

낙동강 수계 대형 인공호 및 하천본류의 조류성장 잠재력 비교

황 순 진* · 유 경 아 · 신 재 기¹

(건국대학교 환경과학과, ¹한국수자원공사 수자원연구원)

Comparison of Algal Growth Potentials in the Large Reservoirs and River Mainstream of Naktong River Watershed. Hwang, Soon-Jin*, Kyung-A You and Jae-Ki Shin¹ (Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea ¹Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation (KOWACO), Taejon 305-390, Korea)

Algal growth potential test (AGPT) has been used as a tool for assessing biological productivity potential in the aquatic ecosystems. This study was conducted to compare the productivity potentials of large reservoirs (Lakes Andong, Hapchon and Jinyang, and Naktong estuarine dam) and river sites (Sangju, Koryung, and Samlangjin) located in the Naktong River watershed. AGPT was conducted in both non-monsoon and monsoon season (February, April, July and September) of 2003, using *Microcystis aeruginosa* as a test alga. The AGPs in the reservoirs were relatively much lower than those of river sites. The river AGPs increased towards upstream close to the influent streams, while it generally decreased towards downstream. Immediately after the abrupt increase in influent discharge in summer, the AGP became similar between midstream and downstream sites. The water quality of river and reservoirs deteriorated during the drought period in accordance with AGP; it was the highest during this period. The AGPs showed the closest correlation with the P concentration, leading to the conclusion that bioavailable P is highly influential to the algal growth in both lentic and lotic ecosystems in the Naktong River watershed. Based on the AGPs, the water quality of tested sites was likely eutrophic. Our results suggest that AGPT be a useful tool in evaluating the productivity potential and trophic state of the water body as well as determining the nutrients that limit the growth of algae.

Key words : Algal growth potential test (AGPT), *Microcystis aeruginosa*, River, Reservoir, Water quality, Phosphorus, Nakdong River watershed

우리나라의 대하천은 대체로 하천과 대형 인공호가 연결되어 있으며, 본류에 대하여 소하천이나 댐의 방류수가 불규칙하게 유입되어 본류의 수질을 결정하고 있다. 이러한 환경에서 영양염을 비롯한 유기물질의 유입은 구간별로 불규칙한 생물학적 생산력을 좌우하게 된다. 대형 인공호들은 하천의 수문학적 변동을 조절하는데 기여하고

있지만 수질은 계절적으로 다소 상이한 양상을 보이게 된다.

조류성장잠재력측정 (algal growth potential test, AGPT) 은 조류를 이용하는 생물검정법으로서 수체의 영양상태를 파악하는데 처음 사용되었고, 외국에서는 미국 환경보호청 (EPA)을 중심으로 수질오염과 부영양화 문제를 해

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

결하기 위해 1970년대 초반부터 폭넓게 적용되었다(Maloney *et al.*, 1973; Miller *et al.*, 1974; Lehmusluoto, 1978). 일반적으로, AGPT는 점 또는 비점오염원의 영향을 비롯하여 수체의 비옥도(Miller *et al.*, 1974; Kotai *et al.*, 1978), 제한영양염(Goldman, 1978), 오·폐수 처리효율 및 증금속 독성(Forsberg *et al.*, 1978) 등을 판정하거나 평가하는데 활용되어 왔으며 그 효용성과 자료의 신뢰성도 높다(Raschke and Schultz, 1987; Lhotsky and Marvan, 1988). 특히, 하천과 인공호에 대한 하수처리수의 영향(US EPA, 1971; Miller *et al.*, 1975; Greene *et al.*, 1975, 1977)과 하수처리 수준(Miller and Maloney, 1971)을 판단하고 결정하는데 유용할 뿐만 아니라 단순 수질 분석에 비해 수환경의 종합적 평가(Raschke and Schultz, 1987)에 직접적인 효과와 기여도가 크다. 국내에서는 1990년대 이후 하천과 인공호를 대상으로 AGPT가 이용되어 왔고, 수질 평가와 영양염의 상대적 결핍 및 하천과 인공호 생태계를 포함하여 하수처리수의 영향을 밝히는 데 주로 활용되었다(신과 조, 1999; 신과 조, 2000; 신 등, 2003b). 낙동강 유역에서 AGPT에 대한 선행 연구로는 신과 조(1999)가 강 중·하류 구간의 본류와 지류를 대상으로 비옥도를 평가하였고, 서 등(2000)은 하천으로 배출되는 하·폐수 처리수의 영향을 비교하였으며, 신 등(2003a)은 진양호와 남강 하류구간에서 AGPT 값의 증감요인을 해석한 바 있다. 그러나 아직까지 동일한 수계 내의 연결되는 유수(하천)와 정수환경(호수)에서의 조류성장잠재력이 서로 비교된 바는 없다.

따라서 본 연구는 수문 및 생태학적 시스템이 서로 다른 강과 인공호의 수환경에서 AGPT를 통해 수중의 생산잠재력과 N·P 영양염의 수준을 비교하였고, 수질평가를 위한 생물학적 기준으로서 AGPT의 필요성을 제시하고자 수행하였다.

낙동강은 우리나라 동남부(127° 29'E~129° 18'E, 35° 03'N~37° 13'N)에 위치한 대형하천으로 태백산(1,549 m)에서 발원하여 본류는 강유역의 중심부를 통과한 후 최종적으로 하구를 통해 남해안으로 유입된다. 낙동강 유역면적은 23,817 km²이고, 유로 연장은 525.2 km이다. 유역은 2개의 광역시(부산, 대구)와 5개 도(경남·북, 전남·북, 강원)를 포함하며, 이는 영남권 면적의 약 3/4에 해당한다.

강 본류에는 825개의 크고 작은 하천이 유입되고 있으나, 그 중 유역 면적이 200 km² 이상인 하천은 금호강을 포함하여 31개 하천에 이른다. 낙동강 유역에는 4개의 다목적댐(안동, 임하, 합천 및 남강)과 3개의 용수댐(영천, 운문 및 밀양)이 건설되어 있으며 강 하구에는 하구둑이

건설되어 있다(부산광역시, 1997; 한국수자원공사, 2005). 금호강을 중심으로 상류에는 감천 등의 하천이 유입되고 금호강 하류에는 회천, 황강, 남강, 밀양강, 양산천 등 경남·북 지방의 지방도시를 관류하는 지천이 유입되고 있다. 금호강 유역은 대구와 영천지방의 집수 또는 배수로이며, 도시화와 산업화에 따라 인구와 공단이 밀집하여 유역 내 최대 오염원에 해당한다(낙동강환경관리청, 1995). 낙동강 유역에서 중·상류 댐들은 홍수조절, 발전 및 용수 공급 등 다목적으로 건설되었고 하구둑은 하류 지역에서 부산시 상수원수의 안정적 공급, 인근 공단의 용수공급 및 농경지에 대한 농업용수의 염해 방지를 위해 1987년에 축조되었다.

본 연구는 낙동강 유역에 위치한 주요 대형 인공호와 하천 본류구간의 주요 지점을 대상으로 강수량을 고려하여(저수기와 풍수기) 2003년 2월, 4월, 7월 및 9월에 4회 조사하였다. 조사 지점은 안동호(AND), 합천호(HAP), 진양호(JIN)와 낙동강 본류 구간의 상주(SAN), 고령(KOR), 삼량진(SAM) 및 낙동강하구호(NAK)에서 각 1개 정점으로 총 7개 지점으로 선정하였다(Fig. 1).



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

수질분석과 조류성장잠재력측정 (AGPT)을 위한 시료는 각 인공호의 최하류인 댐 직상류 (0.5 km)와 하천의 조사지점 중앙에서 수심 0.3~0.5 m 깊이 표층수를 직접 채수하였고, 인공호는 댐 앞에서 모터보트를 이용하여 채집하였다. 수중의 Ammonium ($\text{NH}_4\text{-N}$), Nitrate ($\text{NO}_3\text{-N}$), Nitrite ($\text{NO}_2\text{-N}$) 및 SRP (soluble reactive phosphorus) 농도는 시료를 Whatman GF/F filter로 여과한 후, Rump and Krist (1988)의 방법에 따라 분석하였다. DIN (dissolved inorganic nitrogen)은 $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$ 의 총량으로 계산하여 사용하였다. Chlorophyll-*a* (Chl-*a*) 농도는 90% ethanol을 용매로 하는 비등 추출법을 사용하였다 (Nusch, 1980). 탁도는 HACH 2100N meter로 현장에서 측정하였다.

AGP 측정에 사용된 *M. aeruginosa*는 현장에서 직접 채집하여 단세포를 manipulator로 분리 배양하였고 (Watanabe, 1996; 신과 조, 2000), MA 배지 (Watanabe, 1996)에서 전배양 하였다. 생물검정은 측정 직전에 membrane filter (0.45 μm , Millipore)로 여과한 원수에 P-starvation시킨 조체를 최종적으로 1.0×10^3 cells L^{-1} 의 농도로 접종하였다 (Claesson and Forsberg, 1978; APHA, 1995; 신, 1998). 배양온도는 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 의 항온을 유지하였고, 광은 $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 연속광으로 하였으며, 100~110 rpm 범위로 회전시켰다. AGP 검정은 2 반복으로 수행하였고, 접종한 시료는 7일 동안 배양한 후 600 nm 파장에서 흡광도를 측정하였으며, 최종적으로 단위 부피당 건중량 (mgdw L^{-1})으로 산출하였다 (신, 1998). 자료의 상관분석은 SYSTAT[®] 8.0 프로그램 (SPSS, 1998)을 이용하였다.

수중의 탁도는 인공호, 강 및 하구호에서 각각 7.0 (1.0~18.0), 24.2 (9.6~49.5), 19.1 NTU (10.8~31.6) (평균값과 범위를 나타냈다 (Table 1)). 인공호의 경우 안동호 (AND)에서 7월에 가장 높았고, 합천호 (HAP)에서 9월에 가장 낮았으며, 진양호 (JIN)는 다른 인공호에 비해 변화 (4.7 NTU)가 크지 않았다. 강과 하구호에서 탁도는 장마 전·후에 큰 차이를 보였고, 전 지점에서 9월에 가장 높았다. 강 구간은 상주 (SAN)와 고령 (KOR)에서 각각 41.9, 49.5 NTU로 급증하였고, 이후 삼량진 (SAM)에서 38% 감소하였다. 하구호는 SAM에 비해 약간 높았으나 유의한 차이는 아니었다.

영양염 중에서 용존무기질소 ($\text{DIN}=\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$ 농도의 합) 농도는 인공호에서 평균 $537.1 \mu\text{gN L}^{-1}$ (범위: 181.5~693.4)을 보였고, 강과 하구호에서 각각 1,151.1 (978.7~1,964.4), 1,138.3 $\mu\text{gP L}^{-1}$ (996.6~1,426.9)을 나타냈다 (Table 1). 인공호는 HAP에서 4월과 7월에

낮았고, 강과 하구호는 KOR부터 그 하류에서 2월에 높은 양상을 보였다. DIN이 기여하는 $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ 및 $\text{NO}_2\text{-N}$ 은 인공호에서 각각 5.1, 93.6, 1.4%, 강에서 각각 16.8, 82.2, 1.0%, 하구호에서는 각각 13.9, 84.7, 1.4%를 차지하여, 인공호에서 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도가 월등히 높았으나, 강과 하구호에서는 $\text{NO}_3\text{-N}$ 뿐만 아니라 시공간적으로 $\text{NH}_4\text{-N}$ 가 풍부한 경우도 관찰되었다. $\text{NH}_4\text{-N}$ 는 인공호에서 평균 (범위) $27.3 \mu\text{gN L}^{-1}$ (17.0~37.6)로서 변화가 크지 않았고, 강과 하구호에서는 각각 192.9 (215.0~978.0), 158.2 $\mu\text{gN L}^{-1}$ (30.7~476.3)로서 변동 폭이 매우 컸다. $\text{NO}_3\text{-N}$ 는 인공호에서 평균 (범위) $502.5 \mu\text{gN L}^{-1}$ (154.8~792.5)이었고, 강에서 $946.7 \mu\text{gN L}^{-1}$ (939.5~954.8), 하구호에서는 $964.4 \mu\text{gN L}^{-1}$ (926.6~1,048.9)로서 농도는 낮았으나 변화 폭은 인공호에서 더욱 심하였다. $\text{NO}_2\text{-N}$ 는 인공호, 강 및 하구호에서 평균값이 각각 7.3, 11.8, 15.8 $\mu\text{gN L}^{-1}$ 로서 $\text{NH}_4\text{-N}$ 와 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 1.2~6.1%, 1.5~26.7%, 1.6~10.0% 범위에 해당하였다.

용존무기인 (SRP)은 인공호, 강 및 하구호에서 평균값 (범위)이 각각 3.9 (2.1~9.7), 35.6 (12.7~71.8), 39.6 $\mu\text{gP L}^{-1}$ (8.2~56.7)로 나타났다 (Table 1). 인공호에서 SRP는 장마 전후에 차이가 없거나 장마 후에 증가하는 양상을 보였으나, 강에서는 겨울철 (2월) 갈수기에 중류 (KOR)에서 급증한 후 하류로 갈수록 지수적 감소 경향을 나타냈다. 반면에 4~9월 동안에는 2월보다 급감하는 형태를 보이지 않았다. 결과적으로 $\text{NH}_4\text{-N}$ 는 장마 이후에 강 수역에서 급감하였으나, SRP는 하구호에서 더욱 증가한 양상을 보였다. 이 결과 N/P 비는 몬순기에 감소 경향이 현저하였다. N/P 비는 2월부터 9월까지 점진적 또는 급감하였으며, 이것은 계절적으로 볼 때 인공호와 강에서 각각 수중 $\text{NO}_3\text{-N}$ 및 $\text{NH}_4\text{-N}$ 와 SRP의 함량 수준에 의해 변동되는 것으로 볼 수 있었다.

낙동강 유역의 인공호와 강 수역에서 chl-*a*는 시·공간적인 차이가 뚜렷하였다. 인공호, 강 및 하구호에서 chl-*a*의 평균농도 (범위)는 각각 10.1 (2.6~27.8), 8.3 (2.4~21.0), 39.0 $\mu\text{g L}^{-1}$ (3.2~124.0 $\mu\text{g L}^{-1}$)로서 하구호에서 가장 높은 수준을 보였다 (Table 1). 2~9월동안 인공호의 경우 AND는 점차 증가하였으나 HAP와 JIN은 7월을 중심으로 변화 폭이 컸으며 강의 경우는 2월에 하류로 갈수록 변동이 가장 심하였고, 4월에는 2월보다 미약한 증가 경향을 보였다. 또한 7~9월에는 상하류간에 큰 차이를 보이지 않았다. 몬순 전 (2~4월)에 강, 인공호 및 하구호에서 chl-*a*의 평균값이 각각 13.2, 5.6, 72.6 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로서 하구호에서 가장 높았으나, 몬순기 (7~9월)에는 3.4, 14.5, 5.4 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로서 하천에 비해 인공호에서 약 3~

Table 1. Mean values of main environmental parameters in the ecosystems of river reach and lake region in the Naktong River Basin. Plus-minus indicate standard deviation and numbers in parenthesis indicate the maximum and minimum values.

Parameters	Pre-monsoon			Monsoon			Mean		
	River	Reservoir	Estuarine lake	River	Reservoir	Estuarine lake	River	Reservoir	Estuarine lake
Turbidity (NTU)	14.6	6.7	16.1	33.9	7.3	22.2	24.2±14.7 (49.5/9.6)	7.0±4.8 (18.0/1.0)	19.1±7.8 (31.6/10.8)
Chl-a (µg L ⁻¹)	13.2	5.6	72.6	3.4	14.5	5.4	8.3±8.0 (21.0/2.4)	10.1±7.6 (27.8/2.6)	39.0±43.5 (124.0/3.2)
DIN (µgN L ⁻¹)	1,297.1	579.6	1,238.9	1,005.8	621.6	1,037.7	1,151.5±334.8 (1,964.4/978.7)	537.1±186.4 (693.4/181.5)	1,138.3±165.8 (1,426.9/996.6)
Ammonium (µgN L ⁻¹)	334.2	25.0	265.3	51.6	29.6	51.1	192.9±322.9 (978.0/215)	27.3±7.0 (37.6/17.0)	158.2±176.0 (476.3/30.7)
Nitrate (µgN L ⁻¹)	946.5	549.6	953.1	948.1	582.7	975.7	946.7±5.3 (954.8/939.5)	502.5±183.8 (792.5/154.8)	964.4±37.4 (1,048.9/926.6)
Nitrite (µgN L ⁻¹)	17.5	9.0	20.6	6.2	9.4	11.0	11.8±10.5 (32.8/2.4)	7.3±5.1 (16.4/1.6)	15.8±9.0 (24.0/1.7)
SRP (µgP L ⁻¹)	31.7	3.1	27.9	39.6	4.6	51.4	35.6±22.2 (71.8/12.7)	3.9±2.2 (9.7/2.1)	39.6±15.8 (56.7/8.2)
N/P ratio	55.5	188.1	69.0	29.9	163.2	20.3	42.7±22.8 (77.3/16.4)	175.7±66.7 (303.3/83.7)	44.6±50.8 (167.7/18.5)
AGPT (mgdw L ⁻¹)	9.7	0.2	8.5	12.4	0.7	16.4	11.0±7.4 (23.1/3.4)	0.4±0.7 (2.3/0.0)	12.4±5.3 (18.1/1.9)

4배 높게 나타났다 (Table 1).

AGP 평균값은 인공호, 강 및 하구호에서 각각 0.4, 11.0, 12.4 mgdw L⁻¹로서 강과 하구호에서 상대적으로 높았다 (Table 1). 인공호에서 AGP의 범위는 0~2.3 mgdw L⁻¹이었고, 평균 수준은 AND에서 0.1, HAP에서 0.1, JIN에서 1.1 mgdw L⁻¹이었다. AGP는 인공호마다 계절적 차이가 관찰되었다. AND는 4월에, HAP는 2월에, JIN은 7월에 각각 높았고, 9월에는 공통적으로 높았으나 JIN에서 더욱 현저하였다 (Fig. 2). 강은 상류의 SAN에서 평균값과 범위가 각각 5.5, 3.4~8.4, KOR에서 16.5, 8.4~23.1, SAM에서 12.6, 8.4~16.0, 및 NAK에서 12.1 mgdw L⁻¹, 1.9~18.1 mgdw L⁻¹이었다 (Fig. 2).

2월의 KOR 지점을 제외하고는, 모든 조사지점에서 우기에 증가하는 경향이 뚜렷하였고, 금호강이 유입되고 난 직후인 KOR과 SAM~NAK 구간에서 부영양 수준을 초과하는 빈도가 많았다 (Fig. 2). 또한 정점별 요인간의 상관분석 결과, 하천 본류의 KOR~NAK 구간은 다른 정점에 비해 chl-a와 AGP값이 직선적 관계에 있었는데, 이는 하류로 갈수록 수질의 비옥도가 감소하고 그 반대급부로 생물량은 증가하는 양상이 반영되었기 때문이었다. 이 결과 AGP값은 chl-a의 결과와 대조적으로 2~4월보다 7~9월에 더욱 증가하였다.

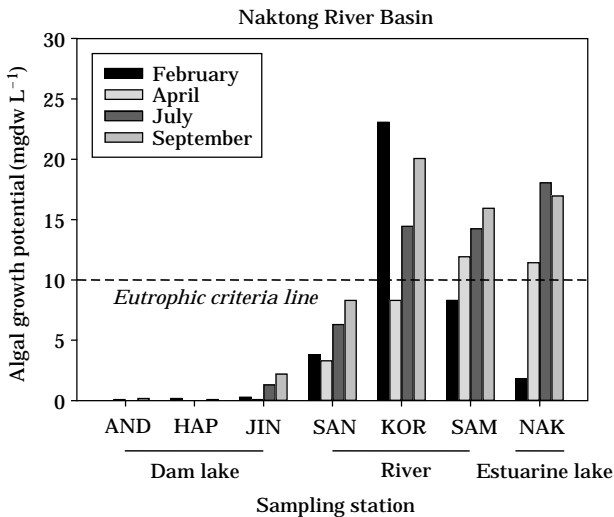


Fig. 2. Spatial and temporal distribution of algal growth potential test (AGPT) values in the Naktong River Watershed in February, April, July, September 2003. The dotted line indicates a eutrophic level (AGPT: 10 mgdw L⁻¹). Acronyms-AND: Lake Andong, HAP: Lake Hapchon, JIN: Lake Jinyang, SAN: Sangju, KOR: Koryeong, SAM: Samrangjin, NAK: Naktong Esturine Lake.

환경요인의 평균값과 표준편차를 이용하여 AGP와의 상호 관련성을 Fig. 3에 나타내었다. 낙동강 유역의 주요 지점에서 AGP를 포함한 수환경 요인의 변동 폭은 인공호보다 강과 하구호에서 더 크게 나타났다. AGP와 환경요인의 관계에서 대부분 양의 상관성을 보였으나 N/P 비는 음의 상관성을 보였다 (Fig. 3).

인공호와 강 상류의 수중 영양염과 AGP의 정점별 분포에서 KOR은 AGP의 변동 폭이 매우 컸으나, 다른 정점에서는 AGP보다 영양염과 chl-a의 변동 폭이 더욱 큰 차이점이 있었다. AGP값은 수중 SRP와 NH₄-N 영양염 농도와 유의한 상관성이 관찰되었다. 낙동강 유역에서 AGP와 NH₄-N, SRP 요인간의 상관계수 (r)는 각각 0.931, 0.999 (p < 0.001)로 매우 높았던 반면, NO₃-N 및

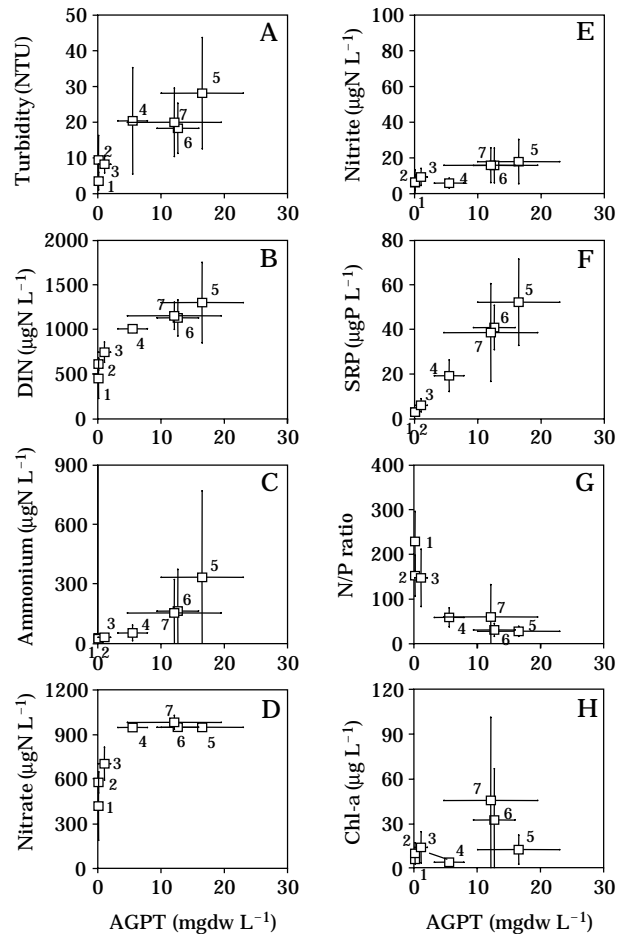


Fig. 3. Relationships between inorganic nitrogen, soluble reactive phosphorus (SRP), chlorophyll-a concentration and algal growth potential values in the Naktong River Watershed. 1: Andong lake, 2: Hapchon lake, 3: Jinyang lake, 4: Sangju, 5: Koryeong, 6: Samrangjin, 7: Naktong lake.

chl-*a*와의 상관계수(*r*) 값은 상대적으로 약간 낮았다(Fig. 3C, F). 인공호, 강 및 하구호에서 AGP는 SRP와 거의 직선적인 관계를 보여 조류생장에 대한 P의 높은 영향을 반영하였다(Fig. 3F). Chl-*a*와 AGP의 상관성으로 판단할 때, chl-*a* 농도가 높은 곳에서는 대체로 AGP 값이 낮았고, chl-*a*가 낮은 곳에서는 AGP 값이 높은 경향을 보였다(Fig. 3H). 이러한 경향은 KOR~NAK 구간에서 뚜렷하게 반영되었다. AGP 값이 높고 chl-*a*가 낮은 지점은 N과 P의 유입 영향이 큰 지점으로서 오염원의 직접적인 영향이 반영되었다. 하류로 갈수록 그 양상은 대별되어 chl-*a* 농도가 높아지면서 수중 P(또는 N)의 감소로 인해 AGP의 감소가 뚜렷하였다. 평균 농도로 볼 때 인공호와 강 수역에서 AGP는 NH₄-N, SRP 및 chl-*a*의 변동과 거의 일치하였다.

낙동강 수계에 위치한 대형인공호와 강 본류에서 *M. aeruginosa*를 통한 AGP 검정 결과는 실제 수질 오염도와 일치하였으며, 오염원 파악 뿐만 아니라 하류로 가면서 조류 발생량이 급격히 증가하고 이를 따라 수체의 비옥도가 감소되는 경향을 명료하게 반영하였다(Table 1). AGP에 대한 인과 질소의 영향은 매우 컸으며 두 영양염 중 어느 한 영양염이 감소되거나 고갈된 구간에서 AGP 값은 감소하였고, 특히 인에 대한 영향이 뚜렷하였다(Fig. 3). 본 연구의 AGP 결과는 신과 조(1999)에 의해 보고된 호수(14.1 mgdw L⁻¹)와 하천(12.9 mgdw L⁻¹)의 결과와 전반적으로 비슷한 수준으로 나타났다. 조사 시기마다 원수에서 부유성 조류가 흡수·이용하고 남은 잔여 영양염의 영향이 지배적이었는데, 갈수기로 갈수록 더욱 증가하였고 결과적으로 AGP 값은 높게 나타나는 경향을 보였다(Table 1).

조류생장의 조절 인자에 해당하는 제한영양염 평가는 수질의 상태를 판단하는데 있어 매우 중요하다. 본 연구 결과, AGP에 대한 인의 영향이 질소보다 높았으며 이는 낙동강 수계에서 조류생장에 대해 인의 제한성을 상대적으로 높음을 의미한다(Fig. 3). 용존무기질소 성분 중에서는 NH₄-N가 NO₃-N보다 상관성이 높게 나타나 낙동강의 조류 성장에는 NH₄-N가 선호됨을 알 수 있었고, 이는 선행연구의 결과들과 일치하였다(신, 1998; 신과 조, 1999).

수계의 영양상태 평가에서 AGP 값 10 mgdw L⁻¹ 이상을 부영양(Sudo, 1980), 20 mgdw L⁻¹ 이상을 과영양 상태(Miller *et al.*, 1974)로 판단하는 기준을 적용할 때, 본 연구에서 조사된 낙동강 수계의 인공호는 빈영양수준, 강과 하구호는 부영양 수준으로 나타났다. 지역에 따라 차이는 있었으나 강 수역은 인공호와 하구호보다 AGP의 평균값

이 약 29배로 월등히 높게 나타났다. 그러나 chl-*a* 농도로 판단할 때(OECD, 1982) 인공호와 강 상류는 중영양, 강 하류와 하구호는 부영양상태로 평가되어 AGP 결과와는 조금 다르게 나타났다. 인공호는 빈영양상태를 보여 영양동태학적으로 결핍된 상태로 나타났기 때문에, 강에서의 조류 발생은 인공호 보다는 하천의 영양염 영향을 직접적으로 받고 있음이 파악되었다.

적 요

조류성장잠재력의 검정(AGPT)은 수생태계에서의 생물학적 생산잠재력을 평가하는 유용한 도구로 이용되어 왔다. 본 연구는 낙동강 유역에 위치하는 대형 인공호와 낙동강 본류의 상하류에 해당하는 몇 개 지점에서 조류성장잠재력을 비교하였다. AGPT의 공시조류로 *Microcystis aeruginosa*를 이용하였고 2003년 2월부터 9월까지 갈수기와 풍수기를 포함하여 계절에 따라 4회 분석하였다. 낙동강 유역에 위치한 인공호들의 AGP는 하천과 비교하여 매우 낮게 나타났다. 하천구간에서는 대체적으로 도시하천과 근접한 상류에서 높고 하류로 갈수록 감소하는 양상을 보였으나 하계에 유입량이 급증한 직후에는 상하류 간 차이가 크게 감소하였다. 낙동강 유역의 인공호, 강 및 하구호의 수질은 갈수기에 더욱 악화되었고 이 시기에 AGP 값도 높게 나타났다. AGP는 시공간적으로 변화 폭이 컸고 수중 영양염 수준과 매우 밀접한 관계를 보였다. 특히, AGP는 영양염 중 인과 상관성이 가장 높아 낙동강의 조류 성장에 인의 영향이 가장 큰 것으로 추정되었다. 본 연구의 결과는 AGPT가 조류 성장에 대한 제한영양염 판정 뿐만 아니라 수중 fertility를 평가함에 있어 유용한 도구로 사용할 수 있음을 제시한다.

사 사

본 연구는 2004년도 건국대학교 교내 연구비 지원에 의해 수행되었음. 원고의 심사를 통해 내용적 발전에 유익한 정보를 제시한 심사자들과 현장조사 및 시료채집을 도와준 건국대학교 환경과학과 육수/생태공학연구소의 대학원생들께 감사드립니다.

인 용 문 헌

낙동강환경관리청. 1995. 낙동강 수계 오염원 분포 현황. 90p.

- 부산광역시. 1997. 낙동강 백서. 298p.
- 서정관, 이재정, 양상용, 정익교. 2003. 낙동강 수계 하 · 폐수처리시설의 방류수가 조류성장 잠재력에 미치는 영향. *Algae* **18**: 157-167.
- 신재기. 1998. 낙동강 부영양화에 따른 담수조류의 생태학적 연구. 인제대학교 박사학위논문. 202p.
- 신재기, 조경제. 1999. 낙동강에서 AGP에 의한 수질평가. 한국육수학회지 **32**: 349-357.
- 신재기, 조경제. 2000. 금강 중 · 하류에서 AGP에 의한 수질평가. 한국육수학회지 **33**: 244-250.
- 신재기, 이옥희, 조경제. 2003a. 진양호와 남강의 수질에 대한 algal growth potential test (AGPT) 적용. 한국육수학회지 **36**: 57-65.
- 신재기, 황순진, 조경제. 2003b. 평택호와 유역 주요 하천의 수환경 및 오염도 평가. 한국육수학회지 **36**: 38-47.
- 한국수자원공사. 2005. 다목적댐 운영 실무 편람. 372p.
- 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.
- 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., T.E. Maloney and J.C. Greene. 1974. Algal productivity in 49 lake waters as determined by algal assays. *Wat. Res.* **8**: 667-679.
- 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.
- 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 Cooperation 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.
- US 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.

(Manuscript received 15 February 2006,
Revision accepted 15 March 2006)