

국내 공공하수도 시설의 에너지 사용 및 자원화실태 조사연구

A Study on Current Energy Consumption and Recycling at Public Wastewater Treatment Plants in Korea

박승호¹ · 김병주¹ · 배재호² · 이철모³ · 김응호^{4,*}

Seungho Park¹ · Byongjoo Kim¹ · Jae-Ho Bae² · Cheol Mo Lee³ · Eung-Ho Kim^{4,*}

1 홍익대학교 기계시스템디자인공학과

2 인하대학교 사회기반시스템공학부

3 (주) 한국종합기술 플랜트부

4 홍익대학교 건설도시공학부

(2007년 4월 27일 논문 접수; 2007년 8월 27일 최종 수정논문 채택)

Abstract

To establish effective and prompt measures for energy conservation in public wastewater treatment plants in Korea, energy consumption rates in 233 utilities in 9 provinces and 7 metropolitan cities are investigated and compared to the rest of the world. Mean load factor for wastewater treatment utilities is 74.9% and those for influent pumps and aeration blowers are 56.2% and 61.0%, respectively. Mean electrical energy usages as the key performance indicators are 0.243kWh/m³ for overall sewage treatments and 2.07 kWh per unit kg BOD removal. Digester gas as one of major byproducts in the process amounts to 382,000m³/day nationwide. While major part of the digester gas is used for sludge heating, only 7.3% of the gas is utilized for electricity generation. Both efficiencies for BOD removal and digestion gas generation are considerably lower than those in USA and EU utilities due to low concentration of organic material in influent wastewater. Such low energy regeneration, in turn, results in significantly higher energy consumption in Korean plants, compared to that in USA and EU ones.

Key words: energy consumption; public wastewater treatment plant; key performance indicator (KPI)

주제어: 에너지 소비, 공공하수처리시설, 주요성능지표

1. 서론

국내 상하수도정책은 시설확충 및 신기술도입에

초점을 맞추고 상하수도시설의 증설, 고도처리시설 도입, 하수관거 정비사업 등 국가차원의 상하수도 인프라를 확충 및 재건 중에 있다. 그러나 대부분의 공공하수도시설에 도입되는 환경기술은 수질, 대기, 폐

*Corresponding author Tel: +82-2-320-1618, FAX: +82-2-325-8815, E-mail: kimeh@hongik.ac.kr (Kim, E.H.)

기물 등 각각의 운영상의 성능에 초점이 맞추어져 왔으며 지금까지 국내 하수처리공정에서 에너지 사용의 효율성 부분은 사실상 간과해 왔다 하여도 과언은 아니다.

본 연구에서는 국내 하수처리장에서의 효율적인 에너지소비 절감 방안을 강구하면서 동시에 하수처리 과정에서의 부생물질의 자원화와 미활용·재생에너지의 이용을 극대화하여 향후 공공하수도시설의 에너지 자립화를 위한 정책적, 기술적 대책을 수립하는데 반드시 필요한 기본 자료인 공공하수도 시설의 에너지 사용실태를 파악하고 미국, 일본, 및 유럽의 에너지 소비현황과 비교하고자 한다. 본 연구는 각각의 처리장에서 발생하는 에너지 소비에 대한 비효율인자를 찾아내고, 이에 대한 근본 원인을 파악하고 이에 대한 대책을 수립하기 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이며, 더 나아가서 거시적인 단위인 국가적 또는 지자체별 에너지 절약을 위한 정책수립용 자료로 활용될 수 있다.

국내의 공공하수도설비의 에너지 소비실태를 파악하기 위하여 서울특별시를 포함한 총 7개 광역시 및 9개도에 소재하는 233개소의 공공하수처리장에 대하여, ① 시설용량 및 운영현황 등의 일반사항, ② 기계설비의 현황 및 운전특성 등, ③ 전기설비의 현황 및 에너지 소비현황 등, ④ 그리고 부생물질의 자원화현황 등의 4부분으로 크게 분류하고, 세부적으로는 총 70항목에 대한 자료를 조사하여 분석하였다.

자료조사 시기는 2006년 5월~8월 기간이었고, 조사내용은 2005년도 운전현황을 기준으로 하였다. 조사 처리장 수는 2005년 현재 국내에 가동 중인 294개소 중 233개소로 79.3%이나, 시설용량기준으로는 총 23,394천톤/일 중 22,100천톤/일로 94.5%에 달하였으므로, 본 연구에서 제시하는 국내 공공하수도시설의 에너지 원단위 등은 국내 하수처리장 에너지 소비현황을 대표할 수 있을 것이다.

2. 본 론

2.1. 국내 하수처리시설의 일반사항

미국 캘리포니아 주의 상하수도설비에서 소비하는 전력량은 총 전력소비량 기준 침투전력소비율 및 평균전력소비율은 각각 7%와 5%(ACWA, 2006)에 달

하고 있고, 미국 전체의 평균전력소비율은 약 3%로 이중 하수설비부분에서 소비하는 에너지는 1.2%이다 (EPRI, 1996; Elliot, 2003; Rogalla, 2006). 일본의 경우는 평균전력소비율이 1.68%이고, 그중 하수설비 부분에서는 0.81%이지만(일본하수도협회, 2003), 우리나라의 공공하수도 시설은 2005년 현재 판매된 총 전력에너지(한국전력거래소, 2006) 중 0.52%의 전력 에너지를 소비하고 있다. 우리나라의 경우가 미국과 일본에 비하여 작은 양의 전력에너지를 소비하지만, 이는 국내 하수도분야의 에너지소비가 효율적이라기 보다는 주로 국내의 다른 산업부분에서 상대적으로 많은 양의 전력을 소비하기 때문으로 사료된다.

국내 하수처리장에서의 자세한 에너지 소비실태에 대하여 논하기 앞서서, 금번 조사된 하수처리장의 일반적인 특징을 다음과 같이 간략히 정리할 수 있다. 2005년 현재 국내 가동 중인 하수처리시설을 시설용량 및 처리공법기준으로 분류하면, 대규모 처리장(100천톤/일 이상)은 표준활성슬러지법(89.5%)을 주로, 중규모 처리장(10~100천톤/일)은 표준활성슬러지법(62%)과 산화구법(6.2%)을 주로, 소규모 처리장(10천톤/일 미만)은 산화구법(21.4%), 표준활성슬러지법(15.7%), 장기포기법(9.9%)과 기타 공법(40.8%)을 골고루 채택하고 있음을 알 수 있다. 고도 처리공법의 경우 대규모 처리장은 A_2O 공법, 소규모 처리장은 SBR 공법을 다수 도입하고 있고, 처리공법 기준으로는 표준활성슬러지법을 채택한 처리장이 98개소(처리장수 기준 42.1%, 시설용량 기준 84.5%)로 가장 많은 비중을 차지하고 있음을 알 수 있다.

하수처리설비의 전국 평균 가동율은 74.9%이고, 최대 94.6%에서 최소 46.5%로 지역적인 편차가 심하였다. 즉, 일부 지자체의 경우는 가동율이 90% 이상을 넘어 차후에 추가 설비 설치의 필요성이 있었고, 일부는 가동율이 매우 낮아 비효율적 운전이 되고 있었다.

2.2. 에너지의 소비실태

2.2.1. 정성적 분석

본 연구에서 실시한 설문조사를 바탕으로, 각 하수처리시설의 에너지 절감과 효율성 향상을 위하여 지속적으로 노력하여야 하는 공정/운전요인과 이에 연관되어 비효율적 에너지소비 가능성이 높은 설비를

Table 1. 공공하수도시설에서의 비효율적 에너지 소비 특성 및 관련 설비

비효율적 에너지 소비 요인	순위		
	1	2	3
에너지를 많이 소비하는 설비	포기조 송풍기	유입펌프	소화조, 교반기 등
내구연한에 가깝거나, 지나서 시설 노후화에 기인한 성능 저하의 경우	유입펌프	탈수기	최종침전지 슬러지 수집기, 반송슬러지 펌프 등
저부하 운전의 경우	포기조 송풍기	유입펌프	반송슬러지 펌프 등
과부하 운전이 심한 경우	탈수기	포기조, 침사인양설비	농축조 등
부하변동에 기인한 효율저하	포기조	유입펌프	침사제거기, 최종침전지 등
간헐운전에 기인한 효율저하	산화구 포기기	포기조	유입펌프, 슬러지 인발펌프 등

Table 2. 자료조사 처리장 중 정량적 분석 수행 처리장 수 및 등가인구수

처리장 소재지 (시, 도)	응답처리장 수 (개소)	처리대상 인구수 (명)	처리대상 등가인구**수 (명)	실제인구 대비 등가인구 비
강원도	6	740,604	412,556	0.56
경기도	65	9,767,125	8,726,233	0.89
경남도	29	2,499,988	1,050,998	0.42
경북도	30	1,757,054	1,221,847	0.70
광주시	2	1,401,745	1,063,802	0.76
대구시	6	2,507,682	3,582,672	1.43
대전시	1	1,507,382	886,717	0.59
부산시	7	4,154,910	2,499,805	0.60
서울시	4	10,712,849	9,477,235	0.88
울산시	4	209,656	158,316	0.76
인천시	6	804,360	454,548	0.57
전남도	18	226,020	119,388	0.53
전북도	16	1,656,701	1,018,160	0.61
제주도	3	416,065	315,244	0.76
충남도	8	871,771	596,966	0.68
충북도	25	1,113,721	813,999	0.73
계(평균)	230	40,347,633	32,398,484	0.80

우선 순으로 정리하면 **Table 1**과 같다. 하수처리설비의 모든 부분이 에너지 소비와 연관되어 있어, 그중 하나라도 최적상태가 아니면, 에너지를 과다소비 할 수 있지만, 그중에서도 상대적으로 많은 에너지를 소비하거나 비효율적 운전에 기인하여 에너지가 많이 소비되는 부분은 포기조 송풍기, 유입펌프 및 슬러지 처리 공정으로 판단되기에, 이 부분에 대한 성능개선 및 최적인전 대책이 우선되어야 할 것이다. 환경부 및 지자체에서 매년 ‘하수종말처리장 운전개선 방식’ 또는 ‘하수처리시설 기술진단’ 등에 대한 우수사례의 발굴을 통하여 에너지절감을 유도하고 있으며, 이를 홍보함으로써 에너지 절감을 위하여 많은 노력을 기

우고 있다. 그러나, 보다 정밀한 에너지 절감대책을 수립하기 위해서는 **Table 1**에서 열거한 “비효율적 에너지 소비요인”을 바탕으로, 시험 계측을 통한 구체적인 운전 자료를 도출하고, 이를 근거로 하여 정량적 대책을 수립하는 것이 필요하다.

2.2.2. 정량적 분석

자료조사 처리장 중 정량적 분석이 가능한 처리장 수는 **Table 2**와 같이 7개시와 9개도의 총 230개소이고, 대상 인구는 약 4,000만명으로 우리나라 전체인구 약 4,700만명의 약 85.4%이다. 그러나, 유입 BOD 기준 등가인구는 실제인구의 약 80% 정도인

Table 3. 하수처리설비의 운전부하율 비교

항목	비율(%)	
하수 처리량	하수 시설량 대비 처리비율	74.9
	하수 유입량 대비 처리비율	97.5
부하율	유입 펌프	56.2
	포기조 송풍기	61
실제량/설계량	1차 슬러지 발생율	178.9
	2차 슬러지 발생율	105.6
	소화조 슬러지 유입율	100.5
	탈수기 처리율	104.6
	탈수 슬러지 함수율	103.3
	(설계 함수율/운전 함수율)	(78.8/76.3)
	탈수케익 발생율	68.5

약 3,200만명으로 실제인구와 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 이때 증가인구 1인 기준은 일일 유입수 기준 BOD 60g이다(Voigt, 2003). 그리고, 대부분의 처리장 소재지는 증가인구 대 실제인구비가 1 이하이지만 대구시의 경우는 1.43으로 유입하수의 BOD가 상당히 높음을 알 수 있다.

위의 Table 1에서 제시한 “비효율적 에너지소비 요인” 중 설비의 저부하 또는 과부하 운전 정도를 확인하기 위하여 설비의 부하율을 조사한 결과를 Table 3에 정리하였다. 대체적으로 유입펌프와 송풍기의 부하율은 매우 낮은 것으로 나타났고, 슬러지 처리설비는 대체적으로 과부하 상태이나, 지역별로 편차가 극심하였다.

Table 4는 하수처리장내 기계설비에서 소비되는 전력을 비교하였다. 널리 알려진 것과 같이 포기조 송풍기에서 약 41%, 그리고 유입펌프에서 약 20%의 전력이 소비되고 있고, 다른 전력소비 설비도 주로 펌프 및 탈수 설비로 상당히 많은 전력을 소비하고 있음을 확인하였다. 따라서 전력소비를 줄이기 위한 주된 대책은 포기조 송풍기 및 유입펌프, 그리고 다수의 펌프류에 집중되어야 함을 알 수 있다. 참고로, 국내처리장에서 소화조 가온용 및 냉난방 등으로 소비되는 연료는 주로 소화가스 및 등유이고 그 비용은

전력비의 4.46%밖에 되지 않았다.

국내 하수처리장의 에너지 소비특성을 객관적으로 파악하기 위하여 외국 처리장과의 주요성능지표 (Key Performance Indicator, 이후 KPI라 함)를 비교하여 Table 5와 Fig. 1에 정리하였다. 미국의 유입하수당 소비전력은 1996년도 자료(EPRI, 1996) 외에는 얻을 수가 없었기에, 매년 1%씩 절감한다고 가정하여 산정하였다. 이 수치는 미국과 일본에서 하수시설 에너지 절감실적과 절감목표를 매년 1%로 산정하고 있기 때문이다(US DOE, 2000). 단위 유입하수당 소비전력은 미국의 중대형처리장과 국내평균 소비전력과 별 큰 차이가 없었으나, 제거 BOD당 소비전력은 상당한 차이가 있었다. 증가인구당 소비전력은 미국 위스컨신주의 중소규모 처리장과 비슷한 전력을 소비하고 있으나, 유럽의 처리장보다는 상당히 많은 양의 에너지를 소비하고 있음을 알 수 있었다.

Fig. 1는 미국의 중소규모 처리장(Rogalla, 2006)과 국내 각 처리장의 유입하수량 당 소비전력을 비교하였다. Table 5와 같이 평균 전력소비량으로 비교할 경우는 국내 처리장과 미국 처리장의 소비전력이 비슷한 것으로 보인다. 그러나, 구체적으로 보면 국내 처리장 평균 소비전력의 경우는 처리효율이 좋은 대규모 처리장의 소비전력이 지배하고 있기에 중소규모 처리장의 경우도 우리나라의 에너지소비효율이 상당히 낮음을 Fig. 1에서 확인할 수 있다. 국가별 총 소비전력기준 하수처리에 소비되는 전력은 앞서 언급한 바와 같이 미국은 약 1.2%, 일본은 0.81%이지만, 우리나라는 약 0.52%로 다소 낮은 편이었다. 이는 주로 다른 산업분야에서 전력을 많이 소비하기 때문이라 사료된다.

Table 6은 처리용량 및 공법별 하수처리에 소비되는 에너지를 비교하였다. 대형 하수처리장의 경우, 하수처리시 소비되는 에너지가 선진국 수준에 도달하고 있지만, 중소규모의 처리장을 운영하고 있는 경우는 높은 에너지 소비율을 나타내었다. 미국의 중규모 처리장(75.7천톤/일)의 경우 0.23kWh/ton인데 비하

Table 4. 하수처리설비의 전력소비율 비교

구분	유입수 펌프	방류 펌프	농축조가동 펌프	소화조가동 펌프	포기조 송풍기	소화조 가스교반기	슬러지이송 펌프	슬러지 탈수 처리설비	여포 세척수 펌프	기타
비율(%)	20.2	1.8	0.9	0.6	41.6	1.4	2.1	3.5	1.1	26.6

Table 5. 주요 성능 지표 (KPI) 비교

항목	단위	대한민국	미국	일본	유럽
사람 수 당 소모전력	[kWh/인/년]	36.3			
사람 수 당 유입하수량	[m ³ /인/년]	151.0			
유입하수당 소모전력	[kWh/m ³]	0.243	0.31 (1995년 0.35) ^b	0.3 ^a [오사카시]	
유입하수당 회수전력	[kWh/m ³]	0	0.08 (1995년 0.09) ^b		
유입하수당 순 소비전력	[kWh/m ³]	0.243	중대형: 0.23 소형: 0.36 (1995년 0.26) ^b		
제거 BOD 당 소모전력	[kWh/kg BOD]	전체평균: 2.07 2차처리: 1.88 고도처리: 2.16	1.5 ^a [전체] 2.36 ^a [위스컨신 주]		1.49 ^a
등가 인구당 소모전력	[kWh/PE/년]	45.3	51.9 ^a [위스컨신 주]		32.2 ^a
등가 인구당 전력에너지 비용	[원/PE/년]	2,879	1,793 ^a [위스컨신 주]		1,999 ^a
연간소모전력/국가 연간 총발전량		하수: 0.52 ^a	3% (상수:1.8% + 하수:1.2%) ^b	1.68% (상수:0.87% + 하수:0.81%) ^c	

- a. 2005년도 하수처리장 연간 전력소비량(1,756 GWh)/2005년도 총발전량(338,900 GWh)(전력거래소, 2006) = 0.52%
- b. 미국 하수처리량 75.7 천톤/일(20MGD)급 처리장 기준(EPRI, 1996; Rogalla, 2006)
- c. 일본하수도협회(2003)
- d. 이타미 가즈오(2005)
- e. Voigt(2003)

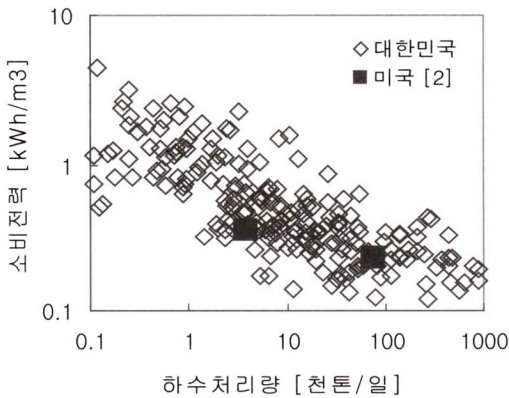


Fig. 1. 국내 각 하수처리장 처리용량에 대한 단위용량처리시 전력소비를 비교(미국은 중규모 및 소규모처리장의 평균값임).

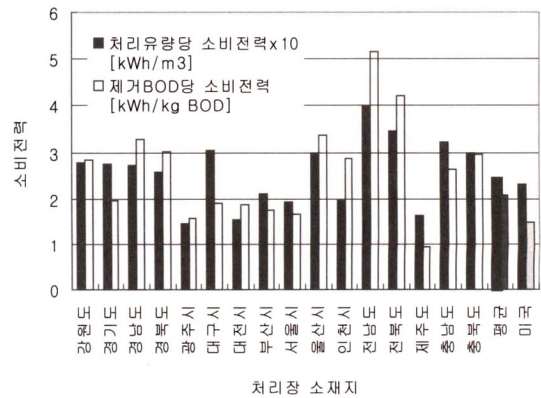


Fig. 2. 지자체별 하수처리 전력원단위 비교(단, 미국은 중규모 급(75.7천톤/일) 처리장 자료임).

여, 국내 중규모급 처리장 평균은 0.36kWh/ton이므로 상당히 높은 편이었다. 이는 처리시설의 비효율적인 운영특성에도 기인하지만, 소화가스자원화가 매우 미흡하고 미활용 재생에너지의 활용이 매우 낮기 때문이다 (아래 2.3절 참조). Fig. 2는 지역별 하수처리

에너지를 비교한다. 전남도가 제거 BOD당 소비전력이 처리유량 당 소비전력보다 상당히 높았고, 반대로 대구시의 경우는 처리하수량 당 소비전력이 더 높았다. 이는 전남도의 유입하수중 BOD 농도가 매우 낮고, 대구시의 유입하수중 BOD 농도가 상당히 높음을 의미한다. 따라서, 효율적인 에너지소비를 위하여

Table 6. 자료조사 하수처리장의 하수처리 전력원단위 비교

시설 용량	처리방법	처리장수	하수유입량 (천톤/일)	하수처리량 (천톤/일)	전력소비량 (kWh)	하수처리 전력원단위(kWh/ton)
100천톤/일 이상	표준활성	34	12,718.1	12,450.0	1,031,099,708	0.227
	장기포기	1	100.0	100.8	13,053,960	0.355
	기타	6	1,332.4	1,310.2	74,151,550	0.155
	소계	41	14,150.5	13,861.0	1,118,305,218	0.221
10천톤- 100천톤/일	표준활성	53	1,855.7	1,749.5	202,161,111	0.317
	회전원판	3	29.1	29.1	3,149,579	0.297
	접촉산화	1	26.8	26.7	8,374,758	0.859
	장기포기	1	7.9	7.9	1,504,764	0.523
	산화구	7	92.3	91.4	14,098,079	0.423
	기타	26	586.5	574.1	96,779,319	0.462
	소계	91	2,598.2	2,478.7	326,067,609	0.360
10천톤/일 미만	표준활성	11	36.7	35.1	7,250,598	0.565
	회전원판	5	21.6	17.0	4,043,431	0.650
	접촉산화	6	3.2	3.2	1,679,098	1.443
	장기포기	18	20.7	19.5	6,737,331	0.945
	산화구	19	52.5	51.4	13,881,760	0.741
	기타	42	97.1	93.2	26,021,806	0.765
	소계	101	231.7	219.4	59,614,024	0.744
	총계		233	16,980.4	16,559	1,503,986,852

처리하수량당 소비전력보다는 제거 BOD당 소비전력을 객관적인 기준으로 활용하여야 하고, 또한 각 처리장에서는 유입하수 중 불명수 등이 혼합되어 하수 농도를 낮추는, 즉 처리가 불필요한 유입하수량까지 처리하여야 하는 경우를 최대한 억제하여야 할 것이다.

Table 7은 개별 해외처리장(Voigt, 2003)의 주요성능지표를 우리나라 지역별 평균값과 비교하였다. 하수처리장 등가인구 기준 연간 에너지소비량을 비교하면 지자체평균 자료와 미국 위스컨신주 소재 처리장의 에너지 소비량은 비슷하고 유럽의 처리장보다 상당히 높은 수준을 보인다. 그러나, 보다 세부적으로 관찰하면 Fig. 3과 같이 국내 각 처리장에서의 에너지 소비가 미국 위스컨신주 및 유럽의 처리장보다 상당히 많은 전력을 소비함을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 지자체별 하수처리장의 전력사용 비율을 설명한다. 전국 전력소비량(한국전력공사, 2006) 중 하수처리장의 전력사용 비율은 0.45%이며 일본의 경우 하수처리장 전력소비량은 6,806GWh로써 일본내 총소비량의 0.81%를 차지하고 있다. 국내 지자체당 하수처리장의 전력사용 비중은 대구시가 1.43%로 가

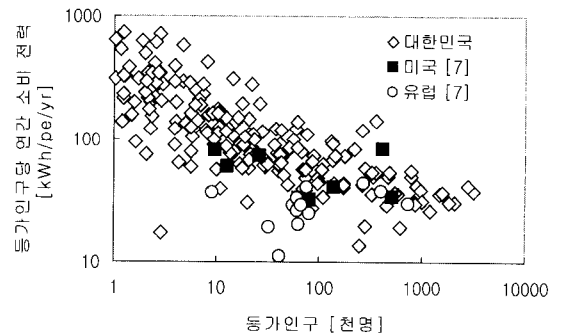


Fig. 3. 하수처리장 등가인구 기준 연간 에너지사용량 비교.

장 높고 울산시가 0.06%로 가장 낮았다. 이 비율은 응답처리장의 전력량만을 고려하므로, 실체는 이보다 약간 높아질 것으로 사료된다.

2.3. 소화가스의 자원화 및 미활용·재생에너지 이용실태

2.3.1. 소화가스의 자원화 실태

2005년 현재 가동 중인 국내하수처리장 중 소화조가 설치된 처리장은 67개소이며, 이 중 미가동 중이거나 자료가 불확실한 처리장을 제외한 처리장에 대해

Table 7. 해외 하수처리장과의 KPI 비교(등가인구 기준: 1pe=60g BOD)

하수처리장명		등가인구 (pe)	연간 총에너지사용량		연간 총 전력에너지비용		연간 총 전력에너지비용 (1\$=950원)	
국가	지자체\단위	1000명	천kWh/yr	kWh/pe/yr	천\$/yr	\$/pe/yr	천원/yr	원/pe/yr
대한민국	강원(평균)	68.8	4267	62.1			306905	4463
	경기(평균)	134.2	5793	43.2			375019	2793
	경남(평균)	36.2	2604	71.9			182014	5022
	경북(평균)	40.7	2682	65.9			227340	5582
	광주(평균)	531.9	18341	34.5			1297149	2439
	대구(평균)	597.1	24946	41.8			1486167	2489
	대전(평균)	886.7	36358	41.0			2308683	2604
	부산(평균)	357.1	13718	38.4			843740	2363
	서울(평균)	2369.3	87119	36.8			5023523	2120
	울산(평균)	39.6	2929	74.0			270780	6841
	인천(평균)	75.8	4750	62.7			306722	4049
	전남(평균)	6.6	748	112.8			66535	10031
	전북(평균)	63.6	5867	92.2			283243	4451
	제주(평균)	105.1	2197	20.9			364232	3466
	충남(평균)	74.6	4287	57.4			224926	3014
	충북(평균)	32.6	2101	64.5			144015	4423
	국가 평균	140.9	6375	45.3			405574	2879
미국 ^a	Ashland	26.1	1911	73	82	3.14	77900	2983
	Burlington	82	2654	32	118	1.44	112100	1368
	Grassland	9.8	803	82	35	3.56	33250	3382
	Green Bay	421.1	35241	84	1171	2.78	1112450	2641
	La Crosse	138.5	5535	40	242	1.75	229900	1663
	Papermill A	506	17253	34	518	1.02	492100	969
	Portrage	63.9	1223	33	61	1.66	57950	1577
	Rhineland	12.6	757	60	32	2.53	30400	2404
	유럽 ^a	A	56	1613	29	81	1.45	76950
B		77	3059	40	164	2.13	155800	2024
C		42.8	468	11	28	0.65	26600	618
D		61.6	1628	26	81	1.33	76950	1264
E		64.3	1306	20	77	1.19	73150	1131
F		13.8			41	2.94	38950	2793
G		82	2067	25	103	1.26	97850	1197
H		733.3	22132	30	1096	1.5	1041200	1425
I		17.3			189	10.9	179550	10355
J		406.4	15030	37	1024	2.52	972800	2394
K		61	2003	33	136	2.24	129200	2128
L		9	322	36	22	2.43	20900	2309
M		33	633	19	59	1.78	56050	1691
N		68	2000	29	155	2.28	147250	2166
O		275	12000	44	743	2.7	705850	2565

a. Voigt(2003).

서 운영현황 자료를 파악하였다. 소화조가 설치된 처리장을 처리장 규모별로 나누면 10-50 천m³/일 규모가 17개소(13개소 가동 중, 2개소 미가동, 2개소 자
료미비), 50-100 천m³/일 규모가 16개소(15개소 가동 중), 100-250 천m³/일 규모가 10개소(모두 가동 중), 250-500 천m³/일 규모가 9개소(8개소 가동

Table 8. 실태조사 응답 하수처리장의 전력소비량

지역	지역별 연간 전력 소비량(GWh) ^a	비율	처리장수	실사용량	하수처리장 전력소비량(GWh)	하수처리장 전력사용 비율(%)
강원	12,379.0	3.72	6	387.3	25.6	0.21
경기	68,750.4	20.68	65	5,255.2	391.8	0.57
경남	24,093.9	7.25	30	1,000.6	91.4	0.38
경북	33,161.1	9.98	33	1,820.3	83.2	0.25
광주	6,205.1	1.87	2	720.0	38.0	0.61
대구	12,363.4	3.72	6	1,564.0	176.2	1.43
대전	7,252.9	2.18	1	900.0	36.4	0.50
부산	16,589.0	4.99	7	1,689.0	94.3	0.57
서울	40,523.7	12.19	4	5,890.0	348.5	0.86
울산	20,851.7	6.27	4	231.6	11.6	0.06
인천	18,165.1	5.46	6	422.0	28.2	0.16
전남	18,803.2	5.66	19	190.4	20.9	0.11
전북	13,592.7	4.09	16	907.9	66.3	0.49
제주	2,768.1	0.83	3	165.0	7.9	0.29
충남	22,449.5	6.75	8	363.0	34.0	0.15
충북	14,464.2	4.35	23	593.5	49.8	0.34
계	332,413.0	100.00	233	22099.7	1504.0	0.45

a. 한국전력공사(2006).

중), 그리고 500 천m³/일 이상 규모가 15개소(15개소 가동 중)이다. 그리고, 소화조 규모별로 구분하면 5000m³ 이하가 24개소(38%), 5,000~10,000m³이 8개소(13%), 10,000~20,000m³ 규모가 12개소(19%), 20,000~50,000m³ 규모가 12개소(19%), 그리고 50,000m³ 이상이 7개소(10%)이다.

소화조 운영현황을 요약하면 다음과 같다. 가온 방식은 37개소가 직접가온(증기주입식), 21개소가 간접가온(열교환방식) 방식을 사용하고 있다. 교반 방법으로는 대부분이 가스교반방식(45개소, 78%)이며, 기계교반이 8개소(13%), 그리고 가스 및 기계 병행을 하는 곳도 5개소(9%)이다. 농축방법은 생슬러지와 잉여슬러지를 혼합하여 농축하는 시설이 43개소(74%)이고, 분리 농축하는 시설은 12개소(26%)이었다. 소화조 온도를 살펴보면 37개소(64%)는 적정범위인 33~37°C로 운전되고 있으며, 33°C 미만으로 운전되는 처리장이 18개소(30%), 37°C 이상이 3개소(6%)이었다. 소화조 내 상부와 하부의 온도차는 대부분의 처리장(41개소, 71%)에서 2°C 이내로 운영되고 있었다. 체류일수는 약 20~30일(23개소, 39%)이 가장 많았으나 20일 이하(12개소, 22%)로 유지되는 곳도 다수 있었다.

소화가스 발생량 현황은 다음과 같다. 설계발생량 대비 실제발생량의 비율은 평균 68.4%로 낮았다. 이를 구체적으로 살펴보면 설계대비 발생가스량이 100% 이상인 처리장이 11개소(19%), 70~100%인 처리장이 10개소(18%), 50~70%인 처리장이 19개소(32%), 그리고 50% 이하인 처리장이 18개소(31%)이었다. 농축슬러지 VS 1kg당 가스발생량은 적정범위(400~700l) 또는 그 이상이 19개소(32%)이었으며, 나머지는 400l 이하이었다. 소화조의 연간 총 가스발생량의 변화는 2001년 281,000m³/일부터 2005년 382,000m³/일까지 꾸준히 증가하였다. 이는 하수의 BOD 증가 및 고도처리 처리장 개소의 증가에 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 4는 하수처리량에 따른 실제 소화가스발생량 대 설계 가스발생량 비를 나타낸다. 발생량비의 평균값은 68.4%이지만 그 범위가 20~160%로 변화폭이 매우 크다. 슬러지 유량가중 평균값은 82%로 나타나 비교적 용량이 큰 소화조에서 가스발생량이 설계 값에 다소 근접하고 있음을 알 수 있다. 실제 가스발생량 대 설계 가스발생량 비는 2001년 55%부터 2004년 67%로 꾸준히 증가하였다. 이 기간 동안 소화효율은 큰 변화가 없었으므로 실제 가스발생량 대 설계 가스

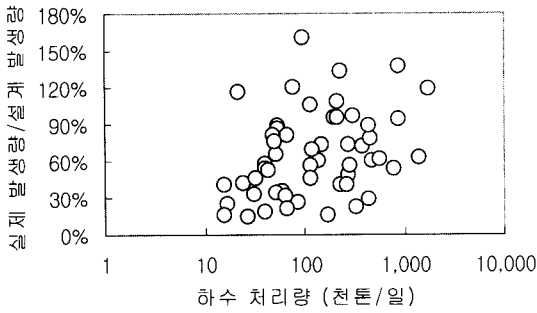


Fig. 4. 실제 가스발생량 대 설계 가스발생량.

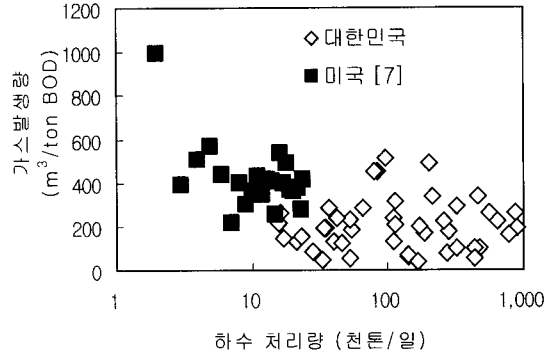


Fig. 6. 국내외 하수처리장 처리량에 따른 유입 BOD 부하에 대한 가스발생량.

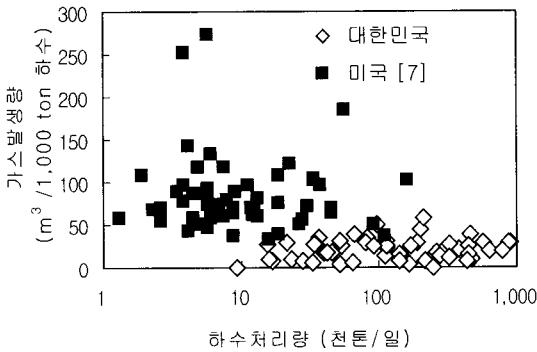


Fig. 5. 국내의 하수처리장 처리량에 따른 가스발생량.

발생량 비가 증가한 것은 관저 정비 등에 따른 하수의 유기물 농도 증가 및 고도처리에 따른 외부탄소원 주입에 의한 슬러지 발생량 증가 등에 의한 것으로 판단된다.

소화가스발생량은 슬러지 유입량에 비례하여 증가하며, 단위 슬러지당 가스발생량은 평균 5.84m³/톤 슬러지(60개소 평균)이었다. 국내 하수처리량 당 가스발생량은 22.8m³/천톤(Fig. 5)으로, 미국 위스컨신주 하수처리장 평균값(83.9m³/천톤)의 약 27%로 매우 낮았다. 이는 하수의 낮은 유기물 농도 및 운영 미숙 등에 의한 소화효율 저하 등에 기인한 것으로 판단된다. 예를 들면 하수처리장 유입 BOD 부하당 가스발생량은 228m³/ton BOD로서 Fig. 6과 같이 미국 위스컨신주의 약 55%이고, 이는 우리나라 소화조 운영효율이 미국에 비하여 낮기 때문에 나타난 현상으로 판단된다. 따라서 소화조 운영이 정상화되고, 관저정비 사업수행 및 음식물 및 분뇨의 하수도 유입 등으로 하수의 BOD가 증가하면 가스발생량은 현재보다 약 4배까지 증가할 것으로 추정된다.

전국 평균 소화효율은 약 35%이며, 각 처리장별 효율 변화는 크게 나타났다. 유량가중평균 소화효율도 35%로 계산되어 처리장 규모와 소화효율은 큰 상관관계를 나타내지 않았다.

각 처리시설에서 발생된 소화가스의 이용현황은 다음과 같다. 대부분의 소화가스(80%)는 소화조 가운데 사용되고 있으며, 슬러지 건조 및 판매에 4.9%, 발전에 7.3%, 처리장 냉난방 등에 0.5%가 이용되고, 그 나머지 7.3%는 소각 등으로 폐기되고 있다. 소화가스를 발전에 활용하는 처리장은 서울특별시의 4개소(중랑, 탄천, 서남, 난지), 부산광역시 2개소(수영 및 장림), 그리고 제주하수처리장이다. 중랑, 탄천, 서남 및 난지의 연간 발전량은 각각 4,457, 2,955, 6,024, 2,578MWh이었다. 수영하수처리장은 발전용량 194kW급, 제주하수처리장은 420kW급 2기가 운영 중이다. 또한 서울특별시 탄천하수처리장의 경우 연료전지를 이용한 발전 시범사업이 현재 진행 중이다.

2.3.2. 미활용 · 재생에너지 이용실태

공공하수도 에너지 사용 실태조사 결과, 미활용 및 재생에너지 실태조사에 응답한 전국 216개 하수처리장 중 에너지절약을 위해 미활용 · 재생에너지를 이미 이용하고 있는 하수처리장은 30곳(13.8%)으로 조사되었다. 이러한 미활용 재생에너지 이용현황 분야별 분포인 Fig. 7을 보면 태양열 이용이 7곳(23%)으로 가장 많았고 소화가스발전이 6곳(20%), 하수열이용 냉난방이 5곳(17%), 그 외 소수력 발전 4곳, 태양광 발전 3곳, 기타 3곳으로 조사 되었으며, 풍력발전과

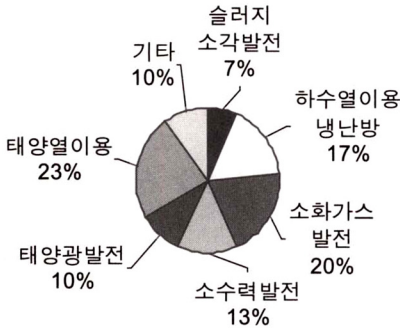


Fig. 7. 미활용 재생에너지 이용현황(적용 분야별).

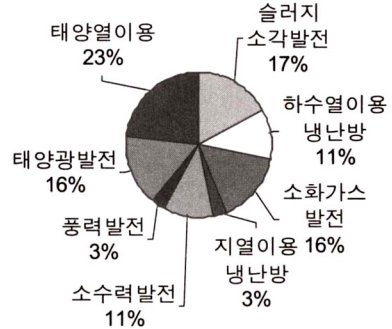


Fig. 8. 향후 도입을 희망하는 미활용 재생에너지 설비의 분포.

지열이용 냉난방은 이용 사례가 전무하였다.

공공하수도 에너지 사용 자료조사 결과, 에너지절약을 위해 미활용·재생에너지의 향후 도입을 희망하는 하수처리장은 응답처리장수 기준 38%의 처리장이 희망하였다. 미활용·재생에너지 이용 희망현황 분야별 분포를 보면 Fig. 8과 같이, 태양열 이용을 희망하는 곳이 23%로 가장 높은 비율을 나타내고 있으며, 슬러지소각발전(17%), 태양광발전(16%), 소화가스발전(16%) 등의 순서로 나타났다.

공공하수도 시설에서의 미활용·재생에너지를 적극적으로 활용하는 데 있어 극복해야할 어려운 점으로는 설비 구입/설치비의 현실화 부분이 53%의 높은 비율로 조사 되었으며, 그 다음이 설비 운영시스템 및 운영비(27%), 활용에 대한 필요성에 대한 인식 미흡(15%) 등의 순서로 나타났다.

3. 맺음말

본 연구에서 실시한 공공 하수도시설에 대한 에너지 사용실태의 조사연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 자료조사에 협조한 국내 하수처리장은 7개시와 9개도의 총 233개소로 2005년 현재 국내 가동 중인 하수처리장수 기준 79.3%, 용량 기준으로 94.5%으로 국내 대부분의 처리장을 포함하였다.

(2) 국내 하수처리장의 평균가동율은 74.9%이고, 포기조송풍기 및 유입펌프의 부하율이 상당히 낮았다.

(3) 국내 총인구 환산 하수처리장의 전력사용량은

1,756GWh로서 국내총 전력소비량 중 하수처리장의 전력사용 비율은 0.52%이고, 처리장내 사용 연료비대 전력비는 4.46%이었다.

(4) 국내 하수처리장의 처리하수당 전력원단위 0.243kWh/m³이고, 제거 BOD 당 소모전력 2.07kWh/kg BOD이었다. 처리하수당 평균 소비전력은 미국 및 일본의 소비전력과 차이가 비교적 작았으나, 제거 BOD당 평균 소비전력은 상당히 높았다.

(5) 지역별 평균 하수처리 에너지 소비는 외국처리장에서의 에너지 소비와 크게 차이가 없는 것처럼 보이나, 개별적으로 보면 매우 큰 에너지를 소비함을 알 수 있었다. 그 이유는 국내처리장은 100천톤/일급 이상의 대규모급 처리장이 대표하였고, 외국처리장의 경우는 중소규모급 처리장이 대표하였기 때문이다. 또한, 외국 처리장에서는 소화가스자원화와 미활용 재생에너지를 적극 활용하고 있으나, 국내처리장에서는 이에 대한 활용실적이 매우 미약하기 때문이다.

(6) 하수처리장에서 부생물질로 발생되지만 재생에너지로 활용될 수 있는 소화가스 발생량은 382,000 m³/일이었다. 미국 위스컨신주와 비교할 경우 처리하수당 소화가스 발생량 및 발생효율도 매우 낮았다. 이는 들어오는 하수의 유입 BOD가 상당히 낮기 때문으로 사료된다.

(7) 각 처리장에서 발생된 소화가스는 소화조 가온 80%, 판매 4.9%, 발전 7.3%에 활용되었다.

(8) 미국, 유럽, 및 일본 등의 선진국과 같이 하수처리장에서의 에너지 운영을 효율적으로 하기 위하여 아래와 같이 제안한다.

① 단기적 계획보다는 5년 이상의 장기적인 계획하

에 비효율적 에너지 소비요인을 단계적으로 개선한다.

② 공공하수처리장의 운영인력에 대한 집중적인 에너지관련 교육이 필요하며, 현장 사정에 적합한 에너지 절약정책을 추진하도록 유도한다.

③ 하수관거의 수송능력과 하수처리장 시설의 보완을 전제로, 유입하수의 BOD 부하를 높여서 하수처리효율을 상승시킴과 동시에, 많은 유기물을 포함하고 있는 수세분뇨 및 음식물쓰레기의 하수도 수용을 통하여 질 좋은 소화가스를 생산하여 재활용하도록 하여야 한다.

④ 지자체 정황에 적합한 미활용 재생에너지 시스템을 적극적으로 활용한다.

후 기

본 연구는 환경부의 연구비 지원, 설문에 자세히 응답하신 국내 하수처리장, 그리고 하수처리분야의 여러 자문위원의 협조로 진행되었기에, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

1. ACWA (Association of California Agencies) (2006) ACWA's

Energy Policy, Goals & Guidelines, http://www.acwa.com/issues/energy_policy.asp.

2. EPRI (1996) Water and Wastewater Industries: Characteristics and Energy Management Opportunities, CR-106941.

3. F. Rogalla (2006) Energy Self Sufficient Wastewater Treatment: How Far from Reality? Proceedings of CIWEM Energy Saving Strategies in Water and Wastewater Treatment, Nottingham, UK.

4. US DOE (2000) Performance Improvement at Wastewater Treatment Plants, Best Practices Management Case Study.

5. T. Elliot (2003) Energy-Saving Opportunities for Wastewater Facilities, a Review, Energy Center of Wisconsin.

6. T.E. Vik (2003) Anaerobic Digester Methane to Energy A Statewide Assessment Prepared for Focus on Energy, McMahan Associates, Inc.

7. D. Voigt (2003) Report on the Development of Energy Consumption Guidelines for Water/Wastewater, Focus on Energy, pp. 22-33.

8. 이타미 가즈오 (2005) 오사카시의 하수도시설에 대한 운영관리 평가의 대처, *일본하수도협회지*, 42(517).

9. 일본하수도협회 (2003) 2003년도 일본수도통계 및 2003년 일본 하수통계.

10. 한국전력공사 (2006) 행정구역별 판매전력량, 전력통계속보.

11. 한국전력거래소 (2006) 2005년(연간종합) 전력시장 운영실적 보고서, p. 2.