

공공하수처리시설에서 에너지 사용현황 및 절감방안 연구

김종락^{1a} · 이가희^{1b} · 유광태^{1c} · 김동윤^{2a} · 이호식^{2b,†}

¹(주)유엔유 · ²한국교통대학교 철도인프라시스템공학과

A Study on Energy Usage Monitoring and Saving Method in the Sewage Treatment Plant

Jongrack Kim^{1a} · Gahee Rhee^{1b} · Kwangtae You^{1c} · Dongyoun Kim^{2a} · Hosik Lee^{2b,†}

¹UnU Inc. · ²Department of Railroad Infra System Engineering, Korea National University of Transportation
(Received 15 September 2020, Revised 23 November 2020, Accepted 25 November 2020)

Abstract

This study aims to conserve and monitor energy use in public sewage treatment plants by utilizing data from the SCADA system and by controlling the aeration rate required for maintaining effluent water quality. Power consumption in the sewage treatment process was predicted using the equipment's uptime, efficiency, and inherent power consumption. The predicted energy consumption was calibrated by measured data. Additionally, energy efficiency indicators were proposed based on statistical data for energy use, capacity, and effluent quality. In one case study, a sewage treatment plant operated via the SBR process used ~30% of energy consumed in maintaining the bioreactors and treated water tanks (included decanting pump and cleaning systems). Energy consumption analysis with the K-ECO Tool-kit was conducted for unit processing. The results showed that about 58.7% of total energy consumed was used in the preliminary and biological treatment rotating equipment such as the blower and pump. In addition, the energy consumption rate was higher to the order of 19.2% in the phosphorus removal process, 16.0% during sludge treatment, and 6.1% during disinfection and discharge. In terms of equipment energy usage, feeding and decanting pumps accounted for 40% of total energy consumed following 27% for blowers. By controlling the aeration rate based on the proposed feedback control system, the DO concentration was reduced by 56% compared pre-controls and the aeration amount decreased by 28%. The overall power consumption of the plant was reduced by 6% via aeration control.

Key words : Aeration Control, Energy Savings, Performance Index, Supervisory Control and Data Acquisition, Tool-kit

^{1a} 부장(Director), jrkim.unu@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5163-6146>

^{1b} 연구원(Researcher), ghrhee.unu@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9652-4762>

^{1c} 대표(CEO), kty.unu@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3735-2312>

^{2a} 석사과정(Master Student), dyk1234@naver.com, <https://orcid.org/0000-0001-9237-0444>

^{2b,†} Corresponding author, 교수(Professor), hlee@ut.ac.kr, <https://orcid.org/0000-0001-5696-7411>

1. Introduction

국내 공공하수처리시설에서 사용되는 전력은 2017년 기준 전체 에너지 소비량의 약 0.62%이고, 산업용 기준으로는 1.10%에 달하며(KWWA, 2020a), 이는 공공하수처리시설의 처리용량 증가와 함께 방류 수질 개선 노력으로 꾸준히 증가하고 있는 추세이다. 2018년도 하수도통계 자료에 따르면 국내 전체 공공하수처리시설의 소비전력량은 2008년 기준 2,230,835 MWh/년에서 2017년 기준 3,136,896 MWh/년으로 약 40.6%가 증가한 것으로 나타나고 있다(ME, 2018). 공공하수처리시설의 에너지 사용량 증가와 글로벌 차원의 기후변화에 대응하기 위하여 환경부는 공공하수처리시설을 대상으로 2010년부터 2030년까지 3단계로 구분된 에너지 자립화 사업계획을 통해 2010년 기준 하수처리시설의 에너지 자립화율 3.5% 수준을 2030년까지 50%로 향상시키기 위한 다양한 사업들을 추진하고 있다. 이러한 에너지 자립화 사업은 하수처리 과정에서 발생하는 다양한 신재생에너지(바이오가스, 태양광, 풍력발전, 소수력 등)의 풍부한 에너지 잠재력을 극대화하고, 그 이용효율을 높여 에너지 자립률을 향상시키는데에 목표를 둔다(ME, 2010; ME, 2019). 한편, 미국을 비롯한 선진 외국에서도 공공하수처리시설의 에너지 절감을 위한 다양한 사업들을 현장에 전개하고 있다. 우리나라와 같이 신재생에너지를 발굴하여 보급하는 경우도 있으나, 무엇보다도 기존 처리시설 중 생물 반응조와 같은 에너지 다소비 공정이나 펌프를 포함한 설비들의 에너지 사용량을 절감하여 에너지 자립율을 개선하는 사례들에 주목할 필요가 있다(K-ECO, 2017; U. S. EPA, 2010). 미국을 비롯한 선진 외국에서는 ‘에너지 자립율’을 처리시설 내의 공정이나 설비에서 절감되는 에너지양을 포함하여 그 효과를 검토하지만, 우리나라에서는 신재생 에너지를 통해 증가되는 에너지양에 국한하여 공정 및 설비의 에너지 절감 효과에 대해서는 평가 및 적용이 비교적 미흡한 실정이다. 그러나 공공하수처리시설에서 기기 개선을 통한 에너지 절감 관련 환경부 보고서에 따르면 송풍기와 펌프류를 포함한 하수처리장 내 회전기기의 에너지 비용 절감액은 전체 하수처리시설의 약 30%를 차지하는 것으로 나타났다(ME, 2014). 이와 같이 하수처리시설에서 새로운 에너지원의 발굴도 중요하지만, 기존에 운전되는 시설의 기기나 운전방법 개선을 통한 에너지 절감 또한 중요한 요소가 아닐 수 없다. 시설 및 기기의 운전방법 개선을 통해 에너지 소비량을 절감하기 위해서는 우선적으로 하수처리시설의 에너지 사용 분석 및 설비 운전 진단을 통해 효율적 에너지 사용방안을 도출하고, 기기 교체를 위한 주요 설비별 소비전력 모니터링이 필요하다. 그러나 대부분의 공공하수처리시설은 전체 소비전력을 중심으로 전력 사용량을 확인하고 있어 개별 설비에 대한 전력 사용량을 확인하기가 어려운 실정이다. 특히 개별 공정이나 설비별로 실시간 전력량 측정을 위한 전력량계를 설치할 경우, 기존 운영시설의 가동을 중단해야 하는 등 공정 운영상 위험요소가 생기거나, 시설 구축에 따른 추가 비용이 발생할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 시설 내 Supervisory

Control And Data Acquisition (SCADA) 시스템을 활용하여 에너지 사용량을 모니터링하고 이를 통해 공공하수처리시설의 에너지사용을 절감하고자 하였다. 기기의 가동시간 및 효율과 고유의 소비전력을 이용하여 설비의 전력소비량을 예측하고, 실제 소비 전력 측정량과 비교, 보정하여 유의한 설비별 전력량 모니터링 자료를 수집하였으며, K-ECO Tool-kit을 이용하여 설비별 전력량 모니터링 자료의 유의성을 비교 검증하고 이를 통해 에너지 사용량 효율 지표를 제시하였다. Sequencing Batch Reactor (SBR) 공정으로 운영되고 있는 A 공공하수처리시설을 연구대상으로 하였으며, 송풍량 제어를 통해 에너지 절감 및 처리수질의 안정성 여부를 확인하고자 하였다.

2. Materials and Methods

2.1 Determination of energy performance index

하수처리시설별로 에너지 사용량을 비교 검토하기 위한 에너지 성능지표(Performance Index, PI)를 선정하여 공공하수처리시설들의 에너지 사용량을 비교 검토하였다. 2018년 국내 하수도 통계(ME, 2018) 자료를 이용하여 동일 공법, 유사 처리용량 규모의 하수처리시설에 대한 PI값을 산정하였으며, PI값 순으로 국내 하수처리시설을 나열하고 이를 바탕으로 5개의 등급을 구분하였다. 또한, 대상하수처리시설의 전력사용 대비 처리성능을 5등급의 에너지 성능으로 제시하였다.

본 연구의 대상은 1,200 m³/일 규모의 Bio Ceramic SBR (BCS) 공법으로 운영하는 A 하수처리시설이며, PI등급 산정 시, 시설용량이 작을수록 단위 오염물질제거량당 전력사용량이 커지므로, 해당 공공하수처리시설의 용량기준 $\pm 50\%$ 범위의 동일 공법의 시설을 대상으로 분석하고자 하였다. PI등급 산정을 위해 국내 하수처리시설 4,111개소 중 환경부에서 발표한 하수도통계 자료를 기반으로 시설용량 600~1,800 m³/일의 SBR공법 사용 시설 89개소를 선정하였다. 해당 하수처리시설들을 대상으로 검토된 PI 지표는 유입유량 및 BOD, COD, TN, TP 제거량 기준 전력사용량(kWh)으로 Table 1과 같다. 이러한 성능지표는 하수처리시설의 에너지 사용현황을 비교, 평가하기 위해 유럽을 중심으로 여러 국가에서 활용되고 있다(Di Fraia et al., 2018; Henriques and Catarino, 2016; Longo et al., 2016; Maktabifard et al., 2018). A 하수처리시설의 PI 산정을 위한 기초수질자료 및 전력사용량 자료는 SCADA 시스템으로부터 수집된 데이터를 사용하였다. SCADA 시스템은 집중 원방 감시제어 시스템으로 각종 산업시설을 효율적으로 운전관리하기 위한 정보수집, 처리, 분석, 제어기술 및 통신 기술이 통합된 통합 계측 감시제어 시스템을 일컫으며(Joo et al., 2004), 수질 및 수량관측, 재해방지, 발전 등의 분야에서 널리 사용되고 있다(Jang et al., 2014). 본 연구에서는 SCADA 시스템으로부터 계측된 기기 가동시간 및 TMS 수질 데이터를 활용하여 PI를 산정하고 하수도통계를 기반으로 산정된 PI 등급과 비교하여 대상하수처리시설의 에너지사용효율을 진단하고자 하였다.

Table 1. Performance index for evaluation of the energy consumption efficiency in sewage treatment plants

Performance Index	Unit	Description
PI-BOD	kWh/kg _m	Electricity consumption per 1 kg of BOD removal
PI-COD	kWh/kg _m	Electricity consumption per 1 kg of COD removal
PI-TN	kWh/kg _m	Electricity consumption per 1 kg of TN removal
PI-TP	kWh/kg _m	Electricity consumption per 1 kg of TP removal
PI-Q	kWh/m ³	Electricity consumption per 1 m ³ of wastewater treatment

2.2 Monitoring of energy consumption for equipments

설비별 에너지 사용량을 모니터링하기 위해 각각의 설비에서 제시하고 있는 소비전력 사양을 기준으로 시간당 에너지 사용량을 산정하였다. 송풍기를 예를 들면, 산업통상자원부 고시 현행 법령 효율관리기자재 운용규정 중 삼상 유도전동기의 1시간 소비전력량 계산법을 이용하여 식 1과 같이 소비전력량을 산정할 수 있다(MOTIE, 2018). 본 방법은 각 설비별로 제시하고 있는 정격출력 값과 효율을 기준으로 소비전력량을 산정하며, SCADA 시스템의 실제 기기 가동시간을 활용하여 설비별 가동량에 따른 전력소비 산정이 가능하다. 이후, 식 1에서 구한 값과 실제 전력량계를 통한 소비전력 측정량을 비교하여 에너지 사용량을 보정하였다.

$$Electricity\ Consumption\ (kWh) = \frac{Output\ Voltage\ (kW) \times Operating\ Time\ (hr)}{Efficiency} \quad (1)$$

실제 전력량계 측정값을 기준으로 가동시간에서 계산한 소비전력(Power_a)에 보정 계수(CF)를 곱해(식 2) 일주일 단위로 보정하였고, 실 측정값과 계산값 사이의 오차가 5% 이내로 되도록 주기적인 보정을 진행하였다. 보정된 전력량 값을 바탕으로 시간별/일별/월별 에너지 사용량 변화를 분석하였다.

$$Power = Power_a * CF \quad (2)$$

2.3 Monitoring of energy consumption for A WWTP with Tool-kit

한국환경공단에서 제작한 하수처리시설 에너지 진단프로그램 Tool-kit (K-ECO, 2015)을 활용하여 A 하수처리시설에 대한 에너지 진단을 수행하였다. Tool-kit 프로그램은 현황과

약, 에너지 흐름도(energy flow map), 에너지 수지(energy balance), 에너지 개선사항, 전력비 최적화방안을 포함한 5가지 분야로 구성되어 있으며, 각각의 분석항목에서 필요로 하는 데이터는 Table 2와 같다. 본 논문에서는 현황과약과 에너지 흐름도를 통한 에너지 사용 실태 및 공정별 에너지 분석을 수행하였다. 첫 번째, 현황과약 단계에서는 월별 전력 사용량, 전력피크, 전기요금, 유입·방류량 자료를 입력하여, 이에 따른 월별 유입하수 1 m³ 당 전력비용과 1 kWh 사용에 따른 전력비인 전력단가를 산정한다. 두 번째, 에너지 흐름도에서는 설비별 정격용량 및 실측용량, 수량 등 설비들의 기본사항을 입력하여, 각 공정별 에너지 소비량 및 부하율, 손실율을 계산하고, 이를 통해 하수 유입부터 방류까지의 에너지 흐름을 파악 할 수 있다. 마지막으로 전력비 최적화방안에서는 현황과약에서 입력한 전력 데이터를 기반으로 계약전력 대비 실제 전력사용량 제시에 따른 비교 분석을 통해 최적화 방안이 검토된다(Kim, 2020).

2.4 Aeration rate control

하수처리공정에서 송풍기는 에너지를 가장 많이 소비하는 설비 중 하나로, 송풍에너지를 절감하기 위한 다양한 연구들이 국내외에서 수행되어 왔다. 오스트리아의 Strass 하수처리시설의 경우, 질산화 공정의 반응조에 Dissolved oxygen (DO) 센서와 암모니아 센서를 설치하여 질소제거에 필요한 DO 농도를 제어함으로써 포기조 내 산소전달에 소모되는 에너지를 최소화하고 있다(K-ECO, 2017). Strass 하수처리시설에서 에너지 사용현황을 자체적으로 분석한 결과, 생물학적 공정에서 가장 많은 에너지를 사용하고 있는 것으로 나타나 이에 대한 에너지 절감을 위하여 별도의 에너지 미터를 설치 및 운전과 동시에 적극적으로 공기량 제어 운전을 실시하고 있다(K-ECO, 2017). 그 외에도, 미국 EPA의 에너지 절약 프로젝트(Energy Conservation Measures, ECM)를 통해

Table 2. Required sewage treatment plant data for tool-kit analysis (Kim, 2020)

Items	Data requirements for tool-kit analysis
Status	Monthly power usage, power peak, electric charges, monthly inflow, discharge volume (for 3 years)
Energy flow map	Facility list by process, rated and actual power, quantity, durable years, quantity of reserve facilities
Energy balance	Rotor capacity, rated voltage, rated current rotator measuring voltage, current, power factor, total harmonic distortion, pump specification flow, hydraulic head pump measurement pressure, power, flow rate

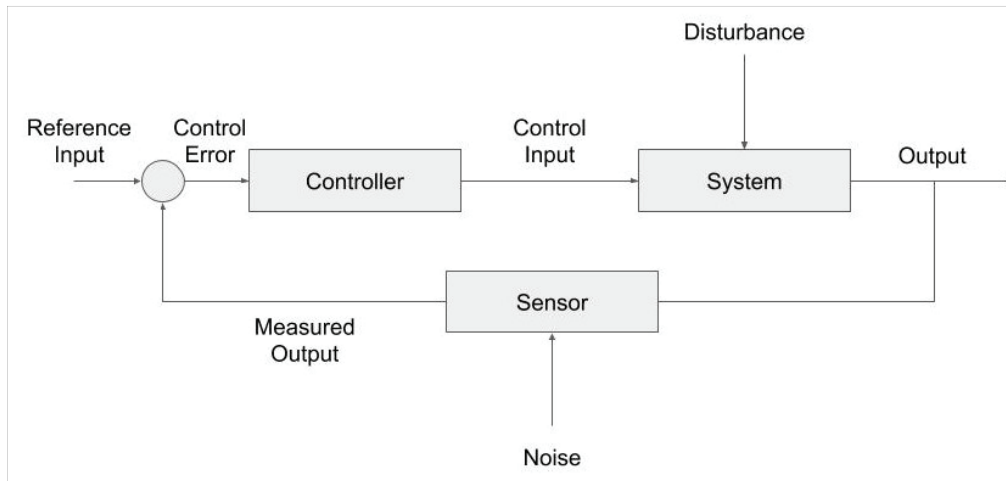


Fig. 1. Structure of feedback control system.

미국 내 9개 하수처리시설에 대한 에너지 절감 프로젝트를 실시한 결과, 대부분의 처리시설에서 DO 제어를 통한 에너지 절감 방안들을 적용하고 있는 것으로 검토되었다(U. S. EPA, 2010).

본 연구에서는 SBR 공법의 A 하수처리시설을 대상으로 기존 운전상태에서 송풍량 제어운전을 통해 방류수 수질을 유지함과 동시에 송풍에너지 및 전체 에너지 사용량을 절감하고자 하였다. 본 연구에 적용된 기본적인 Feedback 제어시스템의 구조는 Fig. 1과 같다. Feedback 제어시스템은 설정된 제어목표치(reference input)와 센서측정값(measured output)을 비교하여 오차(control error)를 계산하고, 제어기(controller)가 오차를 감소시키는 방향으로 조작량(control input)을 전달한다. 대상시스템에서는 전달받은 조작량에 따른 출력값(output)을 도출하여 제어 목표치에 도달하도록 한다. 센서측정값이 제어 목표치에 도달할 때까지 제어 기작이 반복적으로 이루어지며, 이때 외란(disturbance)과 노이즈

(noise)에 의해 출력 및 측정값에 오차가 생길 수 있다.

본 연구에서는 송풍량 조절을 위해 Fig. 2와 같이 피드백 제어 시스템을 적용하였다. 제어 시스템은 1단계와 2단계로 나누어 진행되며, 1단계에서 방류수 TN 기준 농도 설정 후 현재 TN 농도와 비교 결과에 따라 DO 목표치를 증감하도록 하였고, DO 목표치는 1.0~5.0 mg/L 범위에서 결정되도록 상·하한값을 설정하였다. 결정된 DO 목표치를 바탕으로 2 단계에서 반응조 DO 농도를 측정하여 DO 목표치와 비교에 따라 송풍량을 조절하였다. 예를 들어, 현재 DO가 목표치보다 낮을 경우, 송풍량이 증가하고, 목표치보다 높을 경우 송풍량이 감소하게 된다. 해당 제어시스템을 대상하수처리공정에 적용하여 방류수 수질변화 및 에너지 절감량을 확인하였다. 본 연구에서 A 하수처리시설의 방류수 수질분석은 수질 오염공정시험법(ME, 2011)과 Standard method (Baird et al., 2017)에 의해 분석되었고 포기조 내 DO 분석은 센서(Hach LDOsc)를 활용하였다.

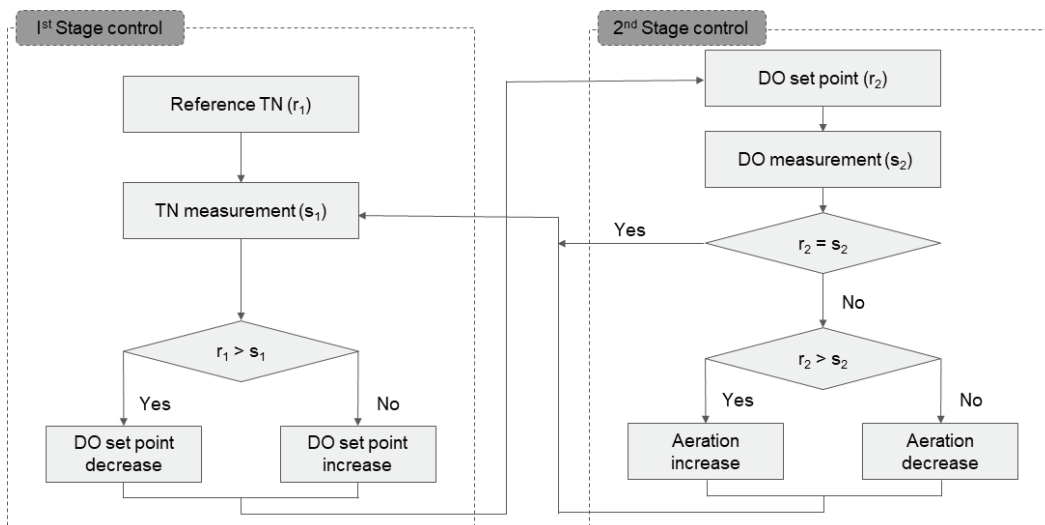


Fig. 2. 2-stage aeration control algorithm based on effluent TN concentration (1st-stage control) and DO concentration in bioreactor (2nd-stage control).

2.5 Introduction of A wastewater treatment plant

A 하수처리시설은 1,200 m³/일 규모의 BCS 공법으로 운영되며, 유입하수는 유량조정조와 BCS 공정을 거쳐 여과 후 방류된다. 슬러지처리공정은 농축 및 탈수과정을 거쳐 부숙화 시설을 통해 처리된다. A 하수처리시설의 연간 전력사용량은 2018년 기준 393,723 kWh/년이며, 전력요금은 연간 약 40,000,000원에 달한다. 주요 에너지 설비로는 유입펌프, 수중 포기기, 송풍기, 방류펌프가 있으며, 해당 설비들의 에너지 사용은 전체 에너지 소비량의 65% 이상을 차지한다.

3. Results and Discussion

3.1 Diagnosis of energy performance index

성능지표 PI 항목별로 각 값들을 순서대로 나열하여 에너지 성능지표 등급기준에 따라 5등급으로 구분하였다. 국내 하수처리장 중 A 하수처리시설 시설용량의 50~150% (600~1800 m³/day)에 해당하는 SBR 공법 사용 처리시설 89개소에 대해 PI 등급기준을 산정하여 유사한 규모 및 공법을 갖는 처리장 간에 전력소비효율을 비교하도록 하였다. 해당 처리시설들을 대상으로 BOD, COD, TN, TP 에 대한 PI를 검토한 결과는 Fig. 3과 같다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 대부분 처리시설의 PI가 유사한 범위에서 나타나므로, PI 항목별 누적 백분위를 기준으로 동일한 처리시설의 분포율을 갖도록 분류 시, 등급 간 간격이 상이하여 유사한 PI값을 가짐에

도 불구하고 상대적인 순위에 따라 등급이 나누어지는 문제가 발생하였다. 이러한 문제를 해결하기 위해 상/하위 5% 데이터를 제외한 백분위 5~95% 자료를 사용하여 PI 값의 크기에 대해 동일한 간격으로 5등분하여 Table 3과 같이 등급 기준을 선정하였다.

PI 등급 산정에 앞서, 시설용량 500톤 이상 국내 전체 공공하수처리시설을 대상으로 수질항목별 에너지 사용현황을 검토한 결과, 시설 규모가 클수록 유입하수량 당 전력사용량이 적고, 오염물질 1 kg 제거 당 소비되는 단위 전력사용량 또한 낮은 것으로 평가되었다(ME, 2018). 공공하수처리시설 규모별 전력사용량을 볼 때, 500~1,000 m³/일 규모의 하수처리시설 유입하수 1 m³당 전력 사용은 2 kWh로 500,000 m³/일 이상 규모의 하수처리시설 유입하수 1 m³당 전력사용량에 비해 약 6~7배 정도 높게 나타났고, 50,000 m³/일 이상 규모에서는 유입하수량 당 전력사용량이 0.3~0.5 kWh/m³로 비슷한 수치를 보였다(ME, 2018). BOD, COD, TN, TP 에 대한 PI를 기준으로 전력사용량을 분석한 결과, 500~1,000 m³/일 규모에서 BOD 1 kg 제거 당 전력사용량은 19.2 kWh/kg_{rm}로 500,000 m³/일 이상 규모 하수처리시설의 BOD 제거 당 전력사용량에 비해 약 10배 정도 높고, COD, TN, TP 또한 적게는 5배에서 10배 차이가 나는 것을 확인할 수 있었다(KWWA 2020b; ME 2018).

하수처리시설의 에너지 성능지표 값을 계산하여 이를 일반 전기 기기의 에너지 사용등급 표시 방법과 같이 5개의 등급

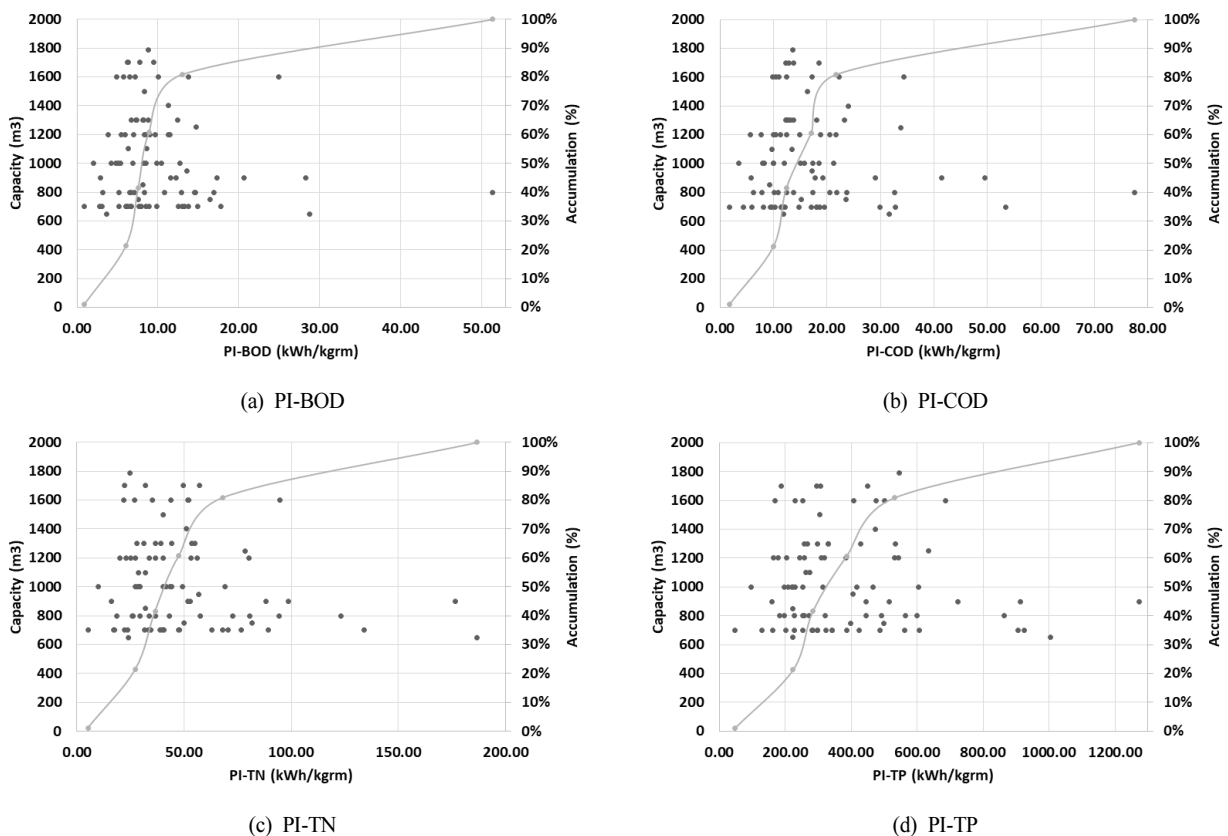


Fig. 3. PI vs Capacity using statistical data of WWTP in Korea.

으로 구분하여 Fig. 4와 같이 나타내었다. 각 등급 간의 범위는 공정별, 용량별 하수처리시설에 대한 하수도통계를 기반으로 순위를 선정하여 5개로 나누어 등급을 구분하였다. 각 등급별로 안전, 양호, 보통, 주의, 경고 상태를 나타내며, 이를 통해 해당 처리시설의 각 수질항목별 에너지 성능지표가 어떠한 상태에 속하는지 효과적으로 보여줄 수 있을 것으로 판단된다.

하수도통계를 기반으로 하여 A 하수처리시설과 동일 공법 및 유사 규모의 하수처리시설들과의 부하량 대비 전력소비를 비교하였다. 그 결과, A 하수처리시설의 PI등급은 안전 2개, 양호 2개의 등급을 받았다. Fig. 4의 A 하수처리시설은 본 연구에서 제안한 에너지 사용등급 표시방법에 의하면 PI-COD는 3.5 kWh/kg_{ss}, PI-TN은 29 kWh/kg_{ss}로 모두 1등급에 해당되어 비교적 양호 상태를 보이고, PI-BOD는 7.2 kWh/kg_{ss}, PI-TP는 445 kWh/kg_{ss}로 안전 상태를 보여주고 있다. PI-TP값이 비교적 큰 이유는 A 하수처리시설 유입 TP 농도가 2.5 mg/L로 유사규모 처리시설의 유입 TP 평균 농도 3.8 mg/L 보다 34% 낮아 계산된 TP 제거량이 작기 때문이다. 이와 같이 본 연구에서 제안한 처리시설별 PI 비교분석을 통해 하수처리 전력소비 효율을 상대적으로 평가할 수 있다.

3.2 Result of energy consumption monitoring for equipments

2020년 5월부터 7월까지 시간에 따른 각 공정별 에너지 사용 현황에 대한 분포를 Fig. 5와 같이 나타내었다. 전체 공정 가운데 생물반응조와 처리수조(자동급수장치, 방류펌프 시설)가 30% 내외의 에너지 사용률로 가장 큰 비중을 차지하고 있다. 이는 본 처리시설뿐만 아니라 송풍기를 사용하는 생물반응조가 설치된 국내의 대부분 하수처리시설에서 나타나고 있는 전형적 현상이다. 미국이나 유럽의 하수처리시설에서 단위공정별 에너지 사용사례를 보면 생물반응조가 49%로 개별 설비 중 가장 높은 에너지 소비율을 나타내고 있고, 약품 주입설비를 포함한 펌프류들이 19%이며 메인 유입 펌

프와 여과지 주입 펌프는 동일한 수준의 에너지 소비율을 기록하고 있는 것으로 보고하고 있다(Drewnowski et al., 2019; U. S. EPA, 2010). 또한 국내 특·광역시 대규모 하수처리시설 단위공정별 에너지 소비도 유사한 분포를 보이며, 생물학적 2차 처리시설의 경우 생물반응조 55~70%, 1차와 2차 침전지의 슬러지 이송에 15.6%와 탈수 7% 등의 에너지 사용 분포를 보이고 있다(KWWA, 2020a). 이러한 에너지 분포 사례를 미루어 볼 때, 에너지 절감을 위해서는 생물반응공정을 우선적으로 고려할 필요가 있다. A 하수처리시설에서 생물반응조 이외에 에너지를 많이 소비되는 공정으로는 또한 유입공정과 슬러지 공정이 있다. 에너지를 많이 소비하는 설비들은 대부분 회전기기를 포함하고 있으며, 이외에도 본 처리시설에 설치된 탈취 공정은 상시운전으로 인해 지속적으로 일정한 에너지를 소비하였다. 한편, 총인저감시설이나 여과, 협잡물처리기 등의 설비는 필요시에만 가동하므로 전체에서 차지하는 에너지 소비율은 크지 않았다.

에너지 다소비 설비인 회전기기를 중심으로 48시간 동안 전력 사용량을 Fig. 6과 같이 검토하였다. 모니터링 설비는 유입펌프와 방류펌프 및 송풍기로서 SBR 공정의 특성을 비교적 덜 반영하는 유입과 방류 펌프 전력사용량은 시간별 증감 폭이 작으나 송풍기의 경우 그 폭이 크게 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 이는 SBR 공정 운전모드에 의해 발생하는 결과로서 사이클별로 유사한 결과 값을 보인다.

3.3 Result of energy consumption monitoring for unit process with tool-kit

한국환경공단의 Tool-kit 프로그램을 이용하여 A 하수처리시설에 대한 최근 3년간 월별 하수처리량과 에너지 비용을 검토하였다. 월별 사용 전력량을 통해 전력요금을 산정하여 분석하였으며, 최근 3년간 에너지 단가는 평균 100원으로, 2017년 109원, 2018년 95원, 2019년 98원으로 변화하였다. 전력 부하율은 12월~3월 동절기에 50% 이상으로 증가하나, 연간 평균 48% 이내로 유지되고 있다. Fig. 7에 A 하수처리

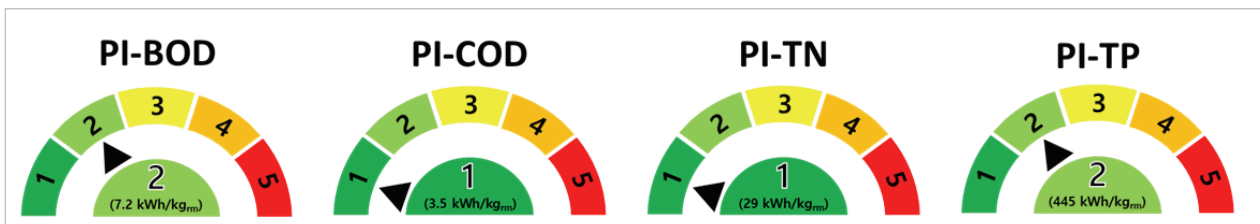


Fig. 4. Calculated energy efficiency grades of A sewage treatment plant using proposed PI.

Table 3. Grade criteria of proposed PI based on water pollutant removal (Unit : kWh/kg_{ss})

	PI-BOD	PI-COD	PI-TN	PI-TP
Grade 1	Less than 6.4	Less than 11.6	Less than 33.7	Less than 306.9
Grade 2	6.4~9.7	11.6~17.2	33.7~49.5	306.9~452.4
Grade 3	9.7~13.0	17.2~22.9	49.5~65.4	452.4~597.8
Grade 4	13.0~16.3	22.9~28.5	65.4~81.2	597.8~743.3
Grade 5	More than 16.3	More than 28.5	More than 81.2	More than 743.3

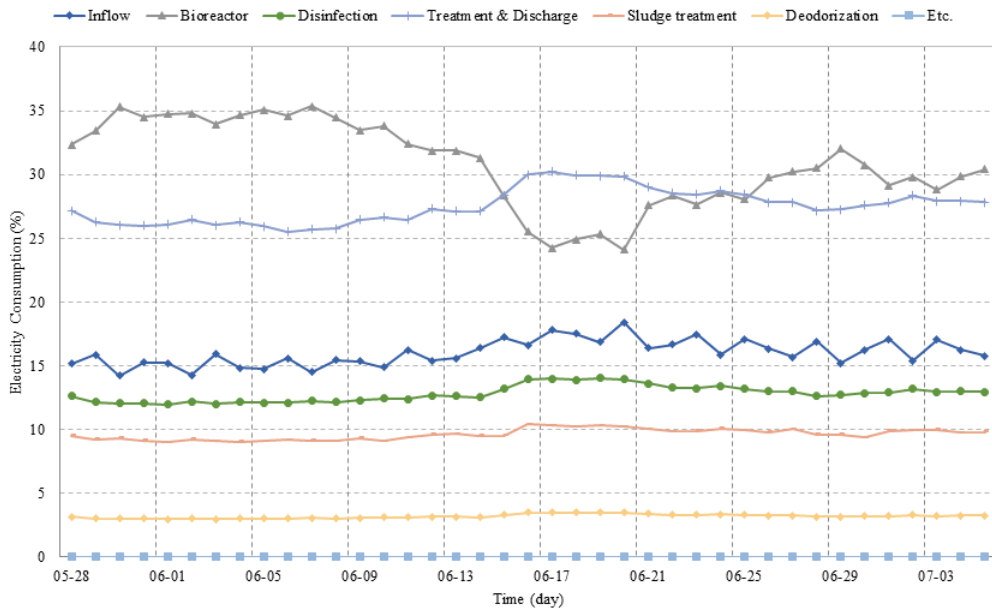


Fig. 5. Energy consumption ratio of the unit process of A treatment plant for 3 months.

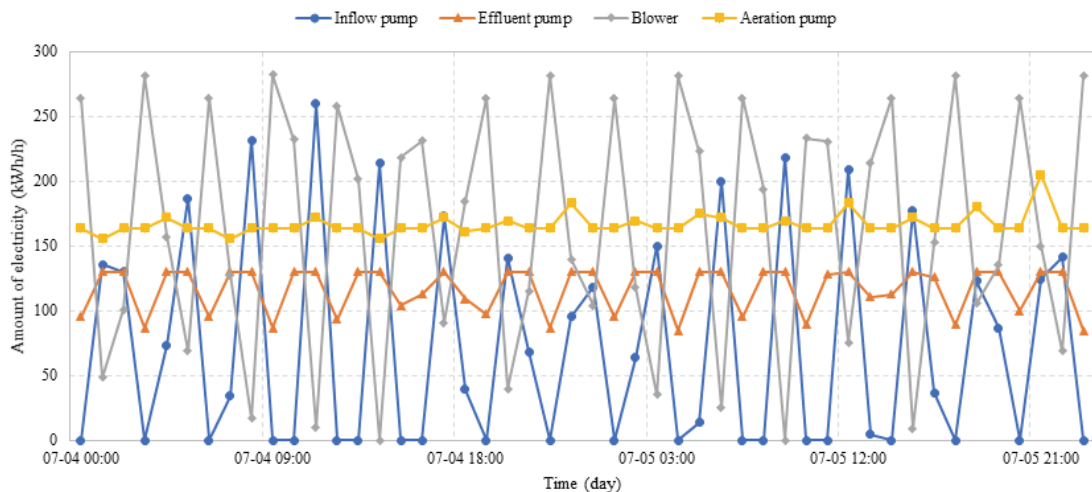


Fig. 6. The variation of power consumption of each type of equipment in A treatment plant for 48 hours.

시설의 에너지 흐름도를 통한 에너지 소비 현황을 나타내었다. 해당 결과는 하수처리시설 평균적인 전력 사용 비율을 고려하여 산정하였으며, 추가적으로, 전력 측정을 통한 실측 데이터가 있을 경우 Tool-kit 내에서 직접 입력을 통해 보다 정확한 분석이 가능하다. 분석 결과, 하수처리를 위해 1,133 kWh의 전력이 하루 평균 사용되고 있으며, 선로손실로 22 kWh, 사무실로 23 kWh, 급배기팬 113 kWh, 조명 22 kWh의 전력량이 사용되는 것으로 나타났다. 이러한 공정의 전력사용량을 제외하면 실질적으로 공정에 투입되는 전력량은 85.5%인 약 930 kWh이다. 그 중, 전처리 공정과 반응조에서 각각 263 kWh, 283 kWh를 사용하며, 전체 공정 전력사용량의 58.7%를 차지하고 있다. 나머지 총인저감시설에서 19.2%, 슬러지 처리 16.0%, 소독 및 방류 6.1% 순으로 에너

지 소비율이 높은 것으로 나타났다. 생물반응공정을 포함한 2차 처리 공정의 에너지 소비 비율이 45~75% 정도 인 것을 고려할 때(Longo et al., 2016; Xu et al., 2017), 해당 분석 결과에서 비슷한 수준의 비율을 보이는 것을 보아 본 에너지 분석 결과 또한 상당 부분 유의할 것으로 사료된다. Tool-kit 분석을 통해 산정된 주요 설비들에 대한 전력 사용량을 Fig. 8과 같이 나타내었다. 유입, 방류 펌프에서 40%, 송풍기에서 27%로 전력사용량이 가장 많은 것으로 나타났다. 또한 기타 펌프와 슬러지 저류조용 송풍기도 각각 19%, 5%를 차지하고 있다. 공정 및 설비별로 에너지 사용현황을 분석한 결과 송풍기와 펌프에 대한 에너지 소비량이 높은 것을 알 수 있다. 이는 앞서 분석된 설비가동시간 기반의 에너지 사용량 산정결과와 비슷한 분석 결과를 보여주었다.

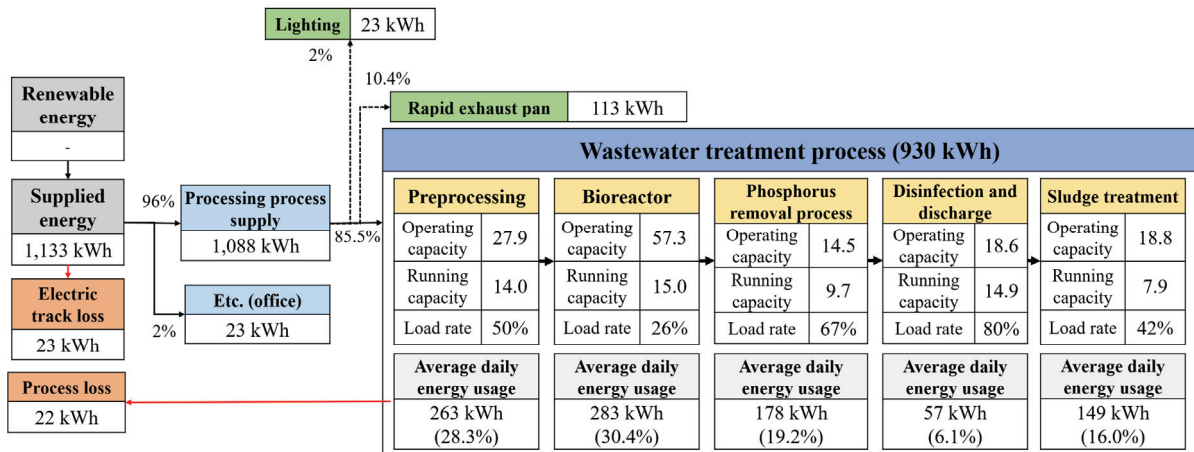


Fig. 7. Energy flow map for A sewage treatment plant by K-ECO energy diagnosis Tool-kit.

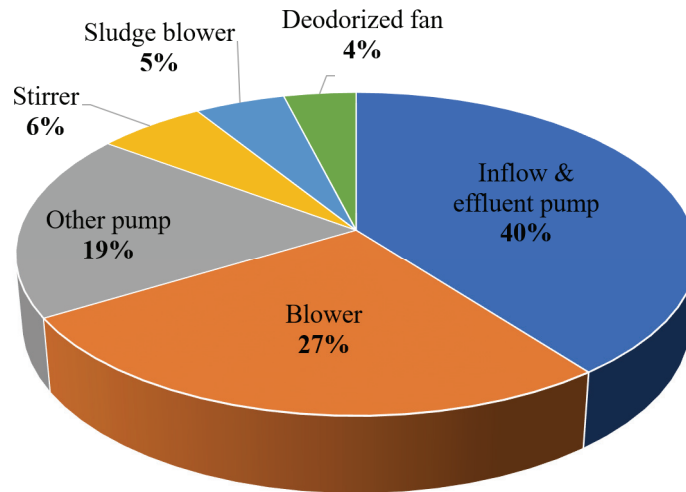


Fig. 8. Energy consumption status of A sewage treatment plant by Tool-kit.

3.4 Result of energy reduction through aeration rate control

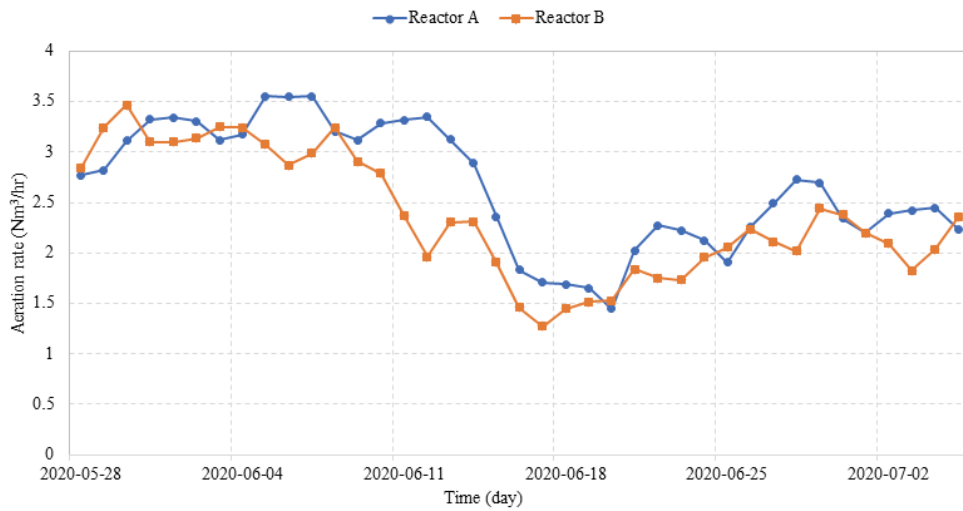
A 하수처리시설의 SBR 공정에서 호기시간에 공급되는 송풍량 조절을 통한 에너지 절감효과와 이에 따른 방류수질의 안정성을 검토하였다. 본 연구에서 SBR 공정으로 운영중인 A 하수처리시설의 DO를 모니터링한 결과 평균 8.0 mg/L 이상의 높은 농도로 운전되며, 그에 따른 필요 이상의 에너지 소비를 확인하였다. 특히, 본 처리시설은 일반적인 하수처리 시설들이 1.0~5.0 mg/L의 DO 농도를 유지하는 것을 고려할 때, 다소 높은 DO 농도로 유지되고 있는 문제점이 있다. 본 연구에서 제안한 Feedback 제어시스템을 이용하여 반응조 내 평균 DO 농도 4.0 mg/L을 목표값으로 송풍량을 조절하였다. Fig. 9의 송풍량 제어 결과와 그에 따른 DO 농도 결과에서 볼 수 있듯이 제어가 시작된 2020년 6월 16일을 기점으로 해서 송풍량(Fig. 9(a))은 급격히 줄어들었고 이로 인해 DO 농도(Fig. 9(b))는 평균 8.0 mg/L에서 2.0~4.0 mg/L 내외의 값으로 감소된 것을 볼 수 있다. 송풍량 제어

전후에 따른 송풍량과 DO 농도, 방류수 내 TN 농도, 전체 소비전력 변화를 Fig. 10과 같이 나타내었다. 방류수 내 TN 농도는 4.0 mg/L 내외로 일정하게 유지되고 있는 것을 볼 수 있다. 일부 기간에서 유입 TN 농도의 변화에 따라 약간의 변화는 있었지만 본 송풍량 제어에 의한 특별한 영향은 확인할 수 없었다. 결과적으로, DO 농도는 제어 전에 비해 약 56% 감소, 송풍량은 28% 감소하였고, A 하수처리시설 전체 전력사용량은 제어 전 1,175 kWh에서 제어 후 1,103 kWh로 6.2% 절감하는 효과를 얻을 수 있었다.

4. Conclusion

하수처리시설에서 에너지 사용현황 모니터링 및 절감 방안 에 대한 연구결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 공공하수처리시설의 유입 BOD, COD, TN, TP 제거량 과 유량을 기준으로 에너지 성능지표 PI를 제시하였으며, 2018년 하수도통계를 기반으로 5등급의 PI 평가 기준을 제



(a) Aeration control



(b) The variation of DO concentration

Fig. 9. The variation of DO concentration by aeration control.

시하였으며, 이를 통해 유사규모 동일공법의 처리시설 간 에너지 사용현황을 객관적으로 비교할 수 있다.

2) 하수처리시설의 전력량을 모니터링하지 않는 개별 설비 및 단위공정의 전력소비량을 실시간 측정할 수 있는 방법을 제시하였다. 이는 설비 가동시간과 에너지효율을 통해 산정하는 방법으로 K-ECO Tool-kit의 분석과 비교하여 그 유의성을 확인하였다. 제안한 방법을 통해 별도의 비용투자 없이 하수처리장의 단위설비·공정의 실시간 에너지 모니터링이 가능할 것으로 기대된다.

3) A 하수처리시설의 공정별 에너지 사용 현황에 대한 분포를 K-ECO Tool-kit으로 분석한 결과, 송풍기 27%를 포함한 생물반응조가 30.4%의 에너지 사용률로 가장 큰 비중을 차지하고 있었고, 송풍기를 비롯해 펌프 등의 회전기들이 에너지 다소비 설비로 검토되었다.

4) 본 연구에서 적용된 Feedback 송풍량 제어시스템을 적용하여 A 하수처리시설의 송풍량을 제어 운전한 결과, 방류수내 TN 농도는 제어 전후 모두 4.0 mg/L 내외로 일정하게 유지하면서, DO 농도는 제어 전에 비해 약 56% 감소하였고, 생물반응조에 공급되는 송풍량은 28% 감소하였다. 결과적으로 송풍량 제어를 통해 A 하수처리시설의 전체 소비전력을 6.2% 절감할 수 있었고, 절감된 소비전력량은 제시한 전력모니터링 방법으로 산정할 수 있었다.

5) 본 연구에서 적용된 PI 지표는 시설 전체 소비전력을 기준으로 산정된 값으로 질소, 인, 유기물 등 개별항목 처리에 소요되는 전력소비량을 나타내는 것은 아니다. 따라서 보다 정확한 PI 지표 산정을 위해서는 개별 항목 처리에 소요되는 에너지 사용량을 산정하는 방안에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

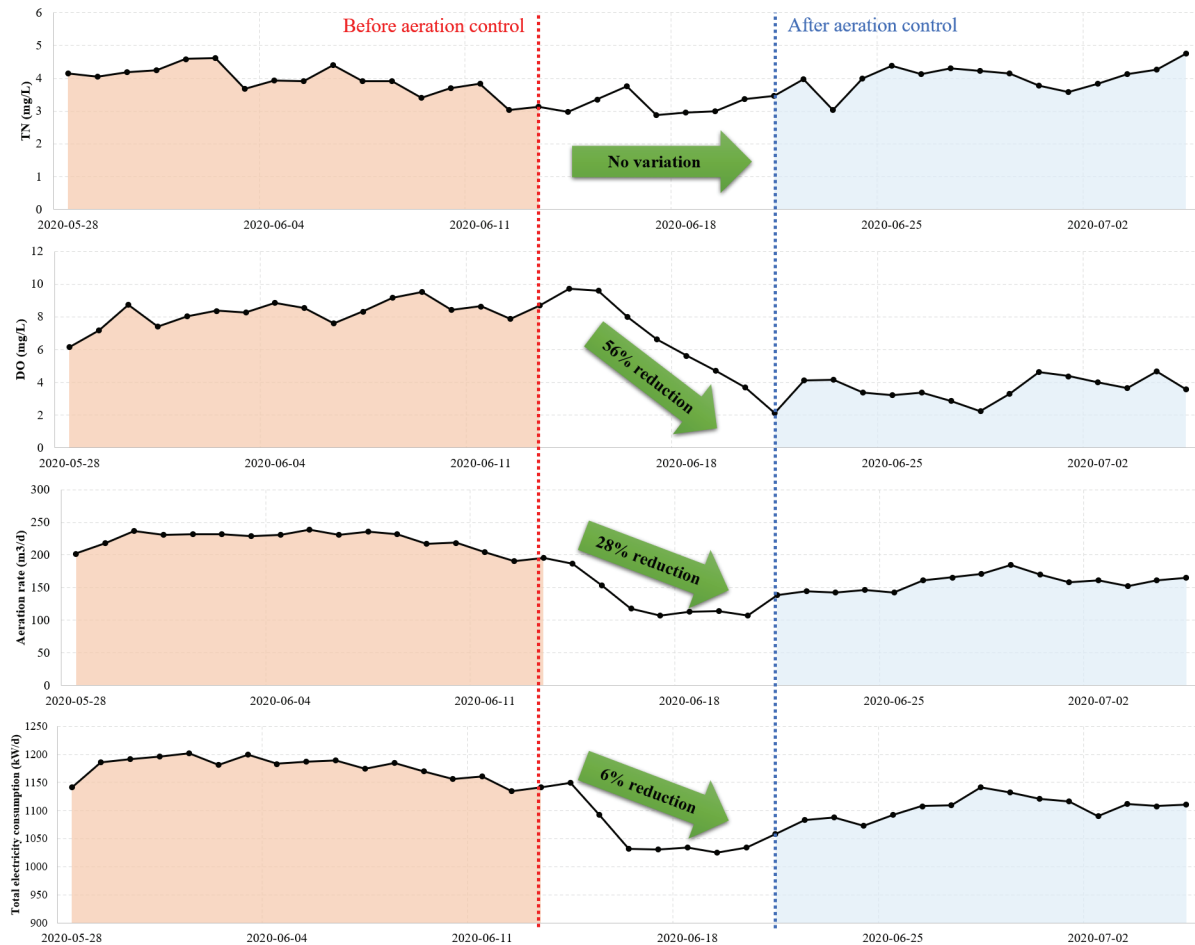


Fig. 10. The variation of TN and DO concentration, total power consumption by aeration control.

Acknowledgement

본 연구는 환경부 “글로벌탑 환경기술개발사업” 으로 지원 받은 과제임(과제번호:2019002210001)

References

- Baird, R. B., Eaton, A. D., and Rice, E. W. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 23rd edition, American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), Water Environment Federation (WEF).
- Di Fraia, S., Massarotti, N., and Vanoli, L. (2018). A novel energy assessment of urban wastewater treatment plants, *Energy Conversion and Management*, 163, 304-313.
- Drewnowski, J., Remiszewska-Skwarek, A., Duda, S., and Łagód, G. (2019). Aeration process in bioreactors as the main energy consumer in a wastewater treatment plant. Review of solutions and methods of process optimization, *Processes*, 7(5), 311.
- Henriques, J. and Catarino, J. (2016). Sustainable value - an energy efficiency indicator in waste water treatment plants, *Journal of Cleaner Production*, 142, 323-330.
- Jang, S. B., Lee, H. H., Hong, S. T., and Chun, M. G. (2014). Development of smart remote terminal unit for water treatment SCADA system, *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, 28(2), 24-30. [Korean Literature]
- Joo, C., Lee, H., Kwak, P., Hwang, J., and Jeon, H. (2004). A study on the analysis of real data using SCADA system in water distribution network, *Proceedings of the 2004 Spring Conference of Korean Society of Environmental Engineers (KSEE)*, Korean Society of Environmental engineers (KSEE), 753-760. [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, 11-13. [Korean Literature]
- Korea Environment Corporation (K-ECO). (2015). *A study on the development of technological diagnosis technique through the analysis of energy consumption patterns in sewage treatment plant*, Korea Environment Corporation. [Korean Literature]
- Korea Environment Corporation (K-ECO). (2017). *A study on the improvement of integrated management sewage facility operation management*, Korea Environment Corporation.

- [Korean Literature]
- Korean Water and Wastewater Association (KWWA). (2020a). *Manual for energy independence of sewage treatment facilities*, Korean Water and Wastewater Association. [Korean Literature]
- Korean Water and Wastewater Association (KWWA). (2020b). *A study on the energy saving and recovery of sewage treatment facilities*, Korean Water and Wastewater Association. [Korean Literature]
- 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.
- Maktabifard, M., Zaborowska, E., and Makinia, J. (2018). Achieving energy neutrality in wastewater treatment plants through energy savings and enhancing renewable energy production, *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 17, 655-689.
- Ministry of Environment (ME). (2010). *Basic plan for energy independence*, Ministry of Environment. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (ME). (2011). *Water pollution official test method enacted by Korean Ministry of Environment*, Ministry of Environment. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (ME). (2014). *Development of IT-based intelligent control and core technology for customized energy-saving devices for the energy saving of the sewage treatment plant blower and pump*, Ministry of Environment. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (ME). (2018). *Statistics of sewerage*, Ministry of Environment. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (ME). (2019). *A study on the policy of energy self-reliance in public sewage treatment facilities*, Ministry of Environment. [Korean Literature]
- Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE). (2018). *Regulations for operation of efficiency management equipment and materials*, Ministry of Trade, Industry and Energy.
- United States Environmental Protection Agency (U. S. EPA). (2010). *Evaluation of energy conservation measures for wastewater treatment facilities*, United States Environmental Protection Agency.
- Xu, J., Li, Y., Wang, W., Wu, J., Wang, X., and Li, F. (2017). Exploring the feasibility of energy self-sufficient wastewater treatment plants: A case study in eastern China, *Energy Procedia*, 142, 3055-3061.