

## 낙동강 중·하류에서의 규조류 성장잠재력 평가

권영호<sup>1</sup> · 서정관<sup>1\*</sup> · 박상원<sup>2</sup> · 양상용<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>국립환경과학원 낙동강물환경연구소, <sup>2</sup>계명대학교 환경과학과)

## Evaluation of Diatom Growth Potential in Midstream and Downstream Nakdong River

Young Ho Kwon<sup>1</sup>, Jung Kwan Seo<sup>1\*</sup>, Sang Won Park<sup>2</sup> and Sang Yong Yang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Nakdong River Environment Research Center National Institute of Environmental Research, Koryoung 717-873, Korea

<sup>2</sup>Department of Environmental Science Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

For the test organism of algal growth potential (AGP), the diatom in the genus *Stephanodiscus* which cause blooms in the Nakdong River was used instead of generally used strains of *Selenastrum*, *Microcystis*, or *Anabaena*. AGP results indicated that all the samples in the Nakdong River except for that from the Nakdan Bridge site were eutrophic state. Furthermore, the sample from Kumho River site was hypertrophic state. In the main stream Nakdong River, the value of AGP was lowest at the upstream Nakdan Bridge site and was highest at Koryoung Bridge site which is just downstream of Kumho River confluent point indicating the seriousness of pollution contributed by the Kumho River to the Nakdong River. Changes in the concentration of nutrients before and after the AGP tests and inter-relationship among the nutrients indicated that the growth of the *Stephanodiscus* in the AGP tests were mostly affected by the nitrate, silicate and phosphate. The limiting nutrient was identified by the nutrient addition experiments and the results showed that phosphate was the limiting nutrient for the growth of *Stephanodiscus* in the tested samples.

**Key Words:** AGP, diatom, Nakdong River, nutrients

### 서 론

낙동강 유역은 산지가 많으며, 하폭이 넓고 평탄하나 유출이 불규칙하고 홍수와 한해의 피해가 큰 특성을 가지고 있다. 또한 하천 중·상류부에는 대도시와 산업단지가 집중되어 있어 많은 오염물질이 하천으로 유입되고 있으며 특히 갈수기에는 낙동강 중·하류지역에 유속이 낮은 정체구간이 장기간 형성되어 지형적·수리학적으로 조류 성장에 알맞은 조건을 제공하고 있다(양 등 2003; 장 등 2001). 그러므로 갈수기에는 매년 하천 중·하류부를 중심으로 규조류에 의한 조류 대 증식 현상이 반복적으로 발생하고 있다(조 등 1995; Ha *et al.* 2003).

갈수기 낙동강 조류 대 증식 현상과 영양염과의 관련성을

과약하기 위하여 조류성장잠재능력평가(AGP) 방법은 매우 유용한 수단으로 활용될 수 있으며, 특히 수역에 부하되는 각종 무기 영양염이 조류 증식에 미치는 영향과 조류증식을 제한하는 물질이 어떤 것인지 검토하는 경우에 매우 효과적이다(西澤一俊 *et al.* 1987). 조류성장잠재능력(AGP) 시험 방법은 시험조류를 이용하는 일종의 Bioassay법으로서 제한 영양염 판정뿐만 아니라 오·폐수 처리효율을 판정하거나 독성을 평가하는 등 다양하게 활용되고 효율성도 높다(西澤一俊 *et al.* 1987; Lopez-Lopez and Davalos 1998; Dzialowski *et al.* 2005). 국내에서는 1990년대부터 하천과 호소에서 조류성장잠재능력(AGP) 분석방법을 활용한 수질평가 방법이 시도되어 왔으며, 수역의 부영양화 정도 평가와 더불어 N·P 영양염의 상대적 결핍을 밝히는데 주로 활용되었다(위 등 1991; 박 등 1992; 주 등 1994; 구 2001).

낙동강 수계를 대상으로 한 조류성장잠재능력(AGP) 관련 연구로는 신과 조(1999)가 녹조류인 *Selenastrum capricornu-*

\*Corresponding author (jkseo@me.go.kr)

tum과 남조류 *Microcystis aeruginosa*를 이용하여 낙동강 중·하류의 영양상태를 평가한 사례가 있으며, 서 등(2003)은 *Anabaena flos-aquae*를 이용하여 낙동강 수계에 위치한 하 폐수처리시설의 방류수를 대상으로 조류성장 잠재력을 조사하여 보고한 바 있다. 그러나 낙동강은 다른 하천과는 달리 조절강의 특성을 가지고 있으며, 갈수기동안에는 낙동강 하류부에 단일 규조류에 의한 조류 대 증식 현상에 의해 하천 수표면 색깔이 수개월 동안 암갈색으로 지속된다. 따라서 조류에 의한 조류성장 잠재능력 (AGP) 시험은 *Selenastrum capricornutum*과 같은 공시 녹조류를 이용하는 것 보다 현장에서 자생하고 있는 조류를 이용 할 경우 제한 영양염 판정과 낙동강 본류에 유입되는 지류의 영향에 대하여 보다 현실성 있는 시험 방법이 될 수 있을 것이다(Lopez-Lopez and Davalos 1998).

그러므로 본 연구에서는 갈수기 동안 낙동강 중·하류에서 규조류 대증식현상을 발생시키는 원인종인 *Stephanodiscus* sp.를 현장에서 직접 분리한 후 조류성장잠재능력(AGP) 시험에 이용하였으며, 수역별 영양상태 평가와 함께 *Stephanodiscus* sp. 증식에 실질적으로 영향을 미치는 제한 영양염을 결정하고자 하였다. 즉, 현장조류를 이용한 AGP와 결정된 제한 영양염을 통해 부영양화 된 수계에서 *Stephanodiscus* sp. 증식에 직접적인 영향을 미치는 영양염을 밝힘으로서 유역관리 및 오염 부하량 조절 등의 부영양화 방지대책을 수립하는데 있어 중요한 기초 자료를 제공하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 조사대상 지점과 조사 시기

낙동강은 우리나라 제2의 하천으로서 그 유역 면적은 23,817km<sup>2</sup>, 유로 연장은 521.5km이며 우리나라 전 국토(남한) 면적의 24.1%를 차지하고 있다. 조사 지점은 낙동강 중류와 하류에서 규조류 대증식이 관찰되었던 고령교(낙동강 하구둑 으로부터 149km)와 구포교 지점(낙동강 하구둑 으로부터 11km)을 선정하였고 대조구로 상류의 낙단교(낙동강 하구둑 으로부터 234km) 지점을 선정하였다(Fig. 1). 또 지류 중에 낙동강 중·하류 수질변동에 큰 영향을 미치는 금호강 지점(낙동강 하구둑 으로부터 170km)을 선정하였다(정 과 박 2004; 조와 엄 2005). 조사 시기는 2004년 4-7월에 월 1회씩 총 4회에 걸쳐서 조사하였다.

### 수질분석

수온을 비롯한 수소이온농도(pH)와 전기전도도는 YSI (63/10 FT) 기기를 이용하여 현장에서 직접 측정하였으며, 용존산소(DO) 농도는 윙클러-아지드화나트륨 변법을 이용

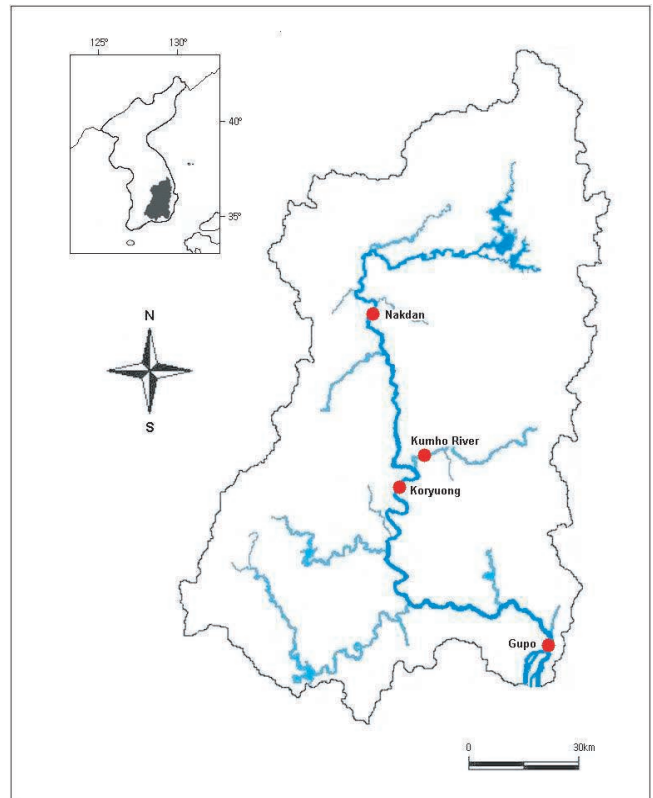


Fig. 1. The sampling sites in the Nakdong River.

하여 현장에서 시료를 고정한 후 실험실에서 측정하였다(환경부 2000). 그리고 영양염류(암모늄: Automated phenate method, 아질산염: Sulfanilamide-NED method, 질산염: Automated cadmium reduction method, 인산염: Automated ascorbic acid reduction method, 규산염: Automated method molybdate-reactive silica)는 Standard methods(APHA · AWWA · WPCF 1995)의 방법에 의해 분석하였고 부유물질(SS) 농도와 클로로필 a 농도는 수질오염공정시험방법(환경부 2000)에 따라서 각각 유리섬유 여지법과 흡광광도법을 이용하여 분석, 정량하였다.

### AGP 시험

AGP 시험에 사용될 조류종의 선택은 낙동강 하류지역에 규조류 대증식 현상이 만성적으로 발생하는 동절기 기간에 시료를 채수한 후 현미경하에서 미세조작기(Micromanipulator)를 이용하여 분리하였으며, 분리된 규조류의 배양은 수정된 Chu No. 10과 F/2 Vitamin 배양액을 사용하여 최대 증식기까지 배양한 후 시험에 이용하였다. 분리된 종의 분류는 전자현미경(EVO40XVP, Carl Zeiss, 독일)으로 *Stephanodiscus* sp. 증임을 최종적으로 확인하였다.

AGP 측정을 위해서 0.45 $\mu$ m 막여과지로 시료를 미리 여과하여 시료 속에 포함된 기타 조류 종들을 미리 제거한 후 시료 100 mL당 *Stephanodiscus* sp.가 5,000 cells mL<sup>-1</sup>이 되도록

**Table 1.** Addition amount of nutrients at nutrient addition test

Nutrients	Addition Amount
Nitrogen	1.0 mg L <sup>-1</sup> as NaNO <sub>3</sub> -N
Silicon	2.0 mg L <sup>-1</sup> as Na <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub> -Si
Phosphorus	0.1 mg L <sup>-1</sup> as K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> -P

접종하였다. 배양조건은 온도 12°C, 조도는 4,000 Lux에서 15일간 실시하였다. 배양이 끝난 시료에 대한 AGP값은 흡광도 600 nm(APHA · AWWA · WPCF 1995)에서 작성된 세포 밀도에 대한 표준 검량선에 따라 세포 밀도를 측정 후 건조중량(mg L<sup>-1</sup>)으로 환산하였다.

영양염 첨가실험의 경우는 규산염 농도가 높게 나타난 6월과 7월을 제외한 4월과 5월 중에서 질산염, 인산염, 규산염 농도가 상대적으로 낮은 5월의 시료를 선택하여 실험을 수행하였다. 영양염 첨가량은 실험목적에 따라 여러 가지가 있으나 첨가실험 시 보편적으로 설정된 값(조 등 1991)을 고려하여 결정하였다(Table 1). 영양염을 첨가한 후 AGP 시험과 동일한 방법으로 온도는 12°C, 조도는 4000 Lux에서 영양염을 첨가하지 않은 대조구와 함께 15일간 배양하였다.

## 결과 및 고찰

### 낙동강 수질 현황

낙동강 본류의 수질변동 특성을 조사한 결과 대체적으로 낙동강의 주요 지류인 금호강 유입 영향으로 인한 수질변동이 컸으며, 하류로 갈수록 점차 그 영향이 줄어드는 것으로 나타났다(Table 2). 현장 수질측정 항목인 전기전도도(Electric Conductivity)의 경우는 낙단교에서 평균 101.6  $\mu\text{S cm}^{-1}$ 로 상대적으로 낮은 값을 기록하였으나, 고령교 지점에서 평균 186.4  $\mu\text{S cm}^{-1}$ 로 크게 증가한 것으로 나타났다. 고령교 지점에서 전기전도도 값이 높게 나타난 이유는 낙단교와 고령교 지점 사이에서 유입되는 금호강의 전기전도도 값이 평균 398.0  $\mu\text{S cm}^{-1}$ 으로 낙단교 지점에 비하여 4배 이상 높았기 때문이었다.

낙동강에서의 영양염 농도 분포 특성 또한 규산염을 제외한 질소, 인 모두 금호강 합류 전에는 대체적으로 낮은 농도를 나타내었으나, 금호강이 합류된 이후 급격히 증가하는 양상을 보여주었다. 암모늄의 경우 전 조사지점에서 0.008–0.654 mg L<sup>-1</sup>의 범위의 농도분포를 나타내었고 상류 지점인 낙단교는 평균 0.091 mg L<sup>-1</sup>로 대체로 낮았으나 금호강이 합류된 이후인 고령교에서 평균 0.184 mg L<sup>-1</sup>로 갑자기 높아지는 특성을 나타내었다. 금호강은 평균 0.391 mg L<sup>-1</sup>로 조사대상 지점 가운데 가장 높은 농도를 보여주었다. 질산염은 1.712–5.906 mg L<sup>-1</sup>의 농도범위였으며, 낙단교에서 평균 1.996 mg L<sup>-1</sup>이었고, 금호강에서는 5.060 mg L<sup>-1</sup>을 나타내었

다. 그리고 하류인 구포교에서는 2,375 mg L<sup>-1</sup>의 값을 보여주었다. 아질산염은 0.01–0.206 mg L<sup>-1</sup>의 농도 범위였으며, 질산염과 유사한 변화양상을 보여주었다. 인산염의 경우 0.001–0.427 mg L<sup>-1</sup>의 농도범위를 보여주었고, 상류지역인 낙단교에서는 평균 0.020 mg L<sup>-1</sup>의 비교적 빈영양 상태를 보여주었으나, 금호강에서 평균 0.316 mg L<sup>-1</sup>의 높은 인산염을 함유한 지류가 유입된 이후 고령교에서 평균 0.086 mg L<sup>-1</sup>로 수체의 인산염 농도가 증가한 것으로 나타났다. 규산염 농도 분포는 2.818–11.164 mg L<sup>-1</sup>의 범위로 측정되었으나 인과 질소원과는 달리 조사 지점과는 큰 관련성이 없었으며, 평균적으로는 5.591–7.593 mg L<sup>-1</sup>의 범위를 나타내어 연중 낙동강에 풍부하게 존재하는 것으로 나타났다.

Chlorophyll-a의 농도는 전 지점에서 6.8–64.3 mg m<sup>-3</sup> 범위로 측정되었다. 월별로는 5월이 가장 높게 측정 되었으며 지점별로는 상류인 낙단교에서 낮았고 금호강이 합류된 이후인 고령교 지점과 구포교 지점은 높은 농도를 보여주었다.

### 영양염류와 조류발생과의 관련성 평가

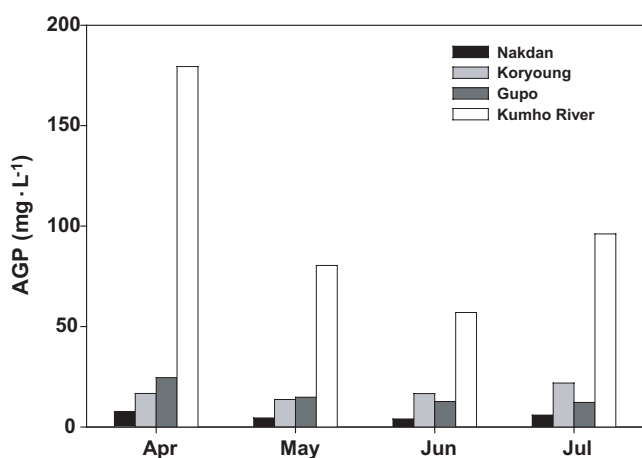
조류성장잠재능력(AGP) 시험 결과: *Stephanodiscus* sp.를 시험종으로 하여 AGP를 측정된 결과 금호강이 합류되기 이전 지점에서는 비교적 낮은 값을 보여주었으나 금호강이 합류된 이후 고령지점에서 AGP값이 크게 증가하였다. 따라서 낙동강 중류지역의 조류발생에 있어서 금호강 유입이 중요한 영향을 미치는 것으로 나타났다(Fig. 2).

금호강이 합류되기 이전 지점인 낙단교 지점에 대하여 연간 총 4회 시험 결과 AGP값이 평균 5.5 mg L<sup>-1</sup>를 보여주었고 전체적으로는 4.0–7.7 mg L<sup>-1</sup>의 범위를 나타내었다. 금호강이 낙동강에 합류된 직후 지점인 고령교는 평균 17.9 mg L<sup>-1</sup>와 전체농도범위 13.7–21.9 mg L<sup>-1</sup>를 나타내어 금호강 합류 이후 AGP값이 크게 증가된 것으로 나타났다. 그리고 낙동강 하류지점인 구포교 지점의 경우도 평균 16.1 mg L<sup>-1</sup>의 값과 전체농도 범위 12.2–24.6 mg L<sup>-1</sup>의 비교적 높은 AGP값을 나타내었다. 낙동강 주요 지류인 금호강의 경우는 평균 103.2 mg L<sup>-1</sup>와 농도범위 57.0–179.4 mg L<sup>-1</sup>을 보여, 낙단교 지점에 비하여 최대 20배 이상 높은 값을 나타내었다. 특히 금호강의 4월에 채수한 시료의 경우 179.4 mg L<sup>-1</sup>로 가장 높은 값을 기록하였다.

국내의 다른 하천들에서 조사된 조류성장잠재능력(AGP) 값들은(시험종: *Microcystis aeruginosa*), 금강의 경우 평균 32.7 mg L<sup>-1</sup>이었고(신과 조 2000), 남강은 평균 57 mg L<sup>-1</sup>로(신 등 2003) 나타나 있다. 이러한 값들은 본 조사(시험종: *Stephanodiscus* sp.) 결과와 비교하여 낙동강 본류 지점 보다는 모두 높았으나, 지류인 금호강 보다는 2배 이상 낮은 값들이다. 낙동강 본류를 대상으로 남조류인 *Microcystis aeruginosa*를 시험 종으로 한 조사결과를 살펴보면 AGP 값이 366 mg L<sup>-1</sup>

**Table 2.** Water quality at sampling sites from April to July 2004.

Date yr/m/d	Site	Temp. °C	pH	Cond. μs/cm	DO	SS	NH <sub>3</sub> -N	NO <sub>2</sub> -N mg L <sup>-1</sup>	NO <sub>3</sub> -N	PO <sub>4</sub> -P	SiO <sub>2</sub>	Chl-a mg m <sup>-3</sup>
04.04.27	Nakdan	12.4	7.6	125.1	9.3	22.4	0.008	0.010	1.807	0.035	4.315	6.8
	Koryoung	15.9	7.6	292.6	8.6	28.4	0.042	0.033	3.377	0.136	3.826	40.5
	Gupo	16.0	7.5	195.0	7.7	13.6	0.101	0.018	2.793	0.069	2.818	9.5
	Kumho	15.3	7.2	372.9	6.2	24.4	0.054	0.120	5.906	0.379	6.265	30.1
04.05.27	Nakdan	20.5	7.2	117.7	8.9	17.2	0.173	0.087	1.712	0.001	2.958	11.3
	Koryoung	22.5	7.8	222.2	10.3	18.0	0.046	0.032	3.027	0.103	3.479	57.3
	Gupo	21.1	7.4	144.4	7.8	8.0	0.094	0.023	2.317	0.037	5.801	64.3
	Kumho	24.0	8.3	612.0	11.4	10.4	0.419	0.206	5.000	0.427	5.345	50.7
04.06.29	Nakdan	21.6	7.4	88.5	8.7	42.8	0.047	0.023	2.521	0.030	8.750	8.9
	Koryoung	23.9	7.3	112.0	8.2	65.2	0.437	0.036	2.985	0.061	8.948	12.1
	Gupo	25.0	7.2	114.3	6.9	18.8	0.440	0.055	2.029	0.037	8.638	13.4
	Kumho	24.2	7.3	242.2	7.6	16.8	0.438	0.098	4.672	0.192	9.175	26.2
04.07.26	Nakdan	24.1	7.7	75.1	7.8	43.2	0.137	0.012	1.943	0.016	8.927	7.0
	Koryoung	28.0	7.7	118.9	7.5	42.4	0.213	0.060	2.462	0.045	5.824	20.5
	Gupo	29.9	8.3	95.7	8.1	19.2	0.293	0.026	2.361	0.043	11.164	32.0
	Kumho	31.0	8.0	364.8	9.3	12.0	0.654	0.112	4.664	0.264	9.586	53.2

**Fig. 2.** Comparison of AGP analysis results among the sampling sites from April to July 2004.

로 높은 값을 나타낸 예에서 알 수 있듯이(신과 조 1999), 시험 중으로 규조류인 *Stephanodiscus* sp.를 이용할 경우 AGP 값이 남조류보다 상당히 낮게 나타남을 알 수 있다. 따라서 금호강의 조사결과를 규조류인 *Stephanodiscus* sp.에 의한 결과임에도 불구하고 조류성장 측면에서 다른 하천에 비하여 매우 유리한 조건을 가지고 있는 것으로 판단되었다.

일반적으로 AGP 값은 빈영양 수역에서는 보통 1 mg L<sup>-1</sup> 이하, 중영양 수역에서는 1-10 mg L<sup>-1</sup>이며 부영양 수역에서는 10-20 mg L<sup>-1</sup>, 과영양 수역에서는 20 mg L<sup>-1</sup> 이상이다(Sudo 1980; Miller *et al.* 1974). 규조류를 이용한 본 조사 결과를 이 기준에 적용할 경우에도 낙단교 지점은 중영양 수역이라고 볼 수 있으며, 고령교와 구포교 지점은 계절에 따라 부영양과 과영양 단계를 나타냄을 알 수 있다. 그리고 낙동강에 유입되는 주요 지류인 금호강은 심각한 과영양 수역으

로 판정되었으며, 낙동강 본류에 유입된 후 조류발생에 큰 영향을 미치는 것으로 사료되었다.

조류의 영양염 이용률과 제한 영양염 추정: *Stephanodiscus* sp.를 대상으로 실험한 결과 수중의 영양염 중에서 인산염에 대한 흡수 이용률이 가장 높았으며, 또한 인산염이 *Stephanodiscus* sp.의 제한 영양염으로 작용하는 것으로 나타났다(Fig. 3). 암모늄과 아질산염의 경우 거의 모든 시료에서 AGP 시험 전·후의 농도차가 크지 않은 것으로 나타났다. 그리고 질산염과 규산염은 AGP 시험 후 낙단교, 고령교, 구포교 시료에서 5.2-21.7%의 영양염 감소현상을 나타내었고 금호강 시료에서는 질산염이 61.4%, 규산염이 20.7%로 비교적 높은 영양염 감소를 보여주었다. 그러나 인산염의 경우 전 시료에 대하여 AGP 시험 후 영양염 농도가 시험 전 보다 90% 이상 감소된 것으로 나타났다.

영양염 첨가 실험에서 규산염의 경우 2 mg L<sup>-1</sup>를 시료에 추가로 첨가한 결과 대조구와 규산염 2 mg L<sup>-1</sup> 첨가구 사이의 AGP 값에서 큰 차이를 보여주지 않았으며, 질산염 1 mg L<sup>-1</sup>를 첨가한 결과에서도 구포교 지점을 제외하고는 규산염 첨가구와 유사한 경향을 나타내었다. 그러나 인산염 0.1 mg L<sup>-1</sup>를 첨가한 시료의 경우는 다른 첨가구와는 다르게 전 지점의 AGP 값이 대조구에 비해 두 배 혹은 그 이상 증가하는 것으로 나타나, 인산염이 주요한 제한 인자로 작용하고 있음을 보여주었다(Fig. 4).

현재까지 국내 많은 하천에서 조사된 결과(위 등 1991; 박 등 1992; 주 등 1994; 신 등 2003)와 동일하게 낙동강의 경우도 인(P)이 주요한 조류 성장의 제한 요인으로 작용하고 있으며, 특히 낙동강 중·하류부의 규조류 대증식 현상과 밀접한 관련성을 가지고 있는 것으로 나타났다. 물론 담수 환경

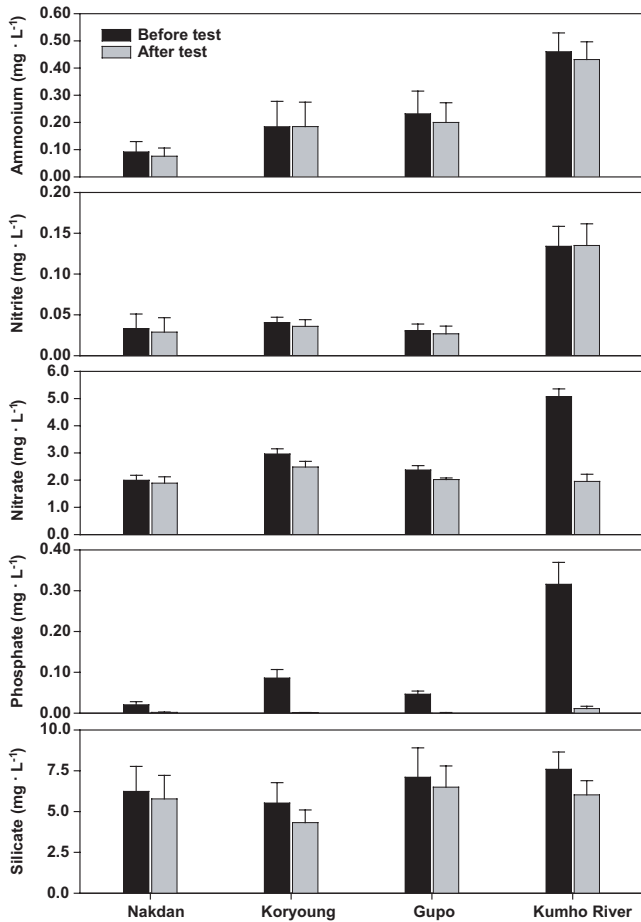


Fig. 3. Average nutrients concentration at the sampling sites before and after the AGP test from April to July 2004.

일지라도 열대나 아열대 지역에서 질소가 제한 영양염으로 작용하는 예외적인 경우도 있지만(Carignan and Planas 1994; Henry *et al.* 1984; Vincent *et al.* 1984), 일반적으로 담수 환경에서는 인(P)이 조류 성장의 제한 인자로 작용하고 해수 환경에서는 반대로 질소(N)가 제한 인자로 나타나는 경향과 보편적으로 일치하고 있다.

참고문헌

구준호. 2001. 조류성장잠재력을 이용한 하수처리장유출수의 환경 영향평가. 석사학위논문, 부경대학교.  
 박혜경, 이문호, 유재근. 1992. AGP spike test에 의한 국내 대형 댐 호의 조류성장 제한영양염의 추정. 수질보전학회지 **8**: 159-166.  
 서정관, 이재정, 양상용, 정익교. 2003. 낙동강 수계 하폐수 처리시설의 방류수가 조류성장 잠재력에 미치는 영향 *Algae* **18**: 157-167.  
 신재기, 이옥희, 조경제. 2003. 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 수질평가. 한국육수학회지 **33**: 244-250.

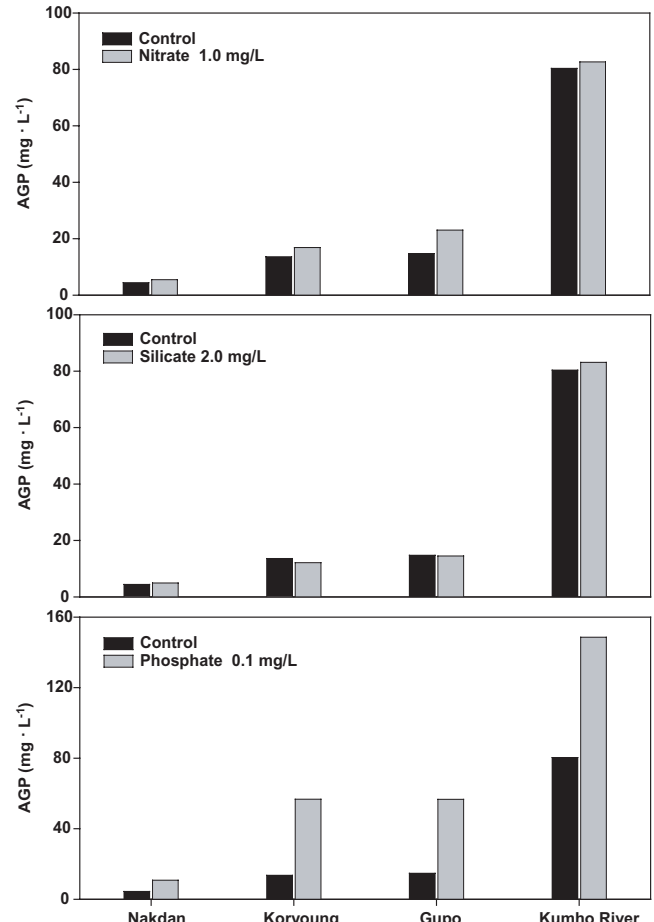


Fig. 4. Effect of nutrients addition test among the sampling sites from April to July 2004.

양상용, 서정관, 이재정, 유재정, 황동진, 박정민, 윤영삼, 정재호, 김문수, 이혜진, 오수태. 2003. 낙동강의 조류발생 특성 및 제어방안 연구 (I). 국립환경연구원보 **25**: 511-524.  
 위인선, 이종빈, 주현수. 1991. 주암댐 및 이사천댐 유역의 조류생 산 잠재력 조사에 관한 연구. 한국환경생물학회지 **9**: 104-112.  
 장광현, 황순진, 장민호, 김현우, 정광석, 주기재. 2001. 저수지화 성향을 띤 낙동강에서 치어 섭식이 동물플랑크톤 군집에 미치는 영향. 한국육수학회지 **34**: 310-319.  
 정성관, 박경훈. 2004. 낙동강 중류 지역의 통합적 유역환경 평가 및 유형화. 한국환경영향평가학회지 **3**: 137-151.  
 조경제, 신재기. 1995. 낙동강에서 규조류 *Stephanodiscus hantzschii* f. *tenuis*와 *S. parvus*의 만성적 대발생. 한국조류학회지 **10**: 91-96.  
 조규승, 강인구, 권오길, 김범철, 나규환, 안태석, 이종범, 이인기, 이혜금, 전상호, 최준길. 1991. 호소환경조사법. pp. 271-281.  
 조덕호, 엄홍석. 2005. 낙동강 하천수질예측에 관한 연구 — 월별 시계열 자료를 이용한 고정지점을 중심으로. 한국환경정책학회지 **13**: 5-30.  
 주현수, 위인선, 정미량. 1994. 광주천 수계에 있어서의 AGP에 관한 연구. 한국환경생물학회지 **12**: 125-136.  
 환경부. 2000. 수질오염공정시험법. pp. 458.  
 西澤一俊, 千原光雄. 1987. 藻類研究法. 共立出版, 日本.  
 APHA · AWWA · WPCF. 1995. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 17th Edition. Washington, DC: American Public Health Association.

- Carignan R. and Planas D. 1994. Recognition of nutrient and light limitation in turbid mixed layers: Three approaches compared in the Paran floodplain (Argentina). *Limnol. Oceanogr.* **39**: 580-596.
- Dzialowski A.R. Wang S.H. Lim N.C. Spotts W.W. and Huggins D.G. 2005. Nutrient limitation of phytoplankton growth in central plains reservoirs, USA. *J. Plankton research* **27**: 587-595.
- Ha K. Jang M.H. and Joo G.J. 2003. Winter *Stephanodiscus* bloom development in the Nakdong river regulated by an estuary dam and tributaries. *Hydrobiol.* **506-509**: 221-227.
- Henry R. J. Tundisi G. and Curi P. R. 1984. Effects of phosphorus and nitrogen enrichment of phytoplankton in a tropical reservoir (Lobos reservoir, Brazil). *Hydrobiologia* **100**: 101-112.
- Lopez-Lopez E. and Davalos L. 1998. Algal growth potential and nutrient limitation in a tropical river-reservoir system of the Central Plateau, Mexico. *Aquatic Ecosystem Health Management* **1**: 345-351.
- Miller W.E. Maloney T.E. and Greene J.C. 1974. Algal productivity in 49 lake waters as determined by algal assays. *Wat. Res.* **8**: 667-679.
- Sudo R. 1980. Studies on the water-blooms in lake Kasumigaura. *J. Limnol.* **41**: 124-131.
- Vincent W. F. Wurtsbaugh W. Vincent C. L. and Richerson P. J. 1984. Seasonal dynamics of nutrient limitation in a tropical high altitude lake (Lake Titicaca, Peru-Bolivia): application of physiological bioassays. *Limnol. Oceanogr.* **29**: 540-552.
- 

Received 15 March 2006

Accepted 8 May 2006