

## 평택호와 유역 하천에서 조류성장잠재력측정

신 재 기\* · 황 순 진

(건국대학교 지역건설환경공학과)

Algal Growth Potential Test (AGPT) in the Stream-Reservoir System of the Pyeongtaek Reservoir Watershed, Korea. Shin, Jae-Ki\* and Soon-Jin Hwang (Department of Biological Systems Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea)

For a biological assessment of Pyeongtaek Reservoir and its major influent streams, an algal growth potential test (AGPT) was conducted with the blue-green algae *Microcystis aeruginosa* in March, June, September and December, 2000. The range and average value of AGPT were from 0 to 463 mg dw/l and 90 mg dw/l, respectively. For the influent streams in particular, the average value of AGPT was the highest in the Hwangguchi Stream (343 mg dw/l). It decreased to 158, 66, 29, 21, and 21 mg dw/l in the Sojong Stream, Songhwan Stream, Osan Stream, Chinwi Stream, and Ansong Stream, respectively. The AGPT values in the reservoir ranged from 0 to 138 mg dw/l (mean 54 mg dw/l) with a tendency to increase in the upstream, which was close to the influent streams. In general, the AGPT values decreased further in the downstream. Immediately after the abrupt increase in influent discharge in summer, the AGPT value in the downstream almost doubled due to the proliferation of blue-green algae. The water quality of Pyeongtaek Reservoir and its influent streams further deteriorated during the drought period. Similarly, the AGPT value was the highest during this period. The AGPT values showed the closest correlation with the content of P ( $r = 0.999$ ,  $p < 0.001$ ). Thus, it could be concluded that the content of P is highly effective in the growth of algae. In the Pyeongtaek Reservoir Watershed, the AGPT values varied in space and time. It was also closely related to the nutrient content of influent streams. The AGPT values revealed that the water quality state was hypertrophic ( $> 20$  mg dw/l). Thus, control of the aquatic environment is essential. AGPT is very useful in evaluating the fertility and pollution state of the water as well as determining the nutrients that limit the growth of algae.

Key words : algal growth potential test(AGPT), *Microcystis aeruginosa*, stream, reservoir, water quality, wastewater

### 서 론

하천의 수질은 유역의 기후와 토지 이용도 뿐만 아니라 도시화에 따른 인구 과밀현상과 점오염원의 위치에 따라 상·하류간에 매우 이질적인 양상을 보이게 된다

(신 등, 2000; 신 등, 2003a). 또한, 하천은 유역의 최종 배수로에 해당하여 오염된 도시하천은 하류의 저수지에 대한 하나의 점오염원 역할을 하고 있고, 하천의 오염도는 곧 저수지의 수질을 판단할 수 있는 척도가 될 수 있다 (Kennedy and Walker, 1990; 신 등, 2000; 신 등, 2003b). 하천과 저수지 생태계에서 수질 부영양화는 허

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

용환경용량의 초과로 인해 나타나는 현상으로써 과도한 영양염 유입에 의한 높은 생산성을 초래하는 것으로 볼 수 있다(OECD, 1982; 신, 1995; Wetzel, 2001; Kalff, 2002). 특히, 무기 P와 N의 오염도는 더욱 증가하여 담수조류의 이상증식에 대한 경제적, 사회적 영향은 더욱 가중되고 있을 뿐만 아니라 최근까지 이에 대한 실질적 대책이 미흡하여 오염 양상이 완화될 수 있는 진전이 적거나 가능성이 희박한 실정에 있다(신 등, 2000; 신 등, 2003b).

평택호는 유역관리의 미비로 인해 담수 초기부터 수질 악화가 초래된 전형적인 하구형 호수에 해당한다(황과 이, 1998). 유역에는 중소 도시가 발달되어 있고, 하천 주변에는 농경지가 넓게 분포하고 있다. 특히, 도시의 생활하수는 유역 하천을 통해 저수지로 최종 집수되는 전형적인 하천~저수지 시스템을 띠고 있다(신 등, 2003b). 또한, 저수지에 비해 유역면적이 매우 크고, 주요 하천의 중·하류부에는 유역에서 발생하는 하·폐수, 분뇨 및 매립장 침출수를 차집 처리하는 하수처리장이 위치하고 있어 하수처리수가 방류되는 하류부터 수질은 현저하게 악화되어 주된 상승 오염원으로 작용하고 있다(신 등, 2003b).

조류생장잠재력측정 (algal growth potential test, AGPT)은 시험조류를 이용하는 생물검정법의 일종으로 수체의 영양상태를 파악하는데 처음 사용되었고, 국외에서는 미국 환경보호청(EPA)을 중심으로 수질오염과 부영양화 문제를 해결하기 위해 1970년대 초반부터 폭넓게 적용되었다(Maloney *et al.*, 1973; Miller *et al.*, 1974; Lehmusluoto, 1978). 일반적으로, AGPT는 점 또는 비점 오염원의 영향을 비롯하여 수체의 비옥도(Miller *et al.*, 1974; Kotai *et al.*, 1978), 제한영양염(Goldman, 1978), 오·폐수 처리효율 및 중금속 독성 평가(Forsberg *et al.*, 1978) 등에 다양하게 활용되어 그 효용성과 자료의 신뢰성도 높다(Raschke and Schultz, 1987; Lhotsky and Marvan, 1988). 특히, 하천과 호수에 대한 하수처리수의 영향(EPA, 1971; Miller *et al.*, 1975; Greene *et al.*, 1975, 1977)과 하수처리 수준(Miller and Maloney, 1975)을 판단하고 결정하는데 유용할 뿐만 아니라 단순 수질분석에 비해 수환경의 종합적 평가(Raschke and Schultz, 1987)에 직접적인 효과와 그 기여도가 크다고 할 수 있다. 국내에서는 1990년대 이후 하천과 호수를 대상으로 AGPT가 지속적으로 이루어져 왔고, 수질 평가와 영양염의 상대적 결핍 및 하천과 호수 생태계를 포함하여 하수처리수의 영향을 밝히는데 주로 활용되었다(신과 조, 1999; 신과 조, 2000; 신 등, 2003a).

평택호 유역에서 수질에 관한 선행 연구는 초기 담수화 과정동안 환경평가(권, 1976; 홍 등, 1976)가 있었고, 최근에 수자원 보전과 유역관리(황과 이, 1998; 신과 전, 2002; 신 등, 2003b)를 위한 조사 연구가 있었다. 본 연구는 하천과 저수지의 시스템이 서로 다른 수환경에서 AGPT를 통해 수중 N·P 영양염의 수준을 파악하고, 생물검정으로 저수지에 대한 하천의 영향을 비교 및 평가하였으며, 국내 수질 기준에 대한 AGPT의 가능성을 제시하고자 하였다.

### 조사지 개황

본 연구 대상지인 평택호(Fig. 1)는 우리나라 서해 중부에 위치한 아산만(37° 00'N, 127° 00'E)의 중상류부를 가로질러 1970년 12월에 착공 후 1973년 12월에 준공된 인공호이다(홍 등, 1976; 황과 이, 1998). 저수지 최하류에 위치한 방조제의 총 길이는 2,564 m이고, 높이는 17 m이다. 유역면적은 40.4 km<sup>2</sup>이고, 저수면적은 0.6 km<sup>2</sup>

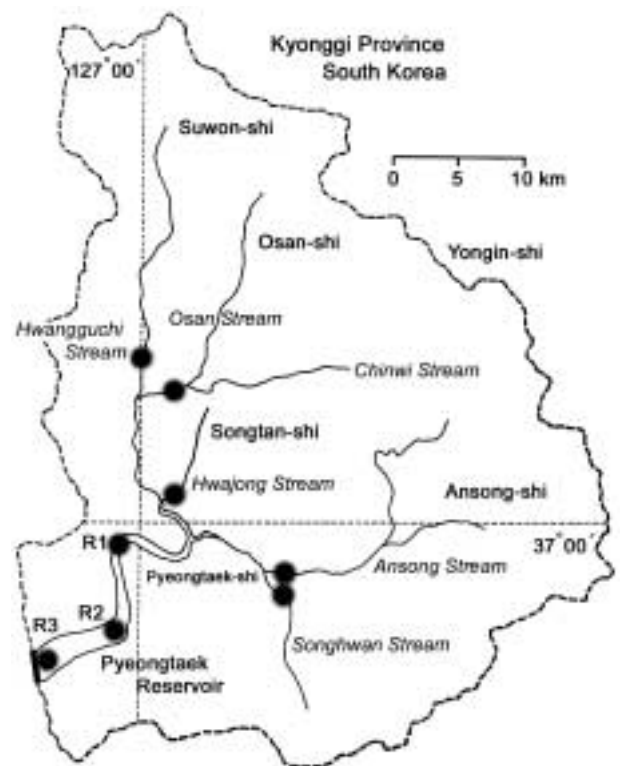


Fig. 1. Map showing sampling locations for water quality and algal growth potential test (AGPT) in the Pyeongtaek Reservoir Watershed.

으로써 그 비율은 67에 해당한다. 저수량은  $82,892 \times 10^3$   $m^3$ 이고, 평균 수심과 수리학적 체류시간은 각각 4.2~7.1 m, 25~34일이다. 수심은 하천 유입부인 상류에서 얇고, 배수갑문으로 갈수록 점차 깊어지는 완만한 호저 구조를 갖고 있다(신 등, 2003b).

평택호를 최종 집수역으로 하는 주요 유입하천은 황구지천, 진위천, 서정천, 안성천 및 성환천이 해당하고, 오산천은 진위천의 중류부에서 합류되며, 평택호로 유입되는 본류는 진위천과 안성천이다(Fig. 1). 각 하천은 소유역별로 중·상류에 중소 도시를 두고 있으며, 황구지천은 수원시, 오산천은 오산시, 진위천은 용인시, 서정천은 평택시와 화성시, 안성천은 안성시 및 성환천은 아산시를 중심으로 구분된다. 이들 하천은 유역에서 발생하는 각종 생활 하오수 및 농경지 유출수의 최종 배수로에 해당한다.

## 재료 및 방법

본 연구는 평택호와 유역 주요 하천을 대상으로 강수량을 고려하여 2000년 3월, 6월, 9월 및 12월에 4회 조사하였다. 조사 지점은 유입 하천인 황구지천(HWA), 오산천(OSA)-진위천(CHI) 합류 후, 서정천(SOJ), 안성천(ANS) 및 성환천(SON)의 최하류에서 각 1개 정점과 저수지의 상류(R1), 중류(R2) 및 하류(R3)에서 각 1개 정점으로 총 8개 지점으로 하였다(Fig. 1).

조류생장잠재력측정(AGPT)과 수질 분석을 위한 시료는 각 하천의 하류 지점 중앙에서 표층수를 직접 채수하였고, 저수지는 모터 보트를 이용하였다. 수중  $NH_4$ ,  $NO_3$ ,  $NO_2$  및 SRP(soluble reactive phosphorus) 영양염 농도는 시료를 Whatman GF/F filter로 여과한 후, Rump and Krist(1988)의 방법에 따라 분석하였다. Chl-a 농도는 90% ethanol을 용매로 하는 비등 추출법을 사용하였다(Nusch, 1980).

AGPT에 사용된 시험조류는 표준종으로 사용되고 있는 남조류 *Microcystis aeruginosa* Kütz를 선택하였다(APHA, 1995). 본 측정에 사용된 *M. aeruginosa*는 1998년 7월에 금강 하류에서 채집하여 단세포를 manipulator로 분리 배양하였고(신과 조, 2000), MA 배지(Watanabe, 1996)에서 전배양하였다. 생물검정은 membrane filter(0.45  $\mu m$ , Millipore)로 여과한 원수에 P-starvation시킨 조체를 최종적으로  $1.0 \times 10^3$  cells/ml 되도록 접종하였다(Claesson and Forsberg, 1978; APHA, 1992; 신, 1998). 배양온도는  $25 \pm 1^\circ C$ 의 항온을 유지하였

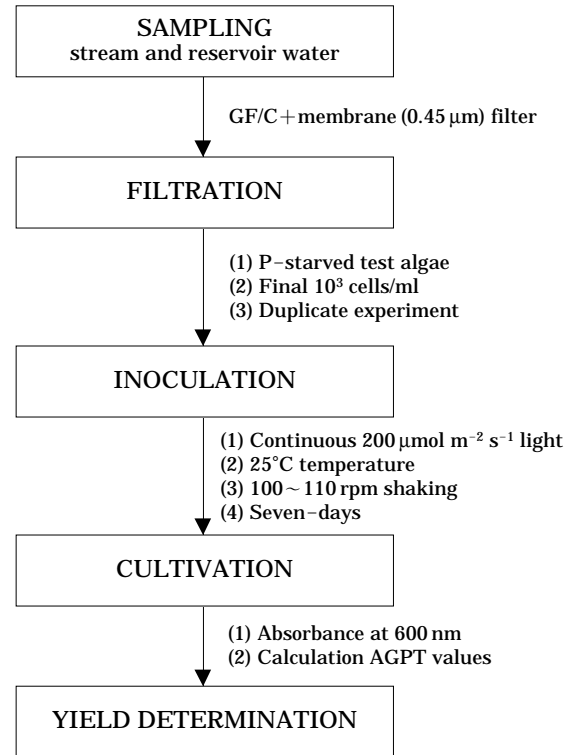


Fig. 2. Scheme for the algal growth potential test (AGPT) procedure to assess fertility of the stream and reservoir water.

고, 광은  $200 \mu mol m^{-2} s^{-1}$ 로 연속광으로 하였으며, 100~110 rpm 범위로 회전시켰다(Fig. 2). AGPT는 duplicate로 하였고, 접종한 시료는 7일 동안 배양한 후 600 nm 파장에서 흡광도를 측정하였으며, 최종적으로 단위 부피당 건중량(mg dw/l)으로 산출하였다(신, 1998). 자료의 상관분석은 SYSTAT® 8.0 프로그램(SPSS, 1998)을 이용하였다.

## 결 과

### 1. 수중 영양염과 조류 생물량

#### 1) 유역 하천

유입하천에서  $NH_4$ 의 범위와 평균값은 각각  $34.1 \sim 7,036.6 \mu g N/l$ ,  $3,305.0 \mu g N/l$ ,  $NO_3$ 는  $100.3 \sim 1,524.7 \mu g N/l$ ,  $868.7 \mu g N/l$ 이었고,  $NO_2$ 는  $30.7 \sim 494.7 \mu g N/l$ ,  $210.3 \mu g N/l$ 이었다(Table 1). 수중 무기질소에서  $NH_4$ 는  $NO_3$ 와  $NO_2$ 에 비해 각각 3.8배, 15.7배 높아  $NH_4$ 의 수준이 매우 높았고, 특정 하천에 의한 영향이 컸다. 하천의 평

**Table 1.** Mean ( $\pm$ SD) values of environmental factors in the watershed streams of Pyeongtaek Reservoir at March, June, September and December, 2000. Parenthesis indicate maximum and minimum values.

Factors/ Sampling Stream	Pyeongtaek Reservoir Watershed Streams				
	Hwangguchi	Osan+Chinwi	Sojong	Ansong	Songhwan
Ammonium ( $\mu\text{g N/l}$ )	4,981.1 $\pm$ 1,219.2 (5,862.3/3,588.7)	1,624.1 $\pm$ 2,065.6 (3,991.8/199.1)	4,668.0 $\pm$ 1,713.6 (5,738.6/2,691.6)	650.4 $\pm$ 871.1 (1,647.0/34.1)	4,601.9 $\pm$ 3,057.9 (7,037.6/1,171.6)
Nitrate ( $\mu\text{g N/l}$ )	508.7 $\pm$ 354.0 (728.1/100.3)	1,147.1 $\pm$ 350.5 (1,524.7/832.2)	1,084.5 $\pm$ 224.1 (1,283.3/841.7)	830.1 $\pm$ 50.3 (867.9/773.0)	773.3 $\pm$ 73.0 (856.0/717.8)
Nitrite ( $\mu\text{g N/l}$ )	159.8 $\pm$ 124.6 (279.3/30.7)	242.2 $\pm$ 220.7 (494.7/86.0)	294.5 $\pm$ 173.4 (483.7/143.2)	105.1 $\pm$ 98.8 (219.0/53.0)	249.9 $\pm$ 206.1 (487.8/125.7)
SRP ( $\mu\text{g P/l}$ )	1,030.4 $\pm$ 520.0 (1,388.5/433.9)	88.0 $\pm$ 120.2 (226.4/9.7)	477.4 $\pm$ 81.5 (567.3/408.2)	66.8 $\pm$ 14.5 (83.9/58.2)	200.1 $\pm$ 139.4 (326.4/50.6)
Chlorophyll- <i>a</i> ( $\mu\text{g/l}$ )	22.1 $\pm$ 3.2 (25.8/19.7)	33.2 $\pm$ 27.6 (52.6/1.6)	13.6 $\pm$ 16.2 (32.3/3.9)	8.9 $\pm$ 7.6 (17.6/3.9)	14.1 $\pm$ 1.3 (15.2/12.6)
AGPT ( $\text{mg dw/l}$ )	343.0 $\pm$ 173.6 (462.5/143.9)	28.5 $\pm$ 40.1 (74.7/2.4)	158.4 $\pm$ 27.2 (188.4/135.4)	21.4 $\pm$ 4.9 (27.1/18.6)	65.9 $\pm$ 46.5 (108.1/16.0)

균값을 기준으로 할 때, NH<sub>4</sub>는 황구지천 (4,981.1  $\mu\text{g N/l}$ ), 서정천 (4,668.0  $\mu\text{g N/l}$ ) 및 성환천 (4,601.9  $\mu\text{g N/l}$ )이 초과하였고, 오산천-진위천 및 안성천은 평균 농도에 비해 각각 49.1%, 19.7%에 해당하였다. NH<sub>4</sub>는 계절적으로 강우 이후인 9월에 대체로 낮았으나 황구지천은 오히려 증가 (5,862.3  $\mu\text{g N/l}$ )하였고, 성환천은 12월 (7,037.6  $\mu\text{g N/l}$ )에 가장 높았다. NO<sub>3</sub>는 오산천-진위천 (1,147.1  $\mu\text{g N/l}$ )과 서정천 (1,084.5  $\mu\text{g N/l}$ )이 평균 농도보다 조금 높았다. 황구지천, 오산-진위천, 서정천에서 12월로 갈수록 증가하였고, 안성천, 성환천은 감소하는 경향이었으나 하천에 따른 계절적 차이는 크지 않았다. NO<sub>2</sub>는 황구지천을 제외한 하천에서 6월에 높은 분포를 보였고, 황구지천과 안성천을 제외하고는 평균값을 상회하였다. 또한, NH<sub>4</sub>와 NO<sub>3</sub>는 서로 상반되는 양상을 보여 NH<sub>4</sub>가 높은 하천에서 NO<sub>3</sub>는 낮은 경향이였다.

SRP는 9.7~1,388.5  $\mu\text{g P/l}$  범위이었고 평균값은 372.5  $\mu\text{g P/l}$ 이었다 (Table 1). SRP는 다른 하천에 비해 황구지천, 서정천 및 성환천에서 풍부하였고, 6월과 12월에 더욱 높았다. 특히, 황구지천의 평균 농도는 다른 하천들의 평균값의 합보다도 200  $\mu\text{g P/l}$  정도 더 많아 황구지천의 오염도는 유역에서 가장 큼을 나타냈다.

Chl-*a* 농도는 1.6~52.6  $\mu\text{g/l}$  범위이었고, 평균값은 18.4  $\mu\text{g/l}$ 이었다 (Table 1). Chl-*a*의 최대값과 최저값은 9월과 12월에 오산-진위천에서 관찰되었다. 황구지천과 성환천은 계절에 따른 큰 변동이 없었고, 다른 하천은 차이가 컸다. 서정천과 성환천은 평균 10  $\mu\text{g/l}$ 를, 황구지천과 오산-진위천은 20  $\mu\text{g/l}$  수준을 초과한 수질을 보였다. 하천에서 P와 N 농도가 높음에도 불구하고 chl-*a*가

크게 높지 않은 것은 유수 환경의 수리학적 영향으로 볼 수 있었다. 또한, 황구지천 (25.8  $\mu\text{g/l}$ )과 오산천-진위천 (52.6  $\mu\text{g/l}$ ) 및 서정천 (32.3  $\mu\text{g/l}$ )에서 높은 chl-*a*가 기록된 것은 하천에 위치하고 있는 수중보에 의한 저류 영향이 컸던 것으로 보여지고, 이들 하천과 같이 오염된 하천에서 보저류지를 통과한 수질은 항상 침전에 의한 여과 효과보다도 더욱 혼탁한 상태를 나타냈다.

**2) 하구 저수지**

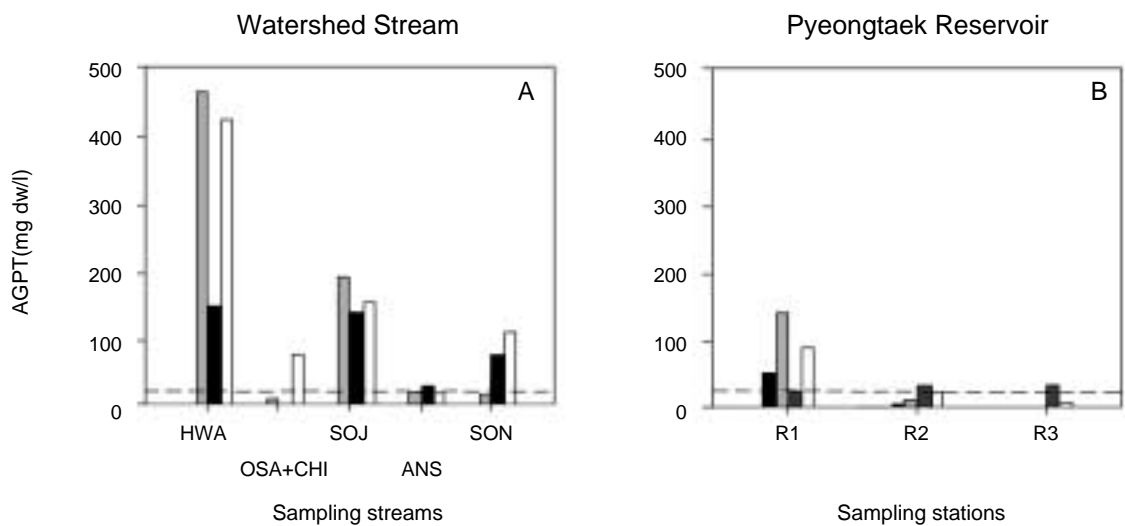
저수지에서 NH<sub>4</sub>는 20.4~6,357.2  $\mu\text{g N/l}$ , NO<sub>3</sub>는 552.9~1,690.2  $\mu\text{g N/l}$ , NO<sub>2</sub>는 0.9~504.4  $\mu\text{g N/l}$  범위이었고, 평균농도는 각각 3,194.5  $\mu\text{g N/l}$ , 914.8  $\mu\text{g N/l}$ , 214.2  $\mu\text{g N/l}$ 이었다 (Table 2). NH<sub>4</sub>는 R1에서 평균 농도가 4,385.3  $\mu\text{g N/l}$ 로써 저수지 평균값보다 27% 많았고, R2는 비슷하였으나 R3는 32% 적었다. NH<sub>4</sub>와 NO<sub>3</sub>는 서로 상반되는 양상을 보여 NH<sub>4</sub>는 하천 성향이 강하고 수심이 얇은 상류에서, NO<sub>3</sub>는 저수지 성향이 강하고 수심이 깊은 하류에서 높은 경향이였다. 또한, NH<sub>4</sub>는 상류에서 계절적 차이가 적었으나, 중하류에서 컸고, 9월에는 전 정점에서 고갈 현상이 현저하였다. NO<sub>3</sub>는 NH<sub>4</sub>와 달리 3월에서 12월로 갈수록 증가하였고, NO<sub>2</sub>는 6월에 특히 높았고, 평균 농도는 정점간에 차이가 없었다.

SRP는 0~417.3  $\mu\text{g P/l}$  범위이었고 평균값은 101.2  $\mu\text{g P/l}$ 이었다 (Table 2). SRP의 평균 농도를 중심으로, R1은 220.3  $\mu\text{g P/l}$ 로써 118% 더 많았고, R2~R3구간은 평균 농도의 32~51% 범위으로써 상류와 대조적이었다. 또한, 9월을 제외한 시기에는 상류가 중하류보다 높았고, 그 차이는 6월에 더욱 컸다.

평택호에서 chl-*a* 농도는 0.3~130.4  $\mu\text{g/l}$  범위이었고,

**Table 2.** Mean ( $\pm$ SD) values of environmental factors in each station of Pyeongtaek Reservoir at March, June, September and December, 2000. Parenthesis indicate maximum and minimum values.

Factors/Sampling stations	Pyeongtaek Reservoir		
	R1	R2	R3
Ammonium ( $\mu\text{g N/l}$ )	4,385.8 $\pm$ 2,932.2 (6,357.2/73.1)	3,029.3 $\pm$ 2,277.4 (5,546.2/28.4)	2,168.2 $\pm$ 2,265.8 (5,367.5/20.4)
Nitrate ( $\mu\text{g N/l}$ )	806.3 $\pm$ 203.3 (1,045.4/552.9)	928.7 $\pm$ 327.0 (1,359.2/574.9)	1,009.4 $\pm$ 470.1 (1,690.2/613.3)
Nitrite ( $\mu\text{g N/l}$ )	226.2 $\pm$ 239.8 (503.0/82.2)	216.3 $\pm$ 252.0 (504.4/37.0)	200.3 $\pm$ 266.5 (503.0/0.9)
SRP ( $\mu\text{g P/l}$ )	220.3 $\pm$ 157.4 (417.3/52.1)	51.4 $\pm$ 36.9 (94.5/11.2)	31.9 $\pm$ 45.7 (99.1/0.0)
Chlorophyll- <i>a</i> ( $\mu\text{g/l}$ )	71.6 $\pm$ 56.3 (130.4/13.6)	36.9 $\pm$ 42.0 (98.8/5.5)	25.4 $\pm$ 39.5 (84.1/0.3)
AGPT (mg dw/l)	72.7 $\pm$ 52.5 (138.4/16.5)	16.3 $\pm$ 12.3 (30.7/2.9)	10.0 $\pm$ 15.1 (32.2/0.0)



**Fig. 3.** Spatial and temporal distribution of algal growth potential test (AGPT) values in the Pyeongtaek Reservoir Watershed in March, June, September, December 2000. Dotted lines indicate criterion of hypertrophic level as 20 mg dw/l.

평균값은 44.6  $\mu\text{g/l}$ 이었다 (Table 2). 계절에 관계없이 상류에서 항상 높은 농도를 유지하였고, 다른 시기에 비해 3월과 9월에 더욱 높았다. 강수량과 유입 유량이 적었던 3월에는 평균 농도가 96.9  $\mu\text{g/l}$  (84.1~107.8  $\mu\text{g/l}$  범위)으로써 저수지의 전 정점을 통해 계절적으로 가장 높았고, 반면에 9월에는 상류 (130.4  $\mu\text{g/l}$ )가 중하류 (4.8~19.4  $\mu\text{g/l}$ )보다 11배 정도 커서 정점간에 더욱 대조적이었다.

**2. Algal growth potential test (AGPT)**

*M. aeruginosa*를 시험종으로 측정한 AGPT 결과는 하천과 저수지에서 조사시기에 따른 차이가 컸다 (Fig. 3A-B). 총 배양구 중, 무생장구는 저수지에서 1회 (3.7%), < 10 mg dw/l와 11~20 mg dw/l는 각각 5회 (18.5%)씩 관찰되었고, > 21 mg dw/l는 16회 (59.3%) 관찰되었으며,

저수지보다 하천에서 그 잠재력이 더욱 컸다. 유역 하천에서 AGPT값의 범위는 2.4~462.5 mg dw/l이었고, 평균값은 123.4 mg dw/l이었다 (Table 1). 하천에 따른 AGPT값은 황구지천에서 평균값이 343.0 mg dw/l로서 가장 높았고, 서정천이 158.4 mg dw/l, 성환천이 65.9 mg dw/l, 오산천+진위천이 28.5 mg dw/l 및 안성천이 21.4 mg dw/l순이었다 (Table 1, Fig. 3A). 계절적으로는 하천별로 다소 상이한 양상을 보였는데, 황구지천, 오산천+진위천 및 서정천은 6월과 12월에, 안성천은 9월에, 성환천은 9월과 12월에 각각 높은 양상을 보였다. 오염도가 높은 도시 하천은 유량이 풍부한 9월에 낮았고, 농경지가 주를 이루는 농촌 하천은 오히려 증가하였다.

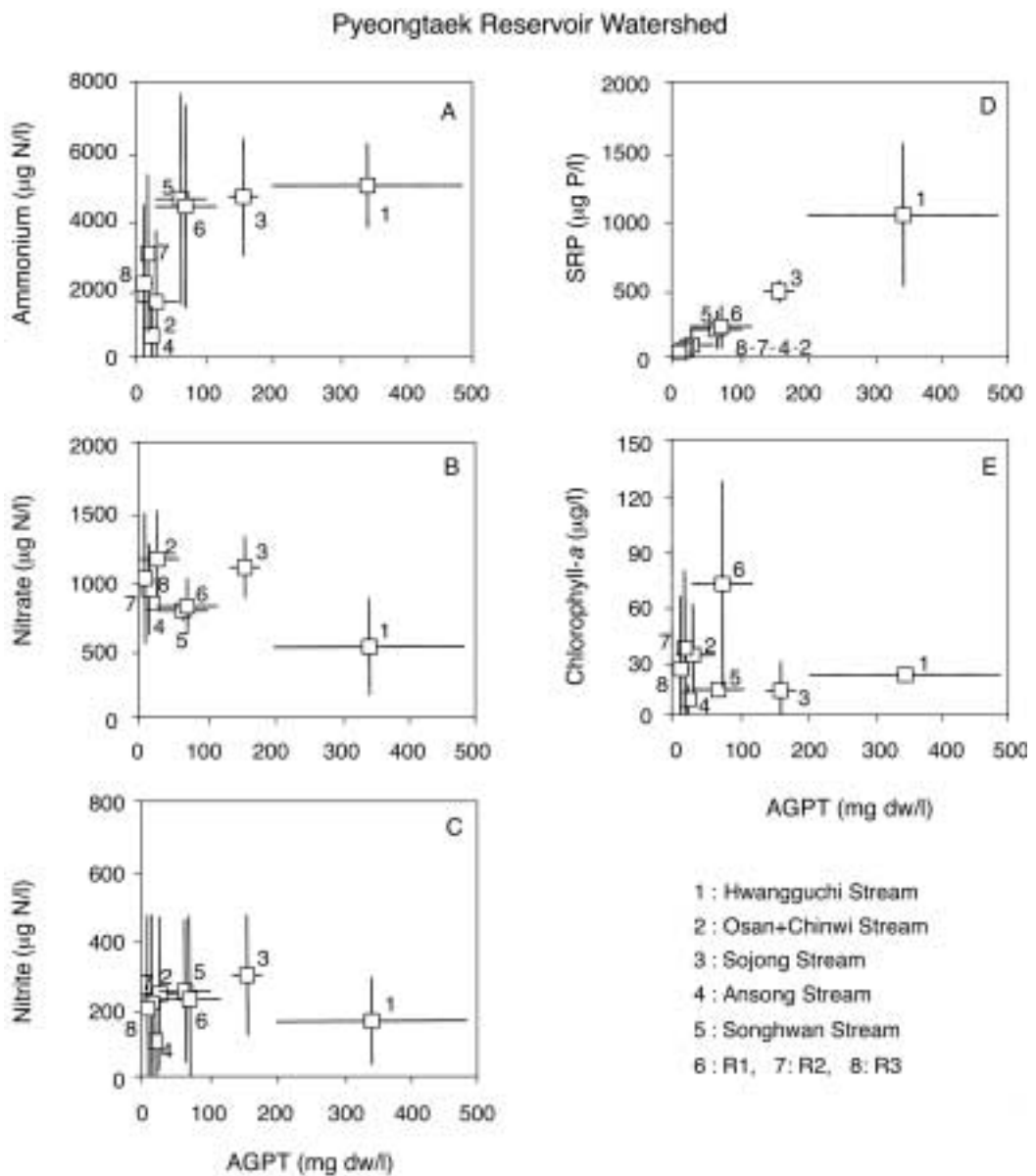
저수지에서 AGPT값은 상·하류간에 현저한 차이가 관찰되었고, 하류로 갈수록 급감하였다. 저수지에서 AGPT값의 범위는 0~138.4 mg dw/l이었고, 평균값은

33.0 mg dw/l이었다 (Table 2). R1은 3월, 6월 및 12월에 각각 48.4 mg dw/l, 138.4 mg dw/l 및 87.3 mg dw/l로써 높았고, 9월에 16.5 mg dw/l로써 낮았다. 반면에 R2와 R3는 다른 계절에 비해 9월에 평균 31.5 mg dw/l로 다소 높았다 (Fig. 3B).

**3. N · P 영양염, 생물량 및 AGPT의 관련성**

평택호 유역에서 수중 영양염과 AGPT의 정점별 분포에서 황구지천은 AGPT의 변동 폭이 매우 컸으나, 다른

정점에서는 AGPT보다 영양염과 chl-a의 변동 폭이 더욱 큰 차이점이 있었다. AGPT값은 수중 SRP와 NH<sub>4</sub> 영양염 농도와 유의한 상관성이 관찰되었다. 평택호 유역에서 AGPT와 NH<sub>4</sub>, SRP 요인간의 상관 계수는 각각 0.370, 0.999 ( $p < 0.001$ )이었다 (Table 3, Fig. 4A, D). 반면 NO<sub>3</sub>와 NO<sub>2</sub> 및 chl-a는 유의성이 적었다 ( $p < 0.05$ ). 평택호와 유역 하천에서 AGPT는 SRP에 거의 직선적으로 증가하여 조류생장에 대한 강한 P 영향성을 보였다 (Fig. 4D). Chl-a와 AGPT의 상호 관련성을 볼 때, chl-a가



**Fig. 4.** Relationships between inorganic nitrogen, soluble reactive phosphorus (SRP), chlorophyll-a concentration and algal growth potential test (AGPT) values in the Pyeongtaek Reservoir Watershed.

**Table 3.** Correlation coefficients between algal growth potential test (AGPT) values and inorganic N · P nutrient, chlorophyll-*a* concentration in Pyeongtaek Reservoir and its watershed stream.

Factors	Pyeongtaek Reservoir Watershed	
	Algal growth potential test (AGPT) (n = 27)	
Ammonium	0.370***	
Nitrate	0.369**	
Nitrite	0.100*	
Soluble reactive phosphorus	0.999***	
Chlorophyll- <i>a</i>	0.168**	

\* not significant, \*\*p < 0.05, \*\*\*p < 0.001

**Table 4.** Water quality assessment by several criteria in Pyeongtaek Reservoir and its watershed stream.

Sampling stations \ Factors	BCOD	T-N	T-P	Chl- <i>a</i>	AGPT
<b>Watershed streams</b>					
Hwangguchi	>V	H	H	E	H
Osan + Chinwi	>V	H	H	H	H
Sojong	>V	H	H	E	H
Ansong	IV	H	H	E	H
Songhwan	V	H	H	E	H
<b>Pyeongtaek Reservoir</b>					
R1 (riverine zone)	IV	H	H	H	H
R2 (transition zone)	III	H	H	H	E
R3 (lacustrine zone)	IV	H	E	H	M

Note) BCOD: biological and chemical oxygen demand, T-N: total nitrogen, T-P: total phosphorus, Chl-*a*: chlorophyll *a*, AGPT: algal growth potential test, M: mesotrophic, E: eutrophic and H: hypertrophic state

높은 곳에서는 대체로 AGPT값이 낮았고, chl-*a*가 낮은 곳에서는 AGPT값이 높은 경향을 보였다 (Fig. 4E). AGPT값이 높고 chl-*a*가 낮은 곳은 N과 P가 다량 유입되는 곳으로서 직접적인 오염원 영향이 반영되었고, 도시하천 직하류 또는 하수처리수의 유입부에 해당하였다. 하류로 갈수록 그 양상은 대별되어 chl-*a* 농도가 높아지면서 수중 P (또는 N) 영양염의 감소로 인해 AGPT값의 저하됨이 뚜렷하였다. 또한, 평균 농도로 볼 때, 저수지에서 AGPT는 NH<sub>4</sub>, SRP 및 chl-*a*의 변동과 거의 일치하였으나, 유역 하천에서는 SRP, NH<sub>4</sub>보다 chl-*a*와 관련성이 적었다.

**4. 수환경 평가**

평택호와 유역 하천을 대상으로 Miller *et al.* (1974), Sudo (1980), OECD (1982), 수질개선기획단 (2000)기준에

의해 유기물, T-N, T-P, chl-*a* 및 AGPT 항목의 수질을 평가해 보았다 (Table 4). BOD와 COD에 의한 수질은 하천에서 평균 V급수, 저수지에서 IV급수로 분류되었고, 총질소와 총인은 전 수계가 과영양 상태로 평가되었다. 반면에, chl-*a*는 하천에서 부영양, 저수지에서 과영양상태로 평가되어 대조적이었고, AGPT는 오히려 하천에서 과영양상태, 저수지에서 중영양-과영양상태를 보여 저수지의 조류 발생은 하천의 영향을 직접적으로 받고 있음이 역력하였다. 특히, AGPT는 하천~저수지 시스템을 통해 상류에서 하류로 갈수록 수중 비옥도 (fertility)가 감소되는 경향이 뚜렷하여 수질분석에 의한 결과보다 종합적 평가 지표로서 더욱 유용함을 알 수 있었다.

**고 찰**

수중의 fertility를 측정하는 AGPT 검정법은 제한영양염 추정, 하수처리수의 영향 평가 및 중금속과 환경호르몬에 대한 위해성 평가 등 수환경을 다양하게 평가하는데 활용되어 왔다. AGPT는 수중에서 조류가 성장할 수 있는 잠재력을 나타내는 것으로서 점 또는 비점 오염원에 대한 수환경의 오염도를 판별하는 척도가 될 수 있다. 이러한 측면으로 볼 때, 본 연구에서 남조류 *M. aeruginosa*를 통한 검정 결과는 실제 수질 오염도와 일치하여 매우 효과적이었으며, 오염원 파악 뿐만 아니라 하류로 유하하면서 담수조류 발생량이 급격히 증가하고, 수체의 비옥도가 감소되는 경향을 잘 반영하였다. AGPT에 대한 인과 질소의 영향은 매우 컸으며 두 영양염 중 어느 한 영양염이 감소되거나 고갈된 구간에서 AGPT값은 감소하였고, 특히 P에 대한 영향이 뚜렷하였다.

평택호와 유역 주요 하천의 AGPT 결과를 국내의 다른 수계에서 조사된 것과 비교해 볼 때, AGPT에 의한 수질평가가 가능하였다. 신과 조 (1999)에 의해 정리된 호수 (14.1 mg dw/l)와 하천 (12.9 mg dw/l)의 평균값에 비해 평택호와 유역 하천은 각각 2.4배, 9.1배 수준으로 더욱 높았다. 조사 시기마다 원수에서 부유성 조류가 흡수 이용하고 남은 잔여 영양염의 영향이 지배적이었는데, 갈수기로 갈수록 더욱 증가하였고, AGPT값은 높게 나타나는 경향을 보였다.

수질에서 조류생장의 조절 인자에 해당하는 제한 영양염 평가는 매우 중요하다. AGPT 분석 결과 다른 인자보다도 P의 상관성이 N보다 높아 P 제한성이 강하게 나타났다. N 성분 중에서 NH<sub>4</sub>가 NO<sub>3</sub>보다 상관성이 양호하여 조류의 성장에는 NO<sub>3</sub>보다 NH<sub>4</sub>가 선호됨을 알

수 있었다(신, 1998; 신과 조, 1999). 수계의 영양상태 평가에서도 AGP가 10 mg dw/l 이상을 부영양(Sudo, 1980), 20 mg dw/l 이상을 과영양 상태(Miller *et al.*, 1974)로 보는 기준을 적용할 때, 평택호는 부영양 수준을 초과하였고, 유역 하천은 지역에 따라 차이가 컸으나 평택호보다 AGPT의 평균값이 3.7배로서 월등히 높아 하수처리수를 포함한 하천관리가 선행된 종합적인 수질 관리가 중요한 것으로 평가되었다.

적 요

평택호와 주요 유입하천에서 2000년 3월부터 12월까지 수질의 생물학적 평가를 위해 남조류 *Microcystis aeruginosa*의 조류생장잠재력측정(AGPT)을 계절에 따라 4회 측정하였다. 평택호와 유입하천에서 AGPT의 범위와 평균값은 각각 0~463 mg dw/l, 90 mg dw/l이었다. 유입하천 중 AGPT의 평균값은 황구지천에서 343 mg dw/l로서 가장 높았고 서정천, 성환천, 오산천과 진위천 및 안성천에서 각각 158, 66, 29 및 21 mg dw/l 순으로 감소하였다. 평택호에서 AGPT값은 0~138 mg dw/l 범위(평균 54 mg dw/l)였으며 대체적으로 유입하천과 근접된 상류에서 높고 하류로 갈수록 감소하는 양상을 보였으나 하계에 유입량이 급증한 직후에는 상류에서 남조류의 대발생(130 µg chl-*a*/l)으로 인해 오히려 하류가 2배 정도 높았다. 평택호와 유입하천의 수질은 갈수기에 더욱 악화되었고 이 시기에 AGPT값도 컸다. AGPT는 영양염 중 P와 상관( $r = 0.999, p < 0.001$ )이 가장 높아 조류의 성장에 P의 영향이 가장 큰 것으로 추정되었다. 평택호 유역에서 AGPT는 시공간적으로 변화 폭이 컸고 유입하천의 영양염 수준과 밀접한 관련성이 있었다. AGPT에 의한 수질상태는 과영양 수준(>20 mg dw/l)으로 평가되어 이에 대한 수환경 관리가 중요하였다. AGPT는 조류 성장에 대한 제한영양염 판정 뿐만 아니라, 수중 fertility를 평가함에 있어 유용하였다.

사 사

본 연구는 2000년도 한국수자원공사 아산수도건설단의 연구비에 의해 수행되었으며, 연구 지원에 대해 감사드립니다. 또한, 본 논문을 심사해 주신 심사위원께 감사드립니다.

인 용 문 헌

권오길. 1976. 아산호를 다녀와서. 한국생물교육학회지 **6**: 10.  
 수질개선키획단. 2000. 물관리백서. 국무총리 수질개선키획단, 갑우문화사, 서울, 한국. pp. 482-483.  
 신윤근, 전상호. 2002. 아산호의 생태학적 연구 1. 이화학적 특성과 영양상태. 한국육수학회지 **35**: 181-186.  
 신재기. 1995. 도시근교 하천(조만강)의 수질 부영양화와 1차 생산성. 인제대학교 석사학위논문. 75p.  
 신재기. 1998. 낙동강 부영양화에 따른 담수조류의 생태학적 연구. 인제대학교 박사학위논문. 202p.  
 신재기, 이옥희, 조경제. 2003a. 진양호와 남강의 수질에 대한 algal growth potential test (AGPT) 적용. 한국육수학회지 **36**: 57-65.  
 신재기, 조경제. 1999. 낙동강에서 AGP에 의한 수질평가. 한국육수학회지 **32**: 349-357.  
 신재기, 조경제. 2000. 금강 중·하류에서 AGP에 의한 수질 평가. 한국육수학회지 **33**: 244-250.  
 신재기, 조주래, 황순진, 조경제. 2000. 경안천~팔당호의 부영양화와 수질오염 특성. 한국육수학회지 **33**: 387-394.  
 신재기, 황순진, 조경제. 2003b. 평택호와 유역 주요 하천의 수환경 및 오염도 평가. 한국육수학회지 **36**: 38-47.  
 홍사육, 조현영, 나규환. 1976. 아산호의 육수학적 연구. 한국육수학회지 **9**: 55-59.  
 황순진, 이상훈. 1998. 경기도 인공호수의 수질개선과 효과적인 관리방안- 평택호를 중심으로. 경기개발연구원 연구보고서. 159p.  
 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.  
 Forsberg, C., S.-O. Ryding, A. Claesson, and A. Forsberg. 1978. Water chemical analyses and/or algal assay? - Sewage effluent and polluted lake water studies. *Mitt. Internat. Verein. Limnol.* **21**: 356-363.  
 Goldman, C.R. 1978. The use of natural phytoplankton populations in bioassay. *Mitt. Internat. Verein. Limnol.* **21**: 364-371.  
 Greene, J.C., W.E. Miller, T. Shiroyama, and T. Maloney. 1975. Utilization of algal assays to assess the effects of municipal, industrial, and agricultural wastewater effluents upon phytoplankton production in the Snake River System. *Water, Air, and Soil Pollution* **4**: 415-434.  
 Greene, J.C., W.E. Miller, T. Shiroyama, R.A. Soltero, and K. Putman. 1977. Use of algal assays to assess the



- effects of municipal and smelter wastes upon phytoplankton production. Proceedings of the Symposium on Terrestrial and Aquatic Ecological Studies of the Northwest. pp. 327-336. EWSC Press, Eastern Washington State College, Cheney WA 99004.
- Kalff, J. 2002. *Limnology: Inland Water Ecosystems*. Prentice-Hall, Inc., New Jersey, USA. 592p.
- Kennedy, R.H. and W.W. Walker. 1990. Reservoir nutrient dynamics. In: *Reservoir Limnology-Ecological Perspectives*. John Wiley & Sons, Inc. pp. 109-131.
- Kotai, J., T. Krogh, and O.M. Skulberg. 1978. The fertility of some Norwegian inland waters assayed by algal cultures. *Mitt. Internat. Verein. Limnol.* **21**: 413-436.
- Lehmusluoto, P.O. 1978. Some aspects on the classification of natural waters by algal assays (AGP), prelude. *Mitt. Internat. Verein. Limnol.* **21**: 437-440.
- Lhotsky, O. and P. Marvan. 1988. A standardized method of algal assay. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* **23**: 957-959.
- Maloney, T.E., W.E. Miller, and N.L. Blind. 1973. Use of algal assays in studying eutrophication problems. Proceedings: Advances in Water Pollution Research 6th International Conference. Pergamon Press, Oxford & New York. pp. 205-214.
- Miller, W.E. and T.E. Maloney. 1971. Effects of secondary and tertiary wastewater effluents on algal growth in a lake-river system. *Journal WPCF*, **43**: 2361-2365.
- Miller, W.E., J.C. Greene, T. Shiroyama, and E. Merwin. 1975. The use of algal assays to determine effects of waste discharges in the Spokane River System. Proceedings: Biostimulation and Nutrient Assessment Workshop. U.S. Environmental Protection Agency, EPA 660/3-75-034. pp. 113-130.
- 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.
- Nusch, E.A. 1980. Comparison of different methods for chlorophyll and phaeopigment determination. *Arch. Hydrobiol. Beih. (Ergebn. Limnol.)*, **14**: 14-36.
- OECD. 1982. *Eutrophication of Waters: Monitoring, Assessment and Control*. Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, France. 154p.
- Raschke, R.L. and D.A. Schultz. 1987. The use of the algal growth potential test for data assessment. *Journal WPCF*, **59**: 222-227.
- Rump, H.H. and H. Krist. 1988. *Laboratory manual for the examination of water, wastewater, and Soil*. VCH Verlagsgesellschaft, Publ, New York, NY (USA). 190p.
- SPSS. 1998. SYSTAT® 8.0 statistics. SPSS Inc., Chigaco, USA. 1,086p.
- Sudo, R. 1980. Studies on the water-blooms in lake Kasumigaura. *Jpn. J. Limnol.* **41**: 124-131.
- EPA (U.S. Environmental Protection Agency). 1971. *Algal Assay Procedure : Bottle Test*. National Eutrophication Research Program, Corvallis EPA1972-795-146/1, Region 10, 82p.
- 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. 1006p.

(Received 20 Apr. 2003, Manuscript accepted 30 May 2003)