

Research Paper

새만금호의 시공간적 수질 변동 특성 및 다변량 통계 기법을 이용한 오염 기작 규명

이주찬* · 권민선** · 권혜련*** · 강 훈**** · 김종구*****

군산대학교 토목환경공학부*, (주)국토해양환경기술단 연구원**, (주)해양정보기술***,
(주)해양정보기술****, 군산대학교 환경공학과 교수*****

Spatiotemporal Variations of Water Quality and Identification of Pollution Mechanisms Using Multivariate Statistical Techniques in the Saemangeum Reservoir

JuChan Lee* · MinSun Kwon** · HyeRyeon Gwon*** · Hoon Kang**** · JongGu Kim*****

Department of Environmental Engineering, Kunsan National University*

Ocean Physics Dept., Land & Ocean Environmental Eng.**

Marine Energy Division, MIT Co., Ltd.***

Marine Energy Division, MIT Co., Ltd.****

Department of Environmental Engineering, Kunsan National University Professor*****

요약: 본 연구는 새만금 유역의 3개 주요 구역(Riverine, Transitional, Lacustrine)을 대상으로 수질 인자의 시공간적 변동성을 평가하고, 오염물질의 기원과 영양염 제한 특성을 규명하였다. 이를 위해 2015년부터 2025년까지 총 13개 수질 관측 지점에서 수집된 장기 데이터(수온, 염분, TN, TP, COD, TOC, Chl-a, SS)를 활용하였으며, 유기물 및 영양염 비율 지표 산정과 더불어 일원배치 분산분석(One-way ANOVA), 피어슨 상관분석, 주성분 분석(PCA) 등 다변량 통계 기법을 적용하였다. 조사 결과, 새만금호의 수질은 유입 하천수(Riverine Zone)의 영향을 강하게 받는 하구역 특성을 보였으며, 외해로 갈수록 물리적 희석 작용에 의해 농도가 감소하는 경향을 나타냈다. 주성분 분석(PCA) 결과, 전체 수질 변동의 48.1%를 설명하는 제1주성분(PC1)은 담수 유입에 따른 육상 기원 오염 부하를, 16.6%를 설명하는 제2주성분(PC2)은 조류 증식 및 영양염 섭취와 같은 생물학적 대사 기작을 대변하는 것으로 나타났다. 유기물 성장 분석(COD vs TOC)에서는 구역별로 유사한 기울기가 관찰되어 물리적 혼합 기작이 우세함을 보였으나, 호소 내측에서는 조류(Chl-a)와 COD 간의 유의한 상관성이 확인되어 내부 기원 유기물(Autochthonous OM)의 기여가 시사되었다. 또한, TN/TP 비율 분석 결과 전 수역이 연중 인 제한(P-limited) 환경에 놓여 있었으며, 부영양화 지수(TSI) 평가 결과 전 구역이 부영양(Eutrophic) 또는 과영양(Hyper-eutrophic) 상태로 진단되었다. 결론적으로, 새만금호의 수질 개선을 위해서는 제한 영양염 인(TP)의 유입 부하를 우선적으로 저감하고, 하절기 조류 대증식에 의한 내부 오염 부하를 제어하는 전략이 필수적이다.

주요어: 새만금호, 수질 변동성, 주성분 분석(PCA), 인 제한, 내부 기원 유기물, 부영양화 지수(TSI)

First Author: JuChan Lee, Tel: +82-63-469-1871, Email: jjuju153@naver.com, ORCID: 0009-0007-6111-6516

Corresponding Author: JongGu Kim, Tel: +82-63-469-1874, Email: kjg466@kunsan.ac.kr, ORCID: 0000-0003-0451-5565

Co-Authors: MinSun Kwon, Tel: +82-31-695-3474, Email: mskwon@landocean.co.kr, ORCID: 0000-0003-0932-0070

HyeRyeon Gwon, Tel: +82-63-469-1871, Email: gwonhr@kunsan.ac.kr, ORCID: 0009-0005-3427-7272

Hoon Kang, Tel: +82-63-469-1871, Email: kh1023@daum.net, ORCID: 0000-0003-0867-5865

Received: 25 February, 2026. Revised: 13 April, 2026. Accepted: 17 April, 2026.

Abstract: This study evaluated the spatiotemporal variations of water quality parameters and identified pollution mechanisms and nutrient limitation characteristics in three major zones (Riverine, Transitional, and Lacustrine) of the Saemangeum Reservoir. To this end, long-term water quality data (including temperature, salinity, TN, TP, COD, TOC, Chl-a, and SS) collected from 13 monitoring stations over a 10-year period (2015–2025) were utilized. The study applied ratio indices alongside comprehensive statistical analyses, including One-way ANOVA, Pearson correlation, and Principal Component Analysis (PCA). The results indicated that water quality was strongly influenced by freshwater inflow in the Riverine zone and gradually improved towards the Outer zone due to physical dilution. Principal Component Analysis (PCA) revealed that the first principal component (PC1), explaining 48.1% of the total variance, represented land-based anthropogenic pollution driven by freshwater input, while the second component (PC2, 16.6%) represented biological metabolic activities such as algal growth and nutrient uptake. The regression analysis between COD and TOC showed similar slopes across zones, suggesting the dominance of physical mixing; however, a significant correlation between Chl-a and COD in the lacustrine zone confirmed the contribution of autochthonous organic matter. Furthermore, the TN:TP ratio analysis indicated that the entire reservoir was under a phosphorus-limited (P-limited) environment throughout the year. The Trophic State Index (TSI) assessment classified all zones as eutrophic or hyper-eutrophic states. Consequently, effective water quality management in the Saemangeum Reservoir requires prioritizing the reduction of Total Phosphorus (TP) loads and implementing strategies to control internal pollution loads caused by algal blooms.

Keywords: *Saemangeum Reservoir, Organic Matter Characteristics, Nutrient Limitation, Principal Component Analysis (PCA), Eutrophication*

I. 서론

하구 담수호(Estuarine reservoir)는 농업용수 확보와 치수 목적으로 조성되지만, 방조제 건설로 해수 유통이 차단되면서 체류 시간이 증가하고 유역으로부터의 영양염 및 유기물 유입이 집중되어 부영양화에 매우 취약한 수체로 전환된다(Paerl et al., 2011; Glibert, 2017). 특히 대규모 방조제는 조석 교환을 제한하고 성층(stratification) 구조와 물질 순환을 근본적으로 변화시켜 조류 대증식, 저산소수괴 형성, 난분해성 유기물 축적 등 복합적인 수질 악화를 야기한다.

국내 최대 규모의 인공 하구 담수호인 새만금호는 방조제 완공 이후 조석 교환이 급격히 감소하고, 동진강-만경강을 통한 영양염 유입이 지속되면서 부영양화가 심화되고 있다(Kim, 2023; Baek et al., 2024). 최근에는 수질 개선을 위해 해수 유통 확대 정책이 시행되고 있으나(Kim et al., 2020), 해수 유입 증가는 단순한 희석 효과를 넘어 염분 성층, 저층수 체류, 입자 교환 구조가

지 동시에 변화시키는 이중적 영향을 초래한다(Park et al., 2023a).

EFDC 기반 수치모의를 수행한 Park et al. (2023a)은 배수갑문 개폐 빈도를 하루 1회에서 2회로 증가시킬 경우, 서측 방조제 인근에서 염분이 2.12 psu 증가하고 담수 유입부에서는 1.18 psu 감소하며, 수심 5 m 이하 저층수 입자 잔류율이 2.52% 감소함을 보였다. 이는 해수 유통 증가가 저층수 교환을 촉진하는 동시에 염분 성층 구조를 재편성하여 수체의 물리적 혼합 체계를 근본적으로 변화시킬 수 있음을 의미한다.

이러한 염분 구조 변화는 새만금 생태계의 1차 생산자인 식물플랑크톤 군집에도 직접적인 영향을 미친다. Park et al. (2023b)은 염분 변화에 따라 *Cyclotella atomus*, *Stephanodiscus hantzschii*, *Phormidium tenue*, *Chaetoceros* spp. 등 우점종 조성이 달라짐을 밝혔으며, 특히 *Chaetoceros* spp.는 염분과 유의한 양의 상관($p < 0.001$)을 보였다. 이러한 종 조성 변화는 단순한 생물학적 차이를 넘어, 1차 생산 및 유기물 생성 경로의 전환

을 의미하며, 새만금이 염분 구배에 의해 물리·생지화학적 과정이 동시에 재편되는 거대 기수호(brackish lake) 임을 보여준다. 즉, 염분 조건에 따른 1차 생산자의 변화는 수체 내 DOM의 기원(allochthonous vs. autochthonous)과 분해 특성을 결정하는 핵심 구동 요인으로 작용한다.

실제로 하구역 시스템에서는 수문학적 조건 변화가 DOM의 조성 변화에 결정적인 영향을 미치며(Chen et al., 2024), 외부 기원 난분해성 유기물과 내부 생성 유기물이 혼재하는 구조가 형성되는 것으로 보고되었다. 이에 따라 새만금에서도 유기물의 기원과 거동 특성을 구분하는 성상 기반 접근이 수질 관리의 핵심으로 부각된다.

실제로 최근 환경부는 기존의 COD 중심 유기물 관리체계에서 총유기탄소(TOC) 기반 관리로 전환하고 있으며, 이는 유기물의 단순 농도 관리에서 벗어나 기원 및 성상(분해 가능성)을 고려하는 방향으로 패러다임이 이동하고 있음을 의미한다(Park et al., 2022). 광학적 성상(CDOM 흡광 특성)과 같은 성상 지표는 하구 혼합 과정에서 유기물의 기원, 제거, 내부 생성 및 변질 과정을 효과적으로 추적할 수 있음이 보고되었다(Guo et al., 2007). 또한 일본 호소에서는 용존 COD(D-COD)의 장기적 증가를 통해 난분해성 DOM 축적이 정량화되었으며, 이는 하·폐수 처리수와 같은 인위적 기원과 밀접히 연관된 것으로 제시되었다(Imai et al., 2002).

특히 TN/TP 비는 Redfield 비(N:P = 16:1)를 기준으로 수체의 질소 또는 인 제한 상태를 진단하는 대표적 지표로 활용되며(Redfield, 1958; Guildford & Hecky, 2000), 최근 하구 및 인공호소에서는 인 감소(P-limitation)와 질소 상대적 과잉에 따라 조류 군집 구조가 소형 규조류 및 시아노박테리아 중심으로 전이되는 현상이 보고되고 있다(Conley et al., 2009; Mousing et al., 2018).

그러나 기존의 새만금의 수질과 관련된 연구들은 대개 장기적인 농도 모니터링이나 TSI 등 단일 평가지표 분석에 집중되어 왔으며(Kim, 2023; Lee et al., 2024), 수질 인자 간의 복합적인 상호작용과 오염물질의 기원(Origin)을 규명하려는 시도는 상대적으로 미흡하였다. 이에 본 연구는 단순 농도 평가를 넘어, COD/TOC, TN/TP, SS/Chl-a 등 변수 간의 비율 분석과 다변량 통

계 기법(PCA)을 결합하여 새만금호의 수질 오염 메커니즘을 입체적으로 해석하고자 하였다. 이를 위해 연구 대상지를 하천(Riverine), 전이(Transitional), 호소(Lacustrine) 구역으로 세분화하고, 일원배치 분산분석(One-way ANOVA)과 주성분 분석(PCA)을 적용하여 구역별 오염 특성을 규명하고자 하였다. 더 나아가 COD/TOC 및 SS/Chl-a 비율을 통해 유기물과 부유물질의 기원(육상 유입 vs 내부 생산)을 판별하고, TN/TP 비와 TSI 평가를 통해 영양염 제한 특성 및 부영양화 상태를 종합적으로 진단함으로써, 새만금 유역의 특성에 부합하는 과학적 수질 관리 전략을 제시하는 데 그 목적이 있다.

II. 재료 및 방법(Materials and Methods)

1. 연구 대상지 및 데이터 수집

(Study Area and Data Acquisition)

본 연구는 새만금 유역 내 주요 하천 유입부 및 호소 내측을 포함한 수질 측정망을 대상으로 하였다. 분석에 사용된 수질 데이터는 새만금유역 통합물관리 시스템(<https://www.eariul.go.kr/cont010102.do>)에서 제공하는 환경부(Ministry of Climate, Energy, and Environment) 제공 데이터를 이용하였다. 데이터는 Fig. 1과 같이 총 13개 관측지점(DE1, DE2, DJ2, DL1, DL2, DL3, ME1, ME2, MK7, ML2, ML3, ML4, Simpo)에서 2015년 1월부터 2025년 1월까지(약 10년간) 월별로 관측된 자료를 이용하였다.

수집된 데이터는 각 측정 지점의 공간적 특성을 반영하여, 만경강 및 동진강 유입부와 Simpo 지점을 포함하는 하천역(Riverine Zone), 담수와 해수가 혼합되거나 하천수가 호소로 확산되는 전이역(Transitional Zone), 호소 중심부 및 배수갑문 인근의 호소/외해역(Lacustrine Zone)의 세가지 구역(zone)으로 구분하여 공간적 수질 변동성을 평가하였다.

분석 대상 항목은 수온(Temperature), 염분(Salinity), 화학적 산소요구량(COD), 총유기탄소(TOC), 총질소(TN), 총인(TP), 부유물질(SS), 클로로필-a(Chl-a)의 총 8개 수질 인자를 모두 포함하여 수행하였다.

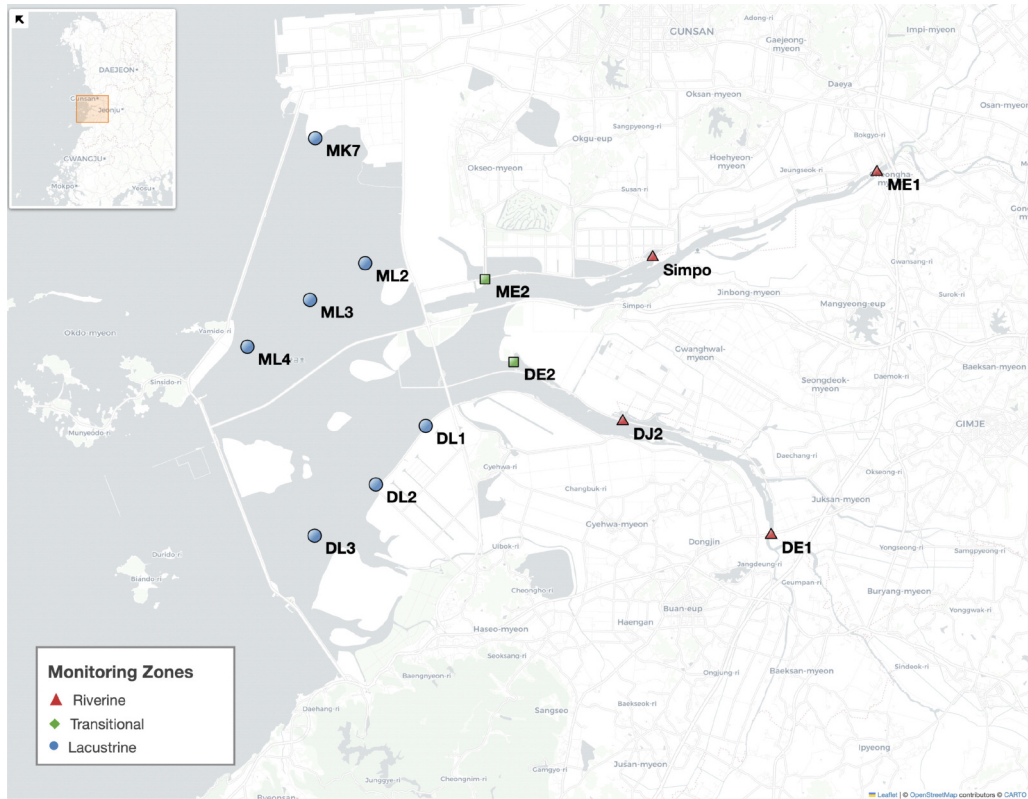


Figure 1. Location of water quality monitoring stations in the Saemangeum reservoir, South Korea.

2. 수질 지표 산정 (Calculation of Water Quality Indices)

유기물질의 기원과 성상(Characteristics)을 파악하고 영양염류의 제한 요인(Limiting factor)을 평가하기 위해 다음과 같은 비율 지표들을 활용하였다. 먼저, TN/TP 비(Mass Ratio)는 수체 내 질소와 인의 상대적 비율을 통해 조류 성장의 제한 영양염(N-limited vs. P-limited)을 진단하는 대표적 지표로 활용하였다(Redfield, 1958; Guildford & Hecky, 2000). 특히, 이러한 고전적 영양염 비율 이론은 최근 담수 및 하구 생태계의 화학양론적 특성을 규명하는 연구에서도 여전히 핵심적인 진단 기준으로 재조명되고 있다(Andersen et al., 2025). 담수호 및 하구역에서 이 비율은 부영양화 및 조류 군집의 전이 현상을 설명하는 핵심 근거가 된다(Conley et al., 2009). 다음으로, COD/TOC 비는 유기물의 기원 및 분해 가능성과 같은 성상을 평가하기 위해 적용하였다. 최근 수질 관리 패러다임이 총유기탄소(TOC) 기

반으로 전환됨에 따라, 두 지표의 비율은 단순 농도 평가를 넘어 유기물 오염의 질적 특성을 규명하는 데 유효하다 (Park et al., 2022).

또한, Chl-a/TN 및 SS/Chl-a 비는 단위 질소당 조류의 1차 생산 효율과 수체 내 부유물질(SS) 중 유기성 조류가 차지하는 비중을 각각 평가하기 위해 활용하였다. 이는 부유물질 및 수질 변동이 상류 유입이나 저층 재부유와 같은 ‘물리적 요인’에 의한 것인지, 혹은 내부 조류 증식에 의한 ‘생물학적 요인’인지를 판별하는 중요한 기준이 된다.

3. 부영양화 지수 평가 (Assessment of Trophic State Index)

새만금호의 종합적인 영양 상태를 진단하기 위해 Carlson(1977)이 제안한 부영양화 지수(TSI, Trophic State Index)를 적용하였다. Carlson 지수는 최근 널리 기법을 활용한 하천 시스템의 시공간적 부영양화 역

동성 분석 연구에서도 수체의 상태를 분류하는 표준 지표로 널리 활용된 바 있다(Lee et al., 2024). 본 연구에서는 인(TP)과 조류(Chl-a) 농도를 기반으로 한 TSI (TP)와 TSI (Chl-a)를 각각 산정하였으며, 계산식은 다음과 같다.

$$TSI(TP) = 14.42 \times \ln(TP \times 1000) + 4.15 \quad (1)$$

$$TSI(Chl-a) = 9.81 \times \ln(Chl-a) + 30.6 \quad (2)$$

여기서 TP의 단위는 mg/L, Chl-a의 단위는 mg/m³ (=ug/L)이다. 산정된 TSI 값에 따라 편이상 30 미만은 빈영양(Oligotrophic), 30~50은 중영양(Mesotrophic), 50~70은 부영양(Eutrophic), 70 이상은 과영양(Hyper-eutrophic) 상태로 판정하였다.

4. 통계 분석(Statistical Analysis)

모든 데이터 처리는 Python 3.11 환경에서 Pandas 및 Scikit-learn 라이브러리를 이용하여 수행하였다. 구역 (Zone) 간 수질 및 비율 지표의 통계적 유의차 검정을 위해 일원배치 분산분석(One-way ANOVA)을 실시하였으며, 유의한 차이가 있는 경우 ($p < 0.001$) Tukey HSD 사후 검정(Post-hoc test)을 통해 그룹 간의 구체적인 차이를 규명하였다. 또한, 다수의 수질 변수 간의 복합적인 상관성을 파악하고 오염 특성을 시각화하기 위해 주 성분 분석(Principal Component Analysis, PCA)을 수행하였다. PCA 수행 전, 변수 간 단위 차이에 의한 영향을 배제하기 위해 Z-score 표준화(Standardization) 과정을

거쳤으며, 고유값(Eigenvalue)이 1.0 이상인 주성분을 추출하여 해석하였다.

III. Results and Discussion

1. 시공간적 수질 분포 특성

(Spatiotemporal Variations of Water Quality)

새만금유역내 3개 구역(Riverine, Transitional, Lacustrine)에 대한 주요 수질 항목의 평균 농도와 표준편차는 Table 1과 같다. 조사 수역의 물리적 특성을 대변하는 염분(Salinity)은 육상 담수가 직접 유입되는 하천역(Riverine)에서 평균 4.96 ± 6.97 psu로 가장 낮았으며, 전이역(Transitional, 18.17 ± 9.14 psu)을 거쳐 호소 내측 및 외해(Lacustrine, 23.03 ± 7.96 psu)로 갈수록 뚜렷하게 증가하는 양상을 보였다. 반면 수온은 구역별로 $15.63 \sim 16.88^\circ\text{C}$ 의 범위를 보여 공간적 차이보다는 계절적 요인에 의한 변동이 지배적인 것으로 나타났다.

전반적인 수질 분포는 이러한 염분 구배(Salinity Gradient)와 역의 상관성을 보이며, 오염원이 유입되는 하천역(Riverine)에서 가장 높은 농도를 보이고 외해로 갈수록 점차 희석·감소하는 전형적인 하구역 특성을 나타냈다.

총질소(TN)의 경우, Riverine 구역에서 평균 3.434 ± 1.996 mg/L로 가장 높게 나타났으며, 이는 Lacustrine 구역의 평균 0.714 ± 0.412 mg/L에 비해 약 4.8배 높은 수준이다. 이러한 공간적 농도 구배는 유역 상류로부

Table 1. Summary of water quality parameters in different zones of the Saemangeum reservoir (Mean \pm Std).

Parameter	Unit	Riverine (n=965)	Transitional (n=954)	Lacustrine (n=2570)
Temperature	°C	16.88 \pm 8.72	16.04 \pm 8.77	15.63 \pm 8.71
Salinity	psu	4.96 \pm 6.97	18.17 \pm 9.14	23.03 \pm 7.96
TN	mg/L	3.43 \pm 2.00	1.34 \pm 0.85	0.71 \pm 0.41
TP	mg/L	0.093 \pm 0.049	0.081 \pm 0.061	0.053 \pm 0.037
COD	mg/L	9.02 \pm 2.65	6.80 \pm 3.31	5.44 \pm 3.07
TOC	mg/L	4.54 \pm 1.15	3.74 \pm 1.55	3.23 \pm 1.46
Chl-a	mg/m ³	36.35 \pm 29.06	25.36 \pm 32.67	17.35 \pm 23.50
SS	mg/L	19.20 \pm 19.80	15.90 \pm 20.40	12.30 \pm 12.10
TN/TP	-	47.04 \pm 42.92	22.96 \pm 21.46	18.80 \pm 20.50
COD/TOC	-	2.00 \pm 0.38	1.80 \pm 0.42	1.63 \pm 0.43
SS/Chl-a	-	1.32 \pm 2.25	2.00 \pm 3.35	2.71 \pm 5.44
Chl-a/TN	-	15.07 \pm 17.83	22.99 \pm 29.41	27.26 \pm 36.59

터 유입되는 농업 배수 및 축산 폐수 등 고농도의 질소 부하가 하천 구역에 집중되고 있음을 시사한다. 총인 (TP) 또한 유사한 경향을 보여 Riverine 구역 (0.093 ± 0.049 mg/L)이 Lacustrine 구역 (0.053 ± 0.037 mg/L)보다 약 1.7배 높았다.

유기물 오염 지표인 COD는 Riverine 구역에서 평균

9.015 mg/L, Lacustrine 구역에서 5.445 mg/L를 기록하여, 질소나 인에 비해 구역 간 농도 차이가 상대적으로 작게 나타났다 (약 1.6배). 이는 영양염류는 생물학적 섭취나 침전에 의해 빠르게 제거되는 반면, 유기물질은 난분해성 물질의 잔존 특성이나 호소 내부에서 조류(Phytoplankton) 증식에 의해 추가로 생성(Internal

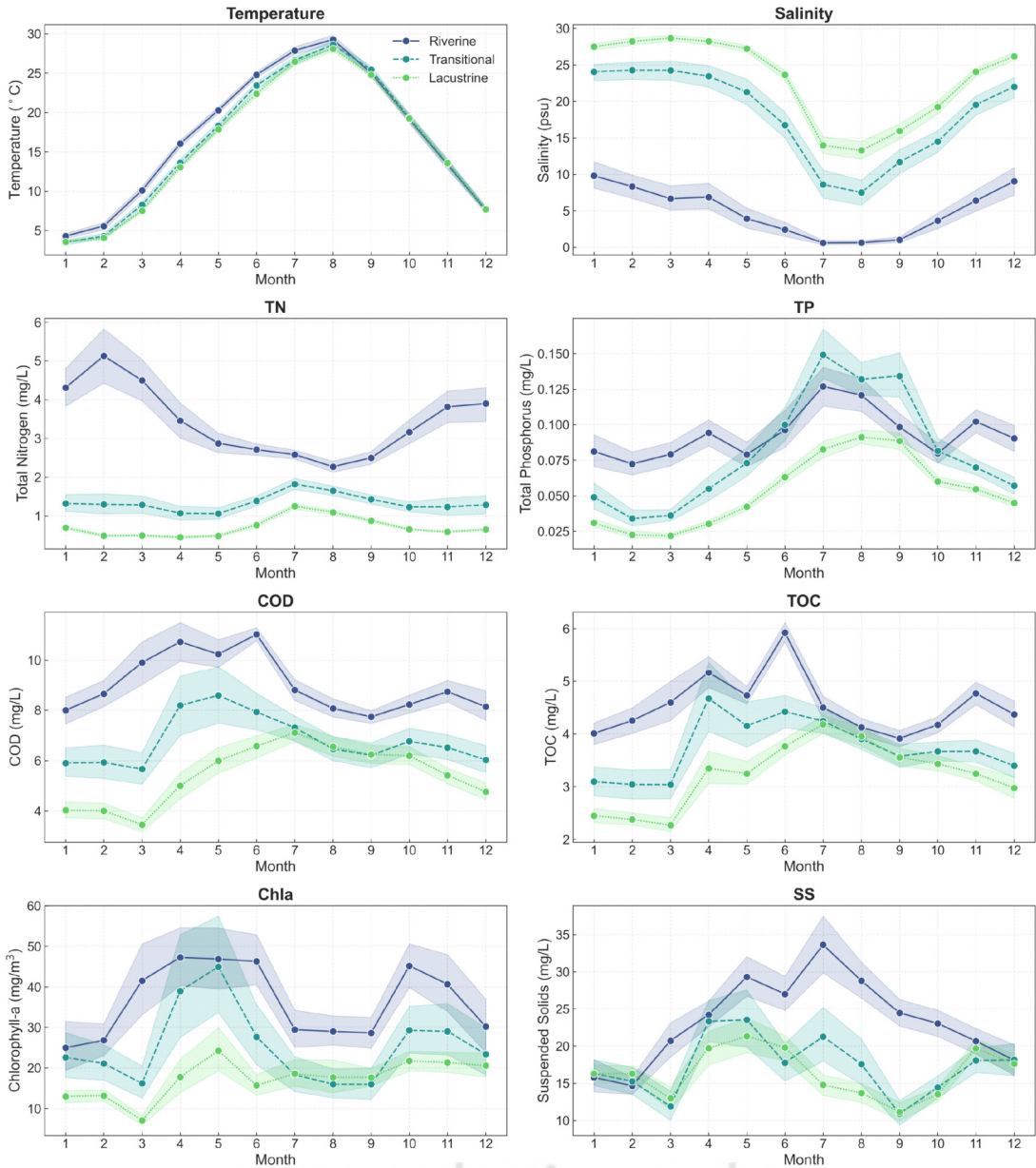


Figure 2. Spatiotemporal variations of major water quality parameters in the Saemangeum reservoir. Shaded areas indicate the standard error of the mean.

Table 2. Results of One-way ANOVA and Tukey's post-hoc test for water quality ratios among different zones.

Variable	ANOVA (F-value)	Post-hoc Comparison (Rank)
TN/TP	387.20***	Riverine > Trans > Lacustrine
COD/TOC	281.29***	Riverine > Trans > Lacustrine
SS/Chl-a	34.98***	Lacustrine > Trans > Riverine
Chl-a/TN	51.49***	Lacustrine > Trans > Riverine

*** $p < 0.001$

production)되는 기작이 작용했기 때문으로 판단된다.

새만금호의 수질 변동을 분석한 결과, 일반적인 하구역과는 차별화된 계절적 특성이 관찰되었다(Fig. 2).

먼저 TN(총질소)의 경우, 다른 지점들과 달리 하천역(Riverine Zone)에서는 집중 강우기인 7~8월에 오히려 연중 최저 농도를 기록하였다. 이는 강우에 의한 절대적인 유입 부하량 증가보다 막대한 수량 유입에 따른 희석 효과(Dilution effect)가 더 지배적으로 작용한 결과로 판단된다.

TOC와 Chl-a는 하절기보다 봄철인 4~6월에 가장 높은 농도를 나타냈다. 이는 하절기 장마철의 높은 탁도와 빈번한 갑문 개방으로 인한 짧은 체류시간이 조류 성장을 억제하는 반면, 봄철은 풍부한 일사량과 상대적으로 안정적인 수리 조건이 형성되어 춘계 조류 대증식(Spring bloom)이 활발히 일어났기 때문으로 해석된다. 이 시기에 Chl-a와 TOC가 동시 피크를 형성하는 것은 수체 내 유기물의 상당 부분이 내부 생물학적 생산에 기인함을 시사한다.

SS(부유물질)의 경우 구역별로 상이한 기작을 보였다. 하천역은 하절기(7~8월) 강우에 의한 육상 오염원 유입 시기에 피크를 보인 반면, 호소 중심부(Lacustrine Zone)를 포함한 하류 수역은 4~5월에 높은 농도를 기록하였다. 이는 하류역에서 봄철 강풍에 의한 저층 퇴적물의 재부유 또는 춘계 조류 증식에 따른 입자성 유기물 증가가 SS 농도 결정의 주요 인자로 작용했음을 보여준다.

2. 유기물 성상 및 영양염류 조성 특성 (Characteristics of Organic Matter and Nutrient composition)

수체 내 오염물질의 거동을 이해하기 위해서는 단순 농도뿐만 아니라, 변수 간의 비율(Ratio)을 통한 기원

추적과 성상 파악이 필수적이다. 본 연구에서는 먼저 구역별 수질 특성 차이를 통계적으로 검증하고, 이어 유기물질의 성상을 심층 분석하였다.

각 구역(Zone)별 수질 특성의 차이를 명확히 파악하기 위해 산정한 4가지 비율 지표에 대해 일원배치 분산 분석(One-way ANOVA) 및 Tukey 사후검정을 실시하였으며, 그 결과는 Table 2와 같다. 분석결과, 모든 비율 지표에서 $p < 0.001$ 의 통계적으로 유의한 차이가 확인되었다. 특히 영양염류 조성 지표인 TN/TP의 F-값은 387.20으로 가장 높게 나타났으며, 유기물 성상 지표인 COD/TOC 또한 281.29의 매우 높은 F-통계량을 보였다. 이는 해당 지표들이 구역 내 변동(Within-group variance)보다 구역 간 변동(Between-group variance)이 압도적으로 큼을 의미하며, 새만금호가 물리적 혼합이 제한된 상태에서 구역별로 뚜렷하게 구분되는 공간적 구배(Spatial gradient)를 형성하고 있음을 시사한다. 반면, 생물학적 기원을 나타내는 SS/Chl-a ($F=34.98$)와 Chl-a/TN ($F=51.49$)은 통계적으로 유의함에도 불구하고, 물리-화학적 지표인 TN/TP나 COD/TOC에 비해 상대적으로 낮은 F-값을 보였다. 이는 생물학적 반응은 환경 요인에 따라 국지적으로 다양하게 발생하므로, 물리적 확산이 지배적인 영양염류나 유기물 분포에 비해 공간적 변동의 설명력이 상대적으로 낮게 평가된 것으로 판단된다.

Tukey 사후검정 결과에 따른 구체적인 공간 분포 특성은 Fig. 3과 같다. TN/TP 비는 F-값이 가장 높았던 지표답게, Riverine 구역에서 Lacustrine 구역으로 갈수록 급격하고 뚜렷한 감소 경향(Riverine > Trans > Lacustrine)을 보였다. 하천을 통해 유입된 고농도의 질소(TN)는 하류로 이동함에 따라 해수 혼합에 의한 강력한 물리적 희석과 더불어 정체 수역 저층에서의 활발한 탈질작용(Denitrification)에 의해 빠르게 감소

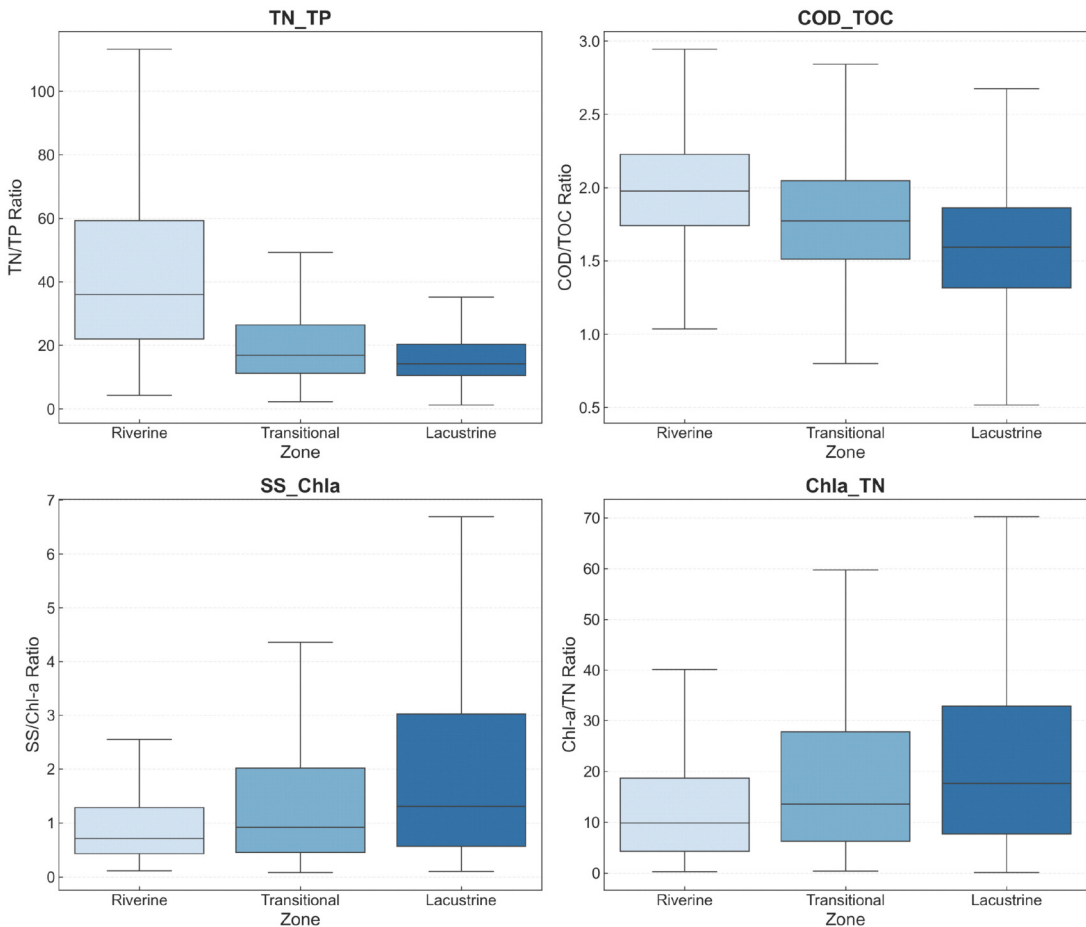


Figure 3. Spatial comparison of physicochemical and biological ratios among the three zones in the Saemangeum reservoir. The horizontal line within the box indicates the median, boundaries of the box indicate the 25th and 75th percentiles, and whiskers indicate the range within 1.5 times the interquartile range (IQR).

한다. 반면, 인(TP)은 물리적 침강에도 불구하고 저층 퇴적물로부터의 내부 용출(Internal loading)이 복합적으로 작용하면서 상대적으로 감소 폭이 작게 나타나, 결과적으로 하류에서 TN/TP 비율의 급감을 유도한 것으로 판단된다. COD/TOC 비는 난분해성 유기물 지표로 역시 Riverine 구역에서 유의하게 높게 나타났다. 하천역은 산소 요구량이 큰 미분해 상태의 육상 기원(Allochthonous) 오염물질이 지배적임을 의미한다. 호소역으로 진입하며 이 비율이 낮아지는 현상은 육상 기원 유기물이 침강 분해됨과 동시에, 수체 내 식물플랑크톤 증식에 의해 생성된 자생적 유기물(Autochthonous organic matter)의 기여도가 지배적으로 변화하였음을 시사한다.

SS/Chl-a 비는 Lacustrine 구역에서 가장 높게 나타났다(Lacustrine > Trans > Riverine). 이는 호소 구역의 얇은 수심과 넓은 수면적에 따른 강풍 매개 저층 퇴적물의 재부유(Wind-induced resuspension) 기작이 훨씬 강력하게 작용하여 무기성 부유물질(SS) 농도를 더 압도적으로 상승시킨 결과이다.

마지막으로, Chl-a/TN 비는 하천역에서 호소역으로 갈수록 급격히 증가하였다. 이는 하천역의 경우 막대한 영양염 부하에도 불구하고 짧은 체류시간으로 인해 조류 생장이 억제되는 반면, 정체된 호소역에서는 질소(TN) 농도가 낮아짐에도 불구하고 풍부한 일사량과 안정된 수체 조건 하에서 식물플랑크톤의 영양염 동화 효율(Nutrient assimilation efficiency)이 극대화되어 대

량 증식으로 이어짐을 명확히 보여준다.

히트맵을 통한 다변량 상관관계 분석 결과, 새만금호 내 수질 인자들은 외부 유입과 내부 생물학적 생산 기작에 따라 뚜렷한 연관성을 나타냈다(Fig. 4).

가장 두드러진 특징 중 하나는 염분(Salinity)과 TN, TP 등 주요 영양염류 간의 강한 음의 상관관계이다. 해수 유입을 지시하는 보존성 지표인 염분과 영양염이 뚜렷한 역상관성을 갖는다는 것은, 새만금호 수체의 질소 및 인 부하가 철저하게 육상 기원의 담수 유입량에 의해 지배적으로 조절되고 있음을 의미한다. 특히 주목할 점은 염분과 TN의 상관계수($r = -0.67$)가 TP($r = -0.50$)보다 더 강한 음의 상관성을 보인다는 것이다. 이러한 차이는 앞서 공간적 분포 분석에서 확인한 바와 같이

하류 호소역으로 갈수록 TN/TP 비율이 감소하는 현상을 생지화학적으로 뒷받침한다. 즉, 질소(TN)는 해수 혼합에 따른 물리적 희석과 더불어 탈질작용에 의해 염분 증가에 비례하여 뚜렷하게 감소하는 반면, 인(TP)은 침강 및 희석 기작 외에도 정체 수역의 저층 퇴적물로부터 발생하는 내부 용출(Internal loading)에 의해 수체 내로 꾸준히 보충되기 때문에 상대적으로 염분과의 역상관성이 약하게 나타난 것으로 해석된다.

유기물 및 생물학적 지표의 관계를 살펴보면, 조류 생물량 지표인 Chl-a는 TOC 및 COD와 강한 양의 상관관계를 나타냈다. 일반적인 하천 환경에서 유기물이 육상 유입의 영향을 크게 받는 것과 달리, 이러한 결과는 새만금호 내 유기탄소의 상당 부분이 외부 유입

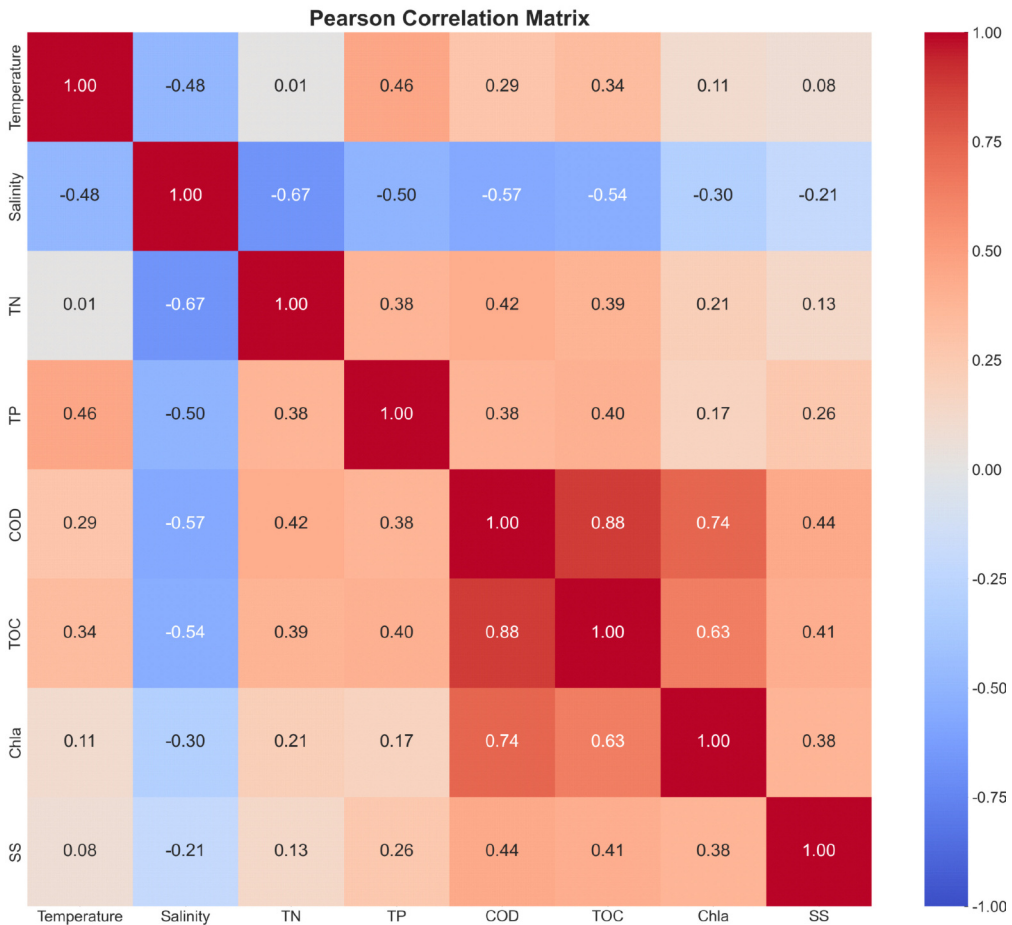


Figure 4. Pearson correlation matrix displaying relationships among water quality parameters in the Saemangeum reservoir. The values in the cells represent Pearson's correlation coefficients (r), and the color gradient indicates the strength and direction of the correlation.

보다는 호 내 식물플랑크톤 증식에 따른 내부 생산 (Autochthonous production)에 기인함을 강력히 뒷받침한다.

특히 주목할 점은 부유물질(SS)이 유기물 지표인 TOC($r = 0.41$), COD($r = 0.44$) 및 조류 지표인 Chl-a($r = 0.38$)와 뚜렷한 양의 상관성을 나타냈다는 점이다. 이는 새만금호 수체에 부유하는 입자성 물질이 강우 유출이나 퇴적물 재부유에 의한 무기성 토사(Inorganic sediments)에만 국한되지 않음을 시사한다. 즉, 수체 내에서 활발히 증식한 식물플랑크톤 세포 및 조류 기원의 입자성 유기물(Particulate Organic Matter)이 부유물질의 큰 비중을 차지하며, 생물학적 대사 주기와 밀접하게 동반 거동하고 있음을 확인하였다.

Fig. 5는 COD와 TOC 간의 회귀분석 결과를 나타낸 것이다. 모든 구역에서 유의한 양의 상관관계가 나타

났으며 ($p < 0.001$), 특히 Transitional 및 Lacustrine 구역에서 높은 결정계수($R^2 = 0.74-0.79$)를 보여 COD와 TOC의 선형성이 더욱 뚜렷하게 나타났다. 반면, 기유키는 Riverine(1.72) < Transitional(1.84) < Lacustrine(1.87) 순이었으나 거의 유사한 수준이었다.

Fig. 6은 Chl-a와 COD 간의 회귀분석 결과이다. 세 구역 모두에서 유의한 양의 상관관계가 나타났으며 ($p < 0.001$), 특히 Transitional ($R^2 = 0.61$)과 Lacustrine ($R^2 = 0.53$) 구역에서 높은 설명력을 보였다. 기유키는 Riverine (0.056) < Transitional (0.079) < Lacustrine (0.095) 순으로 증가하여, 호소 및 기수역 구간에서 COD가 조류 생물량 변화에 더 민감하게 반응함을 보여준다. 이는 수체 내 유기물 농도가 외부 유입뿐 아니라 조류 증식·사멸 과정에서 생성되는 내부 기원 유기물(Autochthonous OM)의 영향을 크게 받고 있음을 의미한다. 따라서 새

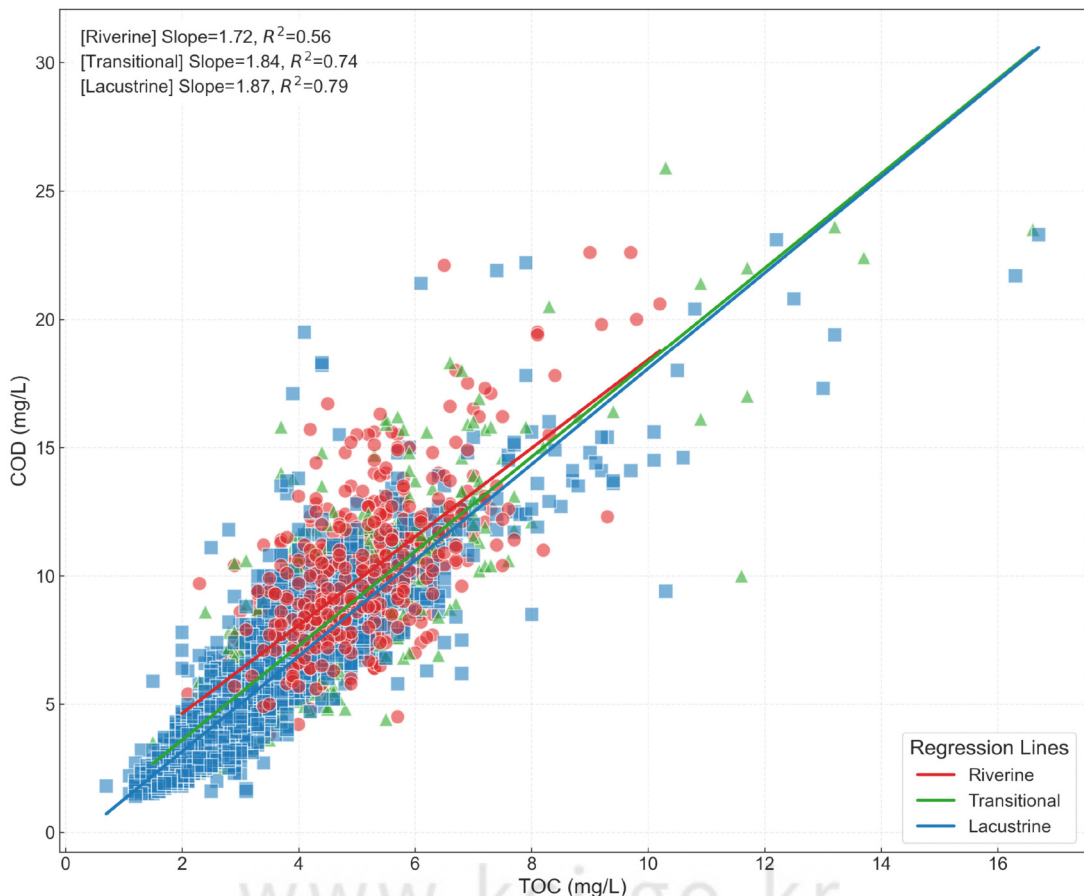


Figure 5. Linear regression analysis between Chemical Oxygen Demand (COD) and Total Organic Carbon (TOC).

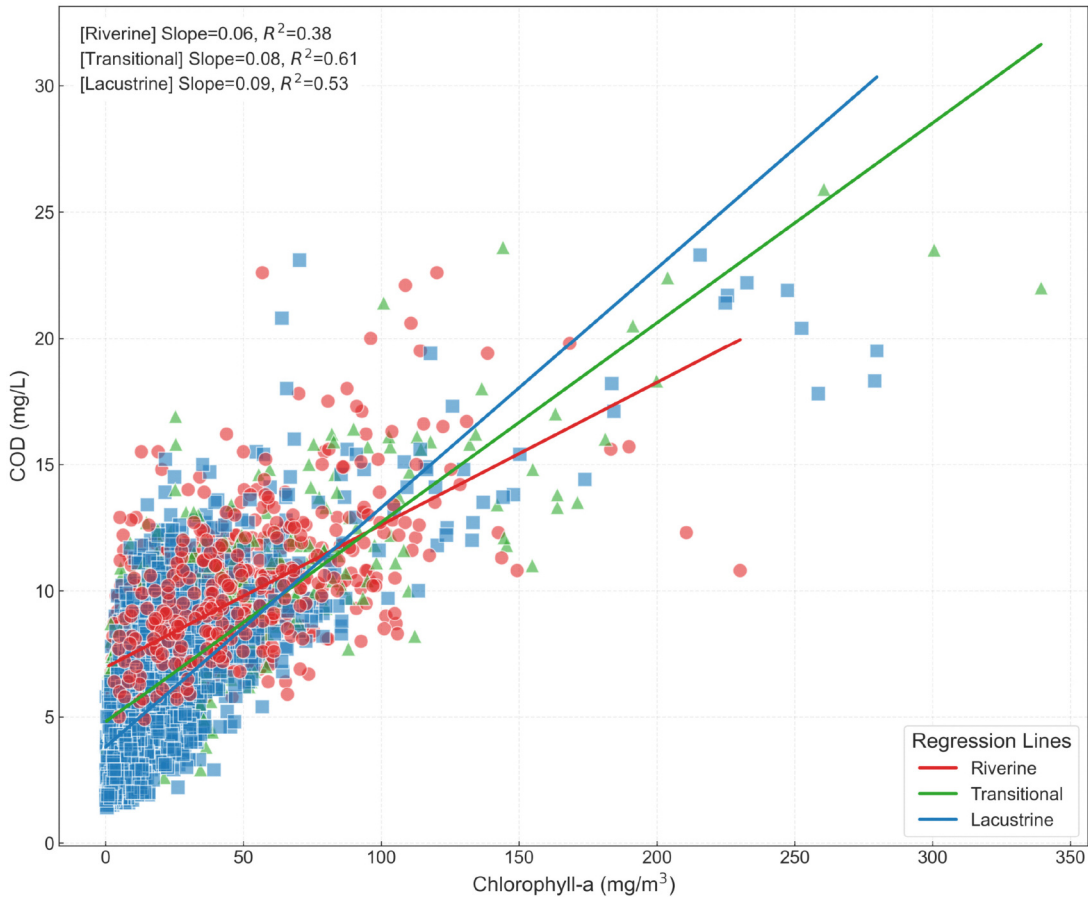


Figure 6. Scatter plot showing the correlation between Chlorophyll-a (Chl-a) and Chemical Oxygen Demand (COD).

만금의 수질 개선을 위해서는 외부 오염원 저감과 더불어, 내부 조류 증식을 제어할 수 있는 관리 전략이 병행되어야 함을 시사한다.

3. 영양염 제한 특성 및 부영양화 평가 (Nutrient Limitation and Trophic State Assessment)

조류(Phytoplankton)의 성장은 수체 내 영양염류의 절대적인 농도뿐만 아니라, 질소(N)와 인(P)의 상대적인 비율(Stoichiometry)에 의해 결정적인 영향을 받는다. 본 연구에서는 TN과 TP의 상관관계 분석을 통해 영양염 제한 요인을 규명하고, Carlson의 부영양화 지수(TSI)를 적용하여 새만금호의 종합적인 영양 상태를 평가하였다.

새만금유역 전 지점의 TN과 TP 농도 분포를 Redfield

Ratio (N:P = 16:1) 기준선과 비교 분석한 결과는 Fig. 7과 같다.

분석 결과, 거의 모든 관측값이 Redfield 기준선 (N:P = 16)의 상단, 즉 질소가 과잉된 영역에 분포하고 있음이 확인되었다. 이는 수체 내에 질소는 조류 성장에 필요한 양보다 훨씬 풍부하게 존재하며, 상대적으로 부족한 인(Phosphorus)이 식물성 플랑크톤의 1차 생산을 제한하는 요인(Limiting factor)으로 작용하고 있음을 강력하게 시사한다.

실제로 통계 분석 결과(Table 1), 하천 유입부(Riverine)의 TN/TP 비율은 평균 47.0 (± 42.9)에 달해 질소 과잉 상태가 뚜렷했으며, 호소 내측(Lacustrine)에서도 평균 18.8 (± 20.5)로 연중 16 이상의 P-limited 환경이 지속되고 있음이 확인되었다. Liebig의 최소량의 법칙(Law of the Minimum)에 근거할 때, 이러한 환경에서는 질

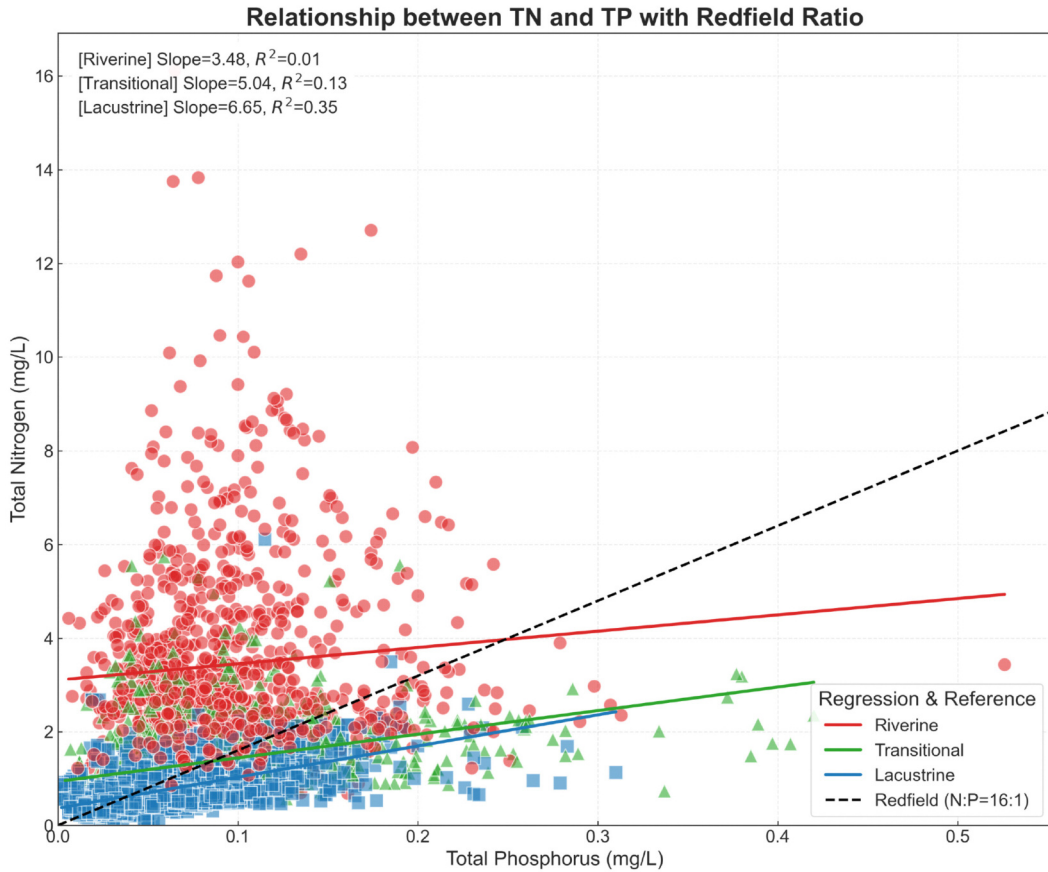


Figure 7. Scatter plot of Total Nitrogen (TN) versus Total Phosphorus (TP). The red dashed line indicates the Redfield ratio (N:P = 16:1).

소 부하를 저감하는 것보다 인(TP) 부하를 제어하는 것이 녹조 발생 억제 및 수질 개선에 훨씬 비용 효과적일 것으로 판단된다.

4. 종합적 부영양화 지수(TSI) 평가

새만금호의 영양 상태를 정량적으로 진단하기 위해 산정된 구역별 TSI(Trophic State Index) 분포는 Fig. 8과 같다.

평가 결과, 조사 대상 전 지점의 TSI 평균값이 부영양

화 기준선인 50을 초과하여, 새만금호 전체가 만성적인 부영양(Eutrophic) 상태에 놓여 있음이 확인되었다.

Table 3에 따르면, Riverine 구역의 평균 TSI는 65.1 (±5.8)로 조사 구역 중 가장 높은 수치를 기록했다. 특히 TSI 등급 분포 분석 결과, 전체 데이터의 약 77.9%가 부영양(Eutrophic) 단계에 해당하며, 20.7%는 기준치 70을 초과하는 과부영양(Hyper-eutrophic) 상태로 나타났다. 이는 유입 하천으로부터 고농도의 영양염류가 지속적으로 공급되어 수질 악화를 주도하고 있음을 시

Table 3. Trophic State Index (TSI) values and classification percentages by zone in the Saemangeum Reservoir.

Zone	TSI (Mean ± SD)	Oligotrophic (<30) (%)	Mesotrophic (30-50) (%)	Eutrophic (50-70) (%)	Hyper-eutrophic (>70) (%)
Riverine	65.1 ± 5.8	0.0	1.3	77.9	20.7
Transitional	60.1 ± 7.4	0.0	9.5	81.3	9.1
Lacustrine	55.3 ± 8.0	0.0	28.5	69.6	1.9

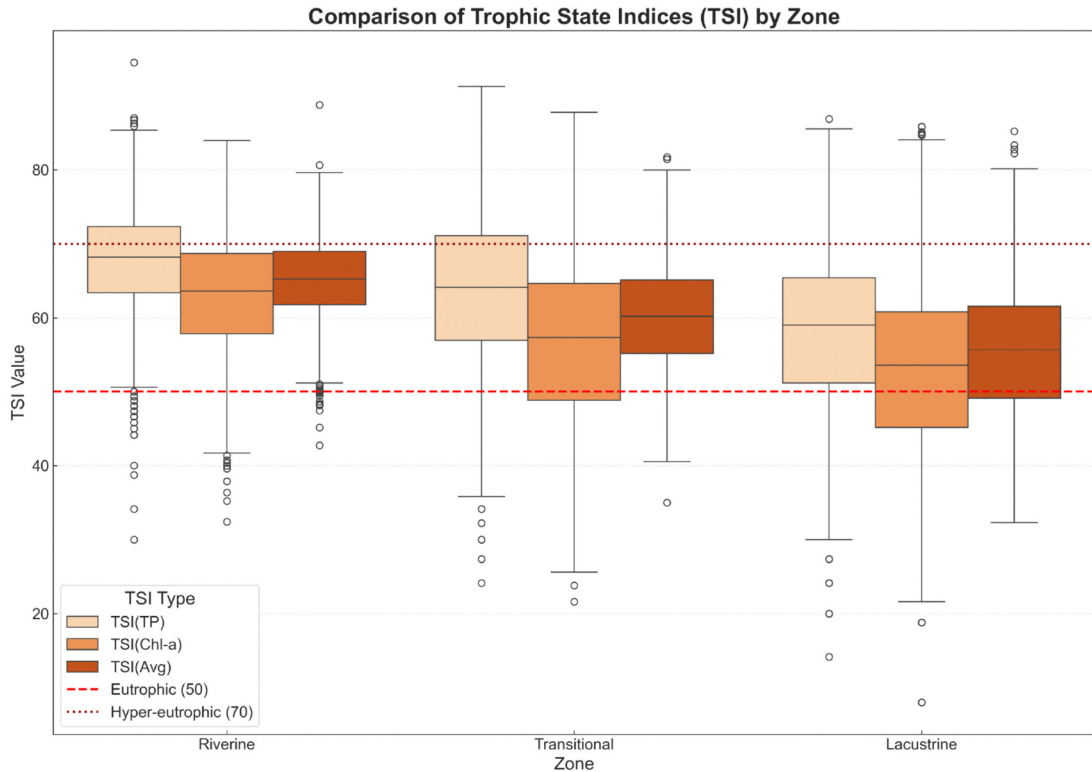


Figure 8. Boxplots of Trophic State Index (TSI) based on TP and Chl-a across different zones. The horizontal line within the box indicates the median, boundaries of the box indicate the 25th and 75th percentiles, and whiskers indicate the range within 1.5 times the interquartile range (IQR). Dashed lines indicate thresholds for eutrophic (50) and hyper-eutrophic (70) states.

사한다.

Transitional 및 Lacustrine 구역의 경우 물리적 희석 및 확산 효과로 인해 Riverine 구역보다는 TSI 값이 다소 낮아졌으나, Transitional 구역 (평균 60.1 ± 7.4)과 Lacustrine 구역 (평균 55.3 ± 8.0) 모두 여전히 부영양 상태를 유지하고 있다. 특히 Lacustrine 구역에서도 전체 데이터의 약 69.6%가 부영양 단계로 분류되어, 호소 내부의 영양염류 농축 현상이 광범위하게 진행되고 있음을 확인하였다.

종합하면, 새만금호는 외부 유입 부하와 내부 정체 수역의 특성이 복합적으로 작용하여 과영양 및 부영양 상태가 고착화된 것으로 판단된다. 앞서 확인된 인(P) 제한 특성과 결부할 때, 향후 수생태계 관리의 인(TP)을 핵심 제어 인자(Key factor)로 설정하여 유입 부하 저감과 내부 조류 증식 억제에 집중적인 대책을 수립해야 할 것이다.

5. 다변량 통계 분석을 통한 오염 특성 종합 (Multivariate Statistical Analysis)

앞서 분석된 수질 인자들 간의 복합적인 상호작용과 구역별 오염 특성을 종합적으로 시각화하기 위해 주성분 분석(PCA)을 수행하였으며, 그 결과는 Table 4 및

Table 4. Loadings of environmental variables on the first two principal components.

Variable	PC1 (48.1%)	PC2 (16.6%)
Temperature	0.24	-0.45
Salinity	-0.40	0.36
TN	0.30	-0.23
TP	0.32	-0.41
COD	0.46	0.25
TOC	0.44	0.19
SS	0.26	0.36
Chl-a	0.34	0.47
Variance Explained	48.14%	16.63%

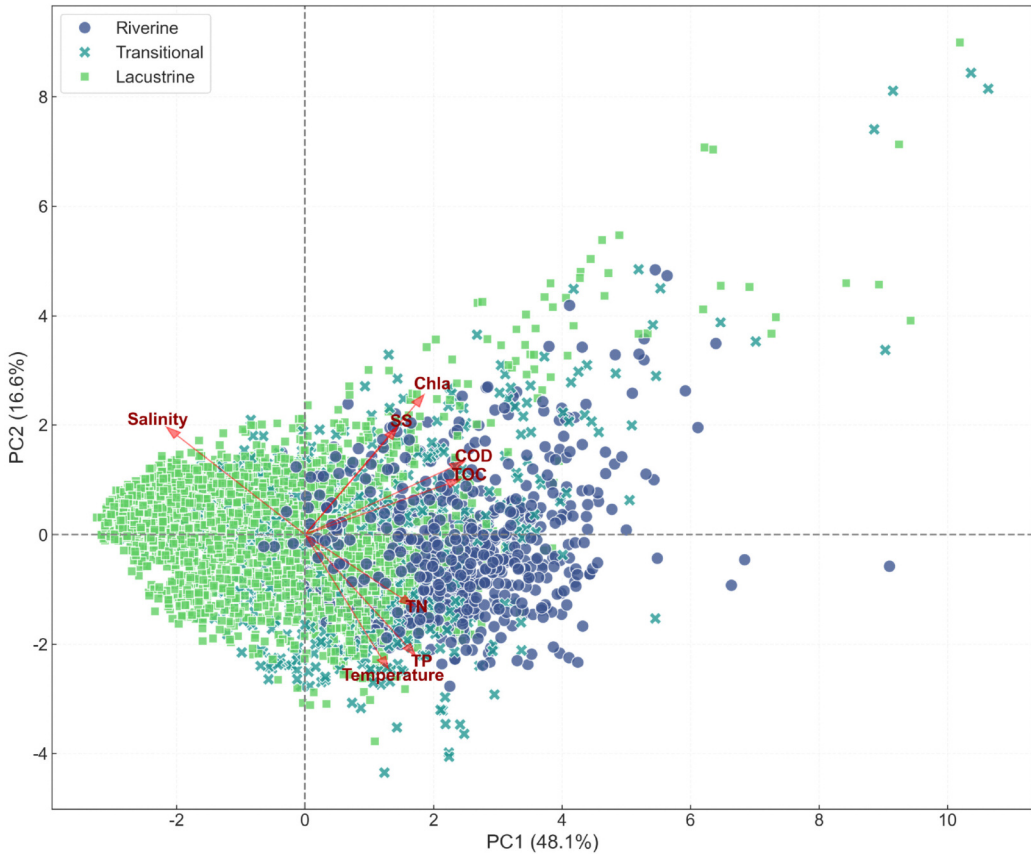


Figure 9. PCA Biplot showing the relationship between water quality variables and sampling zones.

Fig. 9와 같다.

PCA 수행 결과, 제1주성분(PC1)과 제2주성분(PC2)이 전체 데이터 변동의 약 64.8%를 설명하는 것으로 나타났다.

제1주성분 (PC1, 48.14% 설명력)은 COD (0.46), TOC (0.44) 등 유기물 지표와 양의 상관관계를, 염분(Salinity, -0.40)과는 뚜렷한 음의 상관관계를 보였다. 이는 담수 유입량 증가에 따라 유기물 농도가 함께 상승하는 담수 기원 오염 유입(Freshwater-driven Pollution Input)의 특성을 나타낸다. Biplot 상에서 Riverine 구역이 PC1의 양(+)의 방향에 치우쳐 분포하는 것은, 하천을 통한 육상 기원 오염 부하가 새만금호 수질 변동을 주도하는 가장 지배적인 요인임을 통계적으로 입증한다.

제2주성분(PC2, 16.63% 설명력)의 경우 식물성 플랑크톤 지표인 Chl-a (0.47)와 부유물질(SS, 0.36)은 양의 값을, 영양염류인 TP (-0.41)와 수온(-0.45)은 음의 값을

나타내어 생물학적 대사 활동(Biological Activity)을 대변하는 축으로 해석된다. 특히 Chl-a와 TP가 서로 상반된 부호를 보이는 것은, 조류의 대증식(Bloom) 과정에서 수체 내 인(P)이 영양원으로 소모(Uptake)되어 고갈되는 생지화학적 기작이 반영된 결과로 판단된다.

종합하면, 새만금호의 수질은 1차적으로 하천수 유입에 의한 물리·화학적 오염 부하(PC1)에 의해 결정되며, 2차적으로 조류의 성장과 영양염류 섭취와 같은 내부 생물학적 기작(PC2)이 복합적으로 작용하고 있음을 알 수 있다.

IV. Conclusion

본 연구는 새만금호의 수질 변동성과 오염 기작을 다변량 통계 기법으로 규명하였으며, 주요 결론은 다음과 같다.

첫째, 수질 악화는 하천 유입수(Riverine Zone)에 의해 주도되며, 외해로 갈수록 물리적 희석 작용에 의해 농도가 감소하는 경향을 보였다. PCA 수행 결과, 수질 변동은 담수 기원 오염 부하(PC1, 48.1%)에 의해 1차적으로 결정되고, 조류 증식 등 생물학적 기작(PC2, 16.6%)이 복합적으로 작용함을 통계적으로 입증하였다.

둘째, COD와 TOC의 높은 상관성은 유기물이 물리적 혼합 기작에 의해 지배됨을 보여주나, 호소 내측으로 갈수록 조류(Chl-a)와의 연관성이 증가하여 내부 기원 유기물(Autochthonous OM)의 기여가 뚜렷함을 확인하였다.

셋째, 새만금호 수역은 조류가 성장(Chl-a 증가)하면서 영양염(TP)을 섭취(감소)하는 생물학적 역의 관계로, 인 제한(P-limited) 환경이자 만성적인 부영양(Eutrophic) 상태로 진단되었다. 따라서 향후 수질 관리는 질소보다는 인(TP) 부하량 저감을 최우선 목표로 설정해야 하며, 하절기 녹조 발생에 따른 내부 오염 부하를 제어하는 전략이 필수적이다.

본 연구의 학술적 및 실무적 가치는 새만금호에서 하절기 강우에 의한 외부 유입(Allochthonous loading)과 춘계 수온 상승에 따른 내부 생물학적 생산(Autochthonous production)이 시공간적으로 분리되어 작용함을 10년간의 장기 데이터를 통해 실증했다는 데 있다. 이는 하구호의 수질 개선을 위해 상류 유역의 비점오염원 저감뿐만 아니라, 호 내측의 조류 증식 및 유기물 제어를 위한 내부 대책이 반드시 병행되어야 함을 과학적으로 시사한다. 향후 과제로는 본 연구에서 규명된 수질 인자 간의 상호작용 메커니즘을 기반으로, 머신러닝(Machine Learning) 등 고도화된 데이터 분석 기법을 접목하여 조류 대증식 및 부영양화를 사전 예측하는 모델 구축이 요구된다. 아울러 최근 심화하는 극한 강우 및 폭염 등 기후변화 양상이 하구 생태계에 미치는 영향을 파악하기 위해 지속적인 장기 모니터링이 수반되어야 할 것이다.

References

- Andersen, I. M., Taylor, J. M., Graeber, D., Kelly, P. T., Hoke, A. K., Robbins, C. J., & Scott, J. T. (2025). Redfield revisited: Insights into freshwater seston carbon : nitrogen : phosphorus stoichiometry. *Limnology and Oceanography*, 70(S1), S14-S26. <https://doi.org/10.1002/lno.70133>
- Baek, J.-Y., Guerreiro, C. V., Kim, J., Nam, J., & Jo, Y.-H. (2024). Coastal environmental changes after the Saemangeum seawall construction. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1307218. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1307218>
- Carlson, R. E. (1977). A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, 22(2), 361-369. <https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.2.0361>
- Chen, Z. L., Zhang, H., Yi, Y., He, Y., Li, P., Wang, Y., Wang, K., Yan, Z., He, C., Shi, Q., & He, D. (2024). Dissolved organic matter composition and characteristics during extreme flood events in the Yangtze Riverine Estuary. *Science of The Total Environment*, 914, 169827. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169827>
- Conley, D. J., et al. (2009). Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus. *Science*, 323, 1014-1015. <https://doi.org/10.1126/science.1167755>
- Glibert, P. M. (2017). Eutrophication, harmful algae and biodiversity—Challenging paradigms in a changing world. *Marine Pollution Bulletin*, 124(2), 591-606. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.04.027>
- Guildford, S. J., & Hecky, R. E. (2000). Total nitrogen, total phosphorus, and nutrient limitation in lakes and oceans. *Limnology and Oceanography*, 45(6), 1213-1223. <https://doi.org/10.4319/lo.2000.45.6.1213>
- Guo, Weidong & Stedmon, Colin & Han, Yuchao & Wu, Fang & Yu, Xiangxiang & Hu, Minghui. (2007). The Conservative and Non-conservative Behavior of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Chinese Estuarine Waters. *Marine Chemistry*. 107. 357-366. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2007.03.006>
- Imai, A., Fukushima, T., Matsushige, K., Kim, Y. H., &

- Choi, K. (2002). Characterization of dissolved organic matter in effluents from wastewater treatment plants. *Water Research*, 36(4), 859-870. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00283-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00283-4)
- 김종구. (2023). 새만금호의 수질 특성 및 영양상태지수를 이용한 부영양화 평가. *해양환경안전학회지*, 29(6), 587-597.
- Kim Jong Gu. (2023). Assessment of Eutrophication Using Trophic State Index and Water Quality Characteristics of Saemangeum Lake. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, 29(6), 587-597. <http://doi.org/10.7837/kosomes.2023.29.6.587>
- 김남희, 최성록, 오치욱. (2020). 선택실험법을 이용한 새만금호 해수유통 정책 선호 연구, *한국환경정책학회*, 28(3), 87-111.
- Kim, N. H., Choi, A. S., & Oh, C. O. (2020). Assessing Public Preferences for Politics on Seawater Flowing of the Saemangeum Reclamation Site Using Choice Experiments. *Environmental Policy*, 28(3), 87-111. <https://doi.org/10.15301/jepa.2020.28.3.87>
- Lee, D., Moon, J., Jung, S., Suh, S., & Pyo, J. (2024). Classifying eutrophication spatio-temporal dynamics in Riverine systems using deep learning technique. *Science of the Total Environment*, 954, 176585. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176585>
- Mousing, E. A., Richardson, K., & Ellegaard, M. (2018). Global patterns in phytoplankton biomass and community size structure in relation to macronutrients in the open ocean. *Limnology and Oceanography*, 63, 1298-1312. <https://doi.org/10.1002/lno.10772>
- Paerl, H. W., Hall, N. S., & Calandrino, E. S. (2011). Controlling harmful cyanobacterial blooms in a world experiencing anthropogenic and climatic-induced change. *Science of the Total Environment*, 409(10), 1739-1745. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.02.001>
- Park, J. W., Kim, S. Y., Noh, J. H., Bae, Y. H., Lee, J. W., & Maeng, S. K. (2022). A shift from chemical oxygen demand to total organic carbon for stringent industrial wastewater regulations: Utilization of organic matter characteristics. *Journal of Environmental Management*, 305, 114412. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114412>
- 박성화, 김종구, 권민선. (2023a). 새만금 배수갑문 운영에 따른 염분 변화와 저층수의 입자교환 모의. *해양환경안전학회지*, 29(6), 562-575.
- Park, S. H., Kim, J. G., & Kwon, M. S. (2023a). Salinity changes and bottom water particle exchange simulations in response to sluice gate operations at Saemangeum Lake. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, 29(6), 562-575. <https://doi.org/10.7837/kosomes.2023.29.6.562>
- Park, S. H., Kim, J. G., Myung, G. O., & Kwon, M. S. (2023b). Relationship between phytoplankton distribution and salinity in the giant artificial brackish Lake Saemangeum. *Ecology & Hydrobiology*, 23, 251-260. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2023.01.003>
- Redfield, A. C. (1958). The biological control of chemical factors in the environment. *American Scientist*, 46(3), 205-221.