



계절 Mann-Kendall 검정을 이용한 소양호의 장기 수질 경향성 분석

Long-Term Water Quality Trend Analysis of Lake Soyang Using Seasonal Mann-Kendall Test

염호정^a · 안용빈^b · 정세윤^c · 김윤석^d · 김범철^e · 홍은미^{f,†}

Yeom, Hojeong · An, Yongbin · Jung, Seyoon · Kim, Yoonseok · Kim, Bomchul · Hong, Eunmi

ABSTRACT

The long-term monitoring of the Soyang Lake's water quality, covering 25% of the North Han River watershed, is crucial for effective management of both lake water quality and pollution sources in the broader region. This study utilized continuous monitoring data from the front of the Soyang Dam spanning 2003 to 2022, aiming to analyze trends and provide foundational insights for water quality management. Results revealed a slightly poor grade (IV) for total nitrogen (T-N) in both surface and mid-depth layers, indicating a need for concentrated T-N management. Trend analyses using the Mann-Kendall test and Sen's Slope depicted a decreasing trend in total phosphorus (T-P) for both layers, attributed to non-point source pollution reduction projects initiated after the Soyang Lake's designation as a pollution control area in 2007. The LOWESS analysis showed a T-P increase until 2006, followed by a decrease, influenced by the impact of Typhoon Ewinar in that year. This 20-year overview establishes a comprehensive understanding of the Soyang Lake's water quality and trends, allowing for a seasonal and periodical analysis of water quality changes. The findings underscore the importance of continued monitoring and management strategies to address evolving water quality issues in the Soyang Lake over time.

Keywords: Trend analysis; Soyang Lake; long-term monitoring; Mann-Kendall test; LOWESS analysis

1. 서론

수생태계는 타 생태계의 건강성과도 밀접한 연관성을 갖고 있어 타 생태계에 의해 영향을 받기 쉽다. 따라서 장기간의 수질 모니터링을 통해 그 변동성을 파악하는 것이 중요하다. 또한 장기 수질 모니터링은 생태계 건강성 평가를 통해 지속 가능한 수자원 관리에 기여하므로 환경·생태학적 측면에서 중요하며, 특히 호수에서의 장기 수질 모니터링은 수질 및 유역의 오염원 관리에 핵심적인 역할을 하고 있다. 이에 더해,

장기 수질 모니터링은 홍수나 폭우와 같은 재해 상황에서의 신속 대처 능력을 향상시키는 데 도움이 되어 기후변화에 따른 수질 변화 예측에도 중요한 역할을 하고 있다 (Park and Sin, 2022; Jeon et al., 2020).

우리나라는 사계절이 뚜렷하여 계절마다 기후의 편차가 크고, 여름철에 강수량이 집중된 형태를 보인다. 그러나 과거 30년 (1912~1940) 대비 최근 30년 (1991~2020) 동안 우리나라 평균 강수량은 뚜렷하게 증가하고 강수일수는 감소하면서 강수강도는 증가하는 경향을 보이고 있다 (KMA and NIMS). 이러한 강수강도의 증가는 유역으로의 탁수를 포함한 비점오염원 유입을 증가시켜 탁도, T-P 등 수질을 오염시킬 수 있다. 최근에는 이러한 기후변화로 인한 강수패턴 변화가 수질오염과 부영양화를 증가시키고 있다는 보고가 있어, 이에 대한 연구가 더욱 중요해지고 있다 (Kim et al., 2018; Kang et al., 2021).

수생태계에 영향을 미치는 인자를 파악하여 유역의 수질을 관리하기 위해서는 체계적인 모니터링을 통해 수질의 변동을 정확히 분석하는 것이 필요하다. 수질의 경향을 분석하는 것은 유역 내 대책 평가와 향후 대책 수립 모두를 위해 필요하다 (Kal et al., 2022). 그러나 수질 데이터는 일반적으로 정규 분포 형태를 가지기보다는 비정규 분포 형태를 가지는 경우가 많으며, 이 경우 관측치의 정규분포에 대한 가정 없이 분석이 가능한 비모수적 통계기법을 적용하면 해석의 오차를 줄일

^a Undergraduate Student, Department of Environmental Science, Kangwon National University

^b MS Student, Department of Environmental Management, Kangwon National University

^c MS Student, Department of Environmental Management, Kangwon National University

^d MS Student, Department of Environmental Management, Kangwon National University

^e Professor Emeritus, Department of Environmental Science, Kangwon National University

^f Associate Professor, Department of environmental Science, Kangwon National University

[†] Corresponding author

Tel.: +82-33-250-8571

E-mail: eunmi.hong@kangwon.ac.kr

Received: December 13, 2023

Revised: January 18, 2024

Accepted: January 19, 2024

수 있다 (Montgomery and Reckhow, 1984; Sokal and Rohlf, 1995). 수질의 경향성 분석을 위해 국내·외에서 많이 사용되고 있는 통계분석 방법으로는 Mann-Kendall 분석, 계절 Mann-kendall 분석 등이 있다.

경향성 분석에 대한 과거 연구 사례를 살펴보면, 국내에서는 Jung et al. (2018)은 낙동강 수계 남강에서의 수질측정 자료를 이용하여 장기적인 수질 추세를 분석하였고, Kim et al. (2020)은 낙동강 수계 물환경측정망 자료를 이용하여 상·하류 위치에 따른 수질 경향을 분석하였다. 또한 Cho et al. (2019)는 한강수계 지류 하천의 수질 모니터링 자료를 이용하여 장기간의 수질변화와 각 지점 및 항목 간 영향 관계를 분석하였다.

국외에서는 Attiah et al. (2023)은 캐나다 Northwest Territories의 North Slave 지역에 있는 중소형 호수 535개의 호수 표면 온도의 추세와 공간 분포를 분석하였고, Kisi and Ay (2014)는 Mann-Kendall과 Şen의 추세 분석을 사용하여 터키 Kizilirmark 강의 수질 및 하천 흐름 매개변수의 추세를 분석하였다. Stefanidis et al. (2023)은 Copernicus Water Data를 사용하여 22개 유럽 호수의 탁도 및 부영양화 지수 (TSI)의 변동성을 분석한 사례가 있다.

1973년 완공된 소양호는 국내 최대의 인공호로서 다양한 생물들이 살아가는 서식처이며, 생태계를 보전하고 미래 자원을 보존하기 위해서는 지속 가능한 수질 관리가 필요하다. 또한 소양호 유역은 북한강 유역의 25%를 차지하며 북한강 수질 관리에서 중요한 역할을 하고 있다. 소양호가 위치한 춘천, 인제, 양구 지역은 강수량 증가율이 강원도와 우리나라 평균보다 낮으나, 미래에 강수량으로 인한 영향이 커져 물 관리가 더욱 어려워질 것으로 전망되고 있다 (KMA and GROMA, 2015a, b, c). 게다가 소양호는 강우 시 상류 유역의 비점오염 원으로부터 탁수가 유출되면 호소수의 수질이 악화되어 유역 내 어민들의 생계가 곤란해지는 등 지속적으로 문제가 되고 있다.

또한 소양호는 수심이 매우 깊고 열용량이 큰 온대일순환 호 (warm monomictic lake)로 분리되어 계절별 수질의 차이가 크므로, 소양호의 수질을 계절별로 나누어 분석하는 것이 필요하다. 이와 관련해서 Park (1999)은 클로로필-a (chlorophyll-a, Chl-a) 자료를 이용하여 소양호를 포함한 국내 주요 호수의 경향을 분석하였다. Park (2017)은 소양호를 포함한 국내 28개 호소의 부영양화 지수와 경향을 분석하였으나 기존 연구는 비교적 과거에 진행되었으며, 계절별 분석을 수행하지 않아 소양호의 최근 수질에 관한 경향성 연구가 필요한 실정이다.

이에 본 연구에서는 소양강댐에서의 장기간의 수질 모니터

링 자료를 이용하여 소양호의 수질을 전 기간과 계절별, 표층과 중층으로 나누어 분석하고, 경향성 분석을 통해 수질 인자의 계절적 변화 양상을 파악하여 소양호의 수질관리를 위한 대책 수립의 기초자료를 제공하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 연구대상 지역

연구 지역인 소양호는 강원도 춘천시, 양구군, 인제군에 걸쳐있는 국내 최대 규모의 호수로, 소양호가 위치한 춘천, 양구, 인제 지역은 연 강수량의 약 60%가 여름철에 집중되어 있으며, 강수량이 증가하는 현상과 함께 강우일수는 감소하고 강우강도가 증가하는 특징을 보이고 있다 (KMA and GROMA, 2015a, b, c). 소양호의 유역면적은 2,703 km², 총저수량은 약 29억 톤 (ton)에 달하며 한강 하류 수도권 지역의 수자원 공급을 담당하고 있다. 소양호는 유역 길이가 길고 폭이 좁은 반면 수심이 깊은 특성을 갖고 있어 한겨울에도 얼지 않는 온대일순환호로 분리된다 (Lee, 2020). 온대일순환호는 여름에는 표층 수온이 상승하여 성층이 형성되고, 겨울에는 표층의 물이 냉각되어 침강하면서 수직혼합되는 특징이 있다.

2. 모니터링 방법

본 연구에서는 2003년부터 2022년까지 총 20년 동안 월 2회 측정을 하였으며, 소양호에서 가장 수심이 깊은 지점의 수심 0, 40 m에서 모니터링을 실시하였다 (Fig. 1). 수질은 표층 (0 m)과 중층 (40 m)으로 구분하여 분석하였으며, 두 층의 대표수심 선정은 성층현상으로 봤을 때 가장 대표성을 띄는 것으로 보이는 수심으로 선정하였다. 또한 측정된 수질 데이터 중 2017년에 0 m의 T-N, T-P, Chl-a가 결측되었으며, 2016

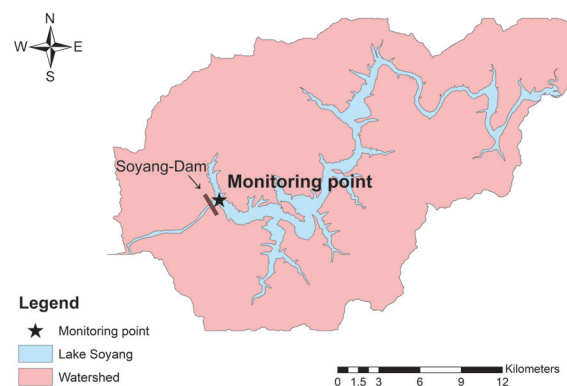


Fig. 1 Location of monitoring point on the Lake Soyang

~2020년에 0 m의 COD와 40 m의 COD, T-N, T-P, Chl-a가 일부 결측되었다.

수질 모니터링 항목은 수온 (water temperature, WT), 전기 전도도 (electric conductivity, EC), 화학적 산소요구량 (chemical oxygen demand, COD), 총질소 (total nitrogen, T-N), 총인 (total phosphorus, T-P), Chl-a 이다. 수온과 EC는 현장에서 YSI PROPLUS (Mobile Multi Sensor Meter)를 이용하여 즉시 측정하였고, 나머지 항목들은 채수한 시료를 실험실로 운반하여 수질오염공정시험기준에 의거하여 측정하였다. 측정법은 COD는 알칼리성 과망간산칼륨법 (alkaline permanganate), T-N은 자외선/가시선 분광법-산화법 (UV/Visible spectrometry - oxidation method), T-P는 자외선/가시선 분광법 (UV/Visible spectrometry), Chl-a는 UNESCO법을 사용하였다.

3. 계절 Mann-Kendall 분석

Mann-Kendall test는 각 계절에 대한 측정값의 상대적인 크기를 계산하여 계절성을 배제하는 비모수적 통계 방법으로서 장기적인 시계열 자료의 경향성을 분석하는데 많이 이용된다 (Mann, 1945; Kendall, 1975). Dietz와 Kileen에 의하여 Mann-Kendall 통계치의 공분산이 제시되고, 계절적 변동특성을 갖는 수질 자료에 대해서도 적용이 가능하도록 확장되었다 (Hirsch and Slack, 1984). 계절 Mann-Kendall 분석은 상관 계수인 켄달의 타우 (Kendall tau)를 구하여 그 유의성을 검증함으로써 경향성의 유무를 파악하고, 이에 수반되는 계절 켄달 기울기 통계량 (Seasonal Kendall slope estimator)을 구하여 경향성의 정도를 판단할 수 있다.

자료는 연도별 월평균 시계열 자료를 이용하게 되며, 켄달 통계 추정치 S_i 는 i 월에서의 관찰치 간의 차이의 합으로 Eq. (1)과 같이 정의된다 (Kim, 2008).

$$S_i = \sum_{k=1}^{n_i-1} \sum_{j=1}^{n_i} \text{sgn}(x_{ij} - x_{ik}) \quad (1)$$

$$\text{sgn}(x_{ij} - x_{ik}) = \begin{cases} 1 & \text{if } x_{ij} - x_{ik} > 0 \\ 0 & \text{if } x_{ij} - x_{ik} = 0 \\ -1 & \text{if } x_{ij} - x_{ik} < 0 \end{cases} \quad (2)$$

여기서 $j = k + 1$ 이며, $\text{sgn}(x_{ij} - x_{ik})$ 는 지시자 (indicator)로서 i 월 데이터 중 j 연도와 k 연도의 차를 1, 0, -1으로 나타낸다 (Eq. (2)). 각 월별 통계량 S_i 를 모두 합하여 구한 전체 켄달 통계량 S 는 다음과 같다 (Eq. (3)).

$$S = \sum_{i=1}^n S_i \quad (n = 1, \dots, 12) \quad (3)$$

여기서, n 은 개월의 수이다. S 통계량이 양의 값을 가질 경우 시간에 따라 증가하는 추이를 나타내고, 음의 값을 가질 경우 시간에 따라 감소하는 추이를 나타낸다 (Kim, 2008). 또한 S 에 대한 분산은 다음과 같이 정의할 수 있으며, 통상적으로 표본이 30을 넘을 경우에는 정규분포라 가정하고 $n_i \rightarrow \infty$ 에 대하여 S_i 를 정규분포로 나타낸다 (Eq. (4)).

$$\begin{aligned} \text{Var}[S] &= \sum_{i=1}^{12} \text{Var}[S_i] \\ &= \sum_{i=1}^{12} \frac{n_i(n_i-1)(2n_i+5) - \sum t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 t_i 는 i 월 내에서 같은 데이터의 개수를 의미한다. 또한 표준정규분포를 위한 표준화 변수 Z 은 다음과 같다 (Eq. (5)).

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{[\text{Var}(S)]^{1/2}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{[\text{Var}(S)]^{1/2}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

본 연구에서는 연도별 월평균 시계열 자료를 이용하여 95% 신뢰구간에서 유의수준 $\alpha=0.05$ 에 대하여 양측검정을 실시하였다. 또한 표준화 변수 Z 값을 이용하여 구한 p -value가 0.05 이상이면 경향성이 없다는 귀무가설을 수용하고 통계적으로 유의하지 않다고 판단하였으며, p -value가 0.05 미만일 때 경향성이 있다는 대립가설을 수용하여 통계적으로 유의하다고 판단하였다.

또한 계절성을 가지고 있는 자료의 장기 수질 경향성을 파악하기 위하여 Excel용 통계 소프트웨어인 XLSTAT을 이용하여 계절 Mann-Kendall 분석을 시행하였으며, 결측치는 무시하였다.

4. Sen's Slope

Sen's Slope는 데이터에 대한 추세 기울기를 선형 모델을 사용하여 평가하는 방법으로, Sen (1968)에 의해 제안되었다. 이 방법은 특이값에 영향을 받지 않고, 자료가 누락된 경우에도 분석이 가능하다. 아래 식은 기울기 산정식이다 (Eq. (6)).

$$Q_i = \frac{X_j - X_k}{j - k} \quad (i = 1, \dots, n) \quad (6)$$

여기서 X_j , X_k 는 각각 j 와 k 시간에서의 데이터 값이다 ($j > k$). 하나의 측정치에서 $N = n(n-1)/2$ 이며 n 은 자료기간의 수이다. 다수의 측정치에서 $N < n(n-1)/2$ 이며 n 은 측정치의 총수이다. N 값은 크기순으로 정렬 가능하며, 이에 대한 Sen's slope 추정량의 중앙값 Q_{med} 는 아래와 같다 (Eq. (7)).

$$Q_{med} = \begin{cases} Q_{[(n+1)/2]} & , \text{if } N \text{ is odd} \\ \frac{Q_{[n/2]} + Q_{[(n+2)/2]}}{2} & , \text{if } N \text{ is even} \end{cases} \quad (7)$$

Q_{med} 는 데이터의 경향을 나타내며, 그 값들은 경향의 기울기를 나타낸다. 결과에서 Sen's slope는 $p \leq 0.05$ 일 때 통계적으로 유의하며, $p > 0.05$ 일 경우 통계적으로 유의한 경향성은 없다고 판단한다. 또한 Sen's slope는 Q_{med} 값이며 양의 값은 증가하는 경향을 나타내고 음의 값은 감소하는 경향을 나타낸다. 본 연구에서는 계절 Mann-Kendall 분석의 유의수준 $\alpha = 0.05$ 에 따라 신뢰구간을 계산하였으며, 신뢰구간은 아래와 같다 (Eq. (8)).

$$C_a = Z_{1-\alpha/2} \sqrt{VAR(S)} \quad (8)$$

여기서 $VAR(S)$ 는 S 에 대한 분산으로 Mann-Kendall 분석에서 사용한 값이며, $Z_{1-\alpha/2}$ 는 표준정규분포로부터 얻을 수 있다. Q_{min} 과 Q_{max} 는 신뢰구간의 하향한계와 상향한계이며 Q_{med} 와 유사한 특성을 보인다.

본 연구에서는 XLSTAT 프로그램을 이용하여 계절 Mann-Kendall 분석을 시행하였으며, 이를 통해 Sen's Slope를 산정하여 수질 경향성을 판단하였다.

5. LOWESS 분석

계절 Man-Kendall 분석법은 연구 대상 기간 동안 선형 경향을 나타내기 때문에 연구기간 중에 경향성이 변할 경우 이를 적절히 반영할 수 없다. 따라서 특정 기간 내 변화하는 경향성을 파악하고, 수질 자료의 변화 경향을 정성적으로 분석하기 위하여 LOWESS (Locally Weighted Scatter plot Smoother) 분석법을 채택하였다. LOWESS 분석을 위해 SPSS V26을 이용하여 LOWESS 적합을 분석하고, 그 결과를 시각화하였다.

LOWESS 분석은 좌표 (x_i, y_i) 를 중심으로 데이터의 가중

값 함수를 적용하여 이동직선 (moving line)을 구하고, 이로부터 y 의 평활점 (smoother)을 얻은 후 이 평활점들을 직선으로 연결한 것이다. 이동선 (x_i, y_i) 은 $x = x_i$ 를 중심으로 일정 간격에 걸친 수직 띠를 만들고, $x = x_i$ 를 중심으로 $n \times f$ 에 가장 가까운 정수 데이터를 포함하도록 수직 띠의 폭을 결정하여 계산할 수 있다 (Eq. (9)).

$$\hat{y}_i \leftarrow \min_{\beta_0, \beta_1} \sum_{|j-i| \leq k} \omega_{|j-i|} (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i)^2 \quad (9)$$

여기서 $i = 1, \dots, n$ 이고, f 는 자료크기 대비 평활기의 너비로 표현된다. f 는 $0 < f < 1$ 의 범위를 갖는 평활상수로서 흔히 $1/3 < f < 2/3$ 가 추천되며, 평활기의 너비 f 를 크게 하면 과소적합 (under-fitting)으로 회귀함수가 직선에 가까운 곡선이 되고, f 를 작게 하면 과다적합 (over-fitting)으로 곡선의 휨 정도가 큰 곡선이 된다 (Cleveland, 1979; Cleveland and Devlin, 1988).

III. 결과 및 고찰

1. 소양호 최근 20년 수질 현황

2003년 1월부터 2022년 12월까지 매일 측정된 소양호 수질 자료를 사용하여 수질 모니터링 현황을 분석하였으며, 전체 조사기간의 수질 변동을 Fig. 2에 나타내었다. 수질은 전 기간 (All Period)과 봄 (3~5월), 여름 (6~8월), 가을 (9~11월), 겨울 (12~2월)로 구분하였으며, COD와 T-N, T-P, Chl-a의 평균, 최대, 최솟값과 호소생활환경기준을 평가하였다 (Table 1). 2016년부터 2020년까지의 결측값은 무시하였다.

평가 결과 표층 (0 m)의 전 기간 평균 COD는 2.26 mg/L, T-N은 1.43 mg/L, T-P는 9.96 μ g/L, Chl-a는 3.18 mg/m³로 나타났으며, 호소수 수질환경기준으로 평가한 결과 COD는 좋음 (Ib), T-N은 약간나쁨 (IV), T-P와 Chl-a는 각각 매우좋음 (Ia) 등급으로 나타났다. 중층 (40 m)의 수질은 전 기간 평균 COD 2.49 mg/L, T-N 1.48 mg/L, T-P 16.55 μ g/L, Chl-a 1.40 mg/m³로 나타났고, 호소수 수질환경기준으로 평가한 결과 평균 COD와 T-P는 좋음 (Ib), T-N은 약간나쁨 (IV), Chl-a는 매우좋음 (Ia) 등급으로 나타났다.

전 기간과 계절별로 나누어 비교한 결과, 표층 (0 m)의 평균 COD, Chl-a는 전 기간보다 여름, 가을 시기에 더 높게 나타났으며, T-N은 봄, 여름, 가을에 더 높게 나타났고, T-P는 가을, 겨울에 더 높게 나타났다. 중층 (40 m)의 평균 COD와 T-P는 전 기간보다 여름, 가을에 더 높게 나타났으며, T-N은 여름에 더 높게 나타났다. 또한 Chl-a는 겨울에 더 높은 것으로 나타났다.

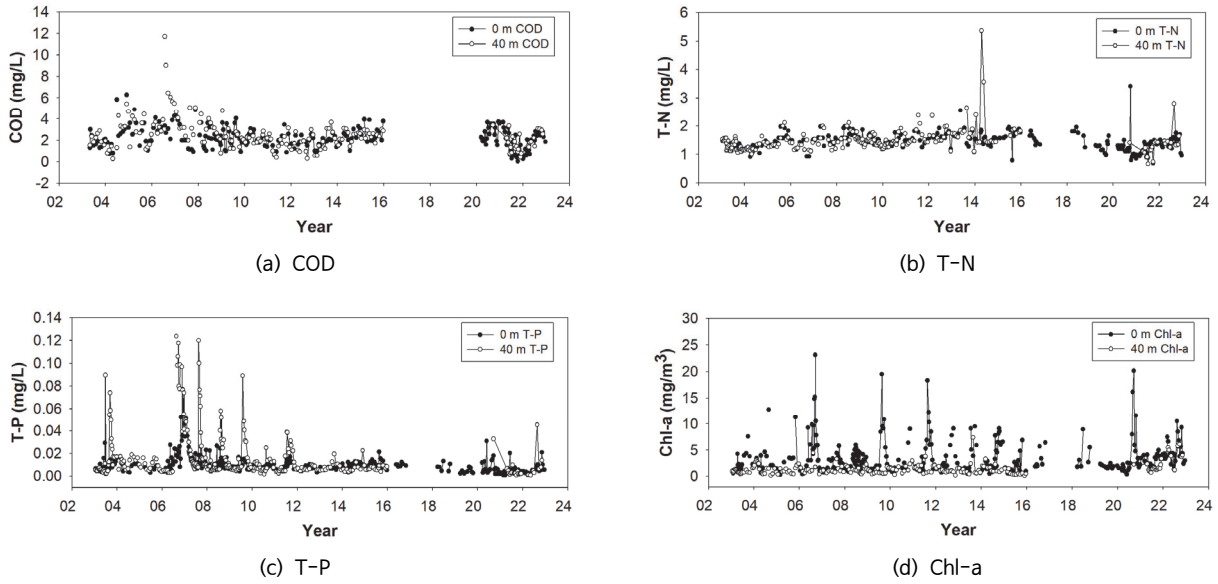


Fig. 2 Water quality variations over the entire period

Table 1 The water quality of the Soyang Lake

Season	Division	Epilimnion (0 m)				Metalimnion (40 m)			
		COD (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (µg/L)	Chl-a (mg/m ³)	COD (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (µg/L)	Chl-a (mg/m ³)
All Period (n=2,326)	MIN.	0.03	0.68	0.83	0.30	0.27	0.66	0.83	0.10
	MAX.	6.30	3.42	77.08	23.09	11.71	5.37	123.71	7.40
	AVG.	2.26(lb)*	1.43(V)	9.96(la)	3.18(la)	2.49(lb)	1.48(V)	16.55(lb)	1.40(la)
	STDEV.	0.99	0.28	7.77	3.12	1.42	0.41	21.85	1.07
Spring (n=650)	MIN.	0.62	0.92	0.83	0.40	0.27	1.01	0.83	0.35
	MAX.	4.91	2.55	31.00	9.28	3.94	5.37	30.10	5.47
	AVG.	2.22(lb)	1.43(V)	8.37(la)	1.89(la)	2.14(lb)	1.47(V)	7.86(la)	1.34(la)
	STDEV.	0.88	0.26	5.19	1.32	0.87	0.59	5.09	1.00
Summer (n=628)	MIN.	0.30	0.79	3.00	0.30	0.74	0.66	1.44	0.32
	MAX.	5.86	1.97	29.46	19.51	11.71	2.80	123.71	7.40
	AVG.	2.27(lb)	1.46(V)	9.66(la)	4.00(la)	2.70(lb)	1.54(VI)	19.23(lb)	1.39(la)
	STDEV.	0.97	0.25	4.91	3.57	1.91	0.37	26.17	1.34
Fall (n=579)	MIN.	0.03	0.68	2.00	0.40	0.31	0.74	0.94	0.10
	MAX.	6.30	3.42	52.12	23.09	6.47	2.11	117.76	6.10
	AVG.	2.30(lb)	1.45(V)	10.97(lb)	5.11(lb)	2.65(lb)	1.46(V)	25.90(II)	1.34(la)
	STDEV.	1.01	0.34	7.09	3.94	1.30	0.27	27.31	1.07
Winter (n=469)	MIN.	0.27	0.85	1.00	0.30	0.56	1.09	2.12	0.40
	MAX.	4.29	1.87	77.08	6.53	5.48	2.39	76.70	3.34
	AVG.	2.23(lb)	1.37(V)	11.62(lb)	1.79(la)	2.44(lb)	1.43(V)	13.77(lb)	1.59(la)
	STDEV.	1.09	0.21	13.35	1.06	1.28	0.26	16.54	0.69

* Water Quality Standards for Reservoirs (Ia : Very good, Ib : Good, II : Slightly good, III : Average, IV : Slightly bad, V : Bad, VI : Very Bad)

2. 소양호의 계절 Mann-Kendall 분석 결과

측정 데이터를 이용하여 전 기간 (All period)과 계절별로 나누어 계절별 분석을 수행하였다. 계절 Mann-Kendall 분석을 이용하여 유의수준 5% 이내인 경우 경향성이 있는 것으로 평가하였으며, 계절 Mann-Kendall 분석과 Sen's Slope 산정 결과를 이용하여 증가 (Up), 감소 (Down), 경향없음 (No Trend)으로 구분하였다. 2016년부터 2020년까지의 결측값은 무시하였다. 계절 Mann-Kendall 분석과 Sen's Slope에 대한 결과를 Table 2에 나타내었다.

경향성 분석 결과, 표층 (0 m)에서 수온은 전 기간과 봄, 여름 세 시기에 p -value 0.05 미만으로 경향성이 있는 것으로 나타났으며, 각각 Sen's Slope 값 0.038, 0.087, 0.093으로 증가

하는 경향을 보였다. 또한 EC는 전 기간과 여름에 p -value 0.05 미만으로 경향성이 있는 것으로 나타났으며, 각각 Sen's Slope 값이 0.858, 1.557로 증가하는 경향을 보였다. T-P는 전 기간과 가을, 겨울 세 시기에 p -value 0.05 미만으로 경향성이 있는 것으로 나타났으며, Sen's Slope 값이 각각 -0.188, -0.242, -0.382로 모두 감소하는 경향을 보였다. 표층 (0 m)에서 경향성은 수온과 T-P에서 가장 많이 나타났으며, COD와 T-N, Chl-a 항목은 모두 p -value 값이 0.05 이상으로 경향성을 보이지 않았다.

중층 (30 m)에서 T-N은 겨울에 p -value 값이 0.05 미만으로 경향성이 있는 것으로 나타났으며, Sen's Slope 값이 0.027로 증가하는 경향을 나타냈다. T-P는 전 기간과 가을, 겨울에 경

Table 2 Seasonal Mann-Kendall test results at 0 m and 40 m

Items	Period	Epilimnion (0 m)			Metalimnion (40 m)		
		p-value	Slope	Trend	p-value	Slope	Trend
WT	All period	0.028	0.038	Up	0.186	0.057	No trend
	Spring	0.041	0.087	Up	0.175	0.031	No trend
	Summer	0.001	0.093	Up	0.765	0.022	No trend
	Fall	0.721	-0.006	No trend	0.730	-0.038	No trend
	Winter	0.461	0.013	No trend	0.903	0.009	No trend
EC	All period	0.028	0.858	Up	0.489	0.329	No trend
	Spring	0.064	0.940	No trend	0.229	0.825	No trend
	Summer	0.001	1.557	Up	0.096	0.766	No trend
	Fall	0.055	0.787	No trend	0.368	0.302	No trend
	Winter	0.773	0.160	No trend	0.839	0.147	No trend
COD	All period	0.139	-0.040	No trend	0.228	-0.041	No trend
	Spring	0.506	-0.027	No trend	0.626	-0.035	No trend
	Summer	0.306	-0.052	No trend	0.074	-0.079	No trend
	Fall	0.506	0.023	No trend	0.690	-0.012	No trend
	Winter	0.350	-0.034	No trend	0.127	-0.119	No trend
T-N	All period	0.757	0.006	No trend	0.079	0.025	No trend
	Spring	0.825	0.004	No trend	0.101	0.026	No trend
	Summer	0.965	0.001	No trend	0.282	0.015	No trend
	Fall	0.398	0.009	No trend	0.564	0.010	No trend
	Winter	0.965	-0.002	No trend	0.001	0.027	Up
T-P	All period	0.020	-0.188	Down	0.033	-0.533	Down
	Spring	0.096	-0.258	No trend	0.239	-0.155	No trend
	Summer	0.506	-0.077	No trend	0.093	-0.683	No trend
	Fall	0.026	-0.242	Down	0.026	-1.038	Down
	Winter	0.000	-0.382	Down	0.005	-0.456	Down
Chl-a	All period	0.306	0.036	No trend	0.006	0.052	Up
	Spring	0.690	-0.023	No trend	0.139	0.033	No trend
	Summer	0.350	-0.087	No trend	0.435	0.024	No trend
	Fall	0.626	0.070	No trend	0.306	0.040	No trend
	Winter	0.079	0.059	No trend	0.747	0.015	No trend

향성이 있는 것으로 나타났으며, Sen's Slope 값은 각각 -0.533, -1.038, -0.456으로 모두 감소하는 경향을 나타냈다. 또한 가을 시기의 T-P는 Sen's Slope 값이 모든 분석결과 중 가장 낮은 것으로 나타나 가장 크게 감소하는 경향을 보였다. Chl-a는 전 기간에서 p -value값이 0.006으로 경향성이 있는 것으로 나타났으며, Sen's Slope값이 0.052로 증가하는 경향을 보였다. 중층 (30 m)에서 경향성은 T-P에서 가장 많이 나타났으며, 수온과 EC, COD 항목은 모두 p -value값이 0.05 이상으로 경향성을 보이지 않았다.

표층과 중층 분석 결과, T-P는 경향성 분석 항목 중 유일하게 두 층 모두 봄과 여름을 제외하고 감소하는 경향을 나타냈다. 소양호는 2007년 비점오염원관리지역으로 지정된 이후 소양강댐 탁수저감대책, 고랭지밭 비점관리대책 등의 비점관리대책을 지속적으로 추진하여 비점오염원을 관리하고 있다. 이에 따라 사업 초기 5년간의 토양유실 저감량은 48,010.6 톤으로 산정되었으며, 이후에도 소양호 유역의 비점오염 저감 사업에 관한 연구는 여러 연구를 통해 이뤄지고 있다 (Choi

et al., 2014; Choi, 2014; Jeon, 2016; Cho, 2018). 이를 통해 소양호의 T-P가 대체로 감소하는 경향을 나타낸 것은 소양호 유역에서 진행되는 비점오염 저감사업의 결과인 것으로 사료된다.

또한 수온과 EC는 중층에서 모두 경향성을 보이지는 않았으나, 두 층 모두 대부분의 Sen's Slope값이 양수로 나타나 점차 증가하고 있음을 알 수 있었다. 우리나라의 장기적인 기후변화는 봄과 겨울의 기온 상승이 뚜렷하고, 최근 10년을 과거와 비교했을 때 평균 기온이 증가하고 여름의 기온 상승이 뚜렷한 것으로 관측되고 있다 (KMA and NIMS, 2021). 이를 통해 소양호의 수온과 EC는 지구온난화로 인한 기온 상승에 영향을 받은 것으로 추정된다.

3. 소양호의 LOWESS 분석 결과

계절 Mann-Kendall 분석법은 선형 경향을 나타내기 때문에 연구 기간 중의 경향성 변동을 파악할 수 없다. 따라서 세부적

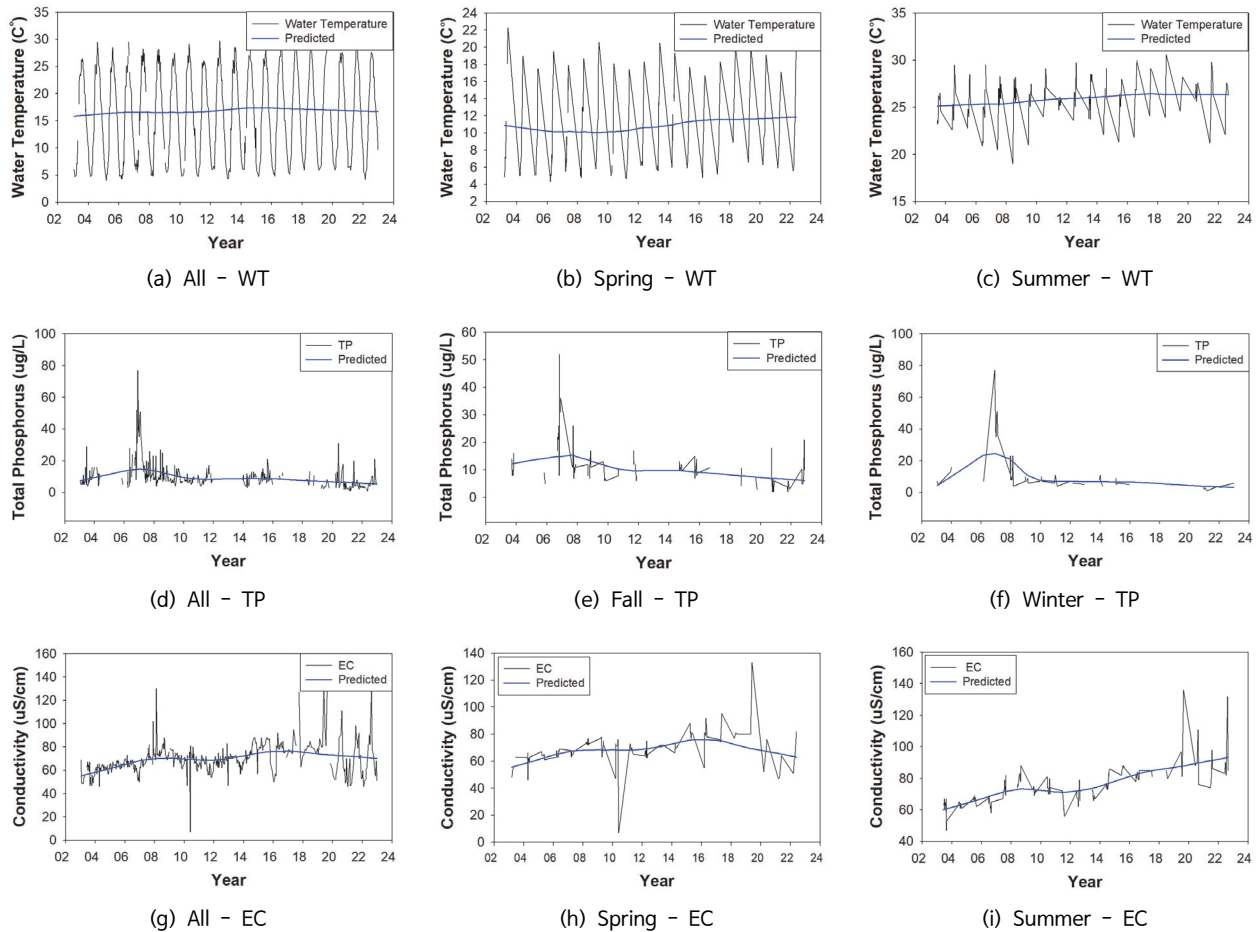


Fig. 3 LOWESS curves for water quality parameters at 0 m.

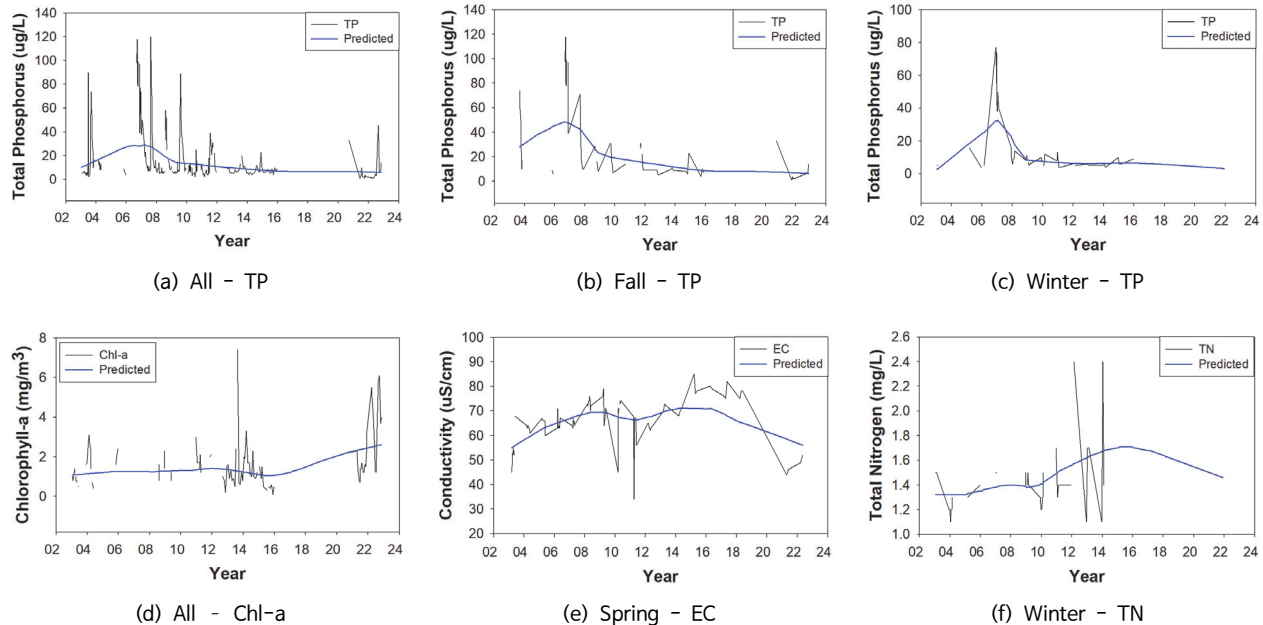


Fig. 4 LOWESS curves for water quality parameters at 40 m

인 수질변동을 파악하기 위하여 LOWESS 분석을 실시하였다. 계절 Mann-Kendall 분석과 Sen's Slope에 대해 유의한 결과를 나타낸 각 수질항목과 유의하지 않은 결과 중 가장 높은 Sen's Slope값을 갖는 수질항목을 LOWESS 곡선을 이용하여 나타내었다 (Figs. 3, 4).

LOWESS 분석 결과 표층 (0 m)에서 수온은 봄 시기에 2009년까지 감소하다가 이후 증가하는 경향을 보였다. 또한 T-P는 2006년까지 증가했다가 이후 감소하는 경향을 보였다. 이는 2006년 태풍 에위니아 상륙으로 인한 영향과 함께 2007년 비점오염원 관리지역으로 지정된 영향인 것으로 판단된다. 또한 EC는 전 기간 약한 증가 추세를 보였으나 여름 시기에는 특히 강하게 증가하는 경향을 보였다. 이는 지구온난화에 의한 수온 상승과 여름철 강우에 의한 탁수 유입에 영향을 받았기 때문인 것으로 판단된다. 중층 (40 m)에서 T-P는 전체적으로는 감소하는 경향을 나타내었으나 표층과 동일하게 2006년에 증가하였다가 다시 감소하는 경향을 보였다. 전 기간 Chl-a는 2016년 이후 증가하는 경향을 보였다. 또한 겨울 시기에 T-N은 2016년까지 증가하다가 이후 감소하는 경향을 보였다. 소양호는 2015년에 인북천유역 만대지구와 인북천유역 가야지구, 내린천유역 자운지구가 비점오염원관리지역으로 재지정되었으며, 본 연구의 데이터와 물환경정보시스템 수질측정망의 수질 데이터를 비교한 결과 중층 T-N의 감소는 비점오염원 관리사업의 영향을 받은 것으로 추정된다.

계절 Mann-Kendall 분석 결과, p-value값이 0.05 이상으로

유의하지 않는 것으로 나타난 결과 중 Sen's Slope 값이 가장 높은 항목은 표층 (0 m)와 중층 (40 m) 모두 봄 시기의 EC인 것으로 나타났다. 두 결과는 20년 동안의 통계적 경향성은 보이지 않았으나, 2008년과 2016년에 상승하고, 2012년에 감소하는 형태를 보였다.

IV. 결론

본 연구는 수질 인자의 계절적 변화 양상을 파악하여 소양호의 수질관리를 위한 기초자료를 제공하고자 실시하였다. 소양호 댐 앞 지점을 대상으로 2003년 1월부터 2022년 12월까지 총 20년간의 데이터를 이용하였으며, 계절 Mann-Kendall 분석과 LOWESS 분석법을 이용하여 6개의 수질항목에 대하여 분석을 실시하였다.

수질현황 조사 결과 대부분 Ib 등급 이상으로 양호한 상태를 보였으나, 표층과 중층 모두 T-N 항목이 호소수 수질환경기준 약간나쁨 (IV) 등급으로 나타나 T-N에 대한 집중적인 관리가 필요할 것으로 판단된다.

계절 Mann-Kendall 분석 결과 T-P는 표층과 중층 모두 봄과 여름을 제외하고 감소하는 경향을 나타냈는데, 이는 2007년 소양호가 비점오염원관리지역으로 선정된 이후 진행된 비점오염 저감사업의 결과인 것으로 판단된다. 또한 수온과 EC는 중층에서 모두 경향성을 보이지는 않았으나, 두 층 모두

대부분의 Sen's Slope값이 양수로 나타나 점차 증가하고 있음을 확인할 수 있었다. 이는 지구온난화로 인한 기온 상승에 영향을 받은 것으로 판단된다.

LOWESS 경향분석 결과 T-P는 2006년까지 증가하다가 이후 감소하는 경향을 보였다. 이는 2006년 태풍 에위니아 상륙으로 인한 영향인 것으로 판단된다. 또한 계절 Mann-Kendall 분석 결과 유의하지 않은 것으로 나타난 항목 중 봄 시기의 EC는 두 층 모두 유의하지 않은 결과 중 가장 큰 Sen's Slope 값을 갖는 것으로 나타났다. 이는 수온 상승과 여름철 강우에 의한 탁수 유입에 영향을 받은 것으로 추정된다.

본 연구를 통해 소양호의 20년간의 수질 현황과 수질 변동 양상을 분석할 수 있었다. 이를 통해 T-P는 경향성 분석 항목 중 유일하게 감소하는 경향으로 나타나 비점오염 저감사업이 좋은 효과를 보였음을 알 수 있었으며, 소양호의 T-N 관리 방향을 재설정할 필요가 있음을 확인할 수 있었다. T-N은 주로 축산폐수와 같은 인위적인 유입에 의해 증가하므로 소양호 상류 지역의 폐수처리 현황을 검토하여 T-N의 증가 원인을 해결할 필요가 있을 것으로 보인다. 또한 본 연구에서는 한 지점의 수질 자료만을 이용하여 분석했기 때문에 향후 여러 지점의 데이터를 이용하여 경향성을 비교분석함으로써 연구의 정확성을 높이는 방법도 고려해 볼 필요가 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국립생태원 국가장기생태연구 (NIE-고유연구-2023-2)사업 및 한국연구재단의 기초연구사업 (No.2022R1C1C1010804)의 지원을 받아 수행되었음.

REFERENCES

1. Attiah, G., H. K. Pour, and K. A. Scott, 2023. Four decades of lake surface temperature in the Northwest Territories, Canada, using a lake-specific satellite-derived dataset. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 50. doi: 10.1016/j.ejrh.2023.101571.
2. Cho, J. H., 2018. Pollutants removal efficiency of rainfall-runoff from dense highland field areas in multistage sedimentation basins-focused on Jaun area in upstream watershed of Lake Soyang-. *Journal of Environmental Impact Assessment* 27(2): 170-180. (in Korean). doi: 10.14249/eia.2018.27.2.170.
3. Cho, Y. C., M. J. Park, K. Y. Shin, H. M. Choi, S. H. Kim,

- and S. J. Yu, 2019. A study on grade classification for improvement of water quality and water quality characteristics in the Han River watershed tributaries. *Journal of Environmental Impact Assessment* 28(3): 215-230. (in Korean). doi: 10.14249/eia.2019.28.3.215.
4. Choi, J. W., M. J. Kang, J. C. Ryu, D. I. Kim, K. J. Lim, and D. S. Shin, 2014. Assessing the action plans in the control area (Soyang Reservoir) of non-point source pollution. *Journal of Environmental Science International* 23(5): 839-852. (in Korean). doi: 10.5322/JESI.2014.5.839.
5. Choi, J. D., 2014. Establishment of nonpoint source management measure in Goljucheon Watershed, 126-132. TRKO201800001763, National Institute of Environmental Research.
6. Cleveland, W. S., 1979. Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots. *Journal of the American Statistical Association* 74(368): 829-836. doi: 10.1080/01621459.1979.10481038.
7. Cleveland, W. S., and S. J. Devlin, 1988. Locally weighted regression: an approach to regression analysis by local fitting. *Journal of the American Statistical Association*, 83: 596-610. doi: 10.1080/01621459.1988.10478639.
8. Hirsch, R. M., and J. R. Slack, 1984. A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence. *Water Resources Research* 20(6): 727-732. doi: 10.1029/WR020i006p00727.
9. Jeon, H. T., S. Y. Hamm, C. W. Lee, J. T. Lee, and J. R. Lee, 2020. Characteristics of long-term water quality trend of dongrae hot spring. *The Journal of Engineering Geology* 30(3): 379-397 (in Korean). doi: 10.9720/kseg.2020.3.379.
10. Jeon, J. H., 2016. A study on the reduction of turbid runoff and NPS pollution from upper subwatersheds of Soyang-dam watershed. M. S. diss., Kangwon National University.
11. Jung, K. Y., M. J. Kim, K. D. Song, K. O. Seo, S. J. Hong, S. H. Cho, Y. J. Lee, and K. H. Kim, 2018. A nonparametric long-term trend analysis using water quality monitoring data in Nam-River. *Journal of Environmental Science International* 27(11): 1029-1048 (in Korean). doi: 10.5322/JESI.2018.27.11.1029.
12. Kal, B. S., J. B. Park, S. M. Kim, S. M. Shin, S. J. Jang, and M. J. Jeon, 2022. A study on seasonal characteristics through long-term water quality monitoring in the Nakdong River watershed. *Journal of Wetlands Research* 24(4):

- 301-311. (in Korean). doi: 10.17663/JWR.2022.24.4.301.
13. Kang, M. W., D. J. Kim, K. J. Lim, and S. S. Lee, 2021. Rainfall erosivity factor of Korean soils estimated by using USLE under climate change. *Korean Society of Soil Science and Fertilizer* 54(3): 265-275. (in Korean). doi: 10.7745/KJSSF.2021.54.3.265.
 14. Kendall, M. G., 1975. Rank correlation methods. Charles Griffin, London.
 15. Kim, S. Y., 2008. Application of Mann-Kendall methods for the performance assessment of the total pollution load management of Geum River, M. S. diss., Hanbat National University.
 16. Kim, J. G., J. U. Jang, G. G. Seong, S. S. Cha, and Y. S. Park, 2018. A study to determine the rainfall erosivity factor of universal soil loss equation using recent rainfall data. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 60(6): 13-20. (in Korean). doi: 10.5389/KSAE.2018.60.6.013.
 17. Kim, J. M., H. G. Jeong, H. R. Kim, Y. S. Kim, and D. S. Yang, 2020. A non-parametric trend analysis of water quality using water environment network data in Nakdong River. *Journal of Environmental Impact Assessment* 29(1): 61-77. (in Korean). doi: 10.14249/eia.2020.29.1.61.
 18. Kisi, O. and M. Ay, 2014. Comparison of Mann-Kendall and innovative trend method for water quality parameters of the Kizilirmak River, Turkey. *Journal of Hydrology* 513: 362-375. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.03.005.
 19. Korea Meteorological Administration (KMA), Gangwon Regional Office of Meteorological administration (GROMA), 2015a. Climate Change Detailed Analysis Report for Yanggu County, Gangwon Province, 20-60.
 20. Korea Meteorological Administration (KMA), Gangwon Regional Office of Meteorological administration (GROMA), 2015b. Climate Change Detailed Analysis Report for Inje County, Gangwon Province, 20-60.
 21. Korea Meteorological Administration (KMA), Gangwon Regional Office of Meteorological administration (GROMA), 2015c. Climate Change Detailed Analysis Report for Chuncheon City, Gangwon Province, 20-60.
 22. Korea Meteorological Administration (KMA), National Institute of Meteorological Sciences (NIMS), 2021. Climate Change Analysis Report for South Korea Over 109 Years (1912-2020), 4-41.
 23. Lee, J. H., 2020. Study on creating social values in surrounding area of Soyanggang Dam. Soyanggang Office, K-water, C5201908564, pp. 6, 64.
 24. Mann, H. B., 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society* 13(3): 245-249.
 25. Montgomery, R. H., and Reckhow, K. H., 1984. Techniques for detecting trends in lake water quality 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 20(1): 43-52. doi: 101111/j.1752-1688.1984.tb04640.x.
 26. Park, S. H., 2017. A Study on the Eutrophication Assessment and Trend Analysis of Major lakes in Korea. M. S. diss., Kangwon National University.
 27. Park, S. J., and Y. S. Sin, 2022. Characteristics of water quality and chlorophyll-a in the seawater zone of the Yeongsan River estuary: long-term (2009-2018) data analysis. *Ocean and Polar Research* 44(1): 13-27. (in Korean). doi: 10.4217/OPR.2022001.
 28. Park, S. Y., 1999. Trend analysis of water qualities in major lakes of Korea with seasonal Mann-Kendall test. M. S. diss., Ewha Womans University.
 29. Sen, P. K., 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association* 63: 1379-1389. doi: 10.1080/01621459.1968.10480934.
 30. Sokal, R. R., and F. J. Rohlf, 1995. Biometry: the principles and practise of statistics in biological research. W. H., Freeman & Co., New York, p. 887.
 31. Stefanidis, K., G. Varlas, G. Papaioannou, A. Papadopoulos, and E. Dimitriou, 2023. Assessing temporal variability of lake turbidity and trophic state of European lakes using open data repositories. *Science of The Total Environment* 857: 159618. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.159618.