Algae
Volume 18(2): 157-167, 2003

낙동강 수계 하 · 폐수 처리시설의 방류수가 조류 성장 잠재력에 미치는 영향

서정관* · 이재정 · 양상용 · 정익교[1]

(국립환경연구원 낙동강물환경연구소, [1]부산대학교 지구환경시스템학부)

Effect of the Sewage and Wastewater Plant Effluent on the Algal Growth Potential in the Nakdong River Basin

Jung Kwan Seo*, Jay Jung Lee, Sang Yong Yang and Ik Kyo Chung[1]

Nakdong River Water Quality Research Laboratory, National Institute of Environmental Research, Daegu 702-832 and [1]Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

Effect of the effluent of the sewage and wastewater plants on the algal growth was investigated from the 19 plants located in the Nakdong river basin. Most of the samples showed high values of the algal growth potential (AGP) when they were mixed with natural river water at 20% of final concentration. At 20% of the mixing ratio, the mixed effluents of sewage and wastewater showed 3.5 and 1.8 times higher AGP than those of the natural river water. The higher AGP values are attributable to the high contents of phosphorus and ammonium in the effluent. The mixing ratio of effluents of the discharge/river flow was highest in the Kumho River (42.8%) followed by the middle of Nakdong River (22.7%), Kam Stream (13.9%), Byungsung Stream (13.3%), Yangsan Stream (7.9%), and Young River (5.4%). Comparison of the trophic state of the effluents with natural river water indicated that the effluents showed higher trophic values than natural water. Concentrations of total phosphorus, total nitrogen and conductivity in the effluents were 12.3, 4.9 and 5.3 times higher than the those found in natural river water respectively. The AGP values were highly related with the trophicity of the water especially on the concentrations of phosphate and ammonium. Toxicities of the treated sewage water, wastewater and livestock waste water tested by the luminescent bacteria, *Vibrio fischerii* were generally low.

Key Words: algal growth potential, Nakdong river basin, sewage and waste water plant effluent, *Vibrio fischerii*

서 론

부영양화 현상이 매년 심화되어 가고 있는 수역에 대하여 중앙 정부와 각 지방 자치 단체들은 오염 부하량 삭감을 목적으로 환경 기초 시설 확충에 많은 재원을 투입하고 있다. 현재 낙동강 수계 내에 설치된 환경 기초 시설 중 2001년 12월31일을 기준으로 규모가 크고, 처리대상 오염 물질 농도가 높은 주요 시설은 하수 종말 처리 시설 51개소, 산업단지 폐수 종말 처리 시설 11개소, 축산 폐수 공공 처리 시설 8개소, 분뇨 처리 시설 48개소 등 총 115개 시설이 있다(낙환청 2002). 물관리 종합 대책에 따르면, 2011년까지 낙동강 수계 내에 환경 기초 시설을 증설하여 하수 처리율을 더욱 높일 예정이다(환경부 2002).

환경 기초 시설의 설치와 효율적인 운영으로 하 · 폐수 처리율이 높아지면 하천으로 흘러드는 오염 물질 부하율이 상당 부분 감소되어 하천의 수질이 점차 개선될 수가 있다. 그러나 이때 고려되어야 할 점은 환경 기초 시설로부터 배출되는 최종 방류수의 수질 상태와 방류수가 하천에 희석된 이후에 하천 자정작용으로 정화될 수 있는 범위 내의 방류 수량이 배출되는가 하는 점이다. 비록 법적인 배출 허용 기준을 초과하지 않았더라도 방류수의 영양 상태가 방류 수역에 비해 지나치게 높다거나 방류량이 하천 유량에 비해 차지하는 비율이 증가할 경우 결과적으로 하천 하류 수역은 방류수에 의한 영향을 크게 받을 수 있다.

일반적으로 환경 기초 시설로부터 하천으로 배출되는 최

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

종 방류수는 방류 수역의 자연 하천수에 비하면 오염도가 상대적으로 높다. 예를 들어 하수도법으로 가장 엄격하게 규정하고 있는 특정 지역 방류수 수질 기준을 적용하여, 최종 방류수의 수질을 생물화학적 산소요구량(BOD)은 10 mg·l^{-1}, 총질소(T-N)는 20 mg·l^{-1}, 총인은(T-P) 2 mg·l^{-1} 이하로 각각 처리한다고 가정하여도 BOD 기준으로 하천 수질기준 3등급에 속하는 3-6 mg·l^{-1}을 초과하게 된다. 그러므로 하천으로 배출되는 최종 방류수의 대부분은 상류부로부터 흘러내려오는 자연 하천수와 비교하여 수질 오염도가 높으며 특히 질소(N), 인(P)을 비롯한 영양염 농도는 월등히 높은 상태로 방류되고 있는 실정이다. 이러한 경우 방류수가 하천수와 합류된 이후에는 수체 내 질소(N), 인(P)을 비롯한 다양한 미량원소들의 농도가 높아지게 되어 하천 내 영양 상태를 높이게 되고 유속, 유량 등 하천별 수리 · 수문학적 특성과 계절에 따라 조류 발생의 호조건을 형성할 수가 있다. 이러한 관점에서 환경 기초 시설이 설치된 낙동강 본류와 지천들에 대하여 최종 방류수가 하천수와 합류된 이후 하천의 조류 발생에 미치는 영향에 대한 검토가 필요하다.

본 조사에 이용된 조류 성장 잠재력(Algal Growth Potential: AGP), 혹은 Algal Assay Procedure(AAP)로 명명되는 시험방법은 1964년 노르웨이의 조류학자 Skulberg에 의해 그 기초가 이루어진 후 미국의 Asloney 등에 의해 세부적인 검토가 이어져 미국 EPA에 의해 1971년 담수시험법과, 1974년에 해수시험법의 표준법이 제정되었다(e.g., Nishijawa *et al.* 1979). 이 시험법을 응용할 수 있는 분야는 1) 폐수 처리시의 탈질이나 탈인 등의 처리 조작의 효율 판정, 2) 방류 수역의 부영양화에 미치는 폐수의 영향 조사, 3) 자연수 혹은 폐수의 조류 증식에 있어서 제한 요인의 결정, 4) 조류가 이용 가능한 영양염 양의 추정, 5) 호소 및 하천에서의 조류 최대 증식량 추정, 6) 조류 증식에 대한 저해 물질의 유무조사 등이다.

우리나라에서는 호소와 하천, 연안해역 등을 대상으로 몇몇 연구자들의 조사 결과가 보고 된 바 있다. 호소와 하천 유역의 조류 성장 잠재력 평가와 제한 영양염 추정에 관련된 연구로는 위 등(1991), 박 등(1992), 주 등(1994)과 신 등(1999)이 있고, 하수 처리수에 대한 조류 성장 잠재력 평가는 구(2001)와 신 등(2001)에 의한 연구가 있다. 그러나 낙동강 수계 본류와 지천에서의 방류수가 미치는 조류 성장 잠재력에 관한 연구는 아직 미비하다. 본 연구에서는 낙동강을 비롯하여 낙동강 수계 주요 지천에 대하여 하 · 폐수 최종 방류수가 하천으로 배출되었을 경우 방류 수역에서 나타날 수 있는 조류 성장 잠재력을 조사하였다.

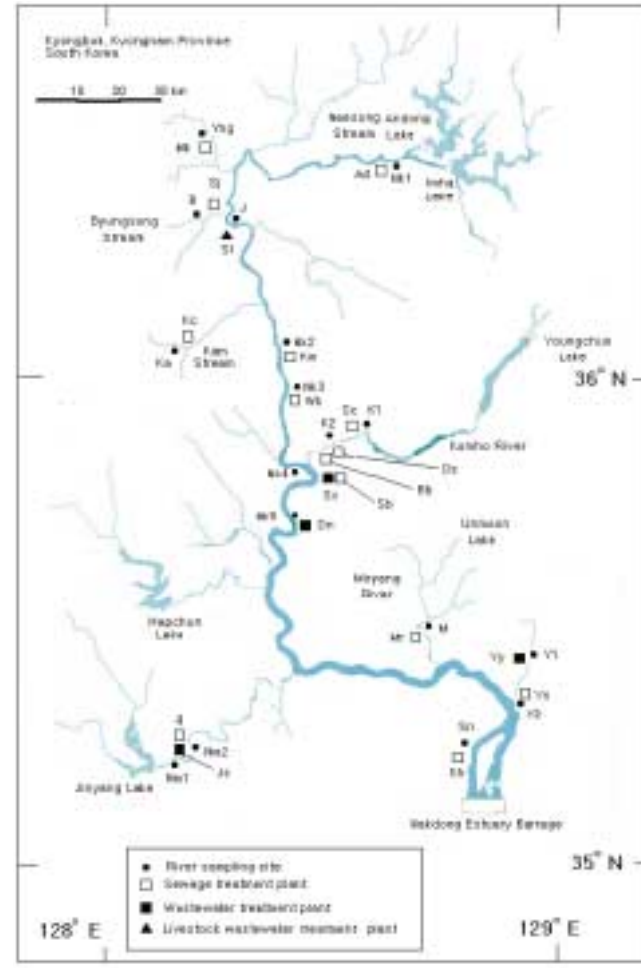

Fig. 1. Map showing the sampling sites in the Nakdong river basin.

Abbreviation of sampling sites: **Y1**, Yangsan Middle Stream; **Y2**, Yangsan Down Stream; **Sn**, Seonakdong River; **M**, Miryang River; **K1**, Kumho River Middle Stream; **K2**, Kumho River Down Stream; **Ka**, Kam Stream; **Nk1**, Nakdong River Upstream (Andong); **Nk2**, Nakdong River Middle Stream (Kumi); **Nk3**, Nakdong River Middle Stream (Waekwan); **Nk4**, Nakdong River Middle Stream (Sungseo); **Nk5**, Nakdong River Middle Stream (Dalsung); **Yng**, Young River; **B**, Byungsung Stream; **Nm1**, Nam River Upstream (Jinju); **Nm2**, Nam River Upstream (Jinju); **J**, Jang Stream; **Ys**, Yangsan Sewage Plant; **Kh**, Kimhae Sewage Plant; **Mr**, Miryang Sewage Plant; **Bb**, Bukbu Sewage Plant; **Sb**, Seobu Sewage Plant; **Sc**, Sinchun Sewage Plant; **Kc**, Kimchun Sewage Plant; **Ad**, Andong Sewage Plant; **Mk**, Munkyung Sewage Plant; **Wk**, Waekwan Sewage Plant; **Sj**, Sangju Sewage Plant; **Ds**, Dalseochun Sewage Plant; **Jj**, Jinju Sewage Plant; **Km**, Kumi Sewage Plant; **Dn**, Dalsung Wastewater Plant; **Yy**, Yangsan Yusan Wastewater Plant; **Ss**, Sungseo Wastewater Plant; **Js**, Jinju Sangpyung Wastewater Plant; **Sl**, Sangju Livestock Wastewater Plant.

Table 1. A general description of the facilities of the water treatment plants along the Naktong river basin

Sewage Treatment Plants						
No	Location	Name	Treatment Capacity ($1{,}000\ ton \cdot day^{-1}$)	Operational Amount ($1{,}000\ ton \cdot day^{-1}$)	Location of Discharge	Treatment Method
1	Andong	Andong*	54	44.3	Nakdong River	Standard activation
2	Munkyoung	Munkyoung	30	25.4	Young→Nakdong	Standard activation
3	Sangju	Sangju	26	17.5	Byungsung Stream→ Nakdong	Standard activation
4	Kimchun	Kimchun	80	72.3	Kam Stream→Nakdong	Standard activation
5	Kumi	Kumi**	330	310.9	Nakdong River	Standard activation
6	Chilkok kun	Waekwan	20	17.1	Nakdong River	Standard activation
7	Taegu	Sinchun	680	493.2	Kumho River→Nakdong	Standard activation
8	Taegu	Seobu	520	476.6	Nakdong River	Standard activation
9	Taegu	Dalseochun**	400	286.9	Kumho River→Nakdong	Standard activation
10	Taegu	Bukbu	170	118.8	Kumho River→Nakdong	Standard activation
11	Yangsan	Yangsan	48	39.2	Yangsan Sream→Nakdong	Standard activation
12	Miryang	Mirayng	30	33.4	Miryang River→Nakdong	Standard activation
13	Jinju	Jinju	150	118.7	Nam River→Nakdong	Standard activation
14	Kimhae	Hwamok***	114	60.3	Choman River→Nakdong	Standard activation
Industrial Wastewater Treatment Plants						
No	Location	Name	Treatment Capacity ($1{,}000\ ton \cdot day^{-1}$)	Operational Amount ($1{,}000\ ton \cdot day^{-1}$)	Location of Discharge	Treatment Method
15	Dalsung kun	Dalsung Nonkong	28	18	Nakdong River	Standard activation
16	Taegu	Sungseo	80	45	Nakdong River	Standard activation
17	Jinju	Sangpeung	35	26.7	Nam river→Nakdong	Two stage contact biofilm
18	Yangsan	Yusan	20	10.1	Yangsan Stream→Nakdong	Standard activation
Livestock Wastewater treatment plants						
No	Location	Name	Treatment Capacity ($1{,}000\ ton \cdot day^{-1}$)	Operational Amount ($1{,}000\ ton \cdot day^{-1}$)	Location of Discharge	Treatment method
19	Sangju	Sangju	0.13	0.035	Jang Stream→Nakdong	Liquid corrosion

*: Incorporation treatment with livestock wastewater

**: Incorporation treatment with wastewater

***: Incorporation treatment with septic tank sludge

Reference: Treatment and development of industrial wastewater and Statistics of sewage (Ministry of Environment 2002).

재료와 방법

조사시기와 지점

본 연구는 2002년 2월부터 12월까지 낙동강 수계의 본류와 지천에 설치된 환경 기초 시설 중 하수 종말 처리 시설 14개, 폐수 종말 처리 시설 4개, 축산 폐수 공공 처리 시설 1개소 등 총 19개 시설에 대하여 한 지점 당 연 3회에 걸쳐 조사하였다(Fig. 1).

조사 대상 시설 중 지천을 거치지 않고 낙동강 본류로 직접 방류하는 경우는 안동 하수 종말 처리장 등 6개 시설이며, 지천으로 직접 방류하는 곳은 양산공단 폐수 종말 처리장 등 13개 시설이었다. 조사 대상 19개 시설 중 17개 시설이 수처리 방법으로 표준 활성 오니법을 채택하고 있었으며, 진주 상평공단 폐수 종말 처리장은 2단 접촉 생물막법, 상주 축산 폐수 처리장의 경우는 액상 부식법을 이용하여 처리하고 있었다(Table 1).

조사항목과 방법

수질조사와 조류 성장 잠재력(AGP)실험: 방류 수역 수질 조사를 위해 환경 기초 시설의 최종 방류구가 위치한 지점으로부터 상류 약 1 km 지점을 선정하여 시료를 채수 하였으

며, 방류수의 경우는 하천으로 직접 유입되는 최종 방류구에서 채수 하였다. 채수한 시료는 저온 냉장하여 실험실로 운반한 후 즉시 측정 항목별로 분석하였다. 전기전도도를 비롯한 현장 조사 항목은 현장에서 기기를 이용하여 측정하였고, 총인(T–P), 총질소(T–N), 인산염인(PO_4–P), 암모니아성 질소(NH_3–N), 질산성 질소(NO_3–N) 농도는 수질오염 공정시험법에 따라 실험실에서 측정하였다(환경부 2001).

조류 성장 잠재력(AGP) 실험은 국립환경연구원 환경 미생물 종균 관리센터에서 AGP 실험용 공시 조류인 남조류 *Anabaena flos-aquae*를 분양 받아 사용하였으며, 조류 증식을 위해 CB 배지를 이용하여 대량 배양하였다(Watanabe *et al.* 1988). 실험에 사용되기 전 인 농도가 낮은 배양액에서 전배양을 실시한 후 시료에 접종하였다. 일반적인 AGP 측정에서 표준 종인 *Selenastrum capricornutum*은 폐수와 같이 화학물질이 많이 포함된 물에서는 다른 공시 조류에 비해 증식량이 낮았기 때문에 본 연구에서는 *Anabaena flos-aquae*과 같은 오수성 조류를 선택하여 사용하였다.

실험에 이용된 하천수와 하 · 폐수 최종 방류수는 실험에 사용된 공시 조류 이외의 미생물에 의한 오염을 방지하기 위해 막여과지(pore size 0.45 μm)를 사용하여 미리 여과한 후 사용하였으며 최종 조류 농도가 5×10^4 cell · ml^{-1}에서 배양이 시작되도록 접종 농도를 조절하였다(APHA · AWWA · WPCF 1998). 배양 조건은 조도 2200 Lux 진탕속도 110 rpm, 온도 25℃에서 실시하였다. 배양 기간은 조류 증식이 최대에 도달할 때까지 실시하였으며 증식 기간은 보통 10일 정도 소요되었다.

배양이 끝난 시료에 대한 AGP값은 흡광도 600 nm (APHA · AWWA · WPCF 1998)에서 작성된 세포 밀도에 대한 표준 검량선에 따라 세포 밀도를 측정한 후 건조 중량(mg · l^{-1})으로 환산하였다.

$$\text{AGP}(\text{mg}\cdot l^{-1}) = \text{희석 시료 중의 조류 증식량}(\text{mg}\cdot l^{-1}) \times \text{희석 배율}$$

하천 유량 측정: 유량 측정은 갈수기인 1월부터 6월까지 조사 대상인 환경 기초 시설들이 위치한 낙동강 본류와 주요 지천에 대하여 월 1회 측정하였다. 유속 측정을 위해 작은 하천의 경우 회전식 유속계를 사용하였고(Model BFM002, VALEPORT, 영국), 큰 하천의 경우 전자식 유속계를 사용하였다(Model ACM210-D, 일본 알렉 전자주식회사). 유량 산정은 흐름이 일정하고 상태가 고른 지점을 선정하여 물이 흐르는 방향과 직각이 되도록 하천의 양끝을 줄로 고정하였다. 같은 간격으로 측정점을 설정한 다음 유속계를 이용하여 하천의 평균 유속을 측정하였고, 중간 단면적법을 이용하여 유속과 단면적의 곱으로 유량을 산정하였다.

발광 박테리아를 이용한 독성 실험: 발광 박테리아를 이용한 독성 실험은 시료의 독성에 따라 형광 박테리아의 발광량을 측정하는 방법이며 비교적 신속하고 간단하게 시료의 독성을 평가 할 수 있는 생물학적 측정 방법이다(최 등 2002). 본 실험에 이용된 세균은 발광 세균인 *Vibrio fischerii*를 이용하였다(Drlange사, 독일). 독성실험을 위하여 시료를 15℃로 유지한 다음, 발광 세균과 시료를 각각 0.5 m*l* 분취하여 혼합한 후 30분간 15℃에서 배양하였다. 배양이 끝난 후 박테리아 발광 측정기를 이용하여 세균의 발광량을 측정하였다(Drlange, LUMIStox 300). 대조구인 2% NaCl 수용액에서의 발광량과 비교하여 시료의 독성도를 평가하였다.

결 과

방류 수역 수질

환경 기초 시설 최종 방류구가 위치한 상류 수역의 수질을 조사한 결과 서낙동강, 금호강, 양산천과 낙동강 중류(달성지점)의 하천 영양상태가 비교적 높게 나타났고 낙동강 상류, 남강과 영강 등은 상대적으로 낮은 영양상태를 보여주었다.

총인의 농도는 0.014–1.048 mg · l^{-1}(평균 0.189 mg · l^{-1}) 였으며, 서낙동강이 1.048 mg · l^{-1}로 가장 높게 나타났고 영강과 남강이 각각 0.014 mg · l^{-1}, 0.047 mg · l^{-1}로 가장 낮게 나타났다. 무기 용존상태로 존재하기 때문에 식물플랑크톤이 수중에서 직접 흡수 가능한 인산염은 총인의 농도와 유사한 지역적 분포 특성을 보여주었다(Fig. 2).

총질소는 1.134–11.812 mg · l^{-1}(평균 4.134 mg · l^{-1}) 범위였으며, 서낙동강이 11.812 mg · l^{-1}로 가장 높았고, 금호강과 양산천이 5.000 mg · l^{-1} 이상의 높은 값을 나타내었다. 남강, 영강과 낙동강 상류는 1.134–2.570 mg · l^{-1} 범위의 낮은 값을 나타내었다. 수중에 존재하는 무기 질소원 중 암모늄 이온의 경우 역시 총질소 농도 분포와 같이 서낙동강, 금호강과 양산천이 다른 하천에 비해 상대적으로 높은 농도를 나타내었다(Fig. 3).

전기전도도 값은 0.144–0.973 ms · cm^{-1}(평균 0.357 ms · cm^{-1})이었으며, 하천별 분포는 총질소 농도와 마찬가지로 서낙동강 0.973 ms · cm^{-1}, 양산천 0.724 ms · cm^{-1}, 낙동강 중류 달성지점 0.568 ms · cm^{-1}과 금호강 0.465 ms · cm^{-1} 순으로 높은 값을 보여 주었다(Fig. 4).

엽록소 *a* 농도는 영양염 농도가 높게 나타난 서낙동강, 양산천, 금호강 등이 50 mg · m^{-3} 이상의 높은 값을 나타내어 영양염 농도가 높을 수록 조류 생물량도 함께 높아지는 것으로 나타났다. 영강, 낙동강상류, 병성천, 밀양강과 감천 등은 평균 3.0–12.8 mg · m^{-3}의 낮은 값을 나타내었다(Fig. 5).

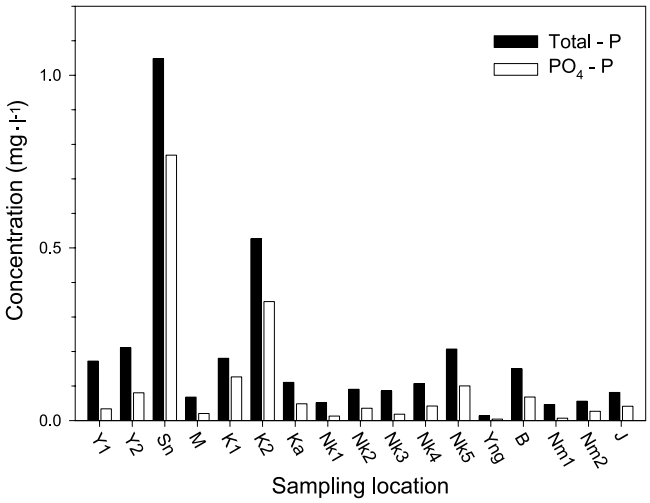

Fig. 2. Total phosphorus and phosphate concentrations of the river water at ca. 1km above the sewage/industrial wastewater treatment plants. (Abbreviation of sampling sites - see Fig. 1)

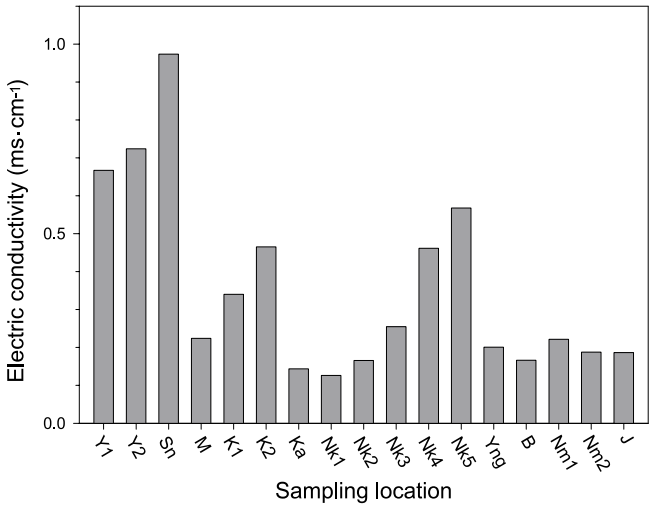

Fig. 4. Electric conductivity values of the river water at ca. 1km above the sewage/industrial wastewater treatment plants. (Abbreviation of sampling sites - see Fig. 1)

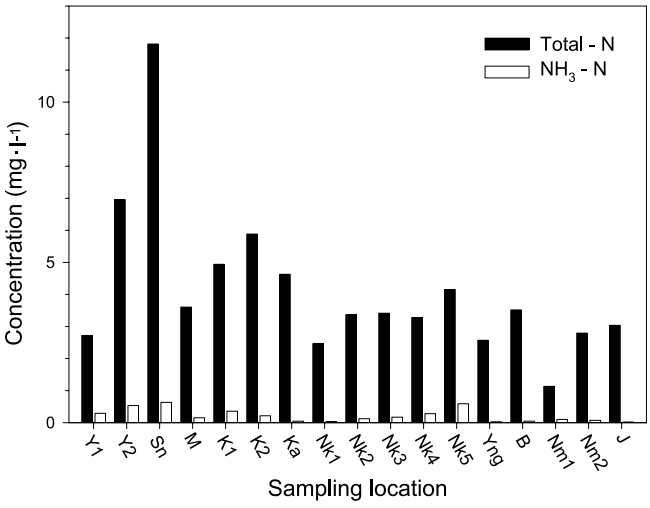

Fig. 3. Total nitrogen and ammonium concentrations of the river ca. 1km above the sewage/industrial wastewater treatment plants. (Abbreviation of sampling sites - see Fig. 1)

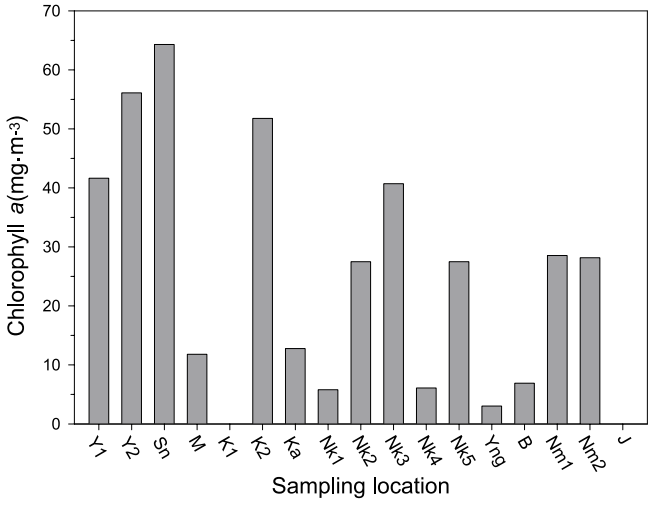

Fig. 5. Chlorophyll-a concentrations of the river water at ca. 1km above the sewage/industrial wastewater treatment plants. (Abbreviation of sampling sites - see Fig. 1)

방류수 수질

하·폐수 처리장에서 하천으로 배출되는 방류수의 수질은 처리 대상인 유입 원수의 성격에 따라서 뚜렷이 구별되는 특징을 보여주었다. 하수 종말 처리장 방류수의 경우 총인 항목, 폐수 종말 처리장 방류수는 전기전도도, 그리고 축산 폐수 처리 시설의 방류수는 총질소와 전기전도도 모두 높은 값을 나타내었다.

총인 농도의 경우 하수 종말 처리장 방류수가 0.538–1.837 $mg \cdot l^{-1}$(평균 1.136 $mg \cdot l^{-1}$)로 폐수 종말 처리장 방류수 총인 농도 0.277–0.826 $mg \cdot l^{-1}$(평균 0.598 $mg \cdot l^{-1}$)에 비해 약 2배 정도 높은 값을 보여주었다. 밀양 하수 방류수는 평균 1.837 $mg \cdot l^{-1}$로 가장 높은 값을 나타내었고, 달성 공단 방류수는 0.277 $mg \cdot l^{-1}$로 가장 낮은 값을 보여주었다(Fig. 6).

총질소 농도는 축산 폐수 처리장 방류수가 평균 25.273 $mg \cdot l^{-1}$를 나타내어 가장 높은 값을 보여주었으며, 하수 처리장 방류수(7.413–21.902 $mg \cdot l^{-1}$)와 폐수 처리장 방류수(5.458–20.494 $mg \cdot l^{-1}$)가 각각 평균 14.572 $mg \cdot l^{-1}$, 13.478 $mg \cdot l^{-1}$으로 유사한 값을 나타내었다. 총질소 농도 평균 20 $mg \cdot l^{-1}$ 이상을 나타낸 곳은 상주 축산 폐수 방류수 이외에 밀양 하수 방류수, 달서천 하수 방류수와 양산 공단 방류수

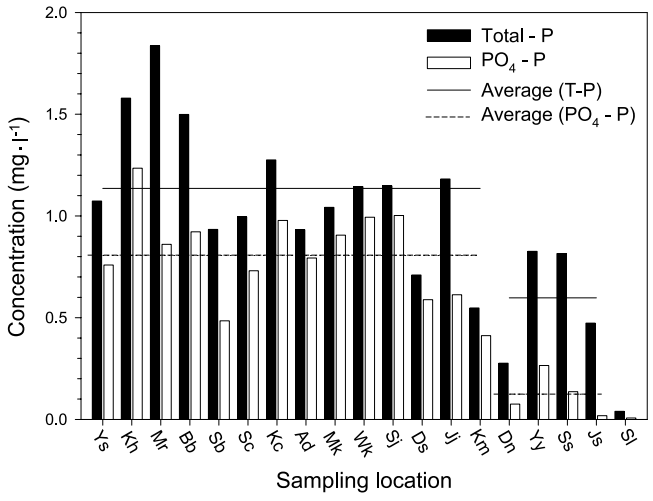

Fig. 6. Total phosphorus and phosphate concentrations of treated sewage and industrial wastewater and livestock wastewater. (Abbreviation of sampling sites - see Fig. 1)

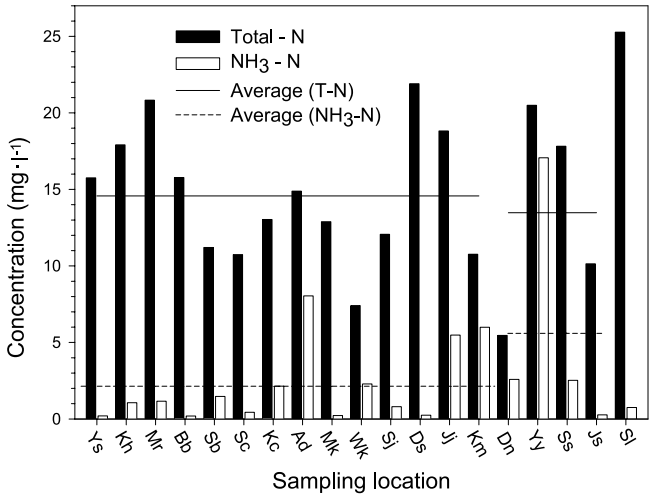

Fig. 7. Total nitrogen and ammonium concentrations of treated sewage and industrial wastewater and livestock wastewater. (Abbreviation of sampling sites - see Fig. 1)

로 나타났다(Fig. 7).

전기전도도 값은 축산 폐수 처리장 방류수가 평균 6.403 ms·cm^{-1}으로 가장 높은 값을 나타내었고 폐수 종말 처리장의 최종 방류수는 1.093–3.982 ms·cm^{-1}(평균 2.405 ms·cm^{-1}) 범위로 하수 종말 처리장의 0.426–3.435 ms·cm^{-1}(평균 0.960 ms·cm^{-1}) 수준보다 높은 값을 보여주었다. 폐수 방류수 중에는 양산 공단 방류수가 평균 3.982 ms·cm^{-1}로 높은 전기전도도 값을 나타내었고, 전체 19개 시설 중 안동 하수 방류수가 평균 0.426 ms·cm^{-1}으로 가장 낮은 값을 나타내었다(Fig. 8).

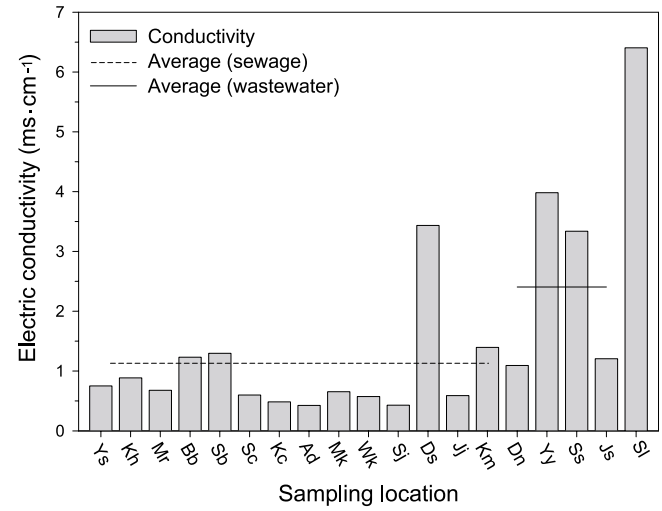

Fig. 8. Electric conductivity values of treated sewage and industrial wastewater and livestock wastewater. (Abbreviation of sampling sites - see Fig. 1)

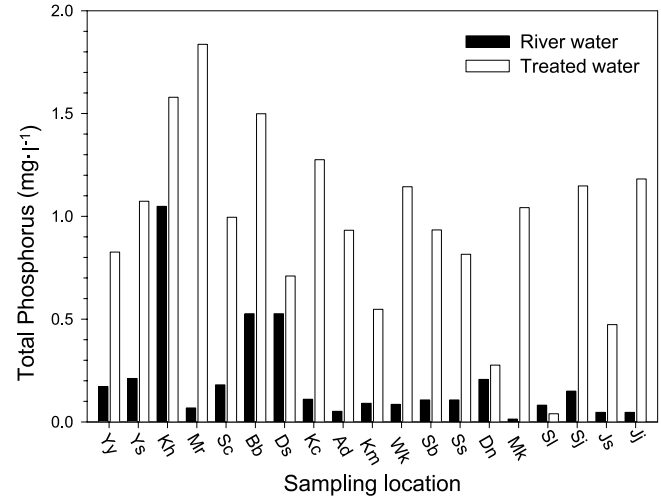

Fig. 9. Comparison of total phosphorus concentrations of the river water with treated sewage and wastewater. (Abbreviation of sampling sites - see Fig. 1)

방류 수역/방류수 수질 비교

조사 대상 방류수와 방류 수역의 영양 상태를 비교한 결과 총인은 평균 12.3배, 총질소 4.9배, 전기전도도는 5.3배로 각각의 농도 차이가 매우 큰 것으로 나타났다.

총인 농도의 경우 문경 하수 방류수가 방류 수역에 비해 최대 75.6배로 가장 컸으며, 그 외 안동 하수, 진주 하수와 밀양 하수 방류수가 18.1–27.0배 범위의 비교적 높은 농도 차이를 보여주었다. 그러나 상주 축산 폐수 방류수는 오히려 방류 수역에 비해 0.5배로 총인 농도가 낮았으며, 달서천 하수, 달성공단, 김해 하수 방류수 등은 1.3–1.5배로 방류 수역과 별 차이를 보이지 않았다(Fig. 9).

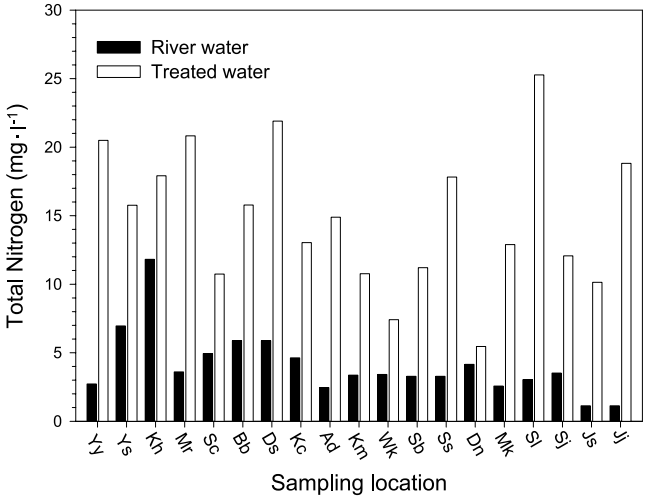

Fig. 10. Comparison of total nitrogen concentrations of the river water with treated sewage and wastewater.

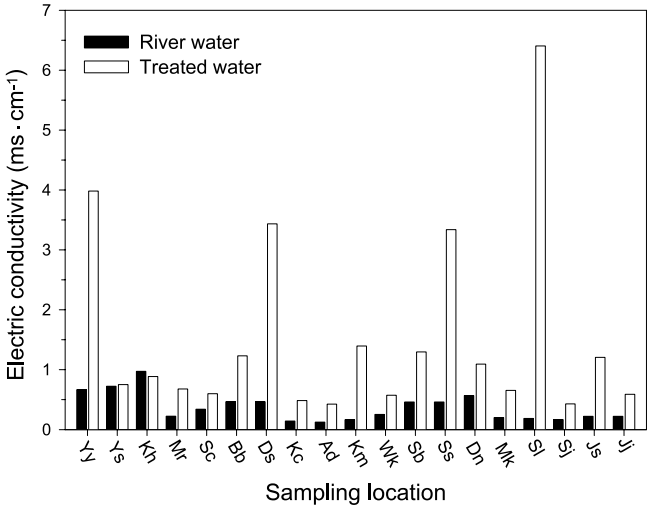

Fig. 11. Comparison of electric conductivity values of the river water with treated sewage and wastewater. (Abbreviation of sampling sites - see Fig. 1)

총질소는 진주 하수 방류수가 16.6배로 농도 차이가 가장 크게 났으며, 5배 이상의 농도 차이를 보여준 곳은 상주 축산 폐수, 양산 공단, 안동 하수, 밀양 하수 방류수 등 이었다. 달성공단과 김해하수 방류수는 각각 1.3배와 1.5배의 낮은 농도 차이를 나타내었다(Fig. 10).

전기전도도는 상주 축산 방류수가 방류 수역에 비해 34.4배의 차이를 보였으며, 구미 하수, 달서천 하수, 양산 공단 방류수가 8.4–6.0배의 비교적 높은 차이를 나타내었다. 김해하수와 양 산하수 방류수는 방류 수역과 비슷하거나 오히려 전기전도도가 낮은 것으로 나타났다(Fig. 11).

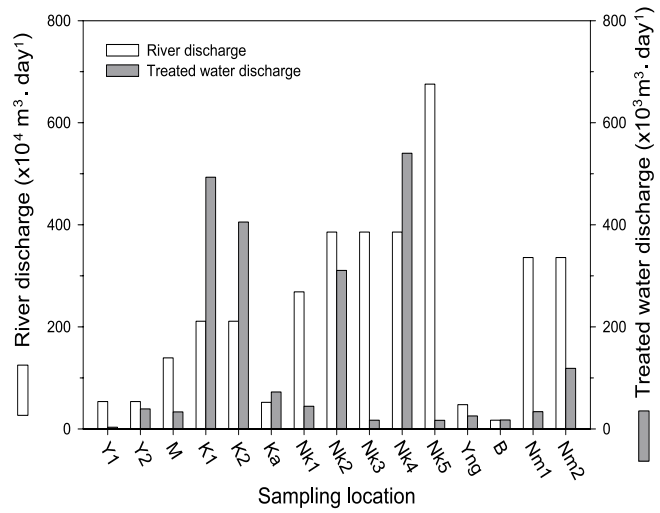

Fig. 12. Comparison of discharge of river with treated water. (Abbreviation of sampling sites - see Fig. 1)

하천 유량, 방류수 배출 유량과 하천 유입 비율 평가

갈수기인 1–6월 동안에 측정된 일 평균 하천 유량값은 낙동강 중류 달성지점이 676×10^4 $m^3\cdot day^{-1}$을 나타내었고 남강과 금호강은 각각 340×10^4 $m^3\cdot day^{-1}$, 211×10^4 $m^3\cdot day^{-1}$으로 지류중에서 비교적 많은 하천 유량을 나타내었다. 그리고 밀양강과 양산천은 각각 139×10^4 $m^3\cdot day^{-1}$과 약 54×10^4 $m^3\cdot day^{-1}$이었으며, 병성천의 경우 17×10^4 $m^3\cdot day^{-1}$으로 가장 적은 유량을 나타내었다(Fig. 12).

하천으로 유입되는 하·폐수 방류량은 낙동강 중류와 금호강에서 많은 배출량을 보였다. 낙동강 중류에 위치한 서부 하수와 구미 하수 방류량이 각각 47×10^4 $m^3\cdot day^{-1}$과 31×10^4 $m^3\cdot day^{-1}$을 나타내었으며, 금호강에 위치한 신천 하수 방류량은 49×10^4 $m^3\cdot day^{-1}$, 달서천 하수와 북부 하수 방류수는 각각 29×10^4 $m^3\cdot day^{-1}$, 12×10^4 $m^3\cdot day^{-1}$일의 방류량을 나타내었다. 공단 방류수는 평균 5×10^4 $m^3\cdot day^{-1}$ 미만의 적은 방류량을 나타내어 하수 방류량과 구별되는 특징을 보여주었다. 상주 축산 폐수 처리장은 35 $m^3\cdot day^{-1}$의 매우 적은 방류량을 나타내었다(Fig. 12).

처리된 방류수가 하천으로 유입되는 양적 정도를 나타내는 방류수 배출량/하천 유량 비율은 금호강의 경우 42.8%로 가장 높은 하천 유입 비율을 보여주었고, 낙동강 중류(22.7%), 감천(13.9%), 병성천(10.3%)이 10%이상의 유입 비율을 나타내었다. 그리고 5%이상 유입 비율을 보여주는 곳은 양산천(7.9%), 영강(5.4%) 등 이었으며, 나머지는 0.3–2.4% 범위로 낮은 값을 나타내었다.

방류 수역 조류 성장 잠재력(**AGP**) 평가

환경 기초 시설 최종 방류구 상류부의 자연 하천수가 나타내는 조류 성장 잠재력을 살펴보면 낙동강 본류는 상류에

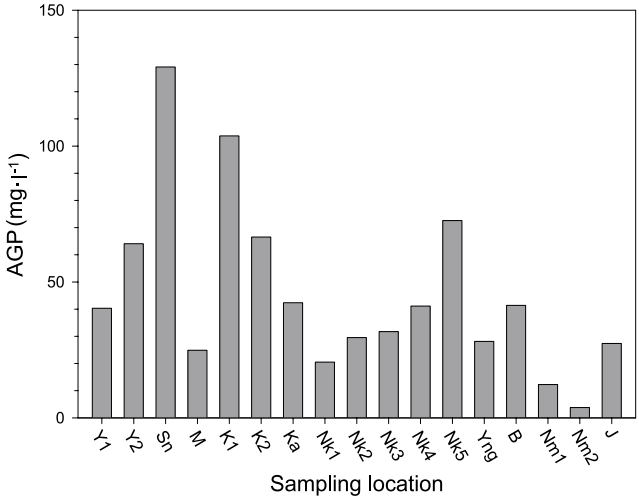

Fig. 13. Algal growth potential values in the Natdong river basin. (Abbreviation of sampling sites - see Fig. 1)

서 중류로 내려오면서 점차 증가하는 경향을 보였고 지천 중에서는 서낙동강, 금호강, 양산천과 병성천이 상대적으로 높게 나타났고, 남강과 밀양강이 상대적으로 낮은 값을 나타내었다(Fig. 13).

낙동강 본류의 경우 안동지점에서 20.5의 값을 나타내었으나 중류지역으로 내려오면서 AGP값이 점차 증가하기 시작하여 금호강이 합류한 이후 달성지점에서 72.6으로 약 3배 이상 증가하는 경향을 보여주었다.

지천의 경우는 서낙동강이 평균 129.1로 가장 높은 값을 나타내었고 그 다음으로 금호강이 평균 66.5–103.7 범위의 높은 AGP값을 보였다. 남강의 경우 3.8–12.2의 범위를 나타내어 조사 대상 하천수 가운데 가장 낮은 수치를 보여주었고 밀양강 역시 24.9로 비교적 낮은 값을 나타내었다.

AGP값이 높게 나타난 하천들은 하천의 영양 상태와 밀접한 관련성을 보여주었는데 가장 높은 수치를 보여준 서낙동강은 총인과 총질소 농도 역시 가장 높았고 영양 상태가 상대적으로 낮은 낙동강 상류와 남강의 AGP값은 낮게 나타났다. 낙동강 본류에서의 AGP 값이 증가하는 양상은 질소와 인농도가 증가함에 따라 함께 증가하는 양상을 보여주었으며, 영양염 중 특히 용존 인산염과, 암모니아성 질소 농도의 증가현상과 밀접한 관련성을 보여주었다.

방류수 첨가에 따른 방류 수역 조류 성장 잠재력(**AGP**) 특성 변화

방류 수역에 대한 방류수 첨가 실험을 실시한 결과 방류수 첨가 비율이 높아짐에 따라 일부 시료를 제외한 모든 시료에서 AGP값이 증가하여 최종 첨가 비율 20%에서 가장 높은 값을 나타내는 경향을 보였다(Fig. 14).

진주 하수, 문경 하수와 구미 하수 방류 수역의 경우 방류

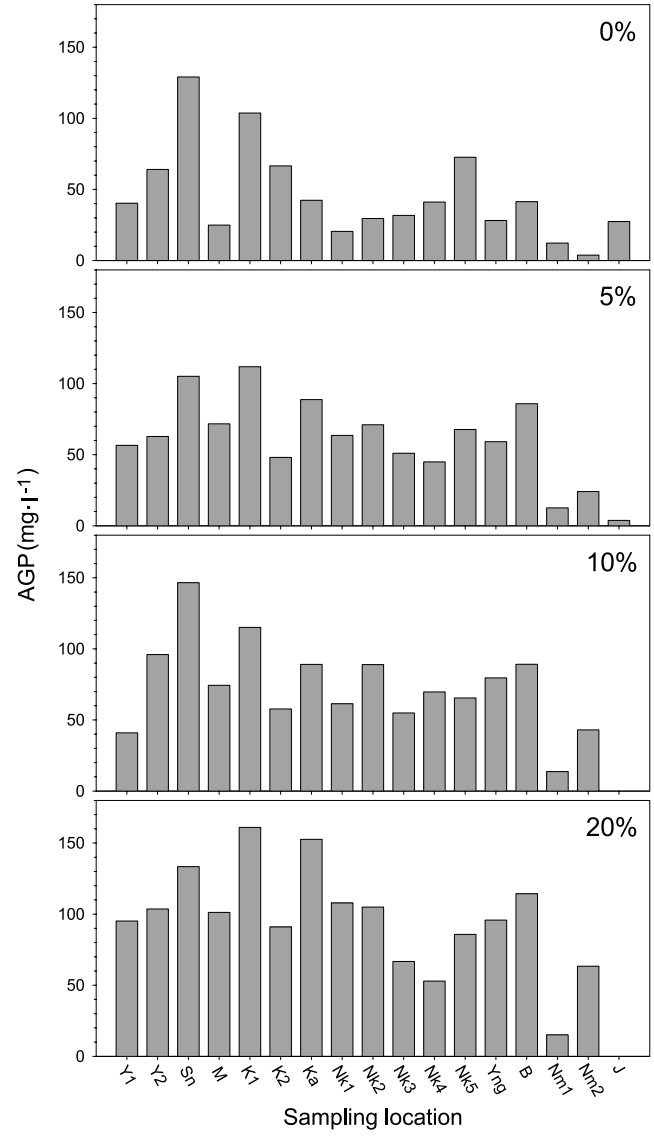

Fig. 14. The changes of algal growth potential values in the river when mixed with treated water at final concentrations of 5%, 10% and 20%. (Abbreviation of sampling sites - see Fig. 1)

수 첨가 비율이 증가함에 따라 AGP값도 일정하게 증가하여 첨가 비율과 AGP값이 뚜렷한 양의 상관관계를 보여주었다. 진주 하수 방류 수역을 예로 들면 방류수 첨가 비율 0%시에는 3.8 이었으나 5% 첨가시 24.0, 10% 첨가시 43.0, 20% 첨가시 63.4의 값을 나타내었다. 그러나 달서천 하수 방류 수역과 상주 축산 폐수 방류 수역은 방류수 첨가 비율이 높아져도 AGP값의 증가 현상이 없거나 오히려 감소하는 특징을 보여주었다.

방류수 특성별로 방류 수역의 AGP값에 기여하는 정도를 살펴보면, 하수 처리수의 경우 방류 수역에 처리수를 20% 첨가했을 때 방류 수역 본래의 AGP값에 비해 평균 3.5배 증

Table 2. The effects of treated sewage and industrial wastewater, livestock wastewater on the algal growth potential of the streams in the Nakdong River Basin

Plant Type	Name of Plant	Location of Effluent Discharge	The increase of AGP at 20% of the treated water mix to river water
Sewage treatment plants	Yangsan	Yangsan Stream	1.6
	Kimhae	Seonakdong River	1.0
	Miryang	Miryang River	4.1
	Taegu Bukbu	Kumho River	1.4
	Kimchun	Kam Stream	3.6
	Andong	Nakdong River	5.3
	Munkyung	Young River	3.4
	Sangju	Byungsung Stream	2.8
	Taegu Dalseochun	Kumho River	0.8
	Kumi	Nakdong River	3.6
	Waekwan	Nakdong River	2.1
	Jinju	Nam River	16.7
	Taegu Seobu	Nakdong River	1.6
	Taegu Sinchun	Kumho River	1.3
	(Average)		(3.5)
Industrial wastewater treatment plants	Dalsung	Nakdong River	1.2
	Yangsan Yusan	Yangsan Stream	2.4
	Jinju Sangpeung	Nam River	1.2
	Taegu Sungseo	Nakdong River	2.5
	(Average)		(1.8)
Livestock wastewater treatment plants	Sangju	Jang Stream	-

가한 것으로 나타났다. 그러나 공단 폐수 처리수는 20% 첨가시 평균 증가율 1.8배로서 상대적으로 낮은 증가률을 보여주었다(Table 2).

하수 처리수가 첨가된 방류 수역 중에서 높은 증가율을 보인 곳은 진주 하수 방류 수역에서 16.7배로 가장 높았고 안동 하수, 밀양 하수 방류 수역이 각각 5.3배, 4.1배의 증가율을 보여주었다. 공단 폐수 처리수는 1.2-2.4배 범위의 증가율을 나타내었다.

방류수 독성 평가

방류수가 가지고 있는 독성을 알아보기 위하여 발광 박테리아를 이용하여 테스트 해 본 결과 본 조사에서 조사한 낙동강 유역의 하수, 공단 폐수와 축산 폐수 방류수 모두에서 독성이 나타나지 않았다(Table 3). 하수 처리수는 독성에 의한 박테리아 발광 저해도가 평균 2.4%였으며, 공단 폐수 처리수는 평균 8.2%로 하수 처리수 보다는 상대적으로 약간 높게 나타났다. 그리고 축산 폐수 처리수는 검출한계 이하로 독성에 의한 발광 저해도가 거의 나타나지 않았다.

낙동강 수계내 여러 하천수를 대상으로 실험한 결과치인 평균 3.1%와 비교해 보았을 때 하수 및 축산 폐수 처리수는 하천수와 거의 동일한 독성도를 가지고 있음을 알 수 있었고 공단 폐수 처리수는 평균 10% 이내의 값으로 다른 시료에 비해서는 상대적으로 수치가 높았지만 독성도는 미약한 것으로 나타났다.

Table 3. Tocxicity of the treated sewage water, wastewater and livestock wastewater tested by the luminescent bacteria, *Vibrio fischerii*

Effluent Type and Reference	Inhibition (%)
Treated sewage water	N.D. - 9.1 (2.4)*
Treated wastewater	2.9 - 12.4 (8.2)
Treated livestock wastewater	N.D.
River water	N.D. - 5.0 (3.1)
Reference Test (Concentration, $mg \cdot l^{-1}$)	
3, 5-Dichlorophenol (6)	74
$Zinc^{2+}$ (25)	45
Chromium (4.0)	50

N.D.: Below detection limit
(value)*: average value

고 찰

하수 종말 처리장 방류수의 총인 농도가 평균적으로 높게 나타난 이유는 원수로 유입되는 생활하수 중에 인 함유량이 높은 세제 등의 물질들이 많이 포함되었고 또한 생활 하수와 함께 분뇨를 함께 병합 처리하는 경우 원수 자체의 인 함유량이 높기 때문으로 여겨진다. 그러나 하수 종말 처리장 방류수 중 구미, 달서천 방류수는 다른 하수 처리장 방류수에 비해 총인 농도가 낮았고 전기전도도는 매우 높게 나타나는 특성을 보였는데 이것은 하수와 함께 인 함유량이 상대적으로 낮은 공단 폐수를 병합 처리함으로 인해 나타난 영향으로 추정된다.

방류 수역과 방류수간 수체 영양도 값이 차이가 많이 날 경우는 방류 수역으로 배출되는 방류 수량이 많을수록 하천수의 영양 상태에 영향을 크게 줄 수 있음을 의미한다. 방류수역의 영양 상태는 낮고 방류수의 영양 상태가 높아서 수체 영양도에서 차이가 많이 날 뿐 아니라 배출되는 방류 수량이 비교적 많은 문경 하수, 진주 하수와 밀양 하수 처리장의 경우는 하천 하류부의 수체 영양도에 미치는 방류수의 영향이 상대적으로 크게 나타날 수 있을 것이다.

방류 수역과 수체 영양도의 값이 큰 차이를 보이지 않은 달서천 하수, 김해 하수와 양산 공단 방류수 등의 경우는 대부분이 서낙동강, 금호강, 양산천과 낙동강 중류(달성지점)의 하천 영양 상태의 값이 비교적 높게 나타났기 때문에 나타난 결과로 해석될 수 있다.

AGP를 이용한 수질 평가 방법은 조류에 의한 유기 오염 현상을 평가하는데 매우 유용하게 이용할 수 있는 방법이다. 하천 내에서 자생하는 조류 혹은 공시된 표준 조류 종을 이용하여 하천 생태계내의 잠재적 조류 발생 정도를 미리 평가할 수 있다는 점에서 단순히 총인, 총질소 농도와 같은 이화학적 방법을 통한 하천 부영양화도 평가방법에 비하여 보다 실제적이고 직접적인 방법이다(Nilssen 1978; Box 1983; Lopez-Lopez *et al.* 1998).

AGP를 측정하는 가장 좋은 방법은 방류되는 수역에서 자생하고 있는 우점 조류를 직접 분리 · 배양한 후 AGP 시험용으로 사용하는 것이다(Munawar *et al.* 1983; Davalos *et al.* 1989; Davalos-Lind 1996; 신 등 2001). 하지만 이러한 방법은 단일 수역이 아닌 수 환경이 상이한 많은 지역을 조사 대상으로 할 경우 시간과 노력이 많이 드는 단점이 있다. 본 조사에서는 오수성 남조류인 *Anabaena flos-aquae*를 사용하였다. 일반적으로 많이 사용되는 녹조류인 *Selenastrum capricornutum*을 사용하지 않았기 때문에 다른 연구 결과들과의 상대적인 비교는 할 수 없었지만 연구 결과에 대한 경향성은 일치하는 것으로 나타났다.

조사 결과 조류 성장 잠재력이 높게 나타난 수역은 서낙동강, 금호강, 낙동강 중류, 양산천 하류 등이었는데 이 하천들은 과거 많은 연구 보고에서도 수질 오염도가 높은 수역으로 보고된 바 있다(김 등 1997; 조와 신 1997). 낙동강 본류와 지천에 대하여 *Selenastrum capricornutum*과 *Microcystis aeruginosa*를 이용한 1995년 조사에서 낙동강 본류에서는 금호강이 합류되는 지점에서 AGP값이 가장 높았으며, 지천의 경우 금호강에서 높은 값을 나타내었다(신 등 1999). 금호강은 과거 낙동강 오염의 주요 요인중의 하나로 인식되어 왔지만 하수 처리 시설의 확충과 환경 정화 노력으로 꾸준히 수질 개선이 이루어져 BOD 기준으로 금호강 하류 지점이 1991년 연평균 29.3 $mg \cdot l^{-1}$에서 2002년 4.1 $mg \cdot l^{-1}$으로 많이 개선되었다. 하지만 본 조사에서 나타난 바와 같이 조류 성장을 촉진하는 영양염 농도는 여전히 높은 상태이며 상대적으로 영양도가 낮은 낙동강 상류수와 합류되고 난 후부터는 낙동강 중류지점의 수체 영양도를 급속히 상승시키는 요인으로 작용하고 있다.

대부분의 방류 수역에서 방류수 첨가 비율이 증가함에 따른 AGP값의 증가가 관찰된 사실들로 미루어 볼 때 비록 환경법에 명시된 배출 허용 기준을 만족하는 최종 방류수라 할지라도 하천으로 배출되는 방류수의 양에 따라 하천의 조류 발생에 미치는 영향도 함께 증가할 수 있다는 점을 시사해 준다.

현재 금호강에 설치 운영중인 하수 처리장 3개소에서 배출되는 방류수는 하천 유량이 가장 적은 갈수기를 기준으로 하였을 때 금호강 하류부 하천 유지 수량의 40% 이상을 차지하는 것으로 나타났다. 그러므로 금호강이 낙동강 본류에 합쳐지기 시작하면 낙동강 중류의 수체 영양도는 당연히 높아 질 수밖에 없다. 수체의 영양도가 높아졌다는 것은 조류 잠재 발생 가능성을 항상 내재하고 있음을 나타낸다. 즉 수온과 유속 등 기상 조건을 비롯한 하천의 수리 · 수문학적 요인이 조류가 발생하기에 좋은 조건이 될 경우 조류 대발생에 의한 하천의 유기 오염 현상이 일어날 수 있는 것이다. 갈수기와 높은 수온 계절에 낙동강 하류에서 해마다 관찰되고 있는 규조류와 남조류 발생에 의한 유기 오염 현상은 이러한 사실에 바탕을 두고 있다고 볼 수 있다.

방류수 첨가 비율이 높음에도 불구하고 AGP값의 감소가 일어난 상주 축산 폐수 방류 수역의 경우는 첨가된 방류수의 용존 인산염 농도가 평균 0.007 $mg \cdot l^{-1}$로 빈영양 상태를 나타내었기 때문에 방류수 첨가 비율이 증가함에 따라 조류 성장에 이용될 필수 영양염이 고갈되어 조류 성장 저해가 일어난 것으로 판단된다.

많은 방류 수량이 유입되는 하천의 경우, 인과 질소를 중심으로 한 방류수 수질 기준이 상대적으로 더욱 강화 될 필요가 있다. 특히 하천은 질소보다는 인 제한 현상이 뚜렷하

게 나타나므로 방류수 중의 인에 대한 보다 높은 수준의 처리가 우선되어야 할 것이다.

또한 하수 종말 처리장은 공단 폐수 종말 처리장이나 축산 폐수 처리장에 비해서 배출되는 유량도 월등히 많을 뿐 아니라 조류 성장에 유리한 인 함유량이 가장 높고 방류 수역에 대한 조류 성장 잠재력 기여율이 가장 높은 것으로 나타났기 때문에 하수 종말 처리장에 대한 엄격한 수질관리가 필요하다.

참고문헌

구준호. 2001. 조류성장잠재력 시험을 이용한 하수처리장 유출수의 환경영향평가. 부경대학교 공학석사학위논문. 44 pp.

김성한, 윤인길, 권오섭. 1997. 회분식 배양에 의한 서낙동강 저서층의 영양염류 용출. 한국육수학회지 **30:** 281-288.

낙동강환경관리청(낙환청). 2002. 낙동강유역 환경지도. pp. 107-112.

박혜경, 이문호, 유재근. 1992. AGP spike test에 의한 국내 대형 댐호의 조류생산 제한영양염의 추정. 수질보전학회지 **8:** 159-166.

신재기, 조경제. 1999. 낙동강에서 AGP에 의한 수질평가. 한국육수학회지 **32:** 349-357.

신재기, 이옥희, 황순진, 조경제. 2001. 경안천에서 하수처리수와 생하수에 대한 algal bioassay. 한국육수학회지 **34:** 192-198.

위인선, 이종빈, 주현수. 1991. 주암댐 및 이사천댐 유역의 조류생산 잠재력 조사에 관한 연구. 한국환경생물학회지 **9:** 104-112.

조경제, 신재기. 1997. 낙동강 중하류에서 무기 N · P 영양염의 변동. 한국 육수학회지 **30:** 85-96.

조규송, 강인구, 권오길, 김범철, 나규환, 안태석, 이종범, 이인기, 이해금, 전상호, 최준길. 1991. 호소환경조사법. pp. 271-281.

주현수, 위인선, 정미량. 1994. 광주천 수계에 있어서의 AGP에 관한 연구. 한국환경생물학회지 **12:** 125-136.

최성헌, 이인선, 변명섭, 박지형, 방규철, 신기식. 2002. 큰물벼룩, 발광박테리아를 이용한 산업폐수 수질평가(I). 국립환경연구원보. **24:** 471-481.

환경부. 2001. 수질오염공정시험법.

환경부. 2001, 2002. 하수도통계. pp. 154-171.

환경부. 2002. 물관리종합대책.

환경부. 2001, 2002 공장폐수의 발생과 처리.

APHA · AWWA · WPCF. 1998. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 16th Ed. American Public Health Association.

Box J.D. 1983. Temporal variation in algal bioassays of waer from two productive lakes *Arch. Hydrobiol.* (suppl.) **67:** 81-103.

Davalos L. 1996. Phytoplankton and bacterioplankton stress by sediment boren pollutants. *J. Aquat. Ecosyst. Health.* **5:** 99-105.

Davalos L., Lind O. and Doyle R.D. 1989. Evaluation of phytoplankton limiting factors in lake Chapala Mexico: turbidity and spatial temporal variation in algal assay respond. *Lake Reserv. Manage.* **5:** 99-104.

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.

Munawar M., Mudroch A., Munawar I.F. and Thomas R.L. 1983. The impact of sediment associated contaminants from the Niagara River mouth on various size assemblages of phytoplankton. *J. Great Lakes Res.* **9:** 303-313.

Nilssen J.P. 1978. Eutrophication, minute algae and inefficient grazers. *Mem. 1st Ital. Idrobiol* **36:** 121-138.

Nishijawa K. and Chihara M. 1979. *Methods of Phycological Studies.* Kourits Press in Japan. pp.453-459.

Watanabe M. and Kasai F. 1988. *NIES Collection List of Strains.* 2nd edition. 31 p.

Accepted 30 May 2003