

국내 하수처리시설 에너지 등급 평가를 위한 ENERWATER의 적용 가능성에 관한 연구

박민오¹ · 이호식^{2,*}

¹국립환경과학원 환경자원연구부 자연환경연구과, ²국립한국교통대학교 철도인프라시스템공학과

A Study on the Applicability of ENERWATER for Evaluation of the Energy Consumption Label of WWTPs in Korea

Minoh Park¹ · Hosik Lee^{2,*}

¹Natural Environment Research Division, Environmental Resource Research Department, National Institute of Environmental Research

²Department of Railroad Infra System Engineering, Korea National University of Transportation

(Received 25 July 2022, Revised 16 September 2022, Accepted 27 September 2022)

Abstract

In this study, we applied ENERWATER to evaluate the energy consumption labeling of wastewater treatment plants in Korea using the Korea sewerage statistics data. The results showed that the energy label status was excellent in the SBR process for small and medium-scale wastewater treatment plants and the A2O process for large-scale wastewater treatment plants. The energy labeling of wastewater treatment plants of 50,000 tons capacity was excellent. The statuses of metropolitan cities and Jeollanam-do province were excellent. We analyzed the effects of renewable energy on wastewater treatment plants' energy consumption and found out that digestion gas for large-scale plants and photovoltaic energy for small-scale plants were effective in improving energy labeling. In addition, we compared the energy labels of four wastewater treatment plants in "Z" city and wastewater treatment plant "X" had the best energy label, and the wastewater treatment plants "V" and "Y" had to be selected as priorities for the energy diagnosis and improvement project. In a comprehensive conclusion, the applicability of ENERWATER was confirmed based on sewage statistics data and labeling can be used to set priorities for the energy diagnosis and improvement project.

Key words : Benchmarking, Diagnosis, Energy label, ENERWATER, Rapid audit, Wastewater treatment plant

¹ 전문연구원(Research Fellow), citizen5@korea.kr, https://orcid.org/0000-0002-2703-3756

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

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

하수처리시설은 단일 분야 에너지 소비량이 큰 시설로, 전체 연간 에너지 소비량이 유럽에서는 1% 수준이고 국내에서는 0.5~1% 수준에 달하고 있다(Kim, 2020; Sabia et al., 2020). 다만, 하수처리시설은 신재생에너지인 태양광, 소수력, 소화가스 등의 에너지 생산을 통한 개선의 여지가 풍부하다. 이러한 이유로 해외에서는 덴마크의 하수처리 자립률 정책, EU의 Power step 프로젝트 등을 통해 하수처리시설에서 에너지 사용량 절감과 신재생에너지 생산을 적극적으로 장려하여 하수처리시설의 energy-positive를 달성하는 것을 목표로 하고 있다(Freyberg, 2016; POWERSTEP, 2018). 국내에서는 환경부에서 2030년까지 하수처리시설의 에너지 자립률 50% 이상을 목표로 하는 에너지 자립화 기본계획 3단계 계획을 발표하였으며, 2020년까지 환경기초시설의 유희용지 등에 신재생에너지 설비 설치를 지원하는 환경기초시설 탄소 중립 프로그램을 통해 온실가스 감축을 추진하였다(ME, 2010; ME, 2018).

그러나 전력소비량이 높은 500톤/일 이상의 하수처리시설 중에서는 일부 대도시의 대형하수처리시설을 제외한 대부분이 신재생에너지 이용률 10%를 넘지 못해 환경부의 추진 단계별 목표 달성에 미진한 실정으로 하수처리시설의 에너지 소비 개선이 필요하다. 또한, 2019년 12월 EU의 The European Green Deal의 발표 후 세계적으로 저탄소 경제 및 탄소 중립의 필요성이 대두되었고, 코로나19 감염병의 세계적 유행을 계기로 지속 가능한 성장 전략의 중요성이 크게 부각되었다(Park, 2022). 이에 따라 환경부에서도 환경기초시설의 탄소 중립 프로그램 등이 포함된 그린뉴딜 정책 방향을 제시하였으며, 하수처리시설의 에너지 소비현황 개선의 중요성과 에너지 진단을 위한 평가 지표의 중요성 또한 커졌다(ME, 2020).

국내에서 하수처리시설의 에너지효율등급을 평가하는 방법으로는 미국 EPA의 Energy Star 방식과 유사한 회귀 분석법의 연구가 주로 이루어져 왔다. Cho et al. (2012)의 연구에서 500톤/일 이상 국내 공공하수처리시설의 에너지 사용량에 영향을 미치는 변수들을 통계적으로 분석하여 연간 에너지 사용량을 종속변수로 하고 유입하수량, 유입 COD, 유입 BOD, 유입 TN, 유입 TP, 고도 처리율, 가동률을 독립변수로 하여 회귀분석식을 도출하였다. 이 회귀식을 통해 공공하수처리시설의 용량 및 공법별 에너지 효율을 분석하였다. ME (2019)에서는 전력사용량을 종속변수로 하고 유입하수량, 유입 및 방류 BOD, TN, TP 농도, 가동률, 소화조 운전용량, 탈수 여부를 독립변수로 하여 회귀분석식을 도출하였다. 그러나 회귀분석 방식은 하수처리시설의 전체 시설에 대한 평가만 이루어진다. 이는 시설 간의 비교에는 적합한 방법이지만, 추후 시설 내에서 개선이 필요한 경우 공정 단계별 평가가 어려워 확장성이 부족한 단점이 있다(Park, 2022).

따라서 본 연구에서는 전체 시설에 대한 평가와 세부적인 전력실측을 통한 공정 단계별 평가까지 적용할 수 있는 EU의 하수처리시설 에너지 등급 지표인 ENERWATER를 사용하는 것을 제안한다. ENERWATER는 EU Horizon 2020 프

로그래를 통해 개발된 하수처리시설의 에너지 등급 평가 및 진단을 위한 방법으로 전체 시설 단위 에너지 등급을 평가할 수 있다. 또한 공정별 기기 설비의 에너지 사용량 측정 데이터가 있는 경우 각 공정 단계의 에너지 등급까지 평가하는 확장성이 있다(ENERWATER, 2018).

이를 활용하여 본 연구에서는 국내 하수도 통계 데이터를 기반으로 500톤/일 이상의 하수처리시설 에너지 등급을 평가하고, 처리시설 간 에너지 등급 비교를 통해 에너지 진단 및 개선 사업 등의 개황 조사 및 우선순위 선정에 활용성을 확인하고자 한다.

2. Materials and Methods

2.1 Rapid Audit and Decision Support Methodology

ENERWATER는 빠른 평가 방법(Rapid audit, RA)과 정밀 진단 방법(Decision support, DS)의 두 가지 평가 방법으로 분류된다. 빠른 평가 방법은 하수처리시설 전체의 에너지 사용량을 산정하여 단일 시설에 대한 에너지 등급을 평가하는 방법이다. 정밀 진단 방법은 시설 전체의 에너지 사용량과 함께 기기 설비별 소비전력 등의 데이터를 실측하여 처리단계별 에너지 등급을 평가하는 방법이며 공정별 에너지 효율성 진단에 활용하는 것을 목표로 한다. 빠른 평가 및 정밀 진단 방법의 결과를 그림으로 비교하면 Fig. 1과 같다(ENERWATER, 2018).

본 연구에서는 국내 하수처리시설에 ENERWATER 방법 적용 가능성을 평가하기 위해서 하수도 통계의 전력소비량, 오염물질 제거량 등의 운영 데이터를 이용하여 빠른 평가 방법을 적용하였다. 빠른 평가 방법의 진행 순서는 Fig. 2에 제시되었다. 먼저, 하수처리시설의 전력사용량을 산정한 뒤 각 시설의 처리대상 오염물질에 따라 시설유형을 분류한다. 분류된 하수처리시설의 핵심성과지표(Key performance indicator,

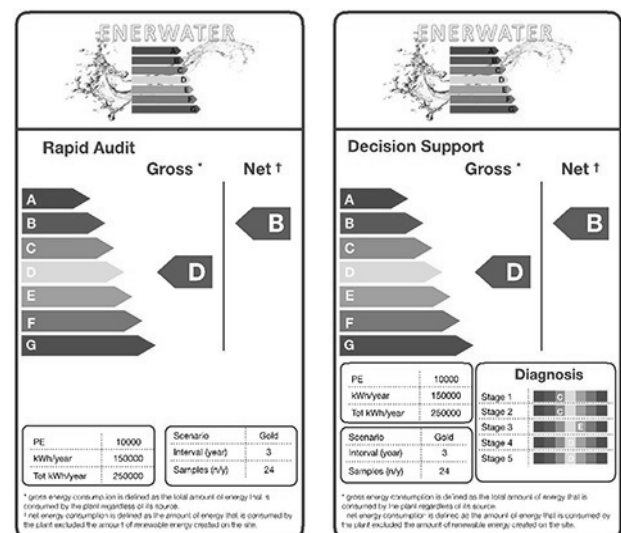


Fig. 1. Results of the ENERWATER RA and DS methods (ENERWATER, 2018).

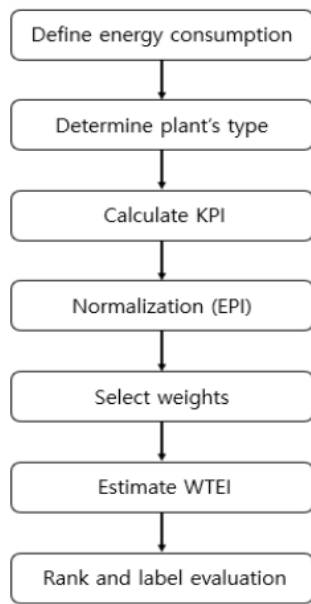


Fig. 2. Work flow of ENERWATER Rapid audit.

KPI를 계산한다. 계산된 KPI를 에너지성과지표(Energy performance indicator, EPI)로 정규화하며, 하수처리시설의 에너지 소비수준에 따른 가중치를 적용해 수처리 에너지 지수(Water treatment energy index, WTEI)를 산출한다. 최종적으로 WTEI에 따라 하수처리시설의 에너지 등급을 산정하게 된다.

2.2 Definition of WWTPs Energy Consumption

ENERWATER 빠른 평가 방법에서는 하수처리시설에서 소비한 에너지를 전력으로 계산하여 소비전력 기준 에너지 사용량을 산정한다. 전력소비량은 전기 검침 측정값을 직접 이용하며, 다른 연료를 사용해 발전기를 작동하는 경우 Table 1에 제시된 변환계수를 적용하여 전력소비량을 계산한다(식 1.1).

$$E_1 : \text{하수처리시설 소비 전력} = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 \quad (1.1)$$

하수처리 과정에서는 백반, 염화철, 황산철, 메탄올 등의 화학물질 사용을 통해 에너지 사용이 대체되고 있다. ENERWATER에서는 화학물질 사용을 추정하기 위해 누적 에너지 수요(Cumulative energy demand) 방법을 이용한다(식 1.2). 단위 시간당 사용된 화학물질의 양에 따른 전력 변환계수는 Table 2와 같다(ENERWATER, 2018).

Table 1. Conversion factor for energy carrier classification (ENERWATER, 2018)

Energy carrier	Electric energy (kWh)	Diesel (kg)	Natural gas (m ³ at 1atm, 0°C)	Biogas (m ³ at 1atm, 0°C)
Abbr.	V1	V2	V3	V4
Conversion factors	1 (kWh/kWh)	11.87 (kWh/kg)	9.94 (kWh/Ncm)	6.11 x NGC (kWh/Ncm)

*NGC: Natural Gas Content in biogas (vol/vol)

Table 2. Chemical energy consumption(ccc) of chemicals commonly used in WWTPs (ENERWATER, 2018)

Chemical	Chemical energy consumption (kWh/kg)
Acetic acid 80% sol.	10.3
Aluminium sulfate 50% sol.	1.04
Iron(III) chloride 40% sol.	3.40
Iron(III) sulfate 12.5% sol.	1.90
Iron(II) sulfate 100%	0.90
Methanol 100%	9.21
NaOH 50% sol.	4.17
Peracetic acid 15% sol.	6.90
Polyaluminium chloride(PAC) 25% sol.	1.94
Polyelectrolyte(polymer 5%)	1.40

$$E_2 : \text{화학에너지 소비량} = \sum_{i=A}^L cec_i \cdot M_i \quad (1.2)$$

cec_i : chemical energy consumption

하수처리시설 내 소화가스, 태양열, 소수력, 풍력, 연료전지 등을 통한 신재생에너지 생산량을 E3(식 1.3), 외부 유입 하수 슬러지를 처리하는 과정에서 발생하는 에너지 생산 및 소비량 추정치를 E4(식 1.4)로 한다.

$$E_3 : \text{하수처리시설 신재생에너지 생산량} = \sum_{i=A}^L i \quad (1.3)$$

$$E_4 : \text{위탁슬러지 처리에 따른 에너지 생산량} - \text{에너지 소비량} \quad (1.4)$$

종합하여 하수처리시설의 총 전력사용량을 총 전력소비량(Gross energy consumption)으로 계산하며(식 1.5), 처리시설에서 자체 생산한 신재생에너지를 고려한 순 전력소비량(NET energy consumption)을 계산한다(식 1.6)(ENERWATER, 2018).

$$\text{총 전력소비량} = E_1 + E_2 - E_4 \quad (1.5)$$

$$\text{순 전력소비량} = E_1 + E_2 - E_3 - E_4 \quad (1.6)$$

2.3 Energy Efficiency Labeling

하수처리시설은 하수의 오염물질을 제거하기 위한 많은 단계의 공정으로 구성되어 있다. 하지만 ENERWATER의 빠른 평가는 방법의 목적상 유입수 및 유출수의 특성 등 영향이 큰 일부 하수처리 공정만을 고려하고 있다. Table 3에 제시된 것과 같이 하수처리시설을 처리대상 오염물질에 따라서 3개 유형으로 구분하고, 그 유형에 포함되는 핵심성과지표(KPI)를 계산한다(ENERWATER, 2018).

- 유형1 : TSS, BOD or COD, NH₄ 제거량(kg)/일
- 유형2 : TSS, BOD or COD, NH₄ and NO₃, TP 제거량(kg)/일
- 유형3 : TSS, BOD or COD, NH₄ and NO₃, TP, 병원균 제거량(kg)/일

본 연구에서 활용한 하수도 통계의 데이터는 2017년부터 2019년까지 3개년 통계 자료이다. 2019년 기준으로 공공하수처리시설의 방류수 수질 기준에 생물화학적산소요구량, 화학적산소요구량, 부유물질, 총인, 총질소, 총대장균군 수의 방류기준이 설정되어 있다. 따라서 모든 하수처리시설을 병원균 제거량까지 고려하는 유형3 시설로 분류하여 분석을 진행하였다. 하수처리시설의 유형에 따라 결정된 핵심성과지표(KPI)는 다음 식 1.7부터 식 1.10과 같이 계산한다(ENERWATER, 2018).

$$KPI_1 = kWh/m^3 \tag{1.7}$$

$$KPI_2 = kWh/kgTPE_{removed} \tag{1.8}$$

$$KPI_3 = kWh/\log_{(pathogens\ removal)} * m^3 \tag{1.9}$$

$$KPI_4 = kWh/kgTS_{produced} \tag{1.10}$$

$$*TPE_{removed} \text{ (Total Pollution Equivalent)} = kgCOD_{removed} + 20 \cdot kgTN_{removed} + 100 \cdot kgTP_{removed}$$

하수처리시설의 운영지표별 KPI가 제공하는 정보들을 단일한 수치로 표현하기 위해 ENERWATER에서는 정규화를 통해 표준화된 지표가 되도록 한다. KPI는 각 운영지표에 따라 다양한 단위로 표현된다. 이를 단일 단위로 공통화하기 위해 정규화를 거쳐 각 KPI에 대한 백분위로 환산한다. 이처럼 정규화된 지표를 에너지 성과지표(EPI)라고 하며, 단일화된 EPI는 가중치를 곱해 하나의 수치리 에너지 지수(WTEI)로 계산될 수 있다. EPI는 다음 식 1.11에 따라 계산한다(ENERWATER, 2018).

$$EPI_n (\%) = \exp(-\exp(-(\frac{KPI_n - \mu}{\beta}))) \tag{1.11}$$

* μ : 위치변수 β : 축적변수

식 1.11의 EPI 계산식은 검벨 누적 분포 함수식을 따르고 있으며, 검벨 누적 분포의 변수를 추정하는 방법으로는 식 1.12와 같이 모멘트 법(Method of moments)을 활용하였다. 모멘트 법은 모수의 표준편차와 평균을 기반으로 위치변수와

Table 3. Identification of KPIs for ENERWATER rapid audit (ENERWATER, 2018)

	Type1	Type2	Type3	If no historical data is available	KPI
Flow (m ³)	Requires measurement of the real flow wastewater treated through online flow meters or similar			Assume WWTP design flow	KPI1
kg COD _{removed}	Requires access to historical data measurements of COD in the influent and effluent of the WWTP and calculation of kg COD removed/day			Assume: Type1: 85% COD removal Type2: 90% COD removal Type3: 55% COD removal	KPI2
kg N _{removed}	Requires access to historical data measurements of N in the influent and effluent of the WWTP and calculation of kg N removed/day			Assume: Type1: 15% N removal Type2: 80% N removal Type3: 90% N removal	
kg TP _{removed}	-	Requires access to historical data measurements of TP in the influent and effluent of the WWTP and calculation of kg TP removed/day		Assume: Type2: 80% TP removal Type3: 90% TP removal	KPI3
Pathogens removal	-	-	Requires access to historical data measurements of pathogens removal in the influent and effluent of the WWTP and calculation coliforms log reduction	Assume: Log 6 pathogen removal	
kg TS _{produced}	Requires access to historical data measurements of TS in the effluent of the WWTP and calculation if kg TS dewatered/day			Assume: sludge production = 0.45kgTS/kgCOD _{eliminated} Assume: 40% solid reduction (i.e. during anaerobic digestion)	KPI4

Table 4. Label assignation according to the WTEI value (ENERWATER, 2018)

WTEI	Label
< 0.110	A
0.110 ≤ WTEI < 0.220	B
0.220 ≤ WTEI < 0.330	C
0.330 ≤ WTEI < 0.440	D
0.440 ≤ WTEI < 0.550	E
0.550 ≤ WTEI < 0.775	F
> 0.775	G

축적변수를 계산하는 전통적인 방법으로, 매개변수를 어렵지 않게 추정할 수 있어서 널리 사용되고 있다(Landwehr et al., 1979).

$$\beta = \frac{\sqrt{6} \times \hat{\sigma}}{\pi}, \quad \mu = \hat{m} - \epsilon\beta \tag{1.12}$$

$\hat{\sigma}$: 모수의 표준편차, \hat{m} : 모수의 평균,
 ϵ : 오일러 상수(=0.57721...)

정규화된 EPI에 하수처리시설의 각 운영지표가 전체 에너지 소비에서 차지하는 평균적인 기여도를 기반으로 산정된 가중치를 곱해 WTEI로 계산한다. 가중치의 의미는 각 하수처리시설의 오염물질의 처리에 하수처리시설 에너지를 얼마나 소비하고 있는지를 나타내는 수치로서 하수처리시설의 공정별 에너지 소비량을 통해 산출된 값이다. 정규화된 가중치 값은 다음 식 1.13을 통해 계산한다(ENERWATER, 2018).

$$\text{정규화된 가중치 } w_{norm,i} = \frac{w_i}{\sum_k w_i}, \tag{1.13}$$

k 는 적용되는 KPI의 수

w_i : estimated weights based on the average energy contribution

다음 식 1.14와 같이 각 EPI에 정규화된 가중치를 곱하여 수처리 에너지 지수(WTEI)로 계산한다(ENERWATER, 2018).

$$WTEI = \sum_{i=1}^k w_{norm,i} \cdot EPI_i \tag{1.14}$$

계산된 WTEI와 Table 4의 분류기준에 따라 하수처리시설의 에너지 효율 등급을 A등급부터 G등급까지 분류한다(ENERWATER, 2018).

3. Results and Discussion

3.1 Application of ENERWATER

ENERWATER 빠른 평가 방법을 국내 하수처리시설에 적

용하기 위해 본 논문에서는 2017년부터 2019년까지 3개년 하수도 통계 자료를 기반으로 각 하수처리시설의 운영 데이터를 평균하여 사용하였다. 2019년 하수도 통계를 기준으로 전국에 500톤/일 이상의 하수처리시설은 681개소이며, 이 중 전력량 등 주요 운영 인자가 누락되어 분석에 오류가 나타난 3개 시설을 제외한 678개소 시설의 에너지 등급을 평가하였다.

또한, 하수처리시설의 시설용량과 에너지 소비 수준에 관한 국내의 선행연구를 검토한 결과, 하수처리시설의 규모가 클수록 에너지 소비 효율이 높으므로 시설의 에너지 효율성을 단순 비교하면 시설 규모에 따라 편향되게 나타나는 것으로 검토되었다(Cho, 2012; Gu et al., 2017; Mizuta and Sabia, 2020; Pitas et al., 2010; Shimada, 2010). 일반적으로 하수처리시설의 시설용량이 클수록 에너지 효율이 더 높은 원인으로 (1) 펌프와 압축기 등을 더 크고 효율적인 장비로 사용하여 규모의 경제가 가능하다. (2) 보다 안정적인 조건으로 시설을 운영하기 좋고 이를 통해 더 규칙적인 장비의 운전이 가능하여 에너지 사용이 크게 변동하는 것을 예방할 수 있다. (3) 처리공정의 자동화에 유리하다. (4) 더 많은 직원 및 숙련된 직원이 상주한다는 점 등을 들 수 있다(Longo et al., 2016).

이 같은 편향성은 유사한 규모의 하수처리시설은 에너지 효율성이 수렴하는 결과로 나타나 정확한 비교가 어렵게 만들며, 단순히 시설용량에 따른 잘못된 해석을 유발할 수 있다. 또한, 중소규모 시설은 농·어촌 지역의 생활환경 개선과 상수원의 수질오염 방지 등 별도의 목적을 위해 설치되기도 하며(Jun, 2010), 해외의 경우 하수처리시설의 규모 또는 처리기술 별로 방류수 수질 기준을 차등하는 것에 비해 국내 하수도법에서는 500톤 이상 규모의 시설은 방류 수계에 따른 차등만 있을 뿐 시설용량에 따른 차등화는 이루어지지 않아 대규모 하수처리시설과 에너지 소비수준을 비교할 때 중소규모의 시설이 불리하게 작용한다(Jeong et al., 2014; National Assembly Environment and Labor Committee, 2010). 본 연구에서는 이와 같은 점을 고려하여 하수처리시설의 시설용량별로 에너지 등급 분석을 수행하였다. 분석된 하수처리시설은 시설용량에 따라 1일 처리용량 5백톤 이상~1천 톤 미만, 1천 톤 이상~5천 톤 미만, 5천 톤 이상~1만 톤 미만, 1만 톤 이상~5만 톤 미만, 5만 톤 이상의 5개 그룹으로 분류하였다.

분류된 678개소의 하수처리시설을 빠른 평가 방법에 따라 소비전력 기준 에너지 사용량을 산정하였다. 본 연구에서는 국가 하수도 통계를 통해 정보를 이용할 수 없는 화학물질에 따른 에너지 소비와 슬러지 위탁처리에 따른 에너지 소비를 제외한 E1과 E3만을 고려하여 전력사용량을 산정하였다. 따라서 본 연구에서 사용한 전력사용량 계산식은 식 2.1 및 식 2.2와 같다.

$$\text{총 전력소비량} = E_1 \tag{2.1}$$

$$\text{순 전력소비량} = E_1 - E_3 \tag{2.2}$$

하수도 통계 수치를 기반으로 그룹화된 하수처리시설의 KPI를 계산하였다. 계산된 전체 하수처리시설 중 유사한 시

Table 5. WWTPs' characteristic in "Z" City

WWTPs	Capacity (ton/day)	Process
WWTP "V"	125,000	Media
WWTP "W"	275,000	A2O
WWTP "X"	350,000	A2O
WWTP "Y"	65,000	Membrane

Table 6. A comparison of KPIs based on Net Energy for WWTPs in "Z" City

WWTPs	KPI ₁	KPI ₂	KPI ₃	KPI ₄
WWTP "V"	0.32	0.48	0.05	0.89
WWTP "W"	0.32	0.21	0.04	0.74
WWTP "X"	0.23	0.21	0.03	0.52
WWTP "Y"	0.83	0.72	0.11	1.09

Table 7. Parameters of Gumbel's cumulative distribution function for KPIs

	KPI ₁	KPI ₂	KPI ₃	KPI ₄
μ	0.8085	0.7198	0.1144	0.6292
β	0.5822	0.7057	0.0820	2.0804

설용량의 하수처리시설이 다수 위치한 "Z" 시의 1일 5만 톤 이상 시설들을 비교해 ENERWATER 방법의 적용 가능성을 확인하고자 하였다. 해당 하수처리시설의 정보는 Table 5에 제시하였다.

Table 6에는 "Z" 시 하수처리시설의 순 전력 기준 KPI 계산 결과를 제시하고 있다.

유형 3의 식에 따라 핵심성과지표를 도출하면 정규화하여 EPI로 계산한다. 본 연구에서는 전체 하수처리시설의 비교를 위해 분석에 사용된 678개소 시설의 KPI 별로 모멘트 법을 통해 위치변수(μ) 및 축적변수(β)를 추정하였다(Table 7).

제시된 "Z"시 하수처리시설의 KPI를 검벨 누적 분포 함수식에 따라 전체 하수처리시설의 EPI를 계산하였다. 정규화한 EPI 계산 결과를 Table 8에 나타내었다.

Table 8. A comparison of EPIs based on Net Energy for WWTPs in "Z" City

WWTPs	KPI ₁	KPI ₂	KPI ₃	KPI ₄
WWTP "V"	0.29	0.79	0.32	0.71
WWTP "W"	0.31	0.05	0.28	0.54
WWTP "X"	0.08	0.07	0.05	0.23
WWTP "Y"	0.99	0.97	0.98	0.86

Table 9. Weights of different KPIs according to domestic literature (Park, 2022)

KPI	KPI ₁	KPI ₂	KPI ₃	KPI ₄
weights	0.3264	0.4113	0.1043	0.1350

Table 10. A comparison of WTEI based on Net Energy for WWTPs in "Z" City

WWTPs	WTEI	Label
WWTP "V"	0.56	F
WWTP "W"	0.23	C
WWTP "X"	0.09	A
WWTP "Y"	0.96	G

정규화한 EPI를 가중치를 이용해 WTEI로 계산하였다. 본 연구에서는 선행연구의 국내 하수처리시설 주요 기기의 에너지 소비율을 평균하여 가중치를 계산하였다(Table 9; Park, 2022)

각 가중치를 이용해 전체 하수처리시설의 WTEI를 계산하였으며, 제시된 "Z" 시 하수처리시설의 WTEI와 그에 따른 에너지 등급의 결과를 Table 10에 비교하였다. "Z" 시의 시설 용량 1일 5만 톤 이상 처리시설의 에너지 등급 평가의 결과를 볼 때, "X" 하수처리시설의 에너지 효율이 가장 우수하며, "V" 및 "Y" 하수처리시설의 에너지 등급이 미흡한 것으로 분석되었다.

이처럼 에너지 등급 결과를 통해 특정 처리시설 간의 에너지 소비수준에 따른 비교가 가능하다. "Z" 시를 예로 볼 때, 규모와 처리계열에서 유사한 "W" 및 "X" 하수처리시설의 정밀 진단을 통한 시설개선사업의 기초 자료로 활용할 수 있다. 또는 에너지 등급이 낮게 나온 시설을 대상으로 하수처리시설 에너지 진단 및 개선 사업의 우선순위를 설정하는 등의 개황 조사 자료로 활용 가능할 것으로 여겨진다.

3.2 Analysis of results by Net Energy Label

본 연구에서는 500톤/일 이상 규모의 하수처리시설을 시설 용량별로 그룹화한 뒤, ENERWATER 빠른 평가 방법을 이용해 에너지 등급을 평가하였다. 그 중 순 전력 기준으로 평가된 에너지 등급에 대하여 처리시설의 규모별, 처리공법별, 지역별로 차이를 분석하였다.

Fig. 3은 에너지 등급 결과를 종합하여 처리시설의 규모별 차이를 분석하였으며, X축에는 하수처리시설의 시설용량, Y

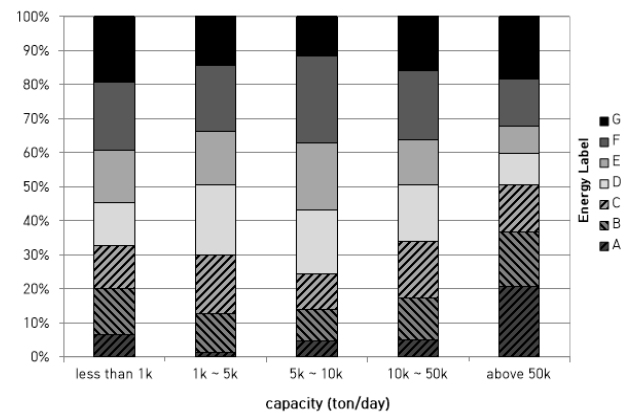


Fig. 3. Distribution of Net energy label for WWTPs capacity.

측에는 시설용량별 하수처리시설의 에너지 등급의 비율을 표기하였다. 분석된 총 7개 등급 중 상위 3번째 등급인 C등급을 기준으로 처리시설 규모별 에너지 등급 현황을 평가하였다. 그 결과, 일일 처리용량 5만 톤 이상의 하수처리시설에서 C 등급 이상 비율이 약 50%를 차지하여 가장 에너지 등급 현황이 우수하였다. 다음으로는 1만 톤 이상 5만 톤 미만 규모와 C등급 이상 비율이 약 32%로 에너지 등급 현황이 양호하였다. 반면 1만 톤 미만 규모의 하수처리시설에서는 C등급 이상 비율이 낮고, E등급 이하 비율이 높아 에너지 등급 현황이 미흡하였다. ME (2019)의 보고서에도 하수처리시설의 규모별 에너지 효율성을 분석한 결과 1천 톤/일 미만의 하수처리시설에서 에너지 효율성이 저조한 시설의 비율이 높고 1만 톤 이상 5만 톤 미만의 규모에서 에너지 효율성이 우수한 비율이 높아 유사한 추세를 보인 바 있다.

Fig. 4는 에너지 등급 결과를 종합하여 처리공법별 차이를 분석하였으며, X축에는 하수처리시설의 처리공법 분류, Y축에는 처리공법별 하수처리시설의 에너지 등급의 비율을 표기하였다. 본 연구에서는 하수도 통계의 처리공법 분류를 따라 A2O, SBR, 막 공법, 담체 공법 및 그 외 처리계열로 분류하였다. 단, 두 가지 이상의 처리계열을 사용하는 시설은 복합계열로 구분하였다. 분석된 총 7개 등급 중 상위 3번째 등급인 C등급을 기준으로 처리시설 규모별 에너지 등급 현황을 평가하였다. 그 결과, 시설 수가 가장 적은 기타 하수처리시설이 약 48%의 C등급 이상 양호한 시설 비율로 가장 높았으며, 다음으로 SBR 계열에서 약 40%의 C등급 이상 비율, A2O 계열에서 약 37% 비율로 에너지 등급 현황이 우수하였다. 분리막 계열 처리시설은 C등급 이상 시설이 오직 B등급뿐이며 그 비율도 가장 낮은 5% 미만으로 에너지 등급 현황이 미흡하였다. ME (2019)의 보고서에도 하수처리 공법별 에너지 효율성을 분석한 결과 SBR 공법 > A2O 공법 > 담체 공법 > 막 공법 순으로 높게 나타나 유사한 결과를 보인 바 있다.

Fig. 5는 에너지 등급 결과를 종합하여 지역별 차이를 분석하였으며, X축에는 특광역시 및 각 도의 분류, Y축에는 지역별 하수처리시설의 에너지 등급의 비율을 표기하였다. 분석된 총 7개 등급 중 상위 3번째 등급인 C등급을 기준으로 처리시설 규모별 에너지 등급 현황을 평가하였다. 그 결과, 전라남

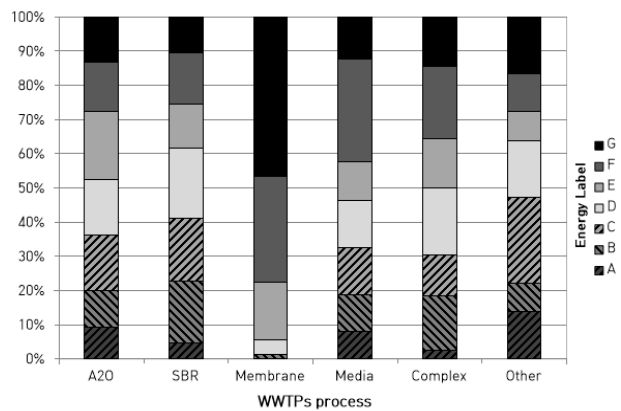


Fig. 4. Distribution of Net energy label for WWTPs process.

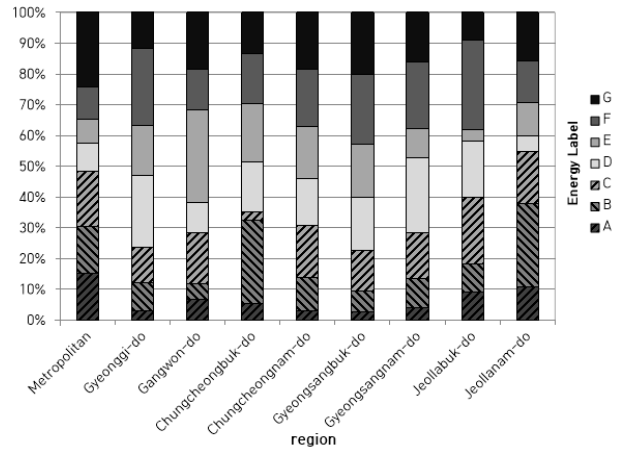


Fig. 5. Distribution of Net energy label for the region.

도 지역의 시설이 C등급 이상 에너지 등급 비율이 약 55%로 우수하였으며, 특광역시 하수처리시설이 약 48%로 두 번째로 높았다. C 이상 등급 비율이 가장 낮은 지역은 약 23%의 경상북도이며, 경기도 지역이 24%로 다음으로 에너지 등급 현황이 미흡하였다.

3.3 Analysis of Results by Renewable Energy Source

ENERWATER 방법의 또 다른 특징은 하수처리시설의 총 전력량과 순 전력량의 분석을 통해 신재생에너지 적용 효과를 비교할 수 있다는 점이다. 본 연구에서 분석된 국내 하수처리시설의 신재생에너지 생산현황과 총 전력량 등급-순 전력량 등급의 관계를 분석하였다.

분석된 하수처리시설 중 신재생에너지를 생산하는 시설은 2017년부터 2019년 에너지 자립 현황 데이터를 기준으로 총 232개소이다. 본 연구에서는 신재생에너지 생산에 따른 하수처리시설의 구분을 에너지 자립 현황 데이터를 따라 소화가스, 하수열, 태양광, 기타로 시설을 분류하였으며, 두 가지 이상의 신재생 에너지원이 생산하는 에너지양에 10% 이상 기여하는 시설은 복합시설로 추가 분류였다. 예를 들어 총생산 신재생 에너지양에서 태양광의 비율이 80%이고, 소화가스의 비율이 20%인 경우는 복합, 태양광의 비율이 95%이고, 소화가스의 비율이 5%인 경우는 단순 태양광 시설로 분류하였다 (Park, 2022).

하수처리시설 시설용량별 신재생에너지 생산시설의 수를 분석한 결과(Fig. 6), 50만 톤 이상의 규모에서는 모든 시설이 신재생에너지를 생산하고 있으며 소화가스 시설의 비율이 60%에 달한다. 하수처리시설의 규모가 작아질수록 신재생에너지를 생산하지 않는 시설의 비율이 점차 커지며, 태양광 발전을 적용한 시설이 주를 이루고 있다.

하수처리시설 시설용량별 총 전력 기준 에너지 등급과 비교해 순 전력 기준의 등급이 개선된 처리시설의 수를 분석한 결과(Fig. 7), 신재생에너지 생산시설이 많은 대형처리시설에서 총 전력 기준 등급보다 순 전력 기준 등급이 개선된 시설의 비율이 높으며, 신재생에너지를 생산하는 시설이 적은 소규모 처리시설일수록 에너지 등급이 개선되는 비율이 낮다. 50만

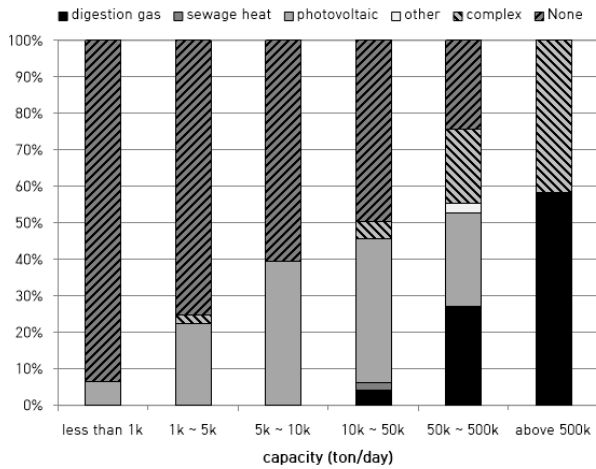


Fig. 6. Distribution of renewable energy production plants for WWTPs capacity.

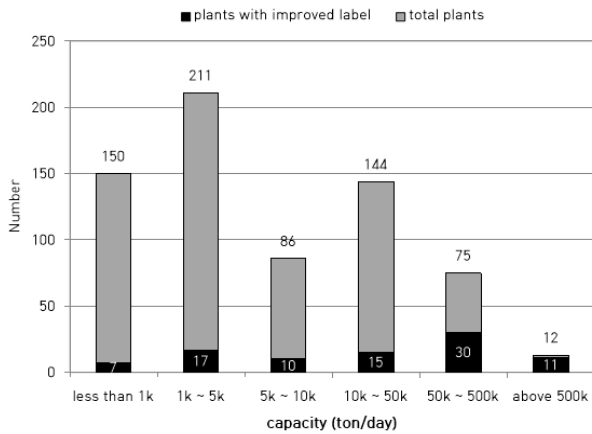


Fig. 7. Distribution of plants with an improved label for WWTPs capacity.

톤 이상 규모의 하수처리시설에서는 12개 시설 모두 신재생 에너지를 생산하고, 11개소 시설의 에너지 등급이 개선되었다. 그러나, 1천 톤 미만 규모의 하수처리시설에서는 10개 시설만 신재생에너지를 생산하고, 이 중 7개 시설만 에너지 등급이 개선되었다.

신재생 에너지원에 따라 순 전력 기준 에너지 등급이 향상된 처리시설을 분석한 결과(Fig. 8), 소화가스 생산시설 32개소 중에서 약 80%인 26개소의 등급이 개선됐으며, 복합시설 28개소 중에서 약 64%인 18개소가 등급이 개선되었다. 적용 중인 시설이 169개소로 가장 많은 태양광의 경우 시설등급의 개선은 약 25%인 43개소에 그쳤다. 신재생에너지 복합시설의 28개소 중 23개소에서 소화가스를 병행하고, 에너지 등급의 개선이 소화가스 시설에서 가장 많아 소화가스가 하수처리시설 에너지 개선에 효과가 있었다. 그러나 태양광이 적용된 1천 톤 이상~5천 톤 미만 하수처리시설 48개소 중 17개소 및 1천 톤 미만 하수처리시설의 10개소 중 7개소에서 에너지 등급이 개선되어 중소규모의 처리시설에서는 신재생에너지의 적용

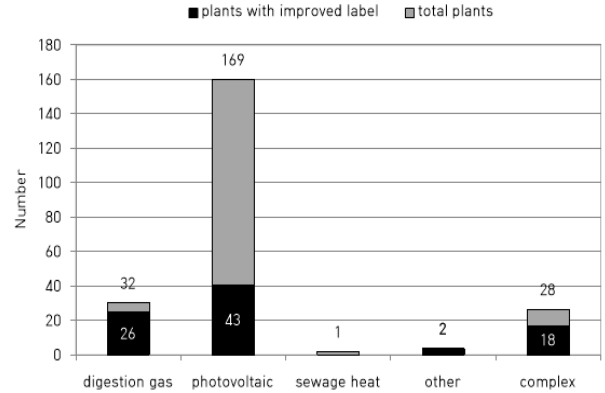


Fig. 8. Distribution of plants with an improved labels by renewable energy source.

가능성 등을 고려할 때 태양광 시설이 에너지 개선에 효과가 있었다. 선행연구 결과에서도 하수처리시설의 에너지 자립률 향상에 있어서 경제성 분석을 수행한 결과 소화가스발전 > 소수력발전 > 태양광 > 풍력 순으로 검토할 필요가 있으며 (Park et al., 2021), 중소규모 하수처리시설은 소화조가 없는 경우가 많아 태양광 발전에 의존도가 높고, 시설용량이 큰 하수처리시설일수록 소화가스에 대한 재생에너지 생산 비율이 높게 나타나(Kim, 2020) 유사한 결과를 보인 바 있다.

4. Conclusion

하수도 통계 기준 시설용량 500톤/일 이상의 국내 하수처리시설을 ENERWATER의 빠른 평가(Rapid audit) 방법을 통해 에너지 등급을 평가하였다. 전체 하수처리시설을 시설용량에 따른 구분 없이 분석하면 규모의 경제에 의해 시설용량이 큰 하수처리시설이 상대적으로 등급이 높게 편향되기 때문에 (Park, 2022) 시설용량에 따라 5개 그룹으로 분류하여 에너지 등급을 평가한 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. ENERWATER 빠른 평가를 이용하여 국내 하수처리시설의 시설용량별, 처리계열별, 지역별 에너지 등급을 분석하였다. 순 전력 기준 등급 분석 결과, 시설용량별로 에너지 등급 현황이 가장 우수한 시설 규모는 5만 톤 이상의 대규모 하수처리시설이며, 처리계열별로는 기타 계열 > SBR > A2O > 담체 공법 > 복합계열 > 막 공법 순서로 등급이 우수하였다. 지역으로는 전라남도 및 특광역시의 하수처리시설의 에너지 등급이 우수하였다.

2. 하수처리시설의 시설용량이 클수록 신재생에너지 적용시설의 비율과 에너지 등급이 개선된 비율이 높아진다. 신재생에너지원별로 분석한 결과 소화가스의 에너지 생산효율이 높아 소화가스 적용 비율이 높은 대형처리시설에서 에너지 등급개선 시설이 많았으며, 시설용량이 작은 시설에서는 비교적 태양광이 에너지 등급개선 효과가 있었다.

3. 국내 하수처리시설에 ENERWATER의 빠른 평가 방법을 적용해 분석한 결과, 국내 하수도 통계 데이터를 기반으로 처리시설의 에너지 소비 등급을 평가할 수 있으며, 에너지 소비

개황 조사 자료 및 에너지 진단사업의 우선순위 선정에서 활용 가능할 것으로 판단된다.

다만, 본 연구는 하수처리시설의 에너지 소비 실측 데이터가 없어 하수도 통계 및 선행연구자료를 바탕으로 한 빠른 평가 방법만 적용 가능한 한계가 있었다. 따라서 에너지 정밀 진단과 지속적인 평가를 위해서 실제 현장 방문 및 실측을 통해 데이터베이스를 구축하고, 이를 바탕으로 국내 상황에 맞게 에너지 소비 가중치 등의 지표를 검토하는 후속 연구가 필요하다.

References

- Cho, E. S., Han, D. H., and Ha, J. S. (2012). Energy efficiency evaluation of publicly owned wastewater utilities, *Journal of Environmental Policy*, 11(4), 85-105. [Korean Literature]
- Cho, H. M. (2012). *Energy self-sufficient in environmental facilities of Seoul metropolitan government*, 2012-PR-23, The Seoul Institute. [Korean Literature]
- ENERWATER. (2018). *Standard method and online tool for assessing and improving the energy efficiency of waste water treatment plants*, Horizon 2020 ENERWATER Project.
- Freyberg, T. (2016). *WaterWorld*, <https://www.waterworld.com/wastewater/article/16202924/denmark-kickstarts-energy-positive-wastewater-treatment-project> (accessed August, 2022)
- Gu, Y., Li, Y., Li, X., Luo, P., Wang, H., Wang, X., Wu, J., and Li, F. (2017). Energy self-sufficient wastewater treatment plants: Feasibilities and challenges, *Energy Procedia*, 105, 3741-3751.
- Jeong, D. H., Choi, I. C., Cho, Y. S., Chung, H. M., Kwon, O. S., Yu, S. J., Yeom, I. T., and Son, D. H. (2014). A study on the management system improvement of effluent water qualities for public sewage treatment facilities in Korea, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 23(4), 296-314. [Korean Literature]
- Jun, M. S. (2010). *Current status and improvement of small-scale sewage treatment plants in Gangwon province*, No.10-47, Research Institute for Gangwon. [Korean Literature]
- Kim, D. Y. (2020). *Diagnosis and evaluation of energy consumption patterns in wastewater treatment plants*, Master's Thesis, Korea National University of Transportation. [Korean Literature]
- Landwehr, J. M., Matalas, N. C., and Wallis, J. R. (1979). Probability weighted moments compared with some traditional techniques in estimating gumbel parameters and quantiles, *Water Resources Research*, 15(5), 1055-1064.
- Longo, S., d'Antoni, B. M., Bongards, M., Chaparro, A., Cronrath, A., Fatone, F., Lema, J. M., Mauricio-Iglesias, M., Soares, A., and Hospido, A. (2016). Monitoring and diagnosis of energy consumption in wastewater treatment plants, A state of the art and proposals for improvement, *Applied Energy*, 179, 1251-1268.
- Ministry of Environment (ME). (2010). *Master plan for energy independence*, Ministry of Environment. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (ME). (2018). *Guidelines for the design and installation of carbon neutral program in environmental infrastructure*, Ministry of Environment. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (ME). (2019). *A study on the energy independence policy of public sewage treatment plants*, Korea Environment Institute. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (ME). (2020). *Direction and major projects of green new-deal policy*, Ministry of Environment. [Korean Literature]
- Mizuta, K. and Shimada M. (2010). Benchmarking energy consumption in municipal, wastewater treatment plants in Japan, *Water Science and Technology*, 62(10), 2256 - 2262.
- National Assembly Environment and Labor Committee. (2010). *A study on the appropriate operation of public sewage treatment plants in Korea*, National Assembly Environment and Labor Committee. [Korean Literature]
- Park, K. H., Lee, H. S., Ha, J. S., Kim, K. T., and Lim, C. S. (2021). Study on energy independence plan and economic effects for sewage treatment plant, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 37(2), 128-136. [Korean Literature]
- Park, M. O. (2022). *Assign the energy label of sewage treatment plants in Korea, using ENERWATER*, Master's Thesis, Korea National University of Transportation. [Korean Literature]
- Pitas, V., Fazekas, B., Banyai, Z., and Karpati, A. (2010). Energy efficiency of the municipal wastewater treatment, *Journal of Biotechnology*, 150, 163-164.
- POWERSTEP. (2018). *POWERSTEP*, <http://www.powerstep.eu/powerstep/approach> (accessed August, 2022)
- Sabia, G., Petta, L., Avolio, F., and Caporossi, E. (2020). Energy saving in wastewater treatment plants: A methodology based on common key performance indicators for the evaluation of plant energy performance, classification and benchmarking, *Energy Conversion and Management*, 220, 113067.