

진양호와 남강의 수질에 대한 Algal Growth Potential Test (AGPT) 적용

신재기* · 이옥희¹ · 조경제²

(인제대학교 낙동강유역환경연구센터, ¹인제대학교 대학원 생물학과,
²인제대학교 환경시스템학부)

Application of Algal Growth Potential Test (AGPT) on the Water Quality of the Chinyang Reservoir and the Nam River. *Shin, Jae-Ki**, *Ok-Hee Lee¹* and *Kyung-Je Cho²* (*Environmental Research Center for Naktong River Watershed, Inje University, Kimhae 621-749, Korea, ¹Graduate School of Biology, Inje University, Kimhae 621-749, Korea, ²School of Environmental Science & Engineering, Inje University, Kimhae 621-749, Korea*)

The algal growth potential test (AGPT) bioassay were conducted to assess the water quality and fertility in the Chinyang Reservoir and the lower part of the Nam River from August 2000 to July 2001. The AGPT value of the Chinyang Reservoir ranged from 0 to 23.4 mg dw l⁻¹, while 79% of the algae cultivation have not grown. The AGPT value was in proportion to phosphorus concentration of the water, and it was less when chlorophyll-*a* was high. This value was higher in the middle and lower layers than in the upper layer, and in the inflow part where the water is shallower than in the lacustrine. The AGPT value has increased in the whole reservoir in August~September when the water volume is high. In contrast, the AGPT value in the Nam River varied greatly compared to that of the reservoir, and ranged from 0 to 252.0 mg dw l⁻¹ and 65% of the algae cultivation have grown. The value was less than 10 mg dw l⁻¹ in the upstream, over the point where the treated wastewater discharged. It was 57 mg dw l⁻¹ on the average in the downstream, except in March and July when the discharged water influenced greatly, exceeding the hypertrophic condition. The result of AGPT shows the differences in the time and space on the reservoir and the streams. The AGPT value has increased in July~September, and in December in the inflow part of the reservoir; in March and August~December in the lower part; and in January, May, and November in the streams. AGPT is useful not only in defining the influence of the limiting nutrients on the algal growth, but also in evaluating the nutrients fertility in the inland water.

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

서론

저수지와 강을 포함하는 육수의 수질은 유역의 토지

이용도와 인구의 밀집도에 의한 지역적 차이가 커서
집·배수역의 상·하류간에 매우 이질적인 양상을 보일
수 있다. 수체의 비옥도 증가는 경제 성장과 더불어 도
시화 및 현대화에 따른 생활 수준의 향상으로 하·오수

* Corresponding author: Tel: 011) 870-6121, Fax: 055) 334-7092, E-mail: jaekishin@hanmail.net

발생량이 증가하는데 원인이 있고, 이로 인해 수질오염은 날로 심각해지고 있다. 그 결과, 수질의 부영양화는 영양염의 증가현상 뿐만 아니라 생물상의 변화를 수반하여 생태계의 구조와 기능적 측면에서 물질 생산성의 불균형을 초래하게 된다(Kotai *et al.*, 1978). 우리나라는 하폐수의 오수관리가 제대로 실행되지 못하여 내륙의 대부분 수계에서 N·P 증가로 인한 조류의 대발생이 사회적 문제로 제기되고 있으며, 특히 갈수기에는 더욱 극심하다(신, 1998). 이러한 조류의 대발생은 수자원의 효율성을 하락시키고, 특히 상수 이용에 대한 경제적, 건강적 악영향을 미치게 된다.

진양호와 남강 하류의 유역은 농촌과 도시의 분포가 뚜렷하다. 특정 유입하천과 배수구가 하나의 점오염원 역할을 할 뿐만 아니라 조류 발생에 대한 근원적 요인으로 작용하고 있는 실정에 있고, 특히 유량이 빈약한 시기에는 만성적으로 대발생하고 있다. 조류의 증식은 환경요인에 따라 좌우되며 그 변화 폭은 매우 크고 조류의 이용가능한 영양염의 구성 및 그 비율이 중요한 요인으로 작용한다(신, 1998). 따라서 수질 평가를 단순 화학적 분석에만 의존하는 것보다 자연 조류개체군 또는 단종 배양조류를 이용한 생물학적 평가도 중요하게 적용되어야 할 부분이다.

조류성장잠재력측정(algal growth potential test, AGPT)은 생물검정법의 일종으로 수중에서 미세조류가 성장할 수 있는 이용 가능한 영양염의 풍부성을 파악하는데 폭넓게 활용되고 있다(Miller *et al.*, 1974; Lehmusluoto, 1978). 또한, 시험조류를 이용하는 bioassay는 제한영양염, 오·폐수 처리효율 및 독성 평가 등에 다양하게 활용되고, 그 효율성도 높다(Lhotsky and Marvan, 1988). 국내에서는 1990년대 이후 하천과 호수를 대상으로 AGPT가 지속적으로 이루어졌고, 부영양화 수준, 영양염의 상대적 결핍을 밝히는데 주로 활용되어 잠재 수질과 특성을 평가함에 있어 그 가치는 이미 입증되었다(신과 조, 1999).

진양호와 남강 생태계에서 수환경에 관한 선행 연구는 오염원 조사(허 등, 1990b; 윤과 정, 1996), 수질의 이화학적 특성(정 등, 1982; 하와 허, 1983; 김과 오, 1988; 허 등, 1990a; 이 등, 1997; 김 등, 1999), 수질모형 적용 및 비교 연구(김 등, 1995; 최 등, 1995), 저질 영양염 함량(김 등, 1999), 미생물 분포(이 등, 1991), 식물플랑크톤 분포(김과 오, 1988; 김 등, 1993; 김 등, 1995; 김 등, 1999), 어류 분포(금과 양, 2002) 등으로 다양하였다. 반면에 미세조류를 이용한 생물검정은 김 등(1999)이 녹조류 *Selenastrum capricornutum*을 가지고 호수수에

대해 제한 영양염을 밝힌 1회 연구가 있었다.

본 연구는 정수와 유수의 시스템이 서로 다른 수환경에서 AGPT를 통해 수중에서 미세조류가 이용할 수 있는 무기 N·P 영양염의 수준을 파악하고, N·P 영양염 및 chl-*a* 농도와의 상호관련성을 분석하여 생물검정에 의한 수질을 비교 평가하고자 하였다.

조사지 개황

본 연구는 산청군과 진주시에 인접한 진양호와 남강 하류를 대상으로 하였다(Fig. 1). 남강 유역은 127° 37'E, 35° 03'N에 위치하며 유역 총면적은 3,466 km²이다. 진양호는 생활용수, 농업용수, 공업용수, 홍수조절 및 전력생산 등 다목적으로 건설된 사력석피댐(rockfill dam)의 인공호로써 1970년도에 완공되었다. 유역내 인구는 13.3만명이고, 토지 이용도는 경작지 14.8%, 임야 75.4%, 대지 1.8%, 기타 7.9%를 차지하고 있다. 진양호의 유역면적은 2,285 km²이고, 저수면적은 28.2 km²로써 그 비율은 81이며, 국내 중·대형 저수지에 비해 비교적 단순한 지형학적 구조를 갖고 있다. 연평균 강수량은 1,417 mm이고, 연평균 유입량은 2,031 × 10⁶ m³이다. 총저수량은 309.2 × 10⁶ m³이고 유효저수량은 299.7 × 10⁶ m³이다. 평균수심은 5 m이고, 최대수심은 12 m로써 유입부에서 얇고, 댐 부근에서 가장 깊으며, 평균 체류시간은 22~54 일에 해당한다(김 등 1999; 한국수자원공사, 1999).

진양호로 최종 유입되는 하천은 덕유산과 지리산을 발원으로 하는 경호강(남강분류)과 덕천강이 있다. 유역면적은 경호강이 1,835 km²이고 덕천강이 450 km²이다. 유로연장은 경호강이 108 km이고, 덕천강은 56 km이며, 각각 국가 및 지방하천으로 지정되어 있다. 경호강과 덕천강의 연평균 유입량은 각각 1,631 m³, 400 m³으로써 경호강의 유량이 덕천강에 비해 4.1배 더 풍부하다. 진양호로 유입된 물은 크게 여수로, 제수문, 발전방류구 및 취수구를 통해 최종적으로 배출된다(한국수자원공사, 1994; 한국수자원공사, 1999).

댐을 기준으로 남강 하류는 유역면적이 1,181 km²이고, 진주시를 통과 유하하여 최하류인 성산에서 낙동강 본류와 합류된다. 또한, 남강 하류의 중간 지점(SAN~KUM구간)에는 진주시하수처리장이 위치하고 있고, 생활하수와 분뇨를 합병처리 후 일 150 × 10³ m³의 하수처리수를 방류하고 있다. 남강 하류에서 CHO~SAN 구간은 고무보댐(rubber dam weir)에 의해 인위적으로 유하량이 조절되고 있는 반폐쇄성 수역에 해당하고, KUM~

YOM 구간은 평수기 이하일 때 하수처리장 방류수가 하천 유량의 대부분을 차지하고 있다.

재료 및 방법

수질분석과 AGPT 시료는 저수지에서 각 지점의 상층, 중층, 하층수를 Van Dorn 채수기로 채수하였고, 강에서는 유수를 직접 채수하였다. 조사 정점은 진양호의 경우 경호강(KYO)과 덕천강(DEO)의 유입부에서 각 1개, 저수구역인 취수탑(TOW)와 댐(DAM)에서 각 1개 정점을 선택하였고, 남강은 천수교(CHO), 진양교(CHI), 상평교(SAN), 금산교(KUM), 월강교(WOL) 및 염창나루(YOM)의 6개 정점을 선택하여 총 10개 지점이었다(Fig. 1). AGPT는 2000년 8월부터 2001년 7월에 걸쳐 저수지는 매월 1회, 강은 6회(1월, 3월, 5월, 7월, 8월 및 11월)

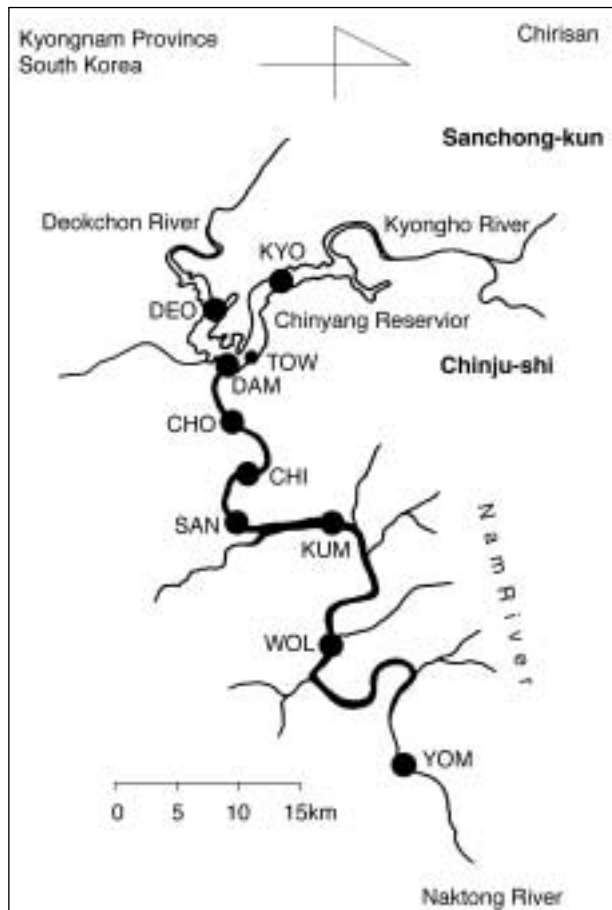


Fig. 1. Map showing sampling locations for water quality and algal growth potential test (AGPT) in the Chinyang Reservoir and the Nam River.

배양하였다.

강수량은 유역에 위치한 산청과 진주측후소에서 측정된 일 자료를 사용하였다(기상청, 2000). 수중 NH_4 , NO_3 및 SRP (soluble reactive phosphorus) 영양염 농도는 시료를 Whatman GF/F filter로 여과한 후, Rump and Krist (1988)의 방법에 따라 분석하였다. 엽록소 *a* 농도는 90% ethanol을 용매로 하는 비등 추출법을 사용하였다(Nusch, 1980).

AGPT에 사용된 시험조류는 표준종으로 사용되고 있고(APHA, 1995), 국내 담수에서 수질 부영양화로 인해 춘계~추계동안 수화 원인종으로 잘 알려진 남조류 *Microcystis aeruginosa*를 선택하였다. 본 측정에 사용된 *M. aeruginosa*는 1998년 7월에 금강 하류에서 채집하여 단세포를 manipulator로 분리 배양하였고(신과 조, 2000), MA 배지(Watanabe, 1996)에서 전배양하였다. Membrane filter (0.45 μm , Millipore)로 여과한 원수에 P-starvation시킨 *M. aeruginosa* 조체를 ml 당 1,000 세포가 되도록 접종하였다(Claesson and Forsberg, 1978; APHA, 1992; 신, 1998). AGPT는 duplicate로 하였고, 접종한 시료는 7일동안 배양한 후 600 nm 파장에서 흡광도를 측정하였으며, 최종적으로 단위 부피당 건중량(mg dw/l)으로 산출하였다(신과 조, 1999). 배양온도는 25°C의 항온을 유지하였고, 광은 200 $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 24시간 연속 조사하였으며, 100~110 rpm범위로 회전시켰다. 자료의 상관분석은 SYSTAT 통계패키지(SPSS, 1989)를 이용하였다.

결 과

1. 강수량 요인

2000년 4월부터 2001년 9월까지 진양호(산청)와 남강(진주) 유역의 강수량 변동에서 강수패턴과 빈도는 시기와 지역에 따라 차이가 컸다(Fig. 2). 따라서 유역의 연중 강수량은 수문학적으로 볼 때, 유입 또는 유출 유량과 밀접한 관련성이 있고, 수질 변동에 중요한 영향인자로 볼 수 있었다. 조사기간(2000년 8월~2001년 7월)동안 진양호와 남강의 총강수량은 각각 1,937.0 mm, 1,712.3 mm이었고, 그 범위는 0.2~202 mm, 0.1~166 mm이었다. 강수량의 최대 및 최소값 비는 진양호와 남강에서 각각 1,010, 1,660으로써 그 차이가 매우 컸고, 총강수량/월강수량의 비는 하계에 낮고, 동계에 높은 특성이 뚜렷하였다. 이는 하상계수와 마찬가지로 저수 또는 유출 특성을 간접적으로 파악할 수 있는 척도가 되

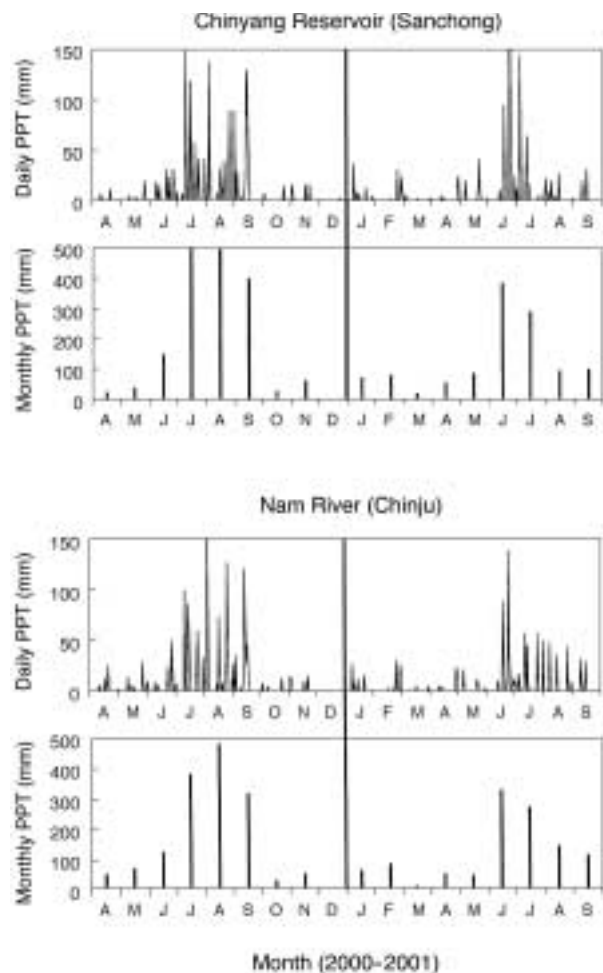


Fig. 2. Temporal variations of precipitation (PPT) in Chinyang Reservoir (Sanchong station) and the Nam River (Chinju station) watershed from April 2000 to September 2001.

었다. 또한, 강수량은 6월~9월 기간에 풍부하여 연 강수량의 81%를 차지하였고, 월별 무강우 일수가 20일을 초과한 시기는 10월~5월이었으며, 12월에 29일로 가장 많았다(Fig. 2). 따라서 이 시기는 유량이 부족한 저수기 이하 수준으로 구분되었다. 결과적으로, 유역에 내린 강수는 저수지로 유입되어 저수량을 증가시키게 되고, 강은 강우 직후 일시에 유출되는 상이한 양상이 관찰되었다.

2. N · P 및 chl-a 변동

1) 저수지 구간

진양호에서 수층별 수질의 평균값과 표준편차를 나타낸 것은 Table 1과 같다. NH_4 는 상층, 중층, 저층의 평균

Table 1. Mean (\pm SD) values of water quality in Chinyang Reservoir from August 2000 to July 2001.

Factors\Regions	Chinyang Reservoir		
	Kyongho River	Deokchon River	DAM
Chlorophyll-a ($\mu\text{g l}^{-1}$)			
U	12.1 \pm 10.1	9.4 \pm 5.4	11.9 \pm 8.0
M	12.7 \pm 10.6	15.3 \pm 15.5	10.4 \pm 9.1
L	8.8 \pm 8.2	10.0 \pm 7.3	6.0 \pm 2.6
Ammonium ($\mu\text{g N l}^{-1}$)			
U	34.0 \pm 19.4	27.1 \pm 19.7	30.5 \pm 16.2
M	70.2 \pm 41.9	39.9 \pm 26.7	51.0 \pm 32.7
L	122 \pm 116	89.7 \pm 87.4	189 \pm 244
Nitrate ($\mu\text{g N l}^{-1}$)			
U	1,865 \pm 847	1,684 \pm 992	1,750 \pm 794
M	1,553 \pm 871	1,576 \pm 959	1,828 \pm 801
L	1,745 \pm 854	1,532 \pm 927	1,615 \pm 820
SRP ($\mu\text{g P l}^{-1}$)			
U	3.2 \pm 7.0	2.5 \pm 5.6	2.2 \pm 6.0
M	3.2 \pm 6.7	3.9 \pm 11.8	2.9 \pm 7.4
L	2.2 \pm 5.1	6.2 \pm 21.1	2.5 \pm 7.1
SRSi ($\mu\text{g Si l}^{-1}$)			
U	2,176 \pm 1,157	2,530 \pm 1,026	2,553 \pm 1,012
M	2,409 \pm 1,376	2,788 \pm 970	2,640 \pm 1,091
L	2,457 \pm 1,371	2,793 \pm 1,176	2,958 \pm 1,022
AGPT (mg dw l^{-1})			
U	0.8 \pm 2.0	0.6 \pm 1.6	0.6 \pm 1.7
M	0.9 \pm 1.9	1.1 \pm 3.7	0.8 \pm 2.2
L	0.6 \pm 1.4	2.0 \pm 6.8	0.7 \pm 2.1

Note: U (upper layer), M (middle layer) and L (lower layer)

농도가 각각 27.1~34.0 $\mu\text{g N l}^{-1}$ (30.5 $\mu\text{g N l}^{-1}$), 39.9~70.2 $\mu\text{g N l}^{-1}$ (53.7 $\mu\text{g N l}^{-1}$), 89.7~189.0 $\mu\text{g N l}^{-1}$ (133.6 $\mu\text{g N l}^{-1}$) 범위이었다. 전 지점에서 수심이 깊은 저층으로 갈수록 NH_4 의 양이 조금 증가하였고, 저층은 표층보다 4.4배 많았다. NO_3 는 1,532.0~1,865.0 $\mu\text{g N l}^{-1}$ 범위이었고, 평균 농도는 KYO, DEO, DAM에서 각각 1,721.0 $\mu\text{g N l}^{-1}$, 1,597.0 $\mu\text{g N l}^{-1}$, 1,731.0 $\mu\text{g N l}^{-1}$ 이었다. TIN 중 NH_4 는 4.1%, NO_3 는 95.9%를 차지하였고, NH_4 는 NO_3 의 4.3%에 해당하여 NO_3 가 절대적으로 풍부하였다. 또한, 수중 질소 중 NH_4 와 NO_3 의 계절적 변동을 보면 각각 6월과 12월에 풍부하였고, 12월과 6월에 빈약하였다.

SRP는 2.2~6.2 g P l^{-1} 범위이었고, 평균값은 3.2 $\mu\text{g P l}^{-1}$ 이었다. SRP는 하천 유입부인 KYO와 DEO보다는 DAM에서 조금 낮은 경향이었다. 또한, 수층에서 상층이 평균 농도보다 낮았고, 중·하층이 높았으나 그 차이는 크지 않았다. SRSi는 2,176.0~2,958.0 $\mu\text{g Si l}^{-1}$ 범위이었던

고, 평균 농도는 2,589.3 $\mu\text{g Si l}^{-1}$ 이었다. SRSi는 NO_3 와 마찬가지로 NH_4 와 SRP에 비해 풍부한 영양염에 속하였고, 결핍 가능성이 적었다. Chl-a는 KYO, DEO, DAM에서 평균값이 6.0~15.3 $\mu\text{g l}^{-1}$ 범위이었고, 평균값은 10.7 $\mu\text{g l}^{-1}$ 이었다. Chl-a의 최대값으로 볼 때, DAM보다는 유입부에서 높았다.

2) 강 구간

남강의 정점 KUM을 중심으로 상류와 하류 수질의 평균값과 표준편차를 나타낸 것은 Table 2와 같다. NH_4 의 범위와 평균값은 상류에서 21.5~817.6 $\mu\text{g N l}^{-1}$, 181.0 $\mu\text{g N l}^{-1}$ 이었고, 하류에서 0~4,047.0 $\mu\text{g N l}^{-1}$, 1,012.0 $\mu\text{g N l}^{-1}$ 이었다. NO_3 의 범위와 평균값은 상류에서 617.0~3,019.0 $\mu\text{g N l}^{-1}$, 1,754.0 $\mu\text{g N l}^{-1}$ 이었고, 하류에서 233.5~6,635.0 $\mu\text{g N l}^{-1}$, 2,681.0 $\mu\text{g N l}^{-1}$ 이었다. 무기질소 성분 중 NO_3 가 NH_4 보다 풍부하였고, 그 수준은 하류부에서 더욱 높았다. 또한 총무기질소에서 NH_4 가 차지하는 비율도 상류보다 하류구간에서 더욱 높아 SAN지점 하류에는 인위적 오염 영향이 큼을 알 수 있었다.

SRP의 범위와 평균값은 상류에서 0~30.9 $\mu\text{g P l}^{-1}$, 7.2 $\mu\text{g P l}^{-1}$ 이었고, 하류에서 0~759.7 $\mu\text{g P l}^{-1}$, 101.0 $\mu\text{g P l}^{-1}$ 이었다. 하류의 SRP 평균 농도는 상류보다 14배 높았고, NH_4 와 NO_3 의 증가 영향과 일치하였다. SRSi는 상하류 구간에서 740~7,396.0 $\mu\text{g Si l}^{-1}$ 범위이었고, 평균값은 3,099.0 $\mu\text{g Si l}^{-1}$ 이었다. 강의 상하류 구간에서 수질의 변동은 SRSi를 제외하고는 강수량이 풍부한 7월에 그 농도가 전반적으로 낮았고, 1월에 높아 하천의 유황에 의한 수질 농도 변화의 영향이 매우 큼을 알 수 있었다. Chl-a는 상류와 하류에서 평균값(범위)이 각각 9.5 $\mu\text{g l}^{-1}$ (1.9~20.9 $\mu\text{g l}^{-1}$), 20.1 $\mu\text{g l}^{-1}$ (4.0~120.9 $\mu\text{g l}^{-1}$)이었다. Chl-a는 하류로 갈수록 크게 증가하는 경향이 뚜렷하였고, 상류의 chl-a 최대 농도는 하류의 평균 농

Table 2. Mean (\pm SD) values of water quality in the lower part of the Nam River from August 2000 to July 2001.

Factors\Regions	Nam River	
	Upstream (CHO~SAN)	Downstream (KUM~YOM)
Chlorophyll-a ($\mu\text{g l}^{-1}$)	9.5 \pm 6.2	20.1 \pm 28.3
Ammonium ($\mu\text{g N l}^{-1}$)	181 \pm 256	1,012 \pm 1,291
Nitrate ($\mu\text{g N l}^{-1}$)	1,754 \pm 690	2,681 \pm 1,601
SRP ($\mu\text{g P l}^{-1}$)	7.2 \pm 10.7	101 \pm 193
SRSi ($\mu\text{g Si l}^{-1}$)	3,192 \pm 2,336	3,006 \pm 2,212
AGPT (mg dw l ⁻¹)	1.9 \pm 3.2	32.4 \pm 64.0

도보다 낮은 수준이었다.

3. Algal growth potential test (AGPT)

*M. aeruginosa*를 시험종으로 측정한 AGPT 결과는 수환경 시스템과 조사시기에 따른 차이가 컸다. 저수지에서 AGPT값의 평균값(범위)은 0.8 mg dw l⁻¹ (0.6~2.0 mg dw l⁻¹)이었다 (Table 1). 또한 수질 생물검정 결과에서 성장구보다 무성장구가 월등히 많았다. 무성장구는 총배양구 (n = 109)의 78.9%를 차지하였고, 정점별로 보면 KYO 94.5%, DEO 94.5%, TOW 97.2%, DAM 91.7%이었다. 수층에 따른 AGPT는 상층보다 중층과 저층에서 더욱 높았고, 상대적으로 성장구 관찰 빈도도 1.6배 많았다 (Table 3). AGPT 결과, 저수지 전체에서 무성장구가 관찰된 시기는 1월~2월, 4월~6월이었고, 성장구가 관찰된 시기는 3월, 7월~12월이었다. 또한 성장구가 상층~하층에서 모두 관찰된 것은 2000년 9월 뿐이었고, 이 시기는 저수지에서 수리학적으론 가장 큰 변화를 수반하는 것으로 추정되었다.

강에서 AGPT값의 범위와 평균값은 상류에서 0~9.3

Table 3. Algal growth potential test (AGPT) values according to the water layer in Chinyang Reservoir. (Unit: mg dw l⁻¹)

Sampling months	Water layer	Riverine zone		Lacustrine zone	
		Kyongho River	Deokchon River	Intake tower	DAM
MAR	U	1.4	-	-	3.9
	M	-	-	.	0.4
	L	-	-	.	-
JUL	U	-	-	-	-
	M	6.9	-	.	-
	L	3.4	-	.	-
AUG	U	.	.	5.2	.
	M	.	.	.	.
	L	.	.	.	.
SEP	U	6.9	1.4	-	8.4
	M	0.4	-	.	8.9
	L	1.9	23.4	.	10.0
OCT	U	-	-	0.4	-
	M	.	.	.	8.0
	L	-	5.2	.	-
NOV	U	-	-	-	-
	M	-	-	.	1.2
	L	-	-	.	-
DEC	U	-	4.9	2.4	-
	M	-	15.5	.	3.9
	L	-	-	.	4.4

Note : upper (U), middle (M), lower (L) layer in water column, no growth (-), no sample (.).

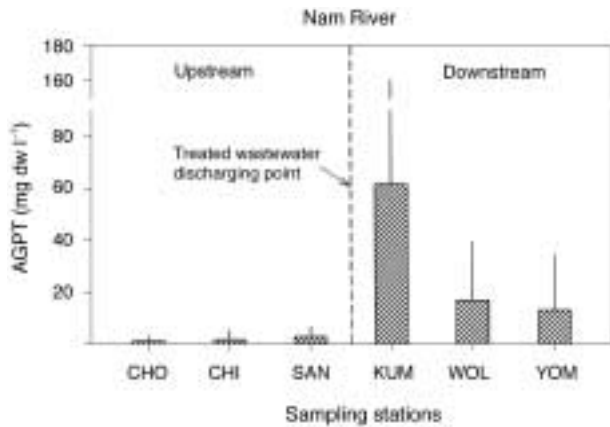


Fig. 3. Spatial distribution of algal growth potential test (AGPT) values in the lower part of Nam River. Vertical bars indicate standard deviation.

mg dw l⁻¹, 1.9 mg dw l⁻¹이었고, 하류에서 0~252.0 mg dw l⁻¹, 32.4 mg dw l⁻¹이었다 (Table 2). 정점에 따른 AGPT값은 KUM에서 평균값이 61.4 mg dw l⁻¹로서 가장 높았고 (Fig. 3), 계절적으로는 1월 (KUM, YOM), 5월 (WOL) 및 8월 (KUM)에 높았다. 2000년 8월에 KUM에서 AGPT값이 높았던 것은 강우에 의해 다량의 영양염이 공급되었기 때문이고, 유출이 급감한 11월에 증가하기 시작하여 1월에 최대를 기록한 것은 전형적인 갈수기 특성으로 인해 유량의 저하가 주된 요인으로 작용하였다 (Fig. 2 참조).

AGPT의 평균값으로 볼 때, 강의 CHO~SAN구간의 수질은 진양호의 저수지와 유사한 성격을 보였는데 이것은 수심, 저수량, 체류시간 등의 구조적인 시스템이 유사하기 때문으로 볼 수 있었고, 가장 중요한 것은 유입 오염원의 영향이 적다는 것을 의미하였다. 반면에 KUM~YOM구간은 도시로부터 발생되는 하수의 처리수가 유입됨으로 인해 인과 질소의 급격한 증가가 야기되었고, 그 결과 AGPT값은 높게 나타났다.

4. 환경 요인과 AGPT

AGPT값은 수중 NH₄와 SRP 영양염 농도와 유의한 상관성이 관찰되었다. 저수지와 강에서 각각 0.045 ($p < 0.05$), 0.745 ($p < 0.001$) 및 0.996, 0.999 ($p < 0.001$)이었다 (Fig. 4; Table 4).

반면 NO₃ 농도는 저수지에서 유의성이 없었고 ($p > 0.05$), 강에서는 상관성 (0.721, $p < 0.001$)이 높았다. 진양호와 남강에서 AGPT는 SRP에 거의 직선적으로 증가하였고, 강한 P 제한성을 보였다 (Fig. 4C, 4G). Chl-a와

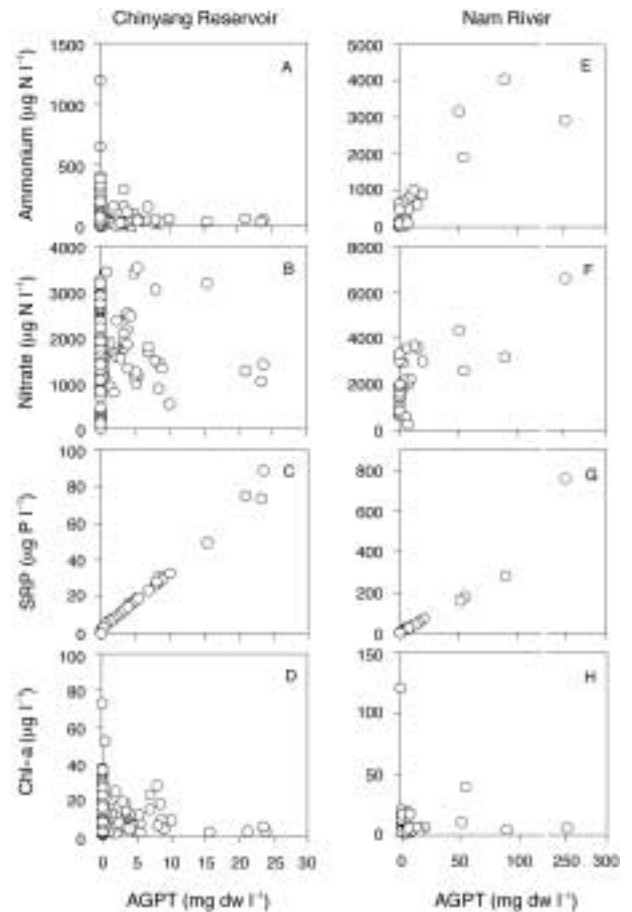


Fig. 4. Relationships between ammonium, nitrate, soluble reactive phosphorus (SRP), chlorophyll-a (Chl-a) concentration and algal growth potential test (AGPT) values in Chinyang Reservoir (N = 109) and the lower part of Nam River (N = 36) from August 2000 to July 2001.

Table 4. Correlation coefficients between water quality factors and algal growth potential test (AGPT) in Chinyang Reservoir and the lower part of the Nam River.

Factors	Algal growth potential Test	
	Chinyang Reservoir (N = 109)	Nam River (N = 36)
Ammonium	0.045**	0.745*
Nitrate	n.s.	0.721*
Soluble reactive phosphorus	0.996*	0.999*
Chlorophyll-a	0.084**	0.095**

Note : * < 0.001, ** < 0.05, n.s. not significant

AGPT의 상호 관련성을 볼 때, chl-a가 높은 곳에서는 대체로 AGPT값이 낮았고, chl-a가 낮은 곳에서는

Table 5. Comparison of AGPT development in Chinyang Reservoir and the Nam River during July 2000 to August 2001.

Water system	Regions	Sampling months											
		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Chinyang Reservoir	Riverine zone	.	.	.	.	.	.	●	.	●	●	.	●
	Lacustrine zone	.	.	●	.	.	.	.	●	●	●	.	●
Nam River	Upstream	●	.	.	.	.	.	.	.	.	.	●	.
	Downstream	●	.	.	.	●	.	.	●	.	.	●	.
Stimulation factors		D		T		D		R	R	R	R	D	T, W

Note : D (drought), R (rainfall), T (turn-over) and W (wind), respectively.

AGPT값이 높은 경향을 보였다 (Fig. 4D, 4H). 결과적으로, AGPT값이 높고 *chl-a*가 낮은 곳은 N과 P가 다량 유입되는 곳으로서 직접적인 오염원 영향이 반영되었고, 도시하천 또는 하수처리수의 유입부에 해당하였다. 하류로 갈수록 그 양상은 대별되어 *chl-a* 농도가 높아지면서 수중 영양염의 감소로 인해 AGPT값의 저하됨이 뚜렷하였다.

본 연구기간 동안 저수지와 강에서 AGPT의 증가에 대한 유도 요인을 시기별로 요약한 것은 Table 5와 같다. 자연적 요인은 갈수, 강우, 전도 및 바람 등으로 볼 수 있었고, 저수지와 강에서 그 요인별 영향은 다소 차이가 있음이 관찰되었다. AGPT 증가에 유량의 감소는 강에서 1월, 5월 및 11월에, 강우는 저수지와 강에서 7월~10월에, 전도와 바람은 저수지에서 12~3월에 각각 영향을 미치는 특성을 나타내었다. 특히, 저수지에서 전도는 수심이 얇은 유입부에서 12월에 시작하여 DAM의 하류에는 3월에 완전 혼합되었다. 최종적으로, 이러한 요인들은 수중의 영양염과 AGPT 증가에 밀접한 관련성이 있었다.

고 찰

수중의 fertility를 측정하는 AGPT 검정법은 제한영양염 측정 (Goldman, 1978), 하수처리수의 영향 평가 (USEPA, 1971) 및 위해성 평가 (Forsberg *et al.*, 1978) 등 수질을 다양하게 평가하는데 활용되어 왔다. AGPT는 수중에서 조류가 성장할 수 있는 잠재력을 나타내는 것으로서 수질의 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 파악뿐만 아니라 하류로 유하하면서 담수조류 발생량이 급격히 증가하고, 수체의 비옥도가 감소되는 경향을 잘 반영하였다. AGPT에 대한 질소

와 인의 영향은 매우 컸으며 두 영양염 중 어느 한 영양염이 감소되거나 고갈된 구간에서 그 값은 감소하였고, 특히 P에 대한 영향이 뚜렷하였다.

진양호와 남강 하류의 AGPT 결과를 국내의 다른 수계에서 조사된 것과 비교해 볼 때, AGPT에 의한 수질 평가가 가능하였다. 신과 조 (1999)에 의해 정리된 호수 (14.1 mg dw l⁻¹)와 하천 (12.9 mg dw l⁻¹)의 평균값에 비해 진양호 (17.0 mg dw l⁻¹, 0~75.2 mg dw l⁻¹범위)는 조금 높았고, 남강 하류 (48.3 mg dw l⁻¹, 0~275.4 mg dw l⁻¹)는 각각 3.4배, 3.7배 수준으로 더욱 높았다. 조사 시기마다 원수에서 부유성 조류가 흡수 이용하고 남은 잔여 영양염의 영향이 지배적이었는데, 갈수기로 갈수록 더욱 증가하였고, AGPT값은 높게 나타나는 경향을 보였다 (Miller *et al.*, 1974).

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 NH₄가 NO₃보다 상관성이 양호하여 조류의 성장에는 NO₃보다 NH₄가 선호됨을 알 수 있었다 (조와 신, 1996; 신과 조, 1999). 수계의 영양상태 평가에서도 AGPT값이 10 mg dw l⁻¹ 이상을 부영양 (Sudo, 1980), 20 mg dw l⁻¹ 이상을 과영양 상태 (Miller *et al.*, 1974)로 보는 기준을 적용할 때, 진양호는 부영양 수준을 초과하였고, 남강은 지역에 따라 차이가 컸으나 진양호보다 AGPT의 평균값이 2.8배로서 월등히 높아 하수처리수에 대한 수질관리가 중요한 것으로 평가되었다.

적 요

진양호와 남강 수역에서 2000년 8월부터 2001년 7월까지 남조류 *Microcystis aeruginosa*에 의한 조류생장 잠재력측정 (AGPT)을 수행하였다. 진양호의 AGPT값은 0~23.4 mg dw l⁻¹ 범위이었고, 무생장 처리구가 79%를 차지하였다. AGPT값은 수중 P 농도에 비례하였고, *chl-*

a가 높을 때 낮았다. 또한, 표층보다 중·저층에서, 하류보다 수심이 얕은 유입부에서 높았다. 계절적으로는 수량이 풍부한 시기인 8월~9월에 저수지의 전체를 통해 AGPT값이 증가하였다. 반면에, 남강의 AGPT값은 0~252.0 mg dw l⁻¹ 범위로써 저수지에 비해 변동 폭이 매우 컸고, 생장이 관찰된 처리구는 65%이었다. 하수처리수가 유입되는 지점을 중심으로 상류는 연중 10 mg dw l⁻¹ 이하였으나, 하류(KUM~YOM 구간)는 유량의 영향이 컸던 3월과 7월을 제외한 평균값이 57 mg dw l⁻¹로써 과영양 수준을 초과하였다. AGPT 결과는 저수지와 강에서 시공간적인 차이가 관찰되었다. 저수지의 유입부는 7월~9월, 12월에, 하류는 3월, 8월~12월에, 하천은 1월, 5월 및 11월에 그 값이 증가하였다. AGPT는 조류 생장에 대한 제한영양염 판정뿐만 아니라, 수중 fertility를 평가함에 있어 유용하였다.

인 용 문 헌

- 기상청. 2000-2001. <http://www.kma.co.kr>, 기후자료: 산청, 진주 강수량.
- 금지돈, 양홍준. 2002. 남강의 어류상과 군집구조. 한국육수학회지 **35**: 220-231.
- 김범철, 박주현, 허우명, 임병진, 황길순, 최광순, 채기숙. 1999. 국내 주요 호수의 육수학적 조사 (3) : 진양호. 한국육수학회지 **32**: 111-126.
- 김봉진, 윤기섭, 양운진, 이찬원. 1995. 남강에 적용된 하천 수질모델의 비교 연구. 경남대학교 환경문제연구소 환경연구 **17**: 65-75.
- 김종원, 이학영, 김맹기, 조인숙. 1993. 진양호와 합천호의 식물플랑크톤상에 관한 연구. 한국환경과학회지 **2**: 367-371.
- 김철수, 오경환. 1988. 남강의 수질과 식물플랑크톤의 분포. 농연보 **22**: 47-59.
- 김한순, 최재신, 정 준, 김도한. 1995. 진양호의 식물플랑크톤 군집에 관한 연구. 한국육수학회지 **28**: 345-357.
- 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. 1998. 낙동강 부영양화에 따른 담수조류의 생태학적 연구. 인제대학교 박사학위논문. 202p.
- 윤성운, 정인철. 1996. 남강 상류지역 수질보전의 정책방향. 환경정책 **4**: 125-144.
- 이영환, 김중균, 이한생, 조동진, 조주식, 신원교. 1997. 남강 농업용수의 시기별 수질변화. 한국환경농학회지 **16**: 259-263.
- 이호원, 허성관, 이민용. 1991. 남강 및 태화강 수질의 미생물학적 연구. 경남대학교 환경연구소 연구보고 **13**: 81-93.
- 정태명, 하호성, 조무제, 양민석, 윤한대, 허중수. 1982. 경남지방의 하천수질오염에 관한 연구, 제1보 남강의 수질오염 실태조사. 경상대학교 연구논문집 **21**: 99-108.
- 최형섭, 박태주, 허중수. 1995. 남강의 수질예측을 위한 QUAL2E 모델 적용. 한국환경농학회지 **14**: 7-14.
- 하호성, 허중수. 1983. 진주시 생활하수가 남강 수질오염에 미치는 영향. 한국환경농학회지 **2**: 90-97.
- 한국수자원공사. 1994. 남강다목적댐 보강사업 환경관리조사 보고서. 131p.
- 한국수자원공사. 1999. 남강다목적댐 관리연보. 337p.
- 허중수, 하호성, 한문규, 조주식, 이춘희. 1990. 진양호의 수질 보전을 위한 조사연구. 1. 진양호 상류유역의 수질현황. 농연보 **24**: 1-14.
- 허중수, 하호성, 한문규, 조주식, 이춘희. 1990. 진양호의 수질 보전을 위한 조사연구. 2. 진양호 상류유역의 수질오염원 및 2000년대 수질예측. 농연보 **24**: 15-35.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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., Chicago, USA. 1086p.
- Sudo, R. 1980. Studies on the water-blooms in lake Kasumigaura. *Jpn. J. Limnol.* **41**: 124-131.
- USEPA (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.

(Received 4 Jan. 2003, Manuscript accepted 4 Mar. 2003)