

## 하수처리시설의 에너지자립화 및 경제적 효과분석

박기학<sup>1a</sup> · 이호식<sup>2</sup> · 하준수<sup>3</sup> · 김극태<sup>1b</sup> · 임채승<sup>4,\*</sup>

<sup>1</sup>수원대학교, <sup>2</sup>한국교통대학교, <sup>3</sup>(주)블루텍, <sup>4</sup>도쿄 대학교

## Study on Energy Independence Plan and Economic Effects for Sewage Treatment Plant

Kihak Park<sup>1a</sup> · Hosik Lee<sup>2</sup> · Junsu Ha<sup>3</sup> · Keugtae Kim<sup>1b</sup> · Chaeseung Lim<sup>4,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Environment Energy Engineering, Suwon University

<sup>2</sup>Department of Railroad Infra System Engineering, Korea National University of Transportation

<sup>3</sup>Blue technology co. ltd

<sup>4</sup>Department of Applied Microbiology, The University of Tokyo

(Received 28 September 2020, Revised 3 March 2021, Accepted 19 March 2021)

### Abstract

It is generally known that a wastewater treatment plant (WWTP) consumes immense energy even if it can produce energy. With an aim to increase the energy independence rate of WWTP from 3.5% in 2010 to 50% in 2030, the Korean government has invested enormous research funds. In this study, cost-effective operating alternatives were investigated by analyzing the energy efficiency and economic feasibility for biogas and power generation using new and renewable energy. Based on the US EPA Energy Conservation Measures and Korea ESCO projects, energy production and independence rate were also analyzed. The main energy consumption equipment in WWTP is the blower for aeration, discharge pump for effluent, and pump for influent. Considering the processes of WWTP, the specific energy consumption rate of the process using media and MBR was the lowest (0.549 kWh/m<sup>3</sup>) and the highest (1.427 kWh/m<sup>3</sup>), respectively. Energy-saving by enhancing anaerobic digester efficiency was turned out to be efficient when in conjunction with stable wastewater treatment. The result of economic analysis (B/C ratio) was 2.5 for digestive gas power generation, 0.86 for small hydropower, 0.49 for solar energy, and 0.15 for wind energy, respectively. Furthermore, it was observed that the energy independence rate could be enhanced by installing energy production facilities such as solar and small hydropower and reducing energy consumption via the replacement of high-efficiency operating.

**Key words** : Benefit/Cost, Energy independence rate, Greenhouse gas, Sewage treatment

<sup>1a</sup> 연구교수(Research Professor), parkihak@naver.com, https://orcid.org/0000-0003-4664-5114

<sup>1b</sup> 조교수(Assistant Professor), kkt38@suwon.ac.kr, https://orcid.org/0000-0003-3036-6217

<sup>2</sup> 교수(Professor), hlee@ut.ac.kr, https://orcid.org/0000-0001-5696-7411

<sup>3</sup> 대표이사(President), jsha1366@naver.com, https://orcid.org/0000-0001-8110-3279

<sup>4,\*</sup> Corresponding author, 박사후 연구원(Postdocs), lcsles87@naver.com, https://orcid.org/0000-0002-0550-4983

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. Introduction

하수처리시설의 초기 운영 시에는 BOD나 SS와 같은 유기물질과 부유물 제거 위주의 단순한 처리 기술로 시작되었으나, 2000년대 이후부터 최근에 이르기까지 방류수 기준법의 강화와 국민의 환경 인식의 향상과 미량 유기물질이나 중금속과 같은 난분해성 물질들의 처리를 위한 고도처리 기술들이 개발·적용됨에 따라 많은 에너지를 소비하는 시설로 변화되었다(Hong, 2004).

에너지 다소비 하수처리시설은 기후변화의 세계적 문제와 연계되어 에너지 절약 및 회수에 대한 개념이 도입되어 정책에 반영되고 있다. 하수처리시설은 에너지를 소비하는 시설이면서 동시에 에너지를 생산할 수 있는 시설이라는 특징도 갖고 있다. 대표적 신재생에너지인 바이오가스를 생산할 수 있는 혐기성 소화조 시설이 중·대규모 하수처리시설 중심으로 설치되어 있으며 하수처리시설 부지를 이용한 태양광 발전도 가능하고 방류수를 이용한 소수력 발전도 일부 하수처리시설에 설치·운영되고 있다.

최근 10년(2008~2017년)간 국내 하수처리시설의 유입수 유량은 약 10% 증가하였고, 총인 관리를 포함한 방류수 수질기준 강화로 처리부하량은 하수처리시설의 에너지 소비를 증가와 유사한 약 35.7%로 나타났다. 하수처리를 위한 단위 전력 소비량은 유량 기준  $0.33 \sim 0.42 \text{ kWh/m}^3$ 으로 10년 평균  $0.38 \text{ kWh/m}^3$ 로 분석되었으며, 부하량 기준  $2.23 \sim 2.86 \text{ kWh/kgBOD}$ 로 10년 평균은  $2.51 \text{ kWh/kgBOD}$ 로 나타났다(ME, 2019a).

미국의 경우, 전체 수처리 시설의 전력사용량은 2002년에 미국 전체 전력사용량의 1.6%(516억 kWh)를 차지했으며, 2011년에는 그 비중이 1.8%(694억 kWh)로 증가하였다. 이에, 미국에서는 하수처리시설을 단순히 에너지 소비의 주체로 보지 않고 신재생에너지 생산에 적극적으로 기여하는 에너지 회수 시설로 보고자 하는 인식의 전환이 이루어지고 있다. 이에 따라 EPA를 중심으로 하수처리시설에서 적용할 수 있는 다양한 에너지 절감 및 생산을 위한 기술들을 하수처리시설에 도입하고 있다. 특히 하수처리시설과 정수처리시설에서 에너지진단을 위한 도구인 Energy Use Assessment Tool (EUAT)를 개발하여 개별 처리장별로 에너지진단을 수행하고 이를 통해 과소비 공정이나 기기를 확인하며 이를 저감하기 위한 노력을 추진하고 있다. 하수처리시설에서의 에너지 절감 정책은 북미 지역보다는 에너지 사정이 다소 열악한 유럽에서 선구적으로 추진되어 왔다. 북유럽의 스웨덴이나 덴마크 같은 나라들은 하수처리시설에 적합한 다양한 에너지 생산 기술들을 개발하여 현장에 적용한 결과 일부 처리시설들은 에너지 자립률을 100% 이상 상회하여 여분의 전력이나 열에너지를 인근 커뮤니티와 공유하고 있다. 유럽 국가들에서도 북미 지역과 같이 하수처리시설을 에너지 중립(energy-neutral) 시설을 넘어서서 energy-positive한 시설로 전환하고자 하는 새로운 하수처리시설 개념의 도입을 위한 노력이 이루어지고 있다(U. S. EPA., 2010).

우리나라 하수처리시설에서의 에너지 증가와 글로벌 차원

의 기후변화 문제에 대응코자 하수처리시설을 대상으로 2010년부터 2030년까지 3단계로 구분된 에너지 자립화 사업 계획을 추진하고 있다. 2010년 기준 하수처리시설의 에너지 자립화율 3.5% 수준을 2030년까지 50%로 상향을 목표로 다양한 사업들을 추진하고 있다. 에너지 자립화 사업은 하수처리 과정에서 발생하는 다양한 신재생에너지(바이오가스, 태양광, 풍력발전, 소수력 등) 등의 풍부한 에너지 잠재력을 극대화하고 그 이용효율을 높여 에너지 자립률을 향상하고자 하는 사업이다. 이러한 에너지 자립화 사업과는 별개로 하수처리시설들의 전체적 처리용량 증가와 시설 고도화로 인하여 전체 운영비 중에 전력비가 차지하는 비중은 매년 증가하고 있다. 하수처리시설 전력비는 2006년 대비 154.2% 증가(2016년 말 기준, 전력 500t/일 기준) 하였고 방류수질 강화에 따른 추가 처리공정 운영 등의 영향으로 2007년 기준 하수처리량 당 전력 원 단위  $0.29 \text{ kWh/m}^3$ , 제거 BOD 당 전력 원 단위는  $2.353 \text{ kWh/kg BOD}$ 에서, 2016년 현재 각각  $0.58 \text{ kWh/m}^3$ 와  $3.588 \text{ kWh/kg BOD}$ 로 증가하였다. 즉, 에너지 자립화를 위한 다양한 사업들이 전개되고 있음에도 불구하고 막상 하수처리시설에서의 에너지 자립화 성과는 미진한 실정이다(Korea Environment Corporation, 2017).

본 연구에서는 3단계 에너지 자립목표인 2030년까지 에너지 자립률 50% 달성을 위한 하수처리시설에서 에너지 사용 측면을 중심으로 도입 가능한 에너지 절감 및 생산설비의 경제성 분석을 수행하였다. 이에 따라 정부에서 추진하는 에너지 절감 사례들을 살펴보고, 생애주기 비용 및 투자회수기간을 분석하였다. 국내외 에너지 절감 프로젝트와 하수처리시설에서 운영 중인 신재생에너지 사례(태양광, 풍력, 소수력 발전)를 중심으로 살펴보았으며, 소화가스 발전과 고효율 기기의 전환으로부터 얻어지는 경제적 효과 및 온실가스 저감 효과를 분석하였다. 이를 통해 하수처리시설의 에너지 자립화 2단계 정책 목표인 에너지 자립률 30% 달성을 위해 경제적인 에너지 생산 및 절감시설의 도입을 제시하고자 하였다.

## 2. Theoretical Review

### 2.1 국내·외 하수처리시설의 에너지 사용실태 분석

미국을 중심으로 유럽과 일본의 선진국 하수처리시설에서 추진하고 있는 에너지 개선방안들을 조사하였다. 미국은 신재생에너지의 생산과 보급을 위하여 연방 정부 및 주 정부 차원에서 다양한 신재생에너지 관련 인센티브 제도를 활용하여 시범사업들을 전개하고 있다. 신재생 에너지원으로는 우리나라와 같이 태양에너지와 풍력에너지, 수력 에너지, 바이오매스 등 다양한 신재생 에너지원을 활용하고 있다(ME, 2010).

신재생 에너지원 가운데 미국 공공하수처리시설에서 주요 에너지원으로 전력생산에 크게 기여하고 있는 자원으로는 바이오가스를 들 수 있다. 미국 하수처리시설의 경우 2018년을 기준으로 1,200여 개의 하수처리시설이 슬러지 처리를 통해 바이오가스를 생산하는 혐기성 소화조를 갖추고 있다. 해당 시설 가운데 절반 이상이 바이오가스를 활용하여 전력과

열을 생산하고 있으며, 바이오가스를 통해 전력을 생산하는 하수처리시설 중 약 10%가 생산된 전력을 판매하고 있다.

미국 EPA는 음식물 쓰레기를 슬러지와 함께 소화함으로써 바이오가스 생산이 증대됨으로 이를 통해 경제적인 이점을 누릴 수 있다는 점을 강조하며 하수처리시설에서의 혐기성 소화조 사용과 음식물 쓰레기의 Co-digestion 확대를 장려하고 있다.

하수처리시설에서의 에너지 절감 정책은 북미 지역보다는 유럽에서 보다 선도적으로 추진해 왔다. 2018년을 기준으로 EU에는 22,000여 개의 하수처리시설이 존재하며 해당 시설들에서 사용되는 에너지는 EU 전체 에너지 소비의 1%를 차지했다.

이에, EU에서는 Horizon 2020의 지원 아래 ENERWATER 프로젝트 등을 추진하여 하수처리시설의 에너지 절감을 위해 노력하고 있다. EU ENERWATER 프로젝트는 EU 회원국들의 하수 처리시설의 에너지 효율성 제고를 목표로, 'H2020' 재정지원 아래 2015년 3월부터 3년 동안 추진되는 프로젝트이다. ENERWATER는 연구기관, 수처리 업체, 시의회, 물 관리청, 산업체 등으로 구성된 4개 EU 회원국 소속 협력 기관들의 참여를 통해 에너지 효율성 지표 개발, 에너지 효율 측정 방법 표준화, 벤치마킹 촉진, 에너지 효율성의 주요 영향 인자 분석을 위한 툴 개발 등을 추진하고 있다 (ME, 2019b).

유럽의 하수처리시설 중 대표적 에너지 절감 사례 중 오스트리아 Strass 하수처리시설로서 에너지 절감을 위해 실시한 대표적 기술은 열병합발전시설(CHP)의 도입과 반류수(sidestream, 대부분 탈리액으로 구성됨)의 처리를 위해 Anammox 미생물을 활용한 DEMON 공정을 들 수 있다. 무엇보다 바이오가스 생산에 획기적인 기여를 한 방법은 음식물 쓰레기를 혐기성 소화조에 농축 슬러지와 동시 투입하는 co-digestion 방법이다. 이는 음식물 쓰레기의 전처리 여부에 따라 혐기성 소화조에 효과적으로 적용 가능하다는 것을 시사한다.

우리나라는 2010년부터 환경부가 추진 중인 에너지 자립화 기본계획에 따라 전국 하수처리시설에서 에너지 절감을 위한 다양한 방안들이 선진 외국의 우수사례를 벤치마킹하

여 현장에 적용되고 있다. 환경부가 추진하고 있는 에너지 자립화 정책에 따라 현장에 적용되고 있는 기술로서 소화조 개선 사업이나 신재생에너지 회수사업 등이 있다. 국내 공공 하수처리시설 규모별 전력사용량, 유입하수량 당 전력사용량, 각 오염물질 제거에 소모되는 전력사용량을 분석하였다. 시설 규모가 클수록 유입하수량 당 전력사용량이 적고, 또한 오염물질 1 kg 제거 당 소비되는 단위 전력사용량이 낮은 것으로 나타났다. 유기물질과 T-N, T-P 제거 기준으로 전력사용량을 분석해 보면 500~1,000 m<sup>3</sup>/일 규모에서 BOD 1 kg 제거 당 전력사용량은 19.2 kWh/kgBOD로 500,000 m<sup>3</sup>/일 이상 규모의 하수처리시설의 BOD 제거 당 전력사용량에 비해 약 10배 정도 높고, COD, T-N, T-P 또한 적게는 5배에서 10배 차이가 나는 것으로 나타났다.

## 2.2 국내외 에너지 절감 및 회수기술

에너지 자립화 개선을 위해 환경부는 2005년부터 소화조 효율 개선 사업을 시작으로 2015년 국가 하수도 종합계획까지 최근까지 자원순환, 폐기물, 바이오가스 등 다양한 에너지 관련 제도 정책들을 추진하고 있다. 에너지 절약사업은 하수처리시설 중 에너지 다소비 시설인 생물반응조 운영시스템을 개선할 뿐만 아니라 에너지 자립화율을 향상시키고 기후변화에 적극적으로 대응하기 위한 목적을 갖고 있다.

대구 서부하수처리시설은 에너지 절약사업을 통해 전력 절감량이 27,128 MWh/년, 절감률이 49.0%로 연간 절감액은 2,035 백만 원으로 다른 하수처리시설에 비해 높은 절감률 달성한 바 있으며, 달서천, 신천하수처리시설의 경우 절감률이 각각 9,017 MWh/년(절감률 24.9%), 4,818, MWh/년(절감률 12.3%) 절감하였다(Daegu Environment Corporation, 2015). 3개 하수처리시설에서 절감된 금액은 총 3,073 백만원/년 경제적 효과를 얻었다. 서부하수처리시설의 경우 투자비가 총 5,911.2 백만 원을 매년 1,701.7 백만 원 절감하는 효과가 있다고 보았을 때 회수기간은 3.47년이고 에너지 자립화율은 기존 대비 10% 이상 향상시키는 효과가 있는 것으로 나타났다.

부산 수영하수처리시설은 에너지 다량 소비 장비 중 대용량 펌프를 고효율 펌프로 교체하기 위한 ESCO 사업을 추진하였다. 사업금액은 에너지절약전문기업(ESCO)과 협약을 체

**Table 1.** Electricity consumption by the scale of public sewage treatment facilities

Facility scale(m <sup>3</sup> /d)	Number of facilities	Total power consumption of sewage treatment facility (kWh/yr)	Electricity consumption per inflow sewage (kWh/m <sup>3</sup> )	Power consumption per BOD removed (kWh/kg BOD)	Power consumption per COD removed (kWh/kg COD)	Power consumption per TN removed (kWh/kg TN)	Power consumption per TP removed (kWh/kg TP)
500 ≤ x < 1,000	4	329,177	2.0	19.2	21.7	82.4	720.7
1,000 ≤ x < 5,000	5	512,783	0.9	5.7	9.9	28.0	217.5
5,000 ≤ x < 10,000	3	2,034,142	1.0	6.4	9.6	25.1	216.1
10,000 ≤ x < 50,000	23	5,005,722	0.9	5.3	10.6	30.3	257.7
50,000 ≤ x < 100,000	6	8,631,585	0.5	3.5	5.8	14.2	123.6
100,000 ≤ x < 500,000	17	22,005,572	0.4	3.0	5.3	14.5	110.5
≥ 500,000	8	84,082,405	0.3	2.0	4.4	12.8	78.9
<b>Total</b>	<b>66</b>	<b>122,601,386</b>	<b>0.7</b>	<b>5.1</b>	<b>8.6</b>	<b>25.4</b>	<b>209.1</b>

결해 사업비 전액을 시공사에서 우선 부담하고 절감된 전력 요금으로 매년 분할 상환하는 방식으로 시행되었다(Busan Environmental Corporation, 2016). 기존 입축사류 펌프에서 수중사류 펌프로 교체한 결과 효율이 35.8% 증가하였으며, 그중 전력소비량 감소로 인한 효율은 13.4%, 유량 효율은 22.4%로 나타났다. 전력 절감량은 연간 1,056 MW로 비용으로 볼 때 연간 118.3 백만 원으로 나타났다. 온실가스 감축량의 경우 35.8% 효율로 일일 18시간 운영을 기준으로 연간 492 tCO<sub>2</sub>-eq로 나타났다.

광주 제1 하수처리시설은 단위 공정인 생물공정 산기관의 재질 개선을 통한 에너지 절감 사업이 수행되었는데, 기존 EPDM 재질의 산기관이 잦은 파손으로 설비관리 애로 및 운영 효율 저하현상과 산소전달률 저하로 송풍기 추가 가동 및 전력비 낭비의 문제가 발생되고 있어 산기관 재질을 평가하고 내구성을 고려한 실리콘 재질 산기관을 선정하고 운영한 결과(Gwangju Environmental Corporation, 2008) 송풍량 2,000 m<sup>3</sup>/hr(7.14%)로 기존 송풍기 0.5대 분량의 개선효과를 달성하였다. 생물 반응조 운영 DO 2 mg/L 이상 달성을 기준으로 평가한 송풍량은 각각 개선 전 대비 약 7.14% 에너지 절감 효과를 달성하였다.

국내 하수슬러지 바이오가스 차량 연료화 관련하여 서남 하수처리시설의 사례가 있다. 바이오가스 시설용량은 2,940 m<sup>3</sup>/일로 정제기술은 흡수법(Water scrubbing, 스웨덴)을 사용하여, 정제 바이오 메탄을 영업용택시 200대에 사용하고 있으며 100% 바이오 메탄으로 차량 충전에 사용하고 있다(NIER, 2017).

대전 하수처리시설에서는 발생된 소화가스를 가온 에너지 원으로 활용하고 있는데, 우선 바이오가스를 대전 열병합 발전소에 공급하고 있으며, 이때 공급되는 열은 0.99 Gcal/hr이

고, 발열량은 5,500~6,500 kcal/m<sup>3</sup>으로 지역난방 공급수 가온에 활용되고 있다(Daejeon Metropolitan City Facilities Management Corporation, 2016).

대구 신천사업소와 북부사업소는 슬러지 소화과정에서 발생하는 메탄가스로 발전 후 폐열을 이용하여 소화조를 가온하는데 사용하고 있었다. 슬러지 처리시설 공사 시 소화조 가온방법 변경으로 열병합 발전이 가능한 수준으로 운영되고 있다. 신천사업소의 경우 750 kW, 600 kW 시설 운영을 통해 2018년 기준 연간 2,851 MWh, 2,549 MWh의 발전량을 생산하였으며, 북부사업소의 경우 260 kW 시설을 통해 2017년 8월 기준 660 MWh의 연간발전량을 생산하였다. 이외에도 연료전지 시스템과 하수열 히트펌프 시설 및 소수력 발전시설들이 국내 하수처리시설에서 신재생에너지 생산 및 회수를 위해 적용되고 있다(Daegu Environment Corporation, 2015).

미국은 EPA에서 에너지 절약 프로젝트(Energy Conservation Measures, ECM)를 통해(U. S. EPA., 2010) 미국 내 9개 하수처리시설에 대한 에너지 절감 방안과 경제성을 분석하였으며, 하수처리시설별 에너지 절감 방안 및 투자비용, 그에 따른 에너지 절감량 및 회수 기간을 분석하였다. Green Bay의 하수처리시설은 폭기 시스템을 개선하였으며, 기존 블로워를 터보 블러워로 교체하였으며 이에 따른 에너지 절감률이 50%로 나타났다.

### 3. Material and Method

#### 3.1 분석 대상 선정

하수처리시설 에너지 효율화 사업에 적용되는 에너지 절감

**Table 2.** Case of energy savings plan in EPA(U. S. EPA., 2010)

Facility	Average flow(m <sup>3</sup> /d)	Energy saving plan	Cost	Energy saving	Payback period(yr)
Green Bay Metropolitan Sewerage District De Pere, WI	30,000	- Aeration system upgrade : 5 positive displacement blowers replaced with 6 turbo blowers	\$850,000	\$63,758/yr 2,143,975 kWh/yr (50% reduction)	13.3
Sheboygan Regional WWTP Sheboygan, MI	45,000	- Aeration system upgrade : 4 positive displacement blowers replaced with 2 Turblex blowers (parallelism of DO control and remote monitoring control system) : Installation of air control valve	\$790,000 (Blower) \$128,000 (Air control valve)	\$25,644/yr (Blower replacement 358,000 kWh/yr, 13% reduction) \$38,245/yr (Installation of air control valve 459,000 kWh/yr, 17% reduction)	14
City of Bartlett, TN Wastewater Treatment Facility	3,800	- Optical DO sensor and aerator VFD Control	\$13,500	\$9,176/yr 71,905 kWh/yr (13% reduction)	1.5
Oxnard, CA Plant #32	85,000	- SRT and DO control optimization	\$135,000	\$26,980/yr 306,600 kWh/yr (20% reduction)	5
Bucklin Point - Narragansett Bay Commission (RI)	90,000	- DO control optimization	\$200,000	\$135,786/yr 1,247,033 kWh/yr (11.6% reduction)	1.5

기술의 경제성 분석을 실시하기 위하여 하수처리시설별 에너지 효율화를 위해 도입되는 신재생에너지 사업과 혐기성 소화조 운영 및 소화조 가스 활용사례를 조사하였다. 그 중 태양광 발전, 소수력 발전, 혐기성 소화조 운영에 따른 경제성 분석을 실시하기 위하여 운영 데이터 등을 확보할 수 있는 하수처리시설을 중심으로 대상 시설을 선정하였다. 태양광 발전 대상 하수처리시설은 광주 효천, 대전, 대구 달성, 인천 공촌, 제주 서부하수처리시설이며 운영 자료(태양광 발전 생산 데이터, 태양광 시설 초기 건설비용, 운영비용 등)와 참고문헌(Korea Engineering and consulting association, 2020, Korea Power Exchange, 2020)을 활용하여 분석 진행하였다. 소수력 발전 경제성 분석 대상은 대구 신천, 석수, 천안, 아산 하수처리시설, 풍력 발전의 경우 제천 하수처리시설, 소화가스 발전은 속초하수처리시설 데이터를 통해 분석을 진행하였다.

3.2 경제성 분석 방법

본 LCC 분석을 위한 모델은 NIST Bridge LCC 프로그램 개발을 위한 모델(Ehlen and Marshall, 1996)이며, LCC 분석 방법은 도로투자기법에 가장 일반적으로 사용하는 현재가치화법을 사용하였다.

NIST 모델(Ehlen and Marshall, 1996)은  $PVLCC = IC + PVOMR + PVD$  여기서,  $PVLCC =$  현재가치의 총기대비용,  $IC =$  초기비용,  $PVOMR =$  유지보수비용의 현재가치,  $PVD =$  철거 및 폐기비용의 현재가치를 의미한다.

$$PV(LCC) = \sum_{n=1}^k \frac{C_n}{(1+i)^n} = \frac{C_1}{(1+i)^1} + \dots + \frac{C_k}{(1+i)^k}$$

여기서,  $PV =$  미래에 발생하는 현재가치,  $C_n = n$ 년 후에 발생하는 비용,  $i =$  할인율,  $k =$  Life Cycle 고려시 설계수명이다.

LCC 분석결과는 할인율의 변화함에 따라 큰 영향을 미친다. 할인율은 보통 명목할인율(Nominal Discount Rate)와 실질할인율(Real Discount Rate)로 구별된다. 명목할인율과 실질할인율의 상관관계는 식은 아래와 같다.

$$I_r = \frac{(1+In)}{(1+F)} - 1$$

(여기서,  $I_r$  : 실질할인율,  $In$  : 명목할인율,  $F$  : 물가상승율)

편익/비용 비율(B/C Ratio)은 총 편익과 총 비용의 할인된 금액의 비율, 즉, 장래에 발생될 비용과 편익을 현재가치로 환산하여 편익의 현재가치를 비용의 현재가치로 나눈 것이며, 일반적으로 편익/비용 비율  $\geq 1.0$  이면 경제성이 있다고 판단한다.

$$\text{편익/비용 비율}(B/C) = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}}$$

여기서,  $B_t$  :  $t$  시점의 편익,  $C_t$  :  $t$  시점의 비용,  $r$  : 할인율,  $n$  : 분석기간

<Table 2>에서는 경제성 분석방법 중 비용편익분석(B/C 분석), 순현재가치(NPV), 내부수익률(IRR)에 대해 장·단점을 제시하였다. 편익/비용 비율은 특정 항목을 편익 혹은 비용으로 처리하는가에 따라 값이 달라지는 단점이 있으나, 일반적으로 투자심사기준으로 사용되고 있다. 순현재가치는 순편익(net benefit)의 흐름을 사업 개시연도의 가치로 평가한 것으로서 가장 직관적으로 널리 쓰이는 방법이나 사업규모에 대하여 표준화(normalize)되어 있지 않은 이유로 사업간 비교에는 적당하지 않다는 단점이 있다. 따라서 성격은 동일하지만 규모가 상이한 두 사업의 NPV만으로 두 사업의 ‘수익성’을 비교하는 것은 바람직하지 않다. 내부수익률은 내부수익률은 기회비용의 측면에서 평가한 사업의 수익성 지표로서, 사업의 규모에 의존하지 않는다는 장점이 있으나, 수익성이 극히 낮거나 높은 경우 계산되지 않을 수 있다.

4. Results and Discussion

4.1 하수처리시설 신재생에너지 도입에 따른 비용편익 분석결과

<Table 3>에서는 비용편익 분석을 위한 항목 산출기준을 제시하였다. 비용 항목에는 시설의 초기 투자비용, 유지관리비 등이고, 사회적 할인율 4.5%를 적용하였다. 편익은 태양

Table 3. Comparison of economic analysis techniques

Analysis method	Judgment	Advantage	Disadvantage
Benefit/Cost ratio (B/C ratio)	$B/C \geq 1$	- Easy to understand and apply. - It is used when evaluating alternatives of similar outcomes or sizes.	- Difficult to compare the business scales. - Difficult to clearly distinguish between costs and benefits
Net Present Value(NPV)	$NPV \geq 0$	- Easy to apply and is used when evaluating similar alternatives. - If there is a difference in the economic analysis results of each method, it is used first.	- The larger the investment business scale, the larger the display. - Multiple IRRs may be derived at the same time.
Internal Rate of Return(IRR)	$IRR \geq r$	- When selecting an alternative, a clear standard is presented and the expected rate of return can be judged. - It is used when the discount rate is unclear when applying NPV or B/C.	- The profitability of short businesses is likely to be exaggerated. - Disadvantageous results occur in the case of a business that occurs slowly.

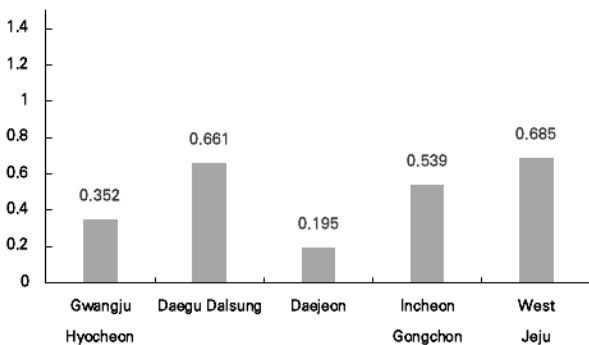
**Table 4.** Criteria for cost-benefit calculation (GIR, 2020)

Division	Calculation standard		Remark
Cost	Facility	Conversion of construction cost to present value at the time of facility construction	
	Maintenance	• Operation period : 365 days	
		• 1% of facility cost • Not considering battery replacement cost	
	Labor	• 2020 Engineering technician labor cost[Environmental intermediate engineer] : 199,510 KRW	
Depreciation	• Endurance : 20 years, Discount rate : 4.5%		
Benefit	Electricity sales revenue	• Land : 83.41 KRW/kWh • Jeju : 129.67 KRW/kWh • Electricity sales revenue = Power generation(kWh/yr) × Power unit price(KRW/kWh)	Electricity exchange SMP price in March 2020
	Emissions trading	• Emission factor per electricity generation : 0.495 kg CO <sub>2</sub> /kWh • Allotment emissions : 40,050 KRW/tCO <sub>2</sub> • Greenhouse gas reduction effect = Power generation(kWh/yr) × Emission factor(kg CO <sub>2</sub> /kWh) × Allotment emissions trading price(KRW/tCO <sub>2</sub> )	Emission factor : 0.495 kgCO <sub>2</sub> /kWh

광 발전으로 인해 얻어지는 전력은 판매 또는 자체 활용할 수 있기 때문에 전량 전력판매 수익으로 산출하였고, 신재생 에너지 생산으로 인해 저감되는 CO<sub>2</sub>를 할당배출권을 환산하여 환경적 효과 편익으로 계산하였다.

**4.1.1 태양광 발전의 경제성 분석**

태양광 발전 경제성 분석 대상은 광주 효천, 대전, 대구 달성, 인천 공촌, 제주 서부하수처리시설의 데이터를 바탕으로 분석을 실시하였다. 경제성 분석은 시스템에 소요되는 비용과 수익을 계산하여 비교할 수 있는 B/C 분석을 활용하였다.



**Fig. 1.** B/C ratio of solar photovoltaic system operation.

태양광 발전 초기 사업비와 유지관리비(시설비의 1%)로 산정하였으며, 2019년 태양광으로 생산된 발전량을 이용하여 편익을 산출하여 향후 20년 동안 운영하였을 때 경제성을 비교·분석하였다. 분석결과 제주 서부가 B/C 0.685, 회수기간 16.34년으로 가장 경제성이 높은 것으로 나타났으며 대구 달성, 인천 공촌, 광주 효천, 대전 하수처리시설 순으로 나타났다.

**4.1.2 소수력 발전의 경제성 분석**

소수력 발전 경제성 분석 대상은 대구 신천, 석수, 천안, 아산 하수처리시설의 데이터를 바탕으로 분석을 실시하였다. 경제성 분석은 시스템에 소요되는 비용과 수익을 계산하여 비교할 수 있는 B/C 분석을 활용하였다. 소수력 발전 초기 사업비와 유지관리비(시설비의 3%)로 산정하였으며, 2019년 소수력으로 생산된 발전량을 이용하여 편익을 산출하여 향후 45년 동안 운영하였을 때 경제성을 비교·분석하였다. 분석결과 석수 하수처리시설이 B/C RATIO 1.184, 회수기간 6.8년으로 가장 경제성이 우수한 것으로 나타났다. 그 외에 천안, 대구 신천, 아산 순으로 경제성이 있는 것으로 분석되었다.

**4.1.3 풍력 발전의 경제성 분석**

세천하수처리시설 운영자료(풍력 발전 생산 데이터, 풍력

**Table 5.** Summary of economic analysis of solar photovoltaic system operation (Jo, 2016 and Min et al., 2014)

Operating period : 20 years, Discount rate : 4.5%

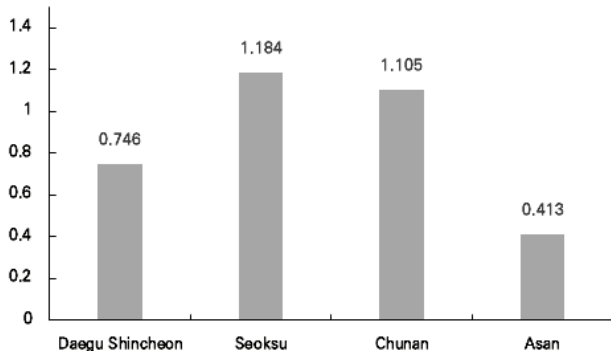
Item	Gwangju Hyocheon	Daegu Dalsung	Daejeon	Incheon Gongchon	West Jeju
Current price of total cost (Million KRW)	238	650	1,387	280	99
Current price of total benefit (Million KRW)	151	430	270	151	68
B/C RATIO	0.352	0.661	0.195	0.539	0.685
Investment recovery period(yr)	34.68	16.91	57.31	20.74	16.34

**Table 6.** Summary of economic analysis of small hydropower plant operation (Water Journal, 2011)

Operating period : 45 years, Discount rate : 4.5%

Item	Daegu Shincheon	Seoksu	Chunan	Asan
Current price of total cost (Million KRW)	686	1,208	292	193
Current price of total benefit (Million KRW)	512	1,430	323	80
B/C RATIO	0.746	1.184	1.105	0.413
Investment recovery period(yr)	10.8	6.8	7.3	19.5

발전시설 초기 건설비용, 운영비용 등) 일체를 수집하여 분석한 결과 제천하수처리시설에서 20년 동안 풍력 발전 시설을 운영할 때 소요되는 총 비용은 351.0백만 원으로 나타났으며, 총 편익은 52.5백만 원으로 분석되어 0.150의 B/C Ratio가 산출되었다.



**Fig. 2.** B/C ratio of small hydropower plant operation

**Table 7.** Economic analysis of wind power operation in Jecheon sewage treatment facility

Item	Jecheon
Operating period(yr), Discount rate(%)	20 years, 4.50%
Current price of total cost(KRW)	350,986,471
Current price of total benefit(KRW)	52,487,258
NPV(KRW)	-307,588,992
B/C RATIO	0.150
Investment recovery period(yr)	46.3

**Table 8.** Economic analysis of digestion gas power operation in Sokcho sewage treatment facility

Item	Sokcho
Operating period(yr), Discount rate(%)	20 years, 4.50%
Current price of total cost(KRW)	1,975,537,975
Current price of total benefit(KRW)	4,949,999,731
NPV(KRW)	5,116,022,386
B/C RATIO	2.506
Investment recovery period(yr)	3.3

**4.2 하수처리시설 소화가스 발전의 경제성 분석**

속초하수처리시설의 경우 2020년 1월 소화가스(바이오가스)를 850 kW 규모로 실시하기 위한 협약을 체결하여 6월까지 완공 후 운영계획으로 총 사업비는 1,800 백만 원으로 해당 비용을 사업비로 산정하였다. 운영비용은 운영유지관리비로 산정되는데 본 연구에서는 KDI 예비타당성조사(Korea Development Institute, 2008) 근거로 시설비의 3%로 보수적인 운영비용으로 산출하였다. 내구연한의 경우 20년으로 하였으며, 할인율 4.5%를 적용하였다.

속초하수처리시설에서 20년 동안 소화가스 발전 시설을 운영할 때 소요되는 총 비용은 1,976백만 원으로 나타났으며, 총 편익은 4,950백만 원으로 분석되어 2.506의 B/C Ratio가 산출되었다.

**4.3 고효율 기기 설비 교체에 따른 에너지 절감**

하수처리시설에서 기기 설비 교체에 따른 에너지 절감 효과와 경제성을 분석하였다. 천안 하수처리시설에서는 생물반응조 내 블로어 교체를 통해 전력절감에 따른 전기요금 절약, 온실가스 감축에 따른 배출권 비용 등을 바탕으로 분석한 결과 연간 3,072,658 kW의 전력 절감 효과가 나타났으며, 온실가스 감축량은 1,520.97 tCO<sub>2</sub>-eq/년이며, 배출권 비용으로 환산하면 60,915 천원으로 산정되었으며, 회수기간은 1.9년으로 나타났다.

중량물재생센터에서는 펌프 인버터 교체를 통해 연간 1,344,660 kW 전력 절감을 하였고, 온실가스 감축량은 665.607 tCO<sub>2</sub>-eq/년이며, 할당배출권으로 환산하면 26,658 천원(투자회수기간 1.5년)을 확보하였다.

**5. Conclusion**

국내 공공하수처리시설은 최근 10년간 하수도 보급률 증가에 따라 전력사용량이 40% 이상 급증하였으며, 국내 총 전력사용량에서 하수처리시설이 차지하는 비중은 0.6%, 산업 부분에서 차지하는 비중은 1% 넘게 차지하고 있다. 하수처리시설은 에너지 소비량이 높은 산업이지만, 이미 선진국에서는 에너지 자립률이 100% 이상으로 운영하는 하수처리 시설 사례가 있을 만큼 에너지 절감 및 회수 가능성이 많은 산업이다. 우리나라는 2010년에 에너지 자립화 기본계획 정책을 시행하였고, 2030년까지 공공하수처리시설의 에너지 자립률을 50%를 목표로 정책을 진행하고 있다. 하지만 2018

**Table 9.** Analysis of cost-benefit calculation for replacement of pump facility

Item	Contents		
Benefit	Power after improvement	311.6 kW	
	Annual power savings	= $Power\ saving [kW] \times 8,760 [hr/yr]$ = 153.5 [kW] $\times$ 8,760 [hr/yr] = 1,344,660 [kWh/yr] (283.7 [TOE/yr])	
	Annual savings	= $Annual\ power\ savings [kWh/yr] \times Exclusive\ power\ unit\ price [KRW/kWh]$ = 1,344,660 [kWh/yr] $\times$ 70.7 [KRW/kWh] = 95,067 [1,000 KRW/yr]	
	Annual GHG* reduction	= $Annual\ power\ saving [MWh/yr] \times emission\ factor (tCO_2 - eq/MWh)$ = 1,344.660 [MWh/yr] $\times$ 0.495 [tCO <sub>2</sub> -eq/MWh] = 665.607 [tCO <sub>2</sub> -eq/yr]	
	GHG emission price	= $Annual\ GHG\ reduction [tCO_2 - eq/yr] \times Emission\ price [KRW/tCO_2 - eq]$ = 665.607 [tCO <sub>2</sub> -eq/yr] $\times$ 40,050 [KRW/tCO <sub>2</sub> -eq] = 26,658 [1,000 KRW/yr]	
Cost		Item	Cost(1,000 KRW)
		Inverter(300,000 KRW/kW)	139,500
		Total	139,500
		Remark Control panel and installation fee included	
Investment recovery period(yr)	= $Investment\ price [1,000\ kRW] \div Annual\ reduction\ price [1,000\ KRW/yr]$ = 139,500 [1,000 KRW] / 95,067 [1,000 KRW/yr] = 1.9 [yr]		
Benefit and cost analysis results		GHG reduction	665.607 tCO <sub>2</sub> -eq/yr (26,658,000 KRW/yr)
		Energy savings	1,344,660 kWh/yr
		Saving electricity bill	95,067,000 kRW/yr

\*GHG : Greenhouse Gas

년 기준 우리나라 에너지 자립률은 16%로 아직 목표치에 많이 부족한 것으로 나타나고 있다.

에너지 자립률 30% 달성을 위해서는 전력사용량 감소와 신재생에너지를 활용한 에너지 생산이 함께 수반되어야 한다. 향후 에너지 자립률 향상에 있어 에너지 생산에 따른 경제성분석(B/C)결과 소화가스발전 2.5, 소수력발전 0.86, 태양광 0.49, 풍력 0.15로 분석된바 향후 에너지 자립률 향상을 위해 사전 검토하여 시행할 필요가 있을 것으로 판단된다.

특광역시 대상 500 m<sup>3</sup>/일 이상의 하수처리시설에서 재생에너지 생산량은 전력사용량의 21%를 생산하며, 재생에너지 생산량 중 소화 가스는 88%, 태양광은 5.3%를 차지하고 있다. 에너지 자립률이 10% 미만인 하수처리시설에서는 태양광의 재생에너지 생산량이 64.9%로 높지만, 에너지 자립률이 10% 이상인 하수처리시설에서는 소화 가스의 재생에너지 생산량이 80% 이상으로 나타났다.

에너지 절감을 위한 사업으로 고효율 설비 및 인버터 설치를 통한 제어로 에너지 절감을 살펴본 결과 대구 서부하수처리시설의 경우 연간 전력량 27,128 MWh 절감 및 전력비 20억 원 절감 효과를 가져왔고, 에너지 자립률 10% 향상 및 투자 회수 기간은 3.47년으로 에너지 개선효과가 검토되었다.

에너지 회수 및 절감을 위해 투자한 비용에 대한 경제성 분석을 수행하였으며, 비용적인 측면은 초기투자비, 운영유지비, 인건비를 고려하였고, 편익에 대한 부분은 전력판매 수익, 온실가스 저감 효과에 따른 할당 배출권 판매 수익으로 분석하였다. 태양광 발전의 경우 투자 회수 기간은 광주 효천 등 5개 하수처리시설 평균 29년으로 나타났으며, 소수력 발전의 경우에는 6.1년의 회수 기간, 에너지 절감형 설비

개선으로 투자 회수 기간은 1.9년으로 나타났다. 신재생에너지 설비를 도입할 때 설치비용과 운영비용 등을 고려하여 비용 효율적인 방법이 도입될 수 있도록 사전검토가 반드시 필요하다.

하수처리시설의 공법별 비에너지 소비율과 가동률 관계에 있어 평균적으로 비에너지 소모율이 가장 낮은 공법은 담체 방식으로 0.549 kWh/m<sup>3</sup>로 나타났고, 가장 높은 공법은 MBR로 담체 공법의 약 2.6배까지 차이가 있는 것으로 알려져 있으며, 전력소비유형의 주요 에너지 소비 설비는 송풍기, 유입·방류펌프 순으로 가장 높게 나타났다. 향후 하수처리시설의 공법 및 고효율기기의 선정에 있어 사전에 에너지 사용량 및 경제성 분석을 통해 효율적인 설계가 이루어져야 할 것이다.

에너지 자립률 향상 및 목표 달성을 위해 소화조 운영 시 Combined Heat and Power (CHP) 시스템 구축 및 바이오가스의 생산량을 증가시킬 수 있는 슬러지의 효율적 병합 소화 방안을 고려할 수 있다. 이러한 측면에서 소화조 효율 개선 방안을 통해 하수처리시설의 에너지 효율 극대화에 가장 큰 효과를 줄 수 있을 것으로 사료되며 향후 소화조 효율 개선 방안을 중심으로 에너지 효율 자립화 방안의 검토가 필요한 것으로 판단된다.

### Acknowledgement

본 연구는 환경부 “글로벌탑 환경기술개발사업” 및 한국상하수도 협회의 지원을 받은 과제임(과제번호 : 2019002190001)



## References

- Busan Environmental Corporation. (2016). *Public sewage operation management in 2016*, Busan Environmental Corporation.
- Daegu Environment Corporation. (2015). *New market creation: Energy conservation projects*, Daegu Environment Corporation.
- Daejeon Metropolitan City Facilities Management Corporation. (2016). *Introduction of high-efficiency facilities and renewable energy application*, Daejeon Metropolitan City Facilities Management Corporation.
- Ehlen, M. A. and Marshall, H. E (1996). *The economics of new-technology materials: A case study of FRP bridge decking*, NISTIR 5864, National Institute of Standards & Technology.
- Greenhouse Gas Inventory and Research Center (GIR). (2020). *Emission Trading Registry System (ETRS)*, <https://etrs.gir.go.kr/etrs/> (accessed Jan. 2020).
- Gwangju Environmental Corporation. (2008). *Increased efficiency and economic feasibility by changing the material of the spiral diffuser*, Gwangju Environmental Corporation.
- Hong, K. D. (2004). Livestock wastewater treatment by a constructed wetland, *Journal of Korea Society of Water Environment*, 20(2), 873-879. [Korean Literature]
- Jo, S. H. (2016). *Energy efficiency improvement and self-reliance plan of public sewage treatment facilities in Gwangju Metropolitan City*, Gwangju Jeonnam Research Institute, 2016-23. [Korean Literature]
- Korea Development Institute. (2008). *Modified and supplemented study on the standard guidelines for preliminary feasibility study of water resource sector projects*, 4th edition, 2894.
- Korea Engineering and consulting association. (2020). *Announcement of the results of the survey on wages of engineering companies*, [https://www.etis.or.kr/webs/data/data\\_board.jsp?leftParam=1&topParam=9&boardId=TOTALBBS](https://www.etis.or.kr/webs/data/data_board.jsp?leftParam=1&topParam=9&boardId=TOTALBBS) (accessed Jan. 2020).
- Korea Environment Corporation. (2017). *A study on improvement of integrated management sewage facility operation*, Korea Environment Corporation.
- Korea Power exchange. (2020). *Korea Power exchange*, <http://www.kpx.or.kr/> (accessed Jan. 2020).
- Min, C. G., Hur, D., and Park, J. K. (2014). Economic evaluation of offshore wind farm in Korea, *The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, 63(9), 1192-1198. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (ME). (2010). *A master plan of energy self-reliance*, Ministry of Environment.
- Ministry of Environment. (ME). (2019a). *A study on the actual condition of deterioration of public sewage treatment facilities and feasibility study for improvement*, Ministry of Environment.
- Ministry of Environment. (ME). (2019b). *A study on the policy of energy self-reliance in public sewage treatment facilities*, Ministry of Environment.
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2017). *Analysis of biogas production facilities in Sweden*, SE0000410246, Environmental resources research department waste resource energy research department, 572.88,, [https://sejong.nl.go.kr/search/searchDetail.do?rec\\_key=SH1\\_KMO201818433&kwd=](https://sejong.nl.go.kr/search/searchDetail.do?rec_key=SH1_KMO201818433&kwd=) [Korean Literature].
- United States Environmental Protection Agency (U. S. EPA.). (2010). Evaluation of energy conservation measures for wastewater treatment facilities, United States Environmental Protection Agency.
- Water Journal. (2011). *A case of improvement of bioreactor facility in Daegu environmental facilities*, <http://waterjournal.co.kr/news/articleView.html?idxno=13266>,(accessed July, 2011).