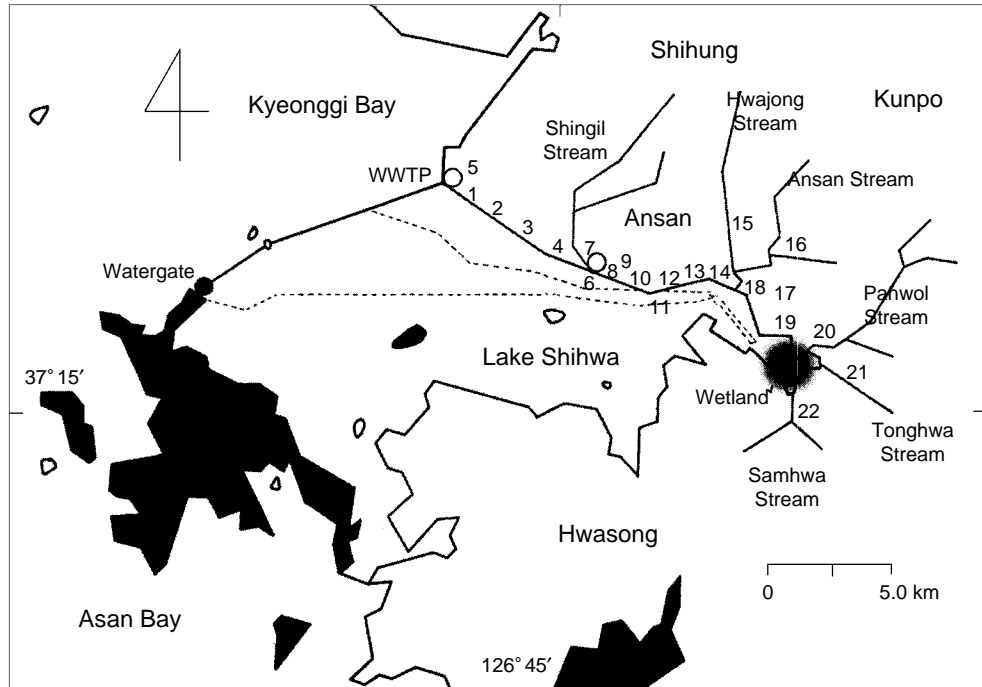


Fig. 1. Map showing sampling locations for water quality and algal growth potential test (AGPT) in Lake Shihwa Watershed and its streams. Numerics indicate the sampling streams as follow: 1 (SHG-1), 2 (SHG-2), 3 (SHG-3), 4 (SHG-4), 5 (TGW), 6 (SHI), 7 (PAT-7), 8 (PAT-6), 9 (PAT-5), 10 (PAT-4), 11 (PAT-3), 12 (PAT-2), 13 (PAT-1), 14 (PAW), 15 (HWA), 16 (ANS), 17 (KUR), 18 (HWA+ANS), 19 (PON), 20 (PAN), 21 (TON), and 22 (SAM), respectively.

Table 1. Mean (\pm SD) values of environmental factors in the stream water of the Lake Shihwa Watershed during December 2001 to April 2002.

Factors	Mean	Maximum	Minimum
Total inorganic nitrogen ($\mu\text{g N/l}$)	3,262.6 \pm 1,524.2	5,670.4	57.0
Ammonium ($\mu\text{g N/l}$)	2,914.6 \pm 1,428.8	4,941.4	57.0
Nitrate ($\mu\text{g N/l}$)	379.0 \pm 251.7	729.0	0.0
Soluble reactive phosphorus ($\mu\text{g P/l}$)	286.0 \pm 723.5	4,356.7	0.0
Soluble reactive silicon ($\mu\text{g Si/l}$)	1,887.9 \pm 2,014.1	14,094.7	186.7
TIN/SRP ratio	15,294 \pm 18,808	50,930	1.1
Algal growth potential test (mg dw/l)	29.5 \pm 46.0	145.0	0.0

bdate로 silicomolybdate를 형성시킨 후, oxalic acid를 첨가하여 측정하는 sodium molybdate법으로 정량하였다. 총무기질소 (total inorganic nitrogen, TIN)는 NH_4 와 NO_3 의 총량으로 계산하였다.

하천수의 비옥도를 평가하기 위해 algal growth potential test (AGPT)에 사용된 시험조류는 표준종으로 사용되고 있는 남조류 *Microcystis aeruginosa* Kütz를 선택하였다 (APHA *et al.*, 1995). *M. aeruginosa*는 조체를 채집하여 단세포를 manipulator로 분리 배양하였고,

MA 배지 (Watanabe, 1996)에서 전배양하였다 (신과 조, 2000). Membrane filter (0.45 μm , Millipore)로 여과한 원수에 P-starvation시킨 *M. aeruginosa*를 ml당 1×10^3 세포가 되도록 접종하였다 (Claesson and Forsberg, 1978; APHA *et al.*, 1995; 신, 1998). AGPT는 duplicate로 하였고, 접종된 시료는 7일 동안 배양한 후 600 nm 파장에서 흡광도를 측정하였으며, 최종적으로 건중량 (mg dw/l)으로 산출하였다 (신, 1998). 배양 온도는 25°C의 항온을 유지하였고, 광은 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 24시간 연속

조사하였으며, 배양구는 100~110 rpm으로 회전시켰다. 자료의 상관분석은 SYSTAT® 8.0 (SPSS, 1998) 프로그램을 이용하였다.

시화호 유역의 주요 하천에서 갈수기(12~4월)동안에 측정된 질소 함량 중 TIN의 평균 농도는 3,262.6 µg N/l 이었고, 최대값은 5,670.4 µg N/l, 최소값은 57.0 µg N/l이었다(Table 1). SHG (1)~SHG (4)는 평균값과 범위가 각각 3,559.5 µg N/l, 881.5~5,093.0 µg N/l이었고, TGW는 4,344.5 µg N/l, 4,076.7~4,612.2 µg N/l, SHI는 4,144.9 µg N/l, 3,188.8~4,978.2 µg N/l, PAT (1)~PAT (7)은 3,792.4 µg N/l, 1,768.1~5,509.2 µg N/l, PAW는 1,414.5 µg N/l, 338.1~2,577.1 µg N/l, HWA는 4,912.4 µg N/l, 4,782.6~5,042.2 µg N/l, ANS는 3,308.9 µg N/l, 3,080.9~3,536.8 µg N/l, KUR은 4,559.3 µg N/l, HWA+ANS는 2,820.0 µg N/l, 1,805.4~3,608.0 µg N/l, PON은 2,102.9 µg N/l, PAN은 4,394.9 µg N/l, 3,621.8~4,693.9 µg N/l, TON은 2,555.7 µg N/l, 686.4~4,766.6 µg N/l 및 SAM은 928.9 µg N/l, 57.0~3,333.1 µg N/l이었다(Fig. 2A). 유입 하천 중에서 SHG, TGW, PAT, HWA, KUR 및 PAN은 유역 하천의 평균 농도를 초과하는 수준이었다.

NH₄는 평균 농도가 2,914.6 µg N/l이었고, 최대값은 4,941.4 µg N/l, 최소값은 57 µg N/l이었다(Table 1). SHG (1)~SHG (4)는 평균값과 범위가 각각 3,123.5 µg N/l, 570.2~4,570.2 µg N/l이었고, TGW는 2,386.4 µg N/l, 1,309.0~3,463.7 µg N/l, SHI는 3,997.5 µg N/l, 3,188.8~4,535.9 µg N/l, PAT (1)~PAT (7)은 3,220.2 µg N/l, 1,511.8~4,810.8 µg N/l, PAW는 1,391.9 µg N/l, 302.2~2,577.1 µg N/l, HWA는 4,735.2 µg N/l, 4,529.0~4,941.4 µg N/l, ANS는 2,910.5 µg N/l, 2,865.8~2,955.1 µg N/l, KUR은 4,556.5 µg N/l, HWA+ANS는 2,711.1 µg N/l, 1,443.1~3,608.0 µg N/l, PON은 2,102.9 µg N/l, PAN은 4,214.6 µg N/l, 3,621.8~4,693.9 µg N/l, TON은 2,310.2 µg N/l, 416.7~4,295.3 µg N/l 및 SAM은 921.3 µg N/l, 5.7~3,333.1 µg N/l이었다(Fig. 2B). 이 중에서 HWA가 가장 높았고, SAM이 비교적 낮은 농도를 보였다.

NO₃는 평균 농도가 379.0 µg N/l이었고, 최대값은 729.0 µg N/l, 최소값은 0 µg N/l이었다(Table 1). SHG (1)~SHG (4)는 평균값과 범위가 각각 463.5 µg N/l, 66.7~729.0 µg N/l이었고, TGW는 458.1 µg N/l, 303.2~613.0 µg N/l, SHI는 442.3 µg N/l, PAT (1)~PAT (7)은 556.5 µg N/l, 146.1~698.4 µg N/l, PAW는 65.0 µg N/l, 18.4~100.8 µg N/l, HWA는 189.7 µg N/l, 125.8~253.6 µg N/l, ANS는 671.0 µg N/l, KUR은 2.8 µg N/l, HWA

+ANS는 217.8 µg N/l, 73.2~362.3 µg N/l, PON은 0 µg N/l, PAN은 359.8 µg N/l, 85.5~634.0 µg N/l, TON은 327.3 µg N/l, 241.0~471.3 µg N/l 및 SAM은 10.1 µg N/l, 0~18.6 µg N/l이었다(Fig. 2C). 이 중에서 ANS가 가장 높았고, SAM이 가장 낮은 농도를 보였다.

유입하천에서 N은 공간적으로 차이가 컸을 뿐만 아니라 풍부하였다. 소유역 또는 하천별로 볼 때, N의 변동 폭이 크고 작은 하천이 뚜렷하게 구분될 수 있었고, 하천의 영양염 수준과 특성을 파악하는데 유용하였다. TIN 성분 중에서 NH₄와 NO₃는 SHG (1)~SHG (4)에서 각각 87.8%, 12.2%이었고, TGW에서 54.9%, 45.1%, SHI에서 96.4%, 3.6%, PAT (1)~PAT (7)에서 84.9%, 15.1%, PAW에서 98.4%, 1.6%, HWA에서 96.4%, 3.6%, ANS에서 88.0%, 12.0%, KUR에서 99.9%, 0.1%, HWA+ANS에서 96.1%, 3.9%, PON에서 100%, 0%, PAN에서 95.9%, 4.1%, TON에서 90.4%, 9.6% 및 SAM에서 99.2%, 0.8%를 차지하였으며, 대다수 하천에서 NO₃ (r = 0.393, p < 0.001)보다 NH₄ (r = 0.926, p < 0.001)의 비중이 월등히 높았다.

SRP는 평균 농도가 286.0 µg P/l이었고, 최대값은 4,356.7 µg P/l, 최소값은 0 µg P/l이었다(Table 1). SHG (1)~SHG (4)는 평균값과 범위가 각각 18.8 µg P/l, 0~108.2 µg P/l, TGW는 2,178.4 µg P/l, 0~4,356.7 µg P/l, SHI는 366.6 µg P/l, 0~879.4 µg P/l, PAT (1)~PAT (7)은 535.3 µg P/l, 0~2,229.4 µg P/l, PAW는 50.2 µg P/l, 3.6~149.1 µg P/l, HWA는 284.7 µg P/l, 140.0~429.4 µg P/l, ANS는 0 µg P/l, KUR은 752.1 µg P/l, HWA+ANS는 30.6 µg P/l, 0~87.0 µg P/l, PON은 0 µg P/l, PAN은 996.8 µg P/l, 676.4~1,326.4 µg P/l, TON은 69.6 µg P/l, 0.6~220.3 µg P/l 및 SAM은 7.7 µg P/l, 0~30.9 µg P/l이었다(Fig. 2D). TGW, PAW, KUR 및 PAN의 SRP 농도는 유역 평균 농도보다 월등히 상회하였고, 특히 TGW와 PAN은 각각 5.6배, 2.6배를 초과하는 수준이었다.

SRSi는 평균 농도가 1,887.9 µg Si/l이었고, 최대값은 14,094.7 µg Si/l, 최소값은 186.7 µg Si/l이었다(Table 1). SHG (1)~SHG (2)는 평균값과 범위가 각각 830.4 µg Si/l, 236.0~1,763.1 µg Si/l, TGW는 1,782.0 µg Si/l, 667.8~2,896.1 µg Si/l, SHI는 6,381.5 µg Si/l, 2,387.0~14,094.7 µg Si/l, PAT (1)~PAT (7)은 1,639.0 µg Si/l, 697.4~3,206.4 µg Si/l, PAW는 1,807.3 µg Si/l, 186.7~3,497.0 µg Si/l, HWA는 2,575.9 µg Si/l, 2,321.3~2,830.4 µg Si/l, ANS는 3,021.7 µg Si/l, 2,748.3~3,295.1 µg Si/l, KUR은 2,321.3 µg Si/l, HWA+ANS는 1,160.9 µg Si/l, 198.2~1,976.5 µg Si/l, PON은 2,058.6 µg Si/l, PAN은

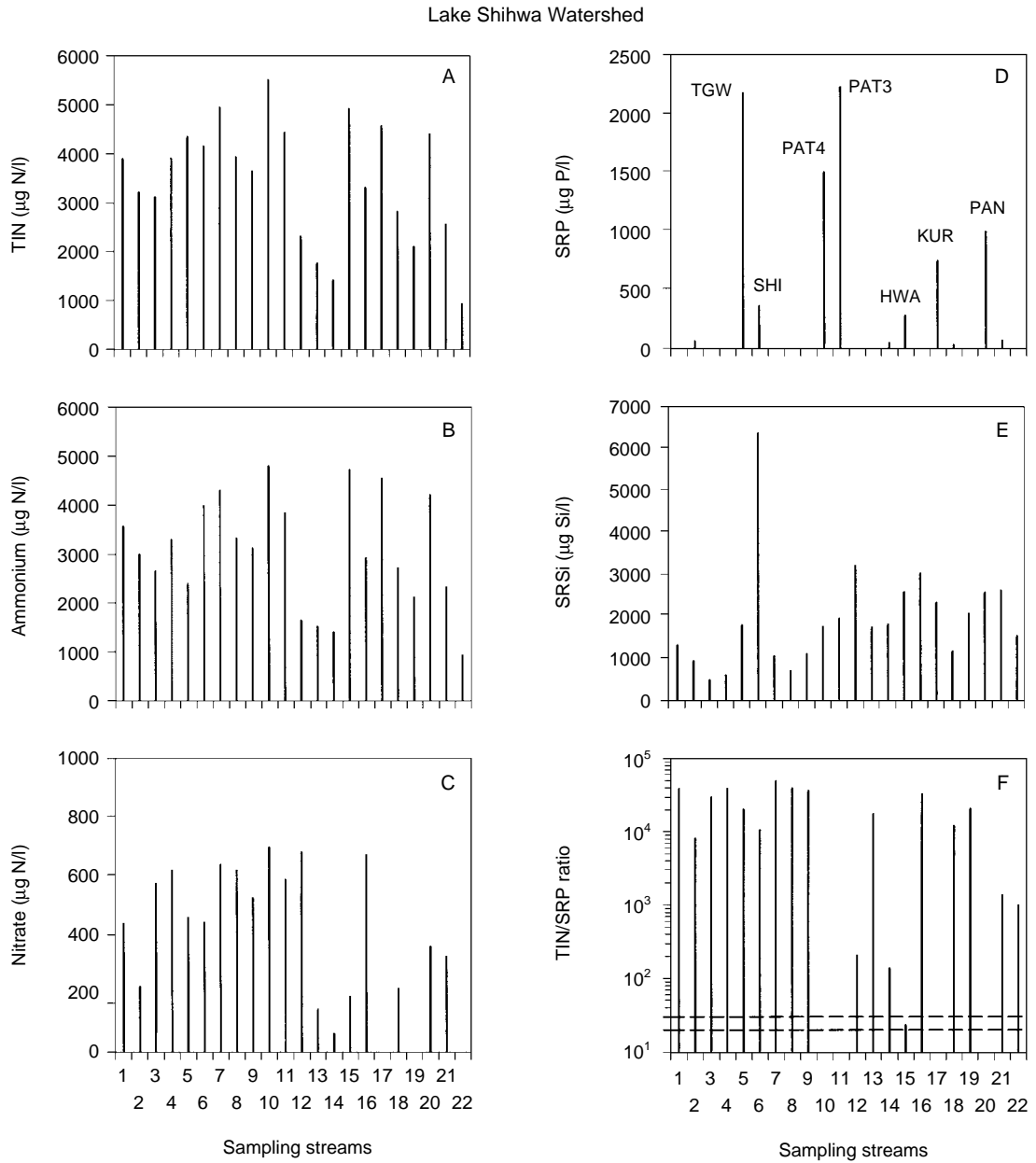


Fig. 2. Spatial distribution of mean values of inorganic nutrients and N/P ratio in the streams of Lake Shihwa Watershed during December 2001 to April 2002. Numerics of scatter plot indicate as follow: 1 (SHG-1), 2 (SHG-2), 3 (SHG-3), 4 (SHG-4), 5 (TGW), 6 (SHI), 7 (PAT-7), 8 (PAT-6), 9 (PAT-5), 10 (PAT-4), 11 (PAT-3), 12 (PAT-2), 13 (PAT-1), 14 (PAW), 15 (HWA), 16 (ANS), 17 (KUR), 18 (HWA+ANS), 19 (PON), 20 (PAN), 21 (TON), and 22 (SAM), respectively.

2,557.8 µg Si/l, 1,730.2~3,011.0 µg Si/l, TON은 2,612.8 µg Si/l, 403.4~4,413.3 µg Si/l 및 SAM은 1,527.1 µg Si/l, 452.9~3,556.2 µg Si/l이었다 (Fig. 2E). 수중 Si는 N과 P 영양염이 충분할 때, 규조류의 성장을 조절할 수 있는 영양염 요인으로 작용할 수 있다 (신 등, 2001). 시화호 유역 하천에서 평균 농도로 볼 때, Si가 풍부한 편이

서 호수에서 계절에 따라 규조류의 발생에 잠재적 영향을 제공할 것으로 추정되었다.

N/P 비율은 평균값이 15,294이었고, 최대값과 최소값은 각각 50,930과 1.1이었다 (Table 1). SHG (1)~SHG (4)의 평균값 (범위)은 29,026.0 (139~50,930.0), TGW는 20,384.1 (1.1~40,767.0), SHI는 10,637.7 (5.7~31,888.0),

PAT (1)~PAT (7)은 20,448.1 (2.0~49,478.0), PAW는 139.1 (16.7~486.8), HWA는 23.0 (11.7~34.2), ANS는 33,088.5 (30,809.0~35,368.0), KUR은 6.1, HWA+ANS는 12,114.6 (41.5~30,283.0), PON은 21,029.0, PAN은 4.7 (3.5~6.9), TON은 1,352.0 (21.6~5,223.0) 및 SAM은 983.0 (107.9~2,005.0)이었다 (Fig. 2F). N과 P의 비율은 상대적으로 단순 비교로 볼 수 있다. 시화호 유역 하천을 대상으로 수질 분석에 의한 제한 영양염을 평가한 결과, 대부분 20 이상으로 P제한에 해당하였다 (Porcella and Bishop, 1975). 다른 하천에 비해 HWA, KUR 및 PAN이 낮은 편이었고, 이 중에서 KUR과 PAN은 10이하로써 강한 N제한을 야기할 수 있는 하천에 해당하였다 (Fig. 2F).

AGPT값은 평균 농도가 29.5 mg dw/l이었고, 최대값은 145.0 mg dw/l, 최소값은 0 mg dw/l이었다 (Table 1). SHG (1)~SHG (2)의 AGPT 평균값 (범위)은 6.0 mg dw/l (0~35.2 mg dw/l), TGW는 63.2 mg dw/l (0~126.3 mg dw/l), SHI는 65.0 mg dw/l (0~122.2 mg dw/l), PAT (1)~PAT (7)은 36.0 mg dw/l (0~145.0 mg dw/l), PAW는 15.9 mg dw/l (0.3~48.9 mg dw/l), HWA는 81.8 mg dw/l (45.9~117.6 mg dw/l), ANS는 0 mg dw/l, KUR은 124.9 mg dw/l, HWA+ANS는 9.8 mg dw/l (0~28.2 mg dw/l), PON은 0 mg dw/l, PAN은 108.0 mg dw/l (86.7~124.9 mg dw/l), TON은 22.5 mg dw/l (0~72.7 mg dw/l) 및 SAM은 2.4 mg dw/l (0~9.5 mg dw/l)이었다 (Fig. 3). 하천별 AGPT의 평균값에서 63.6%가 생장이 관찰된 반면에, 36.4%가 무생장한 경우에 해당하였다.

시화호 유역에서 AGPT에 의한 수질은 10 mg dw/l 이상을 부영양 상태 (Sudo, 1980), 20 mg dw/l 이상을 과영양 상태 (Miller *et al.*, 1974)로 볼 때, 22개 정점 중 54.5%가 10 mg dw/l보다 낮았고, 부영양은 4.5%, 과영양 상태는 40.9%를 차지하였다. 부영양~과영양 상태의 수질을 보인 하천은 SHG (2), TGW, SHI, PAT (3), PAT (4), PAW, HWA, KUR, PAN 및 TON이었다 (Fig. 3). AGPT의 결과로부터, 시화호에서 식물플랑크톤의 발생에 대한 하천수의 영향을 비교 평가함에 있어 인공습지에 의한 수처리를 고려하더라도, TGW, SHI, HWA 및 KUR 유역은 더욱 세심한 관리가 필요한 하천으로 지적될 수 있었고, 향후 단순 수질 농도 뿐만 아니라 유량을 포함한 총량으로써 그 규모를 보다 정확하게 규명하는 것이 중요한 과제라고 하겠다.

시화호 유역 하천의 22개 정점을 대상으로 영양염 요인과 AGPT의 관련성을 본 것은 Fig. 4와 같다. AGPT 결과에서, N 또는 P 농도가 높은 특정 하천을 제외하고

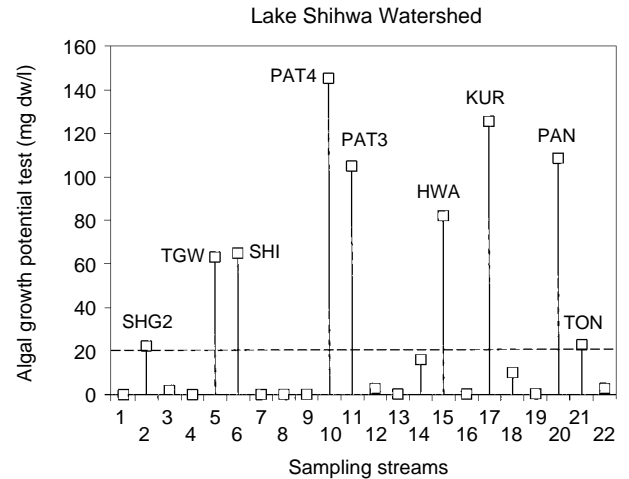


Fig. 3. Spatial distribution of mean values of algal growth potential test (AGPT) in the streams of Lake Shihwa Watershed during December 2001 to April 2002. Dotted lines indicate criterion of hypertrophic level as 20 mg dw/l. Numerics of scatter plot indicate as follow: 1 (SHG-1), 2 (SHG-2), 3 (SHG-3), 4 (SHG-4), 5 (TGW), 6 (SHI), 7 (PAT-7), 8 (PAT-6), 9 (PAT-5), 10 (PAT-4), 11 (PAT-3), 12 (PAT-2), 13 (PAT-1), 14 (PAW), 15 (HWA), 16 (ANS), 17 (KUR), 18 (HWA+ANS), 19 (PON), 20 (PAN), 21 (TON), and 22 (SAM), respectively.

는 편차가 적었을 뿐만 아니라 거의 유사하여 밀집되는 분포를 나타냈고, 그 값은 수중 무기 영양염에 대한 관련성이 매우 뚜렷하였다. 무생장구를 제외한 AGPT는 TIN ($r = 0.860$), NH_4 ($r = 0.859$), SRP ($r = 0.698$)와 유의한 상관관이 관찰되었고 ($p < 0.001$, $n = 22$), 다른 영양염에 비해 SRP와 NH_4 에 대한 관련성이 더욱 컸다. N과 P의 농도가 높을수록 AGPT는 비례하여 증가하였고, NO_3 ($r = 0.177$, $p < 0.001$)와는 부분적으로 관련성이 관찰되었으나 NH_4 에 비해 상대적으로 낮았다. 또한, N/P 비가 낮을수록 AGPT는 증가하였는데, 이것은 N보다 P 농도에 더욱 의존적이었고 (N 제한성), 현재의 P 농도에 N의 수준이 증가할 때 AGPT의 규모는 더욱 커질 것으로 예상되었다. 따라서, 이러한 결과는 하류의 호수 수질에 미치는 P의 영향이 식물플랑크톤 발생에 대한 잠재력의 척도가 될 수 있음을 시사하였다.

시화호 유역 하천에서 배수 시스템에 따른 수질 농도의 평균값과 상대적 비율을 비교한 것은 Table 2와 같다. 하천과 수로 중에서 하수처리장 (wastewater treatment plant, WwTP)으로 차집 송수되는 부분 (반월토구)을 하수처리되어 해양으로 방류되는 WwTP 하수로 보았고, 그 외 나머지는 미처리 하수 (untreated wastewa-

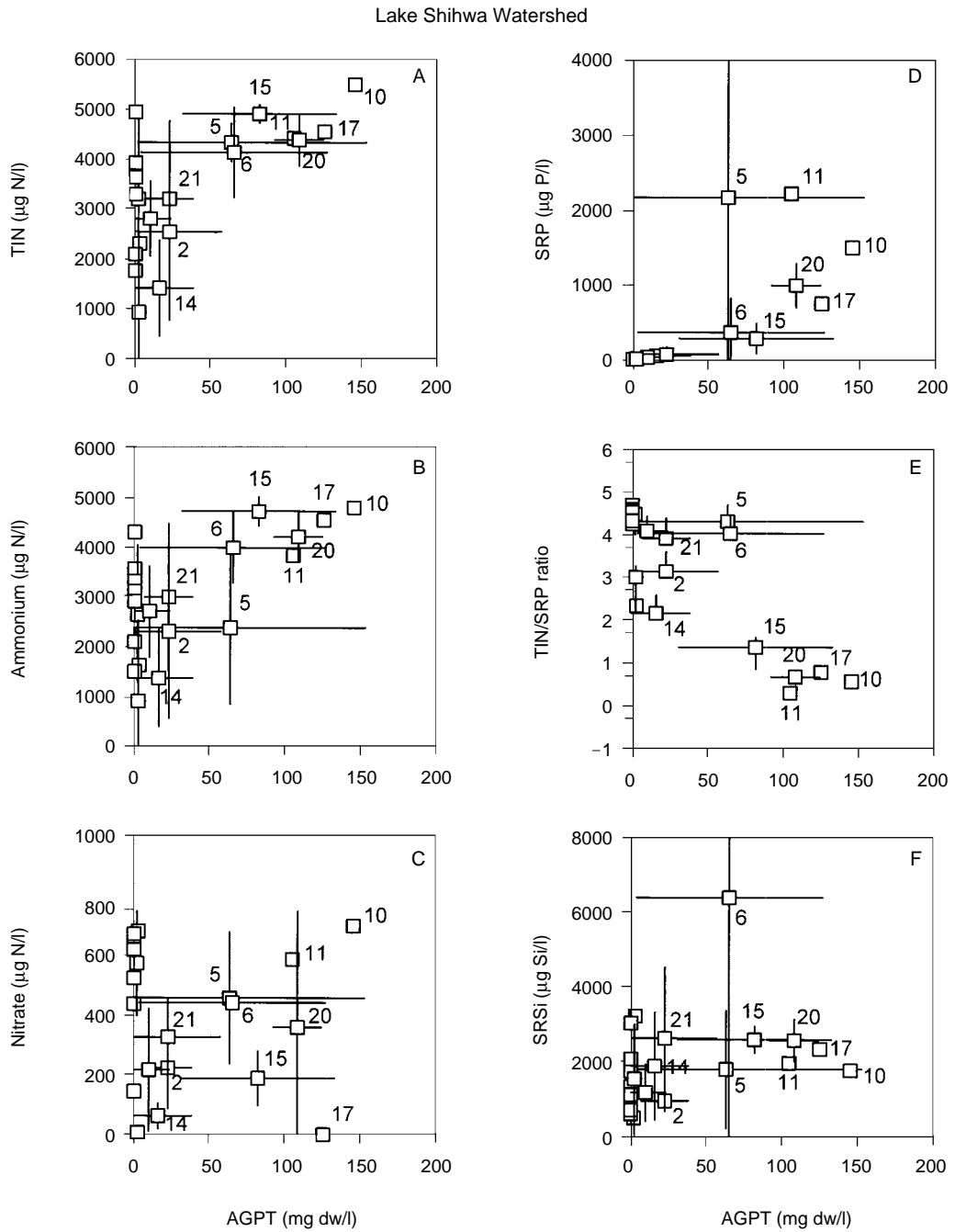


Fig. 4. Relationships between inorganic nutrients, N/P ratio and algal growth potential test values in the streams of Lake Shihwa Watershed during December 2001 to April 2002. Numerics of scatter plot indicate as follow: 2 (SHG-2), 5 (TGW), 6 (SHI), 10 (PAT-4), 11 (PAT-3), 14 (PAW), 15 (HWA), 17 (KUR), 20 (PAN), and 21 (TON), respectively.

ter, UTW)로 간주하였다. 또한, UTW하수는 인공 습지 (constructed wetland, CWL)로 공급되는 부분 (반월천, 동화천, 삼화천)과 시화호의 호수 (LAK)로 직접 유입되는 부분으로 구분하여 비교하였다. WwTP 하수와 UTW

하수에서 TIN은 각각 53.4%, 46.6%, NH_4 는 51.9%, 48.1%, NO_3 는 62.9%, 37.1%이었고, SRP는 62.6%, 37.4%, SRSi는 44.1%, 55.9%에 해당하였다. AGPT값은 WwTP 하수에서 51.1%, UTW 하수에서 48.9%로써

Table 2. Comparison of mean concentration of inorganic nutrients and algal growth potential test depending on the drainage systems in the stream water of the Lake Shihwa Watershed during December 2001 to April 2002. Numerics in parenthesis indicate relative abundance (%).

Factors\ Drainage systems	Total wastewater		Untreated wastewater	
	WwTP waste- water	UTW waste- water	Constructed wetland (CWL)	Lake Shihwa (LAK)
TIN (µg N/l)	3,792.4 (53.4)	3,315.0 (46.6)	2,626.3 (43.0)	3,487.1 (57.0)
Ammonium (µg N/l)	3,220.2 (51.9)	2,982.0 (48.1)	2,481.4 (44.4)	3,107.2 (55.6)
Nitrate (µg N/l)	556.5 (62.9)	328.4 (37.1)	232.4 (39.6)	354.6 (60.4)
SRP (µg P/l)	535.3 (62.6)	320.4 (37.4)	358.0 (53.5)	311.5 (46.5)
SRSi (µg Si/l)	1,639.0 (44.1)	2,075.2 (55.9)	2,232.6 (52.3)	2,035.9 (47.7)
AGPT (mg dw/l)	36.0 (51.1)	34.5 (48.9)	44.3 (58.0)	32.1 (42.0)

※ TIN: total inorganic nitrogen, SRP: soluble reactive phosphorus, SRSi: soluble reactive silicon, AGPT: algal growth potential test

WwTP 하수의 농도가 조금 높았다.

또한, 인공습지와 호수로 유입되는 미처리된 하수의 질소 성분 중 TIN은 각각 43.0%, 57.0%. NH₄는 44.4%, 55.6%, NO₃는 39.6%, 60.4%이었고, SRP는 53.5%, 46.5%, SRSi는 52.3%, 47.7%이었다. AGPT값은 CWL에서 58.0%, LAK에서 42.0%로써 LAK보다 CWL이 0.4배 정도 높은 농도를 보였다. 비록, 시화호로 유입되는 부분이 적다고 할지라도 특정 하천의 유입수 농도가 고농도이기 때문에 이에 대한 대책 마련 없이는 호수의 식물플랑크톤 발생에 대한 그 영향을 배제할 수 없을 것으로 판단되었다.

인 용 문 헌

기상청. 2001. <http://www.kma.go.kr>, 기후자료: 1991-2000 인천, 수원 강수량.
 신재기, 김동섭, 조경제. 2000a. 시화호에서 무기영양염과 식물플랑크톤의 동태. 한국육수학회지 **33**: 109-118.
 신재기, 김동섭, 조경제. 2000b. 시화호에서 해수유입 전·후

의 수환경 요인과 식물플랑크톤의 동태. 한국환경과학회지 **9**: 115-123.
 신재기, 이옥희, 황순진, 조경제. 2001. 경안천에서 하수처리수와 생하수에 대한 algal bioassay. 한국육수학회지 **34**: 192-198.
 신재기, 조경제. 2000. 금강 중·하류에서 AGP에 의한 수질 평가. 한국육수학회지 **33**: 244-250.
 신재기. 1998. 낙동강 부영양화에 따른 담수조류의 생태학적 연구. 인제대학교 박사학위논문. 202pp.
 APHA, AWWA, WEF. 1995. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 18th ed. American Public Health Association, Washington, DC.
 Claesson, A. and A. Forsberg. 1978. Algal assay procedure with one or five species. *Minitest. Mitt. Internat. Verein. Limnol.* **21**: 21-30.
 Miller, W.E., T.E. Maloney and J.C. Greene. 1974. Algal productivity in 49 lake waters as determined by algal assays. *Wat. Res.* **8**: 667-679.
 OECD. 1982. Eutrophication of Waters: Monitoring, Assessment and Control. Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, France. 154pp.
 Porcella, D.B. and A.B. Bishop. 1975. Comprehensive management of phosphorus water pollution. Ann. Arbor. Science, Ann. Arbor, Mich. 303pp.
 SPSS. 1998. SYSTAT® 8.0 statistics. SPSS Inc., Chicago, USA. 1086pp.
 Strickland, J.D. and T.R. Parsons. 1972. A Practical Handbook of Seawater Analysis. Bulletin of Fisheries Research Board of Canada. No. 167. 310pp.
 Sudo, R. 1980. Studies on the water-blooms in lake Kasumigaura. *Jpn. J. Limnol.* **41**: 124-131.
 Thornton, K.W., B.L. Kimmel and F.E. Payne. 1990. Reservoir limnology: Ecological perspectives. John Wiley & Sons, Inc., New York, USA. 246pp.
 UN (United Nations). 1992. Protection of inland waters against eutrophication. New York, ECE/ENVWA/26. 29pp.
 Watanabe, M. 1996. Isolation, cultivation and classification of bloom-forming Microcystis in Japan. In, Watanabe, M.F., K. Harada, W.W. Carmichael and H. Fujiki. (eds). Toxic Microcystis. pp. 13-34. CRC Press, Boca Raton, London.
 Wetzel, R.G. 2001. Limnology: Lake and River Ecosystems. 3rd Edition. Academic Press, California, USA. 1006pp.
 (Manuscript received 10 July 2003, Revision accepted 20 August 2003)