

연구논문

물질수지분석을 이용한 하수처리장 유입수질 측정 센서의 상태 진단

백지원^{1a} · 김종락^{1b} · 유광태^{1c} · 김예진^{2,†}

¹주식회사 유엔유 · ²부산가톨릭대학교 소방방재학과

Sensor State Isolation for Wastewater Based on Influent Characteristics Methodology

Baek Jiwon^{1a} · Kim Jongrack^{1b} · You Kwangtae^{1c} · Kim Yejin^{2,†}

¹UnU Inc. · ²Department of Fire and Disaster Prevention, Catholic University of Pusan

(Received 29 February 2024, Revised 5 June 2024, Accepted 20 June 2024)

Abstract

Wastewater treatment plants are constantly exposed to influent wastewater that is constantly changing. This poses a major challenge to the operation of the plants. It is crucial to have a rapid and accurate measurement of the influent concentrations of wastewater in order to maintain and optimize treatment performance, as well as to develop energy-saving strategies. While laboratory measurements provide the highest accuracy in determining influent water quality, they are inevitably time-consuming procedures. In order to cope with the ongoing disturbances from wastewater influent, absorption-based optical measuring instruments have been developed. These instruments can detect the influent water quality in a short amount of time, improving their practicality and reliability. However, when these optical measuring instruments malfunction, the accuracy of the measured values decreases, leading to unreasonable operation of the treatment plant. This paper proposes a method for detecting anomalies in optical water quality measurement devices. The Harmony Search algorithm is used to validate the measured water quality values and detect abnormalities such as contamination or physical anomalies in the measurement apparatus. To assess the performance of the developed algorithm in detecting anomalies, validation was conducted by installing it in a field-scale wastewater treatment plant. The results consistently showed that the developed fault detection method for optical water quality measurements equipment provided acceptable results for normal, temporary abnormal, and long-term abnormal conditions.

Key words : Fault detection, Harmony search algorithm, Influent characteristics, Optical measurement sensor, Wastewater treatment

^{1a} 책임(Senior Engineer), jwbaek.unu@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4407-6085>

^{1b} 수석(Principal Engineer), jrkim.unu@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5163-6146>

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

² Corresponding author, 교수(Professor), yjkim@cup.ac.kr, <https://orcid.org/0000-0002-9523-1009>

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 처리성능에 영향을 미치는 주요한 공정 외적 인자는 주로 수온, 독성물질의 유입, 유입수의 C/N비 등이 거론된다. 하수처리시설의 처리성능 평가는 방류수질 기준으로 수행되고 있는데, 방류수질 변동의 원인은 단위공정의 운전조건의 변경이나, 앞서 언급한 공정 외적 인자에 의하는데, 그 중 가장 결정적인 인자는 유입수의 변동이다. 수처리공정의 안정적 운영 및 공정 효율의 모니터링 및 분석을 통해 F/M비 등의 주요 운전조건을 개선하는 등의 조치를 취하기 위해서는 유입수의 성상을 빠르게 감지하여 공정 성능을 분석하는 것이 중요하다(Kim et al., 2016; Kim et al., 2009).

유입수의 성상을 알아내기 위한 실험실 분석은 필연적으로 많은 시간을 요하여 하루에 1회 정도 수행되는 것이 일반적이며, 이를 바탕으로 한 하수처리시설의 성능 유지를 위한 제어 조치는 시간적으로 효율적이지 않다. 이에, Kim et al. (2016)은 데이터 기반 모델링 기법 중 하나인 최근린법을 활용하여 과거의 유입수로부터 하루 혹은 향후 며칠간의 유입수 유량과 수질을 예측하였고, Golzar et al. (2020)은 인공신경망(Artificial Neural Network, ANN)과 몬테카를로 기반 민감도 분석 기법을 활용하여 미래의 수온을 예측하기도 하였다. 그러나 이들 연구는 기본적으로 불확실성을 배제할 수 없는 예측 모델에 의존하고 있다는 단점이 있다.

불확실성을 배제하기 어려운 모델과 시간이 많이 소요되는 실험적 분석의 단점을 극복하기 위해, 실시간으로 유입수 수질을 측정할 수 있는 측정장비 또는 센서의 개발이 진행되어 왔다. 그러나, 다양한 물질들이 존재하는 하수나 폐수에서 정확하게 하나의 수질항목의 농도를 측정하기란 쉽지 않다. 또한, 방류수질 측정에 사용되는 분석기기를 부유물질 농도가 높은 수질 측정에 적용하는 것 또한 배관 막힘, 이물질에 의한 간섭과 파손 등의 잦은 기기 고장의 발생 우려가 있다. 이러한 문제를 해결하고 실시간으로 유입수 수질을 측정할 수 있는 해외 센서의 도입 및 국내 센서 개발이 진행되었다. 특히, 분광광도법을 이용하여 하·폐수의 성상을 모니터링하는 제품은 다양한 물질들이 전자기 스펙트럼의 고유한 파장 영역대를 흡수한다는 원리를 적용한 것으로, 고형물질, 유기물질, 질소 성분 등이 흡수되는 파장 범위가 분리되어 존재하며, 흡수된 파장의 분석을 통해 해당 물질들의 농도를 정량한다.

광학식 센서는 실시간 수질 자동 측정장치에 비해 측정시간이 짧고, 재료가 저렴하여 경제적이며, 유지관리 비용이 저렴하다는 이점을 가지고 있다(Kumar et al., 2024). 반면에, 하·폐수의 수질을 측정하는 경우 쉽게 오염될 수 있어 측정값의 오차가 자주 발생하는 단점을 가지고 있다. 따라서 광학식 센서를 하·폐수 처리 현장에 안정적으로 적용하기 위해선 적절한 유지관리가 항상 요구된다. 광학식 센서의 유지관리는 브러쉬세정, 공기세정, 초음파세정 등 자동세척 방법으로 일부 오염물질을 제거할 수 있으나, 효과적으로 오염물질을 제거하기 위해서는 사람에 의한 수동세척을 정기적으로

수행해야 한다. 이때, 센서의 측정값으로부터 오염상태를 감지할 수 있다면 빠른 조치를 위해 비정상자료의 측정을 최소화할 수 있으며, 정상자료의 확보는 공정의 안정적 운영 계획을 수립하는데 매우 중요하다.

대부분의 비정상 상태 감지는 주로 측정된 값이 유효하지 않은 값, 즉 이상치인지를 알아보는 과정이 우선되는데, 이는 누적된 측정값으로부터 도출되는 정규분포의 평균값으로부터 표준편차의 3배 구간을 ($\mu \pm 3\sigma$) 벗어나는 경우를 이상치라고 판단하는 방법이 가장 일반적이다(Wheeler and Poling, 1998). 그러나 본 연구는 이상치 판정 단계를 거치고 난 후의 값이 계측기가 오염, 파손 등의 비정상 상태에서 얻어졌는지를 감지하기 위한 것이다. 유입수질 및 유출수질을 포함한 하수처리시설의 각종 변수들은 실시간으로 매우 다양하게 변화하므로, 값의 변동이 비정상적인 계측에 의한 것인지 상태의 변화에 의한 것인지 판독하기 어렵다. 따라서, 항상 변화하는 값을 측정하는 계측기의 비정상을 판단하기 위해서는 한 개 이상의 다른 계측기의 값을 함께 통계적으로 분석하여 판단의 근거를 삼기도 한다(Jin et al., 2019; Mehranbod et al., 2005; Wang et al., 2022).

광학식 센서의 측정부가 오염되면 센서가 측정하는 다수의 파장 중 일부 파장의 값이 왜곡된 값을 가지며, 이로 인해 일부 수질 항목의 계산치에도 왜곡이 발생한다. 이러한 계산치의 왜곡을 감지해 낼 수 있다면, 센서의 오염 유무를 실시간으로 진단하기 위한 근거자료로 활용할 수 있을 것이다. 본 연구에서는, 유입 수질이 변동하는 조건에서 계측기의 오염이나 파손 등과 같은 센서의 비정상상태를 진단할 수 있는 방안으로서, 센서에서 측정된 유기물, 질소, 인, 부유물질 농도의 물질수지분석으로 통해 센서의 이상상태를 진단하는 방법을 제시하고자 하였다.

2. Materials and Methods

2.1 광학식 수질측정 센서의 설치 및 데이터수집

축산폐수 및 음폐수(음식물류 폐기물에서 발생하는 폐수)가 함께 처리되는 처리용량 20,000 m³/일 Y하수처리장 스크린 후단에 본 연구에서 활용한 광학식 수질측정 센서(스마트 센서 UV-06, (주)유엔유)를 설치하였다(Fig. 1). 설치된 센서는 UV 및 IR 대역 파장값, EC(전기전도도), 수온 데이터를 사용하여 유기물(TCOD), 질소(T-N), 인(T-P), 부유물질(TSS) 농도를 동시에 측정할 수 있는 측정장치이다.

광학식 수질측정 센서는 TCOD, T-N, T-P, TSS 네 항목을 초 단위로 측정하며, 데이터로거에서 분석된 센서 상태정보와 함께 원시 자료(raw data)를 전송하였으며, 1분 간격으로 데이터베이스에 측정값을 저장하였다. 수집된 분 단위 데이터는 시간 평균값으로 계산한 후 이를 매시간 유입수 성상분석을 수행하는 데 사용하였다.

본 연구에 사용된 자료는 2023년 1월 2일부터 11월 17일 사이 측정된 시간 평균값을 사용하였으며, 분 단위 데이터가 Table 1에 제시된 범위에 벗어난 값은 이상치(outlier)로 판단하고 시간 평균값 생성시 이를 제외하였다. 각 수질항목의

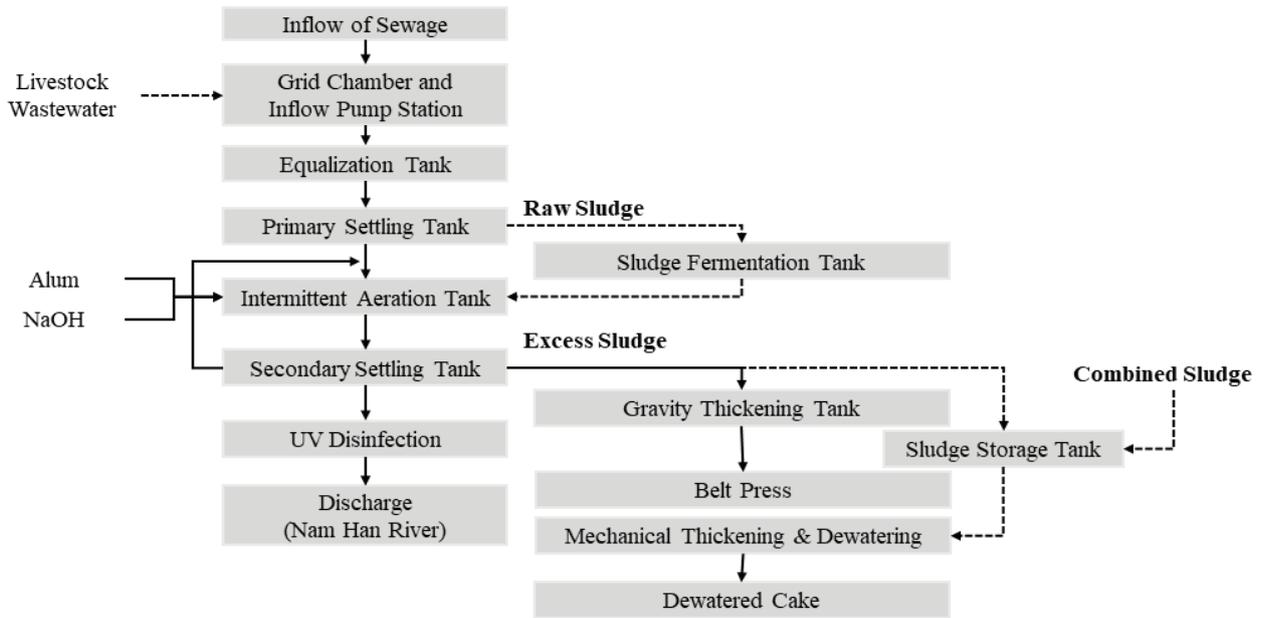


Fig. 1. Process diagram of Y wastewater treatment plant

Table 1. Range of normal values of water quality.

	TCOD	T-N	T-P	TSS
min	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001
max	-	120	20	1500

최대값은 2023년 1월 2일 이전 측정된 각 수질 항목의 최대 값을 고려하여 설정하였고, 최소값은 장비 점검 등의 상황에서 발생하는 0의 값을 제외하기 위해 작은 실수 값을 설정하였다.

2.2 유입수 성상분석 (Influent characterization)을 활용한 센서 비정상 감지

국제물학회(International Water Association, IWA)에서 발표된 활성슬러지모델 중 ASM2d (Activated Sludge Model No. 2d, Henze et al., 2006)는 하수처리공정 설계 및 최적 운영을 목적으로 널리 사용되는 하수처리공정 시뮬레이션 모델이다. ASM2d에서 정의하는 모델 상태변수(미생물 농도 혹은 유기성 물질, 질소 성분의 농도 등을 의미함)는 하수처리공정모델의 기본 요소로서 18개의 변수로 구성되며, 기호 S는 용존성, X는 입자성 물질을 의미한다(Table 2). TCOD,

T-N, T-P, TSS 수질 항목은 ASM2d의 상태변수들을 조합하여 계산될 수 있는 합성변수이다. 따라서 상태변수로부터 계산된 합성변수들은 상호 물질수지(Mass Balance) 관계를 가지며, 하나의 수질항목이 다른 수질항목에 비해 상대적으로 매우 크거나 작은 값을 가질 수 없다.

Table 2는 ASM2d의 상태변수들을 사용하여 합성변수를 계산하는 수식을 제시하고 있다. TCOD는 $S_F, S_A, S_I, X_S, X_I, X_H, X_{AUT}, X_{PAO}, X_{PHA}, X_{PP}$ 의 합으로 계산(Eq(1))되며, TSS, T-N, T-P는 Eq(2, 3, 4)에 제시된 바와 같이 상태변수와 이와 관련된 화학양론계수(Table 3) 곱의 합으로 계산된다. T-N 및 T-P 또한 아래 Eq(3)과 Eq(4)와 같이 계산된다. 일반적으로, 유입 하수에 존재하지 않는 용존 산소(S_{O_2}), 질소 가스(S_{N_2}), 미생물 관련 성분($X_H, X_{AUT}, X_{PAO}, X_{PHA}, X_{PP}$), 인 침전 관련 성분(X_{MeOH}, X_{MeP})의 상태변수 값은 0으로 가정되므로, 본 연구에서도 동일하게 적용하였다.

$$TCOD = S_F + S_A + S_I + X_S + X_I + X_H + X_{AUT} + X_{PAO} + X_{PHA} + X_{PP} \tag{Eq(1)}$$

$$TSS = i_{TSS, X_B} * (X_H + X_{AUT} + X_{PAO}) + i_{TSS, X_S} * X_S + i_{TSS, X_I} * X_I + i_{TSS, X_{PHA}} * X_{PHA} + i_{TSS, X_{PP}} * X_{PP} \tag{Eq(2)}$$

$$TN = S_{NO_3} + i_{N, S_F} * S_F + i_{N, S_I} * S_I + i_{N, X_B} * (X_H + X_{AUT} + X_{PAO}) + i_{N, X_S} * X_S + i_{N, X_I} * X_I + S_{NO_3} \tag{Eq(3)}$$

$$TP = S_{PO_4} + i_{P, S_F} * S_F + i_{P, S_I} * S_I + i_{P, X_B} * (X_H + X_{AUT} + X_{PAO}) + i_{P, X_S} * X_S + i_{P, X_I} * X_I \tag{Eq(4)}$$

Table 2. State variables of activated sludge model No.2d.

Symbol	Description	Unit	Symbol	Description	Unit
S _F	Fermentable organic matter	gCOD/m ³	S _{PO4}	Soluble inorganic phosphorus	gP/m ³
S _A	Fermentation product (Volatil Fatty Acids)	gCOD/m ³	X _H	Ordinary heterotrophic organisms	gCOD/m ³
S _I	Soluble undegradable organics	gCOD/m ³	X _{AUT}	Autotrophic nitrifying organisms (NH ₄ to NO ₃ ⁻)	gCOD/m ³
S _{O2}	Dissolved oxygen	gCOD/m ³	X _{PAO}	Phosphorus accumulating organisms	gCOD/m ³
X _S	Particulate biodegradable organics	gCOD/m ³	X _{PHA}	Storage compound in PAOs	gCOD/m ³
X _I	Particulate undegradable organics	gCOD/m ³	X _{PP}	Stored polyphosphates in PAOs	gP/m ³
S _{NH4}	Ammonium and ammonia nitrogen (NH ₄ + NH ₃)	gN/m ³	X _{MeOH}	Metal hydroxide compounds	gTSS/m ³
S _{NO3}	Nitrate and nitrite (NO ₃ + NO ₂) (considered to be NO ₃ only for stoichiometry)	gN/m ³	X _{MeP}	Metal phosphate compounds	gTSS/m ³
S _{N2}	Dissolved nitrogen gas	gN/m ³	S _{ALK}	Alkalinity (HCO ₃ ⁻)	mol HCO ₃ ⁻ /m ³

Table 3. The stoichiometric coefficients used to calculate the composite variables.

Parameters	Values	Parameters	Values	Parameters	Values
i_{TSS, X_B}	0.9	i_{N, S_I}	0.01	i_{P, S_I}	0
i_{TSS, X_I}	0.75	i_{N, S_F}	0.03	i_{P, S_F}	0.01
i_{TSS, X_S}	0.75	i_{N, X_B}	0.07	i_{P, X_B}	0.014
$i_{TSS, X_{PMOPP}}$	3.23	i_{N, X_I}	0.02	i_{P, X_I}	0.01
$i_{TSS, X_{PALPHA}}$	0.6	i_{N, X_S}	0.04	i_{P, X_S}	0.01

본 연구에서 유입수 정상분석 (Influent characterization)을 활용한 센서 비정상 감지를 위해 3단계의 분석을 수행하였다. 1단계에서는 측정된 TCOD, T-N, T-P 합성변수를 상태변수로 분해하고, 2단계에서는 분해된 상태변수값을 다시 합성변수로 계산하고, 3단계에서는 측정된 1단계 합성변수와 계산된 2단계 합성변수의 차이가 일정 범위 이내를 벗어난 경우, 물질수지가 맞지 않지 않는 센서 비정상상태로 판단하였다. 1단계의 합성변수를 상태변수로 분해하는 과정을 유입

수 정상분석(Influent Characterization)이라고 하며, 이와 관련된 다양한 방법이 제시되어 왔다(Choi et al., 2005; Henze et al., 2006; Lu et al., 2010). 본 연구에서는 Fig. 2에 제시한 하모니서치 알고리즘(Harmony Search Algorithm)(You et al., 2018)을 이용하여 유입수 정상분석을 수행하였으며, 일반적인 도시 하수 특성(You, 2020)을 고려하여 유기물, 질소, 인의 합성변수와 각 상태변수의 분율 범위를 Table 4와 같이 설정하였다.

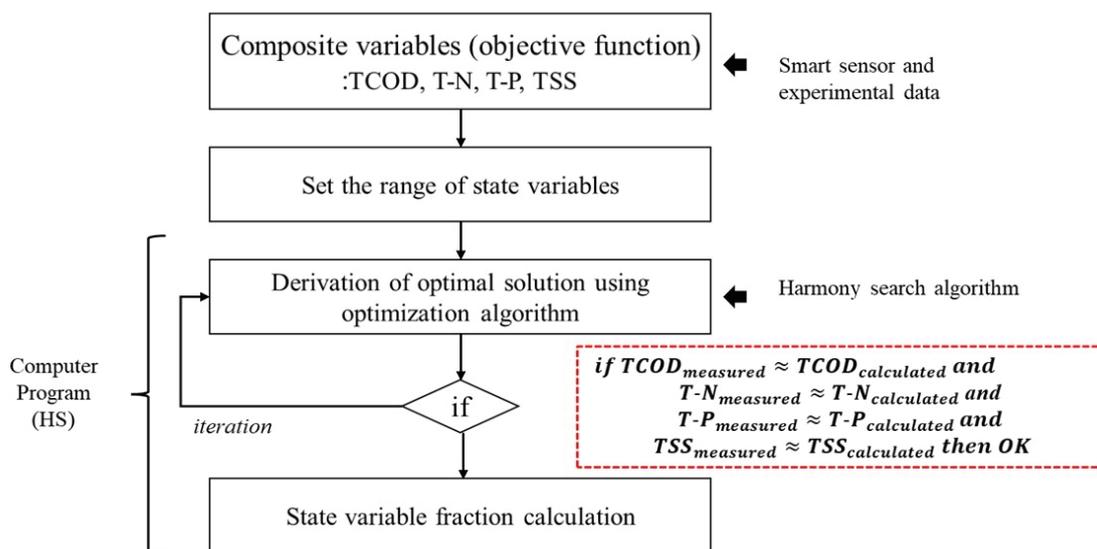


Fig. 2. Influent characteristics procedure using Harmony Search Algorithm.

Table 4. Search ranges of the ratio of state variables and water quality.

	S _F /TCOD	S _I /TCOD	X _I /TCOD	S _A /TCOD	S _{NH4} /T-N	S _{PO4} /T-P
max	0.8	0.50	0.30	0.50	1.0	0.945
min	0.18	0.00	0.00	0.00	0.4	0.00

하모니서치(Harmony Search, HS) 알고리즘은 음악가들이 즉흥적인 연주를 통해 음악을 개선하는 과정을 모방하여 개발된 최적화 알고리즘(Geem, 2009; Geem et al., 2001)으로, 탐색하고자하는 매개변수들의 우수한 후보 해(하모니)들을 저장소(Harmony Memory)에 기록하고, 특정 후보 해를 변경하여 생성된 새로운 해(하모니)를 평가하여 목적함수값이 가장 좋은 해를 단계적으로 찾는 과정을 반복하여 최적의 해를 도출하는 탐색 기법이다(Kim et al., 2018; Lee et al., 2016; Nasir et al., 2021; Yoo, Lee et al., 2018).

2.3 센서의 비정상 상태 진단

광학식 수질측정 센서의 측정부에 오염이 발생하거나 내부 오류가 발생할 경우, 측정되는 수질 농도로부터 이러한 비정상적인 상태를 진단하고자 하였다. 실제 수질 농도가 증가 또는 감소할 경우 유기물, 질소, 인, 부유물질은 일정한 관계를 가지고 동시에 증가 또는 감소하게 된다. 하지만 센서가 비정상 상태일 경우에는 일부 합성변수는 증가하고, 나머지는 감소하는 비정상적인 관계를 나타내었으며, 예로 측정부 오염 발생시 TSS와 TCOD는 크게 변하고, T-N, T-P는 상대적으로 크게 변화하지 않는 경향이 있었다. 본 연구에서는 TCOD에 대한 S_F, S_I, X_I, S_A의 분율 4개, T-P를 구성하는 S_{PO4} 분율 1개, T-N에 대한 S_{NH4} 분율 1개를 추정할 목표변수로 설정하고, 초기값을 부여한 후, 센서로부터 측정된 TCOD, T-N, T-P값에 각 분율을 적용하여 상태변수를 계산하였다. 계산된 상태변수로부터 합성변수 TCOD, T-N, T-P, TSS를 계산하고, 측정된 합성변수와의 오차를 계산(Eq(5))한다.

$$\text{오차(\%)} = \frac{\text{측정값} - \text{계산값}}{\text{측정값}} \times 100 \quad \text{Eq(5)}$$

하모니서치 알고리즘은 각 합성변수의 오차가 모두 5% 이내가 될 때까지 6개 매개변수를 변경하면서 최적해를 찾도록 하였다. 오차가 한 항목 이상이라도 5% 이상이면 센서

측정값이 유효하지 않은 것으로 판단하였다. 이후 센서의 비정상상태의 원인을 분석하고자 하였으며, 이는 센서 측정항목별(TCOD, T-N, T-P, TSS)로 측정값의 10%부터 200%까지 10%씩 값을 증가시키며 유입성상분석을 실시하였다. 변경된 항목별 농도에서 유입성상분석이 정상적으로 수행되면, 이를 정상적인 수질로 판단하고 현재 측정값과 비교하여 측정값이 실제보다 다소 높거나 낮게 측정되고 있음을 판단하였다. 만약 TSS 농도가 낮은 경우 성상분석이 정상적으로 수행된다면, 측정된 TSS는 실제보다 높은 농도이므로, 측정부의 일시적 오염이 원인일 수 있다. 하지만 네 항목 모두 변경된 농도로 정상적인 유입성상분석을 수행하지 못한 경우에는 센서의 기기 고장 원인으로 추정하여 즉시 점검을 해야하는 조건을 판단할 수 있다.

3. Results and Discussion

하수처리시설에서 측정된 센서 데이터 분석 결과, 정상인 경우와 비정상인 경우로 나누어 분석 결과를 설명하고, 테스트베드 운전기간 중 센서 진단 결과를 기술하였다.

3.1 센서 정상상태

다음은 센서가 정상적으로 측정을 수행하고 있는 기간 중 2023년 2월 9일 0시 데이터로, Table 5는 하모니서치 알고리즘을 통해 얻어진 상태변수들을 제시하고 있다. TCOD, T-N, T-P, TSS 수질 항목의 센서 측정값과 상태변수 조합으로 계산된 값의 오차가 모두 0.1% 이하인 것으로 나타나(Table 6), 센서의 측정값이 정상적인 자료인 것으로 판단되었다.

이후, TCOD, T-N, T-P, TSS 농도를 측정값의 10%부터 200%까지 10%씩 증가시키며 구한 값으로 수행한 유입수 성상분석 결과를 Fig. 3과 같이 표시하였다. x축은 항목별 농도이며, y축은 각 수질농도에서 유입성상분석 결과 정상(1), 비정상(0) 상태를 나타낸 것이다. 파란색 점은 분석에 사용된 값, 빨간색점은 측정값을 나타낸다. 분석결과 TCOD 203 mg/L

Table 5. The values of the state variables from the influent characteristics based on HSA.

State variable	S _F	S _A	S _I	X _S	X _I	S _{NH4}	S _{NO3}	S _{PO4}
Values [mg/L]	84.9	19.7	27.0	119.0	39.7	32.3	0.0	1.0

Table 6. The measured and estimated values of the normal case (2023-02-09 00:00:00).

Items	TCOD	T-N	T-P	TSS
Measured by sensor [mg/L]	290.0	40.7	3.39	119.0
Calculated by HSA [mg/L]	290.3	40.7	3.39	119.0
Error (%)	0.1	0.1	0.1	0.0

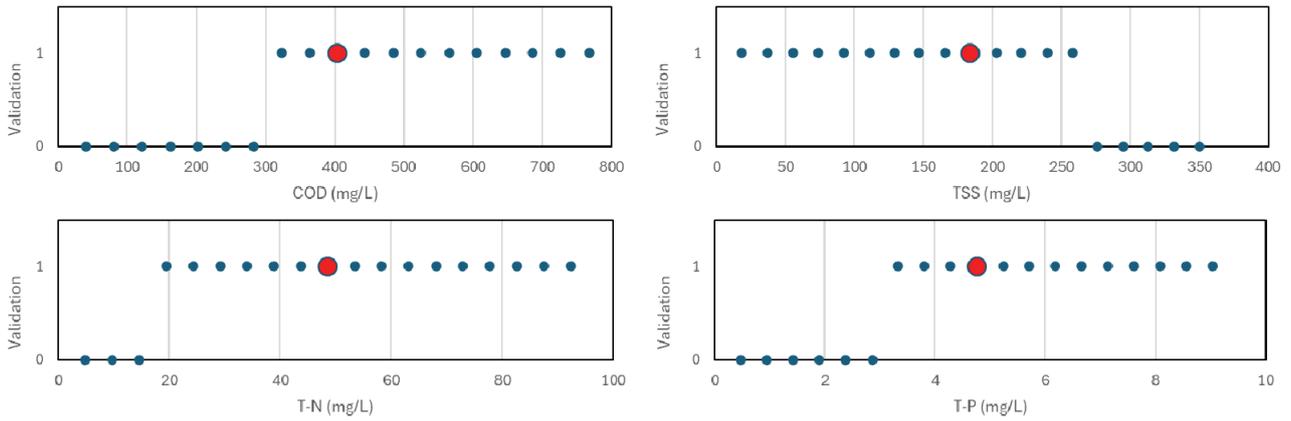


Fig. 3. Valid results for the concentration ranges for the normal state.

이상, TSS 179 mg/L 미만, T-N 12.2 mg/L 이상, T-P 2.37 mg/L 이상에서 신뢰할 수 있는 오차범위를 보였으며, 측정값이 모두 이 범위에 해당하여 최종적으로 신뢰할 수 있다는, 즉 센서가 정상이라는 판단을 할 수 있었다.

3.2 센서 비정상상태

다음은 유입성상분석이 정상적으로 수행되지 않은 기간 중 2023년 5월 4일 10시 데이터로, 센서 측정값을 유입성상분석적으로 계산된 모델 상태변수의 값은 Table 7과 같으며 Eq(1)부터 (4)로부터 계산한 합성변수 값은 Table 8 에 제시

된 계산값과 같다. T-P의 측정값과 계산값의 오차는 15.5%로 5% 기준을 초과하여 측정 데이터가 유효하지 않으며, 센서는 비정상상태인 것으로 판단할 수 있다.

TCOD, T-N, T-P, TSS 농도를 하나씩 측정값의 10%부터 200%까지 변경하면서 유입성상분석을 한 결과 Fig. 4와 같은 결과를 얻었다.

TCOD, T-N은 농도를 바꾸어 유입성상분석을 하여도 정상적인 유입성상분석 결과를 얻을 수 없었다. 이는 상태변수 조합으로 각 합성변수를 계산할 수 없는 조건으로 물질수지 관계가 맞지 않음을 나타낸다. TSS농도는 261 mg/L 이하 농

Table 7. Characterized state variables using contaminated sensor data (excluding zero-value items)

State variable	S _F	S _A	S _I	X _S	X _I	S _{NH4}	S _{NO3}	S _{PO4}
Values [mg/L]	150.0	126.0	70.2	322.0	165.0	20.0	0.0	0.0

Table 8. Measured and calculated data of contaminated sensor data (2023-05-04 10:00:00)

Items	TCOD	T-N	T-P	TSS
Measured by sensor [mg/L]	833.0	41.4	5.72	380.0
Calculated by HSA [mg/L]	833.2	41.4	6.37	365.3
Error (%)	0.0%	0.0%	11.4%	3.9%

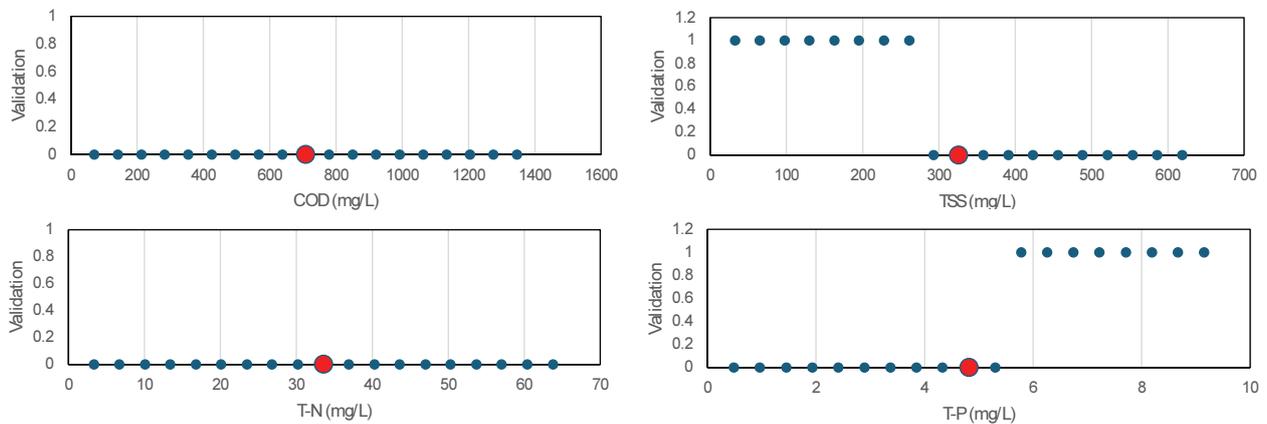


Fig. 4. Invalid results for the concentration ranges for the abnormal state.

도에서 유효한 물질수지 관계를 나타내었고, 261 mg/L보다 큰 농도에서 유효하지 않은 결과가 나왔다. 현재 측정값 380 mg/L는 정상범위보다 높은 값에 해당한다. T-P도 동일하게 분석할 경우 측정값 5.72 mg/L은 정상범위(5.78 mg/L 이상)보다 낮은 값에 해당된다. 해당 센서 데이터는 TSS 농도가 실제보다 높거나 T-P 농도가 실제보다 낮은 농도로 측정되는 상태라고 판단되므로, 실제 시료를 수질분석한 후 센서 보정을 하면 해당 문제를 해결할 수 있을 것이다.

3.3 테스트베드 적용 센서 진단 결과

테스트베드에 설치된 스마트센서 데이터를 사용하여 센서 진단한 결과를 3개의 특징으로 구분하여 설명하고자 한다. 정상상태, 오염상태, 유효하지 않은 값이 빈번하게 발생하는 구간의 세 가지 경우를 통해 확인하였다.

Case 1. 정상 상태

센서가 정상 상태로 운영되는 기간의 운영 데이터를 Fig. 5에 표시하였다. Fig. 5(a)에서는 약 8시간 주기로 측정값이 변동하는 규칙적인 변화를 보이고 있고 Fig. 5(b)에서는 유입 정상분석결과 상태변수에 의해 계산된 합성변수의 물질수지가 정상적인 것으로 계산되어 센서 측정값이 모두 정상적인

것으로 나타났으며, 1년간 과거 운전자료를 기반으로 판단하였을 때 수질항목별 측정값이 정상적인 것으로 판단하였다.

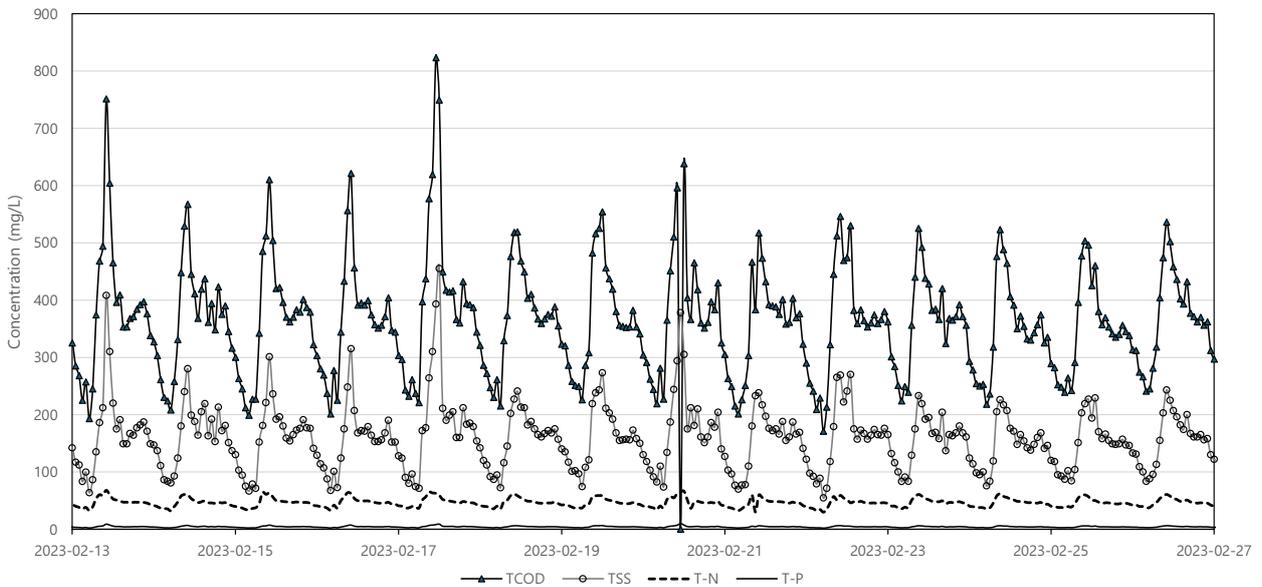
Case 2. 장기간 비정상 상태

센서 상태가 장기간 비정상적으로 분석된 기간을 Fig. 6에 표시하였다. 센서가 정상 상태일 때 TCOD 농도가 500 mg/L 미만을 유지하다가 급격히 2,500 mg/L까지 상승하였다. Fig. 6(a)에서 보면, TCOD 농도가 상승하기 1시간 전에 물질수지 분석결과가 비정상적임을 알 수 있다.

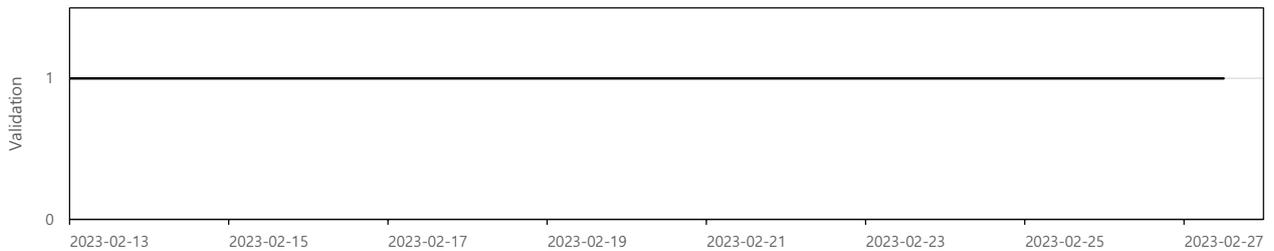
Fig. 6(b)에서는 유입정상분석을 통한 센서 진단결과 유효한 구간이 관찰되지 않았다. 이와 같이 본 연구에서 제시하는 알고리즘의 구동 과정에서, 모든 항목의 물질수지 관계가 비정상이라는 결과가 지속되면 센서를 점검하여 측정단계에서 발생된 문제를 조치하여야 한다. Fig. 7은 비정상 구간의 항목별 측정값 변동 후 유입수 정상분석 결과를 표시한 것으로 모든 항목이 정상인 구간을 찾을 수 없었다.

Case 3. 일시적 비정상 상태

Fig. 8은 센서 비정상상태가 짧은 시간 동안 반복하여 발생하는 것을 보여주고 있다. Fig. 8(a)를 보면 센서 측정값이 일반적인 농도 범위 안에 포함되는 것처럼 보이지만,

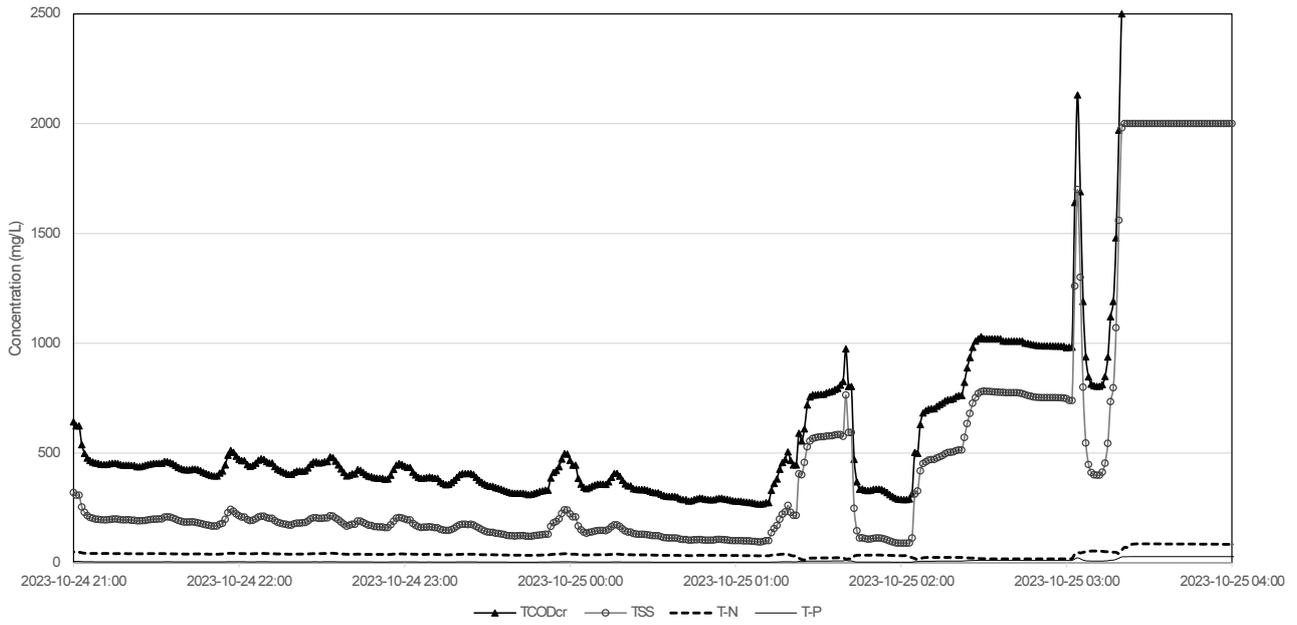


(a) Time data by parameters

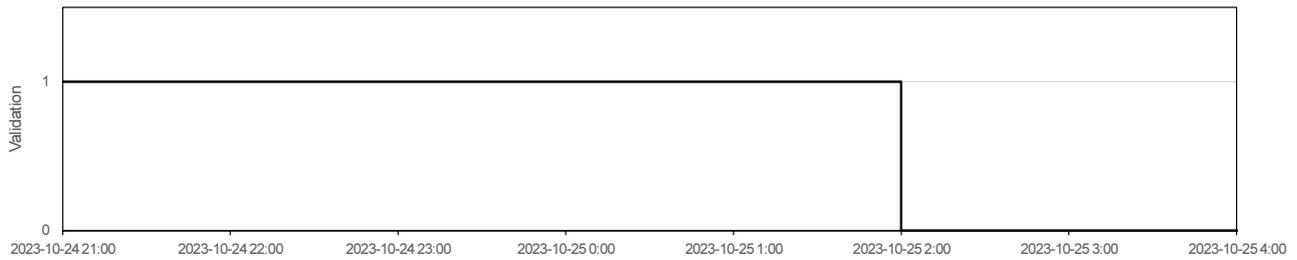


(b) Sensor diagnosis results based on influent characteristics analysis(0: polluted, 1: normal)

Fig. 5. State detection results at the normal state.



(a) Time data by parameters



(b) Sensor diagnosis results based on influent characteristics analysis (0: polluted, 1: normal)

Fig. 6. State detection results at the abnormal state of the polluted part.

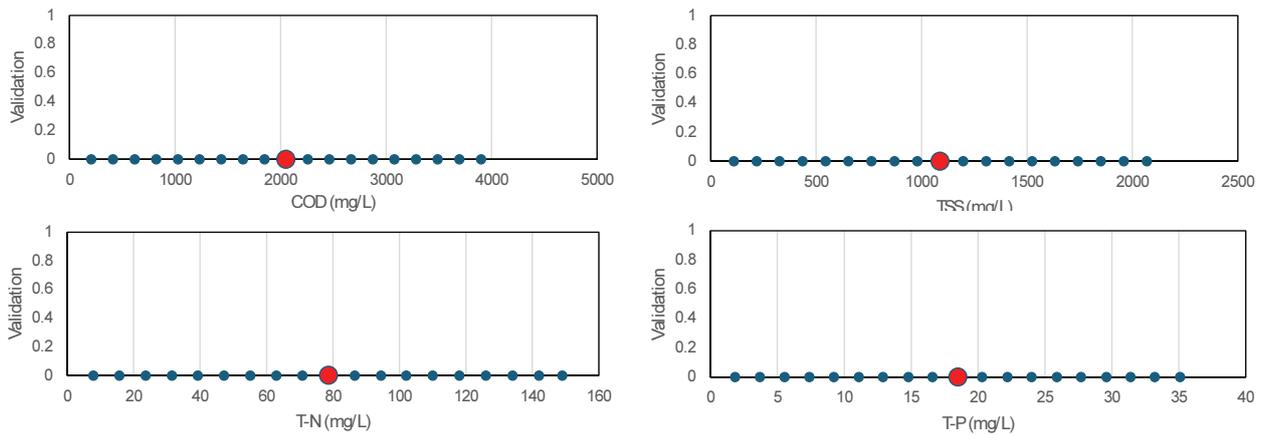


Fig. 7. Invalid results for the concentration ranges for the abnormal state of the polluted part.

Fig. 8(b)에서 비정상적인 센서 상태가 발생되고 있다. 이러한 경우의 데이터를 네 항목별로 10%~200%까지 값을 변동하여 분석하면 Fig. 9에서와 같이 TSS는 유효한 농도 범위보다 높게 측정되고, T-P는 유효한 농도 범위보다 낮게 측정된 것으로 나타났다. 하지만 센서의 비정상 상태는 몇 시간 후

정상 상태로 변경되었고, 이는 비정상 상태의 원인 측정부 이물질 부착 등 일시적 현상으로 발생한다고 추정할 수 있다. 만약 이러한 현상이 CASE2와 같이 장기간 지속되면 센서를 점검해야 할 것이다.

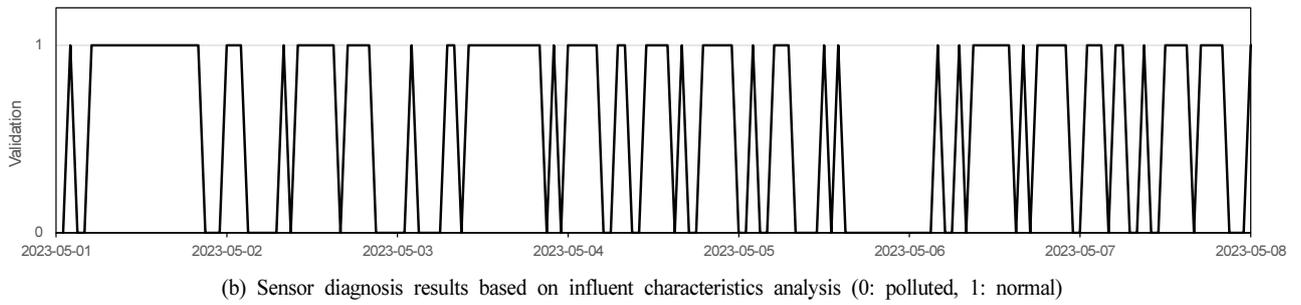
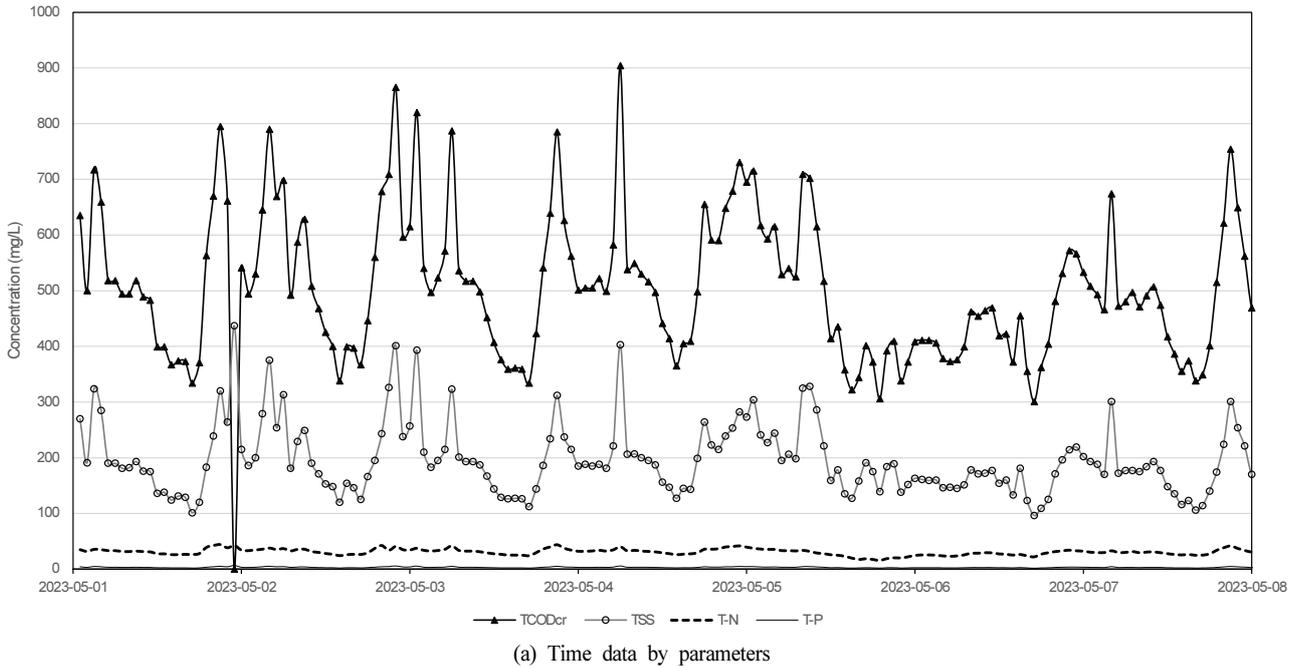


Fig. 8. State detection results at the discreted abnormal states.

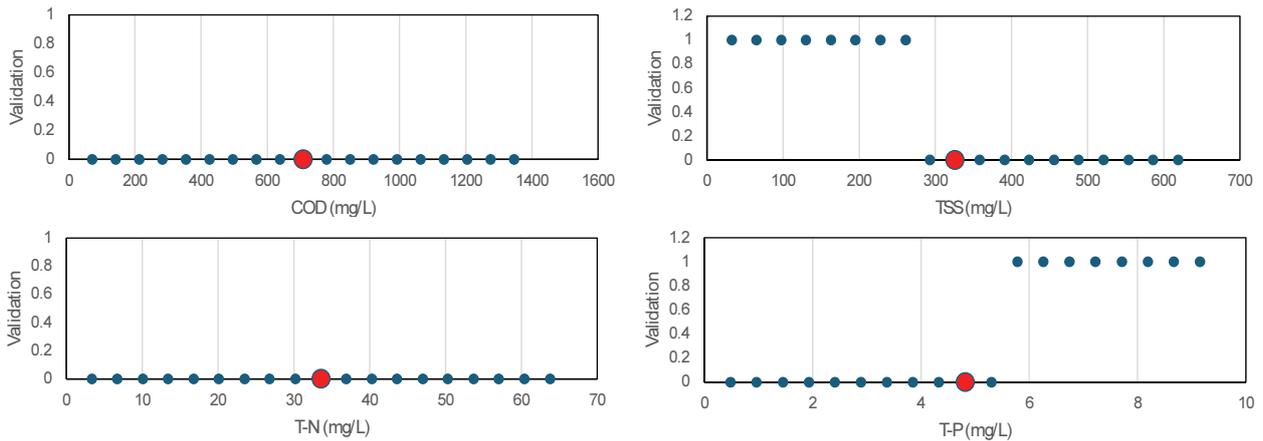


Fig. 9. Invalid results for the concentration ranges for the discreted abnormal states.

CASE1과 CASE3 비교

앞서 언급한 바와 같이, CASE1과 CASE 3의 측정데이터와 측정값의 통계량을 비교하면 CASE3의 경우 측정된 농도 값은 CASE1과 유사하게 데이터가 변동하고 있는 것으로 보인다(Table 9).

사분위수 범위는 CASE1에서 TCOD 125.9 mg/L, TSS 69.1 mg/L CASE3에서 TCOD 107.9 mg/L, TSS 71.8 mg/L로 유사하였다. CASE1, CASE3의 TSS/TCOD의 평균 비교를 통해 두 기간의 데이터 특징을 검토하고자 하였다. 정상 분석 결과가 유효한 데이터의 TSS/TCOD 평균은 0.44 ± 0.041 ,

Table 9. Comparison of the concentrations between CASE1 and CASE3.

Items	CASE1		CASE3	
	TCOD [mg/L]	TSS [mg/L]	TCOD [mg/L]	TSS [mg/L]
Q1	288.5	117.7	385.2	171.5
Q2(median)	360.2	156.9	429.4	197.6
Q3	414.4	186.8	493.1	243.3
Q3-Q1	125.9	69.1	107.9	71.8

Table 10. Statistics and F-Test results of the data from valid and invalid case.

Items	Valid data set	Invalid data set
number of data	165	200
mean±standard deviation	0.44±0.041	0.64±0.041
p-value of F-test	0.47	
t-test p-value	1.1×10 ⁻¹⁵³	

유효하지 않은 데이터의 TSS/TCOD 평균은 0.64±0.041 로 유효하지 않은 데이터의 TSS/TCOD 비율이 높은 경우 유입 정상분석이 제대로 이루어지지 않는 것을 알 수 있다. 두 가지 경우에 대한 F-검정 수행 결과 p-value 가 0.47로 유의수준 5% 이상의 값을 가져 두 집단이 등분산 조건이었으며, 등분산 t-test 결과 p-value 가 유의수준 5%미만의 값을 나타내 두 집단의 평균이 통계적으로 유의하게 다른 것으로 분석되었다(Table 10).

4. Conclusion

하수처리장의 운영에서 유입수의 농도를 신속하게 측정하는 것은 하수처리장의 처리능력의 유지와 최적화, 에너지 절감 방안의 도출 등 다양한 측면에서 매우 중요하다. 유입수의 정확한 수질을 알기 위해서는 실험실에서 행해지는 측정이 최고의 정확도를 가질 것이나, 다소 시간이 소요된다는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해 흡광도 기반의 광학식 수질 계측기가 개발되어 그 적용성과 신뢰성이 증가하고 있다. 그러나 현재 개발되어 적용되고 있는 광학식 수질 계측기는 다양한 영역대의 파장으로부터 복합적인 수질 항목 값을 추정식을 통해 도출하므로 센서 오염에 취약하다는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해서는 실시간으로 수행하는 이상 감지 작업이 매우 중요하다.

본 논문에서는 광학식 수질 측정기의 이상을 감지하기 위한 방법을 제시하였다. 오염이나 측정부의 물리적인 이상 등, 광학식 수질 측정기가 정상이 아닌 경우를 감지하기 위하여 측정된 수질 값이 타당한지 검증하기 위해 하모니서치 알고리즘을 활용한 유입수 정상분석 방법을 사용하였다. TCOD, T-N, T-P, TSS의 네 가지 수질 항목은 서로 연계되어 있어 그 농도들이 일련의 물질수지에 의한 균형을 이루므로, 하모니서치 알고리즘을 활용한 유입수 정상분석 방법이 그 적용의 타당성을 가진다고 판단된다. 개발된 알고리즘의 이상 감지 성능을 알아보기 위해 실제 운영되는 하수처리장에 설치하여 센서의 오염을 정확하게 감지하는지에 대한 검증을 수

행하였다. 그 결과, 개발된 알고리즘은 별도의 측정값과의 대조나 다른 값의 참조를 활용하지 않음에도 불구하고 광학식 수질 측정기의 이상 상태를 감지해 낼 수 있음을 확인하였다.

Acknowledgement

This research was supported by the Korea Environment Industry & Technology Institute(KEITI) through the “Prospective Green Technology Innovation Project” (No. 2021003160003), funded by the Korea Ministry of Environment (MOE). This research was also supported by Korea Water Cluster through 2022 Project for Active and Digitalization of Water Technology(2022200007).

References

Choi, E. H., Klapwijk, B., Mels, A., and Brouwer, H. (2005). Evaluation of wastewater characterization method, *Water Science and Technology*, 52(10-11), 61-68.

Geem, Z. W. (2009). *Music-inspired harmony search algorithm: Theory and applications*, Springer.

Geem, Z. W., Kim, J. H., and Loganathan, G. V. (2001). A new heuristic optimization algorithm: Harmony search, *Simulation*, 76(2), 61-68. <https://doi.org/10.1177/003754970107600201>

Golzar, F., Nilsson, D., and Martin, V. (2020). Forecasting wastewater temperature based on artificial neural network (ANN) technique and Monte Carlo sensitivity analysis, *Sustainability*, 12(16), 6386-6402. <https://doi.org/10.3390/su12166386>

Henze, M., Gujer, W., Mino T., and van Loosedrecht, M. (2006). *Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3*, IWA Publishing Volume 5. <https://doi.org/10.2166/9781780402369>

- Jin, B., Li, D., Srinivasan, S., Ng, S. K., Poolla, K., and Vincentelli, A. S. (2019). Detecting and diagnosing incipient building faults using uncertainty information from deep neural networks, *2019 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management (ICPHM)*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, San Francisco, CA, USA, 2019, 1-8. <https://doi.org/10.1109/ICPHM.2019.8819438>
- Kim, J. H. (2018). Harmony search algorithm and its application to optimization problems in civil and water resources engineering, *Journal of Korea Water Resources Association*, 51(3), 281-291.
- Kim, M., Kim, Y., Kim, H., Piao, W., and Kim, C. (2016). Evaluation of the k-nearest neighbor method for forecasting the influent characteristics of wastewater treatment plant, *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 10(2), 299-310.
- Kim, Y., Ahn, Y., Kim, H., Shin, J., and Kim, C. (2009). Development of a diagnosis algorithm of influent loading levels using pattern matching method in Sequencing Batch Reactor (SBR), *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 31(2), 102-108. [Korean Literature]
- Kumar, M., Khamis, K., Stevens, R., Hannah, D. M., and Bradley, C. (2024). *In-situ* optical water quality monitoring sensors-applications, challenges, and future opportunities, *Frontiers in Water*, 6, 1-13. <https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1380133>
- Lee, H. M., Yoo, D. G., Lee, E. H., Choi, Y. H., and Kim, J. H. (2016). Development and applications of multi-layered harmony search algorithm for improving optimization efficiency, *Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 17(4), 1-12. <https://doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.4.1>
- Lu, P., Zhang, X., and Zhang, D. (2010). An integrated system for wastewater COD characterization and a case study, *Water Science and Technology*, 62(4), 866-874.
- Mehranbod, N., Soroush, M., and Panjapornpon, C. (2005). A method of sensor fault detection and identification, *Journal of Process Control*, 15(3), 321-339. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2004.06.009>
- Nasir, M., Sadollah, A., Grzegorzewski, P., Yoon, J. H., and Geem, Z. W. (2021). Harmony search algorithm and fuzzy logic theory: An extensive review from theory to applications, *Mathematics*, 9(21), 2665-2710. <https://doi.org/10.3390/math9212665>
- Wang, G., Jia, Q. S., Zhou, M. C., Bi, J., Qiao, J., and Abusorrah, A. (2022). Artificial neural networks for water quality soft-sensing in wastewater treatment: A review, *Artificial Intelligence Review*, 55, 565-587. <https://doi.org/10.1007/s10462-021-10038-8>
- Wheeler, D. J. and Poling, S. R. (1998). *Building continual improvement: A guide for business*, Knoxville, Tennessee, USA. SPC Press.
- Yoo, D. G., Lee, S. M., Lee, H. M., Choi, Y. H., and Kim, J. H. (2018). Optimizing re-chlorination injection points for water supply networks using harmony search algorithm, *Water*, 10(5), 547-565. <https://doi.org/10.3390/w10050547>
- You, K. T. (2020). *A study on the harmony search based influent fractionation and improved Jacobian newton method with dynamic biofilm model to develop a simulation software for wastewater treatment plants*, Doctorial Dissertation, Korea University, Korea, 52-53. [Korean Literature]
- You, K., Kim, J., Pak, G., Yun, Z., and Kim, H. (2018). Development of a WWTP influent characterization method for an activated sludge model using an optimization algorithm, *Membrane Water Treatment*, 9(3), 155.