

## 하수처리시설의 에너지 자립화 방안 연구

김 영 준, 이 종 연\*, 강 용 태\*\*\*

경희대학교 대학원 기계공학과, \*환경관리공단, \*\*경희대학교 공과대학 기계공학과

### Study on Energy Independence Plan for Sewage Treatment Plant

Young Jun Kim, Jong Yeon Lee\*, Yong Tae Kang\*\*\*

Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Kyung Hee University, Yong In, Gyeong-gi 446-701, Korea

\*Environmental Management Corporation, Incheon 404-708, Korea

\*\*School of Mechanical Engineering, College of Engineering, Kyung Hee University, Yong In, Gyeong-gi 446-701, Korea

(Received October 14, 2009; revision received November 11, 2009)

**ABSTRACT:** The objectives of this study are to analyze the energy independence plan and to propose a suitable sewage treatment plant in Korea. The total amount of electricity consumption for public sewage treatment plant was estimated as 1,812 GWh in 2007. It was estimated that total 16 sewage treatment plants with renewable energy systems produced electricity of 15 GWh per year, which could replace 0.8% of total electricity used for sewage treatment. It was found that domestic sewage treatment plants with power generation plants by digestion gas were installed in 7 places and produced electricity of 13 GWh per year. It was also found that the power generation plants by digestion gas were the most cost-effective for sewage treatment plant out of the renewable energy systems based on the benefit-cost analysis.

**Key words:** Energy independence(에너지자립), Renewable energy(재생에너지), Sewage treatment plant(하수처리시설), Digestion gas generation(소화가스발전)

#### 기 호 설 명

- $\rho$  : 밀도 [kg/m<sup>3</sup>]
- $g$  : 중력가속도 [m/s<sup>2</sup>]
- $V$  : 풍속 [m/s]
- $Q$  : 유량 [m<sup>3</sup>/s]
- $H_e$  : 유효낙차 [m]
- $P$  : 발전출력 [kW]
- $A$  : 날개의 회전면적 [m<sup>2</sup>]
- $H_A$  : 일사량 [kWh/m<sup>2</sup>·day]
- $P_{AS}$  : 표준상태 태양전지 어레이 출력 [kW]
- $E_P$  : 발전전력량 [kWh]

#### 1. 서 론

중국을 포함한 브릭스의 급속한 경제성장, 그리고 중남미 국가들의 자원민족주의 확산으로 인한 에너지자원 국유화 경향과 2002년 이라크전쟁 이후로 OPEC의 시장지배력 회복 및 석유수급 불균형 지속으로 인해 신고유가 시대가 고착되고 있다. 또한 온실가스 의무감축의 본격 시행 및 포스트 교토체제 협상 돌입으로 기후변화가 국제무대의 주요 이슈로 부각되면서 산업계를 중심으로 감축 노력이 확산되고 있다. 에너지의 97%를 해외수입에 의존하는 국내의 경우 원자력 에너지에 대한 역할정립, 신재생에너지 보급확대, 에너지 기술개

† Corresponding author

Tel.: +82-31-201-2990; fax: +82-31-201-2990

E-mail address: ytkang@khu.ac.kr

발을 통한 에너지 안보 확충과 기후변화 협상에 대한 적극적 대응으로 저탄소형 에너지 시스템 구축의 필요성이 증대하고 있는 실정이다.

국가하수도 종합계획(2007년~2015년)에 의하면 에너지 자립형 하수도 시설 구축을 위해 에너지 자립형 공공하수도시설의 모델개발, 에너지 저소비형 하수처리 공정 및 운전관리 기법을 도입하고 중대형 공공하수처리시설에 대한 소화가스 열병합 발전설비 의무화 및 재생에너지의 확대 도입 방안 등 적극적인 향후 정책을 도입할 계획이다.

국내 공공하수처리시설은 2007년 말 현재 347개소(6개월이상 가동), 시설용량 23,734,700 m<sup>3</sup>/day, 평균가동을 79.6%, 전력사용량은 약 1,812 GWh로써 국내 총 전력사용량 중 하수처리시설의 전력사용량 비율은 0.49%로 나타났다. 하수처리시설에서 사용되는 에너지는 전력이 전체의 98.6%로 거의 대부분을 차지하고 있으며, 기기별로 생물반응조의 포기용 송풍기와 하수 유입펌프에서 61.4%로 가장 많은 전력이 소비되고 있었다. 하수처리시설의 하수처리량당 전력원단위는 0.29 kWh/m<sup>3</sup>, 제거 생물학적 산소요구량(BOD)당 전력원단위는 2.353 kWh/kg · BOD이었다.<sup>(1)</sup>

에너지 다소비인 공공하수처리시설의 기후변화협약에 대비한 역할이 증대하면서 온실가스 감축 및 하수처리시설 에너지 자립을 위한 대안으로 신·재생에너지 이용에 대한 적극적인 대응의 필요성이 제기되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 공공하수처리시설에 적합한 에너지 자립 기술과 국내·외 하수처리시설의 에너지 자립실태를 분석한 후, 편익·비용 비율분석(Benefit-Cost Ratio Analysis)에 의한 재생에너지원별 효용성을 평가하고, 공공하수처리시설에 적합한 에너지 자립 모델을 구성하고자 한다.

## 2. 재생에너지 기술개요

### 2.1 소화가스발전

혐기성소화는 절대적으로 산소가 존재하지 않는 조건하에서 박테리아에 의해 유기물질이 발효되는 과정으로 20세기 초반부터 하수슬러지 안정화를 위한 방법으로 널리 사용되어 왔으며, 이 과정에 의해 슬러지의 무해화, 탈수능력 향상 및 메탄(CH<sub>4</sub>)과 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)를 주성분으로 하는 소화가스의 에너지 부산물을 얻을 수 있는 장점이

있다.<sup>(2)</sup>

소화가스 발생량은 유기물의 종류에 따라 차이가 있으나, 평균적으로 유기물 1 kg당 400~600리터의 가스가 발생한다. 소화가스 조성은 부피비로 메탄이 50~60%, 이산화탄소 40~50%, 불순물(H<sub>2</sub>S, N<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, Siloxane 등)과 수분으로 이루어져 있다. 소화가스(메탄 60%)의 저위발열량은 5,136 kcal/Nm<sup>3</sup>이다. 소화조 가온 및 열병합발전 등의 연료로 사용하기 위해서는 수분이나 먼지, 황 화합물 등과 같은 불순물을 제거하기 위한 전처리공정이 필요하다.<sup>(3)</sup>

소화가스 열병합발전시스템의 경우 발전기에서 생산되는 전기는 하수처리시설 내에 전력으로 공급하고, 냉각수와 배기가스 열교환기를 통하여 회수되는 온수는 소화조 가온용으로 사용함으로써 열과 전기를 동시에 활용할 수 있는 장점이 있다. 그러나 소화가스 이용을 위한 전처리 공정 및 열병합발전시스템 선정시 소화가스 발생량의 변동과 가스성분 변화 등에 유의하여야 한다.

### 2.2 풍력발전

풍력발전은 태양에 의한 지구표면의 불균일한 가열에 의해서 발생한 바람의 운동에너지를 공기역학적인 힘을 일으키는 날개를 이용하여 회전에너지로 변환시키고, 이 기계적 회전에너지를 발전기를 이용하여 전기에너지로 변환시키는 발전방식이다.

풍력발전량은 평균풍속자료를 이용한 통계적 방법을 사용하여 산정하며, 일반적으로 Weibull 및 Rayleigh 분포함수로 표현되는 풍속분포를 이용하는 데, Rayleigh 분포함수는 Weibull 분포함수의 특별한 경우로 형상계수가 2인 경우이다.<sup>(4)</sup>

풍력발전의 출력은 식(1)에 의해서 구해진다.

$$P = \frac{1}{2} \rho_a A V^3 \eta C_p \quad (1)$$

여기서,  $\rho_a$ 는 공기밀도,  $A$ 는 날개의 회전면적(Swept area),  $V$ 는 풍속,  $\eta$ 는 기계효율 및 발전기효율,  $C_p$ 는 출력계수(Power coefficient)이다.

Weibull 분포함수는 식(2)와 같이 표현된다.

$$f(V) = \frac{k}{c} \left( \frac{V}{c} \right)^{k-1} \exp \left[ - \left( \frac{V}{c} \right)^k \right] \quad (2)$$

여기서,  $f(V)$ 는 풍속  $V$ 가 발생할 확률,  $k$ 는 형상계수,  $c$ 는 척도계수이다.

풍속 관측높이와 풍차 허브높이가 다른 경우에는 풍속의 보정이 필요하다. 연간발전량은 시동풍속에서 정지풍속까지 각 풍속별로 산출한 전력량의 합계가 되며, 여기에 풍차 설치높이에 따른 압력, 온도, 기타 손실 등으로 보정한다.

### 2.3 소수력발전

수력발전은 물의 고저차(낙차)에 의한 위치에너지를 수차를 이용하여 회전에너지로 변환시키고, 이 기계적 회전에너지를 발전기를 이용하여 전기에너지로 변환시키는 발전방식이다.

하수처리시설은 물의 사용량이 증가하는 하절기에는 하수량이 증가하고 동절기에는 감소하는 경향이 있으나, 안정적인 유량확보로 시스템의 고효율발전이 가능하다. 하수처리시설의 경우 일일 하수 유입량과 방류량이 기록되므로 방류량을 분석하여 유량지속곡선을 작성한다.<sup>(5)</sup>

소수력발전의 출력은 식(3)과 같다.

$$P = \rho_w g Q H_e \eta_t \eta_g \quad (3)$$

여기서,  $\rho_w$ 는 물의밀도,  $g$ 는 중력가속도,  $Q$ 는 유량,  $H_e$ 는 유효낙차,  $\eta_t$ 는 수차효율,  $\eta_g$ 는 발전기효율이다.

발전량은 유량변화에 따른 수차의 효율곡선을 이용하여 산출하며, 여기에 기타 손실 등으로 보정한다.

### 2.4 태양광발전

태양광발전은 태양의 빛에너지를 직접 전기에너지로 변환하여 발전하는 방식으로 반도체가 빛을 흡수하면 전기가 발생되는 원리인 광기전력효과(Photovoltaic effect)를 이용한 것으로 p형반도체와 n형반도체의 접합구조인 태양전지에 빛이 입사되어 흡수되면 전자와 정공이 발생하고 pn접합부의 전기장에 의해 전자는 n측으로 정공은 p측으로 이동하며 외부회로에 전력을 공급한다.

태양전지 연간 발전량은 식(4)와 같다.<sup>(6)</sup>

$$E_P = H_A P_{AS} K 365 \quad (4)$$

여기서,  $H_A$ 는 설치장소의 일사량,  $P_{AS}$ 는 표준 상태에서 태양전지 어레이 출력,  $K$ 는 태양광 발전 효율이다.

태양광발전시스템은 하수처리시설의 침전지 등 상부에 태양전지를 설치하여 조류발생을 방지하고, 발전된 전력을 하수처리시설에서 소비하는 전력의 일부로 공급함으로써 에너지 자립을 향상에 기여할 수 있다. 또한 혐오시설로 인식되기 쉬운 하수처리시설의 이미지 개선에 기여할 수 있다.

## 3. 국내·외 하수처리시설의 에너지 자립 실태분석

2007년말 현재 국내 하수처리시설의 재생에너지 도입현황을 Table 1에 나타내었다.<sup>(1)</sup> 국내 347개 하수처리시설 중 16개소만이 재생에너지를 도입·운영하고 있었으며, 전체 설비용량 17,659 kW, 연간 발전량 15 GWh, 에너지 자립율 0.8%로 선진국과 비교할 때 상당히 낮았다.

국내 하수처리시설에서 소화조가 설치된 65개 하수처리시설 중 소화조가 정상 가동 중인 처리시설은 59개소이며, 소화가스 발생량은 평균 413,558 Nm<sup>3</sup>/

Table 1 Applications of renewable energy to sewage treatment plant(End of 2007)

Name	Capacity of facility (m <sup>3</sup> /day)	Digestion gas generation (kW)	Small hydro power (kW)	Wind power (kW)	Solar photovoltaic (kW)
Tancheon	1,100,000	800*2 1,600*1			
Seonam	2,000,000	1,600*2			
Nanji	1,000,000	720*3			
Jungrang	1,710,000	846*3 1,200*3			
Suyoung	550,000	750*1			
Sincheon	680,000		139*1		479
Bugok	10,000				50
Byeokje	30,000				24
Seoksu	300,000		400*1		
Chuncheon	150,000				100
Jecheon	70,000	280*1			100
Cheonan	150,000		20*1 15*1		
Asan	63,000		36*1		
Jinhae	60,000		10*1	10*1	133
Onsan	150,000				40
Jeju	130,000	375*1			
Total		16,103	620	10	926

day이었다. 소화가스는 소화조 가온에 74%, 발전에 5%가 활용되고 있으며, 14%는 폐기되고 있었다. 소화가스를 발전에 활용하는 하수처리시설은 7개로 조사되었고, 연간 총발전량은 13 GWh이며 에너지 자립율은 0.7%로 재생에너지 중 국내 하수처리시설의 에너지 자립율 향상에 큰 역할을 하는 것으로 나타났다.

제주하수처리시설의 소화가스발전설비는 2005년 11월에 도입되어 연간발전량이 0.7 GWh로 하수처리시설 전력사용량의 28%를 대체하며, 평균 가스발생량은 2,476 Nm<sup>3</sup>/day이고 발전에 소비되는 가스량은 1,185 Nm<sup>3</sup>/day이었다.

제천하수처리시설의 소화가스발전설비는 2007년 1월에 도입되어 연간발전량 0.78 GWh로 전력사용량의 19.7%를 대체하고, 발전설비의 폐열회수로 연간 678 Gcal의 에너지를 절감하고 있으며, 평균 가스발생량은 2,082 Nm<sup>3</sup>/day이고 발전에 소비되는 가스량은 1,522 Nm<sup>3</sup>/day이었다.

태양광발전설비는 7개의 하수처리시설에 도입되어 연간 1.1 GWh의 전력을 생산하고 있으며, 국내 공공하수처리시설의 전체 전력사용량에 대한 에너지 자립율은 0.06%이다. 신천하수처리시설의 태양광발전설비는 2004년 8월 발전설비용량 479 kW로 설치되어 연간 0.55 GWh의 전력을 생산하고 있으며, 에너지 자립율은 1.4%이다. 7개 하수처리시설의 태양광발전설비는 최초침전지, 생물반응조, 최종침전지, 관리동 상부, 생물반응조 주변공터 등을 이용하여 다양하게 설치되고 있었다.

소수력발전은 5개 하수처리시설에서 발전설비용량 620 kW로 연간 0.8 GWh의 전력을 생산하고 있으며, 에너지 자립율은 0.04%이다. 소수력발전은 아산하수처리시설에서 2000년 12월 국내 최초로 도입되어 연간 발전량 0.05 GWh로 하수처리시설 전력소비량의 0.7%에 해당하는 전력을 생산하고 있으며, 유효낙차 6.9 m, 최대유량 0.416 m<sup>3</sup>/s로 카플란수차가 적용되었다.

풍력발전은 진해하수처리시설에서 국내 최초로 2007년 도입되어 가동 중에 있으며, 발전설비용량 10kW, 연간 발전량 2.9 MWh로 하수처리시설 전력소비량의 0.06%를 대체하고 있다.

일본에서는 1984년부터 하수처리시설에 소화가스발전설비가 도입되기 시작하여, 2005년말 기준 26개 처리시설에서 총 발전설비규모 22,556 kW, 연간 총발전량 112 GWh로 일본 하수처리시설 전력

소비량 6,899 GWh 대비 1.6%의 에너지 자립율, 연간 발전에 소비되는 소화가스량은 58,920,483 Nm<sup>3</sup>로 나타났다.<sup>(7)</sup>

일본 야마가타시 정화센터의 시설용량은 52,000 m<sup>3</sup>/day이며, 1988년 11월 178 kW의 소화가스 엔진발전설비와 2002년 5월 100 kW 2기의 소화가스 연료전지 발전설비를 도입하여 정화센터에 전력을 공급하고 있고, 2005년 소화가스 사용량 1,405,394 Nm<sup>3</sup>/year, 연간 총발전량 2.5 GWh로 하수처리시설 전력소비량의 40.3%를 공급하는 것으로 나타났다.

일본 모리가사키 수 재생센터의 시설용량은 1,540,000 m<sup>3</sup>/day이고, 2004년 4월 일본 최대의 소화가스 발전기 3,200 kW 1기가 설치되었으며, 2005년 소화가스 사용량 12,960,770 Nm<sup>3</sup>/year, 연간 총발전량 20.9 GWh로 하수처리시설 전력소비량의 19.6%를 공급하는 것으로 나타났다. 또한 모리가사키 수 재생센터에서는 소수력발전설비를 2005년 6월 유효낙차 2.5 m, 평균유량 5.0 m<sup>3</sup>/s의 47.5 kW 2기와 유효낙차 2.0 m, 평균유량 0.3 m<sup>3</sup>/s의 4 kW 1기를 도입하여 연간 0.8 GWh의 전력 생산으로 하수처리시설 전력소비량의 0.7%를 공급하고 있다.

일본 나카지마 정화센터에서는 2004년 2월 정격출력 1,500 kW의 풍력발전설비를 도입하여 하수처리시설 전력소비량의 20%인 연간 2.5 GWh의 전력을 생산하고 있으며, 프로펠러형 로터직경 70 m, 브레이드수 3매, 허브까지의 높이는 70 m이다.

하수처리시설의 에너지 자립 실태분석을 통하여 하수처리시설은 시설 및 부지 특성상 소화가스발전, 풍력발전, 태양광발전 및 소수력발전 등의 재생에너지 도입에 유리한 여건을 갖추고 있는 것으로 분석되었으며, 적극적인 재생에너지 도입방안이 마련된다면 에너지 자립형 하수처리시설을 구축할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 편익 · 비용 분석에 의한 재생에너지 원별 효율성 평가 및 하수처리시설의 에너지 자립 모델분류

재생에너지 원별 효율성 평가는 시설용량 520,000 m<sup>3</sup>/day 규모의 S하수처리시설을 대상으로 모델을 구성하여 실시하였다. S하수처리시설의 연간 하수처리량은 131,035,000 m<sup>3</sup>/year, 전력소비량 57,288,002 kWh/year, 에너지원단위 0.437 kWh/m<sup>3</sup>이다.

소화가스 발생량은 년중 최저, 최고, 평균 각각 15,395 Nm<sup>3</sup>/day, 19,633 Nm<sup>3</sup>/day, 18,720 Nm<sup>3</sup>/day이며, 연간 발생량은 6,570,000 Nm<sup>3</sup>/year, 소화가스 중 메탄가스 함량은 60%이다.

연평균 풍속은 지상높이 10m에서 4.4m/s로 풍력 발전설비를 도입하기에는 다소 낮지만, 풍속 변화에 따른 풍력발전량의 변화와 편익·비용 비율의 변화를 검토하고자 분석을 수행하였다.

소수력발전 도입을 위한 하수처리수 방류량은 년중 최저, 최고, 평균 각각 297,000 m<sup>3</sup>/day, 450,000 m<sup>3</sup>/day, 358,000 m<sup>3</sup>/day이며, 염소소독조 방류구에 유효낙차 2.4m를 확보할 수 있다.

태양광발전 도입이 가능한 최초침전지 및 최종 침전지의 면적은 56,352 m<sup>2</sup>, 관리동 등 건물 지붕 면적은 8,105 m<sup>2</sup>이다.

모델 하수처리시설은 유입되는 하수를 처리하여 D하천을 거쳐 낙동강으로 방류한다.

이상의 조건을 이용하여 S하수처리시설의 재생에너지 도입에 따른 전력자립율을 분석하였으며, 분석기준 시점은 2008년 11월이다.

소화가스발전은 열병합발전기 용량 1,250 kW를 도입하며, 발전효율 30%, 폐열회수 열이용효율 50%, 가동율 90%로 하여 연간발전량을 산출하였다. 월별 소화가스 발생량은 발생량이 최저인 1월을 제외하고는 발전기 사용량보다 많았고, 향후 소화효율이 개선되면 발생량이 증대할 것으로 예측된다. 연간발전량은 9,855 MWh, 폐열회수 열량 14,125.5 Gcal이며, 설치비용은 87.5억 원이다.

풍력발전은 850 kW, 1,800 kW를 기준으로 검토를 하였으며, 터빈 용량을 기준으로 Vestas사의 자료를 적용하였다. 압력, 온도, 정지손실, 기타 손실을 20%를 적용하였다. 풍속 4.4 m/s에서 연간발전량은 951 MWh, 2,875 MWh이고, 풍속 5.0 m/s에서 연간발전량은 1,310 MWh, 3,825 MWh이며, 풍속 5.4 m/s에서 연간발전량은 1,556 MWh, 4,441 MWh이다. 풍력발전기 설비용은 850 kW, 1,800 kW 각각 18억 원, 38억 원이다.

소수력발전은 설계유량 6 m<sup>3</sup>/s, 유효낙차 2.4 m, 연간 월별 방류수량 자료를 이용하여 유량지속곡선을 작성하였으며, 발전용량 및 연간발전량은 RETScreen을 이용하여 산출하였다. 카플란수차, 발전기효율 95%, 수압손실 5%, 기타손실 6%, 가동율 90%, 터빈효율은 RETScreen에서 제공하는 데이터를 이용하였다. 소수력 발전기용량 85 kW, 연간

발전량 653 MWh이며, 설치비용은 8.3억 원이다.

태양광발전은 침전지 상부를 이용해 태양전지 어레이출력 1,000 kW를 도입하고, D시의 평균일사량 4.0 kWh/m<sup>2</sup>·day, 태양광 발전효율 0.7로 하여 산출한 연간발전량은 1,022 MWh이다. 설치비용은 88억 원이다. 일반적으로 국내 태양광발전 시스템의 발전효율은 60~80%의 범위를 가진다. 또한 태양전지 어레이출력 1,000 kW를 설치하는데 필요면적은 16,500 m<sup>2</sup>이다.

모델 하수처리시설에 위와 같이 재생에너지를 도입하면 25%의 전력자립이 가능한 것으로 평가되었다.

또한 재생에너지 원별 효율성을 평가하기 위하여 편익·비용 비율분석을 실시하였다. 편익·비용 비율분석(Benefit-Cost Ratio Analysis)은 B/C 비율이 높은 사업일수록 경제적 타당성이 높은 것으로 평가하는 분석기법이다. 일반적으로 B/C 비율이 1보다 크면 경제성이 있다고 판단한다. 편익·비용 비율은 식(5)에 의해서 구해진다.<sup>(8)</sup>

$$\frac{B}{C} = \sum_{i=0}^n \frac{B_i}{(1+r)^i} / \sum_{i=0}^n \frac{C_i}{(1+r)^i} \quad (5)$$

여기서, B는 편익, C는 비용, r는 할인율, n는 분석기간이다.

분석기준은 할인율 7%, 수명기간 20년을 공통으로 적용하였으며, 운전유지비는 소화가스발전, 풍력발전, 소수력발전, 태양광발전 각각 설치비의 8%, 2.5%, 3%, 1%를 적용하였고<sup>(1)</sup>, 재생에너지에 의해 생산된 전력을 하수처리장의 소내 전력으로 공급하여 전력요금 대체효과에 의한 B/C 비율을 산출하기 위해 전력단가는 한국전력공사 산업용전력(을)교압A 67.5원/kWh를 공통으로 적용하였다. 그리고 소화가스 발전의 폐열회수에 의한 열공급 대체효과는 한국지역난방공사 온수요금 공공용 69.89 원/Mcal를 적용하였다.

B/C 비율분석의 결과를 Table 2와 Table 3에 각각 나타내었다. 에너지 자립율 향상을 위해 하수처리시설에 도입되는 재생에너지중 소화가스 발전이 가장 효율성이 높은 것으로 나타났다. 또한 풍력발전은 저용량보다는 대용량일수록 경제성이 높은 것으로 나타났다.

B/C 비율분석에서 B/C 비율이 대부분 낮게 나왔지만, B/C 비율만으로 사업의 타당성을 논하기

Table 2 Benefit-Cost Ratio of renewable energy

Description	Digestion gas generation	Small hydropower	Solar photovoltaic
Present value of Cost (Billion won)	16.1	1.0	9.7
Present value of Benefit (Billion won)	17.5	0.49	0.73
B/C Ratio	1.08	0.45	0.07

Table 3 Benefit-Cost Ratio of wind power

Wind speed (m/s)	4.4		5.0		5.4	
Capacity (kW)	850	1,800	850	1,800	850	1,800
Present value of Cost (Billion won)	2.3	4.8	2.3	4.8	2.3	4.8
Present value of Benefit (Billion won)	0.68	2.1	0.93	2.7	1.1	3.2
B/C Ratio	0.30	0.43	0.41	0.57	0.49	0.66

에는 무리가 따른다. 재생에너지 도입에 따른 환경비용의 절감, 에너지 고갈에 대한 위험도 감소 등 분석과정에서 더 많이 존재하는 편익의 항목들을 고려하지 않았기 때문이다.

국내의 공공하수도시설에 적합한 에너지 자립형 모델을 구성하기 위하여 에너지 자립설비별 도입기준을 설정하고, 각 설비별 도입가능 하수처리시설을 선정하여 국내 공공하수처리시설의 전체 전력사용량에 대한 에너지 자립율을 분석하였다.

소화가스발전 도입에 따른 자립율 분석은 소화조 운영중인 하수처리시설 65개소 중에서 일 가스발생량이 2,000 Nm<sup>3</sup>/일 이상인 하수처리시설 36개소와 가스발생량이 2,000 Nm<sup>3</sup>/일 이하이나 기 도입 되어 운영중인 하수처리시설 2개소를 포함하여 38개 하수처리시설을 분석대상으로 하였다. 분석대상 하수처리시설의 일 가스발생량은 481,436 Nm<sup>3</sup>/일을 기준으로 하였으며, 발전효율을 30%와 34%로 구분하여 각각 산출하였다. 가동율은 90%, 메탄가스 함량은 60%이다. 발전효율 30%의 경우 연간 예상발전량 283 GWh, 에너지 자립율 15.6%이며, 발전효율 34%의 경우 연간 예상발전량 321 GWh, 에너지 자립율 17.7%로 각각 산정되었다.

풍력발전 도입에 따른 자립율 분석을 위하여 강

가 및 해안가에 위치한 하수처리시설을 대상으로 미국 항공우주국(NASA)의 기상관측자료를 이용하여 연평균 풍속을 조사하였고, 지상고 10m에서 풍속이 5m/s 이상인 하수처리시설 45개소를 분석 대상으로 하였다. 분석대상 하수처리시설 45개소의 평균풍속은 5.3 m/s이며, 연간 예상발전량은 설비용량을 기준으로 중형 850 kW와 중대형 1,800 kW로 구분하여 각각 산출하였다. 연간 예상발전량은 각각 67 GWh와 193 GWh이며, 에너지 자립율은 3.7%와 10.7%로 각각 산정되었다.

소수력발전의 도입기준은 하수처리시설 중 하수처리수 방류구 낙차가 2m 이상인 하수처리시설 23개소 중에서 발전설비용량 10kW 이상인 하수처리시설 15개소로 설정하였으며, 에너지 자립율 기여도가 미미하여 본 연구의 자립율 분석에서는 제외하였다.

태양광발전의 도입기준을 설정하기 위해 국내 하수처리시설(77개소)의 설계자료를 분석하여 침전지 및 생물반응조의 면적을 산출하여 하수처리장 면적에 대한 점유비율을 산정하였다. 태양전지의 설치 가능면적은 하수처리장 면적의 약 20% 정도로 산출되었으나, 본 연구에서는 하수처리장 면적의 15%를 태양전지 설치면적으로 설정하여 하수처리시설 347개소에 적용하였다. 전체 하수처리장 면적은 21.7 km<sup>2</sup>이며, 처리장별로 산정된 태양전지용량은 321 MW이다. 연간 예상발전량 산출에 있어 일사량은 기상청 기후자료 평년값(30년 평균) 지역별 자료를 이용하였으며, 태양광 발전효율을 0.7과 0.75로 구분하여 각각 산출하였다. 국내 347개 하수처리시설의 태양광발전 도입에 따른 연간 예상발전량은 각각 393 GWh와 421 GWh이며, 에너지 자립율은 21.7%와 23.2%로 각각 산정되었다.

에너지 자립설비별로 설정된 도입기준에 의하여 하수처리시설에 대한 자립설비의 적용성을 검토하여 자립형 모델을 구성하였다. 에너지 자립형 모델은 크게 8개의 모델로 분류되었으며, 347개 하수처리시설에 적용되었다.

소화가스발전과 풍력, 소수력, 태양광 모두를 적용할 수 있는 하수처리시설은 1개소이고(Model 1), 소화가스발전과 소수력, 태양광을 적용할 수 있는 하수처리시설은 7개소이다(Model 2). 또한 소화가스발전과 풍력, 태양광을 적용할 수 있는 하수처리시설은 4개소이며(Model 3), 소화가스발전과 태

양광을 적용할 수 있는 하수처리시설은 26개소이다(Model 4). 그리고 풍력발전과 소수력, 태양광을 적용할 수 있는 하수처리시설은 2개소이며(Model 5), 소수력발전과 태양광을 적용할 수 있는 하수처리시설은 5개소이고(Model 6), 풍력발전과 태양광을 적용할 수 있는 하수처리시설은 39개소이다(Model 7). 태양광발전만을 적용할 수 있는 하수처리시설은 263개소이다(Model 8).

에너지 자립설비의 도입으로 국내 공공하수처리시설 전체 전력사용량의 약 41~52%를 대체할 수 있는 것으로 평가되었다. 소화효율개선과 대용량의 풍력발전 도입, 에너지 절감설비 도입 등으로 에너지 자립율은 더욱 높아질 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 국내 하수처리시설에 적합한 에너지 자립기술과 국·내외 하수처리시설의 에너지 자립실태를 분석하였다. 또한 편익·비용 분석에 의한 재생에너지 원별 효율성 평가와 하수처리시설의 에너지 자립 모델 구성을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 2007년 국내 공공하수처리시설의 전력사용량은 1,812 GWh이며, 하수처리량당 전력원단위는 0.29 kWh/m<sup>3</sup>이다.

(2) 2007년말 재생에너지를 도입·운영하는 하수처리시설은 16개소이며, 전체 설비용량 17,659 kW, 연간 발전량 15 GWh로 에너지 자립율 0.8%이다.

(3) 국내 하수처리시설에 소화가스 발전설비가 도입된 하수처리시설은 7개소이며, 연간 발전량 13 GWh, 에너지 자립율 0.7%로 국내 하수처리시설의 에너지 자립율 향상에 가장 큰 역할을 하고 있는 것으로 나타났다.

(4) 편익·비용 분석결과 에너지 자립율 향상을

위해 하수처리시설에 도입되는 재생에너지중 소화가스 발전이 가장 효율성이 높은 것으로 나타났다. 또한 풍력발전은 저용량보다는 대용량일수록 경제성이 높은 것으로 나타났다.

(5) 에너지 자립설비의 도입으로 국내 공공하수처리시설 전체 전력사용량의 약 41~52%를 대체할 수 있는 것으로 평가되었다.

## 후 기

본 연구는 환경부의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다

## 참고문헌

1. Ministry of Environment, 2008, Feasibility study on energy independence plan for public sewage treatment plants against climate change.
2. Jung, Y. K., 2007, Sludge into biosolids processing, disposal and utilization, Donghwa.
3. Bae, J. K., 2008, Technology of biomass and biogasification, A-Jin.
4. Ko, K. N. and Heo, J. C., 2008, Wind power engineering, Munundang.
5. Park, W. S. and Lee, C. H., 2001, Capacity computation and application techniques of small hydro power, Proceedings of the Korean Solar Energy Society, pp. 134-139.
6. Lee, S. H., 2008, Photovoltaic power generation system, Kidari.
7. Japan Sewage Works Association, 2007, Sewage works statistics.
8. Korea Development Institute, 2004, Research on the general guidelines for preliminary feasibility study, 4th ed., pp. 44-54.