

총 설

하수처리시설의 T-N 방류수 수질기준 강화방안에 관한 연구

김지태*

경기대학교 환경에너지공학과 · 하 · 폐수고도처리기술개발사업단

A Study on Strengthening Option of T-N Effluent Water Quality Standards of Sewage Treatment Plants

Ji Tae Kim*

Department of Environmental & Energy Engineering, Kyonggi University ·

R&D Center for Advanced Technology of Wastewater Treatment and Reuse

(Received 1 September 2017, Revised 23 November 2017, Accepted 27 November 2017)

Abstract

Over the past 40 years, the public sector has continued to invest in the sewage treatment plants (STPs) in Korea. Currently, the domestic sewage treatment rate is over 90% with the enhancement of operating efficiency of the STPs, and water quality of major rivers has been continuously improved. However, COD and T-N indicators are stagnating or slightly worsening, and though advanced treatment facilities are installed in most of the STPs, there is a limit to the removal of nutrients. Since there are a lot of water pollution sources in the vicinity of the watershed because of high population density in Korea, it is essential to reduce the inflow of the nutrients in order to prevent the eutrophication of the rivers and lakes. While the effluent T-P standard in STPs has greatly strengthened since 2012, which results in the considerable investment for the improvement of treatment process in STPs for the last few years, it is necessary to strengthen the T-N standards, as the effluent standard of T-N has been maintained at 20 mg/L since 2002. In this study, based on the analysis of the effluent T-N standard status of major industrialized countries, and the domestic nitrogen load in public waters, the option of appropriate T-N standard level is reviewed, and the required investment costs and the effect of strengthening the standard are estimated.

Key words : Effluent Standards of Sewage Treatment Plants, Nutrient removal, Standard Enforcement, Total Nitrogen, Treatment Technology

1. Introduction

1970년대 이후 급격한 산업화와 도시화가 진행되고 수질 오염물질 발생이 급증함에 따라 하·폐수를 적정히 처리하기 위하여 처리시설이 도시와 공단지역을 중심으로 집중 건설되었으며 현재는 생활계·산업계 등 점오염원에서 발생하는 대부분의 하·폐수가 처리시설에서 법령에서 규정된 허용기준 이하로 처리되어 공공수역으로 배출된다. 처리시설의 방류수 수질기준은 그간 점진적으로 강화되어 종래 BOD로 대표되는 유기물질 위주의 관리에서 1990년 중반 이후부터는 질소, 인 등 영양물질 기준을 추가로 설정하여 관리하고 있으며, 이에 따라 고도처리시설도 크게 확충되었다. 하수처리시설의 방류수 수질기준의 경우 영양물질 중

총인 처리기준은 최고 0.2 mg/L로 크게 강화되었으나 총질소 기준은 2002년 이후 20 mg/L로 설정되어 있으며, 더욱이 동질기에는 이를 충족하기 어려운 경우도 있다. 그간 하·폐수처리장의 총질소 기준을 강화해야 한다는 필요성에 대해서는 전문가들의 다양한 의견 제시와 상당한 논의가 있었으나 학술적으로 강화 대안을 제시한 바가 없는 것으로 파악된다. 이러한 여건을 감안하여 본고에서는 하·폐수 처리시설 방류수의 총질소 기준에 대한 적정성과 강화 방안, 그리고 기준 강화시의 소요 투자금액과 환경적 효과에 대해 고찰하고자 한다.

2. Material and Methods

우선 국내의 방류수 수질기준 중 총질소 및 총인 기준에 대해 환경부 통계자료 및 연구보고서를 조사·비교하고 수질오염 지표별로 주요 하천의 수질변화 추세를 분석하는 한편, 하수처리시설에서 배출되는 질소성분의 공공수역에의 기여 분을 조사하여 이를 토대로 총질소 기준의 강화 대안을 제시하고자 한다. 하수처리장 방류수의 총질소 배출 기

* To whom correspondence should be addressed.

jtkim221@kgu.ac.kr

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, provided the original work is properly cited.

준을 강화하는데 따른 효과를 분석하기 위해서는 수계별 오염원과 오염농도, 유역별 수량 변화 등을 통합적으로 고려하여 수질예측 모델링과 같은 과학적 통계 분석 방법을 통해 접근하는 것이 바람직하나, 질소 총수지를 토대로도 총질소 기준 강화의 효과에 경향을 도출할 수 있어 여기서는 후자의 방법으로 효과를 분석하였다. 수질오염도와 하수처리장 운영과 관련된 통계자료는 현실적으로 정부 자료를 인용할 수 밖에 없어 이를 토대로 질소 부하를 추정하였다. 산업폐수나 축산분뇨 처리시설의 경우 공식적으로 질소 처리통계가 없어 하수처리시설을 기준으로 질소 부하를 추정하였다.

물환경정보시스템의 하천의 수질 및 조류자료를 토대로 남조류 발생과 이에 영향을 미치는 수질항목과의 관계를 파악하기 위해 상관 분석을 실시하였다(Table 11). 물환경정보시스템의 4대강 수질자료와 조류현황 자료를 활용하여 녹조발생의 기준 지표로 활용되는 남조류(Blue-green algae)와 11개 수질항목과의 상관분석을 하였으며, Minitab Inc.사의 MINITAP Release 14.20 버전을 이용하였다. 분석대상 지점은 4대강 중하류의 대표지점으로 한강유역 한남대교지점(보강지점), 낙동강유역은 강정고령보지점(다사지점), 금강유역은 공주보지점(곰나루지점), 영산강유역은 죽산보지점(죽산지점) 등 4개 지점이며 2010년 1월 부터 2017년 9월까지 자료를 토대로 남조류가 발생되어 측정된 월의 세포수(cells/ml)와 해당 월의 수질농도를 적용하였다. 이 분석 방법에서 상관분석으로 도출되는 R-value는 두 인자(세포수와 수질 농도)간의 연관 정도를 나타내는 지표로서 절대값이 1에 가까울수록 인자 간의 영향이 높은 것이다. 각 R-value에 해당하는 P-value는 통계적 분석함에 대한 유의성을 나타내는 유의계수로서 본 분석에서는 신뢰구간 95%를 기준으로 적용하였다. 따라서 P-value의 값이 0.05보다 적은 경우에 그에 해당하는 R-value 값의 유의성이 있다고 판단하는 기준이 된다.

또한, 기준 강화 시의 환경적 효과와 처리시설 개량을 위한 적정 기술을 살펴보고 국내 A공법사의 내부 설계 자료를 토대로 하수처리시설의 보강을 위한 투자 소요액을 추정하여 정책적인 실현 가능성을 분석하고자 한다.

3. Results and Discussion

3.1 국내 하·폐수 처리현황

환경부의 통계에 따르면 국내 하수처리장은 2014년 말 기준으로 Table 1과 같이 3,757개소가 운영 중이며 처리용량은 24,999천m³/d, 유입 하수량은 19,457천m³/d(시설용량 500 m³/d 이상 시설대상)이다. 산업폐수는 2014년 말 기준으로 50,965개의 배출업소에서 5,089천m³/d이 배출되고 있으며 처리방식은 하수처리시설 유입처리가 33%, 위탁처리 및 직접방류가 49%, 전량 재이용 14%, 폐수종말처리장 유입 처리 4% 등으로 처리되고 있다(ME, 2016b).

경제규모가 확대되고 소득 수준이 향상되면서 오염물질 배출특성이 변화되고 각종 화학용품, 의약품 등의 사용 증가로 하·폐수 원수의 성상이 악성화 되고 있어 처리시설의 배출허용기준도 오염 영향과 기술적 제거 가능성을 고려하여 지속적으로 강화될 필요가 있으며(Jeong et al., 2014; Yu et al., 2013), 수자원 부족에 대응하여 방류수의 재이용 필요성이 높아짐에 따라 재이용 용도에 적합하게 처리될 수 있도록 방류수 수질기준의 항목 확대와 강화가 요구되고 있다. 하·폐수 처리 시스템은 기본적으로 유기물질 처리가 안정화되면 질소, 인 등 영양물질에 대한 최적 처리를 중요시하게 되며 고도처리 공정은 이러한 영양물질 제거를 주목적으로 한다. 우리나라도 중규모 이상 처리장에는 고도처리 공정을 대부분 도입하였으며 도입된 처리장 555개소의 처리 공법은 SBR, A₂O, 담체적용 공정 순으로 구성되어 있다(Table 2). 고도처리 공정은 하수 재이용이 활성화되고 청정 수질에 대한 요구가 높아지면서 생물학적 고도처리 공법인 SBR, A₂O 공법에 막 분리나 고도산화처리, 오존처리, 여과처리 등 물리화학적 처리공정을 조합한 시스템으로 발전되고 있다(Kim et al., 2011).

하수처리시설의 방류수는 법적 기준 이하로 배출되더라도 방류수역에 비하여 높은 영양염류 함량을 지니고 있어 수용 하천 및 호소의 영양 상태를 높이고 있으므로 적절한 관리가 요구된다(Um et al., 2011). 하수처리시설에의 유입 부하는 Table 3과 같으며, 총인에 비해 총질소의 제거율이 낮고 유출 부하량도 상대적으로 높은 것으로 나타나고 있다. 이는 2010년 이후 총인 방류수기준의 강화 추세에 비

Table 1. Status of Domestic Sewage Treatment Plant (STPs)

Item	2006	2008	2010	2012	2014
Number of STPs	344 (1,681)	403 (1,991)	470 (2,594)	546 (3,067)	597 (3,160)
Treatment Rate (%)	85.5	88.6	90.1	91.6	92.5
Treatment Capacity (1,000 m ³ /d)	23,273	24,568	25,118	25,297	24,999

※ () : The number of STP under 500 m³/d capacity

Table 2. Status of Advanced Treatment Technology Applied STPs

Item	Total	SBR line	A ₂ O line	Carrier	Membrane	Special Microbe	etc.
Number of Site	555	203	135	131	48	21	17
Rate (%)	100	36.8	25.5	23.6	8.6	3.8	3.1

Table 3. Status of Nutrient Treatment in STPs

Parameters	Quality of inflow (mg/L)	Quality of Discharge (mg/L)	Removal Rate (%)	Load of inflow (ton/yr)	Load of effluent (ton/yr)
T-N	37.9	11.43	69.8	286,691	79,743
T-P	4.1	0.55	86.6	31,048	3,315

해 총질소 기준은 크게 강화되지 않은 요인도 있으나, 근본적으로는 총질소 저감을 위해서는 기존 시설과 기술로는 처리에 한계가 있어 기준 강화 시 이를 충족시킬 수 있는 안정적인 처리기술과 통합적인 시설 개량이 요구되기 때문이다.

2.2 국내 하수처리시설의 총질소 및 총인 기준 현황

하수처리시설의 방류수 기준에 총질소 항목은 1996년에 60 mg/L로 설정된 이후 2002년에 20 mg/L으로 강화되어 현재는 50 m³/d 이상의 시설은 모두 20 mg/L을 적용하고 있으며, 50 m³/d 미만의 시설에 대하여는 40 mg/L을 적용하고 있다(Table 4). 동절기에는 질소 처리효율이 떨어지는 점을 고려하여 500 m³/d 미만의 시설에 대하여 2014년 말까지는 60 mg/L으로 유예하였다가 2015년부터 유예를 폐지하였다. 총인 기준은 1996년 8 mg/L에서 2002년에 2~4 mg/L로, 2012년부터 0.2~4mg/L로 강화하였다. 즉 2002년 이후 총질소 기준은 크게 변하지 않은 반면 총인 기준은 최고 10배까지 강화되었다(Yu et al., 2013).

산업폐수의 경우 수질 및 수생태 보전에 관한 법령에 기

준이 설정되어 있으며 폐수종말처리시설의 경우 총질소 기준이 하수처리시설 수준까지 강화되어 20 mg/L로 설정되었고, 직접 방류하는 폐수처리시설의 경우는 30~60 mg/L로 전반적으로 총인 방류수 기준의 강화 추세에 비해 느슨한 편이다(Table 5).

2.3 외국의 총질소 방류수기준

선진국의 하폐수 처리시설의 방류수 수질기준은 우리나라와 규제 방법과 기준의 측정 및 적용방식이 상이하여 동일한 잣대로 비교하기 어려우나 국립환경과학원의 연구 자료를 토대로 비교하고자 한다(NIER, 2013).

미국의 경우 각 주별로 연방정부 환경처(EPA)의 가이드라인을 참고하여 항목 및 기준치를 설정하고 있다. 민감지역의 경우는 Table 6과 같이 최고 1 mg/L까지 설정한 경우도 있으며 평균적으로 10~20 mg/L 수준으로 평가된다. 우리나라와 같이 공공수역 주변에 오염원이 밀집되어 있고 하천수를 상수원수로 이용하는 한편 계절별 수량 변동 폭이 큰 경우는 미국 기준으로 본다면 수질 민감 지역으로 볼 수 있다. EPA에서는 10대 필요기술 중 두 번째로 영양염류 제거와 회수를 선정했으며, 총질소를 3 mg/L까지 강화하려는 계획을 갖고 있다(Martin, 2013).

Table 4. Effluent Criteria of T-N and T-P in STPs

(Unit : mg/L)

Category	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)
STPs over 500 m ³ /d capacity	I area	Below 20
	II area	20
	III area	20
	IV area	20
500 m ³ ~ 50 m ³	20	2
Under 50 m ³	40	4

Table 5. Effluent Criteria of T-N and T-P in Industrial WWTP

(Unit : mg/L)

Item	Effluent criteria*	
	Integrated WWTP	Individual WWTP
T-N	20	30~60
T-P	0.2~2	0.2~2

* Different levels of criteria are applied in 4 steps according to area

Table 6. T-N/T-P Effluent Regional Standard for WWTP⁴⁾ in US

(Unit : mg/L)

Area	T-N	T-P	
Chesapeake Bay Tributaries Maryland	8	2	
Puget Sound Budd Inlet, Washington	4 ¹⁾		
Flolida, AWP ²⁾	3	1	
Pad Dam, MWD ³⁾ , San Diego	1 (winter 10)	0.1 (1 winter)	
Hookers Point WWTP, Flolida	3	7.5	T-N (annual average)
Landia sewerage Authority WWTP, New Jersey	0.5 (NH ₄ -N) 10 (NO ₃ -N)		monthly average

- 1) Total Inorganic Nitrogen
- 2) Advanced Wastewater Treatment
- 3) Municipal Waster Discharge
- 4) Waste Water Treatment Plant

Table 7. T-N/T-P Planning Effluent Standard for WWTP in Tokyo

(Unit : mg/L)

Region	BOD	T-N	T-P
Pollution Prevention Ordinance of Tokyo	15	20	1
Planning Effluent Water Quality (Ariake)	12	18	1
Planning Effluent Water Quality (Ukima)	12	10	1
Planning Effluent Water Quality (Higasiogu, Ochiai etc.)	13	-	-

Table 8. T-N/T-P Effluent Standard for WWTP in EU

Country	Capacity of WWTP (P.E)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)
EU,	10,000 ~ 100,000	15	2
England,	over 100,000	10	1
France	Removal rate	70 ~ 80 %	80 %
Germany	over 10,000	18	1 ~ 2

일본은 우리와 유사하게 하수도법령에 방류수 수질기준이 설정되어 있고 이와 별도로 공공하수 관리자가 BOD, T-N, T-P 오염도에 대해 계획방류수질을 정할 수 있으며 처리공법(공정)에 따라 10~20 mg/L 이하로 설정하고 있다. 동경도에서 정한 주요 지역의 계획방류수질은 Table 7과 같이 18~20 mg/L 수준이며 동경도 공해방지조례상 신설 처리장의 T-N 기준은 20 mg/L, T-P 기준은 1 mg/L로 우리 기준과 유사하다.

유럽의 경우 유럽연합(EU)에서 제정한 도시폐수처리 지침에서 방류수 수질기준을 10~15 mg/L로 제시하고 있으며 각 국가별로 별도로 기준을 정한다. 독일의 경우 폐수방류법(Wastewater Charge Act)에서 처리용량에 따라 차등적으로 기준을 설정하고 있으며 총질소 기준은 5,000 m³/d 이상 시설에 대해 10 mg/L로 설정하고 있다. 영국, 프랑스의

경우도 용량에 따라 10~15 mg/L로 설정하고 있다(Table 8).

이상의 사례를 종합하면 선진국들은 총질소 기준은 전반적으로 Table 9와 같이 최고 1 mg/L에서 20 mg/L 범위에서 설정하고 있다.

2.4 우리나라 총 질소 물질수지 현황

국립환경과학원의 2012년 연구 결과에 따르면 우리나라 전체적으로 질소성분의 토양(농업지역) 유입량은 838,909 ton/yr이고, 이중 공공수역으로 배출되는 양은 498,915 ton/yr으로 비점오염원 중 농업지역에서 254,284 ton/yr, 도시지역에서 26,275 ton/yr, 임야지역에서 87,081 ton/yr이 각각 배출되고 하수처리시설 방류수에서 131,275 ton/yr가 유출되는 것으로 나타났다. 공공수역으로 배출되는 총질소 유출량 중 하수처리장 방류수 기여분은 유출량의 26%에 달한다(Fig. 1).

환경부의 하수도통계에 따르면 하수처리시설에서의 총질소 유입부하는 286,691 ton/yr, 유출부하는 79,743 ton/yr으로 상기 질소수지 분석 연구결과와는 다소 차이가 있으며 이는 부하 산정 방식이 상이한데 따른 것으로 보인다.(ME, 2015) 산업폐수의 경우 발생량은 5,089 천m³/d, 방류량은

Table 9. T-N Effluent Standard for WWTP in each Countries

Parameter	U.S	Japan	Germany	EU	Korea
T-N (mg/L)	1 ~ 18	10 ~ 30	18	10 ~ 15	20

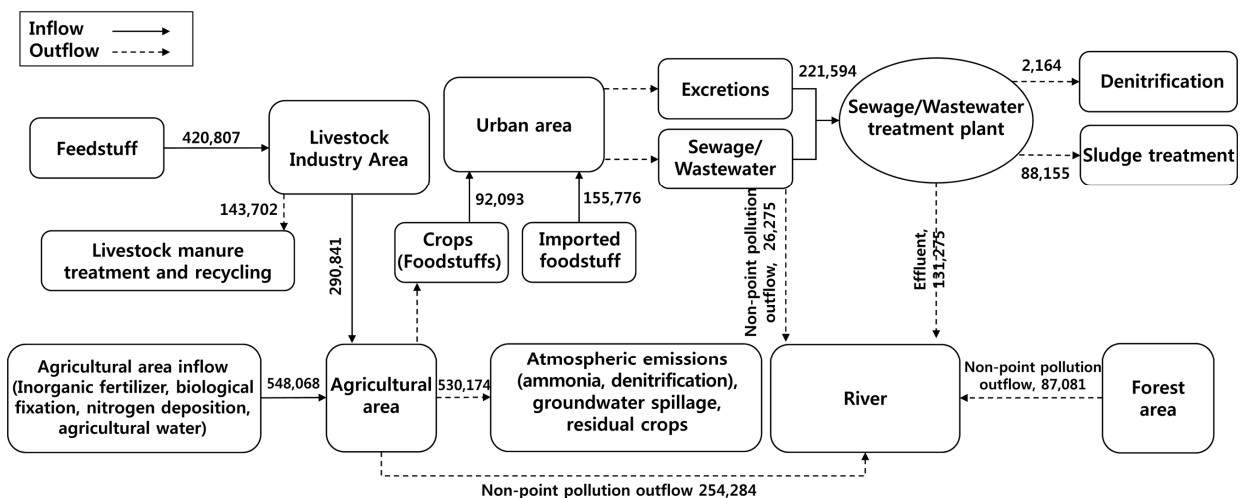


Fig. 1. Analysis of T-N Income and expenditure.

Unit : ton/yr

Table 10. T-N Effluent Load from Industrial WWTPs

(Unit : mg/L)

Item	Amount	Reference
Discharge amount of industrial WW	3,790,000 m ³ /d	
Direct treatment amount (except treatment by STPs and reuse)	2,490,000 m ³ /d	
T-N inflow load of industrial WW	72,530 ton/yr	12.7% × 2 of T-N inflow load of sewage (286,691 ton/yr)
T-N effluent load of industrial WW	21,760 ton/yr	treatment rate : 70 %

3,790 천m³/d이며 방류량중 하수처리시설 연계처리 및 재이용량 등을 제외한 직접처리 방류량과 위탁처리량은 2,490 천m³/d이다(ME, 2016a). 질소유입부하를 하수의 2배, 질소처리율을 70%로 가정하면 산업폐수처리시설로부터의 질소방류부하는 21,760 ton/yr로 추정되고 하수처리시설 방류부하와 합하면 총 질소부하량은 101,503 ton/yr에 달한다(ME, 2011). 여기에는 축산분뇨 처리시설, 소규모 하수처리시설 등의 유출부하는 정확히 고려되지 않은 것으로 실제 하수보다 질소부하가 큰 점으로 고려하면 총부하량은 이보다 증가할 것이다(Table 10).

2.5 국내 공공수역의 수질변화

국내 주요 하천의 수질변화 추이를 보면 유기물질의 오

염도 저감 추세가 뚜렷한 반면, 난분해성물질, 영양물질의 오염도는 큰 변화 없이 정체하고 있음을 알 수 있다(ME, 2016a). 즉, 그간 유기물질 제거에 중점을 두고 하·폐수처리시설 및 하수관거를 지속적으로 확충·정비함으로써 BOD 저감에는 큰 효과를 거둔 반면 난분해성물질이나 영양물질 저감에는 상대적으로 효과가 적었음을 나타낸다. Fig. 2에서 보듯이 주요 하천의 BOD는 지속적으로 저감된 반면, COD는 정체되거나 다소 증가하고 있다(Fig. 3). 영양물질의 경우 주요 하천의 T-P 농도(Fig. 4)는 2014년을 기점으로 소폭 개선되는 추세를 보이는 반면, Fig. 5와 Fig. 6에서 같이 호소수의 T-N과 T-P 농도는 2006년 이후 정체되어 있으며 T-N/T-P 농도비의 변화를 보면 Fig. 7와 같이 4대강 유역에서 지속적으로 증가하고 있음을 알 수 있다 (ME, 2014).

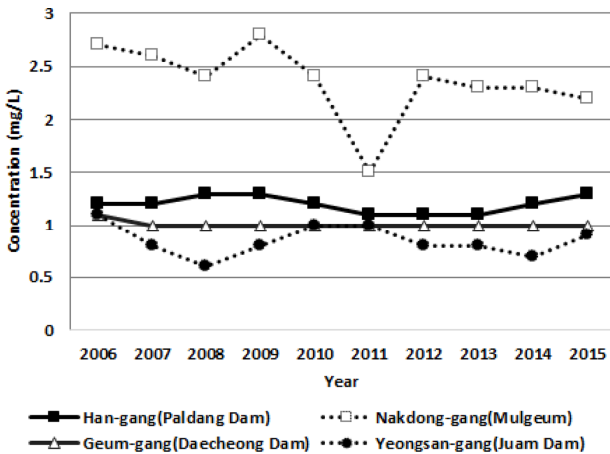


Fig. 2. Trend of BOD in 4 major rivers.

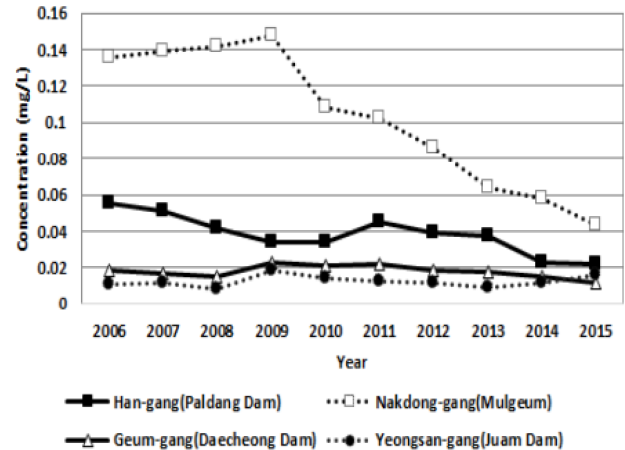


Fig. 4. Trend of T-P in 4 major rivers.

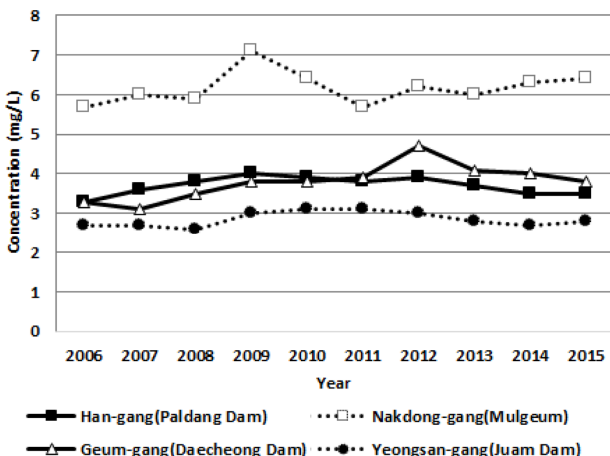


Fig. 3. Trend of COD in 4 major rivers.

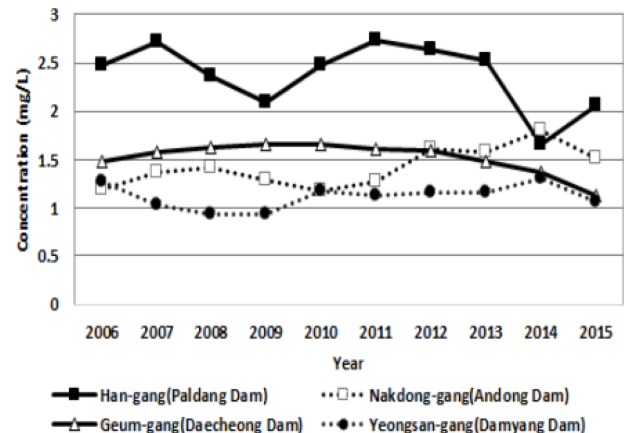


Fig. 5. Trend of T-N in lake water.

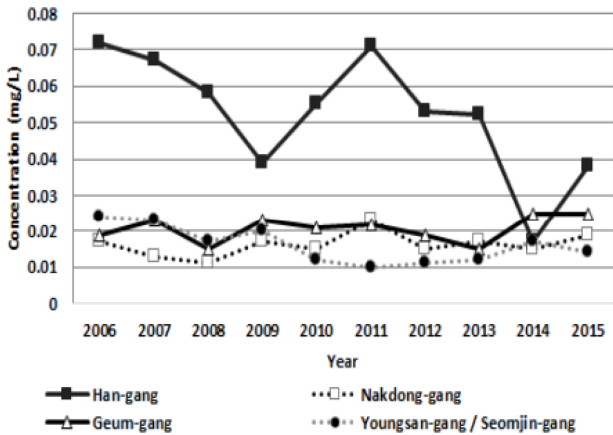


Fig. 6. Trend of T-N in lake water.

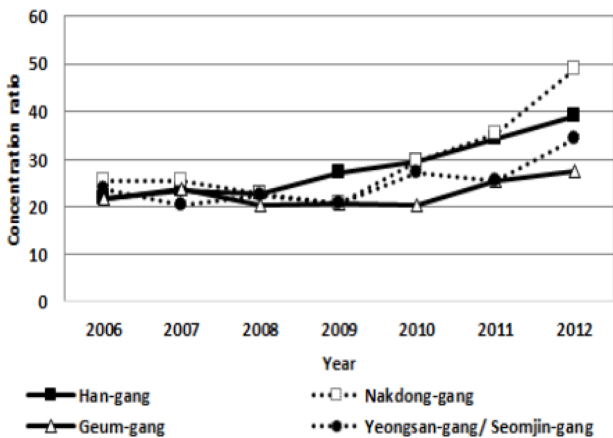


Fig. 7. Trend of T-N/T-P ratio in 4 major rivers.

Table 11. Correlation Analysis Using Water Quality Data of 4 Major Rivers

Para-meters	value	BOD	DO	COD	T-N	NO ₃ -N	NH ₃ -N	T-P	PO ₄ -P	Temp.	pH	Chl-a
DO	R	0.036										
	P	0.668										
COD	R	0.798	-0.133									
	P	0.000	0.111									
T-N	R	0.256	0.111	0.131								
	P	0.002	0.185	0.117								
NO ₃ -N	R	-0.111	0.198	-0.199	0.794							
	P	0.184	0.017	0.016	0.000							
NH ₃ -N	R	0.383	-0.108	0.294	0.766	0.277						
	P	0.000	0.195	0.000	0.000	0.001						
T-P	R	0.251	-0.236	0.277	0.435	0.259	0.425					
	P	0.002	0.004	0.001	0.000	0.002	0.000					
PO ₄ -P	R	0.071	-0.301	0.05	0.488	0.35	0.472	0.849				
	P	0.395	0.000	0.547	0.000	0.000	0.000	0.000				
Temp.	R	0.153	-0.669	0.269	-0.318	-0.357	-0.136	0.282	0.182			
	P	0.065	0.000	0.001	0.000	0.000	0.102	0.001	0.029			
pH	R	-0.059	0.295	-0.074	-0.328	-0.116	-0.481	-0.318	-0.399	-0.039		
	P	0.479	0.000	0.375	0.000	0.165	0.000	0.000	0.000	0.64		
Chl-a	R	0.662	0.295	0.557	0.07	-0.068	0.017	0.056	-0.157	0.114	0.23	
	P	0.000	0.000	0.000	0.404	0.415	0.841	0.502	0.06	0.172	0.005	
blue-green algae	R	0.068	-0.328	0.203	-0.228	-0.298	-0.05	-0.034	-0.021	0.23	-0.054	-0.092
	P	0.415	0.000	0.014	0.006	0.000	0.553	0.688	0.806	0.005	0.523	0.269

MINITAP (Release 14.20버전)을 이용한 남조류 발생에 관한 상관분석 결과 남조류 발생과 용존산소(DO)는 P-value가 0.001 이하로 유의성이 높았으며, 음(-)의 값을 보여 남조류의 발생으로 DO 값이 감소됨을 확인할 수 있었다. 수온의 경우에도 P-value가 0.005로 유의성이 높았으며, 양(+)의 값을 보여 수온 증가에 따라 녹조 발생이 증가하는 상관관계를 확인하였다. 유기물의 경우에는 COD의 P-value가 0.014로 유의성을 나타냈으며, R-value가 양(+)의 값을 보여 COD가 증가하면 남조류 발생이 증가하는 상관 관계를 확인하였다. 영양염류중 질소의 경우 T-N과 NO₃-N 모두 P-value가 0.006과 0.001 이하로 유의성이 높았으며, R-value가 음(-)의 값을 보여 남조류 발생시 질소가 소비되는 것을 알 수 있었으며, 남조류 발생에 충분한 질소량이 있음을 확인할 수 있었다. 영양염류중 인의 경우 T-P와 PO₄-P 모두 유의성이 떨어지는 것으로 나타났으나 R-value가 음(-)의 값을 보여 남조류 발생시 인이 소비되고 있음을 알 수 있었다. 이를 종합하면 국내 4대강의 분석대상 지점들의 녹조 발생은 COD성분의 유기물이 증가될 때 높아지고, 수중 질소를 소비하는 것으로 나타났다.

4대강 유역의 하천에 각 1개 지점만을 대상으로 한 이러한 상관분석 결과가 녹조발생에 따른 수질항목의 전반적인 상관관계를 평가하기는 어려우나, 인 저감만으로 영양물질 관리에 어려움을 보인 사례(Havens et al., 2001)에서 보듯이 국내 수계에도 질소 성분이 녹조발생에 필요한 이상으로 충분히 포함되어 있어 질소 관리의 중요성을 확인할 수 있었다. 또 남조류 중에 Anabaena의 경우 인산염 인이 낮

고 질산성 질소가 높을 때 신경독소(neurotoxin)가 증가한다고 보고되고 있어(Sivonen et al., 1989), 기존의 총인 저감을 통한 영양물질 관리에는 한계가 있으며, 질소와 인을 함께 관리하는 것이 녹조 저감에 매우 중요함을 알 수 있다.

이를 위해서 수계에 유입되는 영양물질을 저감하기 위해서는 오염부하 비중이 커지고 있는 비점오염원에서 삭감이 중요하나 기술적으로 오염물질을 저감하기 어렵고 저감량도 제한적임으로 고려할 때 결국 영양물질은 주요 점오염 배출원인 하·폐수 처리시설에서 최대한 저감하는 것이 요구된다. 영양물질 지표와 함께 난분해성 유기물을 포함하는 하·폐수의 유기물 지표로서 산화력이 높고 신속·정확하게 실시간으로 측정 가능한 TOC 기준을 설정하면 방류수를 더욱 효과적으로 제어할 수 있을 것이다(Choi et al., 2015). 이러한 공공수역의 수질변화 추이를 감안할 때 향후 하·폐수 처리시설의 방류수 수질기준은 1단계로 영양물질 기준의 강화, 2단계로 TOC 지표를 기반으로 화학물질을 포함한 난분해성물질 관련 기준의 강화로 나아가야 한다. 영양물질 기준 중 총인 기준은 이미 2012년에 크게 강화했으므로 이제는 총질소 기준을 단계적으로 강화해야 할 시점이다.

2.6 총질소 기준의 강화 대안

앞서 조사한 바와 같이 미국, 유럽, 일본 등 대부분의 선진국들은 총 질소 기준을 10 mg/L 대로 설정하고 있다. 영양물질 제거를 위해 하·폐수 처리시설에 고도처리공정을 갖추고 필요에 따라 후단에 물리화학적 처리 공정을 병행해야 한다. 총질소 기준을 강화하는 경우 기존 하수처리시설에서 기준을 충족하기 쉽지 않으므로(특히 동절기), 기존 고도처리기술을 보완·개량하고 필요시 전·후단 처리공정을 접목해야 한다. 또한, 선진국의 최신 하·폐수 처리기술이 에너지 절감형/고효율형 수처리 기술을 지향하고 있음을 고려하면 우리나라 또한 공정·장치 기술의 업그레이드가 필요한 시점이다. 부영양화 및 녹조와 관련하여 Ryu et al. (2016)의 연구에서 언급한 것과 같이 국내 주요하천의 녹조발생에 대표 종인 남조류는 대부분 높은 T-N/T-P 농도비에서 발생하지만 그 중 *Aphanizomemon*속의 증식은 낮은 T-N/T-P 농도비에서 우점이 발생하는 것으로 알려져 있음을 고려할 때 공공수역의 부영양화 방지를 위해서도 총질

소에 대한 관리가 시급하다. 실제로 하천의 T-N/T-P 농도비가 지속적으로 증가하고 있어 총인뿐만 아니라 총질소 기준을 적어도 15mg/L 이하로 강화하는 것이 필요하다.

총인 기준이 강화되면서 일정 규모 이상의 처리시설에 총인 처리를 주목적으로 하는 화학적 처리공정이 후처리 단계에 설치된 반면, 질소의 경우 기존 고도처리 공정에서 처리하므로 기준을 강화하기 어려운 측면이 있다. 그러나 Choi et al. (2017)이 제시한 바와 같이 공공수역에 영양물질 배출을 저감하기 위한 수단으로 하·폐수 처리시설에서의 배출부하를 줄이는 것이 현시점에서 가장 실현 가능한 대안이 될 것이다.

방류수 기준 중 총질소 기준을 강화하는 경우 현재 20 mg/L에서 15 mg/L 또는 10 mg/L으로 강화하는 방안을 고려할 수 있다. 기준 강화를 위해서는 경제성 있는 처리기술이 확보되고 기존시설의 개량을 위한 투자가 선행되어야 하므로 5~10년의 유예기간이 요구된다. 동절기는 기술발전 추이를 고려하여 유예기간을 이보다 긴 10~15년으로 주는 것도 대안이 될 것이다. 총질소 기준 강화 시 공공수역에의 질소부하 유입량은 Table 12과 같이 8~13% 저감될 것으로 예상되며 총질소 기준이 강화되면 10 mg/L로 설정된 재이용수 기준을 만족하므로 농공업 용수로의 재이용도 활성화될 것이다.

총질소 배출기준 강화 시 적용 가능한 기술로는 전통적인 생물학적 처리기술(A₂O, MLE, Bardenpho 등) 외에 신기술들이 선진국을 중심으로 개발되어 상용화되고 있다(Table 13). 국내 전문기업들도 개발에 참여하고 있는 Sharon시스템, Anammox시스템, 그래놀화기술, 담체적용기술(IFAS포함), InNitri 기술 등이 있으며, 이러한 생물반응조의 처리기술 외에 Hu et al. (2012)가 언급한 Side-stream의 Biological nutrient removal (BNR)기술과 같이 다양한 기술이 지속적으로 개발되고 있어 수 년 내에는 보다 경제성 있고 처리효율이 높은 다수의 공정기술이 상용화될 것으로 예상된다.

질소제거 효율을 제고하는 신기술중 Sharon시스템의 경우 암모니아성 질소를 질산성 질소(Nitrate) 보다 아질산성 질소(Nitrite)로 질산화를 촉진하는 것이 특징이다. 간단한 단일 반응조로 슬러지 체류가 요구되지 않고, Nitrite 상태에서 탈질이 이루어지므로 산소 소비량 약 70%와 탄소원

Table 12. Reduction Amount of T-N Load from STPs by 10mg/L Criteria

Aqueous nitrogen load (ton/yr)	Effluent nitrogen load (ton/yr)	Reduction amount (ton/yr)	Reduction ratio (%)	Source of data
498,915	79,743	39,872	8%	ME (2015)
	131,275	65,638	13%	NIER (2012)

Table 13. BNR Technology and Development Level

BNR Processes	Tethnology name	Commercialization phase
Main-stream	A ₂ O, MLE, Bardenpho, IFAS, BAF et al.	Commercial
Side-stream	Sharon, Anammox, InNitri, Granule et al.	Some commercialization, research phase

약 40%를 감소할 수 있다. 특히, 질산화가 70~90% 이뤄져 처리효율이 높다. Sharon 공정과의 조합 방안이 많이 연구되고 있는 Anammox 시스템의 경우 Nitrite상에서 탄소원 소비 없이 Anammox균을 이용하여 탈질시켜 질소를 처리하는 시스템으로 약 90~95%의 질소처리 효율을 보이는 것으로 알려져 있으며(Wamex, 2014) Sharon의 단점 중 하나인 추가 탄소원 소비를 보완할 수 있는 공정이다(U. S. EPA, 2017). Anammox 미생물의 국내 적용사례는 아직 없으며, 국외에서도 고농도 처리공정에 적용되고 주 처리공정에 적용사례는 없는 것으로 파악된다.

그레놀화기술은 미생물 군집을 그레놀(Granular; 입상화) 형태로 만들어 이용하는 기술로 질산화 미생물, 탈질 미생물 등을 그레놀 형태로 적용하여 미생물 양을 증대시켜 질소를 처리하는 공정기술로 포기조건에서 그레놀을 유지하는 것이 핵심 요소이다. 이외에 질산화 미생물을 배양하여 생물반응조에 주입하는 InNitri 시스템도 있다(Ambulkar, 2017). 현재 국내의 처리 공정으로 기술적으로는 기준 만족이 가능할 것이나 처리효율 제고와 경제성 확보를 위해서는 에너지소비 효율과 슬러지 처리효율을 높여 경제성을 확보하는 기술 확보가 요구된다.

총질소 기준을 현재 20 mg/L에서 10~15 mg/L로 강화하는 경우 투자 소요비를 단순히 생물반응조를 증설하고 송풍량도 비례하여 증가하는 것으로 추산하면 5,000 m³/d 시설의 경우는 281~312백만원, 50,000 m³/d 시설의 경우는 3,037~3,374백만원, 500,000 m³/d 시설의 경우는 30,206~33,566백만원의 개량비가 소요되는 것으로 추정된다. 여기에서 2차 침전지의 증설은 생물반응조만으로 대응이 가능하다고 보아 고려하지 않았고, 생물반응조 증설을 위한 추가 부지매입비, 건축물 및 수전설비는 없다는 조건하에서 토목비용은 평당 500만원, 기계비용은 토목공사비×2, 전기공사비는 기계공사비×0.2로 산정하였으며 생물반응조 유효수심은 4 m, 체류시간은 기존 대비 15 mg/L의 경우는 1.0시간, 10 mg/L의 경우는 1.3시간 이상 더 필요한 것으

로 가정하여 산정하였다.

이를 토대로 전국 5,000 m³/d 이상 285개 시설을 대상으로 한 투자 소요비를 산정하면 10 mg/L로 강화 시 2조 1,029억원, 15 mg/L로 강화 시 1조 8,926억원에 달한다(Table 14 and 15). 여기서 개소당 평균단가는 최고·최저 용량별 비용의 중간 평균단가로 산정하였고, 50만m³/d 이상 시설은 50만m³/d 개량비용을 적용하였다. 실제로는 하수성상 및 처리여건에 따라 후처리 공정 또는 보완시설이 추가로 필요하므로 총 소요비는 이보다 증가할 수 있는 반면, 질소제거 기술의 발전에 따라 절감 요인이 있다. 이를 10년간에 걸쳐 투자하면 연간 약 1,892~2,102억원이 소요될 것으로 예상되며 우리나라 하수처리시설의 국고 투자분이 2017년 기준 약 6,849억원이고(ME, 2016c) 지방비(평균 30%) 포함 시는 총 9,784억원 수준이므로 기존 하수처리 시설 투자 예산 대비 연간 20% 정도 추가 소요될 것으로 예상된다. 실제로는 하수 재이용시설 투자비용 및 노후시설의 시설개량 비용과 중복되므로 실제 투자비용은 이보다 다소 절감될 것이다.

4. Conclusion

국내 하수처리시설 방류수로부터 공공수역에 유입되는 총질소 부하량은 79,743 ton/yr, 총인 부하량은 3,315 ton/yr 수준이며 방류수 수질기준은 I 지역 기준으로 총인은 0.2 mg/L로 최근 10년간 크게 강화된 반면, 총질소 기준은 2002년 이후 동절기 및 소규모 시설 이외에는 20 mg/L를 유지하고 있다. 선진국의 경우 수질오염 취약 지역에는 최고 1 mg/L로 규제하는 지역도 있으며, 대부분의 경우 10 mg/L 대로 총질소를 규제하고 있다.

공공수역으로 배출되는 총질소 유출량 498,915 ton/yr 중 하수처리시설 방류수의 기여분은 26%에 달하며 방류수의 총질소를 10 mg/L로 강화하였을 때, 부하량 저감량은 39,872~65,638 ton/yr, 저감 비율은 8~13%에 달할 것으로 예상

Table 14. Estimated Cost of STPs Improvement for T-N 10/15 mg/L by Capacity

Capacity of STPs (m ³ /d)	Reactor capacity (m ³)			Improvement cost (million won)	
	20 mg/L	15 mg/L	10 mg/L	15 mg/L	10 mg/L
5,000	1,660	1,888	1,902	281	312
50,000	16,309	18,667	18,929	3,037	3,374
500,000	162,978	186,432	189,038	30,206	33,562

Table 15. Estimated Total Cost of STPs Improvement (over 5,000 m³/d for T-N 10/15 mg/L)

Capacity(m ³ /d)	Number of sites	Improvement cost in case of T-N 10 mg/L (million won)		Improvement cost in case of T-N 15 mg/L (million won)	
		Average cost per each site	Total cost	Average cost per each site	Total cost
5,000-50,000	201	1,843	370,443	1,659	333,459
50,000-500,000	72	18,468	1,329,696	16,621	1,196,712
Above 500,000	12	33,563	402,744	30,206	362,472
Total	285		2,102,883		1,892,643

되어 공공수역의 총질소 부하량 저감과 부영양화 방지에 상당한 효과를 거둘 것으로 판단된다.

국내 공공수역의 수질개선을 위해서는 BOD 중심의 유기물질 지표는 크게 개선되었으므로 하·폐수처리장의 영양물질 배출기준을 강화하는 것이 시급하다. 현 여건에서 공공수역에 유입되는 영양물질을 효율적으로 저감하기 위해서는 하·폐수 처리시설의 총질소 기준을 강화하는 것이 실현 가능한 최적의 대안이며 국내외 여건을 고려할 때 적정 기준은 10~15 mg/L 수준으로 판단된다.

하수처리장의 총질소 기준을 강화해야 한다는 과학적 논거자료가 미흡함에도 불구하고 앞서 살펴보았듯이 선진국들은 우리나라보다 대부분 유역의 오염 부하가 적은 여건에서도 규제 수준이 우리나라보다 강하며 총인기준이 크게 강화되었음에도 불구하고 녹조문제가 완화되고 있지 않음을 고려할 때 하·폐수처리시설의 총질소 기준의 강화는 불가피한 선택으로 판단된다.

국내 처리기술의 발전추세로 보아 5년 가량 유예기간을 설정할 경우 경제성 있는 기술이 확보되어 투자 효율이 제고될 것으로 예상되며 동질기에는 처리효율이 떨어지는 점을 고려하여 추가적으로 유예기간을 주거나 3~5년 이후에 추가 설정하는 방안이 필요하다.

총질소 기준 강화시 기존시설 개량이 필수적으로 요구되며 개량 소요비용은 시설 용량에 따라 281~33,562백만원이 소요되고 전국 5천m³/d 이상의 285개 시설 개량시 총 2조 1,028억원이 소요될 것으로 예상된다. 이러한 투자는 공공수역의 수질 개선은 물론 국내시장의 축소로 어려움을 겪고 있는 전문기업의 경쟁력 제고와 함께 전문인력 고용 효과를 창출할 것이다. 총질소 기준의 강화하기 전에 앞서 살펴본 질소의 효율적 처리 기술과 같은 선진기술이 확보되어야 하며 이를 위한 산·학·연 연계 기술개발이 요구된다. 또한 세계 하·폐수 처리시장에서의 적용기술이 종래 개도국 대상의 전통적 처리기술과 선진국의 고도처리 기술로 양분되었으나 점진적으로 개도국 시장도 전통적 처리기술에 고도처리기술을 접목하는 추세임을 고려할 때 총질소 기준이 강화되면 수질개선과 함께 관련 기업의 국제경쟁력을 강화하는 계기가 될 것이다. 즉 총질소 기준의 강화는 국내 하·폐수처리장의 전반적인 업그레이드를 의미하며 에너지절감형 기술, 영양물질 제거형 고도처리기술이 적용되어 국내 기업의 기술력 향상으로 연계되고 국제 물 시장에서의 경쟁력을 강화시키는 동인이 될 것이다.

Acknowledgement

본 연구는 환경부 글로벌담 환경기술개발사업으로 지원 받은 과제임(과제번호: 2016001410001).

References

Ambulkar, A. R. (2017). *Oxford Research Eyclopedias*, <http://environmentalscience.oxfordre.com/view/10.1093/acrefore/97>

- 80199389414.001.0001/acrefore-9780199389414-e-495?rskey=gEc5za&result=1 (accessed Nov. 2017).
- Choi, I. W., Kim, J. H., Im, J. K., Park, T. J., Kim, S. Y., Son, D. H., Huh, I. A., Rhew, D. H., and Yu, S. J. (2015). Application of TOC Standards for Managing Refractory Organic Compounds in Industrial Wastewater, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 31(1), 29-34. [Korean Literature]
- Choi, O. Y., Kim, H. T., Seo, H. S., and Han, I. S. (2017). Analysis of Water Qulity Changes & Characterization at the Watershed in Han River Basin for Target Indicator in TMDLs, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 33(1), 16-33. [Korean Literature]
- Havens, K. E., Xie, P., Iwakuma, T., James, R. T., Takamura, N., Hanazato, T., and Yamamoto, T. (2001). Nutrient Dynamics and the Eutrophication of Shallow Lakes Kasumigaura (Japan), Donghu (PR China), and Okeechobee (USA), *Environmental Pollution*, 111(2), 263-272.
- Hu, Z., Houweling, D., and Dold, P. (2012). Biological Nutrient Removal in Municipal Wastewater Treatment: New Directions in Sustainability, *Journal of Environmental Engineering*, 138(3), 307-317.
- Jeong, D. H., Choi, I. C., Cho, Y. S., Chung, H. M., Kwon, O. S., Yu, S. J., Yeom, I. T., and Son, D. H. (2014). A Study on the management System Improvement of Effluent Water Qualities for Public Sewage Treatment Facilities in Korea, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 23(4), 296-314. [Korean Literature]
- Kim, J. T., Hwang, H. Y., Hong, B. P., and Byun, H. S. (2011). The Background and Direction of R&D Project for Advanced Technology of Wastewater Treatment and Reuse, *Membrane Journal*, 21(3), 278-280. [Korean Literature]
- Martin, L. (2013). *Water online*, <https://www.wateronline.com/doc/epa-s-top-technology-needs-for-water-0001> (accessed Nov. 2017).
- Ministry of Environment (ME). (2011). *Study on Appropriate Treatment & Management of the Public Sewage Treatment Works Entering the Industrial Wastewater*, National Institute of Environmental Research, 1-96. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (ME). (2014). *A Study on the Roadmap of Evaluation and Management of Nutrient Pollution in Public Water*, Seoul National University, 13-138. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (ME). (2015). *Sewer statistics 2014*, Ministry of Environment, 1-2280. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (ME). (2016a). *Environmental Statistics Yearbook 2016*, Ministry of Environment, 121-264. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (ME). (2016b). *Occurrence and Treatment of Industrial Wastewater 2016*, 11-1480000-001452-10, National Institute of Environmental Research, 3-430. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (ME). (2016c). *Outline of budget and fund management plan of Ministry of Environment in 2017*, Ministry of Environment, 1-46. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2012). *Nitrogen Budget of South Korea and Management Plan*,

- Hanyang University*, 29-48. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2013). *A Study on the Planning of Improvement for Effluent Standards of Sewage Treatment Plants*, 11-1480523-001516-01, *National Institute of Environmental Research*, 31-81. [Korean Literature]
- Ryu, H. S., Park, H. K., Lee, H. J., Shin, R. Y., and Cheon, S. U. (2016). Occurrence and Succession Pattern of Cyanobacteria in the Upper Region of the Nakdong River : Factors Influencing Aphanizomenon Bloom, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 32(1), 52-59. [Korean Literature]
- Sivonen, K., Himberg, K., Luukkainen, R., Niemilä, S. I., Poon, G. K., and Codd, G. A. (1989). Preliminary Characterization of Neurotoxic Blooms and Strains from Finland, *Toxicology*, 4(3), 339-352.
- Um, C. Y., Chu, K. H., Yun, Z. H., Choi, I. H., Park, J. Y., Lee, H. S., and Ko, K. B. (2011). Evaluation of Korean Water Quality Standards in Winter by Characteristics and Statistical Analyses of the Effluent Water Quality at the Sewage Treatment Plants in Korea, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 27(4), 523-532. [Korean Literature]
- United States Environmental Protection Agency (U. S. EPA). (2017). *Reducing Nutrients in the San Francisco Bay Through Additional Wastewater Treatment Plant Sidestream Treatment*, EPA-R9-WTR3-13-001, EPA, San Francisco, 7-52.
- Wamex. (2014). *Wamex*, <http://www.wastewaterinfo.asia/tech-sheets/side-stream-nutrient-removal> (accessed Nov. 2017).
- Yu, S. J., Park, S. M., Kwon, O. S., Park, S. J., and Yeom, I. T. (2013). Improvement on Sewage Effluent Standard of Public Sewage Treatment Plants, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 29(2), 276-287. [Korean Literature]