



## A study on TOC monitoring and spatial distribution analysis using a spectrometer in rivers

Yoon, Soo Bin<sup>a</sup> · Lee, Chang Hyun<sup>b</sup> · Kim, Young Do<sup>c\*</sup>

<sup>a</sup>Master's Course, Department of Civil & Engineering, MyongJi University, Youngin, Korea

<sup>b</sup>Ph.D Course, Department of Civil & Engineering, MyongJi University, Youngin, Korea

<sup>c</sup>Professor, Department of Civil & Engineering, MyongJi University, Youngin, Korea

Paper number: 23-037

Received: 25 July 2023; Revised: 26 October 2023; Accepted: 8 November 2023

### Abstract

Organic pollution is one of the most common forms of water contamination. Under the Water Quality Conservation Act, indicators for measuring organic substances include BOD, COD, and TOC. Analysis of BOD and COD is labor-intensive, and in the case of organic substances where biological decomposition is not feasible or toxic substances are present, the accuracy is often low. Therefore, the Ministry of Environment is shifting towards TOC-centric management. With advancements in sensor technology today, various parameters can be monitored using sensors. In this study, digital monitoring of river TOC using a spectrophotometer called Spectro::lyser V3 was conducted. Initially, experiments were carried out at the Andong River Experiment Center to assess the applicability of the measurement equipment. Subsequently, data collected at the confluence of the Nakdong River was analyzed for the spatial distribution of TOC using the Kriging technique. This research proposes the utilization of sensors for river TOC monitoring and spatial distribution analysis. Real-time monitoring of changes in river TOC concentration can serve as fundamental data for pollution monitoring and response. Sensor-based river monitoring offers advantages in terms of temporal resolution and real-time data acquisition. When various spatial information interpretation methods are applied, it is expected to contribute to diverse studies such as aquatic ecological health, river water source selection, and stratification analysis in the future.

**Keywords:** TOC (Total Organic Carbon), Spectro::lyser V3, Spectrometer, Organic matter

## 하천에서의 분광측정기를 이용한 TOC 모니터링 및 공간분포 분석 연구

윤수빈<sup>a</sup> · 이창현<sup>b</sup> · 김영도<sup>c\*</sup>

<sup>a</sup>명지대학교 토목환경공학과 석사과정, <sup>b</sup>명지대학교 토목환경공학과 박사과정, <sup>c</sup>명지대학교 토목환경공학과 교수

### 요 지

수질오염 중 유기물 오염은 가장 흔히 발생한다. 물환경보전법에 의해 유기물질을 측정하는 지표에는 BOD, COD, TOC가 있다. 그 중 BOD, COD의 분석은 노동집약적이다. 그리고 생물분해가 불가능하거나 유독물질이 존재하는 유기물질일 경우에는 낮은 정확도를 나타내 환경부에서는 TOC 중심의 관리로 전환되고 있다. 오늘날 센서기술의 발전으로 다양한 항목을 센서를 통해 모니터링 가능하다. 본 연구에서는 분광측정기인 Spectro::lyser V3를 이용한 하천 TOC 디지털 모니터링을 진행했다. 우선 측정 장비에 대한 적용성 평가를 위해 안동하천실험센터에서 실험을 진행했다. 그리고 낙동강 합류부에서 측정한 데이터를 Kriging 기법을 활용하여 하천의 TOC 공간분포를 분석했다. 본 연구에서는 센서를 활용한 하천 TOC 모니터링 및 공간분포에 대한 연구를 제안했다. 실시간으로 하천 TOC 농도 변화를 모니터링 할 수 있으며, 이는 오염원 감시 및 대응에 있어 기초자료로 활용할 수 있다. 이러한 센서 기반 하천 모니터링은 시간적 해상도 및 실시간 데이터 취득에 있어 장점이 있는데, 다양한 공간 정보 해석 방법을 적용한다면 추후 수생태 건강성, 하천 취수원 선정, 성층 분석 등 다양한 연구에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

**핵심용어:** TOC( Total Organic Carbon), Spectro::lyser V3, 분광측정기, 유기물질

\*Corresponding Author. Tel: +82-31-330-6407  
E-mail: ydkim@mju.ac.kr (Kim, Young Do)

## 1. 서론

총탄소(TC)는 총유기탄소(TOC)와 총무기탄소(TIC)로 구성되어 있다. 이 중에서 총무기탄소를 제외한 물질을 총유기탄소, TOC라고 한다. TOC는 물속에서 산화될 수 있는 모든 유기화합물의 양을 탄소의 양으로 나타낸 것으로 대표적인 수질지표 중 하나이다. 시료 중 유기물질을 고온에서 CO<sub>2</sub>로 산화시켜 그 발생량을 분석장치를 통해 측정하여 TOC를 구할 수 있다. 이처럼 TOC는 시료 속에 존재하는 물질에 방해받지 않고, 수중에 존재하는 유기물 총량을 더 정확하게 측정 가능하다는 장점이 있다(Choi and Han, 2011; Lee *et al.*, 2013). 현재 수돗물과 의약품의 수질 평가, 하천과 토양의 조사 및 연구, 공장의 배수 감시 등 많은 분야에서 널리 이용되고 있다.

TOC 외에도 BOD나 COD를 통해서도 유기물질을 측정할 수 있지만, 유기물질의 종류와 측정 조건 등에 따라 정확한 양을 측정하기 어렵다는 단점이 있다(Jo *et al.*, 2006). BOD는 미생물을 이용하기 때문에 분석값이 불안정하고 분해율이 낮아 측정에 어려움이 있고(Park *et al.*, 2022), 긴 시간이 소요되며, 유기물질을 정확히 표현할 수 없다(Kim and Lee, 2019). COD도 시료의 특성 및 성상에 따라 산화율 차이가 크고(Hwang and Park, 2018), 시료 내 잔류하는 일부 무기물질과의 반응으로 인해 상대적으로 재현성이 낮아 난분해성을 포함하는 유기물질 총량을 측정하지 못하기에 유기물의 대표 지표로서 한계가 있다(Lyu and Lee, 2007; Park *et al.*, 2022). 또한, BOD 시험방법은 5일이 소요되므로 초기 오염사고에 즉각적인 대응이 어려운 단점이 있다. COD 시험방법은 산화율이 온도와 시간의 영향에 따라서 측정치의 평균값은 편차가 크다. 이러한 유기물질 관리의 한계점을 개선하기 위해 난분해성 유기물질까지 측정 가능한 TOC가 도입되었다.

2013년 1월부터는 국내 하천과 호소의 생활환경 기준에 TOC 항목이 적용되어 활용되었고(Jeong *et al.*, 2014), 2016년 1월부터는 수질 및 수생태계 목표기준 규정에 의하여 CODmn를 기준에서 제외하고 TOC 단일 항목으로 관리 중이다(Choi and Kang, 2018). 이와 연계한 체계적인 유기물 관리를 위해 TOC 기준이 도입되었다(Jung *et al.*, 2015). TOC 도입을 통해 수질 분석 및 수질자동측정기기 등의 선진화된 기술 제도 도입과 수질관리의 효율성을 제고할 수 있다.

하천 및 호소에서 환경기초시설의 확충에 따라 BOD가 개선되었으나 난분해성 유기물질은 지속적으로 증가하여 개선 효과가 미흡한 실정이다. 유기물질 산화율로 BOD는 20~40%, CODmn은 30~60% 정도로 부족하다(Choi *et al.*, 2015). 산화력이 높고 신속, 정확하며 실시간 측정이 가능한 TOC를 난분

해성 유기물질 등 전체 유기물질에 대한 새로운 관리지표로 설정할 필요성이 대두되고 있다(Choi *et al.*, 2020).

최근 폐수배출시설 실태조사 결과, 기존의 방식인 CODmn과 유사한 수준으로 TOC가 처리되고 있음이 파악되었다. 호소에서도 TOC와 CODmn간의 상관성을 조사한 결과 TOC와 CODmn의 농도는 유사한 경향으로 검출되었다. 환경부는 2016년부터는 CODmn을 TOC로 전환하였고(Cho *et al.*, 2014), 2021년부터는 공공하·폐수 및 분뇨처리시설의 방류수수질 기준도 TOC로 전환되었고(Kwon *et al.*, 2021), 2022년부터는 CODmn가 배출되는 폐수처리시설에 TOC가 적용되었다. 2023년까지는 TOC TMS가 부착될 예정이다.

TOC 도입의 예로 TOC 오염총량제를 들 수 있다. 현재 수질 오염총량관리제 대표 평가항목으로는 BOD와 T-P가 적용되고 있다. 하지만 BOD의 경우 유기물질 지표로서 사용하기에는 각종 산업 활동에 발생하는 난분해성 유기물질 및 독성을 반영하기 어렵고, 분석과정에서의 많은 시간이 소요된다는 단점이 있다. TOC는 산업발달 및 생활환경 변화로 인한 화학물질 사용량 증가에 따라 빠르고 정확한 유기물질 관리 방안이 요구되면서 도입되었다(Choi and Kang, 2018).

또한, 조류의 과도성장에 따른 부영양화 현상과 수중의 질소가 산화되는 질산화에 의한 측정치의 변동이 심하다는 문제점이 대두되면서 기존의 BOD 또는 T-P를 보완하거나 대체할 수 있는 대상 항목이 추가되어야 한다는 연구결과가 도출되고 있는 실정이다. 유기물질에 대한 항목으로 BOD 외에 유기물질 전체를 관리할 수 있는 TOC를 추가하거나, 현재의 BOD를 대체하여 TOC를 관리대상 물질로 적용하는 방안을 검토할 필요가 있다고 보고되었다(Ahn, 2020). 그래서 기존 BOD 중심의 관리에서 벗어나 난분해성 유기물질 관리에 적극적으로 대응하기 위해 TOC 오염총량제의 필요성이 커졌다(Lee *et al.*, 2006).

TOC 분석법으로는 대부분 현장에서 채수하여 실험실에서 분석하여 수분석으로 진행되고 있다. 하지만 수분석의 경우 분석속도가 한정적이고, 분석 절차가 복잡하기에 많은 시간과 인력이 소요된다. 그리고 실험자의 숙련도에 따른 차이가 측정결과의 오차로 발생하기도 한다. 이러한 TOC 분석의 한계점을 개선하고자 센서 기반의 TOC 모니터링이 필요하다.

수분석이 가지는 한계점을 개선하기 위해 측정장비를 사용하면 짧은 시간 내에 연속적인 측정이 가능하고, 빠르고 정확한 데이터 분석과 동시에 많은 양의 데이터를 한눈에 확인할 수 있다. 그리고 실험자에 따른 오차를 최소화할 수 있으며, 장비를 현장에서 사용한다면 하천의 대표지점이 아닌 모든 구간에서 측정 가능하다는 장점이 있다.

또한, 현재 국가에서 운영 중인 측정망의 경우 고정측정, 지점측정을 통해서 하천의 대표지점의 자료만 제공하고 있다. 지점측정은 광범위한 공간에 대한 대표성을 나타내기 어렵다. 그렇기에 지점측정의 자료는 인근 하천의 전체적인 수질이나 유량을 대표하는 기초자료라 판단하기 어렵다(Lee *et al.*, 2022). 특히 하천이 합류하는 구간의 경우 각 하천마다 측정값이 다를 수 있기에 합류구간을 분석하기 위해서는 고정측정이 아닌 연직측정이 필요하고 생각하여 연구를 진행하였다. 이 연구결과를 통해 TOC와 같은 수분석항목도 센서를 이용하여 측정이 가능함을 확인하고, 측정된 데이터를 공간분포로 해석하여 그 양상을 시각적으로 제시함으로써 고해상도의 데이터 취득 및 활용할 수 있다.

## 2. 대상지역 및 연구방법

### 2.1 연구대상지역

#### 2.1.1 안동하천실험센터

한국건설기술연구원 하천실험센터(River Experiment Center, REC)는 경상북도 안동시 남후면 하아리에 소재한 총면적 193,051 m<sup>2</sup>의 부지에 최대 10 m<sup>3</sup>/s의 방류가 가능한 길이 560~680 m, 폭 11 m, 길이 2 m 규모의 3개 실규모 대형 수로를 비롯한 다수의 실험·실증 시설을 보유하고 있다. 하천실험센터는 국내 최대 규모이며, 세계적으로도 독보적인 규모와 우수한 인프라를 보유한 실험 시설이다. 하천실험센터에서 센서에 대한 기초자료 취득과 실제 하천에 대한 센서의 현장적용성을 판단하였다.

#### 2.1.2 낙동강·금호강·진천천 합류구간

하천실험센터에서 센서 테스트를 진행한 후 실제 하천에서 센서를 적용하였다. 그 대상지로는 낙동강·금호강·진천천 합류하는 구간(Fig. 1)이다. 해당구간은 주변에 성서공단이 위치해 대명천으로부터 오염물질이 유입되는 지점이다. 그렇기에 여러 하천에 대한 혼합양상과 각 특성을 연구할 수 있다.

대상지에서 측정하기 전, 수질측정망 자료를 통해 TOC를 확인해본 결과 낙동강(달성)은 3.4 mg/L, 금호강(금호강8)은 5.1 mg/L, 혼합된 후(화원나루)는 4.5 mg/L였다. 이렇듯 하천마다 TOC 농도의 차이가 있음을 확인하였다. 하지만 수질측정망의 경우 하천이 합류구간이 아닌 곳에 위치하고 있다. 그래서 실제로 하천마다 TOC 차이가 나는지 확인하기 위해 해당 대상지에서 연구를 진행하였다.

### 2.2 자료 취득 방법

대상지역에서 취득한 TOC 결과는 수질오염공정시험기준에 의거하여 수분석을 진행하였다. 이 시험기준은 지표수, 지하수, 폐수 등에 적용되며, 정량한계는 0.3%이다. TOC 측정방법으로는 고온연소산화방법과 UV산화방법으로 나눌 수 있다. 물속에 존재하는 TOC를 측정하기 위해 시료의 적당량을 산화성 촉매로, 충전된 고온의 연소기에 넣은 후 연소를 통해 수중의 유기탄소를 CO<sub>2</sub>로 산화시켜 정량하는 방법이다. TOC 검량방법으로는 무기성 탄소를 사전에 제거하여 측



(a) General map



(b) Satellite map



(c) Actual map

Fig. 1. Research target area



Fig. 2. Spectro::lyser V3

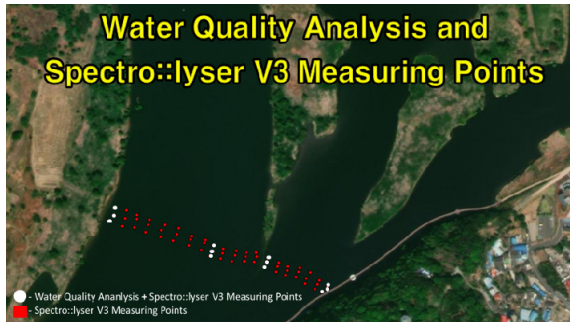


Fig. 3. Measuring points

정하는 TC-IC 방법이나 무기성 탄소를 측정 후 총탄소에서 감하여 TOC의 양을 구하는 NPOC 방법이 있다. 휘발성유기 화합물이나 거품이 포함된 시료는 TC-IC 방법을, 수돗물과 같이 TOC 농도가 낮은 시료는 NPOC 방법을 사용한다. 그리고 대상지역에서 TOC를 측정하기 위해서 Spectro::lyser V3 센서(Fig. 2)를 사용하였다. Spectro::lyser V3 센서는 190 nm~750 nm 스펙트럼에 걸쳐 측정하는 센서로, 1개의 센서로 여러 항목을 동시에 측정할 수 있으며 그와 동시에 측정값을 실시간으로 확인할 수 있다.

TOC 데이터를 취득하기 위해서는 수문조사방법 중 하나인 보트법을 이용하였다. 센서를 이용하여 연직방향으로 측정이 가능한 보트법을 통해 대상지역의 측정지점(Fig. 3)을 횡단하며 TOC를 측정하였다.

Fig. 3의 점은 위에서부터 상, 중, 하의 측정지점을 나타낸 것이다. 센서를 이용한 측정지점은 총 60지점(20개 지점 상·중·하), 수분석의 채수 지점은 총 12지점(4지점 상·중·하)로 측정하였다. 센서로는 짧은 시간에 많은 지점에서 측정이 가능하지만, 채수는 어렵기에 낙동강, 금호강, 진천천 중 4지점만 선정하여 채수를 진행하였다. 채수한 후 센서를 이용하여 먼저 측정을 한 다음 수분석을 위한 시료로 사용하였다. 그렇기에 센서 측정지점과 수분석을 위한 채수한 지점의 시료는 동일하다.

### 2.3 TOC 모니터링 적합센서

TOC를 측정하기 위해서 Spectro::lyser V3 센서를 사용하였다. Spectro::lyser V3는 190 nm~750 nm 스펙트럼에 걸쳐 측정하는 센서로 전 세계의 많은 수도 시설에서 수질 모니터

링에 사용되고 있다. 전체 흡수 스펙트럼을 분석할 수 있는 능력으로 Spectro::lyser V3는 물에서 많은 매개변수를 측정할 수 있다. Spectro::lyser V3는 1개의 센서로 TOC뿐만 아니라 여러 항목들(TSS, 온도, 색상, TOC, DOC, COD, NO<sub>3</sub>)을 동시에 측정할 수 있다. 그러므로 변화의 양상을 한눈에 확인할 수 있고, 그에 따른 데이터를 얻을 수 있기에 모니터링에 적합한 센서라고 판단되었다.

TOC 분석은 대부분 실험실에서 진행된다. TOC 측정센서가 개발되지만 대부분 분석기 위주의 개발이었다. 분석기는 휴대가 어렵기에 실내에서만 분석할 수 있고, 시료가 필요하므로 제한적이다. 하지만 Spectro::lyser V3와 같은 센서는 실외에서 측정 가능하고, 휴대가 가능하기에 공간적 제약을 받지 않는다. 이처럼 센서는 인력과 시간을 절약시키고, 고해상도의 데이터 취득이 가능하다. 또한, 센서사용 시 시약사용 및 폐액이 발생하지 않아 유지관리에 용이하다. Spectro::lyser V3의 경우 광학성능 향상으로 크게 향상된 정확도를 통해 항목 중 원하는 측정항목을 선택하여 확인할 수 있다. Bluetooth와 WLAN으로 휴대용 장비와 직접 통신을 하는 웹서버 기능으로 IoT 연결이 가능하기에 센서 활용확용 소프트웨어가 불필요하다.

### 2.4 연구방법

Spectro::lyser V3 센서를 하천에 적용하기 전에 실제 하천과 비슷한 규모를 가진 안동하천실험센터에서 센서에 대한 테스트를 먼저 진행하였다. 이 테스트를 통해 Spectro::lyser V3의 성능과 정확도에 대해서 알아보고, 실제 하천에 적용하기 위한 현장적용성을 판단하였다.

안동하천실험센터에서 현장적용성을 판단 후 실제 하천에 센서를 적용하였다. 그 대상지로는 낙동강·금호강·진천천의 합류구간으로, 해당구간은 주변에 성서공단이 위치해 있으므로 대명천으로부터 오염물질이 유입되는 지점이다. 여러 하천이 합류되는 지점에서 TOC를 측정하여 변화의 양상을 확인하고자 하였다. 합류구간에는 측정망이 위치하지 않기에 합류지점에서 TOC를 측정하였다.

또한, 측정된 TOC의 공간분포를 도출하기 위해서 래스터 보간법을 사용하였다. 보간이란 실측치를 이용하여 새로운 점의 포인트 값을 추정하는 방법이다. 고도, 강우, 화학물질농도 및 소음수준과 같은 포인트 데이터에 대해 알려지지 않은 값을 예측하는 데 사용된다. 전략적으로 분산된 샘플 위치에서 현상을 측정할 수 있으며, 그 측정(관측)값으로 예측값을 구해 다른 모든 위치에 할당할 수 있다. 래스터 보간은 크게 결정론적 방법과 지형통계적 방법으로 나눌 수 있다. 결정론

적 방법은 특정 수학 공식에 기초하여 위치에 값을 할당하는 방법으로 IDW, Spline, Trend, Natural Neighbor 기법이 있다. 지형통계적 방법은 측정된 지점 간의 통계적 관계를 포함하는 통계 모델을 기반하는 방법으로 Kriging 기법이 있다. 따라서 래스터 보간법 중에서도 지형통계적 방법인 Kriging 기법을 이용하여 공간분포로 도출하였다.

공간분포를 통해서 하천의 수체와 수질에 대한 특성을 확인할 수 있고, 특히나 합류구간에서는 서로 다른 성질의 수체가 합류되는 양상을 시각적으로 확인할 수 있다. 이를 통해 하천에 대한 수질 특성 변화를 면밀히 파악할 수 있고, 이렇게 파악한 하천의 특성을 통해 수체혼합특성, 수체혼합거동까지 확인할 수 있다. 대부분의 공간분포는 직독식항목에 대한 권투어자료로 많이 해석되기에 수분석항목에 대한 공간분포는 드물다. 그러기에 본 연구를 통해 TOC와 같은 수분석항목에 대해서도 공간분포 해석이 가능하다는 것을 확인하고자 하였다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 안동하천실험센터에서의 TOC 측정

안동하천실험센터는 실제 하천과 비슷한 규모를 가지고 있다. 그래서 센서에 대한 정확도 평가와 보정, 현장적용성을 판단하기 위해서 별도로 실험을 진행하였다. 안동하천실험센터에서는 하천보다는 센서를 쉽게 측정할 수 있기에 미리 테스트를 진행하기에 적합한 장소라 판단하여 진행하였다. 안동하천실험센터에서는 수조와 수로에서 TOC는 많은 차

Table 1. Spectro::lyser V3 sensor result

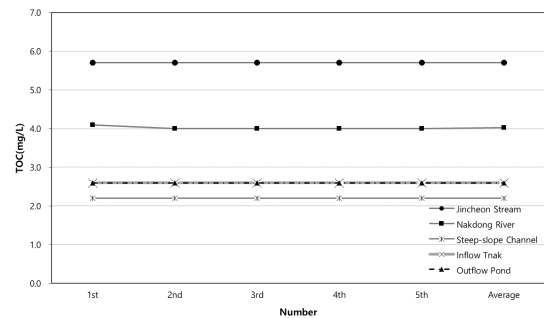
	Jincheon Stream	Nakdong River	Steep-slope Channel	Inflow Tank	Outflow Pond
1st	5.7	4.1	2.2	2.6	2.6
2nd	5.7	4.0	2.2	2.6	2.6
3rd	5.7	4.0	2.2	2.6	2.6
4th	5.7	4.0	2.2	2.6	2.6
5th	5.7	4.0	2.2	2.6	2.6
average	5.7	4.0	2.2	2.6	2.6

Table 2. Water quality analysis result

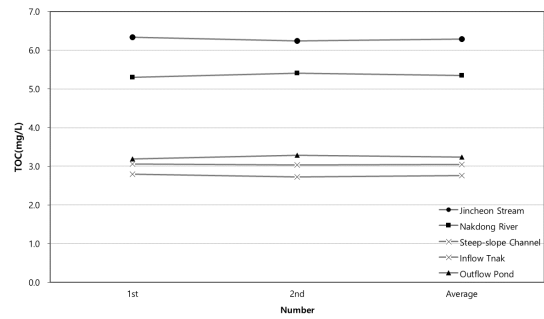
	Jincheon Stream	Nakdong River	Steep-slope Channel	Inflow Tank	Outflow Pond
1st	6.3	5.3	2.8	3.0	3.2
2nd	6.2	5.4	2.7	3.0	3.3
average	6.3	5.4	2.7	3.0	3.2

이가 나지 않았다. 그래서 낙동강과 진천천에서 추가로 측정하였다. Tables 1 and 2는 안동과 낙동강, 진천천에서 측정된 센서와 수분석 결과이다. Spectro::lyser V3 센서는 5회, 수분석은 2회 평균값(Fig. 4)을 이용하여 분석하였다. Spectro::lyser V3는 분광법을 사용하여 측정하였고, 수분석은 수질오염공정시험기준법에 의거하여 측정하였다.

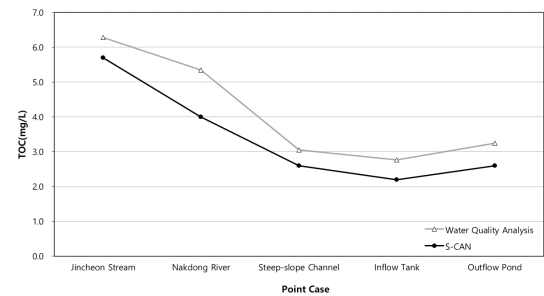
안동하천실험센터에서 취득한 Spectro::lyser V3의 TOC와 수분석의 TOC를 비교해보았을 때, Spectro::lyser V3와 수분석 결과의 비슷한 경향을 보였다. 하지만 측정값을 비교하면 결과적으로는 0.6 mg/L 정도의 오차가 발생하였다. 오차가 발생한 이유로 Spectro::lyser V3 같은 경우에는 글로벌 값이 시스템적으로 기본으로 제공되기 때문에 기존 수분석



(a) Spectro::lyser V3



(b) Water quality analysis



(c) Comparison (a)-(b)

Fig. 4. Comparison of water quality analysis and Spectro::lyser V3 sensor results



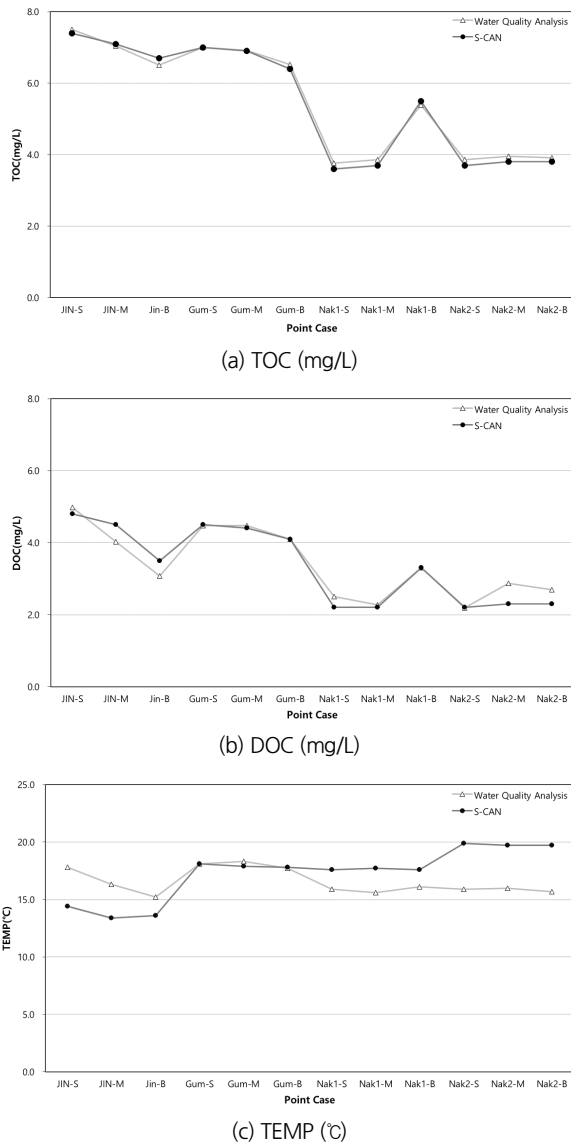


Fig. 5. Result by point

결과와 차이를 보였다. 안동실험센터에서의 측정은 초기 보정결과가 통상적으로 사용되는 보정 기준으로 설정이 되어있어 측정에 오류라고 판단하였다. 이후 Spectro::lyser V3를 증류수 기준으로 보정한 후 금호강 합류구간에서 다시 측정을 진행하였다.

### 3.2 합류구간에서의 TOC 측정

Spectro::lyser V3를 증류수 기준으로 보정한 후 낙동강·금호강·진천천의 합류구간에서의 측정값을 보면 수분석의 결과와 많이 차이가 나지 않는 것을 확인할 수 있다. 보정 후 오차는 0.051 mg/L 정도가 발생하였다. 이를 통해 안동실험센터의 오차는 센서 보정에 대한 오차임을 확인할 수 있었다. 또한, 그래프(Fig. 5)를 통해서 진천천의 TOC가 낙동강의 TOC보다 높다는 것을 확인할 수 있었고, 그와 동시에 수표면과 하상의 TOC가 동일하지 않다는 것을 알 수 있다. 이는 측정대상구간인 낙동강과 금호강, 진천천의 대표적인 농도값이 다르기 때문이라고 설명할 수 있다. 낙동강의 평균 TOC 농도는 4 mg/L 이하 좋은물수질기준 II 등급에 해당되며(Shim *et al.*, 2020), 금호강의 경우 낙동강보다 높은 7.3 mg/L의 농도를 나타냈다. 낙동강과 진천천 사이의 금호강의 경우 평균 금호강 수질농도인 5.3~5.7mg/L의 농도를 나타낸 것을 확인할 수 있다.

센서 측정의 결과(Tables 3 and 4)와 수분석 결과를 비교하고, 하천의 전반적인 TOC 농도를 확인하기 위해서 센서측정은 60지점, 수분석은 12지점으로 진행하였다. 센서로 측정한 60지점은 단면분포 등 공간적 해석을 위해 진행하였으며, 수분석은 센서측정과 비교분석을 위해 낙동강, 금호강, 진천천의 대표 정점의 상·중·하를 분석하였다. 낙동강의 경우 금호강과 진천천에 비해 하폭이 2배이상으로 2지점을 분석하였다.

Table 3. TOC (mg/L) result

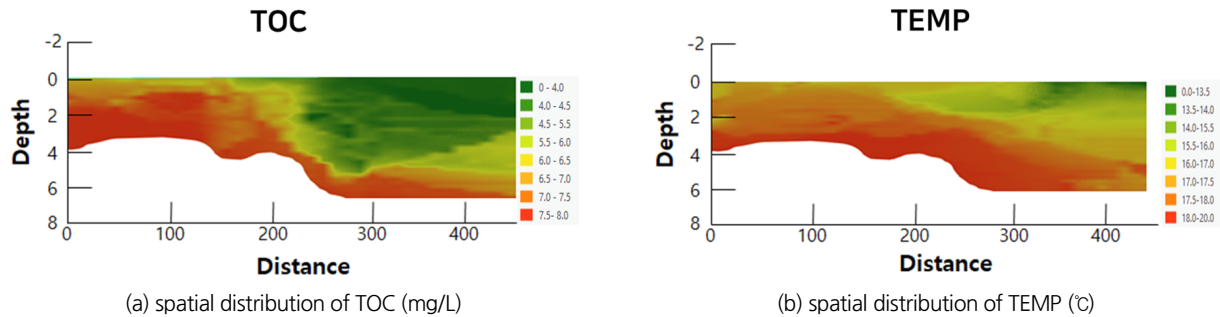
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Surface	7.4	7.5	7.6	7.5	7.5	7.3	7.0	5.7	4.3	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.7
Middle	7.1	7.0	6.2	6.1	6.1	6.8	6.9	5.7	4.6	4.0	4.5	4.4	3.7	3.8	3.6	3.8	3.7	3.7	3.7	3.8
Bottom	6.7	7.5	5.3	5.3	7.6	7.3	6.4	5.7	4.7	4.5	3.9	6.5	5.5	4.8	4.1	4.2	4.0	3.8	3.8	3.8

Table 4. TEMP (°C) result

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Surface	14.4	14.4	15.4	16.6	16.9	17.1	18.1	17.9	17.5	17.3	17.8	17.6	17.6	16.9	16.2	15.8	15.8	16.4	17.8	19.9
Middle	13.4	15.1	15.6	16.2	16.7	17.4	17.9	17.9	17.4	17.4	17.6	17.6	17.7	17.3	16.4	15.9	15.9	16.3	17.9	20.0
Bottom	13.6	14.4	15.5	16.0	16.6	17.1	17.8	17.9	17.8	17.4	17.6	17.6	17.6	17.7	16.6	16.0	15.8	16.1	17.6	19.7

**Table 5.** TOC (mg/L) results by point

	JIN-S (1)	JIN-M (1)	Jin-B (1)	Gum-S (7)	Gum-M (7)	Gum-B (7)	Nak1-S (13)	Nak1-M (13)	Nak1-B (13)	Nak2-S (20)	Nak2-M (20)	Nak2-B (20)
Sensor	6.7	7.1	7.4	6.4	6.9	7.0	5.5	3.7	3.6	3.8	3.8	3.7
Water Quality Analysis	6.5	7.0	7.5	6.5	6.9	7.0	5.4	3.9	3.8	3.9	3.9	3.9

**Fig. 6.** Spatial information in the confluence section

채수지점은 센서를 측정한 1, 7, 13, 20지점과 동일하다. 센서측정값과 수분석값을 비교하기 위해서 Table 5을 통해 두 개의 값이 모두 존재하는 12지점(1, 7, 13, 20지점의 상·중·하)만 그래프로 나타내었다. 채수하여 센서로 먼저 측정된 뒤 수분석의 시료로 사용하였기에 센서와 수분석에 사용된 시료도 동일하다.

### 3.3 Kriging기법을 이용한 공간정보 도출

금호강 합류구간의 TOC를 Kriging기법을 이용하여 공간분포(Fig. 6)를 도출하였을 때, 연직방향 4 m, 수평방향 200 m 지점에서 진천천의 TOC 영향이 낙동강 본류로 조금씩 유입되는 것을 확인할 수 있다. 수온 영향을 봐도 동일한 지점에서 따뜻한 물이 유입되고, 수온의 성층현상도 같이 확인할 수 있다.

공간보간 시 Surface, Middle, Bottom의 3 layer에서 QQ-Plot 과 베리로그래프의 특성을 고려하여 선형모델을 선정하여 공간보간을 진행했으며, 보간 진행시 보간의 신뢰도는 85.4%로 높은 수치의 보간신뢰도를 나타내었다.

이를 통해 하천마다 가지는 특성이 다르고, 수표면과 하상의 특성까지 공간정보를 통해서 동시에 확인할 수 있다. 또한, Kriging기법을 이용한 공간정보를 통해서 TOC 경향을 시각적으로 확인할 수 있다.

## 4. 결론

난분해성 유기물질까지 포함한 전체 유기물질의 총량을 확인하고자 TOC가 도입되었다. 현재 국가에서 운영 중인 측정망의 경우 고정적 측정을 통해 자료를 제공하고 있다. 하지만 이는 하천의 대표지점이라 판단하기에는 부적합하다. 수분석의 경우 분석수가 한정적이고 실험자의 숙련도에 따라 오차가 발생할 확률도 높다. 반면에 센서를 이용한 측정법은 무한히 분석 가능하고, 센서기반으로 측정하기 때문에 오차가 발생할 확률이 낮다. 그렇기에 TOC도 센서기반의 모니터링이 가능하다고 생각한다. 이러한 센서기반의 모니터링을 통해 공간적으로 높은 해상도의 데이터 취득이 가능하다. 그래서 보트법과 센서를 이용하여 TOC 디지털 모니터링을 진행하였다. 안동실험센터에서는 센서에 대한 정확도 테스트를, 낙동강·금호강·진천천 합류구간에서는 TOC 공간정보를 도출하였다. Kriging기법을 이용한 TOC 공간정보 도출을 통해 TOC 경향을 수온의 성층현상과 더불어 수체가 혼합되는 구간에서 정교한 농도 분포 양상을 시각적으로 확인하였다. 또한, 수분석항목들을 센서로 측정하여 수체에 대해 파악이 가능하다는 것을 확인하였다. 수체가 오염되었을 때 오염원의 원인이나 영향, 추적 등 오염원을 파악하는데 용이하게 사용될 것으로 생각한다.

이후 활용방안으로 TOC는 탄소량을 직접 확인함으로써 기존의 생분해성 물질 위주의 유기물질 관리 정책을 개선 및

보완하고, 수체 내 난분해성물질의 증가 추세를 파악하고 저감을 수행함과 동시에 빠른 측정결과 제공에 따른 실시간 오염원 감시 및 대응을 할 수 있다. 또한, 수환경 공간정보의 다양한 해석 방법과 수공학분야의 적용을 통해 추후 수생태 건강성, 하류 말단부 취수원 지점 선정, 성층 분석 등 다양한 연구에 기초자료 사용될 것이라 사료된다.

## 감사의 글

이 논문은 행정안전부 지능형 상황관리 기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다(2021-MOIS37-003)(RS-2021-ND631021).

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

## References

- Ahn, T.U. (2020). *A study for technical elements for the implementation of total pollution load control system in TOC*. No. 11-1480523-004243-01, National Institute of Environmental Research, pp. 2-4.
- Cho, Y.B., Oh, Y.G., Shin, D.C., and Park, C.H. (2014). "Distribution of total organic carbon and correlations between organic matters of sewage treatment plants" *Journal of the Korean Society of Environmental Analysis*, Vol. 17, No. 4, pp. 207-214.
- Choi, B.W., and Kang, M.A. (2018). "Availability evaluation of TOC as the environmental standard - Survey of lakes in Nakdong River Basin -." *Journal of Wetlands Research*, Vol. 20, No. 2, pp. 173-180.
- Choi, I.W., Kim, J.H., Im, J.K., Park, T.J., Kim, S.Y., Son, D.H., Huh, I.A., Rhew, D.H., and Yu, S.J. (2015). "Application of TOC standards for managing refractory organic compounds in industrial wastewater." *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 31, No. 1, pp. 29-34.
- Choi, J.Y., and Han, D.H. (2011). "Development of water quality standard for TOC as organic matter index." *Seoul Studies*, Vol. 12, No. 3, pp. 173-184.
- Choi, S.H., Jeong, M.E., Joo, K.Y., Choi, Y.J., Yoon, N.N., Kwak, J.S., Lee, J.H., Kim, Y.R., and Jeon, D.Y. (2020). "Study on correlations between total organic carbon and organic matter indexes in industrial wastewater from Busan." *Journal of Environmental Analysis, Health and Toxicology*, Vol. 23, No. 1, pp. 1-8.
- Hwang, S.H., and Park, J.C. (2018). "Management of TOC and COD organic matter of effluents in sewage treatment plants." *Journal of Environmental Science International*, Vol. 27, No. 4, pp. 261-266.
- Jeong, D.H., Choi, I.C., Cho, Y.S., Ahn, K.H., Chung, H.M., Kwon, D.S., Park, H.W., Shin, H.S., and Hur, J. (2014). "Characteristics of TOC in effluent discharge from public sewage treatment works in Korea." *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater*, Vol. 28, No. 6, pp. 657-668.
- Jo, S.H., Kang, M.A., Choo, Y.Y., Jeong, G.C., Jung, D.H., and Yi, J.H. (2006). "Impact assessment of river water quality using organic pollutant index - Industrial waste water -." *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 16, No. 4, pp. 373-379.
- Jung, K.Y., Ahn, J.M., Lee, K.L., Lee, I.J., Yu, J.J., Cheon, S.U., Kim, K.S., and Han, K.Y. (2015). "Temporal and spatial analysis of non-biodegradable organic pollutants in the Geumho River system." *Journal of Environmental Science International*, Vol. 24, No. 11, pp. 1343-1362.
- Kim, Y.S., and Lee, E.J. (2019). "Establishment of target water quality for TOC of total water load management system." *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 35, No. 6, pp. 520-538.
- Kwon, E.K., Park, S.H., and Lee, W.T. (2021). "Comparison of coal-, coconut-, and wood-based activated carbons for removal of organic matters in wastewater treatment plant effluent." *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 43, No. 4, pp. 257-264.
- Lee, C.H., Park, J.G., Kim, K.D., Ryu, S.W., Kim, D.S., and Kim, Y.D. (2022). "Two-dimensional spatial distribution analysis using water quality measurement results at river junctions." *Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, Vol. 42, No. 3, pp. 343-350.
- Lee, S.G., Kwon, Y.J., Hwang, S.M., Kim, J.R., and Jeon, S.S. (2006). "Determination of on-line TOC monitoring in water quality monitoring system." *Journal of the Korean Society for Environmental Analysis*, Vol. 9, No. 4 pp. 235-242.
- Lee, S.T., Lee, Y.H., Hong, K.P., Lee, S.D., Kim, M.K., Park, J.H., and Seo, D.C. (2013). "Comparison of BOD, COD, TOC and DOC as the indicator of organic matter pollution of agricultural surface water in Gyeongnam Province." *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, Vol. 46, No. 5, pp. 327-332.
- Lyu, J.H., and Lee, D.G. (2007). "Inquiry of water environment in Mihocheon (Stream) - Water quality monitoring focused on TOC -." *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 23, No. 5, pp. 731-739.
- Park, S.H., Lee, C.Y., Kim, K.T., Kim, H.W., and Lee, W.T. (2022). "Comparison of COD and TOC in influents and effluents of six industrial wastewater treatment plants in Korea." *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 44, No. 5, pp. 143-149.
- Shim, K.H., Shin, S.G., Kim, S.G., Kim, Y.G., and Kim, G.H. (2020). "Priority selection of water quality improvement through water quality data of tributaries of Nakdong River." *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 36, No. 5, pp. 364-372.