

광학특성을 가진 수질변수를 활용한 하구 담수호 내 TOC 농도 추정

김진욱^{1a} · 장원진^{1b} · 신재기² · 강의태³ · 김진휘^{1c,†} · 박용은^{4a,†} · 김성준^{4b}

¹건국대학교 사회환경플랜트공학과 · ²한국수자원공사 · ³한국농어촌공사 농어촌연구원 · ⁴건국대학교 사회환경공학부

Estimating TOC Concentrations Using an Optically-Active Water Quality Factors in Estuarine Reservoirs

Kim Jinuk^{1a} · Jang Wonjin^{1b} · Shin Jaeki² · Kang Euntae³ · Kim Jinhwi^{1c,†} · Park Yongeun^{4a,†} · Kim Seongjoon^{4b}

¹Department of Civil, Environmental and Plant Engineering, Konkuk University

²Korea Water Resources Corporation (K-water)

³Korea Rural Community Corporation, Rural Research Institute

⁴School of Civil, Environmental Engineering, Konkuk University

(Received 16 September 2021, Revised 22 November 2021, Accepted 26 November 2021)

Abstract

In this study, the TOC in six estuarine reservoirs in the West Sea (Ganwol, Namyang, Daeho, Bunam, Sapkyo, and Asan) was estimated using optically-active water quality factors by the water environment monitoring network. First, specification data and land use maps of each estuarine reservoir were collected. Subsequently, water quality data from 2013 to 2020 were collected. The data comprised of 11 parameters: pH, dissolved oxygen, BOD, COD, suspended solids (SS), total nitrogen, total phosphorus, water temperature, electrical conductivity, total coliforms, and chlorophyll-a (Chl-a). The TOC in the estuarine reservoirs was 4.9~7.0 mg/L, with the highest TOC of 7.0 mg/L observed at the Namyang reservoir, which has a low shape coefficient and high drainage density. The correlation of TOC with water quality factors was also analyzed, and the correlation coefficients of Chl-a and SS were 0.28 and 0.19, respectively, while the correlation coefficients of these factors in the Namyang reservoir were 0.42 and 0.27, respectively. To improve the estimation of TOC using Chl-a and SS, the TOC was averaged in 5 mg/L units, and Chl-a and SS were averaged. Correlation analysis was then performed and the R^2 of Chl-a-TOC was 0.73. The R^2 of SS-TOC was 0.73 with a non-linear relationship. TOC had a significant non-linear relationship with Chl-a and SS. However, the relationship should be assessed in terms of the spatial and temporal variations to construct a reliable remote sensing system.

Key words : Data conversion, Estuarine reservoir, Optical properties, Total organic carbon, Water quality data

^{1a} 박사과정(Ph.D. Student), saertt@konkuk.ac.kr, https://orcid.org/0000-0001-7815-3400

^{1b} 박사과정(Ph.D. Student), jangwj0511@konkuk.ac.kr, https://orcid.org/0000-0002-0949-4735

² 연구원(Researcher), shinjaeki@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-5380-5078

³ 연구원(Researcher), watermanager@ekr.or.kr, https://orcid.org/0000-0002-1161-6682

^{1c} Corresponding author, 박사후연구원(Post-Doc), jinhwi25@naver.com, https://orcid.org/0000-0003-2115-8969

^{4a} Corresponding author, 교수(Professor), yepark@konkuk.ac.kr, https://orcid.org/0000-0002-1959-0843

^{4b} 교수(Professor), kimsj@konkuk.ac.kr, https://orcid.org/0000-0002-9729-9373

1. Introduction

우리나라의 담수호의 총 저수량은 약 27억 톤으로 전체 저수량의 21%이며, 담수호로부터 공급받는 관개면적은 183×10^3 ha로 전체 논 면적의 약 14%에 해당하며 대부분 서해 중부지역 및 서남 해안지역에 밀집되어 있다(MAFRA, 2005). 담수호는 서해 중부지역의 남양호, 아산호 등과 같이 간척사업에 의해 만들어진 간척담수호와 서남 해안지역의 완도호, 월송호 등과 같이 도서지역의 용수공급을 위해 만들어진 양수담수호로 구분된다. 이 중 서해 중부지역 담수호의 대부분은 바닷물의 유입을 막는 갑문을 설치하여 농지를 조성한 후 농업용수 확보를 위한 목적으로 조성된 간척담수호로 유역면적이 크고 저수용량의 규모가 큰 특징을 가진다(Jung et al., 2016). 또한 간척담수호는 주변 농지에 농업용수 공급을 위해 용수로, 배수구가 함께 조성되어 농업용수로 공급된 물이 다시 호수로 유입되는 특성을 가지고 있다. 이러한 이유로 관개용수 재유입으로 인한 호내 오염물질 유입 및 축적이 빈번히 발생되며 최근 토지이용의 변화 및 국지성 호우 빈도 증가와 같은 기후변화로 인해 오염물질 유입이 증가하고 있어 녹조 발생 등의 수질오염 문제가 발생되고 있다.

이러한 담수호의 수질악화를 해결하기 위해 인공습지, 조류 제거선, 수초 제거선, 응집침전법 등의 기법을 활용한 물리적인 오염원 저감 시도가 이뤄졌으나(Jung and Kim, 2017) 대부분 개별 담수호 단위로 수질개선 사업이 실행되고 있으며 효과는 미비한 실정이다. 또한, 담수호 대상 수질 오염 예측, GIS 기반의 공간 정보를 활용한 수질오염 원인 물질 탐색, 수질 거동 모의 모델, Hydrological simulation program - Fortran (HSPF)와 Water quality analysis simulation program (WASP)을 이용한 유역 단위 모델 등과 같은 다양한 연구가 진행되었다(Choi and Kim, 2001; Ham et al., 2007). 하지만 효율적인 담수호의 수질관리를 위한 연구의 선행 조사로서 수질모니터링이 필요한 반면 현재 담수호의 물환경측정망에서 제공되고 있는 수질 항목은 월에 1회 관측되고 있다. 오염물질, 녹조, 퇴적물의 다양화, 다변화하는 담수호 위협 요인에 대한 선제적 관리를 위해서는 월 1회 이상의 지속적인 수질 모니터링이 필요한 실정이다.

이러한 문제를 해결하기 위해 최근 수질측정망을 활용한 수질 모니터링 외에도 초/다분광 센서를 탑재한 Sentinel, Landsat 등의 공간 해상도가 높은 위성, 항공기, 드론 기반의 원격탐사 모니터링을 실시하여 수질 모니터링 방법을 개선 및 보완하고 있다(Kim et al., 2014; Lee et al., 2015). 특히 위성영상을 활용한 원격탐사는 Sentinel-2A/2B가 각각 10일 간격의 주기, Landsat-7/8이 각각 16일 간격의 주기로 짧은 주기와 공간적인 모니터링이 가능한 장점이 있다. 원격탐사 기법을 이용한 방법은 기본적으로 물질의 원격반사도, 흡수 및 산란과 같은 고유광특성의 상호관계로부터 추정되며(Lee et al., 2015) 고유광특성을 갖는 매개변수에는 Chlorophyll-a (Chl-a), 부유고형물(Suspended solids, SS), 유색용존유기물 (Colored dissolved organic matter, CDOM), 및 Secchi disk 등이 있다

(Matthews, 2011). 그러나 이러한 원격탐사 모니터링 방법은 현재 물환경측정망에서 측정하는 Chl-a, SS와 같은 분광특성을 갖는 수질 인자들에 대해서 모니터링이 가능한 반면 총유기탄소(Total Organic Carbon, TOC), 총인, 총질소와 같이 분광특성이 없는 수질인자 모니터링에는 한계가 있다.

최근 환경부에서는 하천 및 호수 등 공공수역의 유기물질 수질환경기준에 TOC를 도입하였으며 수질 모니터링 측면에서 중요성이 커지고 있다(Choi et al., 2012). TOC는 기존에 사용되던 유기물 오염정도 평가 지표인 생물학적산소요구량(BOD₅), 화학적산소요구량(COD_{Mn})과 달리 측정 시간이 오래 걸리지 않고 난분해성 유기물을 포함한 전체 유기물의 안정적이고 정확한 측정이 가능하다(Jung et al., 2015). 물환경정보포털에서 계측하는 TOC는 습식산화법 및 고온연소 산화법으로 원수를 UV로 산화시키거나, 촉매작용하에 연소시켜 발생한 CO₂를 비분산적외선검출(NDIR)로 검출하는 방법을 사용한다(ME, 2021). 이러한 TOC는 광학적인 특성을 띄지 않아 원격탐사를 이용하여 측정하기 위해서는 수질 매개변수에 의한 간접적인 추정에서만 가능한 실정이다. 원격탐사를 통해 TOC를 예측하기 위해서는 먼저 각 수질인자와 TOC간 상관성을 분석하고 광학특성이 있는 수질인자에 대한 평가가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 위성영상을 활용하여 TOC를 예측하기 위한 선행과제로 서해 담수호를 대상으로 물환경측정망에서 제공하는 수질변수 중 고유광특성이 있는 Chl-a, SS를 활용하여 TOC 예측을 위한 매개변수로서의 가능성을 평가하고자 한다.

2. Materials and Methods

2.1 연구지역 및 수질 관측자료

본 연구의 대상유역은 서해 중부지역의 담수호를 대상으로 하였으며 이 중 환경부의 물환경정보시스템(<http://water.nier.go.kr/>)에서 제공하는 6개 담수호(간월호, 남양호, 대호호, 부남호, 삼교호, 아산호)를 최종적으로 선정하였다(Fig. 1). 1996년부터 농림축산식품부와 환경부가 함께 정기적 수질조사 및 관리를 진행하고 있으며 담수호 중 수질개선사업 대책은 간월호(2007/2019년), 남양호(2007년), 부남호(2007년), 삼교호(1999년), 아산호(2007년)에서 수립된 바 있다.

6개 담수호에 대한 수질자료는 물환경정보시스템에서 제공 받았으며, TOC 자료가 제공되는 2013년부터 2020년까지의 자료를 수집하였다. 수질인자와의 영향을 분석하기 위해 동일기간의 수소이온농도(pH), 용존산소(DO, mg/L), BOD(mg/L), COD(mg/L), 부유물질(SS, mg/L), 총질소(TN, mg/L), 총인(TP, mg/L), 수온(WT, °C), 전기전도도(EC, µS/cm), 총대장균군수(Col., 총대장균군수/100mL) 및 Chlorophyll-a(Chl-a, mg/m³)의 자료를 수집하였다. 담수호 전체의 수질경향을 파악하기 위해 상단, 중단, 하단으로 구분되어 있는 자료를 하나의 관측자료로 봤으며, 상층-중층-하층으로 구분하여 자료를 제공하는 부남호 및 아산호의 경우에는 수질인자의 원격탐사가 가능한 상층자료를 대상으로 수집하였다.

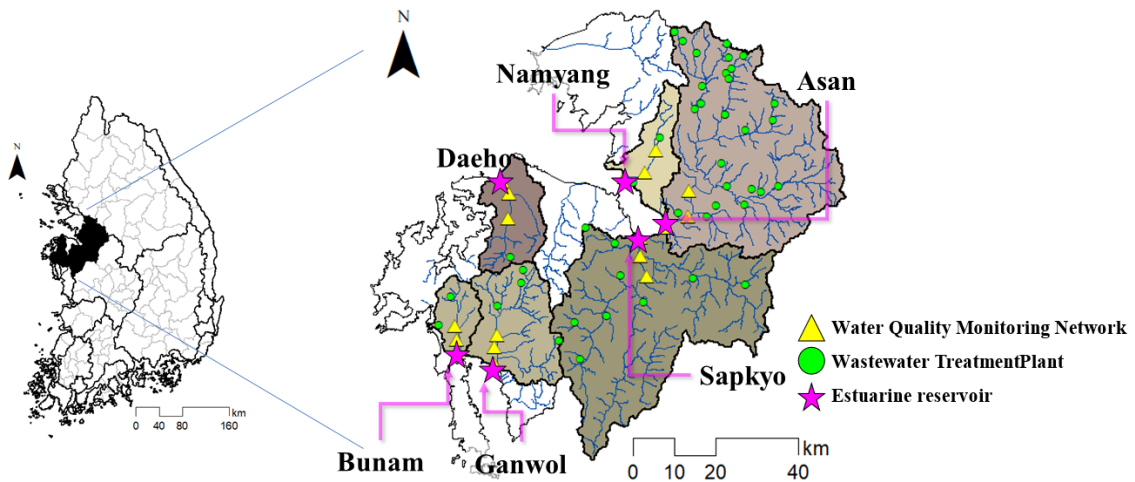


Fig. 1. Map of the study areas showing water quality monitoring stations and wastewater treatment plants.

2.2 유역특성 자료 수집

6개 담수호에 대한 제원 및 유역특성의 자료는 Table 1과 같다. 각 담수호의 유역면적, 수혜면적, 유효저수량 및 준공년도 자료는 농업생산기반시설에서 제공하는 자료를 활용하였다. 유역면적 및 하천도는 물환경정보포털에서 자료를 수집하였으며, 제공하는 지리공간정보(ArcGIS shape 파일)를 이용하

여 유역길이, 본류길이, 하천길이를 계산하였다. 또한 유역의 홍수량 특성을 파악하기 위해 형상계수 및 유역밀집도를 계산하였다. 유역 형상이 흐름방향으로 길고 폭이 좁은지 혹은 짧고 폭이 넓은지를 나타내는 지표인 형상계수는 유역면적을 본류 유로연장의 제곱으로 나눠 계산한다. 형상계수는 0~1의 분포를 가지며 1에 가까울수록 침투홍수량이 크고 발생시간

Table 1. Characteristics of the six estuarine reservoirs

Characteristic	Ganwol	Namyang	Daeho	Bunam	Sapkyo	Asan
Specifications of estuarine reservoirs						
Watershed area (km ²)	488	209	312	156	1,640	1,634
Irrigation area (ha)	6,446	3,449	7,419	3,745	18,000	13,675
Effective reservoir storage (10 ³ m ³)	50,720	20,407	46,460	21,140	62,787	82,892
Total river length (km)	201.2	35.8	77.5	40.4	603.4	639.8
Mainstream length	32.2	29.4	26.1	19.1	65.6	70.6
Shape factor	0.47	0.24	0.46	0.43	0.38	0.33
Watershed perimeter (km)	121.4	121.1	106.2	65.1	268.8	239.8
Drainage density	1.6	2.4	1.7	1.5	1.9	1.7
Main pollution source	Household	Household	Household	Livestock	Household	Household
Completion year	1995	1973	1985	1995	1979	1973
Land use ratio in watershed (%)						
Urban	6.9	17.2	5.5	6.8	9.7	17.4
Paddy	33.3	28.3	30.6	32.3	20.9	18.6
Upland	12.2	12.2	9.3	20.9	13.3	12.3
Forest	26.9	18.7	32.0	13.3	36.4	28.2
Grass	9.7	14.1	8.5	10.0	11.8	13.7
Wetland	2.1	1.6	3.0	2.3	1.8	1.5
Bare field	2.4	4.3	4.0	4.0	3.3	4.9
Water	6.5	3.5	7.1	10.5	2.8	3.3
Point source						
Numbers	4	2	1	2	9	26
Flow (m ³ /day)	40,429	35,835	1,413	8,015	214,351	552,206
Flow-effective reservoir storage rate (%)	7.8	17.6	0.3	3.8	34.1	66.6

이 짧다. 유역밀집도는 유역 면적과 동일한 원에 대해 유역 경계길이의 비를 계산하며, 1에 가까울수록 침투홍수량이 크고 발생시간이 짧은 특성이 있다.

아산호와 삼교호는 유역면적이 각각 1,634 km², 1,640 km²로 다른 담수호에 비해 규모가 큰 편이며 그 외의 담수호는 유역면적이 156~488 km²이다. 남양호는 타 유역에 비해 유역면적이 작음에도 형상계수가 낮고 유역밀집도가 커 침투홍수량이 작고 발생시간이 긴 특성을 가지고 있다.

환경공간정보서비스에서 제공하는 2020년 토지피복도를 토대로 유역별 토지피복 비율을 산정하였다. 비점오염에 관여되는 시가지는 남양호와 아산호에서 각각 17.2%, 17.4%로 가장 높게 나타났으며 특히 남양호는 논 비율 또한 28.3%로 높게 나타났다.

하수종말처리장 시설 자료는 국립환경과학원의 전국 오염원조사 자료로부터 2013~2018년 자료를 취득하였으며, 각 유역별 처리장의 개수 연방류량의 평균, 방류량 대비 유효저수량 비율을 계산하였다. 아산호와 삼교호의 경우 하수종말처리장 수가 각각 26개소, 9개소이며 방류량 또한 552,206 m³/day, 214,351 m³/day로 총 하천길이 만큼 하수종말처리장의 수가 많고 처리되는 양도 많아 저수량 대비 방류량 비율이 높게 나타났다. 반면 간월호, 남양호, 대호호, 부남호의 경우 하수종말처리장의 수가 1~4개소로 적게 나타났으며 방류량 또한 1,413~40,429 m³/day로 5~20배 차이가 나타났다.

2.3 상관분석 및 회귀분석

각 유역 특성에 대한 상관성 분석은 TOC와 연관성 있는 수질인자를 파악하기 위해 실시하였다. 상관분석은 Pearson 상관계수(Pearson's correlation coefficient, r)를 활용하였다. Pearson 상관계수는 두 데이터 간 관련 정도를 측정하기 위해 사용되며, 식 (1)과 같이 길이 k 인 두 데이터 $X(=x_1, \dots, x_k)$ 와 $Y(=y_1, \dots, y_k)$ 의 공분산을 각각의 표준편차로 나눠 계산된다. Pearson 상관계수는 -1부터 +사이의 값을 가지며, +1에 가까울수록 양의 상관, -1에 가까울수록 음의 상관을 가진다. 인자 간의 통계적 유의성 판단은 p-value가 0.05 이하일 때를 기준으로 하였다(Jung et al., 2015).

$$Pearson(X, Y) = \frac{Cov(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (1)$$

TOC와 수질인자 간의 관계를 규명하기 위해 다항회귀분석을 실시하였으며 종속변수는 TOC로 사용하였고, 독립변수는 수질인자 중 상관성이 높고 광학특성이 있어 원격감지에 의해 추정된 바가 있는 수질인자를 선정하여 사용하였다. 따라서, 본 연구의 회귀분석은 분광특성이 있는 수질인자와 TOC 간 경향성을 파악하기 위해 사용하였으며, 모델의 예측 성능을 높이기 위해 TOC를 5 mg/L 간격으로 구분한 후의 상관성을 검토하였다.

3. Results and Discussion

3.1 서해 담수호의 TOC 특성

Fig. 2(a)~(f)은 유역별 TOC 경향을 파악하기 위해 2013~2020년의 월별 TOC 농도 분포를 나타낸다. TOC의 호소생활환경기준은 좋음(I, 3mg/L 이하), 약간좋음(II, 4mg/L 이하), 보통(III, 5mg/L 이하), 약간나쁨(IV, 6mg/L 이하), 나쁨(V, 8mg/L 이하), 매우나쁨(VI, 8mg/L 초과)로 구분된다. Fig. 2(b)와 같이 남양호의 TOC 농도는 7.0 mg/L로 가장 높았으며, 호소생활환경기준은 V 단계로 나타났다. 반면 아산호의 TOC 농도가 4.9 mg/L로 III이며, 그 외의 담수호에서는 IV에 해당하는 5.2~5.9 mg/L의 분포를 보였다.

전체적인 편차는 유역면적이 큰 삼교호 및 아산호에서 각각 1.8 mg/L, 1.0 mg/L로 낮게 나타난 반면, 그 외의 지역의 수질농도 편차는 큰 편이다. 특히 부남호 및 남양호에서의 편차는 각각 3.2 mg/L, 3.1 mg/L로 가장 크게 나타나는데 부남호의 경우 주요오염원(축산계)에 의한 비점오염의 영향으로 판단되며, 남양호의 경우 형상계수가 낮고 밀집도가 높아 높은 체류시간을 가질 수 있는 유역특성이 반영된 것으로 판단된다(Choi and Kang, 2018). 담수호는 관개용수가 대부분 재사용되어 오염물질이 누적되며 특히 남양호는 유역 크기 대비 하수처리장에서 처리하는 방류수가 35,835 m³/day로 많고, 방류수 대비 담수호의 유효저수량 비율이 타 수계보다 17.6%로 유역이 큰 삼교호, 아산호를 제외하고 가장 커 오염물질이 누적되기 쉬운 것으로 생각된다.

월별 TOC는 평균적으로 5~7월에 6.0~7.2 mg/L로 가장 높았으며 10~11월에 4.3~4.4 mg/L로 가장 낮았다. 이는 4월 하순부터 시작되는 묘대기, 이앙기 및 본답기를 포함한 농번기로 인해 비점오염원의 유입되어 높아지고 본답기가 끝나는 9월 말의 갈수기에 접어들면서 감소하는 경향을 보여 10~11월에 가장 낮아지는 것으로 판단된다(Larsen et al., 2011). 특히 남양호에서는 5~7월 농도가 8.1~9.5 mg/L까지 증가하여 매우나쁨에 해당하는 호소생활환경기준을 가지는 것으로 나타났다. 시가지 비율이 높은 남양호와 아산호에서는 7월에서의 variation이 5.0 mg/L, 1.4 mg/L로 다른 기간에 비해 컸으며(Fig. 2(b), 2(f)), 그 외 산림지역이 많은 유역에서는 6월 variation이 가장 큰 것으로 보였다. TOC의 경우 시가지 및 논에서의 오염원뿐만 아니라 산림에서 파생된 자연적인 유기물질의 영향도 함께 받는다. 정규화식생지수(Normalized difference vegetation index, NDVI)는 이러한 식생의 상태 및 생산량 추정 등에 사용되는 지수이며 TOC와 상관성이 있다고 알려져 있다(Ryoo and Ha, 2007; Uganai et al., 1998). TOC의 예측 시 NDVI의 영향을 함께 고려된다면 시가지 및 논에서의 비점오염으로 인한 편차 영향을 파악할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 서해 담수호의 TOC와 수질인자의 상관성 분석

수집된 수질인자와 TOC간 상관성을 분석을 위해 박스도표(Boxplot)에서 정의하는 보통이상점을 사용하여 사분위수 범위(interquartile range; IQR)를 기준으로 양 끝 1.5IQR 경계를 벗어나는 자료를 제거하여 사용하였으며(Kim et al., 2016), 상

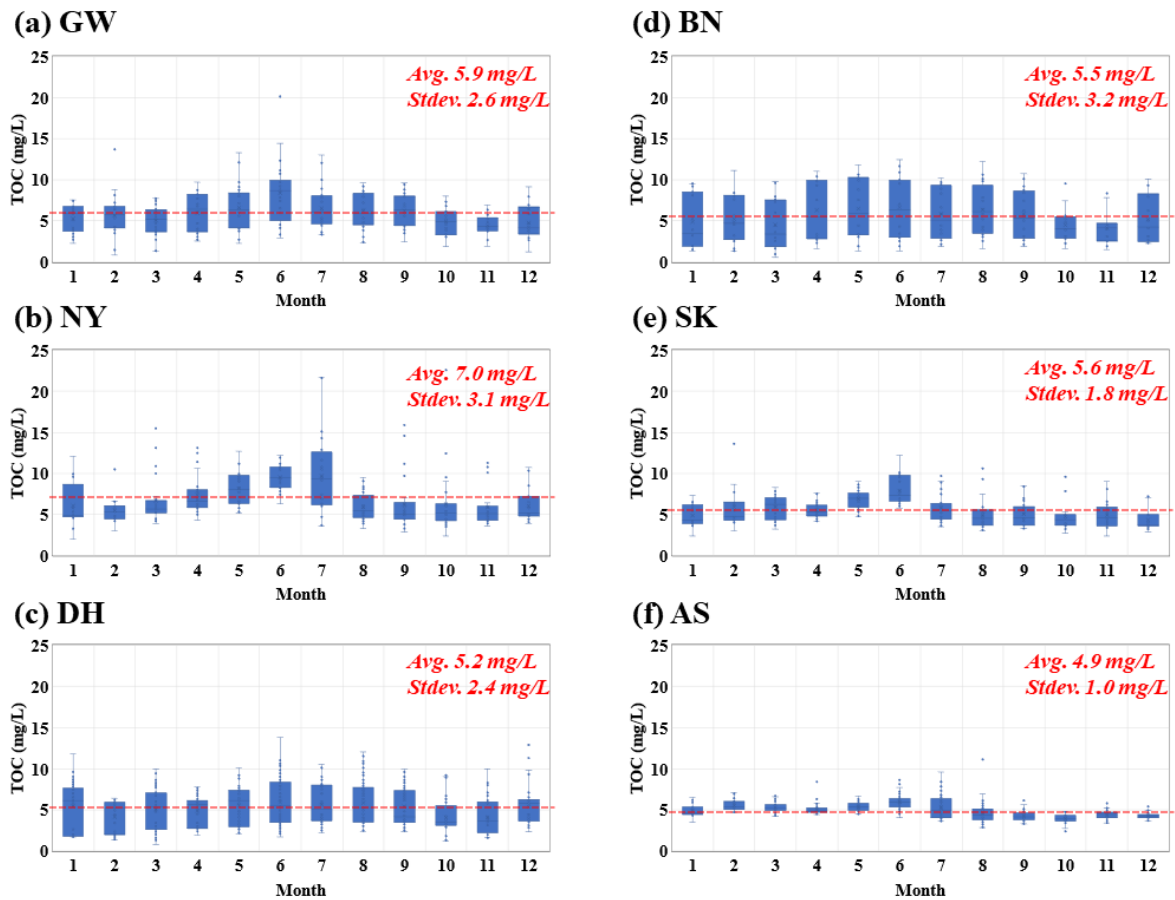


Fig. 2. Box plot of monthly TOC concentration (GW: Ganwol, NY: Namyang, DH: Daeho, BN: Bunam, SK: Sapkyo, AS: Asan).

관계수 및 p-value를 Table 2와 같이 정리하였다. 각 수질인자들의 평균적인 상관계수는 COD(0.57), EC(0.38), BOD(0.36), Chl-a(0.28), SS(0.19), WT(0.17), TN(0.16), pH(0.15), TP(0.14), DO(-0.01) 순으로 높았다. COD, BOD는 TOC와 더불어 유기물 측정 지표로 상관성이 높으며, 시가지, 논에서의 비점오염

증가로 생분해성 유기물인 BOD보다 미생물에 의해 분해되지 않은 고분자 유기물까지 측정할 수 있는 COD에서의 상관성이 더 높게 나타난 것으로 사료된다(Park et al., 2013). 반면 pH, DO, Col.는 1개 이상의 담수호에서 상관성이 매우 낮았으며 정해진 경향성도 보이지 않고 $p > 0.05$ 로 유의하지 못하

Table 2. Results of the correlation analysis between TOC concentration and water quality factors in estuarine reservoirs

	Ganwol		Namyang		Daeho		Bunam		Sapkyo		Asan	
pH	0.18	**	0.37	**	-0.13	**	-0.12		0.20	**	0.36	**
DO	-0.12		0.03		-0.09	*	-0.01		-0.14	*	0.27	**
BOD	0.43	**	0.27	**	0.28	**	0.40	**	0.44	**	0.35	**
COD	0.51	**	0.49	**	0.43	**	0.64	**	0.67	**	0.65	**
SS	0.24	**	0.27	**	0.11	**	0.21	**	0.29	**	0.03	
TN	0.05		-0.25	**	0.31	**	0.40	**	0.13	*	0.32	**
TP	0.34	**	-0.20	**	0.17	**	0.44	**	0.13	*	-0.04	
WT	0.32	**	0.24	**	0.15	**	0.16	*	0.22	**	-0.05	
EC	0.24	**	0.59	**	0.07		0.41	**	0.57	**	0.51	**
Col	-0.15	*	-0.33	**	-0.06		-0.34	**	-0.13	*	-0.24	**
Chl-a	0.22	**	0.47	**	0.14	**	0.26	**	0.27	**	0.30	**

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$

pH: Power of hydrogen ions, DO: Dissolved oxygen, BOD: Biochemical oxygen demand, COD: Chemical oxygen demand, SS: Suspended solids, TN: Total nitrogen, TP: Total phosphorus, WT: Water temperature, EC: Electrical conductivity, Col.: Coliforms, Chl-a: Chlorophyll-a

였다. 남양호, 부남호, 삼교호, 아산호에서는 어느 정도 상관성 있는 수질인자들이 나타난 반면 대호호의 경우 상관계수가 가장 높은 COD의 값이 0.43로 다른 지역에 비해 타 수질인자로 TOC를 예측하기 힘든 것으로 판단된다. 이는 대호호의 경우 시가지가 5.5%로 가장 낮으나 밀집되어 있고, 환경기초시설에 따른 유량은 1,413 m³/day(Table 1)로 가장 낮으며 대호호의 특성상 유입 유량이 작아 가뭄에 따른 농업용수 부족을 위해 삼교호로부터 용수공급을 받으면서 삼교호의 수질 영향에 의해 발생하는 오차로 판단된다(Choi et al., 2018). 또한, TOC 및 COD의 오차에 대해서는 TOC 분석기에서 입자상 유기물을 측정할 때 큰 입자가 걸려져 시험관내 유기물이 균질화되지 않아 COD의 관측값에 비해 크게 과소평가되어 발생할 가능성도 있다(Kim et al, 2007).

광학특성이 존재하는 Chl-a, SS과 TOC의 상관성은 평균적으로 각각 0.28, 0.19로 낮은 편에 속하나 오염물질 농도가 높은 남양호에서의 상관성은 각각 0.47, 0.27로 다른 담수호에 비해 상대적으로는 높으나 TOC를 예측하기에는 한계가 있다.

Lee et al. (2020)은 TOC를 통해 Chl-a를 예측한 바 있으며 ROC커브를 통해 검증하였을 때 AUC 0.951의 정확도를 얻은 바 있다. 이 때 Chl-a는 조류성장애 따른 자생 유기물질의 성장에 영향을 미칠 수 있다고 판단하였다(Kim et al, 2013). 또한 Jung et al. (2015)은 감천유역에서 수질인자들을 활용한 TOC를 예측한 바 있으며 Chl-a, SS를 포함한 모델에서 0.931 이상의 상관성을 나타낸 바 있다. 그러나 위 연구들은 COD, BOD 등의 수질변수가 포함되어 있어 원격탐사를 통해 구축할 수 있는 알고리즘이 아니며, 본 연구에서의 TOC와 Chl-a 및 SS와의 상관성은 낮은 편으로 자료 변환 작업을 통한 예측력을 검토할 필요가 있다. Lim et al. (2011)은 연안역의 수질성분 농도를 자료 변환에 따라 오염총량계 및 오염부하량의 예측값이 될 수 있을 것으로 판단한 바 있으며 본 연구에서도 TOC를 자료 변환을 적용하여 경향을 확인해보고자 하였다.

3.3 Chl-a, SS의 자료 변환을 통한 상관성 분석

분광특성 및 원격탐사로 탐지 가능한 수질인자인 Chl-a 및 SS를 입력변수로 하여 TOC를 예측하는 모델을 구축하기 위해 TOC를 5 mg/L 간격으로 평균하고 Chl-a 및 SS를 동일하게 평균한 후 상관성을 분석을 실시하여 Fig. 3과 같이 나타내었다. 전체적인 양상을 확인한 후(Fig. 3(a), 3(d)) 상대적으로 유역면적이 작은 간월호, 남양호, 대호호, 부남호(Fig. 3(b), 3(e))와 유역면적이 큰 아산호와 삼교호를 구분하였다(Fig. 3(c), 3(f)). 전체적인 상관성은 Chl-a, SS에서 각각 0.60, 0.42로 각각의 상관성을 계산하였을 때 보다 증가하였다. 비선형 함수인 Chl-a, SS의 값에 따라 TOC는 log함수 기울기를 따라가며 유역면적이 작은 간월호, 남양호, 대호호, 부남호 등의 담수호에서는 Chl-a과 TOC의 상관성이 0.72, SS와 TOC의 상관성은 0.63으로 나타났다. 반면 유역면적이 큰 삼교호, 아산호의 TOC는 Chl-a과 SS의 상관성이 각각 0.73, 0.92로 나타났다. 유역면적이 작은 담수호에서의 경향은 유역면적이 큰 담수호에 비해 기울기가 Chl-a에서는 6.63, SS에서는 8.80으로 더 크게 나타났다. 비록 상관성 분석에서 유의한 결과를 제시할 수 있었으나 시공간적 환경특성이 고려된 예측이 필요할 것으로 사료된다.

실제 TOC는 POC (Particulate Organic Carbon)와 DOC (Dissolved Organic Carbon)의 합으로 구성된다. Chl-a 및 SS는 POC와의 상관성이 더 높은 반면, 내륙의 하천 및 담수호에서는 POC의 양이 약 10% 정도로 DOC보다 상대적으로 많이 적어 Chl-a 및 SS와 TOC의 직접적인 상관관계에서는 작은 상관성을 보인다(Kim et al., 2009). 그러나, 물환경정보포털에서는 DOC를 광학특성으로 간접추정할 수 있는 수질 매개변수가 없으며 POC로 TOC를 추정하는 경우 적절한 자료변환 형태를 도입할 수 있고, DOC의 경우 적절한 유역환경에 따른 다른 함수를 적용하였을 때의 예측 가능성이 올라간 것을 확인할 수 있다. 추가적으로 유역별 계절적으로 다른 TOC의 양

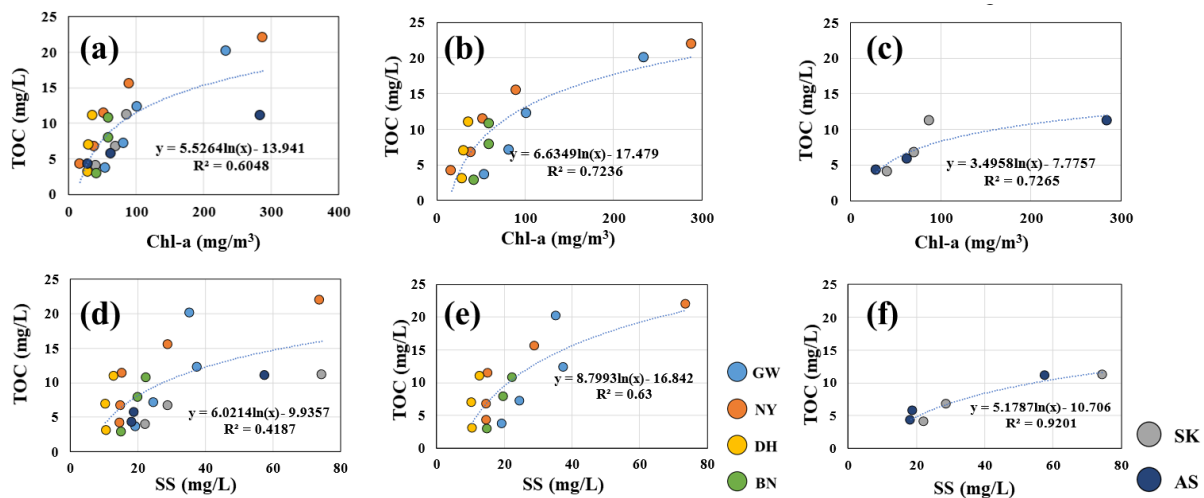


Fig. 3. Trend analysis according to TOC groupings (a) Chl-a-TOC in reservoirs (b) Chl-a-TOC in small watershed reservoirs (Ganwol (GW), Namyang (NY), Daeho (DH), and Bunam (BN)) (c) Chl-a-TOC in large reservoirs (Sapkyo (SK), Asan (AS)), (d) SS-TOC in reservoirs (e) SS-TOC in small watershed reservoirs (GW, NY, DH, BN), (f) SS-TOC in large watershed reservoirs (SK, AS).

상을 DOC 및 POC로 구분하여 조사하여야 하며, 이에 따라 광학특성을 가진 수질인자로 예측할 때 계절 양상을 적용하여 예측하여야 한다(Thurman, 1985).

본 연구에서 적용한 자료변환된 Chl-a 및 SS와 TOC간 비선형 상관성은 추후 분광특성을 이용하여 TOC를 예측할 때 Random forest, Support vector machine 등의 Decision tree와 Artificial Neural Network (ANN)의 Machine-learning기법의 가능성을 보여줄 수 있다. 원격탐사를 통해 Chl-a, SS를 예측하기 위해 Keller et al. (2018)은 6가지의 Machine-learning (Linear, Partial least squares, Random forest, Extremely randomized trees, Adaptive boosting, Gradient boosting, K-nearest neighbors, Support vector machine, Artificial neural networks, Self-organizing maps)을 이용한 바 있으며 Chl-a에서의 R^2 가 0.67~0.88, SS에서의 R^2 가 0.68~0.81로 높은 정확도를 산출한 바 있다.

4. Conclusion

본 연구에서는 원격탐사를 통한 TOC 농도 예측 알고리즘을 개발하기 위한 선행과제로 간접담수호가 많은 서해 담수호 중 물환경측정망에서 수질자료를 제공하는 6개 담수호(간월호, 남양호, 대호호, 부남호, 삼교호 및 아산호)에 대해 광학특성이 있는 Chl-a, TSS를 활용해 예측 가능성을 조사하고자 하였다. 2013~2020년 까지의 자료를 바탕으로 TOC에 대한 분석을 실행한 결과는 다음과 같다.

1) 서해 담수호의 TOC 특성은 남양호에서 7.0 mg/L로 가장 높았고, 대부분이 약간 나쁜 5.0~6.0 mg/L의 분포를 보였다. 시가지 비율이 높고, 낮은 형상계수와 높은 밀집도를 가진 남양호 유역에서는 오염물질이 축적될 수 있는 체류시간이 높아 타 수계보다 오염물질이 누적되기 쉬운 구조로 판단되며, 이에 따라 호소생활환경기준 V 단계로 가장 높은 것으로 판단된다.

2) 서해 담수호의 TOC와 수질인자 간 상관성 분석을 실시한 결과 COD, EC, BOD, Chl-a, SS 순으로 높았다. 한편, 광학특성을 가진 수질인자 간 상관성 분석 결과는 Chl-a, SS에서의 상관계수가 평균적으로 각각 0.28, 0.19로 나타났으며 특히 오염물질 농도가 높은 남양호에서의 상관계수는 0.47, 0.27이며 모두 유의한 것으로 나타났다.

3) 평균 TOC와 Chl-a, SS와의 상관성은 모든 호소에서 0.63 이상이었으며, 상대적으로 유효면적이 큰 호소에서 높게 나타났다. 비록 유의한 상관관계를 확인할 수 있었으나, 시공간적인 환경특성을 고려한 면밀한 분석이 향후 예측 적용을 위해 필요하다고 판단되었다.

본 연구의 결과와 향후 주요 변수들의 시공간적인 복잡성을 고려한 분석을 토대로 추후 원격탐사를 통한 TOC 예측 알고리즘 구축이 필요하다. 또한, 국가측정망에서 관측하지는 않지만 분광특성을 가지고 있는 유색용존유기물(Colored dissolved organic matter, CDOM), 탁도 등을 추가 변수로 고려하여 TOC의 예측 가능성을 평가하는 것도 필요하다. 즉, 각 분광특성을 가진 변수들을 환경특성에 맞게 분석하여 해석하고,

Machine-learning 기법에 적용한다면, 정확도 높은 TOC 예측 알고리즘 개발에 도움이 될 것으로 판단된다.

Acknowledgement

본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 농업기반및재해대응기술개발사업의 지원을 받아 연구되었음(320049-5). 이에 감사드립니다.

References

- 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*, 20(2), 173-180. [Korean Literature]
- Choi, D. H., Jung, J. W., Yoon, K. S., Lee, K. S., Choi, W. J., Lim, S. S., Park, H. N., Yim, B. J., and Hwang, T. H. (2012). Estimation of TOC concentration using BOD, COD in runoff from paddy fields, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 28(6), 813-818. [Korean Literature]
- Choi, M. J., Jung, W. H., Hwang, H. D., and Kim, Y. I. (2018). Water quality improvement plans of Daeho reservoir based on the analysis of watershed characteristics and water quality modelling, *Journal of Korean Society Environmental Engineers*, 40(7), 267-276. [Korean Literature]
- Choi, S. K. and Kim, K. H. (2001). A study of the systematic integration of WASP5 water quality model with a GIS, *The Journal of GIS Association of Korea*, 9(2), 291-307. [Korean Literature]
- Ham, J. H., Yoon, C. G., and Loucks, D. P. (2007). Integrated watershed modeling under uncertainty, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 49(4), 13-22. [Korean Literature]
- Jung, J., Ryu, J. H., Lee, S. H., Oh, Y. Y., Kim, Y. J., Kim, S., Kim, J. H., Hong, H. C., Kim, Y. D., and Kim, S. L. (2016). Characteristics of water quality at freshwater lakes and inflow streams in west reclaimed lands of South Korea, *Journal of Korean Society of Water Science and Technology*, 24(3), 135-147. [Korean Literature]
- Jung, K. Y., Ahn, J. M., Lee, K. L., Kim, S., Yu, J. J., Cheon, S. U., and Lee, I. J. (2015). Development and evaluation of regression model for TOC contentation estimation in Gam stream watershed, *Journal of Environmental Science International*, 24(6), 743-753. [Korean Literature]
- Jung, S. Y. and Kim, I. K. (2017). Analysis of water quality factor and correlation between water quality and Chl-a in middle and downstream weir section of Nakdong river, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 39(2), 89-96. [Korean Literature]
- Keller, S., Maier, P. M., Riese, F. M., Norra, S., Holbach, A., Borsig, N., Wilhelms, A., Moldaenke, C., Zaake, A., and Hinz, S. (2018). Hyperspectral data and machine learning for estimating CDOM, chlorophyll a, diatoms, green algae and

- turbidity, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15, 1881.
- Kim, B. C., Jung, S. M., Jang, C. W., and Kim, J. K. (2007). Comparison of BOD, COD and TOC as the indicator of organic matter pollution in streams and reservoirs of Korea, *Journal of Korean Society Environmental Engineers*, 29(6), 640-643. [Korean Literature]
- Kim, G. H., Baeck, S. H., Jung, Y. H., and Kim, K. T. (2016). Development and evaluation of potential flood damage index for public facilities, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineer*, 58(4), 97-106. [Korean Literature]
- Kim, G. H., Jung, K. Y., Yoon, J. S., and Cheon, S. U. (2013). Temporal and spatial analysis of water quality data observed in lower watershed of Nam river dam, *Korean Society of Hazard Mitigation*, 13(6), 429-437. [Korean Literature]
- Kim, K. Y., Kim, B. C., Eom, J. S., Choi, Y. S., Jang, C. W., and Park, H. K. (2009). The distribution of POC and DOC in four reservoirs on the North Han river and the relationship with algal density, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 25(6), 840-848. [Korean Literature]
- Kim, T. W., Shin, H. S., and Suh, Y. C. (2014). Airborne hyperspectral imagery availability to estimate inland water quality parameter, *Korean Journal of Remote Sensing*, 30(1), 61-73. [Korean Literature]
- Larsen, S., Andersen, T., and Hessen, D. O. (2011). Predicting organic carbon in lakes from climate drivers and catchment properties, *Global Biogeochemical Cycles*, 25(3), 1-10.
- Lee, H., Kang, T. G., Nam, G. B., Ha, R., and Cho, K. H. (2015). Remote estimation models for deriving chlorophyll-a concentration using optical properties in turbid inland waters: Application and valuation, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 31(3), 272-285. [Korean Literature]
- Lee, S. M., Park, K. D., and Kim, I. K. (2020). Comparison of machine learning algorithms for Chl-a prediction in the middle of Nakdong river (focusing on water quality and quantity factors), *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, 34(4), 277-288. [Korean Literature]
- Lim, D. I., Choi, H. W., Kim, Y. O., Jung, H. S., and Kang, Y. S. (2011). Concentration level and grading of water quality components (COD, DIN, DIP, Chlorophyll-a) in Korean coastal waters: A statistical approach, *Ocean and Polar Research*, 33(1), 13-20. [Korean Literature]
- Matthews, M. W. (2011). A current review of empirical procedures of remote sensing in inland and near-coastal transitional waters, *International Journal of Remote Sensing*, 32(21), 6855-6899.
- Ministry of Environment (ME). (2021). Water Environment Information System, http://water.nier.go.kr/web/contents/contentView/?pMENU_NO=68 (accessed Nov. 2021)
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA). (2005). *A research for the salt damage prediction system development of the fresh water reservoir at the reclaimed tideland*, Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Gwacheon, Korea, 10-34. [Korean Literature]
- Park, J. H., Jung, J. W., Kim, D. Y., Kim, K. S., Han, S. W., Kim, H. O., and Lim, B. J. (2013). Water quality characteristics of the major tributaries in Yeongsan and Sumjin river basin using statistical analysis, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 22(2), 171-181. [Korean Literature]
- Ryoo, K. S. and Ha, H. M. (2007). Optimal estimation of water use in the large-scale basin, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineer*, 49(3), 5-12. [Korean Literature]
- Thurman, E. M. (1985). *Organic geochemistry of natural waters*, Maritinus Nijhoff/ Dr W. Junk Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Unganai L. S. and Kogan F. N. (1998). Drought monitoring and corn yield estimation in Southern Africa from AVHRR data, *Remote sensing of Environment*, 63, 219-232.