

옥천천 유역의 하천과 만곡부에서 조류 성장 잠재력 측정

신재기* · 김동섭¹ · 이혜근¹ · 맹승진¹ · 황순진

(건국대학교 지역건설환경공학과, ¹한국수자원공사 수자원연구소)

Algal Growth Potential Test (AGPT) in Streams and Embayment of the Okchon Stream Watershed, Korea

Jae-Ki Shin*, Dong-Sup Kim¹, Hye-Keun Lee¹, Sung-Jin Maeng¹
and Soon-Jin Hwang

Department of Biological Systems Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, and
¹Water Resources Research Institute, Korea Water Resources Corporation, Taejon 305-390, Korea

Algal growth potential test (AGPT) bioassay were conducted to evaluate the stream and reservoir water in the Okchon Stream Watershed during May to September 2002. The water quality of the stream water was clean in the upstream, deteriorating toward the downstream. In particular, SRP and NH₄ significantly increased due to treated wastewater. The average AGPT value of the Okchon Stream watershed was 22.4 mg dw · l⁻¹, with the range of 0-195.7 mg dw · l⁻¹. AGPT value was the highest immediately after inflow of treated wastewater, averaging 91.3 mg dw · l⁻¹. AGPT was highly correlated with SRP, NH₄ and TIN factors, with P having the greatest effect on the growth of algae. Among N components, NH₄ was preferred to NO₃ for the growth of algae. Likewise, AGPT was closely linked to meteorological and hydrological effects and development of natural phytoplankton. In survey stations, mesotrophic, eutrophic and hypertrophic conditions accounted for 43%, 21% and 36%, respectively. On the other hand, hypertrophic condition focused on the downstream reaches. AGPT was useful in determining not only the limiting nutrients but also the water fertility for the growth of algae. Based on the AGPT results, the management of point sources for water pollution in treated wastewater was important in the protection of aquatic environment in the stream and embayment.

Key Words: algal growth potential test (AGPT), embayment, *Microcystis aeruginosa*, reservoir, Okchon Stream Watershed, wastewater, water quality

서 론

조류성장잠재력측정(algal growth potential test, AGPT)은 시험조류를 이용하는 생물검정법의 일종으로, 1966년에 Oswald and Golueke에 의해 수체의 영양상태를 파악하는데 처음 사용되었고(Lehmusluoto 1978), 국외에서는 미국 환경보호청(EPA)을 중심으로 수질오염과 부영양화 문제를 해결하기 위해 1970년대 초반부터 폭넓게 적용되었다(Maloney et al. 1973; Miller et al. 1974). 일반적으로, AGPT는 점오염원 또는 비점오염원의 영향을 비롯하여 수

체의 비옥도(Miller et al. 1974; Kotai et al. 1978), 제한영양염(Goldman 1978), 오·폐수 처리효율과 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. 1971, 1975; Greene et al. 1975, 1977)과 하수처리 수준(Miller and Maloney 1975)을 판단하고 결정하는데 유용할 뿐만 아니라 수질분석 결과에 비해 수환경의 종합적 평가(Raschke and Schultz 1987)에 직접적인 효과와 그 기여도가 지대하다. 국내에서는 1990년 이후, 하천과 호수를 대상으로 AGPT가 지속적으로 이루어져 왔고, 수질 평가와 영양염의 상대적 결핍 및 하천과 호수 생태계를 포함하여 하수처리수의 영향을 밝히는데 주로 활

*Corresponding author (jaekishin@hanmail.net)

용되었으며(신과 조 2000a; 신 등 2003b; 신과 황 2003), 저질 공극수의 *fertility* 측정에도 유용하였다(신과 조 2001).

옥천천은 전형적인 하천-저수지 시스템으로써 하구는 만곡부를 형성하고 있어 유역으로부터 공급되는 유출수의 최종 집수역으로 볼 수 있다. 그 결과, 연중 담수적조 현상 뿐만 아니라 매년 여름철에 남조류의 생물량은 조류예보제의 최고 수준인 대발생 단계를 훨씬 초과하는 수질을 야기하고 있는 심각한 상태에 있다(신과 조 2000b; 신 등 2003a). 또한, 이러한 남조류의 대발생은 집중 호우 이후에 만곡부의 하류와 저수지 본류의 하류부로 확산되어 수자원의 효율성과 가치를 하락시키는 주된 요인으로 작용할 수 있는 위험적 잠재력을 지니고 있다(신 등 1999).

특히, 도시하천과 하수처리장의 배출수 영향은 주된 점오염원으로 작용하고 있는데 반해, 우리나라는 이를 고려한 하천과 호수 생태계 관리가 거의 이루어지지 않고 있는 것이 현실이다(신 등 2000; 신 등 2003a-c). 또한, 이러한 현상은 전국적으로 나타나고 있어, 양질의 수자원을 확보하고 관리하는 측면에서 이에 대한 평가는 매우 중요한 현안 연구로 볼 수 있다.

옥천천과 옥천만의 수환경에 대한 선행 연구는 부족하였다. 하천에 대한 연구로는 2000년에 하천수의 수질 분석과 자연 조류를 이용한 하수 처리수의 생물검정(이 2002)을 하였고, 만곡부에서는 남조류의 사멸에 따른 분해 작용이 수질과(신과 조 2000b) 수중 독소 변화에 미치는 영향과(최 등 2000) 저질토의 영양염 특성과 공극수의 AGPT를 조사한 연구가 있었다(신과 조 2001). 또한, 2002년에 유역 상하류의 수환경을 평가한 연구가 추가되었다(신 등 2003a). 본 연구는 대청호의 중류부로 유입되는 옥천천 유역을 대상으로 수중 비옥도를 평가하기 위해 AGPT를 수행하였고, 특히 하류에 위치한 하수처리장의 배출수가 여름철 조류 대발생에 미치는 영향을 파악하여, 향후 하천-저수지 시스템의 수질 관리에 유용한 자료로 제시하고자 하였다.

재료와 방법

조사지 개황

본 연구의 조사지(36° 10' N-36° 26' N, 127° 29' E-127° 53' E)는 우리나라 중부에 위치한 대청호의 유입 지류인 옥천천 상하류 구간에 해당한다(Fig. 1). 유역의 총면적은 537.2 km² 이고, 농경지가 107.3 km²(20.0%), 임야가 350.6 km²(65.3%), 주거지를 포함한 기타 공유지가 79.3 km²(14.7%)을 각각 차지하고 있다. 유역의 총 인구는 60.8천 명이고, 이 중에서 51%가 읍소재지에 거주하고 있다(옥천군, 2002).

서화천은 옥천천의 본류로써 상·하류 구간의 천변에는 농경지가 넓게 분포되어 있고, 금천천은 상류에 자연 휴양림

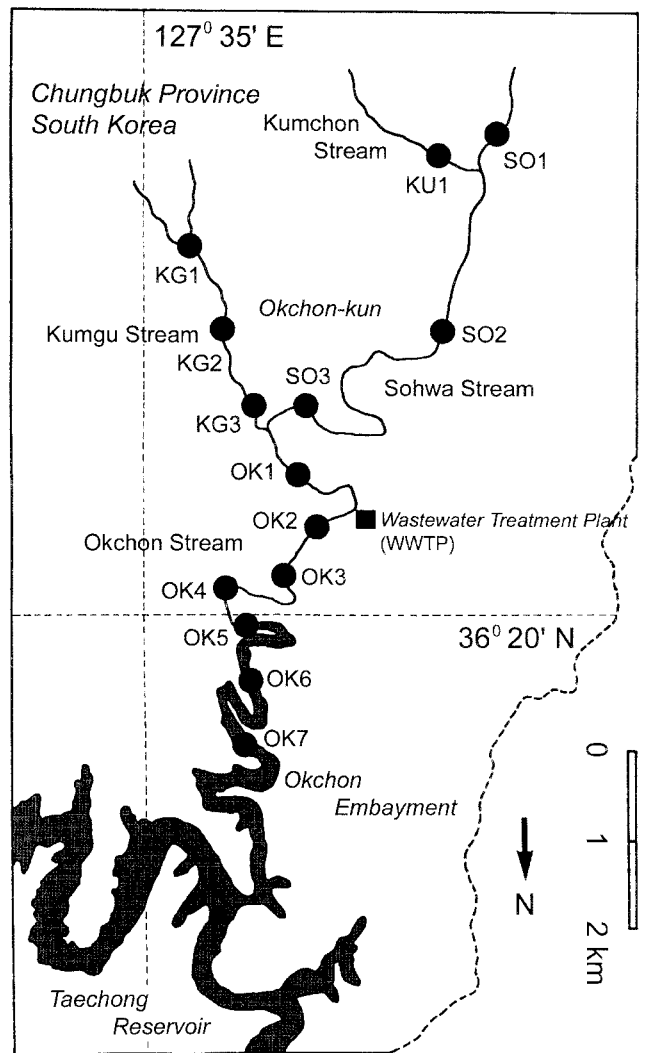


Fig. 1. Map showing sampling locations for water quality and algal growth potential test (AGPT) in the Okchon Stream Watershed.

이 구성되어 있어 유역에서 가장 비오염 지역으로 볼 수 있다.

금구천은 옥천읍을 관류하는 전형적인 소도시형 하천이다. 옥천천은 서화천과 금구천이 합류되어 이루는 하천이고, 유량은 서화천이 금구천보다 월등히 풍부하다. 옥천천의 상류(OK1-OK2 구간)에는 옥천 하수 처리장이 위치하고 있고, 18.0×10³ m³·day⁻¹의 하수 처리수를 배출하고 있으며, 대청호 유역에서 가장 큰 규모에 해당한다. 또한, 옥천 하수 처리장은 표준 활성슬러지 처리(2차처리)와 고속응집조(3차처리)처리를 하고 있고, 생활하수, 분뇨와 매립장 침출수를 혼합하여 합병처리하는 방식을 사용하고 있다(옥천군, 2002). 옥천천에서 하수처리수의 배출 지점 하류는 8-9월에 단기간 완전 수몰되고, 대청호의 수위 변동에 따라 하천과 저수지의 비율이 조절되는 곳이다. 저수화 시기에는 유속이

급감하는 하천과 저수지의 전이대 성격을 나타내고, 부유성과 부착성 담수조류의 서식 환경이 전환되는 장소이기도 하다. 본 연구 기간동안 집중 호우($> 100 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$)는 8월 초순과 하순에 관찰되었다(기상청 2002; 한국수자원공사, 2002).

본 연구는 수중 영양염(N·P), 생물량과 AGPT를 중심으로 이루어졌다. 조사지점은 서화천 3개 지점(SO1-SO3), 금천천 1개 지점(KU1), 금구천 3개 지점(KG1-KG3) 및 옥천천 7개 지점(OK1-OK7)으로써 총 14개 지점으로 선택하였고, 조사주기는 강수에 의한 기후적 영향을 고려하여 월 1회 또는 2회로 하였다. 조사시기와 횟수는 2002년 5-9월로써 총 6회이었다.

수질 분석

수질 분석을 위한 시료는 각 정점의 하천 중앙에서 표층수를 직접 채수하였고, 만곡부는 소형 보트를 이용하였다. 무기 영양염 분석을 위한 시료는 Whatman GF/F filter로 여과한 후 사용하였다. NH_4 , NO_3 , NO_2 와 SRP(soluble reactive phosphorus) 영양염은 Rump and Krist(1988)와 APHA·AWWA·WEF(1995)의 방법에 따라 분석하였다. 총무기질소(total inorganic nitrogen, TIN)는 NH_4 , NO_3 , NO_2 의 합으로 계산하였다. Chl-a 농도는 90% ethanol로 비등 추출하여 665 nm와 750 nm의 흡광도값으로 산정하였다(Nusch, 1980).

조류 성장 잠재력 측정

AGPT에 사용된 시험조류는 국외에서도 표준종으로 사용되고 있고(APHA·AWWA·WEF 1995), 국내 담수에서 춘계-추계동안 수화 원인종으로 잘 알려진 남조류 *Microcystis aeruginosa*를 선택하였다. *M. aeruginosa*는 조체를 채집하여 단세포를 manipulator로 분리하였고(신과 조 2000), *Microcystis*는 MA 배지(Watanabe 1996)에서 배양하였다. Membrane filter(0.45 μm , Millipore)로 여과한 원수 50 ml에 P-starvation시킨 *M. aeruginosa*를 ml 당 1,000 세포가 되도록 접종하였다(Claesson and Forsberg 1978; APHA·AWWA·WEF 1995; 신 1998). AGPT는 duplicate로 하였고, 접종한 시료는 7일 동안 배양한 후 600 nm 파장에서 흡광도를 측정하였으며, 최종적으로 건중량($\text{mg dw} \cdot \text{I}^{-1}$)으로 산출하였다(신 1998). 배양온도는 25°C의 항온을 유지하였고, 광은 200 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 24시간 연속 조사하였으며, 100-110 rpm으로 회전시켰다(Fig. 2). 자료의 상관분석은 SYSTAT® 8.0 통계패키지(SPSS Inc. 1998)를 이용하였다.

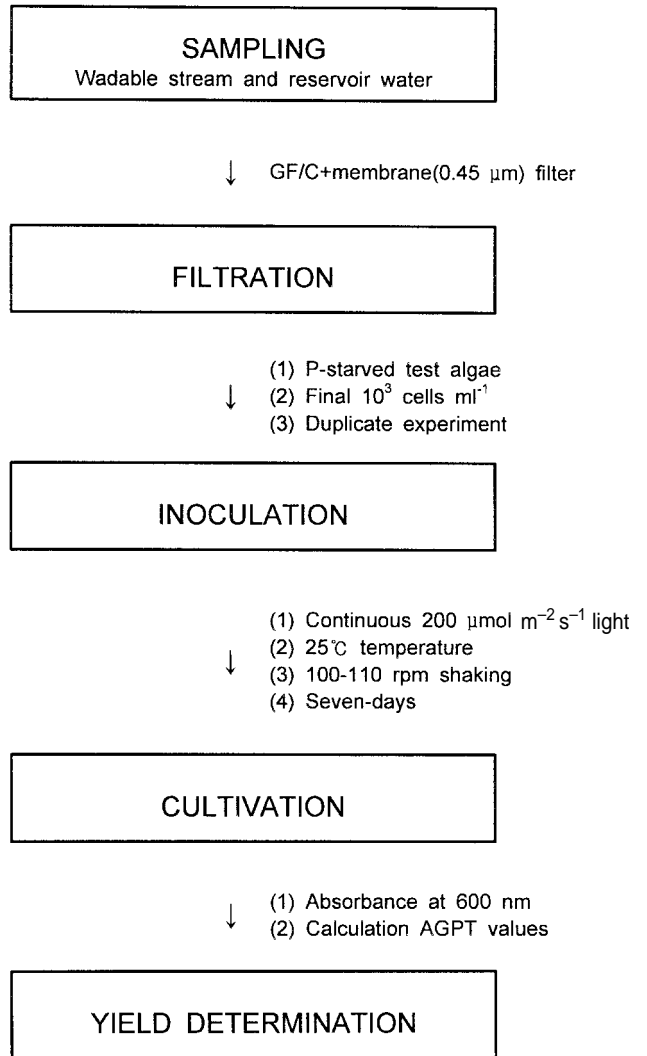


Fig. 2. A scheme for the algal growth potential test (AGPT) procedure to assess fertility of the stream and reservoir embayment water.

결과와 고찰

수중 N·P 영양염

옥천천 유역에서 수중 총무기질소(TIN)는 서화천, 금천천, 금구천과 옥천천의 OK1에서 평균값이 761.2 $\mu\text{g N} \cdot \text{I}^{-1}$ 이었고, 금구천에서 832.6 $\mu\text{g N} \cdot \text{I}^{-1}$ 으로 조금 높았을 뿐 변동폭은 크지 않았다(Table 1). 반면에, 옥천천은 하수처리수가 유입되는 OK2에서 평균 농도가 2,861.6 $\mu\text{g N} \cdot \text{I}^{-1}$ (639.9-5,302.6 $\mu\text{g N} \cdot \text{I}^{-1}$ 범위)로 증가하였고, 하류로 갈수록 감소되어 만곡부인 OK7에서 604.6 $\mu\text{g N} \cdot \text{I}^{-1}$ 를 유지하였다(Table 1).

무기질소 중 NH_4 는 옥천천의 OK2 상류구간에서 7.8-617.2 $\mu\text{g N} \cdot \text{I}^{-1}$ 범위이었고, 평균값은 62.6 $\mu\text{g N} \cdot \text{I}^{-1}$ 이었다. 반면에, OK2에서 평균값이 2,105.3 $\mu\text{g N} \cdot \text{I}^{-1}$ (46.7-4,494.6

Table 1. Mean (\pm SD) values of environmental factors in the main stream of the Okchon Stream Watershed during May to September 2002. Numerics in parenthesis indicate maximum and minimum value, respectively

Factors\Sampling streams	Sohwa (SO1-SO3)	Kumchon (KU1)	Kumgu (KG1-KG3)	Okchon		
				Upper zone (OK1)	Lower zone (OK2-OK6)	Embayment (OK7)
Total inorganic nitrogen ($\mu\text{g N}\cdot\text{I}^{-1}$)	749.2 \pm 84.7 (955.6/641.9)	725.0 \pm 90.1 (899.1/653.1)	832.6 \pm 193.3 (1,363.1/657.3)	738.2 \pm 58.5 (814.6/658.7)	1,928.5 \pm 1,535.8 (5,302.6/639.9)	604.6 \pm 229.3 (861.9/263.3)
Ammonium ($\mu\text{g N}\cdot\text{I}^{-1}$)	56.2 \pm 52.8 (244.9/19.2)	27.5 \pm 14.6 (52.5/7.8)	113.0 \pm 165.2 (617.2/28.4)	52.3 \pm 22.8 (92.6/33.0)	1,164.6 \pm 1,452.9 (4,494.6/46.7)	94.6 \pm 53.2 (145.2/18.1)
Nitrate ($\mu\text{g N}\cdot\text{I}^{-1}$)	679.4 \pm 52.2 (829.2/610.0)	688.1 \pm 66.3 (814.6/626.5)	681.6 \pm 57.4 (807.3/618.9)	664.8 \pm 28.8 (688.8/617.6)	664.4 \pm 81.6 (800.0/503.8)	479.2 \pm 186.3 (672.6/190.8)
Nitrite ($\mu\text{g N}\cdot\text{I}^{-1}$)	13.7 \pm 8.7 (36.4/5.2)	9.4 \pm 11.2 (32.0/2.8)	37.9 \pm 25.8 (82.6/10.0)	21.1 \pm 12.2 (34.7/8.1)	99.5 \pm 76.9 (290.2/14.9)	30.8 \pm 20.0 (58.9/10.9)
Soluble reactive phosphorus ($\mu\text{g P}\cdot\text{I}^{-1}$)	17.0 \pm 22.7 (71.8/0.0)	8.7 \pm 9.9 (24.8/0.0)	52.7 \pm 44.1 (141.5/0.0)	28.7 \pm 23.1 (52.1/0.0)	464.2 \pm 363.4 (1,065.8/33.9)	45.6 \pm 62.2 (147.6/0.0)
Chlorophyll-a ($\mu\text{g}\cdot\text{I}^{-1}$)	8.0 \pm 4.9 (21.3/0.8)	3.1 \pm 2.4 (6.2/0.6)	6.7 \pm 4.3 (16.8/2.0)	7.5 \pm 4.0 (12.6/3.7)	17.9 \pm 47.4 (234.5/1.7)	428.4 \pm 716.0 (1,692.2/13.1)
TIN/SRP ratio	3,030 \pm 3,825 (9,556.0/9.4)	2,467 \pm 3,667 (7,213.0/26.3)	1,864 \pm 3,568 (10,010.0/5.1)	2,651 \pm 4,083 (8,146.0/14.0)	7.3 \pm 7.3 (26.9/0.8)	1,751 \pm 3,839 (8,619.0/5.1)
Algal growth potential test (mg dw $\cdot\text{I}^{-1}$)	4.5 \pm 5.9 (16.7/0.0)	2.3 \pm 3.0 (7.4/0.0)	11.9 \pm 8.5 (25.6/0.0)	9.0 \pm 7.2 (16.3/0.0)	55.5 \pm 52.5 (195.7/10.5)	7.5 \pm 8.5 (18.5/0.0)

$\mu\text{g N}\cdot\text{I}^{-1}$ 범위)로 증가하였고, 하류로 갈수록 지속적으로 감소하였다(Table 1). NO_3 는 NH_4 와 달리 OK7을 제외한 유역 전구간에서 농도가 503.8–829.2 $\mu\text{g N}\cdot\text{I}^{-1}$ 범위이었고, 평균값은 675.7 $\mu\text{g N}\cdot\text{I}^{-1}$ 로써 정점간에 큰 차이가 없었다(Table 1). OK7에서 NO_3 가 다른 정점에 비해 다소 낮은 것은 이 지점이 저수 수역으로써 수중 조류의 생장에 NH_4 와 함께 주요한 질소원으로 이용되었을 것으로 본다. NO_2 는 서화천과 금천천, 금구천과 옥천천에서 평균값(범위)이 각각 11.6 $\mu\text{g N}\cdot\text{I}^{-1}$ (2.8–36.4 $\mu\text{g N}\cdot\text{I}^{-1}$), 37.9 $\mu\text{g N}\cdot\text{I}^{-1}$ (10.0–82.6 $\mu\text{g N}\cdot\text{I}^{-1}$), 50.5 $\mu\text{g N}\cdot\text{I}^{-1}$ (8.1–290.2 $\mu\text{g N}\cdot\text{I}^{-1}$)으로써 옥천천이 다른 유입 하천에 비해 1.3–4.4배 정도 높았다(Table 1). NO_2 는 OK2–OK3 구간에서 상대적으로 높았는데, 이 구간은 하절기 고수온, 저산소 환경에서 하수처리수로부터 공급되는 용존 유기물의 분해가 왕성한 곳로 추정되었다(신 등 2001).

수중 SRP의 변동은 다른 영양염에 비해 매우 뚜렷하였고, 하수처리수의 영향을 평가함에 있어 절대적인 인자가 될 수 있었다. 서화천, 금천천, 금구천과 옥천천에서 SRP 농도의 범위는 각각 0–71.8 $\mu\text{g P}\cdot\text{I}^{-1}$, 0–24.8 $\mu\text{g P}\cdot\text{I}^{-1}$, 0–141.5 $\mu\text{g P}\cdot\text{I}^{-1}$ 및 0–1,065.8 $\mu\text{g P}\cdot\text{I}^{-1}$ 이었고, 평균값은 각각 17.0 $\mu\text{g P}\cdot\text{I}^{-1}$, 8.7 $\mu\text{g P}\cdot\text{I}^{-1}$, 52.5 $\mu\text{g P}\cdot\text{I}^{-1}$ 및 179.5 $\mu\text{g P}\cdot\text{I}^{-1}$ 이었다(Table 1). 옥천천에서 SRP는 OK2가 평균값이 919.3 $\mu\text{g P}\cdot\text{I}^{-1}$ 로써 영향력이 가장 컸고, 주 공급원으로 두드러졌다. 이러한 결과는 하수에 포함된 인 성분 뿐만 아니라 하수와

분뇨를 일정 비율로 섞어 합병처리하는 방식에도 문제점이 있을 것으로 본다.

수중 조류의 chl-a 생물량

유역에서 OK5–OK7 구간을 제외한 상류 구간에서 chl-a 농도는 범위가 0.6–21.3 $\mu\text{g}\cdot\text{I}^{-1}$ 이었고, 평균값은 7.3 $\mu\text{g}\cdot\text{I}^{-1}$ 이었다(Table 1). 반면에, OK5과 OK7에서 chl-a 농도는 평균값(범위)이 각각 55.2 $\mu\text{g}\cdot\text{I}^{-1}$ (5.7–234.5 $\mu\text{g}\cdot\text{I}^{-1}$), 428.4 $\mu\text{g}\cdot\text{I}^{-1}$ (13.1–1,692.2 $\mu\text{g}\cdot\text{I}^{-1}$)로써 유역 평균값에 비해 각각 7.6배, 58.7배 더 높았다(Table 1). 옥천만에서 조류가 최대 증식되는 시기에 chl-a 농도의 증가를 주도한 조류는 남조류 *Microcystis*속, *Anabaena*속, *Oscillatoria*속과 *Phormidium*속이었고, 현존량은 1×10^6 cells $\cdot\text{I}^{-1}$ 를 훨씬 초과하여 담수적조 수준보다 200배를 증가하였다. 또한, chl-a의 생물량으로 본 수체의 영양상태를 평가할 때, 옥천천 유역 하천 중 금천천은 중영양 상태, 서화천, 금구천과 옥천천 OK1–OK4 구간은 중영양–부영양 수준이었고, OK5–OK7 구간은 과영양 상태이었다(OECD 1982). 특히, 정점 OK7은 연중 만성적으로 조류가 대발생하는 곳으로써 상류의 하수처리수 유입과 저질의 축적된 오염 영향을 복합적으로 받는 반폐쇄성 정체수역으로 볼 수 있었다(신과 조 2000a, b, 2001).

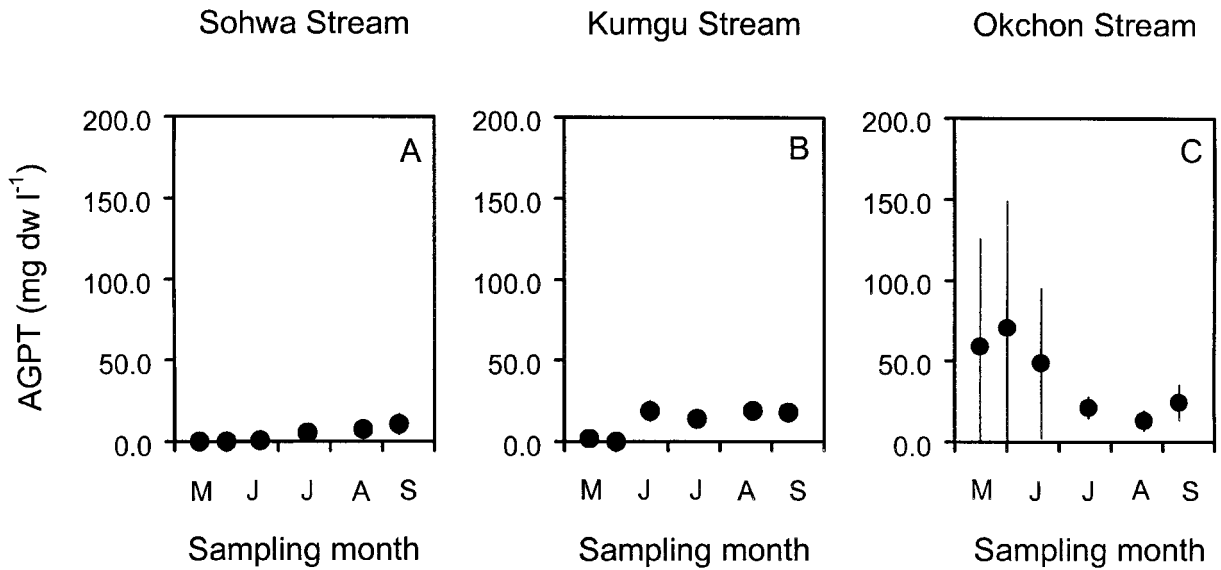


Fig. 3. Monthly variations of algal growth potential test (AGPT) values in the Okchon Stream Watershed during May to September 2002.

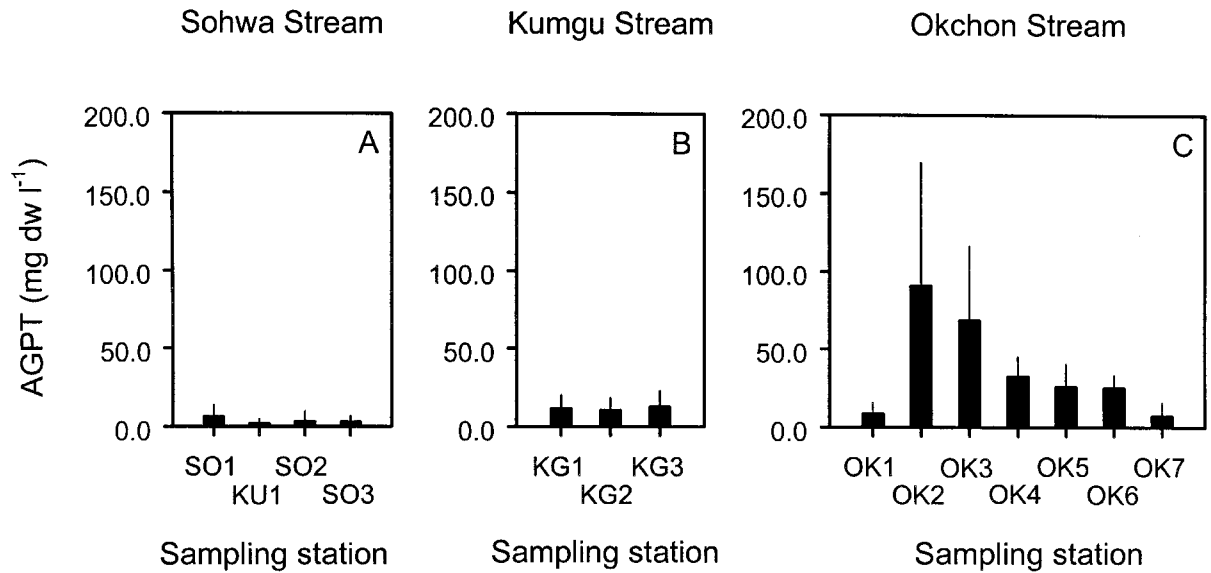


Fig. 4. Spatial distributions of algal growth potential test (AGPT) values in the Okchon Stream Watershed during May to September 2002.

AGPT의 시공간 분포

2002년 5-9월 동안 AGPT의 월 변동에서 서화천은 5-6월보다 7-8월에 조금 증가하였고(Fig. 3A), 금구천은 6-9월에 증가하는 양상이었으며(Fig. 3B), 정점간에 편차가 크지 않았다. 반면에, 옥천천은 AGPT의 평균값이 5-6월에 59.4 mg dw · l⁻¹(48.6-70.6 mg dw · l⁻¹)이었고, 7-9월에는 19.5 mg dw · l⁻¹(13.0-24.5 mg dw · l⁻¹)로써, 정점간 차이는 5-6월에 월등히 컸다. 이러한 정점간 차이는 유량 증가, 수위 변동과 조류의 변성이 주요한 원인으로 파악되었다(신 등 2003a).

AGPT값은 서화천, 금천천, 금구천 및 옥천천이 각각 4.5 mg dw · l⁻¹, 2.3 mg dw · l⁻¹, 11.9 mg dw · l⁻¹와 24.0 mg dw · l⁻¹이었다(Table 1; Fig. 4A-C). 하수 처리수가 유입되기 전 정점인 OK1에서 AGPT값(9.0 mg dw · l⁻¹)은 서화천과 금구천의 중간 수준이었으나 농도로 볼 때, 금구천의 영향이 더욱 컸다(Table 1, Figs 4A-C). 옥천천의 하류구간에서는 하수 처리수가 유입되는 OK2에서 급증하여 평균값이 91.3 mg dw · l⁻¹이었고, 최대값은 195.7 mg dw · l⁻¹이었다(Fig. 4C). AGPT값은 OK2 이후 지속적으로 감소하였고,

Okchon Stream Watershed

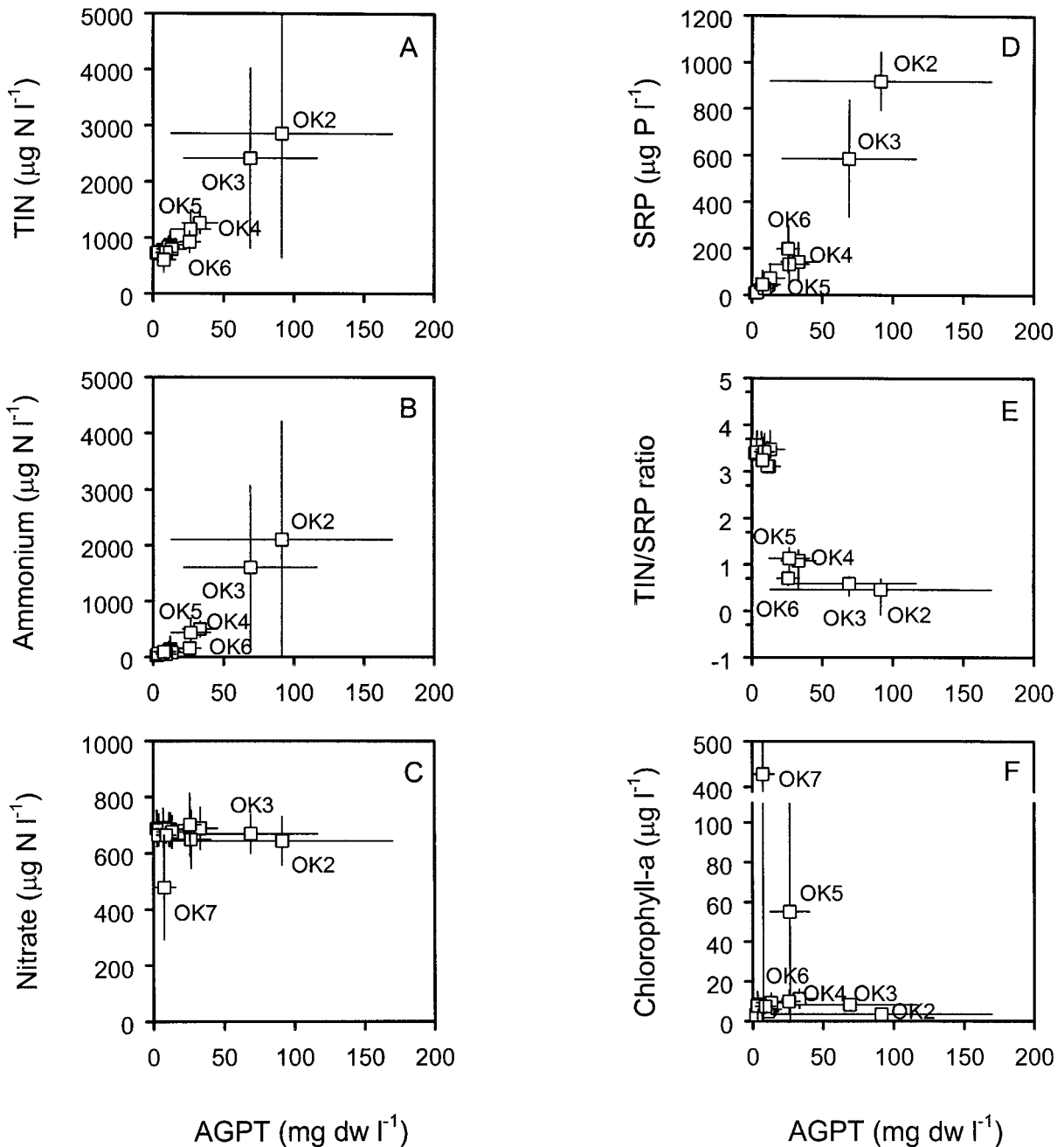


Fig. 5. Relationships between inorganic nitrogen, soluble reactive phosphorus (SRP), chlorophyll-a concentration and algal growth potential test (AGPT) values in the Okchon Stream Watershed.

OK3-OK6 구간은 평균 농도가 38.6 mg dw · l⁻¹ (10.5-134.3 mg dw · l⁻¹ 범위)로써 상류 하천인 서화천, 금천천과 금구천의 다른 정점에 비해 높았으나 연중 어느 정도 수심이 유지(> 2.0 m)되는 OK7은 비슷한 수준(7.5 mg dw · l⁻¹)을 보였다(Fig. 4C). 또한, 하수 처리수의 조류 발생 영향력은 서화천, 금천천과 금구천보다 7.8-39.7배 이상이었고, 유량을

고려한 부하량으로 본다면 더욱 클 것으로 예상된다.

N · P 영양염, chl-a와 AGPT의 상관성

옥천천 유역 14개 정점을 대상으로 무기영양염, chl-a와 AGPT의 관련성을 본 것은 Fig. 5와 같다. AGPT값은 수중 chl-a와 무기 영양염에 대한 관련성이 매우 뚜렷하였다. 특

Table 2. Correlation coefficients between algal growth potential test (AGPT) values and inorganic N · P nutrient, chlorophyll-a concentration in the Okchon Stream Watershed.

Factors	Okchon Stream Watershed	
	Algal growth potential test (AGPT)	
Total inorganic nitrogen	0.986**	
Ammonium	0.982**	
Nitrate	0.004 ^{ns}	
Nitrite	0.018 ^{ns}	
Soluble reactive phosphorus	0.981**	
Chlorophyll-a	0.159*	
TIN/SRP ratio	0.714**	

ns: not significant, * $p < 0.05$, ** $p < 0.001$

정 지점을 제외하고는 편차가 적었을 뿐만 아니라 거의 유사하여 밀집되는 모양을 나타냈고, 상류로 갈수록 더욱 현저하였다(Figs 5A-F). AGPT값은 TIN($r = 0.986$, $p < 0.001$), NH_4 ($r = 0.982$, $p < 0.001$), SRP($r = 0.981$, $p < 0.001$)와 유의한 상관성이 관찰되었고, NO_3 와 NO_2 에 대한 상관성은 적거나 유의성이 없었다($p > 0.05$, Table 2). TIN, NH_4 와 SRP의 농도가 높을수록 AGPT는 비례하여 증가하였고, NO_3 와는 관련성이 적었다(Figs 5A-D). 또한, N/P가 낮을수록 AGPT는 증가하였는데(Fig. 5E), 이것은 N보다 P 농도가 더욱 풍부함을 의미하는 것으로서 현재의 P 농도에 N의 수준이 증가할 때 AGPT의 규모는 더욱 커질 것으로 예상된다. 이러한 결과는 하류에 미치는 P의 영향이 조류 발생에 척도가 될 수 있음을 시사한다고 하겠다. AGPT값은 chl-a 농도가 높은 곳에서 낮았고, chl-a 농도가 낮은 곳에서 그 값이 증가하는 양상을 보였다($p < 0.05$, Fig. 5F). 옥천천에서 AGPT값이 높은 곳은 하수처리수의 영향을 직접적으로 받는 OK2-OK3 구간이었고, 반면에 강한 정체성을 보이는 OK5-OK7 구간은 chl-a 농도가 오히려 급격하게 증가하는 패턴을 보여 대비되었다.

수중의 fertility를 측정하는 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 질소와 인의 영향은 매우 컸으며 두 영양염 중 어느 한 영양염이 감소되거나 고갈된 구간에서 그 값은 감소하였고, 특히 P에 대한 영향이 뚜렷하였다. 수질에서 조류생장의 조절 인자에 해당하는 제한 영양염 평가는 매우 중요하다. AGPT 분석 결과 다른 인자보다도 P의 상관성이 N

보다 높아 P 제한성이 강하게 나타났다. N 성분중에서 NH_4 가 NO_3 보다 상관성이 양호하여 조류의 성장에는 NO_3 보다 NH_4 가 선호됨을 알 수 있었다(신 1998).

옥천천 유역에서 AGPT에 의한 수질은 $10 \text{ mg dw} \cdot \text{L}^{-1}$ 이상을 부영양 상태(Sudo 1980), $20 \text{ mg dw} \cdot \text{L}^{-1}$ 이상을 과영양 상태(Miller et al. 1974)로 볼 때, 14개 정점 중 43%가 이 기준보다 낮았고, 부영양은 21%, 과영양 상태는 36%를 차지하였다. 과영양 환경은 단연 하수 처리수가 유입된 이후이었고, OK2, OK3와 OK4-OK6 구간은 과영양 기준보다 각각 4.7배, 3.4배, 1.7배 높았다. AGPT의 결과로부터 옥천천 하류의 만족부(옥천만)에서 만성적으로 조류가 대발생하는 것은 하수 처리수의 영향이 가장 큰 요인으로 볼 수 있었고, 그 기작을 보다 정확하게 규명하는 것이 중요한 후속 해결 과제라고 하겠다.

사 사

본 논문은 2002년도 한국수자원공사 수자원연구소의 연구비(WRRI-WR-02-4)에 의하여 연구되었으며, 연구지원에 대해 감사드립니다. 또한, 본 논문을 심사해 주신 심사위원께 감사드립니다.

참고문헌

- 기상청. 2002. <http://www.kma.go.kr>, 기후자료: 대전 강수량.
- 신재기, 김동섭, 이혜근, 맹승진, 황순진. 2003a. 옥천천(만) 유역 하천과 만입부의 수환경 평가. 한국육수학회지 **36**: 181-190.
- 신재기, 박경미, 황순진, 조경제. 2001. 경안천과 팔당호에서 총세균수의 분포 및 동태. 한국육수학회지 **34**: 119-125.
- 신재기, 이옥희, 조경제. 2003b. 진양호와 남강의 수질에 대한 algal growth potential test(AGPT) 적용. 한국육수학회지 **36**: 57-65.
- 신재기, 조경제, 오인혜. 1999. 대청호에서 수환경 요인과 식물플랑크톤의 변동. 한국환경생물학회지 **17**: 529-541.
- 신재기, 조경제. 2000a. 금강 중·하류에서 AGP에 의한 수질평가. 한국육수학회지 **33**: 244-250.
- 신재기, 조경제. 2000b. 생물검정에 의한 남조류 *Microcystis*가 수질에 미치는 영향. 한국환경과학회지 **9**: 267-273.
- 신재기, 조경제. 2001. 대청호 저토의 N, P 및 Si 영양염 함량과 조류생장잠재력. 한국육수학회지 **34**: 106-118.
- 신재기, 조주래, 황순진, 조경제. 2000. 경안천-팔당호의 부영양화와 수질오염 특성. 한국육수학회지 **33**: 387-394.
- 신재기, 황순진, 조경제. 2003c. 평택호와 유역 주요 하천의 수환경 및 오염도 평가. 한국육수학회지 **36**: 38-47.
- 신재기, 황순진. 2003. 평택호와 유역 하천에서 조류생장잠재력 측정. 한국육수학회지 **36**: 172-180.
- 신재기. 1998. 낙동강 부영양화에 따른 담수조류의 생태학적 연구. 인제대학교 박사학위논문. 202 pp.
- 옥천군. 2002. 옥천군정 일반현황 자료편. <http://www.okcheon.chungbuk.kr>

- 이순자. 2002. 대청호의 수질오염 특성과 담수조류를 이용한 생물검정. 충북대학교 대학원 석사학위논문. 85 pp.
- 최일환, 신재기, 임성아. 2000. Cyanobacteria의 분해에 따른 microcystins의 변화. 한국육수학회지 **33**: 9-22.
- 한국수자원공사. 2002. 다목적댐 기상·수문 자료: 대청호 유역 강수량 자료. <http://www.kowaco.or.kr>
- APHA·AWWA·WEF. 1995. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 18th ed. American Public Health Association, Washington, DC.
- Claesson A. and Forsberg A. 1978. Algal assay procedure with one or five species. *Mitt. Internat. Verein. Limnol.* **21**: 21-30.
- EPA (U.S. Environmental Protection Agency). 1971. *Algal Assay Procedure: Bottle Test*. National Eutrophication Research Program, Corvallis EPA1972-795-146/1, Region 10, 82pp.
- Forsberg C., Ryding S.-O., Claesson A. and Forsberg, A. 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., Miller W.E., Shiroyama T. and Maloney T. 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., Miller W.E., Shiroyama T., Soltero R.A. and Putman K. 1977. Use of algal assays to assess the effects of municipal and smelter wastes upon phytoplankton production. In: *Proceedings of the Symposium on Terrestrial and Aquatic Ecological Studies of the Northwest*. EWSC Press, Eastern Washington State College, Cheney WA 99004. pp. 327-336.
- Kotai J., Krogh T. and Skulberg O.M. 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 Marvan P. 1988. A standardized method of algal assay. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* **23**: 957-959.
- Maloney T.E., Miller W.E. and Blind N.L. 1973. Use of algal assays in studying eutrophication problems. In: *Proceedings: Advances in Water Pollution Research 6th International Conference*. Pergamon Press, Oxford & New York. pp. 205-214.
- 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.
- Miller W.E. and Maloney T.E. 1971. Effects of secondary and tertiary wastewater effluents on algal growth in a lake-river system. *Journal WPCF*, **43**: 2361-2365.
- Miller W.E., Greene J.C., Shiroyama T. and Merwin E. 1975. The use of algal assays to determine effects of waste discharges in the Spokane River System. In: *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 Co-operation and Development, Paris, France. 154 pp.
- 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 Krist H. 1988. *Laboratory Manual for the Examination of Water, Wastewater, and Soil*. VCH Verlagsgesellschaft, Publ., New York. 190 p.
- SPSS. 1998. *SYSTAT[®] 8.0 Statistics*. SPSS Inc., Chigaco, USA. 1,086 pp.
- Sudo R. 1980. Studies on the water-blooms in lake Kasumigaura. *Jpn. J. Limnol.* **41**: 124-131.
- Watanabe M. 1996. Isolation, cultivation and classification of bloom-forming *Microcystis* in Japan. In: Watanabe M.F., Harada K., Carmichael W.W. and Fujiki H. (eds) *Toxic Microcystis*. pp. 13-34. CRC Press, Boca Raton, London.