



Research Paper

Comparison of Monitoring Methods for Total Organic Carbon using Optical Sensors in a Wastewater Treatment Plant

Seungeun Shin^{ID} · Yeonhee Kwon^{ID} · Changyeon Woo^{ID} · Wontae Lee^{ID*}

Department of Environmental Engineering, Kumoh National Institute of Technology

(Received February 24, 2023; Revised October 13, 2025; Accepted October 14, 2025)

Abstract : This study aimed to determine the optimal installation method for total organic carbon (TOC) online monitoring that facilitates easy maintenance and ensures stable water quality data collection, thereby enhancing the operational efficiency of bioreactors in wastewater treatment plants. Two monitoring configurations were tested at the bioreactor inlet: (1) a submerged type, with a sensor placed directly in the treatment process flow, and (2) a side-stream circulation type, with a sensor placed in a tank receiving influent via an underwater pump. Sensors continuously collected data at second-level intervals, which were processed into 5-minute averages for analysis. Both configurations achieved a utilization rate exceeding 99%, and the average TOC concentrations were 34.34 mg/L for the circulation type and 33.77 mg/L for the submerged type, showing similar fluctuation trends. However, the submerged type exhibited relatively greater variance in measurements. Optimal cleaning cycles were estimated at five weeks for the side-stream type and one to two weeks for the submerged type. These findings suggest that the side-stream circulation configuration offers better maintenance efficiency and reliable data acquisition, making it a recommended option for stable TOC monitoring in sewage treatment processes.

Keywords : TOC, Optical sensor, Spectrophotometer, Water quality monitoring

The Korean text of this paper can be translated into multiple languages on the website of <http://jksee.or.kr> through Google Translator.

* Corresponding author

E-mail: wtlee@kumoh.ac.kr

Tel: 054-478-7636

© 2025, Korean Society of Environmental Engineers



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

연구논문

하수처리시설 생물반응조의 총유기탄소 모니터링을 위한 광학센서 설치방법 비교

신승은¹ · 권연희² · 우창연³ · 이원태^{4*}

국립금오공과대학교 환경공학과

요약: 본 연구는 하수처리시설의 반응조에서 총유기탄소(TOC) 온라인 모니터링의 최적 설치 방법을 비교하여 유지관리의 용이성을 높이고 안정적인 수질 데이터 수집을 통해 반응조의 운전 효율을 향상시키는 것을 목적으로 하였다. 이를 위해 반응조 유입부에 두 가지 모니터링 구성을 적용하였다. 첫째, 센서를 처리 공정 흐름 내에 직접 설치하는 침적형 방식과, 둘째, 수중펌프로 유입수를 유입시킨 수조 내에 센서를 설치하는 측류형 방식이다. 두 방식 모두 초 단위 간격으로 데이터를 연속 수집하였으며, 이를 5분 평균값으로 처리하여 분석에 활용하였다. 그 결과 두 방식 모두 센서 가동률이 99% 이상으로 나타났고, TOC 평균 농도는 측류형이 34.34 mg/L, 침적형이 33.77 mg/L이었다. 시간에 따른 TOC 농도의 변동은 유사한 경향을 보였으나, 침적형 측정값의 분산이 상대적으로 크게 나타났다. 안정적인 데이터 수집을 위한 최적 세정 주기는 측류형이 5주, 침적형이 1~2주로 도출되었다. 이상의 결과는 하수처리 공정에서 TOC의 안정적 모니터링을 위해 수조 설치, 유입수의 순환, 그리고 센서의 수조 내 설치를 포함하는 측류형 구성이 유지관리 효율성과 데이터 신뢰성 측면에서 더 적합함을 시사한다.

주제어: 총유기탄소, 광학센서, 분광계, 수질모니터링

1. 서론

우리나라는 공공수역의 수질 개선을 위하여 하수처리시설 보급 확대에 지속적으로 투자해왔으며, 그 결과 2024년 말 기준 전국 공공하수처리 보급률은 95.6%에 이르렀다. 특히 고도처리 보급률이 94.5%로 높다 [1, 2]. 물 관리를 통합하여 수량, 수질, 재해예방 등 대부분의 물관리 관련 기능을 환경부에서 수행하도록 하는 「물관리기본법」을 2019년부터 시행하였고, 국가 및 유역물관리 종합계획을 수립하여 통합물관리 체계를 구축·수행 중이다 [3]. 물관리 체계의 구체화에 따라 하수도 서비스의 요구 범위가 지속적으로 확장되고 있으며, 지속가능한 물순환 달성을 위해 유역 단위 관리의 중요성이 한층 부각되고 있다. 이에 따라 하수처리의 역할과 수질 관리의 중요성에 대한 사회적·정책적 인식과 관심이 점차 높아지고 있다 [4, 5, 6].

이러한 수량 및 수질적 관심의 확산과 더불어, 최근 하수처리시설 분야에서는 인공지능(AI; Artificial Intelligence), 사물인터넷(IoT; Internet of Things) 등 첨단 디지털(또는 스마트) 기술을 적용한 연구가 활발히 진행되고 있다 [7, 8, 9, 10, 11]. 환경부는 2020년 7월 그린뉴딜 분야 중 '깨끗하고 안전한 물관리 체계 구축'을 위한 핵심과제로 스마트 하수도 사업을 선

정하였고, 2021년부터 하수처리시설의 스마트화를 추진하여 에너지 절감, 수질개선 등의 효과를 기대하고 있다. 스마트 및 디지털 기술의 하수처리 분야 적용은 국민에게 보다 청정하고 안정적인 하수도 서비스를 제공하는 동시에, 하수도 서비스의 질적 수준을 제고하고 나아가 국내 물 산업 전반에 걸친 경제적 파급효과를 확산시키는 데 기여하고 있다 [12, 13, 14].

하수처리시설에 적용되는 스마트기술은 인지, 판단, 제어로 구성된다. 이 중 인지과정은 계측장비, 센서 등을 부착하여 데이터를 획득하는 요소기술로 하수처리 스마트화의 시발점이다. 인지과정에서 잘못된 데이터가 입력되면 판단과 제어 과정에서 심각한 오류가 발생할 수 있어 인지가 가장 중요한 요소라 할 수 있다. 하지만 현재 하수처리시설에 설치되어 있는 수질 측정센서들은 다양한 협잡물로 인해 측정 정확도가 낮고 빈번한 유지관리가 필요하며, 경우에 따라 장기간 사용하지 못하는 단점이 존재한다 [15, 16].

하수처리시설에서 일반적으로 사용하는 수질계측법은 크게 채수펌프(예, 수중펌프, 흡입식펌프)를 이용해 시료를 채취하여 전처리 후 수질을 분석하는 방법인 채수형 이화학적 분석 방법과 측정 지점에 센서를 직접 설치하는 방식인 침적형 센싱 방법으로 나뉜다. 채수형 이화학적 분석 방법은 협잡물 제

거를 위해 거름망을 설치하는 등 유연성은 있으나 수질 분석에 오랜 시간이 걸려 실시간 데이터 수집 및 분석이 쉽지 않아 스마트 기술을 활용한 하수처리에 적용하기에 한계가 있다. 침적형 센싱 방법은 실시간 수질데이터의 확보가 가능하나 하수의 특성상 협잡물로 인한 정확도 저하 및 잦은 유지관리 필요 등의 애로사항이 있다. 센서 데이터는 설치 조건에 따라 유효성과 신뢰성이 달라질 수 있으나 현재 설치 조건에 관한 명확한 규정이 없으며 해당 센서의 제조사에서 임의의 설치구간 및 방법을 선정하여 설치하고 있는 실정이다[17].

이에 본 연구에서는 하수처리시설 생물반응조 유입수를 대상으로 센서 설치 방법(침적형, 측류형)에 차이를 두고 비교하여 유지관리가 쉽고 실시간으로 안정적인 데이터 수집이 가능한 스마트 하수처리용 센서설치 방안을 마련하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 총유기탄소 센서 규격 및 설치

본 연구에서는 광학식 총유기탄소(total organic carbon, TOC) 측정센서를 사용하였다. 광학식 센서는 대상물질의 색, 흡광 및 형광 등의 광학적 현상을 전기적 신호로 변환해주는 센서로 자외선, 가시선, 형광, 적외선 등 측정항목에 따른 다양한 파장을 이용하며 다파장 방식 사용 시 다항목 측정이 가능하다[18]. 연구에 사용된 센서는 UV-Vis spectrometer 방식을 이용하는 다항목 측정센서(Spectro::lyser™ V3, s::can, Austria)로 정확한 TOC 값을 측정하기 위해 총고형물(TSS), 탁도, 온도 등을 보정 값을 적용한 후, 연구 과정에서도 주기적으로 점검하였다. 본 센서는 유지관리를 위하여 측정부 세척으로 브러쉬 방식을 채택한 제품이다.

센서를 설치한 A하수처리시설은 시설용량 50,000 m³/day이고 일차침전지, 생물반응조(혐기/무산소/호기), 이차침전지, 급속여과의 처리공정으로 이루어져 있다. 센서는 생물반응조 유입단에 두 가지 방식으로 설치하였다. (1)침적형, (2)측류형(Fig. 1). 침적형은 생물반응조 유입수로 내에 부착된 형태이고, 측류형은 유입단에서 수중펌프로 하수를 흡입하여 부류(side-stream)로 수조 내에 센서를 설치한 형태이다.

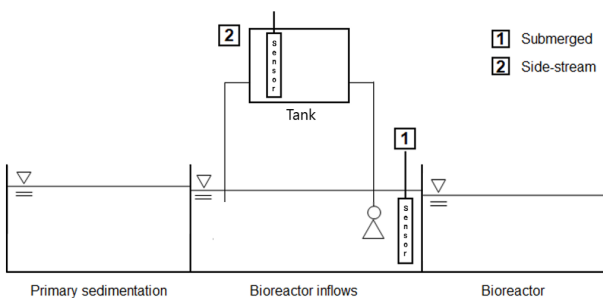


Fig. 1. Schematics of sensors installed at the wastewater treatment plant under study.

2.2 분석방법

센서 데이터의 신뢰성 분석을 위해 하수처리시설 내 침적형 및 측류형 설치지점 시료에 대해 TOC를 분석하였다. TOC는 총유기탄소분석기(TOC-LCPH/CPN, Shimadzu, Japan)를 이용하여 수질오염공정시험기준[ES 04311.1c (총유기탄소-고온연소산화법)]에 따라 입경 300 μm 체 거름하여 시료를 산성화한 후 무기탄소를 완전히 제거하고 남은 유기탄소를 측정하는 비정화성유기탄소(NPOC) 방법으로 분석하였다.

센서 데이터수집은 2022년 10월 7일부터 2022년 12월 3일까지 총 58일간 진행하였으며, 센서에서 초 단위로 수집한 데이터를 5분 평균값으로 변환하여 활용하였다. 센서 운영 기간 동안 이벤트로 인한 데이터 손실은 발생하지 않았으나, 일부 시점에서 수질의 일일 변동, 운영 기간 평균값, 전체 측정 경향과의 상관성이 낮은 이상치가 관찰되었다. 이러한 이상치를 제거하기 위해 사분위수 범위법(IQR, Interquartile Range)을 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 센서 설치 방법별 TOC 측정치 비교

측류형과 침적형의 설치 방법에 따른 센서 가동률을 Table 1에 정리하였다. 센서 가동률은 Eq. 1과 같이 수집된 총 데이터(Total data)에 대한 이상치 제거 후 데이터(Valid data)의 비율로 계산하였다. 측류형과 침적형 모두 99% 이상의 양호한 가동률을 보였다.

$$Operating\ ratio = \frac{(Valid\ Data)}{(Total\ Data)} \times 100(\%) \quad (1)$$

데이터 수집 기간 전체에서 측정된 센서값을 Fig. 2에 나타내었다. 측류형(Side-stream)센서의 TOC 평균농도는 34.34 mg/L(범위 24.51~43.68 mg/L)이었고, 침적형(Submerged)센서의 TOC 평균농도는 33.77 mg/L(25.22~45.64 mg/L)로 평균농도는 큰 차이가 없었으나 농도범위는 측류형보다 침적형이 다소 넓게 측정되었다. 특히, 침적형 데이터는 설치 직후부터 일정시점(약 2주)동안 측류형과 비슷한 데이터 분산정도를 보였으나, 시간이 흐름에 따라 측류형에 비해 더 높은 분산을 보였다. 또한 Fig. 2에 나타나듯이 측정데이터가 평균과 멀어지는 이상치 데이터가 측류형에 비해 침적형에서 대부분의 기간에서 발생하는 것을 확인하였다. 이러한 현상은 침적형 센서의 측정 당시 협잡물과 이물질에 의한 방해에 기인한 것

Table 1. Operating ratios of the installed sensors

Type of installation	Total number of data	Number of valid data	Operating ratio (%)
Side-stream	16,123	16,119	99.98
Submerged	16,424	16,419	99.97

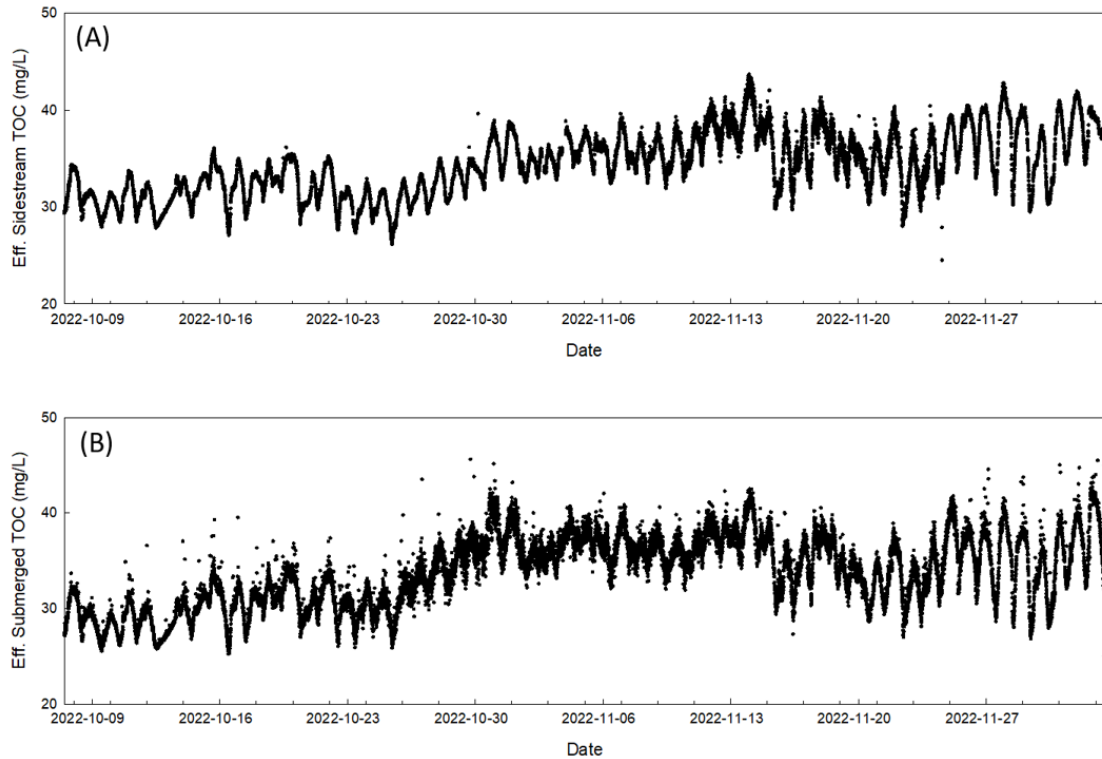


Fig. 2. Comparison of TOC data by (A) a side-stream sensor and (B) a submerged sensor.

으로 판단된다. 실제로 현장 유지보수시 센서 가동시간이 증가함에 따라 센서와 케이블 등 기기 구성요소에 이물질의 정착이 심해지는 것을 확인하였다. 이에 분산이 적고 안정적인 측정경향 분석을 위해서는 측류형을 사용하는 것이 적합하다고 판단된다.

센서별 TOC 측정값에 대한 상관계수(Pearson correlation coefficient)는 Table 2에 정리하였다. 센서별 TOC의 상관계수는 전체기간(10월 7일~12월 3일)동안 0.9057로 나타나 높은 양의 상관관계를 보였다. 주차별 분석에서도 4주차 외의 대부분 기간에서 0.90 이상의 상관계수를 보여 전반적으로 상관성은 높게 유지되었음을 확인할 수 있다. 1주차(0.9881)에서 가장 높은 상관성을 보였으며, 운영시간이 경과됨에 따라 점차

낮아져 4주차(0.8995)에 가장 낮은 상관성을 나타냈다. 4주차 운영 후에 침적형 센서는 세척을 하여 5주차부터 상관계수가 상대적으로 높아진 것으로 판단된다. 측류형 센서는 세척없이 계속 운영하였다. 이러한 결과는 정기적인 센서 세척이 측정 정확도와 신뢰도 확보에 중요한 역할을 한다는 점을 보여주며, 센서 유지관리에서 세척의 중요성을 시사한다.

3.2. 센서 데이터 신뢰성 분석

하수처리시설 운영에 센서를 활용하기 위해서는 센서가 측정한 데이터가 정확하여 운영자나 자동시스템이 수질현황을 판단 및 제어할 수 있어야 한다. TOC 센서의 데이터 측정값 신뢰성을 판단하기 위해 센서 설치 지점에서 물을 채수하여 수질오염공정시험기준(ES 04311.c)에 따라 분석한 TOC 수치와 센서가 측정한 TOC 수치를 비교 분석하였다. 선행연구 결과 측정 알고리즘 보정을 통해 실제 수질분석값과 매우 유사한 값을 측정할 수 있다 [19].

비교분석은 2022년 11월 25일 오전 10시부터 오후 4시까지 20분 간격으로 채수한 시료로 하였고 Fig. 3에 그 결과를 나타내었다. 본 연구에서 수행된 회귀분석 결과, 측류형과 침적형 TOC 센서 간에는 상관관계($R^2 = 0.881$)가 확인되었으며, 이는 두 방식 모두 유입수 내 유기물 변동을 안정적으로 추적할 수 있음을 시사한다. 그러나 산점도의 분포를 살펴보면, 침적형 센서의 측정값이 동일 조건에서 측류형 센서에 비해 다소 낮게 나타나는 경향을 보였다. 전체적으로는 침적형 센서의

Table 2. Pearson correlation coefficients of sensor-based TOC measurements.

Period	Pearson correlation coefficient (r)
Overall	0.9057
Week 1	0.9881
Week 2	0.9540
Week 3	0.9358
Week 4	0.8995
Week 5	0.9246
Week 6	0.9501
Week 7	0.9227
Week 8	0.9278

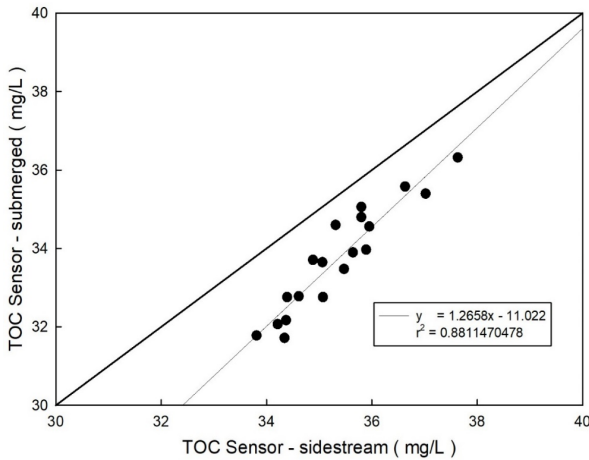


Fig. 3. Correlation between TOC values measured by a side-stream sensor and a submerged sensor.

측정값이 기준선(1:1 line)보다 낮은 위치에서 분포하였다. 침적형 센서와 측류형 센서 측정값의 차이는 수치가 낮을수록 오차가 컸고 다소 높은 범위에서는 오차가 줄어드는 경향을 보였다.

이와 같은 두 센서간 측정값의 차이 경향은 침적형 센서가 공정 흐름 내에 직접 설치되어 있어 협잡물과 미세입자 등의 영향을 많이 받기 때문으로 해석된다. 협잡물은 센서 표면에 부착되거나 주변 유동을 방해함으로써 광학적·전기화학적 신호 감지를 저하시킬 수 있으며, 그 결과 실제 유기물 농도보다 다소 낮은 값이 산출될 가능성이 있다. 반면 측류형 센서는 별도의 수조와 순환 펌프를 통해 상대적으로 균질화된 유입수를 공급받기 때문에 협잡물의 간섭이 최소화되고, 센서 표면의 오염도 또한 상대적으로 적게 발생한다. 이러한 특성은 측류형 센서가 침적형에 비해 장기적인 안정성과 재현성을 확보하는 데 유리함을 보여준다. 따라서 두 방식 모두 모니터링 도구로 활용 가능하나, 데이터의 정확성과 유지관리 효율성을 종합적으로 고려할 때 협잡물 영향을 상대적으로 덜 받는 측류형 방식이 생물학적처리공정 유입부에서 안정적이고 신뢰성 있는 TOC 모니터링에 적합한 대안으로 판단된다.

3.3. 센서 세척 주기 분석

본 연구에 사용한 센서는 브러시를 이용한 자동 세척 기능이 있으나 하수처리시설 유입수 특성상 협잡물 및 이물질이 하천이나 지하수에 비해 많으므로 협잡물이 브러시에 걸리거

나 이물질이 센서 측정부에 부착되어 데이터 수집에 방해로 일으킬 확률이 높다 [20]. 센서를 별도의 장치 없이 측정지점에 직접 설치하는 침적형의 경우 이러한 문제점의 발생 빈도가 측류형에 비해 높으며 측류형의 경우 협잡물 및 이물질의 직접적인 영향은 침적형에 비해 적으나 수조의 세척이 주기적으로 이루어지지 않으면 수조 내부에 협잡물이 침적되어 본래의 수질과 다르게 측정되거나 방해로 받아 정확하지 않은 수질이 측정될 우려가 있다. 따라서 정확한 센서 데이터의 수집을 위해서는 적절한 시기에 주기적으로 센서 및 수조를 세척할 필요가 있다.

센서의 세척주기를 선정하기 위하여 센서 설치 이후 주별로 수집한 측류형 및 침적형 TOC 농도를 **Table 3**에 정리하였다. 본 연구에서 사용한 센서는 광학식센서로 그 측정 정확도가 ±5%이다. 센서의 측정 정확도를 오차범위로 하여 세척 기준으로 적용할 경우 센서 설치 방법에 상관없이 매주 센서 및 수조 세척을 진행해야 하지만 분석 대상이 하수처리시설 생물반응조 유입수라는 점을 감안하여 ±6%(5% + 5%×0.2)의 오차범위를 센서 및 수조 세척 기준으로 선정하였다. 물론 하수 유입수의 TOC 농도가 일간 변화폭이 있어 센서의 오차에 의한 변화라고만 할 수 없지만, 두 센서간 상대적인 세척주기 산정 및 비교를 위해 임의로 오차범위를 정하였다. 오차범위 ±6%를 기준으로 센서 세척 주기를 분석한 결과 측류형의 경우 센서 설치 이후 6주차, 침적형의 경우 2주차부터 ±6% 이상의 값을 보여, 센서를 측류형으로 설치할 경우 5주까지, 침적형으로 설치할 경우 1~2주까지 세척 없이 사용이 가능할 것으로 판단된다. 센서 운영시 측류형은 운영기간 내 세척을 하지 않았으며, 침적형은 4주 운영 후 세척을 한 번 하였다. 센서 세척 외에 운영기간 중 센서장치에 걸린 이물질은 주기적으로 제거해 주었다. 이상을 종합해 볼 때 측류형이 유지·보수 없이 운영 가능한 기간이 침적형보다 길어 유지관리에 용이하며 안정적인 데이터 수집 가능성이 높은 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 하수처리시설 생물반응조 유입수를 대상으로 총 유기탄소(TOC) 모니터링을 수행하여, 침적형과 측류형 센서 설치 방식의 데이터 특성과 유지관리 효율성을 비교·분석하였다. 약 2개월간의 데이터 수집과 분석을 통해 센서 가동률, 측정값 분산, 상관계수, 세척 주기를 종합적으로 평가하였으

Table 3. Mean and standard deviation of TOC values detected over time.

Sensor type	1 st week	2 nd week	3 rd week	4 th week	5 th week	6 th week	7 th week	8 th week
Side-stream (no cleaning)	30.81±1.54 (±5.00%)	32.37±1.81 (±5.59%)	30.94±1.79 (±5.79%)	34.53±1.99 (±5.76%)	35.64±2.04 (±5.72%)	37.27±2.74 (±7.35%)	34.93±2.47 (±7.07%)	38.22±3.02 (±7.90)
Submerged (cleaned once after 4 weeks)	28.67±1.63 (±5.69%)	30.79±1.96 (±6.67%)	31.13±2.10 (±6.75%)	36.36±2.14 (±5.89%)	36.44±1.92 (±5.26%)	36.51±2.66 (±7.29%)	33.77±2.54 (±7.52%)	36.48±3.26 (±8.93%)

며, 이를 통해 센서 설치 방법별 장단점을 도출하였다. 그 결과는 다음과 같이 정리된다.

- 1) TOC 센서의 설치방식(침적형과 측류형)에 따른 데이터 수집율은 99% 이상을 기록하여 설치환경의 영향대비 안정적인 데이터 수집이 가능하였다.
- 2) 침적형 센서의 TOC 값은 운영시간이 증가함에 따라 데이터의 분산이 측류형에 비해 증가하는 경향을 보이므로 이물질에 대한 영향정도가 더 높았다.
- 3) 센서 데이터의 안정성과 신뢰성을 확보하기 위해서는 주기적인 유지관리가 필수적으로 필요하며 침적형 센서는 1~2주 1회 이상, 측류형 센서는 5주 운영 후 1회 이상의 세척 및 점검을 권장한다.
- 4) 하수처리시설에 스마트센서 설치시 측류형이나 침적형 모두 지속적인 데이터 수집을 위해서는 주기적인 유지관리가 필수적이며 초기설치 비용 및 유지관리 요소를 복합적으로 판단하여 적합한 설치방식을 선정하는 것이 필요하다.

Acknowledgement

본 연구는 국가물산업클러스터의 미니클러스터형 프로젝트 사업 지원을 받아 수행되었습니다.

References

1. Korea Ministry of Environment, Statistics of sewerage(2024)
2. Korea Ministry of Environment Web site [Internet]: <http://www.me.go.kr>.
3. Ministry of Environment. Revision of the Government Organization Act for Integrated Water Management and Initiation of Unified Water Management [Press Release]. Korea Ministry of Public Administration and Security Web site; c2018. Available from: <https://www.mois.go.kr>.
4. Lee SH. Global competition. smart water services. *Journal of Water Policy and Economy*. 2015;24:5-14.
5. Lee IK, Choi SH, Jang KE, Choi MS, Song HI, Jin SH, Kim HW. Real-time sensors and model-based optimization for an advanced wastewater treatment process. *J. Korean Soc. Environ. Eng.* 2008;138-141.
6. Park SH, Lee CY, Kim KY, Kim HW, Lee WT. Comparison of COD and TOC in influents and effluents of six industrial wastewater treatment plants in Korea. *Journal of Korean Soc. Environ. Eng.* 2022;44:143-149. <https://doi.org/10.4491/KSEE.2022.44.5.143>.
7. Ministry of Environment. Korean Green New Deal: Full-Scale Implementation of Smart Sewer Systems [Press Release]. Korea Ministry of Public Administration and Security Web site; c2021. Available from: <https://me.go.kr>.
8. Lee YK, Lee SH. A case study of smart water management technology in Korea-based on conceptualization of smart city and smart technology. *Journal of Regional Policies*. 2018;29:149-182.
9. Lee GH, You KT, Choi SC, Kim JR. Development of ensemble model for effluent T-N prediction of WWTP using smart sensor data. *Korean Soc. Civil Eng.* 2020;761-762.
10. Kim YK, Shin GW. Smart system for small-scale sewage treatment plant. *Proceedings of Korean Geo-Environmental Society*. 2021;37-38.
11. Lee JW, Kim YW, Gil KY. A study on operation control: technology required for introduction of intelligent sewage treatment plant. *Journal of Wetlands Research*. 2022;24:38-43. <http://doi.org/10.17663/JWR.2022.24.1.38>.
12. Kim ST, Lim BI, Oh HT, Park KH. An analysis on economic effects of smart sewage pipe. *Journal of Convergence for Information Technology*. 2019;9:78-87. <http://doi.org/10.22156/CS4SMB.2019.9.7.078>.
13. Kim YK, Seo IS, Kim HS, Kim JY. Assessment on economies-environmental affect of smart operation system(sos) in sewage treatment plant. *Journal of Environmental Impact Assessment*. 2013;22:581-589. <http://doi.org/10.14249/eia.2013.22.6.581>.
14. Reza Maleki, Ahmad Miri Jahromi, Ebrahim Ghasemy, Mohammad Khedri. Smart sensing technologies for wastewater treatment plants. *Artificial Intelligence and Data Science in Environmental Sensing*. 2022;1-17. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90508-4.00003-4>.
15. Jeong SH, Kim KT, Jeon DS. Abnormal water quality monitoring based on IoT for smart sewage construction. *The magazine of the Korean society of civil engineers*. 2022;70:34-40.
16. Yoo JM, Jang MS, Woo DS. Trends and future tasks of measurement techniques for water quality monitoring of sewage disposal plants: a review paper. *The Society of Convergence Knowledge Transactions*. 2019;7:103-113. <http://doi.org/10.22716/sckt.2019.7.4.056>.
17. Im DB, Lee JY. Study on improving the legislation for installation and management of smart sewer system. *Chung-Ang Law Review*. 2018;20:47-86. <https://doi.org/10.21759/caulaw.2018.20.2.47>.
18. Bourgeois W, Burgess JE, Stuetz RM. On-line monitoring of wastewater quality: a review. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 2001;76:337-348. <http://doi.org/10.1002/jctb.393>.
19. Hass J, Retter A, Wagner C, Griebler C. High-resolution monitoring of groundwater quality in unconsolidated aquifers using UV-Vis spectrometry. *Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie*. 2023;28:53-66. <https://doi.org/10.1007/s00767-022-00540-3>.
20. Hussain A, Bhattacharya A. "Characteristics of Wastewater." *Advanced Design of Wastewater Treatment Plants: Emerging Research and Opportunities*. IGI Global. 2019;1-28.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing

financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Authors and Contribution Statement

Seungeun Shin

Department of Environmental Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Master, [ORCID](#)[®] 0000-0002-2693-5555: Data curation, data analysis, methodology, visualization, writing - original draft.

Yeonhee Kwon

Department of Environmental Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Master, [ORCID](#)[®] 0009-0002-9158-9748: Data curation, data analysis, methodology, visualization, review and editing.

Changyeon Woo

Department of Environmental Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Ph.D. Candidate, [ORCID](#)[®] 0000-0002-2569-6740: Data curation, data analysis, review and editing.

Wontae Lee

Department of Environmental Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Professor, [ORCID](#)[®] 0000-0001-9660-4455: Project administration, review and editing.