

팔당호 상류수계에 위치한 공공 하수종말처리시설의 총인 배출 최적관리

우영국 · 박은영* · 전양근** · 정명숙*** · 임재명†

강원대학교 토목공학과
*강원대학교 환경공학과
**환경시설관리공사
***한강물환경연구소

Optimal Management Scheme for Phosphorus Discharged from Public Sewage Treatment Plant Located in Upstream Basin of Paldang Lake

Younggug Woo · Eunyoung Park* · Yangkun Jeon** · Myungsuk Jeong*** · Jaymyung Rim†

Department of Civil Engineering, Kangwon National University

*Department of Environmental Engineering, Kangwon National University

**Research and Development Center, Environmental Facility Management Co. Ltd.

***Han River Environmental Research Center, Institute of Environmental Research

(Received 27 September 2010, Revised 25 February 2011, Accepted 8 March 2011)

Abstract

The purpose of the study is to optimally manage sewage treatment plant with analysis of phosphorus contribution and improvement of water quality contributing rate in the effect of inflowing point of effluent and Pal-Dang lake after reducing T-P discharge from large scale public sewage treatment plant at upstream of Pal-Dang lake. Also, this study, for enforcement of T-P in effluent, plans optimal management of effluent T-P through examining propriety of environmental, technological, and economical aspect such as water quality standard of domestic and foreign T-P and related policy. In regarding optimal management of T-P discharged from public sewage treatment plant located in upstream of Pal-Dang lake, the study drew following conclusions. With the optimal management of public sewage treatment plant, it showed that a pollution level became higher in the order of Sumgang E in South-Han river, C in Dalcheon, B1·B2, A in North-Han river, and J in Kyungancheon, and it is required reduction of T-P first. The highest value in analysis of benefit-costs from sewage treatment plant in the selected research area was Kyungan B, and the others are with the order of Jojong A, Bokha A, Kyungan A, and Yanghwa A. With result of this study, all 14 areas are required more enforced phosphorus treatment. The study resulted that the most top priority areas were Hangang F, Sumgang B, and Gyungan A, top priority areas were Bokha A, Dalcheon B, and Cheongmi A, priority areas were Hangang E, Heukcheon A, Gyungan B, and Jojong A, and potential areas were Sumgang A, Yanghwa A, Dalcheon A, and Hangang D. It seems to be appropriate to apply 0.2 mg/L of T-P treatment for water supply source reservation, 0.5 mg/L for the other areas by locally, and 0.2~0.5 mg/L for biological nitrogen·phosphorus treatment method and 0.5~1 mg/L for Conventional Activated Sludge by technologically. Also, it may be appropriate to apply 0.2 mg/L for the most top priority area(I), 0.3 mg/L for the top priority area(II), 0.4 mg/L for priority area(III), and 0.5 mg/L for potential area(IV) by the separation of priority area.

keywords : Optimal management of T-P, Optimal management of watershed, Pal-Dang lake, Public sewage treatment plant, T-P contribution rate

1. 서론

수도권 지역의 중요 상수원인 팔당호는 1973년에 축조된 인공호로서 유역의 총 면적은 23,800 km²로서 북한강 유역이 37%, 남한강 유역이 60%, 경안천 유역이 3%를 차지하고 있다. 주요 상수원인 팔당호의 수질개선을 위하여 그동안 다양한 규제제도 및 환경기초시설의 설치 및 확대 등에 막대한

비용을 투자해 왔으나 그 성과는 만족스럽지 못한 실정이다.

이로 인해 봄철 등의 저수기 및 갈수기에는 호소의 부영양화로 인한 수질악화 현상이 빈번히 발생하고 있다. 특히 부영양화의 제한인자로 알려진 총인의 경우 이미 OECD 영양단계기준에서 부영양(0.1~0.035 mg/L)단계에 해당하는 수질을 나타내고 있으며 2001년 이후에는 0.05 mg/L 이상을 유지하며 지속적인 증가추세를 보이고 있다(한강유역관리청, 2006). 한편 총인의 수질 개선을 위해 다양한 연구와 노력이 지속되고 있다(김범철 등, 2007; 하주현 등, 2009;

† To whom correspondence should be addressed.
jmrim@kangwon.ac.kr

한미덕 등, 2009; Raymond et al., 1980).

정부에서도 1996년 이후 하천 및 호소에 부영양화를 발생시키는 질소 및 총인 등의 영양염류의 제거를 위하여 방류수 수질기준을 설정하고 신규 하수종말처리장 및 기존 운영 중인 하수종말처리장에 생물학적 영양염류 제거공정(BNR)을 도입하여 지속적으로 수질을 개선하고 있다. 점오염원의 대규모 배출원인 환경기초시설의 배출수질 관리는 팔당호의 부영양화 방지를 위한 수질관리계획과 연계되어 향후에도 계속적으로 개선되어야 할 부분이다.

또한 부영양화 발생의 주요 원인인 총인의 체계적인 관리가 상대적으로 미흡하다고 판단하여 공공수역의 부영양화 방지를 위해 2011년부터 총인 기준 농도를 0.2~0.5 mg/L로 지역별로 차등화 시키고 있으며 기존 환경기초시설의 총인 처리 공정을 보완하고 있는 상태이다(환경부, 2010b). 이러한 방류수 수질기준의 차등적 강화는 방류수계의 특성 및 수처리 현황, 수계에 대한 수질기여도, 방류수질 개선에 따른 효과 등 다양한 요소가 고려되어 차등적인 적용권역이 설정될 필요가 있으며 이를 위해서는 의사결정이 이루어지는 합리적인 과정이 요구된다.

국내에서도 공공투자사업 정책평가나 우선순위 결정에 다기준의사결정분석을 적용한 사례를 발견할 수 있다. 계층화분석기법(analytical hierarchy process, AHP)을 적용하여 중요도(가중치)를 결정하고 이를 각각의 평가기준에 적용하는 것과 순위결정방법(outranking method)을 적용한 사례가 있다. 수자원분야에 계층화분석기법의 적용 사례로는 가뭄기의 댐 운영시 생활용수, 공업용수, 농업용수, 하천유지용수 등과 같은 용수 분배의 우선순위를 결정하거나(이현재와 심명필, 2002), 하천의 등급화를 위한 순위해석 문제에 대해서 충주댐을 대상으로 다목적 댐의 운영을 평가에 적용된 사례가 있다(고석구 등, 1992; 김양일과 고석구, 1992).

본 연구의 목적은 첫째 수도권 상수원 상류지역에 위치한 대규모 하수종말처리시설의 배출원에서 방류되는 총인의 배출량을 삭감시켜 방류수계 및 팔당호 유입지점에 미치는 인 기여도 분석을 통하여 공공 하수종말처리시설의 총인을 최적관리를 하고자 하였고, 둘째 수계별 관리구역을 차별화한 유역의 최적관리를 위하여 단위유역별 인기여도 분석, 비용-편익분석 등을 통하여 유역의 최적관리를 위한 인 처리 적용권역 및 우선적용구역 순위를 설정하였고, 셋째 방류수 총인 강화를 위하여 국내·외 방류수 총인의 수질기준과 총인규제 관련정책 등 환경적, 기술적, 경제적 측면에서 타당성을 검토하여 방류수 총인의 최적관리를 도모하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1. 연구대상 및 범위

본 연구는 ‘팔당호 상류수계에 위치한 환경기초시설의 인 기여도 분석’(우영국 등, 2010)에 사용된 환경기초시설 자료, 수질자료, 모델링 수행방법, 오염원자료를 활용하여 연구를 수행하였다. 연구대상지역의 범위는 Fig. 1에 나타나

있으며 세부적인 수계 및 단위유역은 Table 1에 구분되어 있다. 팔당호 상류의 주요 3개 수계(남한강, 북한강, 경안천)로서 남한강 수계는 충주댐 방류지점, 북한강 수계는 청평댐 방류지점, 경안천 수계는 수계내 최상류 조사지점에서부터 팔당호 유입지점까지를 연구대상 구역으로 설정하였으며 팔당호 상류지역에 위치한 공공 하수종말처리시설들에 대해 연구가 수행되었다.

또한 본 연구에서 수행되는 부하량 산정, 환경기초시설들의 인 기여도 분석, 인 처리 적용권역 설정 등의 주요 분석방법은 수질오염총량관리제(환경부, 2006)에서 분류되는 단위유역을 기초로 하여 수계별, 유역별, 단위유역별로 구분하여 연구를 수행하였다.

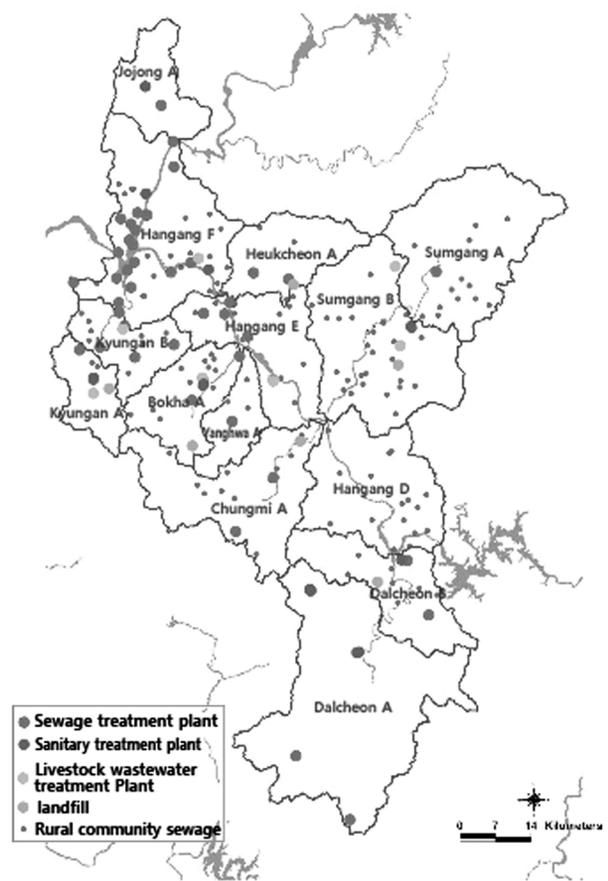


Fig. 1. Unit-watershed in study area.

2.2. 하수종말처리시설의 총인 최적관리

하수종말처리시설의 총인최적관리를 위한 오염기여도 분석은 수질관리 목표지점에 대한 유하거리, 배출유량 및 수질에 의한 배출부하량에 의해 결정된다. 대규모 하수종말처리시설의 팔당호 유입지점(남한강, 북한강, 경안천 말단지점)에 대한 시설별 개별적 인 기여도를 분석, 수계분류 및 지류별 인 기여도 분석, 단위유역별 인 기여도 분석의 3가지 방법에 대한 수질모델링을 통한 인 기여도를 분석하였다(우영국, 2011; 한강물환경연구소, 2009).

각각의 하수종말처리시설에 의한 인 기여도를 분석하기 위하여 하수종말처리시설의 배출농도에 대한 최대 삭감을

통해 개선시킬 수 있는 수계의 수질개선능도를 모델링을 통해 분석하였다. 하수종말처리시설이 수계의 수질에 기여하는 오염기여도를 산정하기 위해서는 본 연구대상 유역 내에 위치한 55개 주요 하수종말처리시설을 대상으로 총인 배출농도를 0 mg/L으로 설정하여 모델링을 수행하였을 경우 개선되는 수질의 차를 분석함으로써 하수종말처리시설에 의해 가증되는 수질의 오염기여도를 산정하였다. 전체 하수종말처리시설에 의해 수질에 미치는 오염기여도를 100%로 할 경우 각각의 하수종말처리시설의 배출 삭감에 의해 수질이 개선되는 값을 분석하여 각 하수종말처리시설별 오염기여도를 분석하였다(우영국 등, 2010).

2.3. 유역의 최적관리

권역별 하수종말처리시설들의 인 기여도 분석, 비용-편익 분석, 상수원보호구역, 취수원 현황, 오염원 증가율, 환경기초시설 추가 설치계획 등을 평가인자로 선정하고 각각의 배점은 총 10점 만점으로 권역별 인 기여도 4점, 권역별 B/C rate 3점, 상수원보호구역 및 취수원 2점, 환경기초시설 설치계획 1점으로 구성하여 평가하였다.

인 기여도는 기여율 15%이상 4점, 10~15% 3점, 5~10% 2점, 1~5% 1점, 0% 0점의 기준을 두었으며 B/C의 경우에는 권역별 상위 1~4위를 1그룹으로, 5~8위를 2그룹으로, 9~12위를 3그룹으로, 환경기초시설이 없어 B/C를 산출할 수 없는 2개 권역을 4그룹으로 구분하여 1그룹에 3점, 2그룹에 2점, 3그룹에 1점, 4그룹에 0점을 부여하였다.

권역별 상수원보호구역 및 취수원에 대해서는 둘다 있는 경우 2점, 취수원만 있는 경우 1점, 둘다 없는 경우 0점을 부여하였으며 권역별 환경기초시설 설치계획은 2015년까지 10,000톤/일 이상 규모의 환경기초시설을 신설 또는 증설할 경우 1점을, 10,000톤/일 미만인 경우 0.5점을, 추가 설치계획이 없는 경우 0점을 부여하였다. 이들 평가인자에 가중치를 두어 총점을 평가하는 방식으로 인 처리 적용권역 및 우선 적용권역을 설정하여 유역의 최적관리를 하였다.

유역의 최적관리를 위한 비용-편익 분석은 연구대상지역 내 공공 하수종말처리시설을 현장방문 조사를 통한 실측자료와 관련문헌을 활용하여 산정하였다(최종수와 김형복, 2003; 한강수계오염총량관리조사·연구반, 2005; 한국토지공사, 2001; 환경관리공단, 2008).

본 연구의 비용-편익분석에 있어서 비용은 방류수기준 강화에 따른 직접준수 비용만을 고려하였다. 이 비용은 수질개선을 위한 단계적 총인 처리 도입시설에 대한 투자비 및 운영·관리비로 산정하는 공학적 추정방법을 이용하여 정량화하였다. 또한 편익은 사회적·경제적 파급적 효과를 제외한 하수종말처리시설의 방류수 수질개선을 통한 수계의 수질변화를 정량화하는 방식으로 산정하였다. 이에 따라 비용-편익 분석은 권역별로 시설개선을 위한 투자 및 운영비와 수계의 수질개선효과를 고려하여 분석하였다.

2.4. 총인 방류수 최적관리

총인 방류수 최적관리를 위해서 국내·외 방류수 총인의

수질기준과 총인 관련정책 등을 비교 검토하고 환경적, 기술적, 경제적 측면에서 타당성을 검토하여 적정 규제농도를 선정할 후 총인 방류수 최적관리 범위를 설정하였다. 하수종말처리시설의 인기여도 분석, 유역의 최적관리의 평가 결과와 현실적인 여건을 감안하고 현행의 배출기준 강화정책, 지역별, 공법별, 권역별 차등적으로 적용하였다.

기존 하수종말처리장에서 총인을 추가로 제거하려는 궁극적인 목적은 호소의 조류발생을 억제하여 양질의 상수원을 확보하여 국민의 건강을 책임지는 질 높은 수돗물을 생산하는데 있다. 따라서 방류수 총인의 지역적 차등적용은 상수원을 중심으로 이루어져야 하며 결국 상수원관리지역(상수원보호구역, 수변구역)과 그 외 지역을 구분하여 적용되어야 할 것이다.

환경부에서 발표한 2008년 하수도통계(환경부, 2009a) 자료에 의하면 우리나라 총 하수처리용량은 23,946,298 m³/d이며, 14,865,876 m³/d은 표준 활성 슬러지공법을 기초로 한 생물학적 처리공법으로 운영 중에 있으며, 9,080,312 m³/d은 질소/총인 제거공정을 포함한 고도처리공법으로 운영 중에 있다. 따라서 각 공법별 인의 처리효율도 각각 다르게 나타나기 때문에 본 연구에서는 현장에 적용될 하수종말처리장에서 운영상 처리 가능한 총인 농도를 제시하였다.

권역(단위유역)별 차등적용에 의한 방류수 총인 강화방안은 본 연구에서 수행한 인 처리 적용권역 및 우선 적용구역 설정의 과정을 활용한 방법으로 권역(오염총량관리제도의 단위유역)별로 상수원에 미치는 인 기여도와 상수원보호구역 및 환경기초시설 설치계획 등을 고려하여 순위를 산정하고 상위부터 그룹화 하여 그룹별로 차등적용 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 하수종말처리시설의 총인 최적관리

보정 및 검증이 완료된 수질모델을 사용하여 팔당호 상류의 남한강, 북한강, 경안천 수계의 연구대상지역내에 위치한 하수종말처리시설에서 방류되는 총인의 배출량을 삭감시킬 경우 방류수계 및 팔당호 유입지점에 미치는 인 기여도를 분석하여 하수종말처리시설의 총인 최적관리를 하였다. 주요지점별 인 기여도 자료는 각 하수종말처리시설별 인 기여도 분석, 인접 수계에 대한 인 기여도, 단위유역별 하수종말처리시설에 대한 인 기여도를 세 가지 관점에서 다양하게 분석하였다(우영국, 2011; 한강물환경연구소, 2008).

분석된 인 기여도의 결과를 보면 Table 1과 같이 북한강, 경안천, 남한강을 통해 팔당호로 유입하는 각각의 세 지점의 기여율을 지점별로 100%로 설정하고 각 수계에 해당하는 하수종말처리시설의 기여율을 통하여 권역별 기여율과 수계 기여율을 도출하였다. 도출된 인 기여율은 하수종말처리시설의 인 기여도를 바탕으로 수계별(북한강, 남한강, 경안천) 팔당호 유입지점을 각각 100%로 설정하여 분석한 자료이므로 권역별로 인 기여율을 비교하기 위해서는 북한강, 남한강, 경안천 3개 수계의 합을 총 100%로 설정하여 팔당호에 미치는 권역별 기여율을 분석하였다.

Table 1. Phosphorus contribution rate for each unit-watershed and sewage treatment plant

Basin	Watershed T-P contribution		Unit watershed T-P contribution		Sewage treatment plant T-P contribution		Paldang lake
	Watershed	Contribution rate (%)	Unit watershed	Contribution rate (%)	Sewage treatment plant	Contribution rate (%)	
North-Han river	Main stream of North-Han river	75	Hangang F	75	B1	50	100%
			Jojongcheong	25	Jojong A	25	
Kyungan cheon	Kyungancheon	100	Hangang F	12.1	M	10.4	100%
			Kyungan A	72.6	J	55.6	
			Kyungan B	15.3	S3	6.9	
				K	6.3		
					S	0.7	
L	20.1						
South-Han river	Main stream of South-Han river	23.1	Hangang F	6.7	I	6.7	100%
			Hangang E	6.7	G	6.7	
			Hangang D	0			
	Dalcheon	30.8	Dalcheon A	0			
			Dalcheon B	20.0	C	20.0	
	Bokhacheon	15.4	Bokha A	13.3	H	13.3	
	Sumgang	23.1	Sumgang A	0			
			Sumgang B	40.0	E	40	
	Yanghwacheon	0	Yanghwa A	0			
	Chungmicheon	7.7	Cheongmi A	13.4	H1	6.7	
W					6.7		
Heukcheon	0	Heukcheon A	0				

Table 2. T-P loading and contribution rate in lake Paldang

Basin	Paldang lake		Unit watershed T-P contribution		
	T-P loading (kg/d)	Loading rate (%)	Unit watershed	Watershed contribution rate (%)	Paldang lake contribution rate (%)
North-Han river	36.33	9.3%	Hangang F	75	7.0
			Jojong A	25	2.3
Kyungan cheon	113.47	28.9%	Hangang F	12.1	3.5
			Kyungan A	72.6	21.0
			Kyungan B	15.3	4.4
South-Han river	242.62	61.8%	Hangang F	6.7	4.1
			Hangang E	6.7	4.1
			Hangang D	0	0
			Dalcheon A	0	0
			Dalcheon B	20.0	12.3
			Bokha A	13.3	8.2
			Sumgang A	0	0
			Sumgang B	40.0	24.7
			Yanghwa A	0	0
			Cheongmi A	13.4	8.3
Heukcheon A	0	0			

따라서 Table 2와 같이 3개 수계에 대한 기여율로 산출된 권역별 인 기여도를 수계별 하수종말처리시설이 팔당호에 미치는 총인 부하량 비율을 고려하여 팔당호를 기준으로 다시 산출하였다. 산출결과 팔당호에 가장 큰 영향을 미치는 권역은 시설용량 130,000 m³/d의 대규모 하수종말처리장이 위치한 섬강B로 팔당호 기준 인 기여율 24.7%를

나타내고 있다.

각 권역별 인 기여도는 권역에 해당되는 하수종말처리시설의 인 기여도를 바탕으로 산출되었으나 인 기여도의 기준점이 팔당호 유입지점이므로 팔당호로 직접 방류되는 하수종말처리시설 9개소가 제외된 46개소에 대한 분석결과를 통하여 산출되었다. 남한강, 북한강, 경안천을 통하여 팔당

Table 3. T-P loading and contribution rate for each unit-watershed

Watershed	No. of facilities	Treatment capacity (m ³ /d)	Effluent loading of T-P (kg/d)	Contribution rate by delivery (%)
Kyungan A	2	44,672	75.58	21.0
Kyungan B	3	17,668	8.27	4.4
Dalcheon A	6	11,778	9.40	0
Dalcheon B	2	61,130	48.88	12.4
Bokha A	3	28,804	31.32	8.2
Sumgang A	1	5,637	4.55	0
Sumgang B	3	101,535	107.92	24.7
Yanghwa A	1	685	0.73	0
Jojong A	1	2,893	2.24	2.3
Cheongmi A	2	12,532	12.45	8.3
Hangang D	0	-	-	0
Hangang E	6	14,502	16.79	4.1
Hangang F	14	95,015	72.84	14.6
Heukcheon A	2	2,387	1.45	0

호로 유입되는 지점이 각각 다르고 각 수계별로 팔당호에 미치는 인 기여율이 각각 상이하므로 권역별 하수종말처리 시설의 인 기여도 분석 자료에 각 수계별 팔당호 유입지점의 총인 부하량을 고려한 기여율을 산출하여 Table 3에 나타내었다.

3.2. 유역의 최적관리

팔당호의 수질개선을 위하여 연구대상 지역에 위치한 하수종말처리시설들의 방류수 수질을 개선할 경우에 투자되는 비용(시설투자비 및 유지관리비)과 편익(수질개선효과)을 분석하여(한강물환경연구소, 2009) 각 권역별 비용-편익을 Table 4에 나타내었다.

비용-편익 분석 중 비용부분은 대상수계의 수질(총인)개선을 위한 유역내 하수종말처리시설 시설투자비와 유지관리비 등의 직접준수비용을 의미하며 이 가운데 유지관리비

는 2008년도 시설별 유지관리비에 방류수 수질개선에 따라 추가로 소요되는 유지관리비를 포함한 비용을 적용하였다. 편익부분은 배출부하량 저감에 의한 수질개선농도(mg/L)를 수질모델링 수행하여 제시하였으며 팔당호로 유입되는 3개 본류하천(북한강, 남한강, 경안천)과 8개 지류하천(조종천, 달천, 섬강, 원주천, 청미천, 양화천, 복하천, 흑천)에 대하여 각각 분석하였다. 투자비용은 현재의 각 하수종말처리시설들의 처리형태 및 현황의 검토를 현장조사를 통해 분석되었다. 이와 같은 과정을 거쳐 분석된 자료를 바탕으로 권역별 B/C 값을 산출하였다. 여기에서의 B/C 값은 경제학적인 개념으로 사용되는 B/C율이 아닌 투자비 100만원당 개선되는 총인 농도(mg/L)를 나타내었다. 여기서 하수종말처리시설의 방류수 농도를 0.2 mg/L로 강화하였을 경우 총인 부하 저감에 따른 수질개선 효과 및 비용-편익 분석결과를 나타내었다. 비용대비 가장 큰 편익을 보이는 권역은

Table 4. Analysis of benefit-costs for each watershed (T-P 0.2 mg/L)

Watershed	Cost (Million won)			Benefit (mg/L)			B/C	B/C × 10 ⁶
	Before improvement ¹⁾	After improvement ²⁾	Additional cost	Before improvement ¹⁾	After improvement ²⁾	Concentration improved		
Gyungan A	3,565	3,835	260	0.164	0.092	0.072	2.76923E-04	276.92
Gyungan B	1,405	1,417	12	0.071	0.040	0.031	2.58333E-03	2,583.33
Dalcheon A	1,453	3,187	1,734	0.074	0.036	0.038	2.19146E-05	21.91
Dalcheon B	2,767	8,431	5,664	0.003	0.001	0.002	3.53107E-07	0.35
Bokha A	1,635	1,796	161	0.166	0.105	0.061	3.78882E-04	378.88
Sumgang A	540	1,278	738	-	-	-	-	-
Sumgang B	7,784	15,149	7,365	0.145	0.079	0.066	8.96100E-06	8.96
Yanghwa A	83	93	10	0.214	0.213	0.001	1.00000E-04	100.00
Jojong A	1,188	1,278	90	0.069	0.010	0.059	6.55556E-04	655.55
Cheongmi A	823	2,499	1,676	0.168	0.147	0.021	1.25298E-05	12.53
Hangang D	-	-	-	-	-	-	-	-
Hangang E	1,268	2,757	1,489	0.051	0.041	0.010	6.71592E-06	6.72
Hangang F	9,131	9,535	404	0.035	0.026	0.009	2.22772E-05	22.28
Heukcheon A	401	529	128	0.019	0.013	0.006	4.68750E-05	46.87

1) Before improvement : Maintenance and Management Expenses of Environmental Facilities of Each Basin in 2008.
 2) After improvement : Total Cost When Improved to 0.2mg/l of Discharged Phosphorus Density. (Facility Investment + Maintenance and Management Expenses)

2,583.33×10⁶을 나타낸 경안B이며 그 뒤로 조종A, 복하A, 경안A, 양화A 순으로 나타났으며 비용대비 가장 낮은 편익을 나타낸 권역은 달천B로 나타났다.

이러한 결과는 각 권역에 속한 하수종말처리시설의 용량 및 총인 방류 부하량과 총인 처리 공정의 추가설치 여부에 따른 초기 시설투자비용이 가장 큰 요인으로 작용하였다. 경안B의 경우 권역내의 모든 하수종말처리시설에 총인 처리 공정이 이미 도입되어 있으므로 별도의 시설투자비가 소요되지 않았으며 수질개선효과는 높았으므로 가장 높은 B/C를 나타내었다.

유역의 최적관리를 위하여 권역별 인 기여도, 상수원 보호구역, 환경기초시설 설치계획 등 권역별 현황을 조사하였으며 각각의 인자에 대해 점수를 부여하여 권역별 서열화를 통해 유역의 최적관리 방법을 설정하였다. 유역의 최적 관리에 사용된 평가인자는 인 기여도분석, 비용-편익분석, 상수원보호구역 유무, 취수원 유무, 오염원증가율, 환경기초 시설 추가설치계획에 의해 효율적인 인 처리 적용권역 및 우선적용구역을 설정하였다. 각 평가인자에 대한 단위유역

별 분석 결과를 Table 5에 나타내었다.

인 처리 적용권역은 각 권역별 평가인자 가운데 중요 요소인 권역별 인 기여도, 상수원 보호구역 지정현황, 환경기초시설 추가 설치계획의 세 가지 인자를 활용하여 인자별 적용권역을 설정하고 각 인자별 적용권역을 취합하여 최종 적용권역을 설정하였다. 그 외에 적용권역 설정에서 배제된 권역별 비용-편익, 취수원 현황 및 오염원 증가율은 적용권역 설정 후 인처리 우선 적용구역을 설정하는 단계에서 별도의 점수를 부여하여 활용하였다.

Table 6은 3가지의 인 처리 적용권역 평가인자에 따른 결과를 살펴보면 인 기여도에 의해서는 총 14개 권역 중 9개 권역이 적용권역으로, 5개 권역이 적용외 권역으로 선정되었고 상수원보호구역에 의해서는 7개의 적용권역과 7개의 적용외 권역이, 환경기초시설 설치계획/장래 오염원 증가율에 의해서는 12개의 적용권역과 2개의 적용외 권역으로 구분되었다.

인 처리 적용권역은 세 가지 인자 중 한 가지 이상에서 적용권역으로 만족할 경우 인 처리 적용권역으로 선정하는

Table 5. Analysis results of estimation factors for each watershed

Watershed	T-P contribution rate (%)	B/C × 10 ⁶	Water conservation area	Water intake sources	Increase rate of pollutants (%)	Plan for additional facility (ton/d)
Gyungan A	21.0	276.92	×	×	- 6.1	23,800
Gyungan B	4.4	2,583.33	×	×	- 6.1	2,520
Dalcheon A	0	21.91	×	○	- 4.0	4,300
Dalcheon B	12.4	0.35	○	○	- 4.0	-
Bokha A	8.2	378.88	×	○	15.9	4,200
Sumgang A	0	-	○	○	6.9	350
Sumgang B	24.7	8.96	○	○	6.9	13,500
Yanghwa A	0	100.00	×	×	15.9	4,000
Jojong A	2.3	655.55	×	×	6.1	-
Cheongmi A	8.3	12.53	○	○	15.9	60,955
Hangang D	0	-	×	×	2.3	2,700
Hangang E	4.1	6.72	○	○	15.9	21,000
Hangang F	14.6	22.28	○	○	13.1	29,450
Heukcheon A	0	46.87	○	○	15.9	2,300

Table 6. Final selection of T-P priority area

Watershed	T-P contribution rate	Water conservation area	Plan for additional facility /Increase rate of pollutants	Final selection result
Gyungan A	○	×	○	Priority area
Gyungan B	○	×	○	Priority area
Dalcheon A	×	×	○	Priority area
Dalcheon B	○	○	×	Priority area
Bokha A	○	×	○	Priority area
Sumgang A	×	○	○	Priority area
Sumgang B	○	○	○	Priority area
Yanghwa A	×	×	○	Priority area
Jojong A	○	×	×	Priority area
Cheongmi A	○	○	○	Priority area
Hangang D	×	×	○	Priority area
Hangang E	○	○	○	Priority area
Hangang F	○	○	○	Priority area
Heukcheon A	×	○	○	Priority area

것을 원칙으로 한 결과 총 14개 권역 전체가 최종 인 처리 적용권역으로 선정되었다. 따라서 각각의 평가 인자에 대한 배점과 가중치를 부여하고 각 권역별로 평가인자의 배점에 의하여 점수를 산정한 뒤 권역별로 서열화하여 우선 적용 구역을 선정하였다.

인 처리 우선 적용구역 설정 종합평가 결과는 Table 7에 나타내었다. 한강F, 섬강B, 경안A가 공동 1순위로 가장 먼저 인 처리 시설이 적용되어야 할 것으로 나타났으며 다음으로 북하A, 달천B, 청미A순으로 나타났다. 한강D는 가장 낮은 점수를 보이는 것으로 나타났다.

이와 같이 결정된 인 처리 적용권역의 순위를 Fig. 2에 나타내었으며 권역별 총점을 활용한 그래프를 활용하여 권역별 격차를 고려 인 처리 적용권역을 최우선적용권역(I), 우선적용권역(II), 적용권역(III), 잠재적용권역(IV)으로 구분하였다.

권역별 인 처리 적용 우선순위를 활용하여 총 14개 권역의 그룹을 설정한 결과 최우선적용권역에 한강F, 섬강B, 경안A의 3개 권역이 우선적용권역에 북하A, 달천B, 청미A의 3개 권역이 일반적용권역에 한강E, 흑천A, 경안B, 조종

A의 4개 권역이 잠재적용권역에 섬강A, 양화A, 달천A, 한강D의 4개 권역이 설정되었다. 최우선적용권역은 팔당호 상수원의 수질을 개선하기 위하여 추가적인 인 처리 공정을 도입할 경우 가장 우선으로 도입되어야 하며 그에 따른 수질개선효과도 가장 뚜렷하게 나타나는 권역을 의미한다. 그 뒤로 우선적용권역과 일반적용권역은 순차적으로 도입되어야 할 것으로 판단된다. 잠재적용권역은 팔당호에 미치는 인 기여도가 거의 없는 것으로 판단된다.

3.3. 총인 방류수 최적관리

총인 방류수 최적관리를 위해 국내·외 총인 방류수 수질 기준 검토 및 수질개선 측면, 기술적 측면, 경제적 측면 등 관련 정책과 비교 검토하였다. 정부의 물 환경관리 기본계획에서는 각 수계 중권역의 85%를 좋은 물 이상으로 개선하기 위하여 수계영향권별 목표수질을 설정하였고 그에 따라 각 권역별 물 환경 목표기준 및 달성기간을 수립하였다.

국내의 총인 방류수 수질기준은 2002년 1월부터 팔당호 상수원 수질보전특별대책지역과 잠실수중보권역의 총인 배출농도를 2 mg/L까지 강화시켰고 2004년 1월부터는 한강,

Table 7. Ranking of priority area for T-P treatment

Watershed	T-P contribution rate	B/C	Water conservation area	Plan for additional facility	Total score	Rank
Hangang F	3	2	2	1	8	1
Sumgang B	4	1	2	1	8	
Gyungan A	4	3	0	1	8	
Bokha A	2	3	1	0.5	6.5	2
Dalcheon B	3	1	2	0	6	3
Cheongmi A	2	1	2	1	6	
Hangang E	1	1	2	1	5	4
Heukcheon A	0	2	2	0.5	4.5	5
Gyungan B	1	3	0	0.5	4.5	
Jojong A	1	3	0	0	4	6
Sumgang A	0	0	2	0.5	2.5	7
Yanghwa A	0	2	0	0.5	2.5	
Dalcheon A	0	2	0	0.5	2.5	
Hangang D	0	0	0	0.5	0.5	8

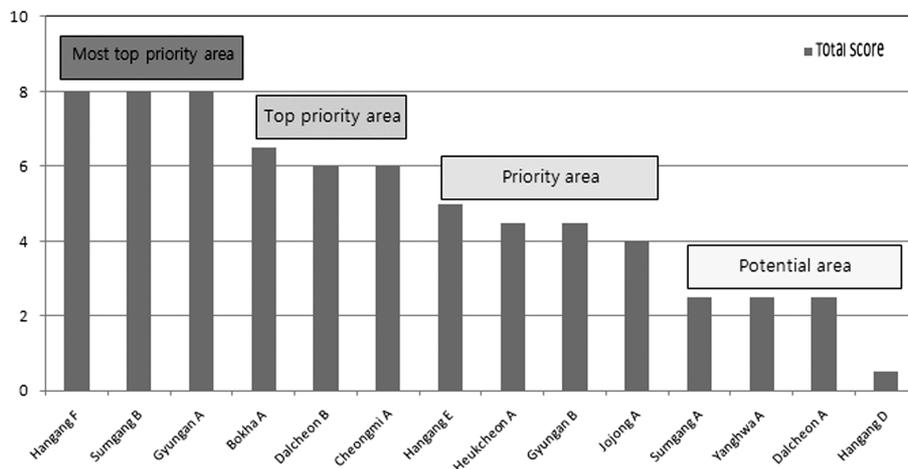


Fig. 2. Classification of priority areas by total score.

낙동강, 금강, 영산강, 섬진강 수계지역까지 확대하여 적용하였으며, 현재까지 2 mg/L로 규제하고 있으며(환경부, 2010a), 실제 하수종말처리장에서 현재 방류하고 있는 총인 농도는 0.8~1.2 mg/L 수준을 나타내고 있다.

국외의 총인 방류수 수질기준은 0.1~2.0 mg/L의 규제 범위를 가지고 있고, 일본이나 독일의 총인 수질기준이 0.5~1.0 mg/L이며, 국내 하수처리장의 방류수가 1 mg/L 내외로 방류하고 있는 점을 고려할 때 국내의 기준도 강화될 필요가 있을 것으로 판단된다(환경부, 1996; EPA, 2007; Water quality in the European Union, 1991).

또한 모델링을 통한 수질개선 측면을 살펴보면 하수종말처리시설의 방류수 총인 농도를 저감하였을 때 목표 총인 농도별 개선되는 하천의 총인 수질과 등급을 살펴보면 아래의 Table 8과 같다. 3개 수계의 수질개선 효과를 보면 북한강은 현재 수질이 양호하며 하수종말처리시설에서 배출되는 총인 부하량이 적어 총인 기여도가 낮으므로 목표 총인 수질을 0.1 mg/L 까지 강화시켜도 큰 변화는 보이지 않고 있다. 그러나 남한강 및 경안천의 경우 상류지역의 하수종말처리시설의 방류수 총인 농도를 0.3 mg/L까지 강화시키면 하천수질이 1등급 격상되는 것을 알 수 있다. 또한 원주천의 경우 상류지역의 하수종말처리시설의 방류수 총인 농도를 0.1 mg/L로 강화시켰을 때 하천수질은 개선전 0.496 mg/L에서 0.067 mg/L까지 수질개선 효과가 나타날 것으로 판단된다.

방류수 총인을 강화하기 위한 기술적 측면을 검토해 보면 가장 중요하게 검토되어야 할 사항은 기술적으로 처리 가능한 총인 농도이다. 국내 총인처리 실증실험의 결과를

살펴보면 아래의 Table 9에 나타난 바와 같이 4개 처리장에 현장실험을 실시한 결과 총인농도 2.327~3.458 mg/L의 원수가 물리화학적 처리공정을 도입하기 전에는 0.460~0.951 mg/L로 처리되었으며, 물리화학적 처리공정인 약품침전 및 여과설비를 도입한 경우 0.122~0.236 mg/L로 처리되었다(환경부, 2009b). 따라서 기존 하·폐수처리장에 총인 처리공정을 추가 도입할 때 국내 상용화된 기술로 총인 0.2 mg/L까지 처리하여 방류하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

경제적 측면을 살펴보면 인 처리 우선적용권역의 시설투자비는 최우선적용권역에 6,717백만원, 우선적용권역은 6,888백만원, 일반적용권역은 1,481백만원, 잠재적용권역은 2,380백만원이 소요될 것으로 판단된다. 유지관리비는 ton당 개념으로 환산하면 총인 목표 수질 0.2 mg/L 기준으로 톤당 14.8원의 추가처리 비용이 소요될 것으로 판단된다(우영국, 2011).

본 연구에서는 현행의 배출기준 강화정책, 지역적·권역별 차등인자 등을 고려한 총인 방류수 최적관리를 도모하고자 하였다. 이를 위해 총인 방류수 최적관리는 지역적 차등적용, 처리방법별 차등적용, 권역별 차등적용 등 3가지 안에 대한 분석을 수행하였다.

총인 방류수 최적관리의 궁극적인 목적은 호소의 조류발생을 억제하여 부영양화를 방지하고 양질의 상수원을 확보하여 정수장의 효율 및 비용을 절감하고 나아가 국민의 건강을 책임지는 질 높은 수돗물을 생산하는데 있다. 따라서 방류수 총인의 지역적 차등적용은 상수원을 중심으로 이루어져야 하며 이를 위해 상수원보호구역, 수변구역, 기타지역으로 구분하였다. 상수원보호구역에 인접하여 방류되고 있는 하수종말처리시설의 총인 방류수는 0.2 mg/L로 강화

Table 8. Prediction of grade of water quality after the improvement of effluent in environment fundamental facilities

Watershed	Before improvement	Prediction of grade of water quality after the improvement (mg/L)				
		0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
North-Han river	Ib(0.026)	Ib(0.024)	Ib(0.023)	Ib(0.023)	Ib(0.023)	Ib(0.022)
South-Han river	II(0.050)	II(0.043)	II(0.041)	Ib(0.039)	Ib(0.038)	Ib(0.036)
Kyungancheon	IV(0.262)	II(0.189)	III(0.176)	III(0.161)	III(0.147)	III(0.133)
Jojongcheong	II(0.069)	Ib(0.025)	Ia(0.019)	Ia(0.013)	Ia(0.010)	Ia(0.007)
Dalcheon	II(0.077)	II(0.057)	II(0.050)	II(0.044)	Ib(0.037)	Ib(0.030)
Sumgang	III(0.145)	IV(0.102)	II(0.094)	II(0.087)	II(0.079)	II(0.072)
Wonjucheon	V(0.496)	IV(0.244)	IV(0.200)	IV(0.156)	IV(0.112)	II(0.067)
Chungmicheon	III(0.168)	III(0.155)	III(0.152)	III(0.149)	III(0.147)	III(0.144)
Yanghwacheon	IV(0.214)	IV(0.213)	IV(0.213)	IV(0.213)	IV(0.213)	IV(0.212)
Bokhacheon	III(0.166)	III(0.125)	III(0.119)	III(0.112)	III(0.105)	II(0.098)
Heukcheon	Ia(0.019)	Ia(0.017)	Ia(0.016)	Ia(0.014)	Ia(0.013)	Ia(0.011)

Table 9. Field study results for phosphorus removal

Swage treatment plant	T-P treatment process	T-P (mg/L)		
		Raw water	Before treatment	After treatment
A	Chemical precipitation + sand filter + MDF	2.521	0.951	0.156
B	Chemical precipitation + sand filter	3.458	0.460	0.122
C	Chemical precipitation + MDF	2.725	0.755	0.198
D	Chemical precipitation	2.327	0.862	0.236

시키고, 수변구역지역은 0.3 mg/L로 설정하고, 기타 지역은 0.5 mg/L로 다소 완화된 기준을 적용하는 것이다.

처리공법별 차등적용에 의한 총인 방류수 최적관리는 현재 각 하수처리장마다 총인의 처리공법이 달라 공정 후단에 동일한 총인 처리 공정을 추가로 설치하더라도 각각의 처리효율이 상이하게 나타난다. 표준 활성 슬러지공법을 기초로 한 생물학적 처리공법의 경우 총인은 3.602 mg/L로 유입되어 1.478 mg/L로 방류 58.9%의 처리효율을 보였고, 고도처리의 경우 총인은 4.672 mg/L로 유입되어 0.784 mg/L로 방류되어 83.2%의 처리효율을 보였다. 따라서 하수처리장에서 운영 중인 처리공법에 따라 방류수 총인 수질기준을 차등 적용하는 방법을 고려할 수 있다. 또한 총인 처리 공정 도입의 방법(응집후 여과, 부상, 침전) 따라 처리효율에 차이가 있으므로 세부적으로 총인 처리 공정 도입에 따른 방류수 총인 수질기준 차등적용도 고려할 필요성이 있다.

본 연구에서는 공법별 차등적용에 의한 총인 방류수 최적관리는 Table 10에 제시하였으며 기존하수처리장의 공법을 고려한 방법(A)과 총인 제거공정 설치를 고려한 방법(B) 등 2가지 방법을 제시하였다.

권역(단위구역)별 차등적용에 의한 총인 방류수 최적관리는 본 연구에서 수행한 인 처리 적용권역 및 우선 적용구역 설정과정을 활용한 방법으로 권역(오염총량관리제도의 단위구역)별로 상위부터 그룹화 하여 그룹별로 차등적용시키는 방안이다. 상수원 호소에 미치는 인 기여도와 상수원보호구역 및 환경기초시설 설치계획 등을 고려하여 종합평가를 실시하여 순위를 산정하고 그 중요도에 따라 그룹별로 차등 적용시켰다. 이러한 방법은 적용단계가 복잡하고 그 적용방법의 타당성에 대해서 광범위한 논의가 이루어져야 하지만 현재 실시하고 있는 일률적 적용방법이나 위에 제시된 지역적, 공법별 차등방법의 경우 실제 상수원에 가장 큰 영향을 미치는 인 기여도가 높고 총인 배출부하량이 많은 하수종말처리시설이 다른 하수종말처리시설과 동일한 혹은 더 완화된 수질기준을 적용받을 수 있으므로 적극적으로 검토할 필요가 있다고 판단된다.

본 연구범위인 14개 권역에 대한 인 처리 적용권역 및 우선 적용구역 설정에 도출된 결과를 활용하여 방류수 농도를 제시한 결과는 Table 11과 같다. 가장 강화된 방류수

농도를 적용받는 그룹I은 최우선 적용권역으로 분류된 한강F, 섬강B, 경안A의 3개 권역으로 0.2 mg/L의 방류수 농도로 설정되었으며, 잠재적 적용권역인 그룹IV의 섬강A, 양화A, 달천A, 한강D의 4개 권역은 가장 완화된 방류수 농도로 설정되는 것이 합리적일 것으로 판단된다. 또한 II, III, IV그룹의 방류수 농도도 장기적인 수질개선을 위하여 단계적으로 강화하는 것이 필요할 것으로 검토되었다.

4. 결론

본 연구에서는 팔당호 상류수계에 위치한 공공 하수종말처리시설에서 배출되는 총인의 최적관리를 위해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 하수종말처리시설의 인 기여도 분석을 통한 총인 최적관리는 남한강 수계 섬강 E하수처리장과 달천의 C하수처리장, 북한강 B1·B2하수처리장, A하수처리장, 경안천의 J하수처리장 순으로 오염기여도가 높게 나타났으며 이들 하수종말처리시설부터 우선적으로 총인 배출량 삭감이 요구된다. 배출된 총인의 부하량이 팔당호에 유달되는 비율이 높은 단위구역은 섬강A, 경안B, 한강F, 달천B의 순으로 나타났다.
- 2) 구역의 최적관리는 연구대상지역내에 위치한 권역별 하수종말처리시설들의 방류수질을 개선할 경우에 투자되는 비용과 그로 인해 개선되는 수질농도로 분석된 비용-편익 분석에서 가장 높은 B/C 값을 나타낸 권역은 경안B이며, 그 뒤로 조종A, 북하A, 경안A, 양화A 순으로 분석되었다. 인 처리 적용권역 선정 결과는 연구대상지역 총 14개 권역 모두가 인 처리 적용 대상권역으로 나타났으며, 인 처리 우선 적용구역에 대한 분석 결과는 한강F, 섬강B, 경안A가 공동 1순위로 선정되어 최우선적 적용권역으로 설정되었으며, 우선적용권역에 북하A, 달천B, 청미A의 3개 권역, 적용권역에 한강E, 흑천A, 경안B, 조종A의 4개 권역, 잠재적용권역에 섬강A, 양화A, 달천A, 한강D의 4개 권역으로 나타났다.
- 3) 총인 방류수 최적관리를 위한 지역적 차등적용은 상수원보호구역 0.2 mg/L, 수변구역 0.3 mg/L, 기타지역 0.5 mg/L로 차등 적용하는 방법이 타당하다고 판단되고, 공법별 차등적용은 생물학적 질소·인 처리공법의 경우

Table 10. Plan for strengthening the T-P effluent standard by the separation of treatment process

Plan	Standard activated sludge process		Biological nutrients removal	
	Conventional treatment	Filtration, Stirrer/Clarifier	Conventional treatment	Filtration, Stirrer/Clarifier
A	0.5 ~ 1 mg/L		0.2 ~ 0.5 mg/L	
B	1 mg/L	0.6 mg/L	0.4 mg/L	0.2 mg/L

Table 11. Plan for strengthening the T-P effluent concentration by the separation of priority area

Group	I (Best top priority area)	II (Top priority area)	III (Priority area)	IV (Potential area)
Watershed	Hangang F, Sumgang B, Gyungan A	Dalcheon B, Bokha A, Cheongmi A	Hangang E, Heukcheon A, Gyungan B, Jojong A	Sumgang A, Yanghwa A, Dalcheon A, Hangang D
T-P standard (mg/L)	0.2	0.3	0.4	0.5

0.2~0.5 mg/L, 표준 활성슬러지 공법의 경우 0.5~1 mg/L로 차등 적용하는 것이 타당하다고 판단되며, 권역별 차등적용은 인 처리 적용권역의 평가결과를 기준으로 최우선적용권역(I)에 0.2 mg/L, 우선적용권역(II)에 0.3 mg/L, 적용권역(III)에 0.4 mg/L, 잠재적용권역(IV)에 0.5 mg/L로 차등 적용하는 것이 타당하다고 판단된다.

사 사

본 연구는 한강수계관리위원회·국립환경과학원 한강물환경연구소에서 시행한 환경기초조사 사업에 수행된 연구결과이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

고석구, 이광만, 고익환(1992). 다기준의사 분석기법에 의한 다목적 저수지의 운영을 평가. *한국수문학회지*, **25**(1), pp. 83-92.

김범철, 사승환, 김문숙, 이윤경, 김재구(2007). 국내호수의 제한영양소와 하수처리장 방류수 인 기준 강화의 필요성. *수질보전 한국물환경학회지*, **23**(4), pp. 512-517.

김양일, 고석구(1992). 다목적댐의 이수 및 치수관리를 위한 의사 결정 지원 시스템 개발. *한국수문학회지*, **25**(1), pp. 35-41.

우영국(2011). 팔당호 상류지역의 하수종말처리장으로부터 배출되는 총인 최적관리. 박사학위논문, 강원대학교.

우영국, 박은영, 전양근, 양희정, 임재명(2010). 팔당호 상류수계에 위치한 환경기초시설의 인기여도 분석. *수질보전 한국물환경학회지*, **26**(6), pp. 1016-1027.

이현재, 심명필(2002). 계층분석과정(AHP)에 의한 가뭄시 용수배분 우선순위 의사결정. *한국수자원학회지*, **35**(6), pp. 703-714.

최종수, 김형복(2003). 하수처리시설 건설 및 유지관리비용

산출방안. *대한환경공학회지*, **25**(1), pp. 33-37.

하주현, 이해원, 최정현, 박석순(2009). 팔당 상수원 토지이용규제 정책의 문제점과 개선방안. *수질보전 한국물환경학회지*, **25**(6), pp. 855-862.

한강물환경연구소(2008). 상수원 호소 상류지역의 물리 화학적 인처리 공정 타당성검토 1년차 보고서.

한강물환경연구소(2009). 상수원 호소 상류지역의 물리 화학적 인처리 공정 타당성검토(2).

한강수계오염총량관리조사·연구반(2005). 한강수계 제2차 수질오염총량관리 대상물질안 산정.

한강유역환경청(2006). 팔당댐 증권역 물환경관리계획(2008~2012).

한국토지공사(2001). 주택단지내 상수·오수발생량 원단위 산정 및 하수처리시설 소요비용 연구.

한미덕, 이은주, 오조교, 김응수, 이창희, 남궁은, 정육진(2009). 팔당수계 주요하천 수질의 시·공간적 특성. *수질보전 한국물환경학회지*, **25**(3), pp. 394-403.

환경관리공단(2008). 2007 공공하수처리시설 고도처리 실태 점검 결과.

환경부(1996). 하폐수 종말처리장 방류수 수질기준 설정에 관한 연구.

환경부(2006). 한강수계 오염총량 관리계획 수립지침.

환경부(2009a). 2008년 하수도통계.

환경부(2009b). 하수처리시설의 총인처리강화 시범운영연구.

환경부(2010a). 물환경정보시스템. <http://water.nier.go.kr/>.

환경부(2010b). 환경부 보도자료, 생활하수과.

EPA(2007). *Advanced Wastewater Treatment to Achieve Low Concentration of Phosphorus*.

Raymond, C. L., Colleen, S. M., and Walter Rast (1980). *Phosphorus Management Strategies for Lakes*, Ann Arbor Science Publishers, Inc.

Water quality in the European Union. (1991). *Council Directive of 21 May 1991 concerning Urban Wastewater Treatment* (91.271/EEC).