KJEE 50(1): 79-95 (2017)
https://doi.org/10.11614/KSL.2017.50.1.079
ISSN: 2288-1115 (Print), 2288-1123 (Online)

Original article

의암호 및 팔당호에 유입되는 주요 하수처리 방류수의 수질 비옥도 생물검정: Algal Growth Potential (AGP) Test

서완범 · 이수웅[1] · 김건희 · 박채홍 · 최봉근 · 심연보[1] · 황순진* · 신재기[2,*]

건국대학교 환경보건과학과, [1]국립환경과학원 한강물환경연구소, [2]한국수자원공사 낙동강남부권관리단

Cyanobacterial Bioassay (AGP test) on the Water Fertility of Treated Wastewater Effluents Discharged into Euiam and Paldang Reservoirs, Korea. *Seo, Wanbum* (0000-0003-1004-1722), *Su-Woong Lee*[1] (0000-0001-6827-0769), *Keonhee Kim* (0000-0002-5725-1447), *Chaehong Park* (0000-0003-1080-0733), *Bong-Geun Choi* (0000-0002-0389-755X), *Yeon Bo Sim*[1] (0000-0003-2317-8146), *Soon-Jin Hwang** (0000-0001-7083-5036) *and Jae-Ki Shin*[1,*] (0000-0002-5380-5078) *(Department of Environmental Health Science, Konkuk University, Seoul 05029, Republic of Korea; [1]Han River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research, Yangpyeong 12585, Republic of Korea; [2]Office for Southern Region Management of the Nakdong River, Korea Water Resources Corporation (K-water), Busan 49300, Republic of Korea)*

Abstract Euiam and Paldang Reservoirs have often been facing water quality problems, such as eutrophication, algal blooms and off-flavors by treated wastewater effluent (TWE) in the North-Han and the Han River basins, but little is examined on the direct biological effect of TWE. This study tested algal growth potential (AGP) of four TWEs discharged into Euiam and Paldang Reservoirs to evaluate water fertility in September 2014 and March and September 2015. Test alga was used *Anabaena circinalis* isolated from Paldang Reservoir. Mean concentration of T-N and T-P in TWEs was 3,956.7 μg N L^{-1} and 50.8 μg P L^{-1}, and the proportion of NO_3-N and PO_4-P to the total fraction was 72.1% and 40.8%, respectively. Both N and P were high in TWEs, but much higher N than P concentration indicates strong P-limitation. As a consequence, the maximum AGP was determined by PO_4-P concentration ($r = 0.998$, $p < 0.01$). Mean AGP value was 15.4 mg dw L^{-1} among four effluents indicating its eutrophic condition. Due to the establishment of tertiary (advanced T-P) treatment method in the studied plants recently, P concentration was significantly decreased in TWEs compared to the years prior to 2012. However, P concentration seems to be still high enough to cause eutrophication and algal blooms. Therefore, wastewater treatment to P-free level needs to be considered if effluents are directly discharged into the drinking water resources.

Key words: algal growth potential (AGP), *Anabaena circinalis*, treated wastewater effluent, Euiam Reservoir, Paldang Reservoir, North-Han River

서 론

의암호와 팔당호는 우리나라에서 단일 수계 중 유일하게 최장 연계 댐(cascade serial dams) 구조를 가진 북한강~한강 구간의 중 · 하류에 각각 위치하고 있다(Hwang *et al*.,

Manuscript received 29 December 2016, revised 12 January 2017, revision accepted 26 January 2017
* Corresponding author: Tel: +82-2-450-3748, Fax: +82-2-456-5062, E-mail: sjhwang@konkuk.ac.kr
Tel: +82-10-3870-6121, Fax: +82-51-529-3168, E-mail: shinjaeki@gmail.com

ⓒ The Korean Society of Limnology. All rights reserved.
This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provide the original work is properly cited.

2016, 2017). 따라서 유량은 극한 홍수기를 제외하고 상류의 댐에 의해 불가피하게 조절되고 있으며, 유역에 비해 저수 규모가 작을 뿐만 아니라 발전 · 취수량도 동시에 많아서 다른 댐 저수지들과 달리 체류시간이 매우 짧은 전형적인 하천형 저수지에 해당한다(Kim, 1995; Hwang *et al*., 2016, 2017). 이러한 시스템에서 담수 후 10년이 되는 시기부터 발생한 부영양화와 녹조현상은 현재까지 만성적인 수질문제로 이어져 왔고(Hwang *et al*., 2016), 그로 인한 국내 최대 상수원으로써 겪은 사회 · 경제적 영향과 누적 피해는 천문학적으로 막대하였다(Kim *et al*., 2015). 또한, 이를 경감 또는 해소하기 위하여 정부는 나름대로 목표 수질을 가지고 다양한 노력(예, 환경기초시설 확대, 조류경보제, 오염총량제 및 수질예보제 등)을 지속적으로 펼쳐 왔으나(MOE, 2016), 시간이 경과하면서 가시적인 기대효과는 적었고, 돌발사태에 한시적 사후 대응 또는 임시 수습에만 전전긍긍하는 실정이었다. 또한, 실제로 이상수질 문제(예, 조류 번성 · 이취미 발생 · 유해물질 누출)에 부닥칠 때마다 단기 대책으로 펄스방류(pulsed-flows)와 정수시설 고도화에만 급급하거나 치중하였고(MOE, 2016), 저수지와 유역 중심의 육수학적 근원 추적과 과학적 원인 해결을 위한 접근은 도외시 된 물 관리 정책을 펼쳐왔다.

하천에 댐을 축조하여 형성된 인공 저수지의 수질은 유역의 도시화와 인구집중 등 산업적 토지 이용도 변화로 인한 오염 영향에 취약할 뿐만 아니라 상 · 하류 또는 구간별 이질적인 분포특성을 보이게 된다(Shin *et al*., 2003b, 2016; Jeong *et al*., 2014). 또한, 하천과 저수지는 유역의 최종 배수로와 집수역에 각각 해당하고, 외부 또는 내부 부하 수준에 의해 저수지의 수질이 결정되므로(Schindler, 1974; Shin *et al*., 2003d), 이에 대한 조류생물검정은 수계의 오염상태를 총체적으로 가늠할 수 있는 예측 도구로써 중요하게 활용될 수 있다(USEPA, 1971; Shin *et al*., 2000). 최근에 유역의 수질개선 및 관리 차원에서 크고 작은 하수처리장의 신규 건설, 증설 또는 시설 고도화가 확대 추진되었으나, 지역별로 설정된 방류수 수질기준이 높아서 저수지의 수질은 크게 개선되지 않고 있다(Jeong *et al*., 2014). 특히, 상수원의 중점 수질기준 항목인 BOD는 더 이상 증감경향이 없으나, 난분해성 유기물과 무기 P·N의 오염도는 가중되어 녹조현상과 이취미 발생에 대한 환경 · 사회적 문제는 더욱 증폭되었다(Shin *et al*., 2003a, 2016; Hwang *et al*., 2016, 2017). 저수지의 부영양화는 시스템의 허용환경용량 초과로 인해 나타나는 인위적인 현상으로써 과다한 영양염 유입에 의한 높은 생산성을 유발하는 원인이 된다(OECD, 1982; Paerl, 1988; Thornton *et al*., 1990; Wetzel, 2001; Kalff, 2002). 우리나라에서 수질 부영양화는 무엇보다도 하천(유수환경)에서 연중 영양염 농도가 높기 때문이며, 이 물을 온전하게 받아 들이는 저수지(정수환경)는 기상 · 수문학적 조건에 따라 흐름이 급감하는 본류 및 지류의 상류지역(river-reservoir hybrid zone)에서 조류의 생물량이 크게 증가하는 현상으로 귀결되고 있다(Shin *et al*., 2016). 또한, 수중 영양염 농도는 강수량 또는 유량의 증감 변동과 밀접한 관련성을 가지고 있어 여름에 비교적 낮고 겨울에 높은 계절적 특성을 나타내고 있으나, 장마기에 일부 수질 요인(예, 인(P)과 藻體)은 수문학적 변동성에 의해 이송 · 확산 정도가 매우 빠르다(Hwang *et al*., 2016, 2017). 특히, 도시하천은 그동안 체계적인 관리가 미흡하여 수질오염 수준이 심각한 상태이었고, 이를 개선하고자 현재 정부(지자체)의 주도 하에 하천 생태 건강성 회복 및 복원사업이 전국적인 규모로 추진되고 있다(MOE, 2016). 그러나 하수처리수와 CSOs (combined sewer overflows)의 취약성에 대한 보완책 마련은 적극적이지 못하였다.

한강 수계에서 하천과 저수지의 상류는 농경지와 농촌이, 중 · 하류 구간은 군소 또는 대도시가 발달되어 있고, 특히 도시지역 기원성 생활하수는 우기를 제외(예, 합류식 CSOs)하고 전량 하수처리장을 통해 처리한 후 배출되고 있다. 그리고 주요 하천의 하류 말단에 소유역에서 발생하는 하 · 폐수를 관로를 통해 차집하여 처리하는 환경기초시설이 위치해 있으며(MOE, 2015), 하수처리수가 방류되는 지점의 하류부터 수질 악화는 역력히 관찰되어 주된 오염원으로 작용하고 있다. 하수처리수는 많은 선행연구 결과를 통해 수질오염의 원인 중 하나로써 명백한 사실이며(Edmondson and Lehman, 1981), 과거부터 국내외적으로 다양한 분야에서 관심의 대상이 되었을 뿐만 아니라 부영양화 또는 그 영향을 줄이고자 많은 노력을 경주해 왔다(Edmondson and Lehman, 1981; Shin *et al*., 2000). 그러나 국내의 경우, 기준항목(예, BOD)의 부적절성으로 인해 오랫동안 수질관리에 어려움을 겪어 왔으며 현재에도 여전히 진행 중에 있다. 따라서 하수의 총인고도처리 시행과 함께 공공수역의 수질을 결정짓는 원인과 결과 부분을 보다 명확히 해야 할 시점이라 여겨지며, 특히 녹조현상과 2차 영향을 최소화하기 위해서 기상 조건에만 의존하기 보다 PO_4 부하의 경감 관리로 전환하는 것이 반드시 필요한 것으로 보여진다(Hwang *et al*., 2016).

담수 수질은 물리 · 화학적 실험분석에 의한 농도 값, 영양염 조성과 상대 비율 및 지표생물 성장의 생물학적 잠재력을 통해 비교 평가할 수 있다(USEPA, 1971). 이 중에서 조류성장잠재력은 증식에 요구되는 영양염의 적정 농도를 판정하고 현장 또는 장래 잠재예측 영향을 밝힘으로써 수질 비옥도(water fertility)를 평가하는 일종의 생물검

정(bioassay) 도구이다(Sudo, 1980). 조류는 N과 P 등 영양염의 양과 비율에 의해 주어진 환경에서 종조성과 생물량을 달리하기 때문에 수질 평가에 유용한 척도가 될 수 있다(Wetzel, 2001). 또한, 조류와 영양염의 관계에서 조류성장과 생물량은 필요한 최소량으로 존재하는 것에 의해 결정된다는 Liebig's 최소율 법칙에 근거하고 있다(USEPA, 1971). 그리고 수중의 영양염은 조류가 직접 가용할 수 있는 형태로써 존재하는 것만은 아니며, 특히 인(P)과 질소(N)에 친화력(affinity)이 높아 생장에 대한 그 영향은 화학적 분석 결과로 확인하기 어려운 저농도에서 일어날 수 있다(Wetzel, 2001). 따라서 수중에 녹아있는 성분의 농도로써 제한성을 평가하는 것은 다소 부족한 면이 없지 않다. 수질분석에 의한 조류성장 평가는 개략적일 수 있으므로 조류성장잠재력 측정과 같은 생물검정법을 병행하는 것이 보다 효과적일 수 있다(Miller *et al*., 1974).

미세조류를 이용한 수질 생물검정은 1927년에 Schreiber가, 1933년에 Storm이 각각 해수와 담수의 수질에 적용한 것이 초기 연구이었고(Lhotsky and Marvan, 1988), 자연조류와 시험조류에 의한 방법 또는 변법이 일반적이었다(Shin *et al*., 2001; APHA, 2012). 이 중에서 조류성장잠재력(algal growth potential, AGP) 측정은 시험조류를 이용하는 것으로써 1966년에 Skulberg, W.E.와 Oswald and Golueke가 스웨덴의 호수 수체의 영양상태를 파악하는 데 처음 사용되었고(Lehmusluoto, 1978), 1970년대 초반부터 미국환경보호청(EPA)을 중심으로 수질오염과 부영양화 문제를 해결하기 위해 폭 넓게 시도되었으며(USEPA, 1971; Maloney *et al*., 1973; Miller *et al*., 1974, 1978; Lehmusluoto, 1978), 그 결과로써 1971년에 Algal Assay Procedure: Bottle Test (AAP-BT)와 1978년에 Algal Assay Bottle Test의 protocol이 만들어졌다(USEPA, 1971; Miller *et al*., 1978).

현재까지 우리나라(Appendix 2)를 포함하여 미국(Miller and Maloney, 1971; Wang *et al*., 1973; Maqsood, 1974; Miller *et al*., 1974; Greene *et al*., 1975; Shoaf, 1978; Smith *et al*., 1979; Raschke and Schultz, 1987; Schultz *et al*., 1994; Cassidy, 2011; Obispo, 2014), 캐나다(Couillard and Li, 1993), 멕시코(Lopez and Davalos-Lind, 1998; Abeja-Pineda *et al*., 2015), 일본(Sudo, 1980), 스웨덴(Forsberg *et al*., 1975; Wilander and Persson, 2001), 노르웨이(Faafeng *et al*., 1994), 네덜란드(Bolier, 1985; Klapwijk *et al*., 1989), 체코공화국(Lukavsky *et al*., 1979; Lukavsky, 1992; Kviderova and Elster, 2013) 및 오스트레일리아(Stauber, 1995) 등 세계 각국에서 널리 이용하고 있다. 이들 조사 및 연구는 부영양화 모니터링, 영양염 이용 친화력, 각종 오염수에 대한 반응, 배양실험법 및 자료분석 활용 등 위주로 내용을 담고 있다.

일반적으로, AGP 실험검정은 점(Miller and Maloney, 1971; Gakstatter *et al*., 1978) 또는 비점오염원(Couillard and Li, 1993)의 영향을 비롯하여 수체의 비옥도(Miller *et al*., 1974; Kotai *et al*., 1978), 제한영양염(Goldman, 1978), 오·폐수 처리효율 및 중금속 독성 평가(Forsberg *et al*., 1978; Wang, 1982; Obispo, 2014) 등 다양한 연구에 활용되어 그 효용성과 자료의 신뢰성도 높다(Raschke and Schultz, 1987; Lhotsky and Marvan, 1988). 특히, 하천과 저수지에 대한 하수처리수의 영향(USEPA, 1971; Miller *et al*., 1975; Greene *et al*., 1975, 1977)과 하수처리 수준(Miller and Maloney, 1971)을 판단하고 결정하는 데 유용할 뿐만 아니라 일반적인 수질분석에 비해 물환경의 종합적 평가(Raschke and Schultz, 1987)에 직접적인 효과와 그 기여도가 크다고 할 수 있다.

국내는 1990년대 초반부터 하천과 저수지를 대상으로 AGP 테스트가 지속적으로 이루어져 왔고(Appendix 2), 수질환경 예측평가와 영양염 제한성(Jung, 1991; Wui *et al*., 1991; Park *et al*., 1992, 2007, 2015; Joo *et al*., 1994, 2000; Chung *et al*., 1996; Oh *et al*., 1998; Shin and Cho, 1999, 2000b; Kim, 2002; Shin *et al*., 2003b, 2003c, 2003e; Shin and Hwang, 2003; Kwon, 2004; Hwang *et al*., 2006; Kwon *et al*., 2006; K-water, 2007; Kim *et al*., 2007; Jeong *et al*., 2008; KRC, 2009; Long, 2010), 퇴적층 P 잠재력(Shin and Cho, 2001) 및 하수 영향(Shin and Cho, 2000a; Shin *et al*., 2001; Seo *et al*., 2003; Chang *et al*., 2011; Joo *et al*., 2016)을 밝히는 데 주로 활용되었다. 그리고 연안·해양에도 육수(하천, 강 및 저수지)와 유사한 목적으로 사용하고 있다(Kwon *et al*., 2002; Lee, 2003).

본 연구의 목적은 2014년 9월, 2015년 3월 및 9월에 의암호와 팔당호로 배출되는 주요 4개 하수처리장 방류수에 대한 수질 비옥도(water fertility)를 파악하고자 남조류 *Anabaena circinalis* 시험조류를 이용하여 생물학적으로 검정하는 것이었다. N·P 계열 영양염, chlorophyll-*a* (Chl-*a*)의 수질분석과 동시에 AGP를 측정하였고, 그 영향을 수용하는 저수지의 수질과 비교하여 최종적으로 오염원과 제한 영양염 중심의 수질관리 필요성을 검토하고, 매년 하계~추계(동계)에 전개되는 녹조현상과 연관시켜 육수학적 특성을 고찰하였다.

재료 및 방법

1. 조사지 개황

한강은 4대강 중 가장 고위도(N36°30′~N38°55′, E126°

24′~E129°02′)에 위치한 국가하천으로써 남한의 하천 중에서 유로연장이 가장 길고(494.4 km), 남한강과 북한강이 팔당호에서 합류되어 이루어진다(MOLIT, 2012). 이 중에서 북한강은 최상류에서 하구까지 본류와 지류에 연속되는 7개의 인공댐(평화의댐, 화천댐, 춘천댐, 소양강댐, 의암댐, 청평댐 및 팔당댐)이 계단식 구조(평균거리 80.3 km)로 건설되어 강우사상에 따라 유량이 인위적으로 조절되는 특성을 갖고 있다(Hwang *et al*., 2016, 2017).

의암호는 북한강 수계의 상류에 위치해 있으며, 1967년에 수력발전(용량 45,000 kw, 연간 161 Gwh)의 단일 목적으로 댐을 건설(강원도 춘천) 준공하여 조성된 인공호이다(Fig. 1). 댐은 북한강 본류의 춘천댐과 소양강 합류점에서 약 10 km 하류에 위치한 콘크리트 중력식 잠언 둑으로써 제방 높이와 길이는 각각 23 m, 273 m이고, 14개의 수문(13 × 14.5 m)이 설치되어 있다. 유역과 저수지 면적은 각각 7,709 km^2 (북한강의 31.7%), 15.5 km^2이고, 길이와 폭은 각각 8 km (북한강의 3.5%), 5 km로써 타원형 모양에 가깝다(Fig. 1). 총저수량은 8.0×10^7 m^3이고, 평균 체류시간은 약 4.7일(갈수기 6.9~7.7일)로써 전형적인 하천형 저수지이다(Hwang *et al*., 2017). 주요 유입원은 춘천호(북한강 본류)와 소양호(소양강 지류)의 방류수이고, 그 외 우기를 제외하고 유량은 적지만 비교적 수질이 좋지 않은 공지천과 유역에서 발생하는 하수를 처리한 후 배출하는 춘천하수처리장의 방류구가 포함된다(Fig. 1).

팔당호는 남 · 북한강 수계의 하류에 위치해 있으며, 수력발전(연간 378 Gw) 목적으로 1973년 12월에 댐 건설(경기도 하남 · 남양주) 후 이듬 해부터 담수하여 조성된 인공호이다(Fig. 1). 댐은 한강 하구(신곡수중보)에서 약 34.5 km 상류지점, 남한강과 북한강이 합류하는 두물머리(경기도 양평군 양서면 양수리)로부터 하류 약 7 km 지점에 위치한 콘크리트 중력식 잠언 둑으로써, 제방 높이와 길이는 각각 29 m, 575 m이고, 15개의 수문(20.0 (W) × 16.75 (H) m)이 설치되어 있다. 유역 및 저수지 면적은 각각 23,800 km^2, 36.5 km^2이고, 둘레는 77 km, 평균 수심은 6.5 m (최대 24.3 m)이다(Fig. 1). 총저수량은 24.4×10^7 m^3이고, 평균 체류시간은 약 4.7일(갈수기 6.9~7.7일)로써 전형적인 하천형 저수지이다(Hwang *et al*., 2016). 주요 유입원은 충주호(남한강 본류)와 청평호(북한강 본류)의 방류수로써 연계 댐 시스템의 합류점에 위치하여 이들 수질의 영향을 최종적으로 받고 있다. 그 외 우기를 제외하고 비교적 많은

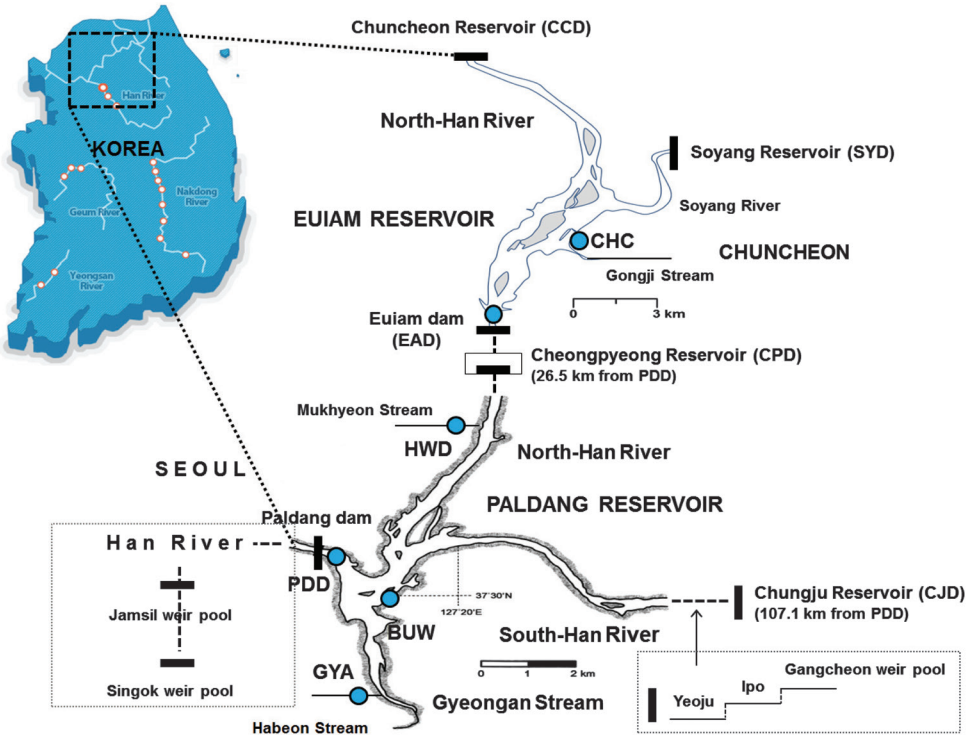

Fig. 1. Map showing the sampling stations of major wastewater treatment plant (WWTP) located in the North-Han River, the Gyeongan Stream and Paldang Reservoir basin. CHC: Chuncheon, HWD: Hwado, BUW: Bunwon, GYA: Gyeongan wastewater treatment plant, EAD: Euiam Reservoir dam, PDD: Paldang Reservoir dam.

Table 1. Comparison of facility capacity and major features of wastewater treatment plant (WWTP) located in the North-Han River, the Gyeongan Stream and Paldang Reservoir. Data were collected from Annual Report of National Wastewater Statistics 2014 (MOE, 2015).

Items/WWTP	Chuncheon (CHC)	Hwado (HWD)	Bunwon (BUW)	Gyeongan (GYA)
Discharging area	Euiam Reservoir	Mukhyeon Stream (North-Han River)	Paldang Reservoir	Gyeongan Stream
Treatment capacity (10^3 m^3 d^{-1})	150.0	43.0	1.9	40.0
– Advanced treatment	150.0	43.0	1.7	40.0
– Biological treatment	–	–	0.2	–
– T-P treatment (operation date)	150.0 (May, 2012)	43.0 (September, 2011)	1.9 (March, 2012)	40.0 (November, 2011)
Treatment method	BSTS-II (Media)	DNR (A2O)	ICEAS-Aeration (SBR)	PID
P-treatment method	Chemicals + COA + SED (Sedimentation)	MSF (Filtration)	SMF (Filtration)	FPF (Filtration)
– Coagulation chemicals	PAC 17%	Alum	PAC 10% + NaOH	PAC 17%
– Chemical concentration (mg L^{-1})	26.4	52.7 (47.0~58.3)	56.9	60.1
Population within unit treatment area (10^3 person)	240.3	101.5	3.7	118.2
Construction (Year)	January, 1990	August, 1993	November, 1992	February, 2002
Facility upgrade (Year)	–	2005	2002	2007

BSTS: biomecca sewage and wastewater treatment system, DNR: Daewoo nutrient removal, A2O: anaerobic/anoxic/aerobic, ICEAS: intermittent cycle extended aeration system, SBR: sequencing batch reactor, PID: phased isolation ditch, COA: coagulation, SED: sedimentation, MSF: miracle sand filter, SMF: superior membrane system, FPF: fiber phased filter.

유량은 아니지만 유역의 최대 오염하천인 경안천을 비롯한 북한강의 묵현천 및 남한강의 섬강, 청미천, 양화천, 복하천 등 주요 지류가 있다(MOLIT, 2012). 그리고 유역은 팔당호에 가까워지면서 도시화의 진행과 인구 밀집현상으로 중 · 상류에 비해 다양한 오염원이 고밀도로 분포하며, 발생하는 하수를 처리한 후 배출하는 하수처리장의 방류구가 본류 또는 지류에 분산되어 위치하고 있다(HREO, 2007; MOE, 2015).

본 연구 대상인 춘천하수처리장(강원도 춘천, 150.0×10^3 m^3 d^{-1})의 방류수는 의암호로 직접 유입되고, 화도하수처리장(경기도 남양주, 묵현천 하구에서 상류 3 km, 43.0×10^3 m^3 d^{-1}), 분원하수처리장(경기도 광주, 1.9×10^3 m^3 d^{-1}) 및 경안하수처리장(경기도 광주, 경안천 하구에서 상류 3 km, 40.0×10^3 m^3 d^{-1})의 방류수는 팔당호로 최종 유입된다(Table 1) (Fig. 1). 이들 처리장은 고도처리를 기본으로 하였고, 2011년 9월~2012년 5월 사이에 총인처리를 추가하여 운영 중에 있으며, 세부 방법(시설, 화학약품 및 적용농도 등)은 다소 차이가 있었다(Table 1).

2. 현장조사 및 실험분석

2014년 9월, 2015년 3월 및 2015년 9월에 의암호와 팔당호로 유입되는 하수처리장 방류수에 대한 조류성장잠재력을 테스트하기 위해 3회 조사 및 채수하였다. 조사지점은 춘천하수처리장(CHC), 화도하수처리장(HWD), 분원하수처리장(BUW) 및 경안하수처리장(GYA)의 4개 지점(Table 1)과, 의암댐(EAD)과 팔당댐(PDD) 지점의 2개를 선정하여 총 6개 지점이었다(Fig. 1). 수질분석을 위한 시료는 각 처리장의 방류구에서 채수하였다. CHC, HWD 및 GYA는 도보로 접근하였고, BUW, EAD 및 PDD는 소형선박을 이용하였다. 채수한 시료는 아이스박스에 담아 보관한 후 차량을 이용하여 12시간 이내에 실험실로 옮겼고, 즉시 전처리 후 분석하였다(APHA, 2012).

T-N (total nitrogen)과 T-P (total phosphorus)는 원수를 그대로 사용하였고, Ammonium (NH_4), Nitrate (NO_3) 및 Soluble reactive phosphorus (SRP, PO_4)의 무기 영양염과 DTN (dissolved total nitrogen), DTP (dissolved total phosphorus)의 분석을 위한 시료는 Whatman GF/F filter (Whatman, UK)로 여과한 후 사용하였다(Rump and Krist, 1988; APHA, 2012). Chl-*a* 농도는 시료를 Whatman GF/F로 여과한 후 90% Aceton 용매로 광합성 색소를 추출하여 측정한 흡광도 값으로 계산하였다(APHA, 2012).

3. Algal growth potential 측정

조류성장잠재력(algal growth potential, AGP) 측정은 의

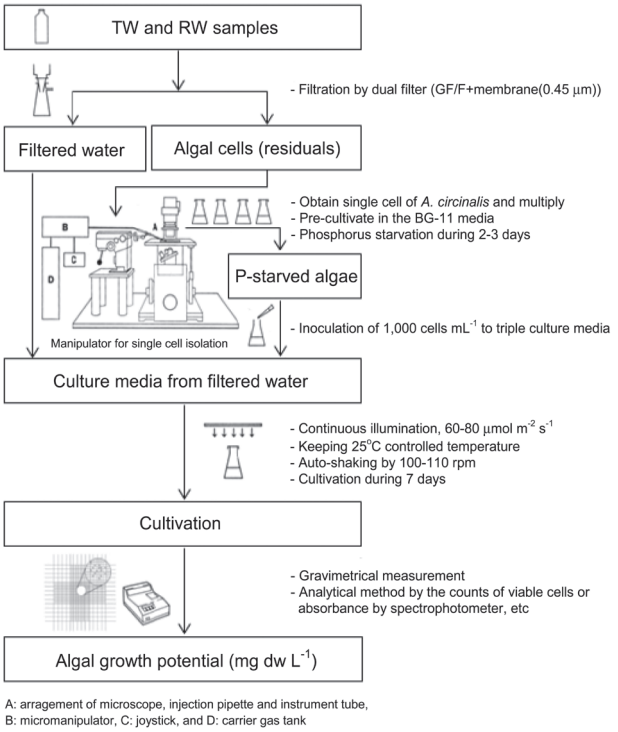

Fig. 2. Schematic diagram illustrated the procedure of algal growth potential (AGP) test. *Anabaena circinalis* was collected in Paldang Reservoir and used as the test alga. TW: treated wastewater, RW: reservoir water.

암호와 팔당호에서 춘계~추계동안에 녹조현상의 원인종으로 잘 알려진 남조류 *Anabaena circinalis*를 시험조류로 사용하였다. *A. circinalis*는 2012년 8월에 팔당호에서 녹조 대발생 시기에 조체를 채집하여 광학현미경(Axiostarplus, ZEISS, Germany) ×200배 배율 하에서 단세포를 manipulator로 분리하였고, BG-11 media (Watanabe, 1996)에서 전배양하였다(Fig. 2). Membrane filter (0.45 μm, Millipore)로 여과한 측정대상 시험시료 50 mL에 P-starvation시킨 *A. circinalis*를 최종 mL당 1,000 cells이 되도록 접종하였다(APHA, 2012). 배양온도는 25℃의 항온을 유지하였고, 광은 60~80 μmol m^{-2} s^{-1}로써 연속 조사하였으며, 100~110 rpm으로 교반시켰다(Fig. 2) (Claesson and Forsberg, 1978). 배양은 3반복으로 하였고, 접종한 시료는 7일 동안 배양한 후 건조 중량(mg dw L^{-1})으로써 AGP값을 산출하였다(Shin, 1998). 수질 자료의 시공간적인 차이 분석을 위해 ANOVA의 사후분석법(post-hoc Tukey's HSD analysis)을 이용하였으며, 요인별 상관분석은 Spearman's Rank 분석법으로 수행하였다. 자료의 통계처리는 SYSTAT® 8.0 통계프로그램(SPSS, 1998)을 이용하였으며, 유의성은 $p<0.05$로 확인하였다.

결과 및 고찰

1. 하수처리장 방류수의 N·P 영양염 분포

하수처리수에 대한 T-N의 범위와 평균 농도는 각각 940.0~7,170.0 μg N L^{-1}, 3,956.7 μg N L^{-1}이었다(Fig. 3, Table 2). T-N 농도가 시공간적으로 2,000 μg N L^{-1}를 초과한 것은 2014년~2015년 9월에 동일하게 CHC, HWD 및 GYA의 3 곳이었고, 2015년 3월은 전 지점이 해당하였으며, 이때 EAD와 PDD도 각각 2,140.0 μg N L^{-1}, 2,190.0 μg N L^{-1}로써 포함되었다($p<0.01$) (Fig. 3). 그리고 CHC는 3월에 높은 값을 보였으나 HWD와 GYA는 9월에 높았다. CHC가 3월에 높았던 것은 NH_4의 농도가 높았기 때문이었으며($p<0.05$), 이 시기는 갈수기로써 수문학적 유량이 빈약하였다(Hwang *et al*., 2016, 2017). 그리고 HWD와 GYA가 9월에 높았던 것은 NO_3 뿐만 아니라 용존유기질소(DON, dissolved organic nitrogen)의 비율이 컸기 때문이었고($p<0.01$), 몬순기 장마에 의한 영향이 컸던 것으로 볼 수 있었다(Hwang *et al*., 2016). NH_4의 범위와 평균값은 각각 27.4~1,941.5 μg N L^{-1}, 383.6 μg N L^{-1}이었다(Fig. 3, Table 2). 이 중 최고 값은 2015년 3월에 CHC에서 관찰되었고, 2015년 3월에 CHC, HWD와 9월에 CHC를 제외하고 500 μg N L^{-1} 이하를 나타냈다. NH_4는 하수처리장 간에 유의한 차이가 없었다($p>0.05$).

NO_3의 범위와 평균 농도는 각각 400.0~5,630.0 μg N L^{-1}, 2,850.8 μg N L^{-1}이었다(Fig. 3, Table 2). NO_3는 T-N의 양상과 유사하였고($r=0.934$, $p<0.01$), 2,000 μg N L^{-1}를 넘어 선 시기와 지점은 총 8회 관찰되었다. 2013년 9월에 HWD, GYA, 2015년 3월에 CHC, HWD, BUW, GYA 및 9월에 CHC, HWD, GYA가 각각 해당하였다(Fig. 3). NO_2의 범위와 평균값 각각 0.0~200.0 μg N L^{-1}, 89.2 μg N L^{-1}이었고(Fig. 3, Table 2), 시공간적으로 전체가 200 μg N L^{-1} 이하로 분포하였고, 처리장별 공간적인 차이는 유의하지 않았다($p>0.05$). T-N 중 DIN, NH_4, NO_3 및 NO_2가 차지하는 비율은 각각 84.0%, 9.7%, 72.1% 및 2.3%이었고(Table 2), 이를 제외한 유기성 N 성분은 16.0%를 차지하였다.

T-P의 범위와 평균 농도는 각각 31.8~70.9 μg P L^{-1}, 50.8 μg P L^{-1}이었다(Fig. 4, Table 2). CHC는 3월에 비교적 높은 값을 보인 반면에 9월에는 낮았고, 다른 지점(HWD, BUW, GYA)들은 9월에 조금 더 높아 그와 상반되는 경향을 나타냈다. T-P는 T-N ($r=0.516$, $p<0.05$), DIN ($r=0.471$, $p<0.05$)과 양의 상관성을 보였다. SRP의 범위와 평균값은 각각 1.7~50.8 μg P L^{-1}, 20.7 μg P L^{-1}이었다(Fig. 4, Table 2). 처리장별 SRP의 시공간적 증감 변동은 T-P와 관련성이 컸

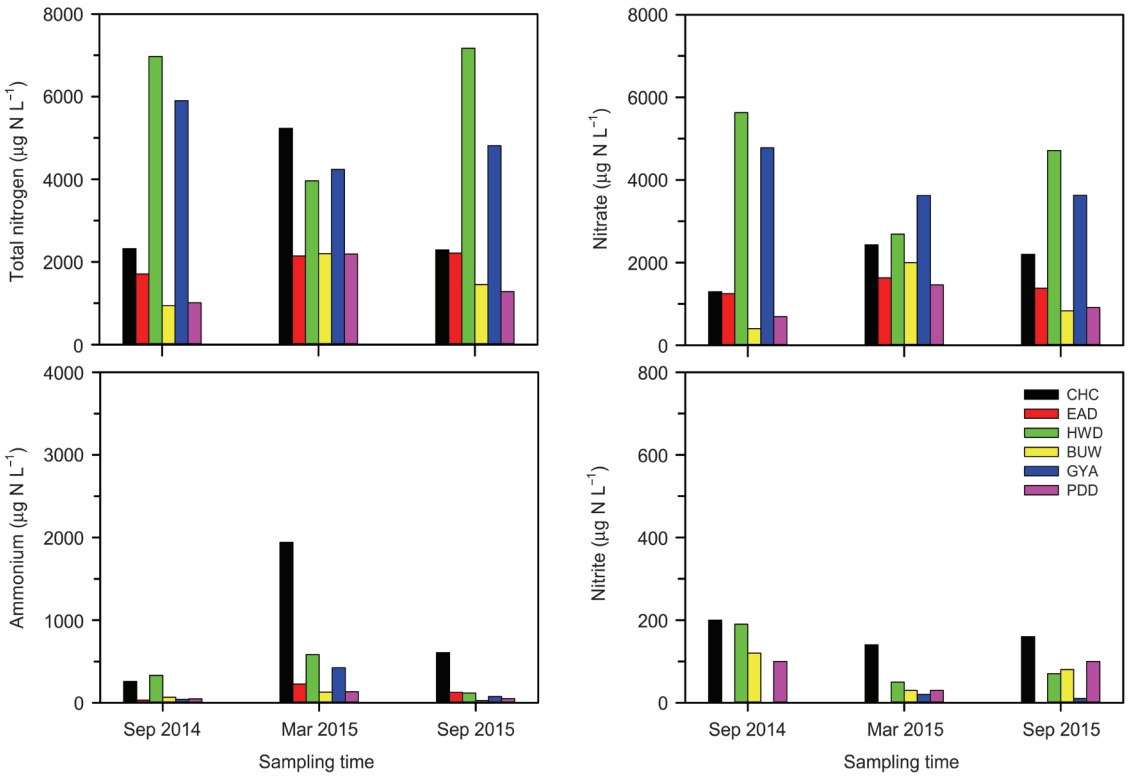

Fig. 3. Spatial and temporal distribution of total nitrogen, Ammonium, nitrate and nitrite concentration contained in treated wastewater effluents inflow into the North-Han River, the Gyeongan Stream and Paldang Reservoir. See Fig. 1 for abbreviations.

고(r=0.953, p<0.01), T-P의 40.8%를 차지하였다. 그리고 하수처리수에서 질소가 높을 때 인 농도가 동시에 높았으나, BUW는 경향을 달리하여 인 농도만 높았다(Fig. 4).

2. 하수처리수의 AGP 측정

남조류 *A. circinalis*를 이용한 하수처리수 생물검정 결과에서, AGP 값의 범위와 평균값은 각각 10.3~22.0 mg dw L^{-1}, 15.4 mg dw L^{-1}이었다(Fig. 5, Table 2). 하수처리수는 시공간적으로 전 지점에서 부영양 수준인 10 mg dw L^{-1} (Sudo, 1980)를 초과하였고, 과영양 상태 >20 mg dw L^{-1} (Miller *et al*., 1974)를 보인 것은 2015년 9월에 HWD에서 유일하였다(Fig. 5). AGP는 T-N (r=0.651, p<0.01), DIN (r=0.604, p<0.01), NO_3 (r=0.546, p<0.05), T-P (r=0.947, p<0.01) 및 SRP (r=0.998, p<0.01)와 양의 상관성을 나타냈다. Wui *et al*. (1991)은 저수지 유역의 하천에서 AGP는 필수 영양염과 높은 관련성이 있었고, 특히 P의 농도에 의해 최대 증식량이 결정된다고 언급하였다. Chl-*a* 농도는 하수처리수에서 <0.5 mg m^{-3}이었으나 댐 지점에서 평균값이 13.3 mg m^{-3}로써 26배 높아 대비되었으며, 계절적으로 3월보다 9월에 13.4 mg m^{-3}로써 더 높았다(Fig. 5). 반면에, 하수처리수의 AGP는 의암호(EAD)와 팔당호(PDD)에 비해 각각 8.9배, 7.8배 정도 높아서(Table 2), 녹조 번성에 대한 주요 영양염의 공급원으로써 기여할 수 있는 잠재력이 확인되었다. Chl-*a*는 N·P 계열 영양염(p<0.05)과 AGP (p<0.01)에 대해 음의 상관성을 보였는데, 이것은 하수처리수에서 영양염 함량이 매우 높은 반면에 Chl-*a*가 낮았기 때문이었고, 고농도의 영양염이 공공수역에 이송 또는 확산될 경우 조류가 직접 이용 가능한 형태의 풍부성으로 인해 생물량 증가로 이어질 수 있는 가능 잠재력이 컸기 때문이었다.

3. N·P 영양염 비옥도와 AGP의 상호 관계

하수처리수와 댐저수지수에서 AGP와 N 계열(T-N, NH_4, NO_3) 및 P 계열(T-P, SRP) 영양염과의 관계를 나타낸 것은 Fig. 6과 같다. AGP의 값이 <5 mg dw L^{-1} 또는 >10 mg dw L^{-1}에서 대별되었는데 댐 원수와 하수처리수의 분포 형태로써 비교되었다. 또한, N 계열은 AGP가 클수록 영양염 농도가 넓게 분산되어 증가하였고(Fig. 6의 (b)), 그 값이 작을수록 상대적으로 협소한 분포(a)를 보였다(r=0.546~0.650, p<0.05). 반면에, P 계열은 AGP가 작을

Table 2. Mean value and range (minimum-maximum) of nutrient water quality on major treated wastewater effluents of wastewater treatment plant (WWTP) located in the North-Han River, the Gyeongan Stream and Paldang Reservoir basin in September 2014, March and September 2015.

Item\WWTP	Chuncheon (CHC)	Euiam dam (EAD)	Hwado (HWD)	Bunwon (BUW)	Gyeongan (GYA)	Paldang dam (PDD)	p
Total nitrogen ($\mu g\,N\,L^{-1}$)	3,280.0 ± 1,688.8^{ab} (2,290.0~5,230.0)	2,020.0 ± 274.4^{a} (1,706.0~2,214.0)	6,033.3 ± 1,798.3^{c} (3,960.0~7,170.0)	1,530.0 ± 633.8^{a} (940.0~2,200.0)	4,983.3 ± 843.5^{bc} (4,240.0~5,900.0)	1,493.3 ± 618.3^{a} (1,010.0~2,190.0)	0.001
Dissolved inorganic nitrogen ($\mu g\,N\,L^{-1}$)	3,075.7 ± 1,384.6^{bc} (1,748.7~4,511.5)	1,546.7 ± 290.1^{a} (1,279.0~1,855.0)	4,790.9 ± 1,417.9^{c} (3,322.6~6,152.4)	1,228.1 ± 825.3^{a} (587.5~2,159.4)	4,199.5 ± 565.3^{c} (3,714.6~4,820.4)	1,173.9 ± 405.7^{ab} (837.4~1,624.4)	0.001
Ammonium ($\mu g\,N\,L^{-1}$)	935.7 ± 888.3^{b} (258.7~1,941.5)	128.0 ± 97.0^{a} (32.0~226.0)	344.3 ± 232.6^{ab} (117.8~582.6)	74.8 ± 51.4^{a} (27.4~129.4)	179.5 ± 211.9^{a} (40.4~423.4)	77.3 ± 49.5^{a} (47.4~134.4)	0.123
Nitrate ($\mu g\,N\,L^{-1}$)	1,973.3 ± 602.9^{a} (1,290.0~2,430.0)	1,418.7 ± 193.9^{a} (1,247.0~1,629.0)	4,343.3 ± 1,503.9^{b} (2,690.0~5,630.0)	1,076.7 ± 828.0^{a} (400.0~2,000.0)	4,010.0 ± 666.9^{b} (3,620.0~4,780.0)	1,020.0 ± 396.6^{a} (690.0~1,460.0)	0.001
Nitrite ($\mu g\,N\,L^{-1}$)	166.7 ± 30.5 (140.0~200.0)	–	103.3 ± 75.7 (50.0~190.0)	76.7 ± 45.1 (30.0~120.0)	10.0 ± 10.0 (0.0~20.0)	76.7 ± 40.4 (30.0~100.0)	0.023
Total phosphorus ($\mu g\,P\,L^{-1}$)	49.0 ± 11.5^{bc} (39.2~61.7)	10.7 ± 4.0^{a} (7.0~15.0)	59.0 ± 12.2^{c} (46.6~70.9)	47.9 ± 16.7^{bc} (31.8~65.2)	47.5 ± 5.3^{bc} (42.6~53.1)	30.0 ± 10.1^{b} (19.9~40.0)	0.002
Soluble reactive phosphorus ($\mu g\,P\,L^{-1}$)	41.3 ± 12.0^{b} (30.6~54.3)	5.3 ± 1.5^{a} (4.0~7.0)	50.8 ± 9.4^{b} (42.4~61.0)	39.1 ± 11.8^{b} (28.6~51.8)	40.0 ± 1.9^{b} (37.9~41.6)	6.7 ± 2.3^{a} (4.5~9.0)	0.000
Chlorophyll-*a* ($mg\,m^{-3}$)	0.6 ± 0.2^{a} (0.4~0.7)	10.2 ± 8.5^{ab} (3.8~19.8)	0.5 ± 0.2^{a} (0.3~0.6)	0.5 ± 0.1^{a} (0.4~0.6)	0.5 ± 0.1^{a} (0.4~0.6)	16.4 ± 10.4^{b} (4.7~24.4)	0.012
Algal growth potential ($mg\,dw\,L^{-1}$)	14.9 ± 4.3^{b} (11.0~19.5)	1.7 ± 0.5^{a} (1.3~2.3)	18.3 ± 3.4^{b} (15.3~22.0)	14.1 ± 4.2^{b} (10.3~18.6)	14.4 ± 0.7^{b} (13.6~15.0)	2.0 ± 1.3^{a} (0.6~3.1)	0.000
T-N/T-P ratio	67.0 ± 18.1^{a} (49.8~84.8)	189.4 ± 85.4^{b} (147.6~305.7)	102.2 ± 16.0^{a} (85.0~116.9)	31.9 ± 27.7^{a} (20.1~69.2)	105.0 ± 18.6^{a} (90.6~126.3)	49.7 ± 44.7^{a} (32.0~110.1)	0.005
DIN/SRP ratio	74.4 ± 13.4^{ab} (57.1~83.1)	290.0 ± 133.4^{c} (215.1~463.8)	94.4 ± 26.9^{ab} (78.4~125.8)	31.4 ± 33.8^{a} (15.9~75.5)	105.1 ± 12.1^{ab} (91.9~115.9)	174.3 ± 138.4^{bc} (117.8~361.0)	0.013

T-N, total nitrogen; T-P, total phosphorus; DIN, dissolved inorganic nitrogen; SRP, soluble reactive phosphorus.

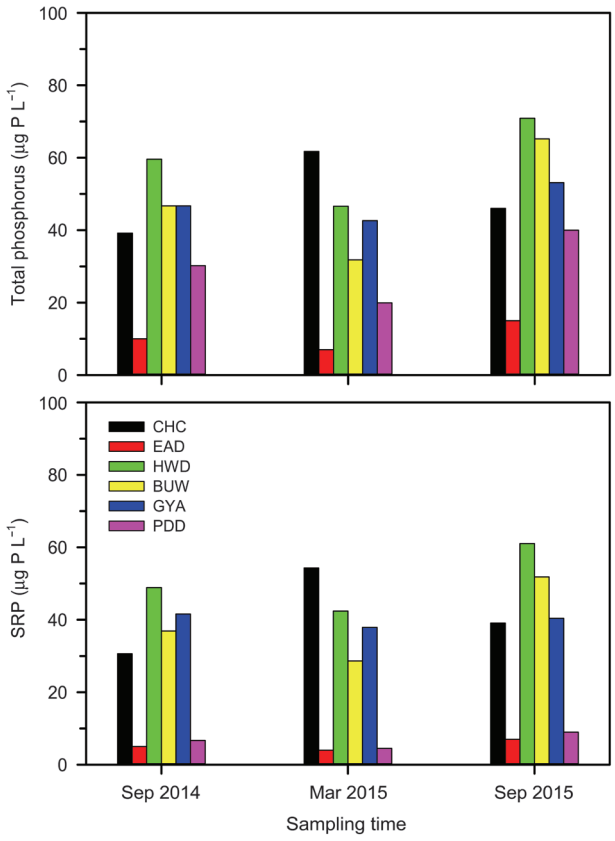

Fig. 4. Spatial and temporal distribution of total phosphorus and soluble reactive phosphorus (SRP) concentration contained in treated wastewater effluents inflow into the North-Han River, the Gyeongan Stream and Paldang Reservoir. See Fig. 1 for abbreviations.

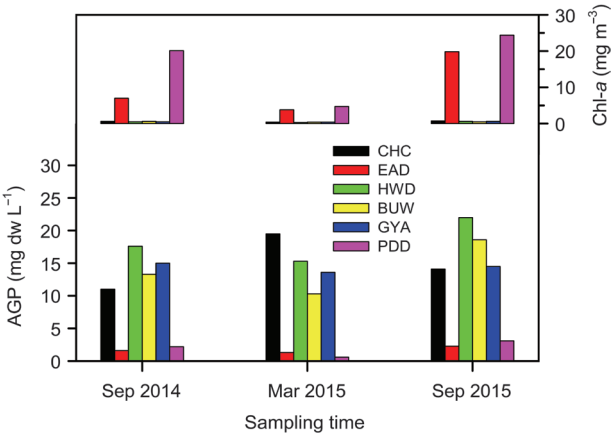

Fig. 5. Spatial and temporal distribution of algal growth potential (AGP) on the treated wastewater effluents inflow into the North-Han River, the Gyeongan Stream and Paldang Reservoir. See Fig. 1 for abbreviations.

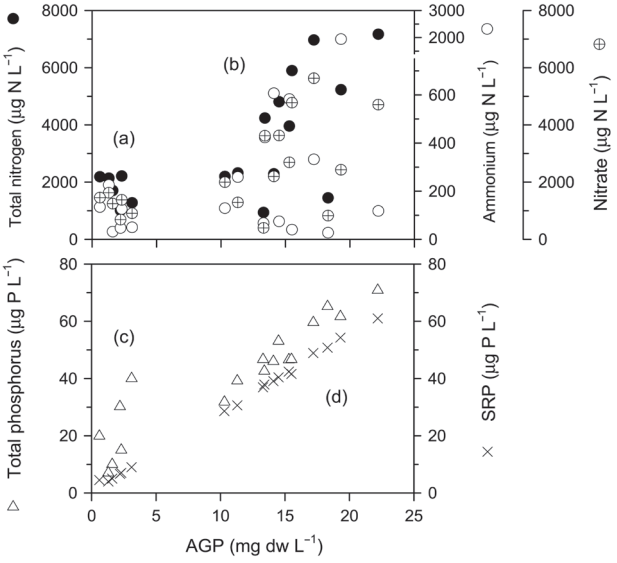

Fig. 6. Relationships between nitrogen, phosphorus components and algal growth potential (AGP) on the treated wastewater effluents inflow into the North-Han River, the Gyeongan Stream and Paldang Reservoir.

수록 T-P의 분포가 넓었고(c), 그 값이 클수록 좁은 범위에서 거의 직선적(r=0.947~0.980, p<0.01)으로 증가하였다(d). N 계열에서 공분산 형태를 보인 것은 N 성분 중 조류가 직접 이용할 수 있는 종이 다양하고(Wetzel, 2001), T-N에서 NH_4와 NO_3가 차지하는 비율을 시공간적으로 달리하기 때문에 이에 대한 영향이 다소 크게 작용하는 것이었으며(Shin *et al*., 2003b), P 계열은 SRP의 단순 흡수이용 및 저장성에 의해 복잡하지 않는 특성이 반영된 것으로 볼 수 있었다(Shin *et al*., 2000). 특히 오염원으로부터 유하거리가 다소 멀리 떨어진 댐 부근에서는 N보다 P가 부족한 상태이었고(Shin *et al*., 2016), 조류증식에 의한 Chl-*a* 농도가 커져 T-P 중 유기인 성분의 함량이 증가됨으로써(Hwang *et al*., 2016, 2017) 그 차이에 의해 분산 정도가 컸던 것으로 사료되어진다. 그리고 하수처리수와 댐저수지수에서 TN/TP 또는 DIN/SRP 비는 각각 17 (Forsberg and Ryding, 1980)과 20 (Porcella and Bishop, 1975)을 상회하여 N보다 P 제한성이 더욱 강함을 시사하였으며(p<0.05), N 결핍은 관찰되지 않았다. 따라서 녹조현상과 연관된 영향을 최소화하기 위해서는 P 유입의 근원인 공급 요인에 관심을 가져야 하겠으며 이에 대한 경감 노력이 더욱 필요하겠다.

4. 하천형 저수지의 부영양화 및 녹조현상에 대한 하수처리수의 영향

의암호와 팔당호는 대하천에 댐을 건설하여 담수 시킨 전형적인 하천형 저수지에 해당한다(Hwang *et al*., 2016,

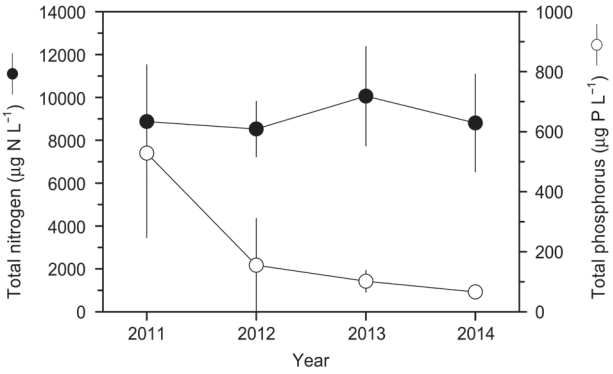

Fig. 7. Yearly mean (±SD) distribution of total nitrogen and total phosphorus concentration contained in treated wastewater effluents inflow into the North-Han River, the Gyeongan Stream and Paldang Reservoir.

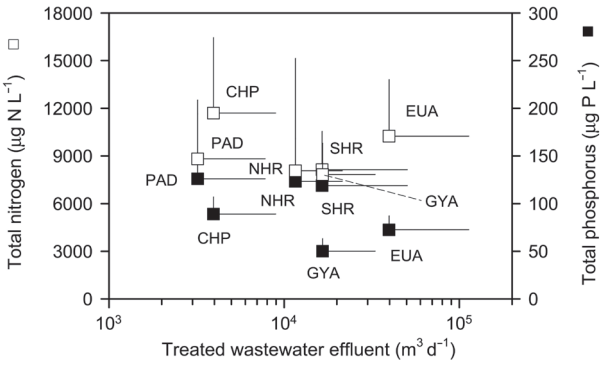

Fig. 8. Comparison of mean total nitrogen and total phosphorus concentration for each water system including 65 treated wastewater effluents in Han River basin from 2011 to 2014. Error bars are standard deviation. SHR, South-Han River (n=27); NHR, North-Han River (n=5); EUA, Euiam Reservoir (n=4); CHP, Cheongpyeong Reservoir (n=7); GYA, Gyeongan Stream (n=11); PAD, Paldang Reservoir (n=11). Data are collected from 'Annual Report of National Wastewater Statistics 2012~2015' published by Ministry of Environment (MOE), Republic of Korea.

2017). 따라서 물 교환율이 상대적으로 빠르므로 부영양화와 녹조현상의 수질은 크게 문제되지 않을 것이라고 담수 초기부터 예측하였으나, 국내외 기존 연구 결과에서 기술된 이러한 가설적 내용은 의암호와 팔당호에서 의미를 크게 둘 수가 없었다. 그 이유는 조류에 의한 수질 악화 또는 그 영향이 날로 심각할 뿐만 아니라 발생 원인을 판단하는 데도 명확하지 않았기 때문이다(Byun *et al*., 2015).

1991년~2016년 동안에 우리나라 전국을 대상으로 AGP 선행연구를 정리한 결과 총 65개(소하천 19개, 강 20개, 저수지 23개(농업용 1개) 및 하수 3개) 지역에서 수행되었다(Appendix 2). 소하천, 강, 저수지 및 하수의 AGP 평균값(범위)은 각각 97.7 mg dw L^{-1} (0.3~462.5), 118.8 mg dw L^{-1} (2.0~849.0), 18.9 mg dw L^{-1} (0.6~138.4) (농업용 2.8 mg dw L^{-1}) 및 369.1 mg dw L^{-1} (57.0~977.9)이었다. 그 결과를 시스템별로 비교할 때, 하수처리수>강>소하천>저수지 순으로 감소되는 경향이 뚜렷하였으며, 이를 통해 오염원으로부터 공공수역에 미치는 부영양화 경로와 조류성장 가능수역을 짐작할 수 있었다. 그리고 수역별로 AGP 분포의 공간적 특성을 살펴보면 다음과 같이 요약될 수 있었다. 하수는 미처리한 원수와 처리수에서 차이가 있었는데(Appendix 2), 이것은 분뇨 합병처리 전 · 후에서 비롯되는 결과이었으며(Shin *et al*., 2001), 처리수에서 P의 농도가 더 높아 AGP가 컸었다. 강과 소하천은 오염원으로부터 공간적 거리가 멀어질수록 AGP가 감소하는 반면에 Chl-*a*는 큰 폭으로 증가하는 결과를 나타내었다(Shin, 1998; Shin and Cho, 1999, 2000b; Seo *et al*., 2003; Shin *et al*., 2003c; Shin and Hwang, 2003). 이와 달리 저수지는 상류부나 하수방류지점에 가까울수록 AGP와 Chl-*a*가 동시에 높아지는 양상이었으며(Shin *et al*., 2003b; Hwang *et al*., 2016, 2017), 이것은 수체의 구조적(예, 수심형태) 또는 비구조적(예, 수문요인) 특성에 따른 물의 유동성이 제한되기 때문이었다(Hwang *et al*., 2016, 2017; Shin *et al*., 2016).

2011년~2014년에 본 연구 대상 하수처리장 방류수에서 T-N과 T-P 농도의 연 변동을 나타낸 것은 Fig. 7과 같다. T-N의 범위는 5,982.0~12,355.0 μg N L^{-1}이었고, 평균값은 9,064.9 μg N L^{-1}로써 이를 기준으로 소폭 증감을 반복하였으나 연도별 차이는 크지 않았다. 다른 해에 비해 2013년에 15.1% 정도 높았으나 큰 차이는 아니었으며, 2012년에는 하수처리장별 평균 농도가 낮았을 뿐만 아니라 편차도 작았다. 반면에, T-P의 범위는 40.0~800.0 μg P L^{-1}, 평균값은 212.9 μg P L^{-1}로써 연도별 변동 폭이 매우 컸다(Fig. 7). 평균값으로 볼 때, 2011년~2012년 사이에 큰 폭으로 떨어졌고, 이후 2014년까지 완만하게 감소하였다. 이와 같이 T-P가 급감한 것은 하수처리장에서 현재 적용하고 있는 총인 고도처리에 의한 결과로써 70.7% 감소하였고, 2011년과 2014년을 비교할 때 87.5%가 경감되었다. 따라서 2012년 이전에는 T-N과 T-P가 동일하게 고농도로 높은 값을 유지하였으나 그 이후에는 T-P만 급감하는 형태로 변화되었다.

한강 수계(충주댐, 의암댐-팔당댐 구간, 90.6×10^4 m^3 d^{-1})에서 수역(의암호(15.9×10^4 m^3 d^{-1}), 청평호(2.8×10^4 m^3 d^{-1}), 북한강(5.8×10^4 m^3 d^{-1}), 남한강(44.5×10^4 m^3 d^{-1}), 경안천(18.2×10^4 m^3 d^{-1}) 및 팔당호(3.5×10^4 m^3 d^{-1}))을 구분하여 65개 하수처리장의 방류량과 T-N 및 T-P 관계를 비교한 것은 Fig. 8과 같다. T-N은 청평호(CHP)와 의암호(EUA)

에서 평균값이 10,000 μg N L^{-1} 이상을 나타냈고, 그 외는 8,000 μg N L^{-1}를 초과하여 매우 풍부함을 알 수 있었다. 또한, T-P는 남한강(SHR), 북한강(NHR) 및 팔당호(PAD) 수역에 배출되는 하수처리수에서 100 μg P L^{-1}을 초과하여 비교적 높은 수준이었고, 경안천(GYA) 수역에 배출되는 처리장은 <50 μg P L^{-1}로써 낮은 값을 보였다. 이상의 결과에서 과거에 비해 P는 격감된 상태로 볼 수 있었으나, N은 여전히 높은 수준을 유지하고 있어(Jeong *et al*., 2014) 육수학적 측면에서 이를 비교하는 중간 평가가 있어야 할 것으로 사료된다.

하천형 저수지에 속하는 의암호와 팔당호는 하수처리수의 양과 질적인 영향에 매우 취약성을 가지고 있었으며, 이로 인해 부영양화는 불가피한 실정으로 볼 수 있었다(Hwang *et al*., 2016, 2017). 그 예로써, 고농도의 영양염을 방류하는 수역은 평소 집중 관찰되지 않고 있어 오염도와 실태를 파악하는 데 소홀함이 많았을 뿐만 아니라 녹조현상의 전개 양상을 판단하기에 매우 부족하였다. 따라서 매번 문제 발생 후 대응 또는 응급 조치하려는 실행력은 반복 또는 답습해야 하는 어려움이 상존하는 상태로 남게 되었던 것이다. 본 연구결과에서 제시하는 바와 같이, 하천과 저수지(예, 의암호 및 팔당호) 유역의 주요 오염원 중 하수처리수는 수질 영양학적 영향력을 연중 가세할 수 있는 잠재력을 충분히 지니고 있으므로(Wang and Wang, 2009; Hwang *et al*., 2016, 2017), 이에 대한 특단의 대책이 필요할 것으로 보여지며, 특히 총인처리의 효과에서 볼 수 있듯이 P가 조류발생에 결정적 원인이 된다면 상수원에 직접 방류되는 하수처리수 만큼은 P-free 수준까지 도달시키는 정책적 제안을 하고자 한다.

적 요

국내에서 의암호와 팔당호는 하수처리수(90.6×10^4 m^3 d^{-1})를 통해 부영양화, 녹조현상 및 이취미의 수질문제를 빈번하게 겪고 있는 대표적인 수역이었으나, 이에 대한 생물학적 검정은 전무하였다. 본 연구는 2014년 9월, 2015년 3월 및 9월에 의암호와 팔당호에 유입되는 4개 하수처리수의 수질 비옥도를 파악하기 위해 조류성장잠재력을 테스트하였다. 시험조류는 현장에서 직접 분리 배양한 남조류 *Anabaena circinalis*를 이용하였다. 하수처리수에서 T-N과 T-P의 평균 농도는 각각 3,956.7 μg N L^{-1}, 50.8 μg P L^{-1}이었고, 이 중에서 NO_3와 PO_4의 비율은 각각 72.1%, 40.8%를 차지하였다. 하수처리수에서 N과 P 농도가 동시에 높았으나, N이 더욱 풍부하여 P 제한성이 강하였다. AGP의 평균값은 15.4 mg dw L^{-1}로써 전체 하수처리수에서 부영양 또는 과영양 수준이었고, 특히 PO_4의 양에 의해 최대 조류성장잠재력이 결정되었다($r = 0.998$, $p < 0.01$). 과거(2012년 이전)에 비해 P 농도가 매우 격감되었는데 그 이유는 최근 들어 하수를 총인처리하기 때문이었다. 그러나 여전히 하수처리수에서 P 농도가 높아서 상수원의 부영양화와 녹조현상을 야기하는 데 의심할 여지가 없었다. 따라서 P가 조류발생에 결정적 원인이라고 한다면, 상수원에 직접 방류되는 하수처리수를 P-free 수준까지 실행하는 정책과정이 필요한 것으로 본다.

사 사

본 연구는 환경부 한강수계관리위원회의 환경기초조사사업(과제명: 한강수계 호소환경 및 생태조사)에 의해 지원 되었음.

REFERENCES

Abeja-Pineda, O., E. Lopez-Lopez, L. Favari and J.E. Sedeno-Diaz. 2015. Algal growth potential and oxidative stress in *Ankistrodesmus falcatus* exposed to waters from Xochimilco Lake system, Mexico. *Aquatic Ecosystem Health and Management* **18**: 221-231.

APHA · AWWA · WEF (APHA). 2012. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22th ed. American Public Health Association, Washington DC., USA. 1496p.

Bolier, G. 1985. Algal growth potential test: An indicative method to estimate the influence of water quality changes on the algal; biomass. *Water Science and Technology* **17**: 1403-1405.

Byun, J.H., S.J. Hwang, B.H. Kim, J.R. Park, J.K. Lee and B.J. Lim. 2015. Relationship between a dense population of cyanobacteria and odorous compounds in the North Han River systems in 2014 and 2015. *Korean Journal of Ecology and Environment* **48**: 263-271. (in Korean)

Cassidy, K.O. 2011. Evaluating Algal Growth at Different Temperature. M.S. Thesis, Graduate Faculty of the University of Kentucky. USA. 47p.

Chang, I.H., Y. Joung, S.I. Choi and T.S. Ahn. 2011. Microalgal growth and nutrient removal in a lake, a stream and the outlet of a wastewater treatment system. *Korean Journal of Limnology* **44**: 129-135. (in Korean)

Chung, P.G., M.J. Kim and J.S. Kim. 1996. Identification of algal growth limiting nutrient in Sumjin River of Korea by algal growth potential spike test. *Urban and Environmental Research, Jeonbuk National University* **11**: 1-13.

Claesson, A. and A. Forsberg. 1978. Algal assay procedure with one or five species, Minitest. *Mitteilungen der Internatinalen Vereinigung für Limnologie* **21**: 21-30.

Couillard, D. and J.F. Li. 1993. Assessment of manure-application effects upon the runoff water quality by algal assays and chemical analyses. *Environmental Pollution* **80**: 273-279.

Edmondson, W.T. and J.T. Lehman. 1981. The effect of changes in the nutrient income on the condition of Lake Washington. *Limnology and Oceanography* **26**: 1-29.

Faafeng, B.A., E. van Donk and S.T. Kallqvist. 1994. In situ measurement of algal growth potential in aquatic ecosystems by immobilized algae. *Journal of Applied Phycology* **6**: 301-308.

Forsberg, C. and S.O. Ryding. 1980. Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 Swedish waste-receiving lakes. *Archiv für Hydrobiologie* **89**: 189-207.

Forsberg, C., S.O. Ryding and A. Claesson. 1975. Recovery of polluted lakes: A Swedish research program on the effects of advanced waste water treatment and sewage diversion. *Water Research* **9**: 51-59.

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. *Mitteilungen der Internatinalen Vereinigung für Limnologie* **21**: 356-363.

Gakstatter, J.H., M.O. Allum, S.E. Domingguez and M.R. Crouse. 1978. A Survey of phosphorus and nitrogen levels in treated municipal wastewater. *Journal of Water Pollution Control Federation* **50**: 718-722.

Goldman, C.R. 1978. The use of natural phytoplankton populations in bioassay. *Mitteilungen der Internatinalen Vereinigung für Limnologie* **21**: 364-371.

Greene, J.C., W.E. Miller, T. Shiroyama and T.E. 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. *In*: Proceedings of the Symposium on Terrestrial and Aquatic Ecological Studies of the Northwest. EWSC Press, Eastern Washington State College, Cheney WA, USA. pp. 327-336.

Han River Environment Office (HREO). 2007. Water Environmental Management Plan for Mid-basin Area of Paldang Dam. 201p. (in Korean)

Hwang, S.J., B.G. Choi, K. Kim, C. Park, W. Seo, M.H. Park, Y.B. Sim, H.R. Noh and J.K. Shin. 2017. Rainfall and hydrological comparative analysis of water quality variability in Euiam Reservoir, North-Han River, Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **50**: 29-45. (in Korean)

Hwang, S.J., K. Kim, C. Park, W. Seo, B.G. Choi, H.S. Eum, M.H. Park, H.R. Noh, Y.B. Sim and J.K. Shin. 2016. Hydro-meteorological effects on water quality variability in Paldang Reservoir, confluent area of the South-Han River-North-Han River-Gyeongan Stream, Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **49**: 354-374. (in Korean)

Hwang, S.J., K.A. You and J.K. Shin. 2006. Comparison of algal growth potentials in the large reservoirs and river mainstream of Naktong River watershed. *Korean Journal of Limnology* **39**: 138-144. (in Korean)

Jeong, B., Y. Shin, M. Jang and S. Kim. 2008. Nutrient limitation of phytoplankton in the Dongbok Lake: Analyses of long-term data and bioassay experiments. *Korean Journal of Limnology* **41**: 412-421. (in Korean)

Jeong, D., Y. Cho, I. Choi, K. Ahn, H. Chung and O. Kwon. 2014. A study on impact of public sewage treatment works affecting water qualities of the Lake Uiam in Chuncheon city. *Journal of Environmental Impact Assessment* **23**: 406-416. (in Korean)

Joo, H.S., I.S. Wui and M.R. Chung. 1994. A study on algal growth potential in Kwangju stream. *Korean Journal of Environmental Biology* **12**: 125-136. (in Korean)

Joo, H.S., J. Kim, J.C. Park, W.S. Chung, W.K. Lee and W.B. Lee. 2000. Biological evaluation of water quality by AGP in Lake Jinyang. *Journal of Environmental Research Institute, Yosu National University* **3**: 63-71. (in Korean)

Joo, J.C., C.H. Ahn, S. Lee, D.G. Jang, W.H. Lee and B.R. Ryu. 2016. Algal growth potential of *Microcystis aeruginosa* from reclaimed water. *Water Environment Research* **88**: 54-62.

Jung, M.L. 1991. A Study of Algal Growth Potential in Kwangju Stream. M.S. Thesis, Graduate School of Chonnam National University. 54p.

Kalff, J. 2002. Limnology: Inland Water Ecosystems. Prentice-Hall, Inc., New Jersey, USA. 592p.

Kim, B., J.H. Park, B.J. Lim, W.M. Heo, G. Hwang, K. Choi and K.S. Chae. 1997. The limnological survey of major reservoirs in Korea (1): Lake Okjong. *Korean Journal of Limnology* **30**: 431-453. (in Korean)

Kim, H.E. 2002. Algal Growth Potential and Nutrient Limitation in Namhan River System of Korea. M.S. Thesis, Graduate School of Kyung Hee University. 37p.

Kim, J.H., C.M. Choi, W.I. Kim, J.S. Lee, G.B. Jung, J.D. Shin, J.S. Sung, J.T. Lee and S.G. Yun. 2007. Application of microalgae for managing agricultural water quality. *Korean Journal of Environmental agriculture* **26**: 7-16. (in Korean)

Kim, J.M. 1995. A study on the character of water quality according to the flux in Pal-dang Reservoir. *Korean Journal of Sanitation* **10**: 12-24. (in Korean)

Kim, M.K., B. Moon, T.K. Kim and K.D. Zoh. 2015. A study on production and removal of microcystin, taste and odor compounds from algal bloom in the water treatment processes. *The Korean Journal of Public Health* **52**: 33-42. (in

Korean)

Kim, M.K., J.K. Shin and H.K. Ji. 2005. Probe of algal growth potential (AGP) by physio-biochemical analysis of micro-algal in the stagnant watershed. *Algae* **20**: 127-132. (in Korean)

Klapwijk, S.P., G. Bolier and J.van der Does. 1989. The application of algal growth potential tests (AGP) to the canals and lakes of western Netherlands. *Hydrobiologia* **188/189**: 189-199.

Korea Rural Community Corporation (KRC). 2009. Propriety Evaluation Study on the Phosphorus Removal Technique in the Eutrophic Reservoir by Algae. Report No. 11-B552149-000004-01. Ansan, Korea. 284p. (in Korean)

Korea Water Resources Corporation (K-water). 1997. A Study on the Aquatic Ecosystem Change of Dam Reservoir (3rd year). Daejeon, Korea. pp. 196-235. (in Korean)

Korea Water Resources Corporation (K-water). 2007. A Study on the Development Mechanisms and Reduction Technology of Water-Bloom in the River-Reservoir System. Interim Report No. KIWE-WERC-2007-03. Daejeon, Korea. 101p. (in Korean)

Kotai, J., T. Krogh and O.M. Skulberg. 1978. The fertility of some Norwegian inland waters assayed by algal cultures. *Mitteilungen der Internatinalen Vereinigung für Limnologie* **21**: 413-436.

Kviderova, J. and J. Elster. 2013. Standardized algal growth potential and/or algal primary production rates of maritime Antarctic stream waters (King George Island, South Shetlands). Polar Research **32**: 1-17.

Kwon, K.Y., C.H. Kim, C.K. Kang, C.H. Moon, M.O. Park and S.R. Yang. 2002. Limiting nutrients for phytoplankton growth in the Seomjin River estuary as determined by algal bioassay experiment. *Journal of Korean Fisheries Society* **35**: 455-462. (in Korean)

Kwon, Y.H. 2004. Study on Evaluation of Water Quality in Midstream and Downstream Nakdong River by Algal Growth Potential (AGP). MS thesis, Graduate School of Keimyung University. 46p.

Kwon, Y.H., J.K. Seo, S.W. Park and S.Y. Yang. 2006. Evaluation of diatom growth potential in midstream and downstream Nakdong River. *Algae* **21**: 229-234. (in Korean)

Lee, S.A. 2003. Water Quality Assessment by Algal Growth Potential (AGP) Bioassays in the Yeongil Bay. M.S. Thesis, Gtaduate School of Inje University. 142p.

Lehmusluoto, P.O. 1978. Some aspects on the classification of natural waters by algal assays (AGP), prelude. *Mitteilungen der Internatinalen Vereinigung für Limnologie* **21**: 437-440.

Lhotsky, O. and P. Marvan. 1988. A standardized method of algal assay. *Mitteilungen der Internatinalen Vereinigung für Limnologie* **23**: 957-959.

Long, L.T. 2010. Nutrient Limitation of Phytoplankton Growth through Enrichment Bioassay in the Nakdong River. M.S. Thesis, Gtaduate School of Inje University. 57p.

Lopez-Lopez, E. and L. Davalos. 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.

Lukavsky, J. 1992. The evaluation of algal growth potential (AGP) and toxicity of water by miniaturized growth bioassay. *Water Research* **10**: 1409-1413.

Lukavsky, J., J. Simmer and S. Kubin. 1979. Methods for algal growth evaluation. *In*: Algal Assays and Monitoring Eutrophication (Marvan, P., S. Pribil and O. Lhotsky, eds.). E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, Germany. pp. 77-85.

Maloney, T.E., W.E. Miller and N.L. Blind. 1973. Use of algal assays in studying eutrophication problems. *In*: Proceedings: Advances in Water Pollution Research 6th International Conference. Pergamon Press, Oxford, UK and New York, USA. pp. 205-214.

Maqsood, S.A. 1974. Determination of Algal Growth Potential in Natural Environment. M.S. Thesis, The Graduate Faculty of Texas Tech University. USA. 48p.

Miller, W.E. and T.E. Maloney. 1971. Effects of secondary and tertiary wastewater effluents on algal growth in a lake-river system. *Journal of Water Pollution Control Federation* **43**: 2361-2365.

Miller, W.E., J.C. Greene and T. Shiroyama. 1978. The *Selenastrum capricornutum* Printz Algal Assay Bottle Test- Experimental Design, Application, and Data Interpretation Protocol. Report No. EPA-600/9-78-018, U.S. Environmental Protection Agency. Oregon, USA. 126p.

Miller, W.E., J.C. Greene, T. Shiroyama and E. Merwin. 1975. The use of algal assays to determine effects of waste discharge in the Spokane River system. *In*: Proceedings for Biostimulation and Nutrient Assessment Workshop. U.S. Environmental Protection Agency, EPA 660/3-75-034. Oregon, USA. pp. 113-130.

Miller, W.E., T.E. Maloney and J.C. Greene. 1974. Algal productivity in 49 lake waters as determined by algal assays. *Water Research* **8**: 667-679.

Ministry of Environment (MOE). 2015. Annual Report of National Wastewater Statistics 2014. Seoul, Korea. (in Korean)

Ministry of Environment (MOE). 2016. 2016 White Paper of Environment. Sejong, Korea. 591p.

Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). 2012. National List Book of Rivers, Korea, 2011. KGE 11-1611492-000088-01. Seoul, Korea. 767p. (in Korean)

Obispo, S.L. 2014. Optimization of Growth Parameters for Algal Regrowth Potential Experiments. M.S. Thesis, The Graduate Faculty of Califonia Polytechnic State University. USA. 66p.

Oh, H.M., S.J. Lee, S.B. Kim, M.K. Park, B.D. Yoon and D.H. Kim. 1998. Determination of limiting nutrient for algal growth by algal bioassay. *Korean Journal of Limnology*

31: 150-157. (in Korean)

Ok, Y.J. 2007. Studies on Algal Growth Limiting Nutrient in Some Reservoirs in Ulsan in Summer. M.S. Thesis, Graduate School of Industry, Pukyong National University. 32p.

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 1982. Eutrophication of Waters. Monitoring, Assessment and Control. Paris, France. 154p.

Paerl, H.W. 1988. Nuisance phytoplankton blooms in coastal, estuarine, and inland waters. *Limnology and Oceanography* **33**: 823-847.

Park, H.K., M.H. Lee and J.K. Ryu. 1992. Identification of algal growth limiting nutrient in some artificial lakes of Korea by algal growth potential spike test. *Journal of Korean Society of Water Pollution Research and Control* **8**: 159-166. (in Korean)

Park, J.Y. 2000. A Study on Water Quality, Distribution of Phytoplankton Community and Algal Growth Potential in Buan Lake Basin. M.S. Thesis, Graduate School Environmental Studies, Chonbuk National University. 84p.

Park, M.H., B.J. Lim, W.B. Seo, C.H. Park, K.H. Kim and S.J. Hwang. 2015. Akinete germination and algal growth potential test of cyanobacterium *Anabaena circinalis* on different waters in Lake Paldang. *Korean Journal of Ecology and Environment* **48**: 287-295. (in Korean)

Park, M.H., S.J. Hwang, M.Y. Suh, Y.J. Kim and B.K. Kim. 2007. Evaluation of water quality after rehabilitation of Cheonggye Stream using AGP test. *Korean Journal of Limnology* **40**: 234-243. (in Korean)

Porcella, D.B. and A.B. Bishop. 1975. Comprehensive Management of Phosphorus Water Pollution. Ann. Arbor. Science, Ann. Arbor. Mich. USA. 303p.

Raschke, R.L. and D.A. Schultz. 1987. The use of the algal growth potential test for data assessment. *Journal of Water Pollution Control Federation* **59**: 222-227.

Rump, H.H. and H. Krist. 1988. Laboratory Manual for the Examination of Water, Wastewater and Soil. VCH Verlagsgesellschaft, Publication, New York, USA. 190p.

Schindler, D.W. 1974. Eutrophication and recovery in experimental lakes: Implications for lake management. *Science, New Series* **184**: 897-899.

Schultz, D.A., R.L. Raschke and R. Jones. 1994. A shortened algal growth potential test. *Environmental Monitoring and Assessment* **32**: 201-205.

Seo, J.K., J.J. Lee, S.Y. Yang and I.K. Chung. 2003. Effect of the sewage and wastewater plant effluent on the algal growth potential in the Nakdong River basin. *Algae* **18**: 157-167. (in Korean)

Shin, J.-K. 1998. Eutrophication and Ecological Characteristics of Algal Population in the Freshwater Zone of the Naktong River, Korea. Ph.D. Science Thesis, The Graduate School of Inje University. Busan, Korea. 202p.

Shin, J.K. and K.J. Cho. 1999. Water quality assessment by algal growth potential (AGP) in the Naktong River. *Korean Journal of Limnology* **32**: 349-357. (in Korean)

Shin, J.K. and K.J. Cho. 2000a. The impact on water quality from blue-green algae *Microcystis* of natural phytoplankton by algal assay. *Journal of the Korean Environmental Science Society* **9**: 267-273. (in Korean)

Shin, J.K. and K.J. Cho. 2000b. Water quality assessment by algal growth potential (AGP) from midstream to downstream of the Kum River. *Korean Journal of Limnology* **33**: 244-250. (in Korean)

Shin, J.K. and K.J. Cho. 2001. The contents of nitrogen, phosphorus, silicon nutrient and algal growth potential (AGP) in the sediment of Taechong Reservoir. *Korean Journal of Limnology* **34**: 106-118. (in Korean)

Shin, J.K. and S.J. Hwang. 2003. Algal growth potential test (AGPT) in the stream-reservoir system of the Pyeongtaek Reservoir watershed, Korea. *Korean Journal of Limnology* **36**: 172-180. (in Korean)

Shin, J.K., B.G. Kang and S.J. Hwang. 2016. Water-blooms (Green-tide) dynamics of algae alert system and rainfall-hydrological effects in Daecheong Reservoir, Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **49**: 153-175. (in Korean)

Shin, J.K., C.K. Kang and S.J. Hwang. 2003a. Daily variations of water turbidity and particle distribution of high turbid-water in Paltang Reservoir, Korea. *Korean Journal of Limnology* **36**: 257-268. (in Korean)

Shin, J.K., D.S. Kim, H.K. Lee, S.J. Maeng and S.J. Hwang. 2003b. An evaluation of aquatic environment in the Okchon Stream-embayment watershed, Korea. *Korean Journal of Limnology* **36**: 181-190. (in Korean)

Shin, J.K., J.L. Cho, S.J. Hwang and K.J. Cho. 2000. Eutrophication and water pollution characteristics of the Kyongan Stream to Paltang Reservoir. *Korean Journal of Limnology* **33**: 387-394. (in Korean)

Shin, J.K., O.H. Lee and K.J. Cho. 2003c. Application of algal growth potential test (AGPT) on the water quality of the Chinyang Reservoir and the Nam River. *Korean Journal of Limnology* **36**: 57-65. (in Korean)

Shin, J.K., O.H. Lee, S.J. Hwang and K.J. Cho. 2001. Algal bioassay for the treated and raw wastewater in the Kyongan Stream. *Korean Journal of Limnology* **34**: 192-198. (in Korean)

Shin, J.K., S.J. Hwang, C.K. Kang and H.S. Kim. 2003d. Limnological characteristics of the river-type Paltang Reservoir, Korea: Hydrological and environmental factors. *Korean Journal of Limnology* **36**: 242-256. (in Korean)

Shin, J.K., S.J. Hwang, D.S. Kim and C.K. Kang. 2003e. Comparison of the fertility of stream waters depending on the drainage systems in the Lake Shihwa watershed, Korea. *Korean Journal of Limnology* **36**: 381-388. (in Korean)

Shoaf, W.T. 1978. Use of algal assays to determine the potential for phytoplankton growth. *Hydrological Sciences Bulletin*

23: 439-444.

Smith, E.D., R.M. Sweazy, G.A. Whetstone and R.H. Ramsey. 1979. A study of the reuse of reused water. *Ground Water* **17**: 366-374.

SPSS. 1998. SYSTAT® 8.0 Statistics. SPSS Inc. Chigaco, USA. 1,086p.

Stauber, J.L. 1995. Toxicity testing using marine and freshwater unicellular algae. *Australasian Journal of Ecotoxicology* **1**: 15-24.

Sudo, R. 1980. Studies on the water-blooms in Lake Kasumigaura. *Japan Journal of Limnology* **41**: 124-131. (in Japanes, abstract in English)

Thornton, K.W., B.L. Kimmel and F.E. Payne. 1990. Reservoir Limnology: Ecological Perspectives. A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc. New York, USA. 256p.

U.S. Environmental Protection Agency (USEPA). 1971. Algal Assay Procedure: Bottle Test. National Eutrophication Research Program, Corvallis EPA1972-795-146/1, Region 10. Washington, USA. 82p.

Wang, H. and H. Wang. 2009. Mitigation of lake eutrophication: Loosen nitrogen control and focus on phosphorus abatement. *Progress in Natural Science* **19**: 1445-1451.

Wang, W. 1982. An Algal Assay Technique for Aquatic Toxicants. Report of Investigation 101 State of Illinois, Illinois Department of Energy and Natural Resources. ISWS/RI-101/82. Illinois, USA.

Wang, W.C., W.T. Sullivan and R.L. Evans. 1973. A Technique for Evaluating Algal Growth Potential in Illinois Surface Waters. Report of Investigation 72 State of Illinois, Department of Registration and Education. ISWS/RI-72. Illinois, USA. 16p.

Watanabe, M. 1996. Isolation, cultivation and classification of bloom-forming Microcystis in Japan. *In*: Toxic Microcystis (Watanabe M.F., K. Harada, W.W. Carmichael and H. Fujiki, eds.). CRC Press, Boca Raton, London, U.K. pp. 13-34.

Wetzel, R.G. 2001. Limnology: Lake and River Ecosystems. 3rd Edition. Academic Press, California, USA. 1006p.

Wilander, A. and G. Persson. 2001. Recovery from eutrophication: Experiences of reduced phosphorus input to the four largest lakes of Sweden. *Ambio* **30**: 475-485.

Wui, I.S., C.B. Lee and H.S. Joo. 1991. A study on the test of algal growth potential in Chuam and Isa-chun dam. *Korean Journal of Environmental Biology* **9**: 104-112. (in Korean)

Appendix 1. Correlation coefficient between water quality factors tested by Spearman's Rank Correlation. Statistical values were computed among mean of six stations (CHC, HWD, BUW, GYA, EAD and PDD).

Variables	T-N	DIN	NH_4	NO_3	NO_2	T-P	SRP	CHL	AGP	TNP	DNP
T-N	1.000	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
DIN	.961**	1.00	·	·	·	·	·	·	·	·	·
NH_4	.467	.519*	1.000	·	·	·	·	·	·	·	·
NO_3	.934**	.977**	.447	1.000	·	·	·	·	·	·	·
NO_2	−.161	−.172	.318	−.324	1.000	·	·	·	·	·	·
T-P	.516*	.471*	.050	.426	.066	1.000	·	·	·	·	·
SRP	.653**	.600**	.195	.544*	.054	.953**	1.000	·	·	·	·
CHL	−.545*	−.581*	−.422	−.543*	.236	−.559*	−.675**	1.000	·	·	·
AGP	.651**	.604**	.197	.546*	.054	.947**	.998**	−.677**	1.000	·	·
TNP	.426	.449	.092	.501*	−.442	−.348	−.226	.069	−.216	1.000	·
DNP	−.018	.046	−.067	.108	−.229	−.569*	−.558*	.518*	−.556*	.742**	1.000

*$p<0.05$, **$p<0.01$. T-N, total nitrogen; NH_4, ammonium; NO_3, nitrate; NO_2, nitrite; T-P, total phosphorus; SRP, soluble reactive phosphorus; CHL, chlorophyll-*a*; AGP, algal growth potential; TNP, total nitrogen/total phosphorus ratio; DNP, dissolved inorganic nitrogen/phosphorus ratio.

Appendix 2. Comparison of water fertility by algal growth potential (AGP) test on various samples of streams, rivers, reservoirs and wastewater distributed in the four large rivers basin, Korea from 1991 to 2016.

Sample localities	AGP (mg dw L^{-1})	Limiting nutrient	Test algae	Pre-treatment method	References or remarks
Streams and Rivers (n = 39)					(19 streams, 20 rivers)
Gyeongan Stream	37.9	P	SEC	A	Park *et al.* (1992)
Gwangju Stream	0.3~317.9	P	SEC	F	Joo *et al.* (1994)
	0.4~339.5	P	SEC	A	Joo *et al.* (1994)
Gap Stream	262.3	P	MIA	F	Shin and Cho (2000b)
Seokseong Stream	275.4	P	MIA	F	Shin and Cho (2000b)
Miho Stream	50.3	P	MIA	F	Shin and Cho (2000b)
Nonsan Stream	23.9	P	MIA	F	Shin and Cho (2000b)
Seohwa Stream	0.0~16.7	P	MIA	F	Shin *et al.* (2003b)
Geumchon Stream	0.0~7.4	P	MIA	F	Shin *et al.* (2003b)
	2.3	P	COR, OSA	F	Kim *et al.* (2005)
Geumgu Stream	0.0~25.6	P	MIA	F	Shin *et al.* (2003b)
Okcheon Stream	0.0~195.7	P	MIA	F	Shin *et al.* (2003b)
	91.3	P	COR, OSA	F	Kim *et al.* (2005)
Hwangguji Stream	143.9~462.5	P	MIA	F	Shin and Hwang (2003)
Osan-Jinwi Streams	2.4~74.7	P	MIA	F	Shin and Hwang (2003)
Seojeong Stream	135.4~188.4	P	MIA	F	Shin and Hwang (2003)
Anseong Stream	18.6~27.1	P	MIA	F	Shin and Hwang (2003)
Seonghwan Stream	16.0~108.1	P	MIA	F	Shin and Hwang (2003)
Shihwa Reservoir basin	0.0~145.0	P	MIA	F	Shin *et al.* (2003e)
North-Han River	13.7	P	SEC	A	Park *et al.* (1992)
South-Han River	12.0	P	SEC	A	Park *et al.* (1992)
	11.6~56.7	P	SEC	A	Kim (2002)
Seomjin River	4.0~8.0	P	SEC	A	Chung *et al.* (1996)
Nakdong River	6.3~271.3	P	SEC	F	Shin and Cho (1999)
	0.0~640.6	P	MIA	F	Shin and Cho (1999)
	20.5~72.6	P	ANF	F	Seo *et al.* (2003)
	4.0~24.6	P	STE	F	Kwon (2004); Kwon *et al.* (2006)
	3.4~23.1	P	MIA	F	Hwang *et al.* (2006)
Geumho River	148.4~302.9	P	SEC	F	Shin and Cho (1999)
	275.3~849.0	P	MIA	F	Shin and Cho (1999)
	66.5~103.7	P	ANF	F	Seo *et al.* (2003)
	57.0~179.4	P	STE	F	Kwon (2004); Kwon *et al.* (2006)
Seonakdong River	6.3~192.4	P	SEC	F	Shin and Cho (1999)
	5.6~434.3	P	MIA	F	Shin and Cho (1999)
	129.1	P	ANF	F	Seo *et al.* (2003)
Geum River	< 2.0~75.2	P	MIA	F	Shin and Cho (2000b)
Nam River	0.0~252.0	P	MIA	F	Shin *et al.* (2003c)
	3.8~12.2	P	ANF	F	Seo *et al.* (2003)
Miryang River	24.9	P	ANF	F	Seo *et al.* (2003)
Reservoirs (n = 23)					
Juam Reservoir	< 10	P	SEC	F	Wui *et al.* (1991)
Sangsa Reservoir	< 10	P	SEC	F	Wui *et al.* (1991)
Chungju Reservoir	3.7	P	SEC	A	Park *et al.* (1992)
Daecheong Reservoir	32.0	P	SEC	A	Park *et al.* (1992)
	−	P or EDTA	MIA	F	K-water (1997)
	11.25	P (N or TE)	MIA	F	Oh *et al.* (1998)
Daecheong Reservoir (sediment porewater)	2.6~82.4	P	MIA	F	Shin and Cho (2001)
Soyang Reservoir	14.7	P	SEC	A	Park *et al.* (1992)
Okjeong Reservoir	−	N	SEC	F	Kim *et al.* (1997)
Buan Reservoir	8.1~24.3	P	ANF	A	Park (2000)
Daeam Reservoir	15.3~41.4	P	ANF	A	Ok (2007)
Daegok Reservoir	11.8~31.6	P	ANF	A	Ok (2007)

Appendix 2. Continued.

Sample localities	AGP (mg dw L^{-1})	Limiting nutrient	Test algae	Pre-treatment method	References or remarks
Hoiya Reservoir	16.9∼41.9	P	ANF	A	Ok (2007)
Sayeon Reservoir	23.1∼25.4	P	ANF	A	Ok (2007)
Jinyang Reservoir	0.0∼10.0	P	SEC	F	Joo *et al*. (2000)
	0.0∼28.8	P	SEC	A	Joo *et al*. (2000)
	0.6∼2.0	P	MIA	F	Shin *et al*. (2003c)
Pyeongtaek Reservoir	0.0∼138.4	P	MIA	F	Shin and Hwang (2003)
Andong, Hapcheon, Jinyang Reservoirs	0.0∼2.3	P	MIA	F	Hwang *et al*. (2006)
Nakdong Estuarine Reservoir	1.9∼18.1	P	MIA	F	Hwang *et al*. (2006)
Sangseong Reservoir (agricultural water)	2.7∼2.9	P	SEC	F	KRC (2009)
Wastewater (n = 3)					
Untreated wastewater	453.9	P or N	MIA	F	Shin *et al*. (2001)
Treated wastewater	214.7∼977.9	P or N	MIA	F	Shin *et al*. (2001)
Treated wastewater (reclaimed water, pilot)	57.0	P	MIA	F	Joo *et al*. (2016)

P, phosphorus; N, nitrogen; TE, trace element; ANF, *Anabaena flos-aquae*; CHV, *Chlorella vulgaris*; COR, *Coelastrum reticulatum*; MIA, *Microcystis aeruginosa*; OSA, *Oscillatoria agardhii*; SEC, *Selenastrum capricornutum* and STE, *Stephnodiscus* sp.; A, autoclaving; F, filtration.