

국내 호수의 제한영양소와 하수처리장 방류수 인 기준 강화의 필요성

김범철 · 사승환[†] · 김문숙 · 이윤경 · 김재구

강원대학교 자연과학대학 환경과학과

The Limiting Nutrient of Eutrophication in Reservoirs of Korea and the Suggestion of a Reinforced Phosphorus Standard for Sewage Treatment Effluent

Bomchul Kim · Seung-Hwan Sa[†] · Moonsook Kim · Yunkyong Lee · Jai-Ku Kim

Department of Environmental Science, Kangwon National University

(Received 19 April 2007, Accepted 28 June 2007)

Abstract

The limiting nutrient of eutrophication in freshwater bodies in Korea was examined and the phosphorus concentration standard for sewage treatment effluent was discussed. The weight ratio of N/P in 13 major reservoirs showed the range of 18 to 163, which implies phosphorus is more limited than nitrogen for algal growth. In the correlation analysis phosphorus showed higher correlation with chlorophyll-a concentration than with nitrogen. In the algal bioassay phosphorus spike test enhanced algal growth in all 25 samples of five reservoirs, while nitrogen was found to co-limit only in four samples. It confirms that phosphorus is the only limiting nutrient for eutrophication in Korean reservoirs. As many reservoirs are eutrophic in Korea, phosphorus control is critical for the management of water quality. The phosphorus standard of sewage treatment effluent in Korea was compared with other countries, and it can be concluded that phosphorus standard is too high to be effective in eutrophication control and a lower phosphorus standard is essential for the water quality improvement.

keywords : Eutrophication, Limiting nutrient, Phosphorus, Sewage treatment

1. 서론

1990년대 초에 시작된 여러 수질보전대책의 성과로 2005년 말 우리나라의 하천 및 호소의 수질이 크게 개선되어 왔으나, 환경백서(환경부, 2006a)에 따르면 2005년도말 수질환경기준 달성도는 여전히 42.3%에 머무르고 있다. 특히 호수나 만과 같은 폐쇄성수역의 부영양화 현상은 점점 심각한 문제로 논의되고 있다. 우리나라의 수자원은 대부분 인공호나 상류 호수에서 방류한 물에 의존하고 있으므로 호수의 부영양화는 수자원의 질을 좌우한다.

폐쇄성수역의 부영양화는 조류성장의 제한영양소인 질소(N), 인(P) 등의 무기영양염류가 증가하여 발생한다(국립수산과학원, 2005; 조 등, 1996; 허 등, 1995, 1999; Wetzel, 2001). 부영양화는 조류의 유기물 광합성을 증가시켜 호수의 상수원으로서의 가치를 하락시키며 관광자원으로서의 가치도 하락시키는 수질악화의 주원인이다. 그러므로 폐쇄성 수역의 부영양화를 막기 위하여 하수처리과정에서 인과 질소를 제거하도록 하수처리장 방류수의 인과 질소 농도기준을 정하여 관리하고 있다.

현재 운영 중인 대부분의 환경기초시설의 방류수 수질은 법적기준을 만족시키지만, 방류수역에 비하여 높은 영양염

류 함량으로 방류수역의 영양상태를 높이기 때문에 수질관리를 위하여 영양염류의 처리가 중요하다고 지적되며 추가적인 처리시설 도입이 필요한 것으로 보고하고 있다(곽 등, 1997; 김, 2001; 김 등, 2005; 서 등, 2003; 오 등, 2005). 이미 선진국에서는 하수처리시설의 고도처리 비율을 높여 하수처리수의 영양염류 농도를 줄이기 위한 노력을 하고 있다.

환경부는 물환경관리기본계획(환경부, 2006b)에서 상수원 관리 강화를 위하여 환경기초시설의 방류수 수질 기준을 강화하고 이를 위하여 화학적 인 처리시설 도입을 계획하고 있다. 또한 하천의 건천화와 수질 및 생태계 관리를 위하여 하·폐수 처리장 방류수를 하천유지용수로 활용할 계획을 추진하고 있다.

이러한 계획들의 목표 달성을 위해서는 하천 및 폐쇄성 수역의 부영양화의 관리가 고려된 환경기초시설 방류수 수질기준의 검토가 필요하다. 본 논문에서는 우리나라 호수의 부영양화 제한영양소에 관하여 고찰하고 현행 하수처리장 방류수의 인 농도 기준을 더 강화할 필요성에 대하여 제안하고자 한다.

2. 재료 및 방법

호소의 수질현황과 부영양화의 제한인자를 평가하기 위하여 환경부와 농촌공사의 2000~2005년도 호수와 농업용수 저수지 측정망 조사 자료를 사용하였다. 금광, 왕송, 흥

[†] To whom correspondence should be addressed.
shsa@kangwon.ac.kr

부, 덕우, 동방, 덕우저수지의 호수수질은 2003년 9월부터 2004년 8월까지 동절기를 제외하고 한 달 간격으로 댐앞 지점에서 채수하였다. 또한 북한강수계의 파로호, 춘천호, 청평호는 2004년 6월부터 2005년 6월까지 한 달 간격으로 댐앞 지점에서 채수하였다. 채수된 모든 시료수들은 채수 후 즉시 전처리하고 실험실로 운반 후 Standard method (APHA, 1998)에 따라 분석하였다.

하수처리장의 유입수량과 방류수량 및 수질 현황의 분석을 위하여 환경부의 2001~2005년 하수도통계(환경부, 2002~2006c)를 사용하였다.

조류성장의 제한영양소를 조사하기 위하여 2004년 2월부터 8월까지 총 5회에 걸쳐 nutrient spike test를 실시하였다. 대상호소는 수심과 체류시간, 영양상태 등을 고려하여 5개 호소를 다음의 기준에 따라 선정하였다. 수심이 깊고 체류시간이 긴 호소를 대표하기 위하여 빈영양상태를 보이는 소양호와 부영양호인 합천호를 대상으로 선정하였다. 또 수심이 상대적으로 얇고 체류시간이 짧으며 부영양호로 분류할 수 있는 호수로는 팔당호와 낙동강 하구호를 선정하고, 그리고 소형 농업용 저수지로서 연중 과영양상태를 보이는 왕송저수지를 대상으로 선정하였다.

각 대상호수의 댐앞 지점에서 표층수를 채수하였다. 채수된 시료수는 Whatman GF/C filter로 여과하였고, 각각 250 mL 삼각플라스크에 50 mL씩 분주하여 121°C의 autoclave에서 15분간 가열 멸균하였다. Table 1과 같이 영양염을 멸균한 각각의 삼각플라스크에 첨가한 후, 국립환경과학원에서 분양받은 *Anabaena flos-aquae*를 접종하였다. 접종에 사용한 *Anabaena flos-aquae*는 대수성장기의 배양체로서 in vivo fluorescence 값이 1000이 되도록 배양체의 조류밀도를 조절한 후 2%의 비율로 배양액에 접종하였다(오 등, 1998). 삼각플라스크에 *Anabaena flos-aquae*를 접종한 후, 온도 20°C, 광도 100 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{S}$, 광주기 16:8(light:dark)의 조건에서 배양하면서 하루에 1회 hand shaking을 실시하였다. 14일간 배양하면서 3~4일 간격으로 형광광도계를 이용하여 in vivo fluorescence값을 측정하고 *Anabaena flos-aquae*의 성장곡선을 작성하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 우리나라 호수의 조류성장 제한영양소

일반적으로 담수에서 조류성장의 제한영양소는 첫째가 인이며 두 번째로 빈도가 높은 것이 질소이다(Correll, 1998). 북미와 유럽지역의 호수에서는 10~20%의 빈도로 질소 제한이 나타나고 있으나, 대부분의 경우 인이 제한영양소로 알려져 있다(Elser et al., 1990; Heckey et al., 1988; Heiskary et al., 2005).

호수에서 인과 질소의 상대적인 결핍도는 N/P 비의 분석으로부터 예측할 수 있다. 일반적으로 수생식물과 조류의 N/P 무게비는 평균 7인 것으로 보고되고 있다(Hecky et al., 1993; Redfield et al., 1979). 생물의 N, P 함량은 가용량과 생물의 종류에 따라 달라지며 N/P 무게비가 10 이상이

Table 1. Medium composition of each treatment for algal limiting nutrient test

Treatment	Medium composition
1	Control
2	Control+0.05 mg/L P as K_2HPO_4
3	Control+1.00 mg/L N as NaNO_3
4	Control+1.00 mg/L Na_2EDTA
5	Control+0.05 mg/L P+1.00 mg/L N
6	Control+0.05 mg/L P+1.00 mg/L Na_2EDTA
7	Control+1.00 mg/L N+1.00 mg/L Na_2EDTA
8	Control+all

면 인이 제한영양소로 작용하는 것으로 알려져 있다(Horne et al., 2001).

우리나라 주요 인공호의 N/P 비를 보면 대부분 10 이상을 보이고 있으므로 이로부터 인이 제한영양소일 것으로 예상할 수 있다(Table 2). 부영양화가 심한 하구호에서는 N/P 가 10 이하로 낮아지는 예들이 있으나 이 경우에는 상대적으로 인의 농도가 높아서 N/P가 낮아진 것이 질소가 결핍되어 낮아진 것이 아니며, 질소가 제한 영양염으로 작용하는 경우는 거의 없다(Kim et al., 1997).

호소의 식물플랑크톤 밀도를 나타내는 chlorophyll-a와 질소 및 인과의 상관관계 분석으로도 제한영양소를 평가해 볼 수 있다. 농업기반공사에서 관리하고 있는 500개의 농업용 저수지 수질 자료와 환경부에서 운영하고 있는 수질 측정망 중 90개 호수 수질자료를 사용하여 chlorophyll-a와 총인(TP) 및 총질소(TN)의 상관관계를 분석하였다. TN과 TP 농도는 모두 chlorophyll-a 농도와 유의적 상관관계를 보였으나 총인과의 결정계수(r^2)는 0.610인 반면에 총질소의 결정계수(r^2)는 0.323으로 총인과 상관성이 더 큰 것으로 나타났다. 이는 식물플랑크톤 현존량을 주로 인이 좌우한다는 사실을 시사한다(Fig. 1). 우리나라 농업용 저수지 수질 자료의 상관 분석을 한 Hwang 등(2003)도 대부분의 호수에서 인이 제한영양소임을 식물플랑크톤 밀도가 질소보다 인과 더 높은 상관성을 보였고, 따라서 대부분의 저수지에서 인이 제한영양소라고 설명하였다.

인 제한을 유발하는 또 하나의 요인은 우리나라의 기반암이 대부분 화강암으로서 질소의 자연배경농도가 높다는 점이다. 대부분 화강암은 퇴적암에 비해서 인의 침식과 용출이 상대적으로 적어 수환경내 인이 제한되는 요인이 될 수 있다. 또한 담수에서는 수중의 orthophosphate는 Ca^{2+} , Al^{3+} , Fe^{3+} 등과 결합하여 용해도가 낮은 침전물을 만들며, 토양에 쉽게 흡착되어 수중의 농도는 낮게 유지된다. 따라서 대부분의 호수에서 생물에 필요한 원소가운데 가장 결핍되어 있으며 조류성장의 제한영양소(limiting nutrient)로 작용한다.

인과는 달리 질소의 경우 원인은 불분명하지만 자연배경 농도가 매우 높게 나타나고 있다. 인구밀도가 낮고, 오염원이 상대적으로 적은 한강 상류의 청정호수인 소양호에서도 질소의 농도는 1 mgN/L 이상으로서 이미 조류성장을 억제할 수 있는 기준을 크게 초과하는 농도를 보이고 있다. 대

Table 2. Total phosphorus and nitrogen concentration of major reservoir in Korea. TN/TP ratio based on atomic ratio; V_m : maximum water capacity (10^8 m^3), Z_m : maximum water depth (m), SD: Secchi disk depth(m), TP: total phosphorus concentration (mgP/L), TN: total nitrogen concentration (mgN/L), N/P: TN/TP weight ratio, Chl-a: chlorophyll a concentration (mg/m^3), TSI: trophic state index, the average of TSI (Chl), TSI (TP), and TSI (SD)

Reservoir	V_m	Z_m	SD	TP	TN	N/P	Chl-a	TSI
Soyang	29.0	100	2.8	0.016	1.35	102	12.5	50
Choongju	27.5	70	3.1	0.015	2.22	157	4.6	47
Daechung	14.9	60	2.9	0.017	1.79	103	9.5	50
Andong	12.5	50	2.5	0.018	2.39	163	4.8	49
Hapchon	7.9	60	2.1	0.022	1.07	51	10.5	54
Okjong	4.7	50	1.8	0.029	2.03	76	9.4	55
Juam	4.6	40	3.4	0.015	0.77	59	6.6	48
Paldang	2.4	20	0.9	0.074	1.97	38	9.4	63
Jinyang	1.9	7	1.4	0.034	1.28	40	7.9	57
Euiam	0.6	15	2.3	0.024	1.41	65	7.4	52
Youngsan	2.5	12	0.8	0.111	3.20	29	20.3	68
Keum	1.4	8	0.9	0.132	2.31	18	48.7	71
Nakdong	1.3	10	0.9	0.109	3.19	29	41.9	70
Paro	10.1	70	4.9	0.012	1.30	295	3.3	34
Chunchon	1.5	30	3.6	0.019	1.49	218	7.8	41
Chungpyoung	1.9	20	1.9	0.026	1.84	164	11.1	50
Keumkwang	0.1	16	1.4	0.039	1.68	115	22.5	56
Dukwoo	0.04	9	0.8	0.090	2.43	72	71.8	67
Myukwoo	0.01	3	0.4	0.187	2.56	48	135	74
Dongbang	0.01	3	0.5	0.320	2.53	35	171.1	75
Wangsong	0.02	7	0.5	0.255	4.53	46	195.9	78
Heungbu	0.02	6	0.6	0.151	3.67	61	123.9	74

*Kim et al. (1997)

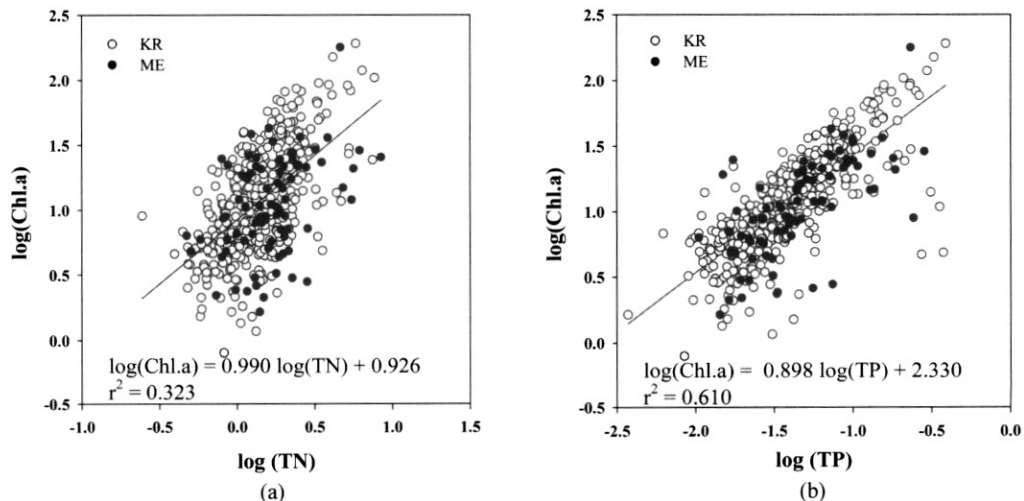


Fig. 1. Scatter plots of log based chlorophyll a and nutrients ((a) TP and (b) TN) in about five hundred agricultural reservoirs and 90 lakes of Korea Ministry of Environment management (mean value used, ○: data of Korea Rural Community & Agriculture Corporation (KR), ●: data of Korea Ministry of Environment (ME)).

형담 가운데 질소 농도가 가장 낮은 곳은 주암호이었는데 이곳에서도 총질소가 0.77 mgN/L로서 호수수질기준의 3급수에 해당하는 농도를 보이고 있다. 따라서 우리나라의 대부분의 호수에서 질소의 자연배경농도가 이미 조류 성장을 억제할 수 없는 높은 농도이기 때문에, 더 이상 인위적인 질소 발생원을 모두 제거한다고 하여도 조류 성장을 억제할 수 있는 농도에 도달할 수 없음을 뜻한다.

Algal assay를 이용한 조류성장잠재력 평가에서도 조사된 모든 호수에서 5회의 시기별 조사에서 모두 인의 첨가에 의해 조류성장이 증가하는 결과를 나타냈으며, 4개의 시료는 질소와 인이 함께 성장을 촉진하였다(Table 3). 조사대상 호수들은 질소의 결핍이 일어나지 않고 있으며, 인이 제한영양소인 것으로 판단된다. 또한 이 점은 Fig. 1의 결과와도 일치하는 결과이다.

Table 3. Algal bioassays of five lakes for algal growth limitation. Algal growth was stimulated in all lakes after adding phosphorus (+N: nitrogen added, +P: phosphorus added, TE: trace element, ○: growth stimulation, -: no effect on the growth)

Reservoir	Date	+N	+P	+EDTA	limiting nutrient
Soyang	Feb	-	○	○	P, TE
	Apr.	-	○	-	P
	June	-	○	-	P
	Jul.	-	○	-	P
	Aug.	-	○	○	P, TE
Nakdong	Feb	-	○	-	P
	Apr.	-	○	-	P
	June	-	○	-	P
	Jul.	-	○	-	P
	Aug.	-	○	-	P
Hapchon	Feb	-	○	○	P, TE
	Apr.	-	○	-	P
	June	○	○	-	N, P
	Jul.	-	○	-	P
	Aug.	-	○	-	P
Paldang	Feb	-	○	-	P
	Apr.	-	○	-	P
	June	○	○	-	N, P
	Jul.	-	○	-	P
	Aug.	-	○	-	P
Wangsong	Feb	○	○	-	N, P
	Apr.	-	○	-	P
	June	○	○	-	N, P
	Jul.	-	○	-	P
	Aug.	-	○	○	P, TE

이상의 결과들로 우리나라 대부분의 호수에서 질소보다는 인이 조류 성장 제한영양소임을 알 수 있고, 따라서 부영양화 방지를 위해서는 질소보다는 인의 근원을 제거하는 것에 주력하여야 할 것이다.

3.2. 하수처리장 방류수의 인 농도 기준

우리나라 호수의 부영양화 결정요인이 인입에도 불구하고 하수처리장 방류수의 인 농도 기준은 다른 나라에 비해 매우 높은 편이다(Table 4). 현재 우리나라의 특정지역내 하수처리장 방류수 인 기준은 2 mgP/L로서, 이는 일본에 비해 2~4배 정도 높고, 미국의 기준에 비해서는 2~10배 정도 높은 수준이다.

또한 현재의 방류수 기준은 2001년부터 2005년에 조사된 전국하수처리장 처리수의 평균 인 농도인 1.2 mgP/L보다도 높게 설정되어 있다(Table 5). 2005년도말 운영 중인 294개 (152개 고도처리시설 포함) 하수종말처리장 중 기준치를 초과하는 처리장은 1개소뿐이며, 방류수의 인 농도가 최근 5년간 연평균 1.1~1.3 mgP/L이므로 인을 제거하기 위한 추가의 노력이 없이도 이 기준을 충족하고 있다.

2005년도 말 현재 가동 중인 하수종말처리장에서 방류되

Table 4. Standards for total phosphorus in sewage treatment effluent in several countries

Country	TP permit limits (mg/L)	Reference
U.S.A.	0.2~1.0	
Norway	0.3~0.4	
Sweden	0.2~0.5	
England	1~2	곽(1995)
Finland	0.5	
Denmark	0.3~0.5	
Netherlands	1~2	
Germany	0.5~1.0	
Australia	0.2	환경부(2006b)
Swiss	0.8	
Japan	0.5~1.0	日本國土交通省(2005)
Korea	8.0(2.0)	환경부(2001b)

는 처리수량은 연간 약 65억 톤으로 국내 최대 다목적댐인 소양강댐의 저수량 29억 톤의 2.2배 이상, 대청댐의 저수량 14.9억 톤의 4.3배 이상에 달한다. 또한 하수종말처리장의 방류수가 대부분을 차지하는 총인의 점원오염부하량은 유역으로부터 배출되는 전체 총인 부하량에 대하여 2003년 말 한강권역에서 58%, 낙동강권역 50%, 금강권역 31%, 영산강·섬진강 권역 41%로 아직도 수계의 수질에 큰 영향을 주고 있는 것으로 보고되고 있다(환경부, 2006b). 농도로는 방류수기준과 실제방류수의 5년간 평균 인 농도가 0.8 mgP/L 차이가 나는데, 이를 총인부하량으로 계산하면 한강권역의 2003년도 연간 배출부하량인 16,205톤/년(환경부, 2006b)의 32%를 차지하는 양이다.

TP에 의한 호소의 영양도 평가기준은 연구자, 국가별로 다르고 계절적 변동이 매우 크나, 기존의 연구들에서는 0.020~0.035 mgP/L의 농도범위에서 부영양단계의 기준을 제시하고 있다(Forsberg et al., 1980; OECD, 1982; 환경부, 2001a). 이러한 기준들을 종합해 볼 때 총인의 농도가 0.03 mg/L 이상시 부영양화 단계에 이르며, 호수의 부영양화를 막기 위해서는 호수의 인 농도를 0.03 mgP/L 이하로 유지하여야 하므로 현재의 하수처리장 방류수의 인 방류기준은 부영양화 억제와 호수수질개선에 전혀 도움이 되지 못하고 있다.

Table 4와 같이 선진국의 하수처리장 방류수 인 기준은 0.1~0.5 mgP/L로서 우리에게 비해 낮은 기준을 적용하고 있다. 특히 일본 비와호(琵琶湖) 유역의 하수처리장에서는 방류수의 인 농도가 약 0.05 mgP/L로서 우리나라의 1/40 이하의 낮은 농도로 배출하고 있다(Table 6). 일본 시가현의 하수처리장 방류수 수질은 현재는 0.03~0.05 mgP/L이지만 장래에는 비와호의 농도와 유사한 0.02 mgP/L로 계획하고 있다. 이 농도는 비와호의 인 농도와 유사한 농도이므로 하수에 의한 부영양화를 완전히 막을 수 있는 농도이다.

하수처리장 방류수의 인 농도 기준은 하수처리 공법의 선택에 있어서 중요한 인자가 된다. 인의 농도 기준이 낮은 선진국에서는 인의 제거율을 높이기 위해서 화학적 처리공

Table 5. Concentration of nitrogen and phosphorus and removal efficiencies in 294 sewage treatment plants in Korea (환경부, 2002~2006c)

	Influent water			Effluent water			Treatment efficiency (%)	
	TN (mg/L)	TP (mg/L)	TN/TP ratio	TN (mg/L)	TP (mg/L)	TN/TP ratio	TN	TP
25% Percentile	18.0	1.8	8.4	9.7	0.8	9.6	36.7	45.4
Mean	26.3	3.1	10.5	14.6	1.2	14.4	48.0	56.8
75% Percentile	31.3	3.3	11.1	17.6	1.5	14.8	62.3	72.4

Table 6. The concentration of total phosphorus in influents and effluents of sewage treatment plants in the watershed of Lake Biwa, Japan (滋賀縣琵琶湖環境部, 2004)

Treatment plant	TP concentration (mg/L)	
Konanchubu Purification Center (湖南中部浄化センター)	Influent	3.3
	Standard for effluent	1.0
	Effluent	0.05
Kosei Purification Center (湖西浄化センター)	Influent	4.0
	Standard for effluent	0.5
	Effluent	0.04
Tofukuhu Purification Center (東北部浄化センター)	Influent	3.3
	Standard for effluent	0.5
	Effluent	0.03
Takashima Purification Center (高島浄化センター)	Influent	3.3
	Standard for effluent	0.5
	Effluent	0.03

법을 가미한 방법을 채택하고 있다. 생물학적 처리로는 인의 농도를 낮추는 데에 한계가 있기 때문에 생물학적 처리의 중간 단계에 알루미늄염을 첨가하여 슬러지의 인흡착력을 높이는 방법을 사용하거나 생물학적처리의 다음 단계의 고도처리 단계에서 화학적처리를 사용하고 있다(김, 2001; 하 등, 1994).

이에 비하여 우리나라에서는 인의 농도 기준이 높기 때문에 인처리 효율이 좋은 화학적 처리 방법과 같이 별도의 고도처리를 도입하지 않고도 기준농도를 충족시킬 수 있다. 따라서 고도처리를 도입할 때에도 인 제거보다는 생물학적 방법을 통해 질소제거에 주력하고 있는 실정이며, 처리공법이 유입수의 특성을 반영하지 못하여 처리효율이 떨어지는 문제점이 제기되고 있다(신 등, 2000; 김, 2003). 질소의 제거만으로는 부영양화를 막을 수 없으므로 하수처리가 호수 수질개선에 큰 도움을 주지 못하고 있다.

2005년 하수도통계(환경부, 2006c)에 따르면, 방류수의 TN/TP 비가 평균 14 정도로 작은 값을 보이며(Table 5), 유입수의 총인 농도보다 방류수의 총인 농도가 같거나 높은 처리장들도 있는 것으로 나타났다. 더욱이 하수처리장에서 입상상 유기인은 유기물이 분해되는 과정을 통해 조류들이 쉽게 이용할 수 있는 용존 무기인 형태로 분해되어 배출된다. 이는 하수처리수의 인이 생물학적 처리의 한계 때문에 유입수보다 용존 무기인 농도가 증가되어 방류되기 때문에 하수처리수의 방류량에 따라 방류수역의 부영양화에 대한 기여도를 높일 수 있음을 시사하였다(김, 2001; 서 등, 2003; 신 등, 2001; 우 등, 1993; 小市 등, 2004, 2005).

이러한 이유로 화학적 처리공법과 같이 용존형 인까지 제거할 수 있는 적절한 공법이 적용된 고도처리시설이 필요하며, 배출기준을 만족하는 방류수라 할지라도 수질관리를 위하여 강화된 방류수 기준이 필요시 되고 있다(서 등, 2003; 오 등, 2005; 허 등, 2005).

4. 결론

하천 및 폐쇄성 수역의 관리를 위하여 현재 시행중인 많은 계획에서 장래 목표로 하는 수질과 생태계의 건강성을 확보하기 위해서는 우선 수역의 부영양화의 발생을 억제하여야 한다. 본 연구의 결과에 따르면 우리나라 대부분의 하천 및 호수와 같은 폐쇄성 수역의 부영양화 결정인자는 인이며, 질소는 자연배경농도가 높기 때문에 조류의 억제에 기여하지 못한다. 또한 하수종말처리시설은 수계로 유입되는 유기물오염부하량을 줄여 수질개선에 큰 기여를 하고 있지만 배출되는 인부하량의 비율이 여전히 높은 것으로 평가된다.

따라서 부영양화의 결정인자인 인의 유입 억제에 더 많은 노력을 기울여야 할 것이다. 우리나라의 경우, 강우 시 집중도가 높은 비점오염원으로부터의 인 유출을 억제하기에는 많은 어려움이 있다. 때문에, 관리가 비교적 쉬운 점오염원의 대부분을 차지하는 환경기초시설로부터의 인 제거율을 높이는 것이 효과적일 것이다. 이를 위해서는 현행의 방류수 총인 기준을 0.1~0.5 mgP/L로 강화할 필요가 있다.

사 사

이 논문은 2006년도 BK21사업에 의하여 지원되었음

참고문헌

- 곽종운, Lars Gillberg, 하수처리에서 응집제의 염기도가 인 제거에 미치는 특성, *한국수처리기술연구회지*, 3, pp. 57-67 (1995).
- 곽종운, 김승환, 이찬원, 화학적 처리에 의한 1차 하수처리장의 처리효과 개선 - 현장시험을 중심으로, *대한상하수도학회지*, 11, pp. 99-108 (1997).
- 국립수산과학원, 한국연안의 적조발생 상황 (2005).
- 김갑수, 국내 하·폐수처리의 현황과 전망, *화학공학기술정보지*, 19, pp. 709-713 (2001).
- 김영철, 안익성, 강민기, 우리나라 하수처리장 방류수 수질

- 현황 및 특성, *한국물환경학회지*, **21**, pp. 158-168 (2005).
- 서정관, 이재정, 양상용, 정익교, 낙동강 수계 하·폐수 처리시설의 방류수가 조류 성장 잠재력에 미치는 영향, *Algae*, **18**(2), pp. 157-167 (2003).
- 신재기, 이옥희, 황순진, 조경제, 경안천에서 하수처리수와 생하수에 대한 algal bioassay, *한국육수학회지*, **34**(3), pp. 192-198 (2001).
- 신항식, 남세용, 강석태, 이상형, 국내 하수처리장 운영 실태 및 개선 방안, *한국수처리기술연구회*, **8**(3), pp. 41-58 (2000).
- 오현택, 구준호, 박성은, 최윤선, 정래홍, 최우정, 이원찬, 박종수, 하수처리장 개선이 마산만 수질에 미치는 영향 분석, *한국환경과학학회지*, **14**(8), pp. 777-783 (2005).
- 오희목, 이석준, 김성빈, 박미경, 윤병대, 김도한, Algal bioassay에 의한 조류성장영양염류 결정, *한국육수학회지*, **31**(2), pp. 150-157 (1998).
- 우승순, 이찬기, 김성석, 최규열, 이해금, 춘천시 하수처리장의 처리공정에서 인의 거동과 존재형태, *한국물환경학회지*, **9**(2), pp. 94-104 (1993).
- 조경제, 신재기, 남한강 담수조류 N·P 요구도 분석을 위한 bioassay, *한국육수학회지*, **29**(4), pp. 263-273 (1996).
- 하준수, 최의소, 화학적방법에 의한 도시하수의 고도처리, 고려대학교 석사학위논문 (1994).
- 허우명, 김범철, 황길순, 최광순, 박원규, 낙동강 수계의 인, 질소 및 Chl.a 농도 분포, *한국육수학회지*, **29**, pp. 175-181 (1995).
- 허우명, 김범철, 김윤희, 달방댐 유입수의 강우에 따른 인 농도 변화와 인부하량, *한국육수학회지*, **32**, pp. 43-48 (1999).
- 허인량, 최지용, 김영진, 정의호, 강원영서지역 하수처리장이 수질에 미치는 영향, *한국환경보건의학회지*, **31**(4), pp. 235-240 (2005).
- 환경부, 호소환경조사기법개발에 관한 연구 (2001a).
- 환경부, 하수도법시행규칙 (2001b).
- 환경부, 환경백서 (2006a).
- 환경부, 물환경관리기본계획 (2006b).
- 환경부, 하수도통계 (2002-2006c).
- 金甲守, 韓國における汚水処理システムの動向と課題, 用水と廢水, **45**(10), pp. 955-966 (2003).
- 小市佳延, 福嶋 悟, 河川における環境基準達成のため要因に関する研究, 横浜市環境科学研究所報 - 柏尾川水系 -, 横浜市環境科学研究所報, **28**, pp. 11-19 (2004).
- 小市佳延, 福嶋 悟, 下村光一郎, 河川における環境基準達成のため要因に関する研究 - 鶴見川水系 -, 横浜市環境科学研究所報, **29**, pp. 11-19 (2005).
- 日本国土交通省, 下水道法 (2005).
- 滋賀縣琵琶湖環境部, 滋賀縣の下水道事業 (2004).
- APHA, Standard Methods for Examination of water and wastewater, 20th ed. American Public Health Association, Washington, D.C., USA. (1998).
- Correll, D. L., The role of phosphorus in the eutrophication of receiving waters: a review, *J. Environ. Qual.*, **27**, pp. 261-266 (1998).
- Elser, J. J., Marzolf, E. R. and Goldman, C. R., Phosphorus and nitrogen limitation of phytoplankton growth in the freshwaters of North America: A review and critique of experimental enrichments, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **47**, pp. 1468-1477 (1990).
- Forsberg, C. and Ryding, S. O., Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 Swedish waste-receiving lakes, *Arch. Hyrobiol.*, **89**, 189-207.
- Hecky, R. E. and Kilham, P., Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: A review of recent evidence on the effects of enrichment., *Limnol. Oceanogr.*, **33**, pp. 796-822 (1988).
- Hecky, R. E., Campbell, P. and Hendzel, L. L., The stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in particulate matter of lakes and oceans, *Limnol. Oceanogr.*, **38**, pp. 709-724 (1993).
- Heiskary, S. and Wilson, B., *Minnesota Lake Water Quality Assessment Report: Developing Nutrient Criteria*, 3rd ed., Minnesota Pollution Control Agency (2005).
- Horne, A. J. and Goldman, C. R., *Limnology*, McGraw-Hill Co., New York (2001).
- Hwang, S-J., Kwun, S-K. and Yoon, C-G., Water quality and limnology of Korean reservoirs, *Paddy and Water Environ.*, **1**, pp. 43-52 (2003).
- Kim, B., Park, J-H., Hwang, G. S. and Choi, K. S., Eutrophication of Large Freshwater Ecosystems in Korea, *Korean Journal of Limnology*, **30**(Supplement), pp. 512-517 (1997).
- OECD, Eutrophication of Waters: Monitoring, assessment and control. Organization for Economic and Co-operative Development, Paris, France (1982).
- Redfield, G. W. and Vincent, W. F., Stages of infection and ecological effects of a fungal epidemic on the eggs of a limnetic copepod, *Freshwat. Biol.*, **9**, pp. 503-510 (1979).
- Wetzel, R. G., *Limnology*, 3rd. ed. Academic Press, pp. 239-288 (2001).