

공공하수처리장의 에너지 소비현황 및 효율성 평가*

조을생**·한대호·하종식

Energy Efficiency Evaluation of Publicly Owned Wastewater Utilities

Eulsaeng Cho**, Dae Ho Han, and Jongsik Ha

한국환경정책·평가연구원(Korea Environment Institute)

제출 : 2012년 5월 30일 수정 : 2012년 10월 11일 승인 : 2012년 12월 11일

국문 요약

국내 공공하수처리시설의 운영적 측면의 에너지 절감을 위한 방안을 모색하기 위해 에너지 효율성을 평가하였다. 하수처리시설의 에너지 사용에 영향을 미치는 변수를 통계적(유의수준 5%)으로 분석한 결과 유입하수량, 유입 COD, 유입 BOD, 고도처리비율, 유입 TN, 유입 TP, 실제 처리용량/설계용량 비율(가동률)로 나타나 국내 하수처리시설의 에너지 사용은 주로 하수 유입수의 성상 및 하수처리시설 가동률에 영향을 받는 것으로 분석되었다. 또한 회귀분석 결과, 에너지 효율성이 평균(50 백분위수) 이상인 하수처리장 비율을 공법별로 살펴보면, A2O 공법을 적용하고 있는 하수처리시설이 상대적으로 에너지 효율성이 높게 운영된 것으로 평가되었으며 반면에 고도처리 공법에서는 분리막 고도처리, 2차 처리공법에서는 접촉산화법을 적용하고 있는 하수처리시설의 에너지 효율성 개선 노력이 상대적으로 더 많이 요구되는 것으로 나타났다. 그러나 보다 정확한 하수처리시설의 에너지 소비산정 및 분석을 위해서는 처리시설의 에너지 사용 모니터링 시스템 구축 및 에너지 소비시설의 정확한 DB 구축이 시급한 실정이다. 특히, 기존 하수도 통계자료에 i) 중계펌프 사용 전력량, ii) 단위공정별 전력량, iii) 처리수 장거리 방류시 펌프 전력사용량, iv) 대체에너지 생산량 및 활용현황 등에 대한 정확한 자료가 보완되어야 한다. 기초자료가 제대로 구축될 경우 유사한 하수처리시설의 에너지 소비 형태에 대해 구체적으로 비교·분석이 가능하며 분석결과를 활용하여 벤치마킹을 통한 각 하수처리장들의 특성에 따른 맞춤형 에너지 절감 방안이 수립될 수 있을 것이다.

주제어 공공하수처리시설, 유입수 성상, 에너지 효율성 평가

Abstract

In this paper, the energy efficiency of wastewater utilities was evaluated to explore ways to save energy via operational measures. The correlation of each wastewater characteristic parameter to energy was assessed to find a set of parameters that explained most of the variations in energy use among utilities. The results show that increases in inflow, influent COD concentration, and ratio of advanced treatment generally increased the energy use. On the other hand, increases in load factor (influent

* 본 논문은 한국환경정책·평가연구원의 연구과제(과제번호 2011-18)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

** 교신저자 : escho@kei.re.kr

average flow/design flow) reduced the energy use. In the regression analysis, the energy efficiency was highest in the A2O advanced process. On the other hand, the membrane process (among the advanced processes) and the contacted aeration process (among the secondary processes) require more efforts in saving energy. However, the data base system related to energy use must be supplemented in order for more accurate analysis of energy consumption in wastewater treatment facilities. In particular, i) electricity consumption of relay pumps and, ii) energy usage per unit process, iii) pump power usage to discharge treated wastewater in a long distance, if necessary, and iv) alternative energy production and utilization status must be recorded. By utilizing the results of the analysis conducted in this study, it is possible to quantify a level of energy savings needed and establish customized energy saving measures to achieve a certain target level for benchmarking a successful case of wastewater utilities.

▣ **Keywords** ▣ Publicly owned wastewater utilities, Wastewater characteristic, Energy efficiency

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

고유가와 기후변화 협약에 대처하기 위한 국가적인 수준의 에너지 대책 마련이 전 세계적으로 화두가 되고 있으며, 선진국에서는 국가 수준의 차원에서 다양한 에너지 대책을 수립·시행하고 있다.

다량의 에너지를 소비하는 환경기초시설 중의 하나인 공공하수처리시설에도 에너지 고갈과 기후변화에 대응하기 위하여 수처리에 소모되는 에너지 절감 및 신·재생에너지 이용 등을 통한 하수도시설의 에너지 자립의 필요성이 증대되고 있는 실정이다. 일반적인 하수처리공정은 하수를 유입하여 1차침전지 → 물리/화학/생물 반응조 → 2차침전지 → 여과/소독하는 수처리 공정과 슬러지를 농축 → 소화 → 탈수하는 슬러지 처리 공정으로 구성되며, 이 두 공정을 운전하는 데 필수적인 펌프, 송풍기, 가온장치, 슬러지 탈수에 많은 에너지가 소비되고 있다(대한상하수도학회, 2006). 공공하수처리시설의 운영관리비를 살펴보면 인건비, 전력비, 개·보수비, 슬러지 처분, 약품비로 구분되어 있으며, 이 중 인건비(26.1%) 다음으로 전력비가 20%로 큰 비중을 차지하고 있다(환경부, 2010a). 공공하수처리시설의 전력비는 일반용보다 낮은 요금이 부과되는 산업용 전력비가 적용되고 있는 점을 감안할 때 처리시설 운영관리비의 20%가 전력비라는 것은 처리시설 운영에 있어 다량의 에너지가 소비되고 있음을 알 수 있다. 이는 그동안

국내 하수도 정책이 주로 시설 확충 및 처리효율을 높이기 위한 신기술 도입에 초점을 맞추어 하수도시설의 증설, 고도처리기술 도입, 하수관거 정비 등 국가차원의 하수도 인프라 확충 및 재건에 집중하여 처리시설 및 운영에서의 에너지 효율성에 대한 고려가 미흡하였기 때문이다. 이에 “국가하수도 종합계획(2007~2015년)”에서 공공하수도 시설의 에너지 자립화 기반 구축과 부생가스 자원화 및 재생에너지의 점진적 도입의 정책방향을 제시하였으며, 범정부적으로 추진 중인 “저탄소 녹색성장” 정책에 부합하기 위해 2010년 환경부는 에너지 다소비 시설인 하수처리시설에 녹색기술을 적용하여 에너지를 절감하고 청정에너지를 생산하는 “하수처리시설의 에너지 자립화 기본계획”을 발표하였다. 에너지 자립화 기본계획에 의하면, 0.8%에 불과한 공공하수처리시설 에너지 자립률을 2030년까지 50% 달성을 목표로 3단계에 걸쳐 에너지 고효율 설비 도입 지원, 미활용 에너지(소화가스, 소수력, 하수열) 이용 지원, 자연 에너지(풍력, 태양광) 생산 지원 등을 추진할 계획이다. 그러나 현재 국내 하수처리장의 에너지 자립화 기본계획은 하수처리시설 운영 측면의 에너지 절감보다는 주로 신·재생에너지 도입을 통한 대체 에너지 생산에 초점을 맞추어 수행되고 있다.

따라서 본 연구에서는 국내 공공 하수처리시설의 에너지 소비 현황 분석 및 각 공공 하수처리시설의 특성을 고려한 에너지 효율성을 평가하였다. 또한 이를 통해 향후 보다 체계적인 하수처리시설 에너지 효율성 평가를 위한 개선안을 제시하였다.

II. 연구방법

공공하수처리시설별 에너지 사용원(전기, 연료 등)에 대한 구체적인 통계자료 부족과 하수처리시설의 사용 에너지의 98.6%가 전력이 차지하는 것으로 보고된 바(환경관리공단, 2008), 본 연구에서는 공공하수처리시설의 에너지 사용원은 전력 사용량만을 고려하였다. 공공하수처리시설의 전력소비 현황은 환경부 하수도 통계 자료(환경부, 2010b)를 활용하여 2009년 말 기준 하수처리 능력이 500m³/일 이상인 시설을 대상으로 운영기간이 6개월 이상인 전력 소비량 통계 자료가 있는 처리시설들을 대상으로 총 359개 시설을 조사하였다.

공공하수처리시설의 운영조건 특성을 고려한 에너지 사용 효율성 평가는 먼저, 전력 사용량에 미치는 주요 영향인자를 분석하고 이 인자들을 반영한 각 공공하수처리시설

의 에너지 사용 효율성을 평가하기 위해 SPSS/WIN K18 통계프로그램을 이용하여 분석하였다. 하수처리시설의 전력 사용량 및 이와 관련된 자료는 환경부(환경부, 2010a; 2010b; 2010c) 자료를 사용하였다.

III. 공공하수처리시설의 에너지 소비현황

1. 공공하수처리시설 현황

2009년 말 기준 국내 공공처리시설은 총 2,770개가 설치되어 운영되고 있다(환경부, 2010b). 이 중 시설용량 500m³/일 이상인 시설은 총 438개소이며, 시설용량은 24,753,610m³/일이고, 500m³/일 미만 시설은 2,332개소, 시설용량은 171,428m³/일로 조사되었다. 시설의 수는 500m³/일 이상 공공처리시설 수가 전체 공공처리시설의 15.8%에 불과하지만 시설용량은 전체의 99.3%를 차지하고 있어 대부분의 하수처리가 500m³/일 이상 시설에서 이루어진다는 것을 알 수가 있다.

<표 1>은 하수처리시설의 처리시설별, 연도별 전력비 추이를 나타내고 있다. 2002년 대비 2009년까지의 연간 하수처리시설 운영비의 증가는 114.3%에 이르고 있으며, 전력비의 증가율은 101.9%로 매년 약 10.6%의 증가를 보이고 있다. 이러한 증가는 처리수와 시설용량의 증가, 수질기준의 강화에 따른 처리수질 개선여부, 고도처리 등 시설들의 변경이 처리단가와 BOD당 처리비용의 증가에 중요한 영향을 주고 있는 것으로 판단된다.

표 1 하수처리시설 전력비 추이현황

구분	2002년	2003년	2004년	2005년	2006년	2007년	2008년	2009년
연간비용(백 만원)	365,084	424,366	468,660	511,082	584,635	649,582	696,934	782,225
연간전력비(백 만원)	77,330	85,914	95,404	102,264	112,786	125,090	137,611	156,139
전력비 기여율(%)	21.2	20.2	20.4	20.0	19.3	19.3	19.7	20.0
전년대비 전력비용 증가율(%)	-	11.1	11.0	7.2	10.3	10.9	10.0	13.5
처리단가(원/톤)	59.6	66.1	71.0	76.9	87.6	100.1	105.5	116.8
BOD당 처리비용(원/kg)	557.3	662.0	655.1	651.3	727.5	460.9	824.4	846.3

자료: 환경관리공단(2008); 환경부(2010a).

2. 공공하수처리시설의 전력소비 현황

1) 시설규모별 전력 사용량

공공하수처리시설의 시설규모별 전력 사용량을 조사한 결과 시설규모가 클수록 유입 처리유량의 톤당 처리단가는 감소하는 것으로 나타났다(표 2). 또한 유입 하수량당 전력 사용량의 경우 10만 톤/일 미만을 제외하고 처리용량이 클수록 감소하는 경향을 보이고 있어 1,000톤/일 미만 규모가 1.26kwh/m³인 반면 50만 톤/일 이상 규모는 0.26kwh/m³로 약 5배의 낮은 전력 사용량을 나타냈다. 10만 톤/일 미만 시설의 경우에 유입 하수량당 전력 사용량이 높은 것으로 나타났는데 이 그룹에 속한 1개의 처리장의 유입 하수량당 전력사용량이 13.2kwh/m³으로 매우 높았기 때문이며 이 처리장을 제외한다면 0.58kwh/m³로 산정된다.

표 2 공공하수처리시설(500m³/일 이상)의 규모별 전력사용 현황

시설규모	시설 수	총전력비 (천원/년)	평균전력비 (천원/년)	처리 유량당 전력비 (원/m ³)	전력사용량 (kwh)	유입 하수량당 전력사용량 (kwh/m ³)
1,000 미만	53	965,566	18,218	114.2	10,683,210	1.26
5,000 미만	102	4,391,042	44,354	72.7	71,014,710	1.18
10,000 미만	47	4,679,909	99,573	56.5	59,632,253	0.72
50,000 미만	87	20,331,289	239,191	37.8	331,990,571	0.62
100,000 미만	23	10,044,406	436,713	25.7	325,614,887	0.83
500,000 미만	33	43,710,493	1,324,560	23.2	863,180,857	0.46
500,000 이상	14	57,850,387	4,132,171	17.5	847,361,345	0.26

2) 공법별 전력 사용량

조사대상 처리시설을 하수도정비 기본계획·공공하수처리시설 기술검토 사례집(한국 환경공단, 2009)에서 구분한 처리공법을 참조하여 담체(media) 고도처리계열, 분리막(membrane) 고도처리계열, 기타고도처리 계열, SBR 계열, A2O 계열, 표준활성슬러지법, 산화구법, 접촉산화법, 회전원판법으로 분류하였다(표 3).

표 3 공정단위별 시설현황

No	구분	시설 수	
1	고도 처리	고도처리(media)	65
2		고도처리(membrane)	7
3		기타고도처리	91
4		SBR	99
5		A2O	41
6	표준활성슬러지법		31
7	산화구법		13
8	접촉산화법		6
9	회전원판접촉법		6
총합계		359	

<표 4>는 공법별 유입 하수량당 전력 사용량과 각 오염물질 제거에 소모되는 전력 사용량을 분석한 결과이다. 고도처리 공법을 비교해보면, 유입 하수량당 전력 사용량은 A2O > SBR > 분리막 고도처리 > 기타 고도처리 > media 순으로 나타났다. 제거 BOD당 전력 사용량은 SBR > A2O > 분리막 고도처리 > 기타 고도처리 > media 순이며, 제거 COD당 전력 사용량은 SBR > A2O > 분리막 고도처리 > 기타 고도처리 > media 순으로 조사되었다. 제거 TN당 전력 사용량은 SBR > A2O > 기타 고도처리 > 분리막 고도처리 > media 순이며, 제거 TP당 전력 사용량은 SBR > A2O > 기타 고도처리 > media > 분리막 고도처리 순으로 나타났다. 전반적으로 SBR과 A2O 공법이 전력 소모량이 많은 것으로 나타났으며 media 고도처리 공법이 상대적으로 전력 소모량이 낮은 것으로 조사되었다.

2차 처리공법의 경우, 유입하수량당 전력 사용량은 접촉산화법 > 산화구법 > 회전원판접촉법 > 표준활성슬러지법 순으로 나타났다. 제거 BOD당 전력 사용량은 회전원판접촉법 > 산화구법 > 접촉산화법 > 표준활성슬러지법 순이며, 제거 COD당 전력사용량은 산화구법 > 회전원판접촉법 > 접촉산화법 > 표준활성슬러지법 순으로 나타났다. 제거 TN당 전력 사용량은 산화구법 > 회전원판접촉법 > 접촉산화법 > 표준활성슬러지법 순이며, 제거 TP당 전력 사용량은 산화구법 > 회전원판접촉법 > 접촉산화법 > 표준활성슬러지법 순으로 나타났다.

표 4 공공하수처리시설(500m³/일 이상)의 공법별 전력사용 현황

구분	유입하수량당 전력 사용량 (kwh/m ³)	제거 BOD당 전력 사용량 (kwh/kg BOD)	제거 COD당 전력 사용량 (kwh/kg COD)	제거 TN당 전력 사용량 (kwh/kg TN)	제거 TP당 전력 사용량 (kwh/kg TP)
고도처리 (media)	0.35	2.64	5.37	15.93	130.32
고도처리 (membrane)	0.49	3.69	6.25	16.06	115.45
기타고도처리	0.46	3.12	5.92	19.47	149.05
SBR	0.53	4.37	8.08	23.58	177.52
A2O	0.65	4.23	6.78	23.36	162.92
표준활성 슬러지법	0.24	1.92	4.11	15.42	100.27
산화구법	0.67	6.89	14.21	39.68	342.29
접촉산화법	0.79	3.81	7.77	33.36	214.80
회전원판 접촉법	0.47	7.05	9.02	35.91	300.79
계	0.40	2.89	5.60	18.55	137.49

본 연구에서 살펴본 2009년 말 기준 전력사용 현황은 2008년 한국환경공단에서 수행한 연구보고서에 분석된 2007년 하수처리시설의 전력원단위보다 유입 하수량당 전력 사용량(0.29kwh/m³)이 37.9% 늘어난 0.40kwh/m³으로 나타났으며 제거 BOD당 전력 사용량은 2007년 2.35kwh/kg BOD에서 2.89kwh/kg BOD로 23.0% 늘어난 것으로 나타났다. 표준활성슬러지법의 경우 2007년과 유입하수량당 전력 사용량(0.234/0.24), 제거 BOD당 전력 사용량(1.90/1.92)과 비교 시 크게 변하지 않은 반면에 다른 공법들에서의 에너지 소비가 높아진 것을 보았을 때 새로 추가되거나 변경된 공법에서의 에너지 소비가 많아진 것이 원인인 것으로 파악된다.

IV. 공공하수처리시설의 에너지 효율성 평가

Ⅲ절에서 분석한 바와 같이 하수처리시설의 단위 전력 사용량은 시설규모, 유입처리 유량 및 부하량, 처리공법, 고도처리 여부 등에 따라 다르게 나타나 어떤 변수를 기준으로 하느냐에 따라 각 하수처리장의 전력사용 소비 순위 비교가 바뀔 수 있다. 예를 들면, 시설규모 또는 유입 부하량이 클수록 하수처리시설의 단위 전력량은 낮아지기 때문에 이러한 사항들의 고려 없이 단순히 어느 하나의 변수를 이용한 절대적인 평가

로 각 하수처리시설 간의 에너지 효율성을 평가하는 것은 바람직하지 않다. 따라서 본 연구에서는 하수처리시설의 운영조건 및 특성을 반영한 에너지 사용 효율성을 평가하기 위해 하수처리시설의 에너지 소비에 미치는 영향인자를 파악하고 이를 이용한 회귀 모형 분석을 수행하였다.

1. 하수처리시설의 에너지 소비에 미치는 영향인자

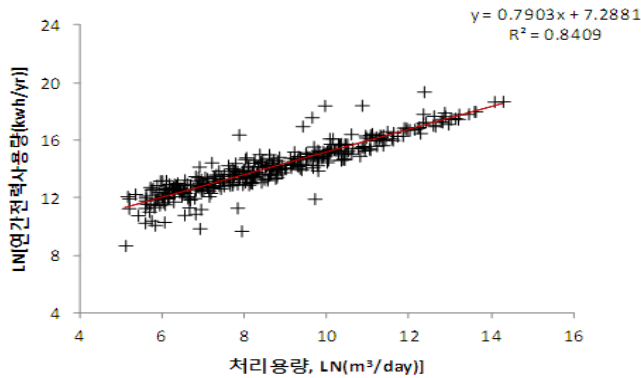
하수처리시설의 에너지 소비에 미치는 영향인자를 분석하기 위해 고려된 대상 변수들을 <표 5>에서와 같이 환경부 통계자료의 가용할 수 있는 데이터를 바탕으로 하수처리시설 운영의 변수를 오염변수, 공정변수, 기타변수로 구분하여 정리하였다. 오염변수는 하수처리시설의 평균유입처리량, 설계시설용량, 각 오염물질의 유입오염농도 및 부하량을 고려하였으며 공정변수에는 고도처리 유무를 구분하기 위한 고도처리비율, 소독방법, 슬러지 생산량, 슬러지 처리현황(농축, 소화, 탈수)을, 기타변수에는 처리시설 부지면적을 고려하였다.

표 5 하수처리시설 운영의 변수

오염변수			
inf_avg	연평균 실제 처리유량	inf_BOD_kg_d	연평균 유입수 BOD 부하량
inf_design	연평균 설계 처리유량	inf_COD_kg_d	연평균 유입수 COD 부하량
inf_lf	실제 처리용량/설계 처리용량	inf_TSS_kg_d	연평균 유입수 TSS 부하량
inf_BOD	연평균 유입수 BOD 농도	inf_TN_kg_d	연평균 유입수 TN 부하량
inf_COD	연평균 유입수 COD 농도	inf_TP_kg_d	연평균 유입수 TP 부하량
inf_TSS	연평균 유입수 TSS 농도	eff_BOD_kg_d	연평균 처리수 BOD 부하량
inf_TN	연평균 유입수 TN 농도	eff_COD_kg_d	연평균 처리수 COD 부하량
inf_TP	연평균 유입수 TP 농도	eff_TSS_kg_d	연평균 처리수 TSS 부하량
eff_BOD	연평균 처리수 BOD 농도	eff_TN_kg_d	연평균 처리수 TN 부하량
eff_COD	연평균 처리수 COD 농도	eff_TP_kg_d	연평균 처리수 TP 부하량
eff_TSS	연평균 처리수 TSS 농도		
eff_TN	연평균 처리수 TN 농도		
eff_TP	연평균 처리수 TP 농도		
공정변수			
adv_tre_ratio	고도처리비율	sludge_dewat	슬러지 탈수
biosolid_prod	슬러지 생산량	sludge_thick	슬러지 농축
dis_chem	염소 소독	sludge_digestion	소화조
dis_UV	UV 소독	dis_O3	오존 소독
기타변수			
floor_area	처리시설 부지면적		

<그림 1>과 같이 실제 유입 처리유량(*inf_avg*) 대비 연간 전력 사용량과의 상관관계를 분석한 결과 처리용량이 증가함에 따라 연간 전력 사용량이 비례적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다.

그림 1 하수처리용량별 연간 전력 사용량 경향



연간 전력 사용량과 높은 상관관계를 보인 하수처리용량을 기준으로 하여 하수처리 시설의 에너지 사용에 영향을 미치는 변수들을 파악하기 위해 전력량과 유입처리량의 회귀식에 각 변수들을 독립적으로 더하여 통계적 유의성을 분석하였다. <표 6>과 <표 7>은 하수처리시설 에너지 사용에 영향을 미치는 변수들의 t 통계량의 절대값 순으로, 유의수준 5% 이내에서 통계적으로 유의한 t 통계량이 12 이상인 변수들과 t 통계량이 12 이하인 변수로 구분하여 각각 나열한 것이다.

통계적으로 95% 신뢰수준에서 하수처리시설 에너지 사용량에 미치는 영향인자는 유입하수량, 유입 COD, 유입 BOD, 고도처리비율, 유입 TN, 유입 TP, 가동률(실제 처리용량/설계용량 비율)로 분석되어 국내의 하수처리시설의 에너지 사용은 주로 하수 유입수의 성상 및 하수처리시설 가동률에 영향을 받는 것으로 나타났다.

표 6 하수처리시설 에너지 사용량에 미치는 영향인자(t 통계량)(2)

변수	계수	t 통계량	잔차제곱합	결정계수	유의확률
ln_inf_avg	0.790	43.441	178.974	84.1	0.000
ln_inf_COD	0.325	4.115	170.849	84.8	0.000
ln_inf_COD_kg_d	0.325	4.115	170.849	84.8	0.000
inf_COD	0.004	3.952	171.452	84.8	0.000
adv_tre_ratio	0.376	3.863	171.774	84.7	0.000
ln_inf_BOD	0.262	3.348	173.511	84.6	0.001
inf_BOD	0.002	3.119	174.214	84.5	0.002
ln_inf_TSS	0.229	3.110	174.241	84.5	0.002
ln_inf_TSS_kg_d	0.229	3.110	174.211	84.5	0.002
inf_TN	0.011	3.002	174.554	84.5	0.003
ln_inf_design	0.273	2.985	174.603	84.5	0.003
ln_inf_lf	-0.273	-2.985	174.603	84.5	0.003
inf_lf	-0.427	-2.917	174.797	84.5	0.004
ln_BOD_kg_d	0.196	2.751	175.248	84.4	0.006
ln_inf_TN	0.290	2.687	175.417	84.4	0.008
ln_inf_TN_kg_d	0.290	2.687	175.417	84.4	0.008

표 7 하수처리시설 에너지 사용량에 미치는 영향인자(t 통계량)(2)

변수	계수	t 통계량	잔차제곱합	결정계수	유의확률
eff_COD	0.024	1.938	177.106	84.3	0.053
eff_TP	-0.185	-1.817	177.329	84.2	0.070
inf_TSS	0.001	1.805	177.351	84.2	0.072
ln_eff_TSS	-0.104	-1.745	177.457	84.2	0.082
ln_eff_TSS_kg_d	-0.104	-1.745	177.457	84.2	0.082
ln_eff_TP	-0.128	-1.743	177.461	84.2	0.082
ln_eff_TP_kg_d	-0.128	-1.743	177.461	84.2	0.082
ln_eff_COD	0.192	1.632	177.646	84.2	0.104
ln_eff_COD_kg_d	0.192	1.632	177.646	84.2	0.104
eff_TN	-0.017	-1.594	177.706	84.2	0.112
ln_eff_TN	-0.155	-1.569	177.745	84.2	0.117
ln_eff_TN_kg_d	-0.155	-1.569	177.745	84.2	0.117
ln_inf_TP	0.123	1.359	178.050	84.2	0.175
ln_inf_TP_kg_d	0.123	1.359	178.050	84.2	0.175
dis_chem	-0.145	-1.212	178.239	84.2	0.226
inf_TP	0.030	1.206	178.246	84.2	0.229
dis_UV	0.099	1.062	178.409	84.1	0.289
sludge_dewat	0.149	1.052	178.420	84.1	0.294
dis_O3	0.305	1.046	173.778	84.4	0.296

변수	계수	t 통계량	잔차제곱합	결정계수	유의확률
ln_eff_BOD	-0.072	-1.021	178.451	84.1	0.308
ln_eff_BOD_kg_d	-0.072	-1.021	178.451	84.1	0.308
inf_COD_kg/d	3.800E-06	0.920	178.549	84.1	0.358
biosolid_prod	1.986E-06	0.874	167.232	83.4	0.383
inf_design	1.937E-07	0.807	178.647	84.1	0.420
eff_COD_kg_d	2.292E-05	0.780	178.669	84.1	0.436
eff_TSS	-0.015	-0.719	178.715	84.1	0.473
inf_TN_kg_d	6.300E-06	0.669	178.749	84.1	0.504
inf_TP_kg_d	5.266E-05	0.643	178.767	84.1	0.521
floor_area	2.903E-07	0.633	178.773	84.1	0.527
eff_TSS_kg_d	4.441E-05	0.608	178.788	84.1	0.843
sludge_thick	0.037	0.509	118.654	87.4	0.611
eff_BOD_kg_d	1.576E-05	0.430	178.881	84.1	0.668
eff_TN_kg_d	8.320E-06	0.427	178.883	84.1	0.670
eff_TP_kg_d	9.165E-05	0.385	178.900	84.1	0.700
inf_TSS_kg_d	7.677E-07	0.338	178.917	84.1	0.735
eff_BOD	-0.006	-0.277	178.936	84.1	0.782
sludge_digestion	0.026	0.233	127.245	86.9	0.816

2. 하수처리시설의 에너지 소비 회귀분석

상기 에너지 사용에 미치는 영향인자와 전력 사용량의 관계를 회귀분석한 결과 하수처리시설 에너지 사용 회귀모형의 최종 독립변수는 평균 유입유량, 유입 COD 농도, 고도처리비율, 가동률이다. 하수처리시설의 에너지 사용은 유입유량, 유입 COD 농도, 고도처리비율이 높을수록, 하수처리시설 설계용량 대비 실제 하수처리시설의 처리용량이 낮을수록 증가하는 것으로 나타났다(표 8).

표 8 하수처리시설 에너지 사용 회귀모형 결과

모형계수				
변수	계수	표준오차	t 통계량	유의확률
Y절편	5.649	0.351	16.077	0.000
LN(연평균처리유량)	0.808	0.019	42.100	0.000
LN(연평균 유입 COD 농도)	0.267	0.079	3.378	0.001
고도처리율	0.298	0.097	3.076	0.002
LN(처리유량/설계유량)	-0.251	0.088	-2.844	0.005
결정계수	0.856			
수정된 결정계수	0.854			

<표 8>은 아래와 같이 식으로 표현하였다.

$$Y = 0808X_1 + 0.267X_2 + 0.298X_3 - 0.251X_4 + 5.649$$

$$Y = LN(\text{전력사용량}), kWh/yr$$

$$X_1 = LN(\text{연평균 유량}), m^3/d$$

$$X_2 = LN(\text{연평균 유입 COD농도}), mg/L$$

$$X_3 = \text{고도처리율}, \%$$

$$X_4 = LN(\text{처리유량/설계유량}), \%$$

3. 하수처리시설의 에너지 소비 순위

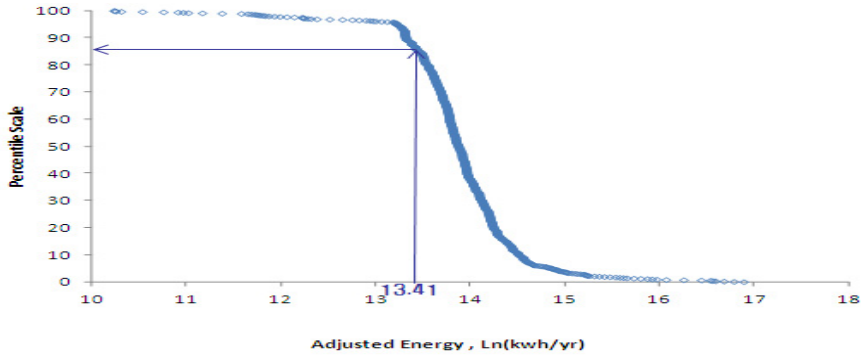
회귀모형을 이용하여 각 하수처리시설의 전력 사용량 예측값들을 구하고 각 하수처리시설의 특성을 고려한 에너지 사용의 상대비교를 위해 실측값의 보정된 에너지 사용량을 구하여 하수처리시설의 에너지 사용 순위를 산정하였다. 즉, 회귀모형에 의해 예측된 전체 하수처리시설의 평균 전력 사용량에 대한 각 처리용량의 전력 사용량의 비율로 보정계수를 산정하여 실측값의 전력 사용량을 보정하였다(Carlson and Walburger, 2007).

$$\text{보정계수} = \text{모델예측값}/\text{모델평균값}$$

$$\text{보정 에너지값} = \text{실측값}/\text{보정계수}$$

예를 들어, 대구광역시 P 하수처리장의 연간 전력 사용량은 10,059,400kwh/년이다. 회귀모형에 의해 예측된 전체 하수처리시설의 평균 전력 사용량은 13.88(log-scale)이며, 대구광역시 P 하수처리장의 예측된 연간 전력 사용량 로그값은 16.69이다. 따라서 보정계수는 1.20(=16.69/13.88)으로 산정되어 실측값의 보정된 전력 사용량은 13.41(=ln(10,059,400)/1.20)이다. <그림 2>는 각 하수처리시설의 보정된 전력 사용량 값들의 누적분포를 나타내며 (100 백분위수 = 100점, 1 백분위수 = 1점) 대구광역시 P 하수처리장의 경우 86.6백분위수로 전체 하수처리시설의 전력 사용량과 비교 시 에너지사용 효율이 86.6점으로 높게 나타났다.

그림 2 각 하수처리시설의 보정된 연간 전력 사용량 누적확률분포

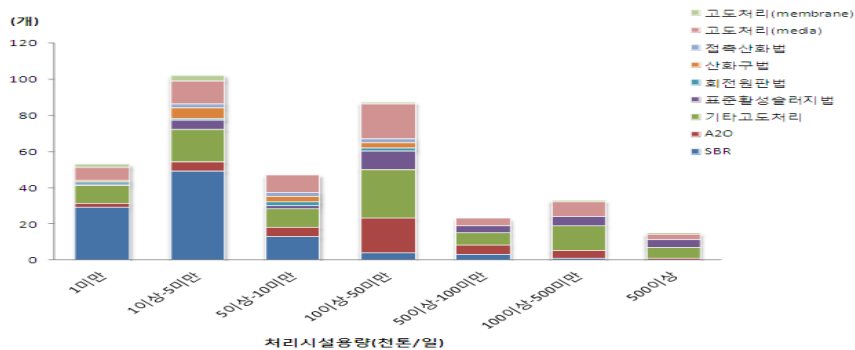


4. 하수처리시설의 에너지 효율성 평가

위 누적분포로부터 각 하수처리시설의 규모별 처리공법 및 에너지 효율분포 현황을 살펴보았다. 에너지 효율성은 전력 사용량이 높은 것에서 낮은 순으로 배열하여 25백분위수 미만; 저조), 25백분위수 이상~50백분위수 미만, 50백분위수 이상~75백분위수 미만, 75백분위수 이상(우수)으로 구분하였다.

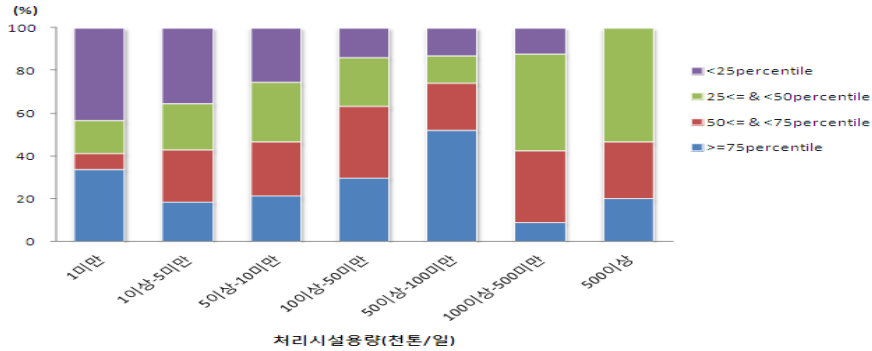
<그림 3>은 에너지 효율평가 대상 공공하수처리시설의 규모별 분포를 살펴 본 것이다. 하수처리시설의 처리용량이 5,000톤/일 미만의 소규모인 경우 SBR 계열의 공법이 타 공법에 비해 높은 비율을 차지하고 있으며 1만 톤/일 이상 규모의 하수처리시설에서는 A2O 계열, 담체 고도처리계열, 기타고도처리 계열이 주로 운영되고 있는 것으로 나타났다.

그림 3 에너지 효율 평가 대상 공공하수처리시설의 규모별 분포



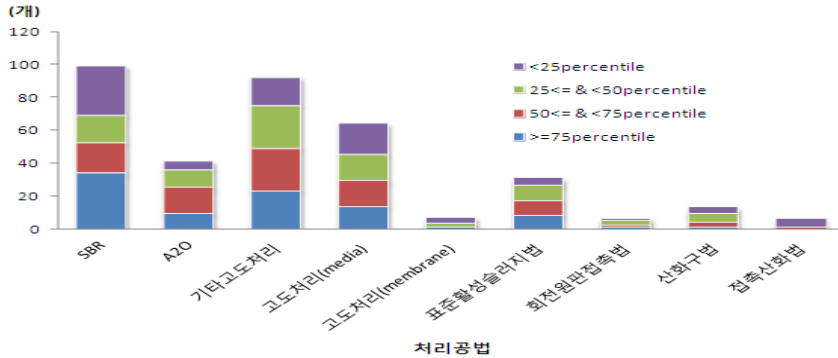
공공하수처리시설 규모별로 에너지 사용을 비교해보면 처리용량이 증가할수록 누적 분포의 25백분위수에 속하는 하수처리시설의 비율은 감소하는 것으로 나타났다(그림 4). 반면에 처리용량이 1,000톤/일 미만에서 10만 톤/일 미만으로 증가할수록 에너지 효율성 50백분위수 이상에 속하는 공공하수처리시설 수의 비율이 증가하였으며 10만 톤/일 이상의 하수처리시설의 경우에는 에너지 효율성이 평균(50백분위수) 이하에 속하는 비율이 증가하는 것으로 나타났다. 5만 톤/일 이상~10만 톤/일 이하의 하수처리시설에서 에너지를 효율적으로 운영하고 있는 시설의 비율이 가장 높은 것으로 나타났다. 또한 처리용량이 1만 톤/일 이상~10만 톤/일 이상 규모의 하수처리 시설의 50% 이상은 에너지 효율성이 평균 이상으로 분석되어 타 규모에 비해 상대적으로 높은 경향을 보였다. 그러나 하수처리시설 규모가 작을수록, 50만 톤/일 이상의 대규모 하수처리시설은 다른 규모에 비해 에너지 사용 효율성 증가를 위해 보다 더 많은 노력이 필요할 것으로 보인다.

그림 4 공공하수처리시설의 용량별 에너지 효율성 분포



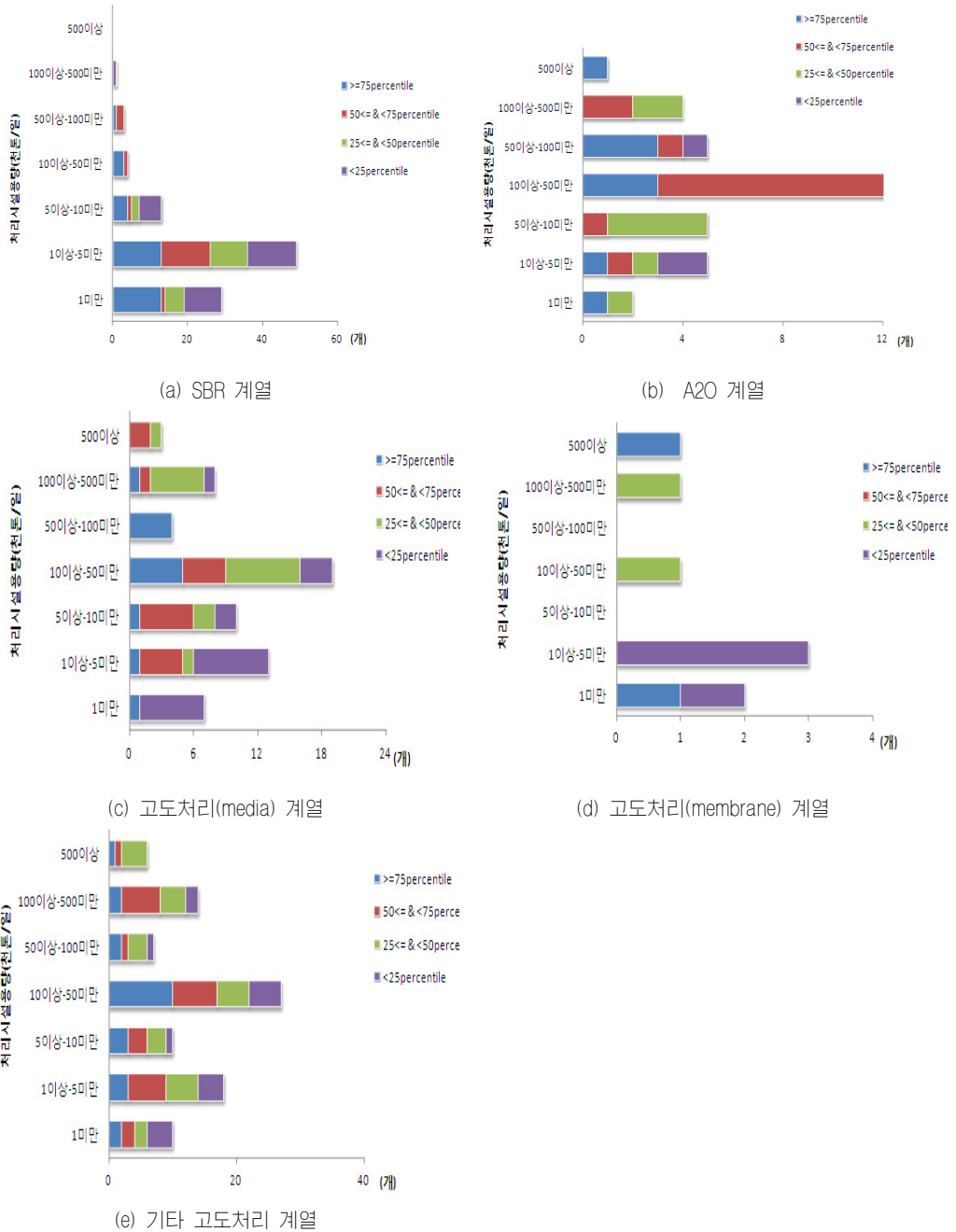
공공하수처리시설의 에너지 사용 경향을 공법별로 살펴보면 SBR 계열, A2O 계열, 기타고도처리, 표준활성슬러지 공법을 적용하고 있는 하수처리시설의 50% 이상은 에너지 효율성이 평균 이상으로 상대적으로 양호한 것으로 나타났다(그림 5). 그러나 분리막 고도처리를 비롯한 2차 처리공법들을 운영하고 있는 하수처리시설의 경우 대부분이 에너지 사용 순위가 50백분위수 이하에 속하는 것으로 나타나 에너지 사용 절감의 필요성이 상대적으로 높은 것으로 분석되었다.

그림 5 공공하수처리시설의 공법별 에너지 효율성 분포



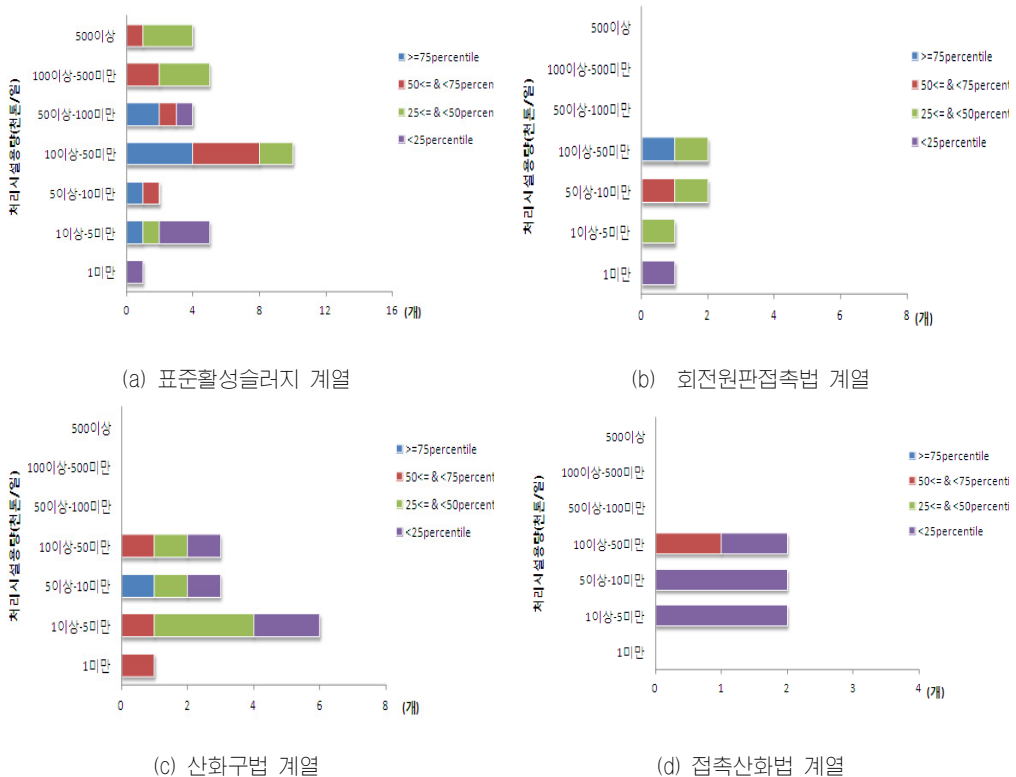
<그림 6>은 각 고도처리공법별 규모에 따른 에너지 효율 현황을 나타낸 것이다. SBR 공법을 운영하고 있는 하수처리시설의 상대적 에너지 효율성을 비교해 본 결과 10만 톤/일 이상~50만 톤/일 미만을 제외하고는 각 시설규모에서 하수처리시설의 50% 가 대체적으로 에너지 효율성 평균 이상을 보였다. A2O 계열의 공공하수처리시설 에너지 사용현황을 분석한 결과 1만 톤/일 이상~10만 톤/일 미만과 50만 톤/일 이상 규모의 하수처리시설이 다른 규모보다 에너지를 효율적으로 운영하고 있는 것으로 분석되었다. 담체를 이용한 고도처리 공법을 운영하고 있는 하수처리시설의 에너지 효율성 분포를 살펴보면, 5만 톤/일 이상~10만 톤/일 미만의 모든 하수처리시설이 75백분위수 이상에 속하여 상대적으로 에너지 효율성이 우수하였고 1,000톤/일 규모의 하수처리시설이 가장 에너지 효율성이 낮은 것으로 평가되었다. 분리막을 적용한 고도처리 계열의 공공하수처리시설에서는 50만 톤/일 이상의 하수처리시설은 75백분위수 이상으로 나타나 상대적으로 에너지 효율성이 높았다. 반면에 1,000톤/일 이상~5,000톤/일 미만의 하수처리시설은 25백분위수 이하로 에너지 효율성이 가장 저조하였다. 또한 50만 톤/일 이상 규모의 하수처리시설을 제외하면 전반적으로 에너지 효율성이 낮은 것으로 조사되어 이들 하수처리시설의 효율적 전력사용을 위한 노력이 보다 더 요구됨을 알 수 있다. 기타 고도처리 계열의 공공하수처리시설의 경우 1만 톤/일 이상~5만 톤/일 미만의 하수처리시설이 75백분위수이상의 비율이 가장 높은 것으로 나타났다. 반면에 1,000톤/일 미만, 5만 톤/일 이상~10만 톤/일 미만, 50만 톤/일 이상 하수처리시설의 경우 에너지 효율성 50백분위수 미만에 속하는 하수처리시설의 비율이 높은 것으로 조사되었다.

그림 6 고도처리 공법별 규모에 따른 에너지 효율성 분포



<그림 7>은 2차처리공법별 규모에 따른 에너지 효율 현황을 나타낸 것으로 표준활성슬러지법을 적용하고 있는 공공하수처리시설의 경우 1만 톤/일 이상~10만 톤/일 미만 규모의 하수처리시설에서 상대적으로 에너지를 효율적으로 운영하고 있는 시설이 많은 것으로 분석되었다. 반면에 5,000톤/일 미만의 소규모와, 10만 톤/일 이상의 대규모에서는 50백분위수 미만에 속하는 하수처리시설의 비율이 높아 에너지 효율이 저조한 것으로 나타났다. 회전원판접촉법 계열은 공공처리시설 6개소에 설치·운영되고 있으며 전반적으로 에너지 효율성이 낮은 것으로 분석되었다.

그림 7 2차처리공법별 규모에 따른 에너지 효율 현황



산화구법 계열의 공공하수처리시설의 에너지 효율성을 살펴본 결과, 회전원판 접촉법과 마찬가지로 각 용량별 에너지 효율성이 50백분위수 이하에 속하는 시설비율이 높아 전반적으로 에너지 효율성이 저조한 것으로 나타났다. 접촉산화법 계열의 6개소

공공하수처리시설 중 1개소만이 에너지 효율성 50백분위수 이상에 속하며 나머지 5개소는 에너지 소비순위 누적분포의 25백분위수에 속하는 것으로 타 공법의 하수처리시설에 비해 에너지를 가장 비효율적으로 운영하고 있는 것으로 분석되었다.

이와 같이 공공하수처리시설의 에너지 효율성을 평가한 결과, 대체로 하수처리시설 규모가 증가할수록 에너지 효율성이 증가하는 것으로 분석되었으나 50만 톤/일 이상의 대규모 하수처리시설의 경우에는 에너지 효율성이 저조하게 나타났다. 공법별로는 에너지 효율성 50백분위수 이상에 속하는 시설 수의 비율을 기준으로 A2O(61%) > 표준활성슬러지(54.8%) > 기타고도처리(53.3%) > SBR(52.5%) > 고도처리(media, 45.3%) > 회전원판접촉법(33.3%) > 산화구법(30.8%) > 고도처리(membrane, 25%) > 접촉산화법(16.7%) 순으로 조사되었다.

V. 연구의 한계점

본 연구는 하수처리시설의 에너지 사용 관련 데이터 부족으로 인해 각 하수처리시설의 에너지 효율성 차이의 주요 원인 분석에는 한계가 있다. 예를 들면 에너지 소비 효율성 평가결과 전체 하수처리시설 중 29.6점으로 저조한 것으로 분석된 경기도 A 하수처리장의 경우 현장 방문한 결과 하수처리장의 지리적 여건상 처리수 방류를 위해 약 4Km의 장거리 펌핑을 하고 있었다. 이로 인한 전력 사용량이 A 하수처리시설 전체 전력 사용량의 약 40% 정도를 차지하여 동 하수처리시설의 에너지 효율성이 낮은 주요 원인으로 조사되었다. 이와 같이 하수처리시설의 처리수 방류 펌핑 거리가 길수록 소요되는 전력량은 증가할 것이나 본 연구의 회귀분석에는 고려되지 못하였다. 마찬가지로 하수처리수를 장외 재이용하는 시설의 경우 또한, 상류로 재이용수를 펌핑하는 길이에 따라 전력 사용량이 비례할 것으로 예상된다. 그러나 이들과 관련된 통계자료 부족으로 인해 본 연구에서는 처리수 방류 펌핑 거리, 장외 재이용시 펌핑 거리 등과 전력사용량의 상관분석이 누락되었다. 또한 전체 하수처리시설 중 38점으로 에너지 효율성이 저조한 것으로 평가된 울산시 Y 하수처리장을 방문한 결과, 소화조에서 생산되는 가스 발생량의 50%를 외부로 공급·판매하여 하수처리시설의 대체 에너지를 생산·활용하고 있는 것으로 조사되었다. 따라서 Y 하수처리장의 실제 전력 사용량은 하수처리시설 가동에 소비되는 전력량에서 외부로 공급하는 Y 하수처리시설의 대체에너지

생산량만큼 제외되어야 할 것이며 이렇게 될 경우 보다 정확한 에너지 효율성이 산정될 수 있을 것이다. 제주시의 J 하수처리장은 소화조의 바이오가스를 이용한 열병합발전시설을 가동하여 하수처리장 부지 내에서 시설 가동에 필요한 전력의 약 30%를 절감하고 있으나 에너지 효율은 35.8점으로 평가되었다. 현장방문 결과 동 하수처리장 전력의 약 40% 정도는 14개의 중계펌프 가동에 대부분 소요되는 것으로 통계자료에는 장외의 중계펌프와 장내 운영 전력량이 모두 포함된 것이다. 이러한 경우를 고려한다면 J 하수처리장의 에너지 효율성 점수는 보다 높아질 것이다. 그러나 하수처리시설의 대체에너지 생산량 및 활용현황에 대한 데이터 누락, 중계펌프를 가동하는 하수처리장의 전체 전력량에 중계펌프에 소요되는 전력량의 포함 여부가 불명확하고 본 연구기간 동안 분석대상의 모든 하수처리장의 현장방문에는 한계가 있어 이러한 현황을 정확히 반영하기 어려운 실정이다.

VI. 결론

공공하수처리시설의 전력 사용량에 미치는 영향인자를 파악하고 회귀분석을 통해 공공하수처리시설의 처리규모별, 공법별, 지역별로 구분하여 에너지 효율성을 비교하였다. 하수처리시설의 유입처리유량, 유입 COD 농도, 고도처리비율, 가동률이 하수처리시설 에너지 사용량의 주요 영향인자로 분석되었다. 이들 영향인자를 반영한 각 하수처리시설의 에너지 효율성 비교 결과 규모별로는 소규모 > 대규모 > 중규모 순으로 에너지 효율성 개선의 필요성이 요구되었다. 공법별로는 고도처리 공법에서는 분리막 고도처리, 2차 처리공법에서는 접촉산화법이 에너지 효율성 개선의 노력이 상대적으로 더 많이 필요한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 특정 공법 또는 특정 시설규모가 에너지 비효율적일 수도 있지만 동일 공법, 유사규모에서 다양한 에너지 효율성이 분석된 바, 하수처리시설이 운영 관리자에 의해 얼마나 에너지 효율적으로 운영되었느냐에 따라 나타난 결과일 수도 있다. 이에 대한 명확한 분석은 각 하수처리시설의 단위 공정별 에너지 소비량과 수처리 효율에 관한 정확한 데이터가 구축되어야 가능할 것이다.

따라서 보다 정확한 하수처리시설의 에너지 소비산정 및 분석을 위해서는 처리시설의 에너지 사용 모니터링 시스템 구축 및 에너지 소비시설의 정확한 DB 구축이 시급한 실정이다. 특히, 기존 하수도 통계자료에 i) 중계펌프 사용 전력량, ii) 단위공정별

전력량, iii) 처리수 장거리 방류시 펌프 전력사용량, iv) 대체에너지 생산량 및 활용현황 등에 대한 정확한 자료가 보완되어야 한다. 이러한 기초자료가 제대로 구축될 경우 유사한 하수처리시설의 에너지 소비 형태를 구체적으로 비교·분석이 가능하며 분석결과를 활용하여 벤치마킹을 통한 각 하수처리장들의 특성에 따른 맞춤형 에너지 절감방안이 수립될 수 있을 것이다. <그림 2>의 각 하수처리시설 전력 사용의 누적분포도는 다른 하수처리시설의 에너지 효율성 점수 벤치마크를 통한 목표 에너지 절감량 산정을 가능하게 한다. 예를 들어, 대구광역시 P 하수처리장이 에너지 효율성 95점을 달성하기 위해서는 95백분위수에 해당하는 에너지 사용량이 7,921,835kwh/년(=exp(13.216×1.20))로, 현 에너지 사용량 21.2%의 에너지 절감이 요구된다. 이와 같이 하수처리시설의 에너지 효율성 평가는 각 하수처리시설 간의 비교 척도로 검토될 수 있다. 더불어 향후 에너지 효율성 평가 자료를 정기적으로 구축할 경우 이를 토대로 에너지 효율적인 처리공법의 선별 및 기기설비 교체·보완·공정개선 등 각 하수처리시설의 특성에 맞는 에너지 절감방안 모색에도 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- 대한상하수도학회. 2006. 「공공하수도시설 에너지 절감대책 수립에 관한 연구」.
- 환경관리공단. 2008. 「기후변화에 대비한 공공하수도시설 에너지 자립화 타당성 조사 연구」.
- 한국환경공단. 2009. 「하수도정비 기본계획·공공하수처리시설 기술검토사례집」.
- 환경부. 2010a. 「2009년 공공하수처리시설 운영관리실태 분석결과」.
- _____. 2010b. 「하수도통계(2009)」.
- _____. 2010c. 「하수처리시설 에너지 자립화 기본계획」.
- Carlson, S. W. and A. Walburger, 2007. *Energy Index Development for Benchmarking Water and Wastewater Utilities*. AWWARF.