

## 새만금호의 수질 특성 및 영양상태지수를 이용한 부영양화 평가

김종구\*†

\* 군산대학교 환경공학과 교수

## Assessment of Eutrophication Using Trophic State Index and Water Quality Characteristics of Saemangeum Lake

Jong Gu Kim\*†

\* Professor, Division of Environmental Engineering

**요 약** : 조류의 이상증식을 일으키는 새만금호 부영양화를 평가하기 위해 Carlson 지수를 적용하였다. 연구를 위해 2021년 월별로 새만금호내 총 7개 정점에서 수질조사를 실시하였다. Chl.a의 농도는 동계에는 만경수계가 약간 높았고, 춘계와 하계에는 동진수계가 약간 높게 나타났으나, 일부 시기를 제외하고는 전체적으로 호소 수질환경기준 3등급과 비슷하거나 낮은 농도를 나타내었다. COD는 만경수계와 동진수계 모두 하계와 추계에 호소 수질환경기준 4등급과 유사하거나 상회하는 수질을 나타내었다. TOC는 모든 지점에서 3등급 이내의 수질을 보였다. 총인 농도는 호소 수질환경기준 4등급을 초과하였고, 월별로는 1월과 강우 후 8월에 높게 나타났다. 수질인자간의 상관성 분석에서 염분 농도에 대한 유기물, 총인, 총질소의 상관성이 상대적으로 높게 나타나 배수갑문을 통한 해수유입과 상류 하천을 통한 담수 유입에 의한 담수역, 기수역, 해수역의 수질 특성을 반영하고 있었다. 영양상태지수에 의한 새만금호의 부영양화 변동 특성을 보면, Chl.a와 SD, TN의 지수에서 부영양화 초기 단계의 수질을 보였으며, TP 지수의 경우 심각한 부영양화 상태를 나타내고 있었다. 수질인자간 부영양화 지수의 크기는 모든 수계에서  $TSI(TP) > TSI(TN) > TSI(SD) > TSI(CHL)$ 의 순으로 나타났다.  $TSI(CHL)$ 에 대한  $TSI(TP)$  및  $TSI(SD)$ 와의 편차를 2차원 평면으로 나타낸 사분면 분석 결과를 보면, 조류 성장에 대한 총인이 영양에서는 모든 수계에서 대부분의 총인(TP)에 의한 제한적 영향은 나타나지 않았으며, 빛 감쇠에 영향을 미치는 인자는 외부로부터 유입되는 작은 입자상 물질에 의한 영향이 크게 나타나는 것으로 평가할 수 있다.

**핵심용어** : 새만금호, 수질변동특성, 상관분석, 영양상태지수, 사분면분석

**Abstract** : We evaluated the eutrophication of Saemangeum Lake, which causes abnormal growth of algae, using the Carlson index. Eutrophication characteristics of Saemangeum Lake were analyzed. For the study, water quality surveys were conducted at 7 stations in Saemangeum Lake every month in 2021. The concentration of Chl.a was slightly higher in the Mankyong water system in winter, and slightly higher in the Dongjin water system in spring and summer, but overall, except for some periods, the concentration was similar to or lower than the lake water quality environmental standard of class 3. COD showed water quality similar to or above the lake quality environmental standard of grade 4 in both the Mankyong and Dongjin water systems in the summer and Autumn. TOC concentrations were within lake water quality standard 3 at all sites. Total phosphorus concentrations exceeded the lake water quality standard of Class 4 and were higher in January and August after rainfall. In the correlation analysis between water quality factors, the correlation of organic matter, total phosphorus, and total nitrogen to salinity was relatively high. This reflected the water quality characteristics of freshwater, brackish water, and seawater areas due to seawater inflow through the drainage gate and freshwater inflow through upstream rivers. According to the characteristics of eutrophication fluctuations in Saemangeum Lake by trophic state index, the indices of Chl.a, SD, and TN showed water quality in the early stage of eutrophication, while the TP index showed a severe eutrophication state. The magnitude of the eutrophication index among water quality components was  $TSI(TP) > TSI(TN) > TSI(SD) > TSI(CHL)$  in all water systems. Quadrant analysis of the deviation of  $TSI(CHL)$  from  $TSI(TP)$  and  $TSI(SD)$  on a two-dimensional plane showed that there was no limiting effect of total phosphorus on algal growth in all water systems. In addition, the factors affecting light attenuation appeared to be dominated by small particulate matter from outside sources.

**Key Words** : Saemangeum Lake, The water quality fluctuation characteristics, The correlation analysis, Trophic state index, Quadrant analysis

† Corresponding Author : [kjg466@kunsan.ac.kr](mailto:kjg466@kunsan.ac.kr)

## 1. 서론

정부는 1987년 “새만금 간척 종합개발사업”을 발표하였고 사업을 추진하는 동안 환경문제로 많은 논쟁을 불러왔다. 사업착공은 1991년 방조제사업이 시작되었고 2006년 4월 방조제 체결되었으며, 2010년 4월 새만금 방조제가 준공되었다.

새만금호의 수질관리 기준은 새만금호 용수의 이용목적에 맞춰 도시용수와 농업용수로 구분하여 관리하고 있으며, 수변도시 및 배후도시 주변수역에 해당되는 도시용수의 수질목표를 3등급으로 정하였고, 호 상류수역은 농업용수 공급 목적에 맞춰 4등급으로 정하여 관리하고 있다.

새만금호의 유역 특성은 호 상류부는 만경강과 동진강의 영향을 받는 담수역의 특징을 가지며, 하류부는 신시갑문과 가력갑문의 영향으로 해수유입에 의한 영향을 받고 있고, 중류역은 전형적인 기수역의 특징을 가진다(Kim, 2023).

부영양화 지수를 이용한 연구는 하천 상류의 다목적댐과 하구 인공호를 대상으로 이루어졌다. 다목적댐에서의 연구를 보면, Park(2005)는 대청호의 수질 환경요인과 영양단계 평가에서 인이 조류성장의 제한인자로 작용하고 있고, 부영양화 지수값은 부영양단계와 중영양단계이며, 조류 성장시기와 강우 영향시기 등에 일시적인 지수의 변동이 발생하여 영양단계의 왜곡이 있을 수 있어 종합적 판단이 필요하다고 하였다. Kim and Kong(2019)는 한국형 부영양화 지수에서 사용되는 유기물 인자인 COD를 물환경 자동측정망에서 관측되는 TOC로의 적용성을 검토하기 위해 이들간의 상관관계를 바탕으로 검토한 바 있다. Kong and Kim(2019)은 조류에 의한 내부생산에 무게를 둔 영양상태지수의 평가가 필요하며, 이를 위해 환경부의 호소 수질측정망 대상 호수인 81개 호소의 상층부 자료를 이용하여 영양상태지수를 제시하였다. Kong(2019)는 환경부의 물환경측정망의 81개 호소 자료를 이용하여 수질 인자간의 특성을 평가하고, 식물플랑크톤 성장에 대한 제한 영양염류와 빛 감쇠에 영향을 주는 요인이 외부로부터 유입되는 비생물성 부유물질의 영향을 크게 받고 있다고 하였다.

하구 유역의 부영양화에 대한 연구로는 Ahn et al.(2013)은 금강유역을 대상으로 한국형 부영양화 지수를 이용하여 유기물, 조류의 밀도, 총인에 대한 종합적인 평가를 실시하여 부영양화 관리의 필요성을 제시하였다. Kim et al.(2012)는 한국형 부영양화 지수를 이용하여 금강수계의 호소를 대상으로 계절별 부영양화 지수를 평가하였는데, 하천 하류역에 위치한 대부분의 인공호에서 높은 지수값을 가진다고 보고하였다. Park et al.(2017)은 한국형 부영양화지수를 이용하여 영산강 유역의 12개 지점에서 4대강 사업과 수질오염총량관리제도의 시행으로 인한 부영양화 특성을 평가하였다. Park

and An(2007)은 국내 대형 인공호를 대상으로 계절적 수문현상, 특히 하계 집중강우에 의한 호소 수질의 변화 및 부영양화 지수의 평가를 실시하고, 경험적 모델을 통하여 부영양화 영향 요인을 분석하였는데, 계절적 변이는 하계 강우발생을 전후로 나타났으며, 부영양화지수(TSI)는 중영양, 부영양상태를 보였고, TSI(TN)은 계절에 관계없이 풍부한 부영양, 과영양 상태를 가진다고 보고하였다.

새만금호에 대한 연구를 보면, 새만금호 배수갑문의 해수유통과 관련된 연구가 다수(Shin et al., 2012a; Shin et al., 2012b; Kim et al., 2020)있으며, 새만금호 염분에 따른 어중변화(Park et al., 2013) 및 식물 플랑크톤 군집변화(Choi et al., 2013)가 있다. 최근 새만금호의 공간적 수질특성에 대한 연구(Kim, 2023)와 새만금호의 식물플랑크톤 이상증식에 대한 인공신경망을 이용한 대량증식체어 알고리즘과 관련된 연구(Park et al., 2023)가 있다.

현재 새만금호는 담수호 진행중에 있으나, 호내 수질문제가 항상 제기되고 있다. 새만금호 자연생태계 모니터링 조사(Ministry of Environment, 2018)에서 2008년 이후 10년간의 수질 변동에서 호 중앙부인 ME2, DE2 지점의 COD는 III등급에서 IV등급 이상의 수질로 악화되었다고 보고하고 있다. 특히 2020년에는 부영양화에 따른 조류 이상증식이 발생하고 빈산소수괴의 발생으로 인한 어류 폐사 등 수질문제가 제기되고 있다. 그러나 새만금호의 수질관리 정책은 상류 오염원에 대한 점오염원과 비점오염원과 관련된 정책뿐이며, 호내 수질관리 정책을 위해서는 호수 부영양화와 관련된 연구가 필요하다.

본 연구에서는 앞서 언급한 조류의 이상증식을 일으키는 새만금호 부영양화를 파악하기 위하여 기존 호수의 평가에 적용된 carlson 지수를 이용하여 영양수준을 평가하고자 한다. 연구 수행을 위하여 1년간 현장조사를 실시하여 새만금호 수질의 월변동 특성을 알아보고, 부영양화 관련 수질인자를 바탕으로 영양상태지수(Trophic State Index, TSI)를 이용하여 부영양화를 평가하여 새만금호 수질관리의 기초자료를 제공하고자 한다.

## 2. 연구내용 및 방법

### 2.1 대상유역

새만금 유역의 전체면적은 3,334.0km<sup>2</sup>이고, 만경강수계는 1,527.1km<sup>2</sup>으로 전체 유역의 45.8%, 동진강수계는 1,129.3km<sup>2</sup>으로 전체 유역의 33.9%를 차지하고 있으며, 새만금호의 면적은 677.6km<sup>2</sup>으로 20.3%를 차지하고 있다.

만경강은 유역면적 1,527.1km<sup>2</sup>, 유로연장 77.4km의 유역특성을 갖고 있으며, 유역의 행정구역은 전라북도 전주시, 군산

## 새만금호의 수질 특성 및 영양상태지수를 이용한 부영양화 평가

시, 익산시, 김제시, 완주군 등 5개의 시군을 포함하고 있고, 유역의 평균경사는 17.5%로 완만하며, 하천에 인접하여 농경지가 발달해 있고, 중 상류부에는 도시와 주거지역이 발달해 있다. 동진간 유역은 행정구역상 정읍시, 김제시, 고창군, 부안군이 있으며 전주시와 완주군의 극히 일부를 포함하고 있고, 농경지와 축산업이 산재해 있다.

동진수계와 만경수계의 특징을 보면, 인구가 집중되어 있는 만경강의 경우 토지계와 더불어 생활계의 배출량이 많은 반면 농업지역이 집중되어 있는 동진강의 경우 토지계와 더불어 축산계의 배출량이 높게 나타나고 있다. 동진강의 하천수질에 영향을 미치고 있는 주요 오염물질이 농업 및 축산활동에 기인하고 있는 것이다(Ryu et al., 2018).

### 2.2 새만금호 수질조사

새만금호의 수질 상태를 알아보기 위하여 2021년 1월부터 11월까지 월 1회 새만금호 내 7개 정점(Fig. 1)에서 수질조사를 실시하였으며, 하계 강우 후의 수질변동 특성을 평가하기 위하여 강우 후 2회 조사를 실시하였고, Fig. 2에 새만금 유역의 일별 강우량과 수질 조사시기를 나타내었다.

조사정점은 새만금호 내부를 만경강의 영향을 받는 만경수계(ME1, ME2, ML3, MK7)와 동진강의 영향을 받는 동진수계(DE1, DE2, DL3)로 구분하였다. 각 수계에서 담수의 영향을 받는 하천 유입구 지점(2개 정점, ME1, DE1), 담수와 해수가 혼합되는 새만금호의 중앙부 기수역 지점(2개 정점, ME2, DE2)과 정체구역에 해당되는 1개 정점(MK7) 그리고 신시갑문과 가력갑문을 통해 유입되는 외해수의 영향을 받는 지점(2개 정점, ML3, DL3)으로 구분하여 조사를 실시하였다(Fig. 1).

강우에 의한 영향을 평가하기 위하여 강우 발생 전을 중심으로 조사를 실시하였고, 하계 강우시에는 강우 후 조사를 실시하였는데, 8월 강우 후 조사와 9월 강우 후 조사가 이루어졌다.

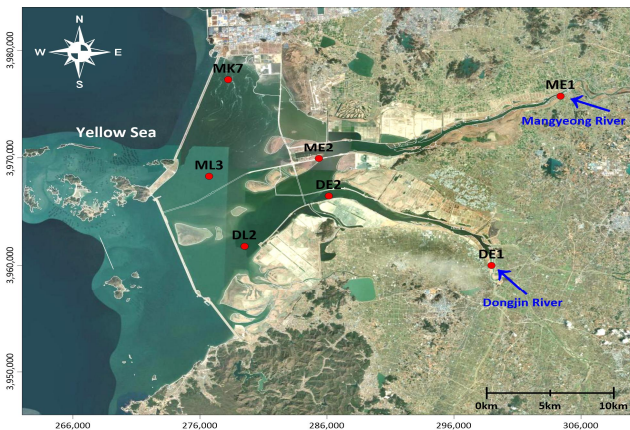


Fig. 1. Map of water quality survey points in Saemangeum Lake.

조사항목은 일반항목으로 수온, 염분은 CTD(Ocean seven 310)를 이용하고, 투명도(SD)는 Secchi Disk를 사용하여 현장에서 측정하였다. 유기물 및 영양염류는 채수 후 실험실에서 측정하였는데, 유기물로는 COD와 TOC를 측정하였고, 영양염류로는 총인(TP)과 총질소(TN)을 측정하였으며, 조류의 양을 알아보기 위하여 Chlorophyll a(Chl.a)를 측정하였다. 실험방법은 담수의 경우 환경오염공정시험법에 따랐으며, 해수의 영향을 받는 기수역의 경우 해양환경공정시험기준에 따라 분석하였다.

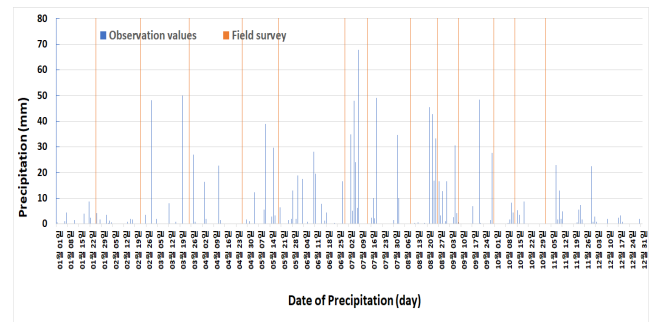


Fig. 2. Timing of daily precipitation and water quality surveys in the Saemangeum Basin.

### 2.3 Carlson의 영양상태지수

부영양화를 유발하는 질소나 인과 같은 영양염류는 적절한 농도로 존재할 경우 식물플랑크톤 성장을 유도하여 대상해역의 기초생산을 높이는 결과를 유도하지만, 부영양 상태가 되면 조류의 대량 증식으로 녹조를 발생시켜 호수 수질을 악화시킨다. 또한 부영양화 단계가 심각해지면 유독/유해성을 가진 남조류와 같은 플랑크톤이 번식으로 수생태계를 교란시키거나 수이용 목적에 심각한 악영향을 미친다.

부영양화가 수질 환경에 미치는 영향이 매우 크기 때문에 부영양화의 발생여부 및 진행 정도를 알아보기 위한 많은 연구가 진행되었다.

일반적으로 호소의 부영양화 상태는 어떤 지점에서 특정 단위 시간 동안 수중 내 존재하는 생물량(biomass)을 기준으로 측정한다. 이는 영양염 공급에 따라 생물학적 반응 정도를 이해하는 것이라 할 수 있으며 이러한 이유로 인하여 부영양화 지수는 계절적 변화, 동물 플랑크톤의 섭식량, 수직적 혼합에 따라 변화하게 된다. 그래서 호수에서의 생물량을 결정하는 조류의 성장과 관련된 수질인자를 평가함으로써 호소의 부영양화 상태를 판단하는 것으로 Carlson(1977)에 의하여 처음 영양상태지수(TSI)가 제시되었다.

Carlson(1977)에 의해 최초 제안된 부영양화 지수는 SD (Secchi depth) 값을 기준으로 TP과 Chl.a에 대해 자연로그로

변환하여 0~100까지의 등가수치 척도를 갖는 지수로 만들었으며, 지수 값이 10배 증가할 때마다 조류의 양이 두 배 증가한다는 의미를 가진다. 동일한 방법으로 Kratzer and Brezonik (1981)은 TN( $\mu\text{g/L}$ )에 대한 유사한 TSI(TN)를 개발하였다. 여기서 SD는 m, Chl.a와 TP, TN는  $\mu\text{g/L}$  단위이다. 부영양화지수에 따른 호수의 영양상태는 CTSI 값을 근거로 빈영양, 중영양, 부영양으로 구분하였으며, CTSI의 범위값과 호수 상태의 구분은 Table 1에 나타내었다(Devi Prasad and Siddaraju, 2012).

$$\begin{aligned} \text{TSI}(\text{SD}) &= 60 - 14.41 \ln(\text{SD}) \\ \text{TSI}(\text{CHL}) &= 9.81 \ln(\text{Chl-a}) + 30.6 \\ \text{TSI}(\text{TP}) &= 14.41 \ln(\text{TP}) + 4.15 \\ \text{TSI}(\text{TN}) &= 54.45 + 14.43 \ln(\text{TN}) \\ \text{CSTI}(\text{Carlson's trophic state}) &= [\text{TSI}(\text{SD}) + \text{TSI}(\text{CHL}) + \text{TSI}(\text{TP or TN})] / 3 \end{aligned}$$

Table 1. Carlson's trophic state index values and classification of lake

TSI values	Trophic Status	Attributes
< 30	Oligo-trophic	Clear water, oxygen throughout the year in the hypolimnion
30-40	Oligo-trophic	A lake will still exhibit oligotrophy, but some shallower lake will become anoxic during the summer
40-50	Meso-trophic	Water moderately clear, but increasing probability of anoxia during summer
50-60	Eutrophic	Lower boundary of classical eutrophy : Decreased transparency, warm-water fisheries only
60-70	Eutrophic	Dominance of blue-green algae, algal scum probable, extensive macrophyte problems
70-80	Eutrophic	Heavy algal blooms possible throughout the summer, often hypereutrophic
> 80	Eutrophic	Algal scum, summer fish kills, few macrophytes

2.4 TSI 개념을 이용한 부영양화 해석

Carlson이 제시한 부영양화지수는 식물플랑크톤의 증식에 의해 제한되며, 식물플랑크톤은 수중의 빛 감쇠를 지배한다는 개념으로 TP, Chl.a, SD 사이의 관계를 정립하여 TSI를 만들었다. 이는 TSI(CHL)와 TSI(SD)의 계산된 값 사이에 적절한 일치가 있을 경우, 조류가 빛 감쇠를 지배한다고 추론할 수 있다(Carlson, 1991). 그러나 TSI(CHL)가 TSI(SD)보다 상당히 낮을 때는 조류 이외의 색도 또는 비조류의 부유 입자상 물질이 빛 감쇠에 기여하고 있다는 것을 의미한다. 비록 작은 셀의 단위 생체량 당 큰 표면적은 큰 나노 또는 미세 플랑크톤보다 더 많은 빛을 감쇠하기 때문에 피코 플

랑크톤에 의한 우세는 TSI(CHL)와 TSI(SD) 사이에 부정적인 차이를 일으킬 수 있고 하였다(Edmondson, 1980). 이는 플로리다의 Apopka 호수가 식물 플랑크톤이 우점하고, 빛 감쇠는 주로 식물플랑크톤에 의해 이루어지지만, TSI(SD)가 TSI(CHL)보다 높게 나타나는 것으로 알 수 있다(Havens et al., 1999). 반대로 지수 값들 사이에 큰 양의 차이 즉, TSI(CHL)가 TSI(SD)보다 높을 값을 가질 때 조류가 단위 생체량 당 표면적이 더 작아서 빛을 덜 감쇠시키는 큰 입자에 의해 지배될 수 있음을 암시한다.

동일한 방법으로 TSI(CHL)와 TSI(TP), TSI(TN) 사이의 편차를 사용하여 TN, TP의 제한 여부를 추론할 수 있다. TSI(CHL)가 TSI(TP) 또는 TSI(TN)와 같거나 크면, TN 또는 TP는 일반적으로 조류 성장의 제한인자가 작용하나, TSI(CHL)가 TSI(TP), TSI(TN)보다 현저히 낮을 경우, 이는 TN, TP를 기준으로 예상되는 것보다 적은 녹조 물질이 존재하고 다른 요인이 제한적일 수 있음을 나타낸다.

Kratzer and Brezonik(1981)은 열대 및 아열대 지역에서는 플랑크톤이 종종 TP가 아닌 TN에 의해 제한된다고 지적했다. 그들은 표준 영양소 첨가에 의한 생물 측정에서 TSI(TP)와 TSI(TN)의 차이와 비교하였고, 두 지수 중 제한 영양소가 더 작은 지수를 가지는 것을 발견했다.

Carlson(1991)은 호수 평가를 위한 2차원 그래픽 접근 방식을 제공함으로써 TSI 차이의 개념을 확장했다.

X축에 TSI(CHL)과 TSI(SD)의 편차를, Y축에 TSI(CHL)과 TSI(TP or TN)와의 편차를 이용하여 TSI 값의 차이를 동시에 고려할 경우 네 가지 조건을 추론할 수 있다(Fig. 3).

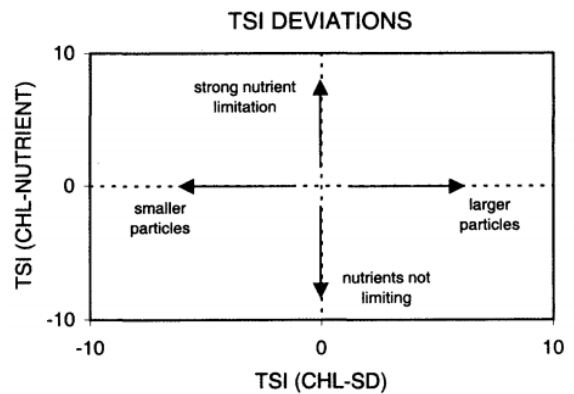


Fig. 3. Differences among trophic state index (TSI) values indicate both the degree of nutrient limitation and the composition of seston, as described in the text. Axes represent differences between TSI values based on chlorophyll a (CHL), nutrients, and Secchi depths (SD), and labels in the four quadrants of the graph indicate the inferred conditions (Havens, 2000).

## 새만금호의 수질 특성 및 영양상태지수를 이용한 부영양화 평가

TSI(CHL) >> TSI(SD)와 TSI(CHL) >> TSI(영양소)의 우측 상단의 호수가 상대적으로 큰 조류이며, 영양소(TP, TN)의 제한을 받는다고 추론되며, TSI(CHL) << TSI(SD)와 TSI(CHL) < TSI(영양소)인 왼쪽 하단 사분면은 호수가 높은 색도를 가지거나 작은 입자의 생체 seston이나 조류에 제한을 받는다고 추론된다.

TSI(영양소) << TSI(CHL) << TSI(SD)의 상단 좌측 사분면에서는 조류는 영양소(TP, TN)에 제한을 받고, 크기가 작은 입자의 영향을 받는 것으로 추론되는 반면, TSI(영양소) >> TSI(CHL) >> TSI(SD)의 하단 우측 사분면에서는 조류는 크기가 크고, 섭식자에 의해 영향을 받는다는 것을 추론할 수 있다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 새만금호의 수질 특성

새만금호 내부 방수제 건설시 호 중앙부에 동서방향으로 방수제를 설치함으로써 만경강의 영향을 받는 만경수계(ME1, ME2, ML3, MK7)와 동진강의 영향을 받는 동진수계(DE1, DE2, DL2)로 분리되어 있어, 상류 오염 부하가 다른 두 하천의 특성에 따라 다른 수질 특성을 가진다.

새만금호 내의 만경수계와 동진수계에 대한 월별 수질인자의 시계열 변화특성을 Table 2에 나타내었고, 새만금호 수계의 주요 수질기준 항목인 COD, TOC와 총인 및 총질소, Chl.a의 시계열 농도변화를 수질환경 기준치와 비교하여 Fig. 4-7에 나타내었다.

염분의 연간 월변동 범위는 동진수계에서 2.96~20.89 psu, 만경수계에서 2.57~20.18 psu 농도범위를 보였다. 시기별로는 2월에 가장 높았으며, 강우의 영향을 받은 하계 7~9월에 낮은 염분농도를 나타내었다.

COD의 연간 월변동은 동진수계에서 3.84~11.25 mg/L, 만경수계에서 5.32~9.57 mg/L의 범위를 보였고, TOC의 경우 동진수계에서 2.44~5.81 mg/L, 만경수계에서 2.71~4.24 mg/L의 범위를 보였다. COD는 만경수계와 동진수계에서 비슷한 농도 수준을 나타내었으나, 강우의 영향을 받는 하계에는 만경수계에서 높은 COD 농도를 나타내었다. 시기적으로는 동계가 낮고 하계가 높은 특성을 나타내었고, 1월이 가장 낮았고, 7월이 가장 높게 나타났다. 새만금호 목표수질인 수질환경기준과 비교하면 COD의 경우 1월을 제외하고는 모든 시기에 도시용수기준인 III 등급인 5 mg/L를 초과하였고, 5~9월 동안에는 농업용수 기준인 IV등급을 초과하고 있었다. TOC의 농도는 COD농도보다 대부분 낮은 농도를 나타내고 있었다.

총인의 연간 월변동 특성을 보면, 동진수계에서 0.058~0.222 mg/L, 만경수계에서 0.073~0.197 mg/L의 농도 범위를 보였다. 월별로는 1월에 가장 높게 나타났고, 2월이 가장 낮

았으며, 하계 7~9월에 다시 증가하는 경향을 보였다. 수계별로는 대부분 비슷한 농도 수준을 보였으나, 농도가 높은 시기에는 만경수계에서 더 높게 나타났다. 새만금호 목표수질인 수질환경기준과 비교하면 모든 시기에 농업용수 기준인 IV등급을 상회하는 높은 농도를 보였다. 강우시기인 하계 강우 후 조사에서 높은 총인의 농도를 보여 강우로 인한 부하의 영향이 있음을 알 수 있다. 전체적으로 새만금호의 수질관리를 위해서는 총인에 대한 점오염 및 비점오염원의 관리가 중요함을 알 수 있으며, 특히 강우가 적은 동계에 높은 총인의 농도를 고려하면 호내 수질관리가 중요하다는 것을 말한다.

총질소의 연간 월변동 특성을 보면, 동진수계에서 1.068~2.607 mg/L, 만경수계에서 1.103~4.059 mg/L의 농도 범위를 보였다. 월별로는 1월에 가장 높은 농도를 보였고, 6월에 가장 낮은 농도를 나타내었다. 상대적으로 강우가 적은 겨울철에 대부분 높게 나타났고, 강우 시기에 약간의 농도 증가는 있으나, 큰 변동은 없었다.

Table 2. Average monthly concentration of water quality in the Mankyeong and Dongjin water systems in Saemangeum Lake

Month	Item	Temp	Sal	COD	TN	DIN	TP	DIP	Chl-a	TOC	SD
Dongjin Area	1	5.14	13.20	3.840	2.516	2.242	0.222	0.014	4.781	2.700	1.9
	2	6.50	20.89	5.824	2.473	2.305	0.067	0.011	16.509	2.441	1.45
	3	10.85	14.94	5.264	2.607	2.018	0.058	0.005	13.565	3.098	2.25
	4	17.94	12.33	6.757	1.401	1.125	0.073	0.004	15.743	3.717	1.3
	5	21.38	6.51	9.093	1.477	1.738	0.119	0.022	68.539	5.812	0.55
	6	26.70	10.63	9.093	1.068	0.761	0.117	0.022	15.140	3.860	1.1
	7	29.44	2.96	11.253	1.883	1.677	0.151	0.016	28.453	5.600	1.9
	8-1	30.76	6.08	9.958	1.675	0.669	0.132	0.021	20.868	4.560	1
	8-2	25.62	4.92	8.189	2.144	1.979	0.206	0.093	2.884	3.740	0.4
	9-1	24.66	6.58	6.779	1.387	1.338	0.138	0.068	11.259	3.450	1.45
	9-2	23.49	10.78	7.575	1.683	1.611	0.138	0.068	11.259	3.653	0.85
10	22.08	10.21	8.976	1.546	1.414	0.128	0.033	33.944	3.253	0.7	
11	16.84	11.47	5.819	1.828	1.380	0.083	0.013	13.596	3.203	1.1	
Mankyeong Area	1	5.71	14.42	5.320	4.059	4.005	0.197	0.008	21.556	3.360	1.43
	2	7.08	20.18	5.923	2.357	2.135	0.069	0.033	31.197	2.957	1.10
	3	12.46	15.92	5.829	2.074	1.888	0.075	0.006	6.713	3.271	1.75
	4	18.30	10.50	6.904	1.389	1.306	0.088	0.018	22.855	4.265	0.70
	5	23.64	3.11	8.376	1.541	1.623	0.126	0.044	18.217	5.007	1.50
	6	26.69	10.95	7.944	1.397	1.219	0.108	0.040	13.877	4.083	0.83
	7	28.99	2.57	9.507	1.841	1.554	0.122	0.034	22.634	4.143	1.43
	8-1	28.08	6.59	9.027	1.381	1.090	0.133	0.040	18.513	4.218	0.65
	8-2	25.21	3.59	7.809	1.908	1.734	0.179	0.081	4.896	3.710	0.43
	9-1	24.32	3.07	8.266	1.703	1.598	0.128	0.059	9.875	3.583	0.73
	9-2	22.85	5.25	9.570	1.701	1.459	0.134	0.061	9.491	4.243	0.75
10	19.87	5.73	7.960	1.941	1.542	0.120	0.028	29.496	3.808	0.58	
11	11.94	8.36	5.944	1.103	0.694	0.073	0.010	7.303	2.710	0.80	

새만금호 목표수질인 수질환경기준과 비교하면 수계 모든 지점에서 호소수질환경기준 4등급(1.0 mg/L이하)을 초과하는 농도를 나타내었다.

Chl.a의 연간 월변동 특성을 보면, 동진수계에서 2.884 ~ 68.539 mg/L, 만경수계에서 4.896 ~ 29.496 mg/L의 농도 범위를 보였다. 월 변동 특성에서 5월에 동진수계에서 가장 높은 Chl.a 농도가 나타났고, 강우시기인 하계 8-9월에 상대적으로 낮은 농도를 나타내어 강우에 의한 희석효과가 큼을 알 수 있었다. 새만금호 목표수질인 수질환경기준과 비교하면 농업용수기준 IV 등급(35 mg/m<sup>3</sup>)은 대부분 초과하지 않았고, 도시용수기준인 III 등급(20 mg/m<sup>3</sup>)은 일부 시기(7, 10월)에 초과하였다.

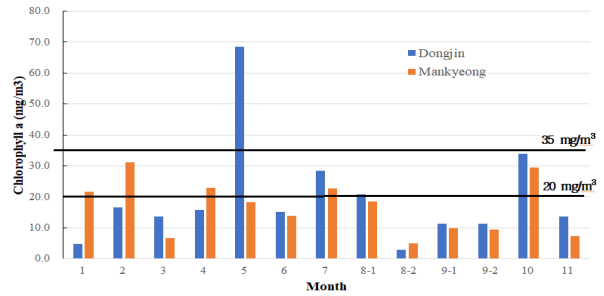


Fig. 7. Monthly variation of Chlorophyll a in the Dongjin and Mankyong water systems in Saemangeum Lake.

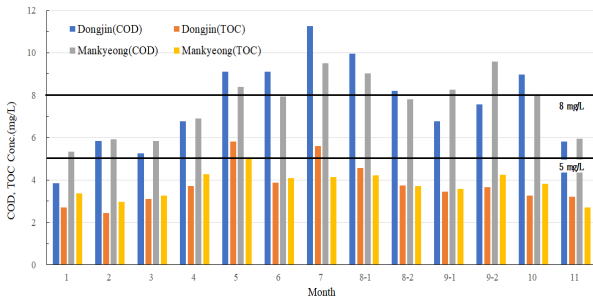


Fig. 4. Monthly variation of organic matter in the Dongjin and Mankyong water systems in Saemangeum Lake.

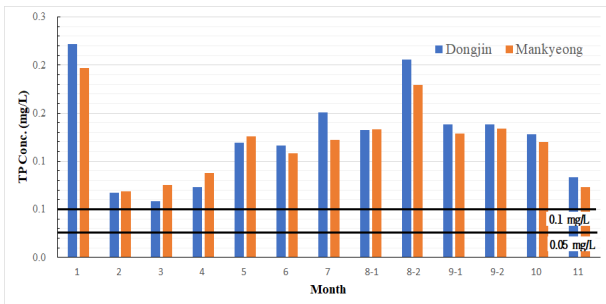


Fig. 5. Monthly variation of Total Phosphorus (TP) in the Dongjin and Mankyong water systems in Saemangeum Lake.

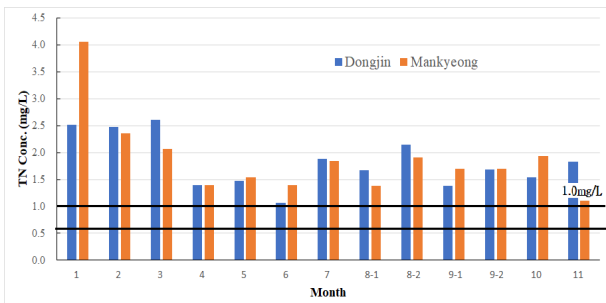


Fig. 6. Monthly variation of Total Nitrogen (TN) in the Dongjin and Mankyong water systems in Saemangeum Lake.

### 3.2 수계별 수질인자간의 상관계수

새만금호의 만경수계와 동진수계에서 수질인자간의 상관 특성을 분석하여 Table 3, 4에 나타내었다.

새만금호가 신시 및 가력갑문을 통한 외해수의 유입으로 갑문 입구부는 해수의 영향을 많이 받고 있으며, 내측으로 갈수록 담수의 영향이 크게 나타나고 있어, 염분의 농도에 대한 유기물 및 영양염류의 역상관성이 대부분 높게 나타났으며, 만경수계보다는 동진수계에서 상관성이 크게 나타났는데, 특히 동진수계의 상류는 주로 농업과 축산에서 배출되는 비점오염원의 영향이 커서 질소와 인에 대한 염분의 상관성이 만경수계 보다 높게 나타난 것으로 판단된다(Ryu et al., 2018) 또한 만경수계에서의 낮은 상관성은 군산 산업단지 앞 MK7 정점과 관련성이 있는 것으로 판단되는데, 새만금호 자연생태계 및 퇴적물 모니터링(III) 보고에서 상류의 강우에 의한 총인 농도가 높은 시기에 호내 조사 정점 중 MK7지점에서만 가장 낮은 총인 농도가 보고되었다는 자료와 관련성이 있다고 판단된다(Ministry of Environment, 2016).

Table 3. Correlations(R<sup>2</sup>) among water quality constituents in the Dongjin area in Saemangeum Lake

	Temp	Sal	COD	TN	DIN	TP	DIP	Chl-a	TOC
Temp	1.000								
Sal	-0.471	1.000							
COD	<b>0.704</b>	<b>-0.540</b>	1.000						
TN	-0.170	<b>-0.608</b>	0.090	1.000					
DIN	-0.218	<b>-0.571</b>	0.021	<b>0.942</b>	1.000				
TP	0.170	<b>-0.608</b>	0.205	0.404	0.392	1.000			
DIP	0.380	<b>-0.523</b>	0.149	0.228	0.281	<b>0.578</b>	1.000		
Chl. a	0.141	-0.203	0.191	-0.001	0.115	-0.057	-0.091	1.000	
TOC	<b>0.588</b>	<b>-0.526</b>	<b>0.713</b>	0.046	<b>0.068</b>	0.142	0.011	0.370	1.000

새만금호의 수질 특성 및 영양상태지수를 이용한 부영양화 평가

Table 4. Correlations(R<sup>2</sup>) among water quality constituents in the Mankyeong area in Saemangeum Lake

	Temp	Sal	COD	TN	DIN	TP	DIP	Chl-a	TOC
Temp	1.000								
Sal	<b>-0.607</b>	1.000							
COD	<b>0.581</b>	<b>-0.574</b>	1.000						
TN	-0.244	-0.406	0.166	1.000					
DIN	-0.237	-0.422	0.153	<b>0.987</b>	1.000				
TP	0.121	<b>-0.628</b>	0.229	0.482	<b>0.513</b>	1.000			
DIP	0.398	<b>-0.532</b>	0.104	0.149	0.161	0.489	1.000		
Chl. a	-0.047	-0.057	0.271	0.366	0.356	-0.101	-0.193	1.000	
TOC	0.428	<b>-0.581</b>	<b>0.628</b>	0.394	0.380	0.223	0.056	0.463	1.000

두 수계에서 총인과 총질소에 대한 무기인과 무기질소의 상관성을 보면, 질소의 경우 두 수계 모두 0.9 이상의 높은 상관성을 가지고 있으나, 인의 경우 상대적으로 낮은 상관성을 보였고, 만경수계에서 더 낮은 상관성을 나타내었다.

특히, 질소와 인의 경우 조류의 영양소로 조류 성장과 밀접한 관련성이 가지는 것이 일반적이거나 새만금호의 조류농도와 영양염류와의 상관성이 극히 낮게 나타나 질소와 인이 조류 성장의 제한인자로 작용하는 농도를 훨씬 상회하는 농도를 가지고 있음을 판단할 수 있다.

3.3 새만금호 부영양화 지수의 평가

새만금호의 부영양화 정도를 평가하기 위하여 새만금호 내 만경수계와 동진수계의 7개 정점에서 조사된 수질측정 자료를 이용하여 Carlson의 부영양화 지수를 수계별, 월별, 계절별로 계산하여 Table 5, 6 및 Fig. 8, 9에 나타내었다.

TSI(SD)의 지수 범위는 동진수계에서 48.9~73.7(평균 59.0)을 보였고, 만경수계에서는 48.9~70.7(평균 58.5)로 나타났다. 가장 높은 값은 두 수계 모두 8월 강후 후 조사된 시점에서 나타났으며, 가장 낮은 값은 갈수기 3월로 나타났다. 이는 강우 후 상류역으로부터 공급된 토사 등의 유입 영향을 나타낸 것으로 판단된다. 계절 평균값은 모든 수계에서 하계와 추계에 높게 나타났고, 동계가 가장 낮았다.

TSI(Chl)은 동진수계에서 38.8~64.8(평균 54.2)의 범위를 보였고, 만경수계에서는 40.6~65.0(평균 53.2)의 값을 나타내었다. 모든 수계에서 하계 강우 유출 후에 가장 낮은 값을 보였으며, 2월과 5월에 높은 지수값을 나타내었다. 계절 평균값에서 전 계절에 걸쳐 비슷한 값을 나타내었으나, 추계가 상대적으로 약간 높은 지수를 보였다.

TSI(TP)는 동진수계에서 61.2~81.2(평균 71.5)의 범위를 보였고, 만경수계에서는 61.9~81.5(평균 71.5)의 값을 나타내었다. 모든 수계에서 동계 1월에 가장 높은 지수값을 보였고,

2, 3월에 낮은 지수값을 나타내었다. 계절 평균값은 춘계가 가장 낮은 값을 보였고, 하계가 상대적으로 약간 높으나, 큰 차이는 없었다.

TSI(TN)은 동진수계에서 51.6~72.4(평균 59.4)의 범위를 보였고, 만경수계에서는 55.1~63.9(평균 60.3)의 값을 나타내었다. 월별 변동에서 동진수계에서는 하계가 낮고 동계가 높은 경향을 보였으나, 만경수계에서는 연중 변화는 거의 없었다.

Carlson 지수(CTSI)에 의한 부영양화 정도를 보면, CTSI(P)는 동진수계에서 54.6~67.9(평균 61.6)의 범위를 보였고, 만경수계에서는 53.2~64.7(평균 61.6)의 범위를 나타내었고, CTSI(N)은 동진수계에서 52.8~62.2(평균 57.5)의 범위를 보였고, 만경수계에서는 49.0~61.2(평균 57.3)의 범위를 나타내었다.

Table 5. Monthly variation of Carlson Trophic State Index, Saemangeum Lake

Area	Month	TSI(SD)	TSI(Chl)	TSI(TP)	TSI(TN)	CTSI(P)	CTSI(N)
Dongjin	Jan	50.78	43.92	81.16	63.5	58.62	52.75
	Feb	54.66	57.97	61.65	72.4	58.09	61.68
	Mar	48.95	53.50	61.24	62.6	54.56	55.03
	Apr	57.37	45.05	63.26	66.8	55.23	56.39
	May	68.67	59.51	72.54	55.6	66.91	61.25
	Jun	59.18	56.00	72.19	61.3	62.46	58.84
	Jul	50.78	62.46	75.18	52.4	62.81	55.22
	Aug-A	60.68	59.58	73.73	51.6	64.67	57.29
	Aug-B	73.66	38.75	80.45	60.3	64.29	57.57
	Sep-A	55.38	54.20	74.40	56.6	61.32	55.40
	Sep-B	62.57	54.20	74.40	61.1	63.72	59.27
Nov	65.28	64.84	73.75	53.0	67.96	61.04	
Man-kyeong	Jan	58.69	53.95	66.74	55.4	59.79	56.00
	Feb	51.34	40.61	81.05	55.1	57.67	49.02
	Mar	54.61	65.02	61.91	63.9	60.51	61.16
	Apr	48.91	48.07	62.64	59.4	53.21	52.13
	May	61.91	52.75	63.85	56.9	59.50	57.20
	Jun	53.80	53.67	72.79	61.0	60.09	56.16
	Jul	59.63	54.13	72.43	63.3	62.06	59.01
	Aug-A	51.34	59.57	72.63	60.9	61.18	57.28
	Aug-B	62.65	59.63	71.90	60.6	64.73	60.95
	Sep-A	70.68	40.61	79.44	62.5	63.58	57.94
	Sep-B	60.61	52.52	73.66	59.0	62.27	57.39
Nov	60.20	52.52	73.66	59.6	62.13	57.43	
Man-kyeong	Oct	64.40	58.80	73.04	58.8	65.41	60.67
	Nov	60.20	53.14	71.22	63.4	61.52	58.90

\*CSTI (Carlson's trophic state) = [TSI(SD) + TSI(Chl) + TSI(TP) or TSI(TN)] / 3



Table 6. Seasonal variation for Carlson Trophic State Index, Saemangeum Lake

Season	TSI(SD)	TSI(Chl)	TSI(TP)	TSI(TN)	CTSI(P)	CTSI(N)
Dongjin	Winter	52.72	50.95	71.40	67.97	58.36
	Spring	58.33	52.69	65.68	61.66	58.90
	Summer	61.07	54.20	75.39	56.42	63.55
	Autumn	60.48	56.80	72.32	56.50	63.20
Man-kyong	Winter	52.98	52.82	71.48	59.48	59.09
	Spring	54.87	51.50	66.43	59.12	57.60
	Summer	61.08	53.48	74.10	61.83	62.89
	Autumn	61.35	54.25	72.89	60.19	62.83

새만금호의 부영양화 지수값을 Table 1에 제시한 부영양화 단계에 나타나는 수질현상과 비교해 보면, 모든 수계에서 TSI 지수가 50이상으로 부영양화 초기 단계의 수질을 나타내고 있으며, 일부 계절에는 부영양화 중간 단계 이상의 수질을 나타내기도 한다. 그러나 총인 지수의 경우 평균 60 이상으로 남조류의 우점과 algae scum 출현 및 대형조류 문제 등 심각한 부영양화를 나타낼 수 있다.

각 항목별 지수값의 크기를 비교하면 모든 수계에서 TSI(TP) > TSI(TN) > TSI(SD) > TSI(CHL)의 순으로 나타났다. 연평균 총인 지수는 동진수계에서 71.54, 만경수계에서 71.51로 가장 높은 부영양도 지수를 보였고, 클로로필 지수는 동진수계에서 54.15, 만경수계에서 53.16으로 가장 낮은 부영양도 지수를 나타내었다.

따라서, 새만금호의 적절한 수질관리를 위해서는 기존의 새만금호 수질관리를 위한 대책으로 추진되고 있는 상류 오염원 대책인 점오염원과 비점오염원에 대한 관리 대책이 주를 이루고 있다. 따라서 새만금호내 수질관리 대책으로 호내 저층 퇴적물 관리, 호내 하계 성층 방지를 위한 폭기 및 순환관리, 호내 수변구역의 습지관리 등 다양한 호내 관리방안의 적용이 필요하다고 판단된다.

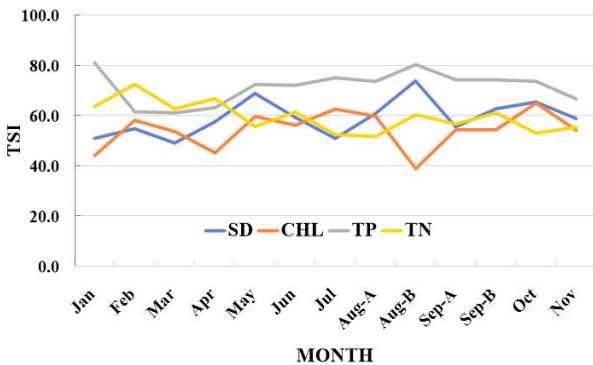


Fig. 8. Monthly variation of TSI at the Dongjin water system in Saemangeum Lake.

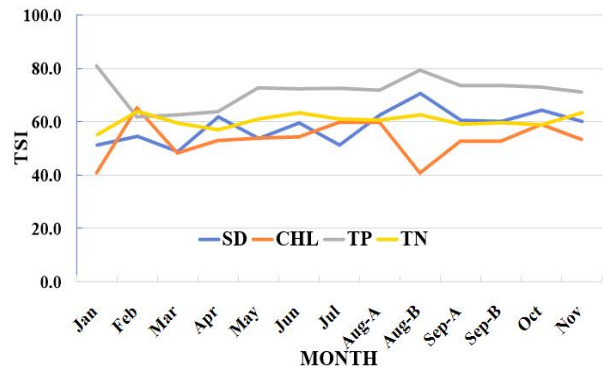


Fig. 9. Monthly variation of TSI at the Mankyong water system in Saemangeum Lake.

### 3.4 TSI 개념을 이용한 새만금호 부영양화 해석

Fig. 3에 나타낸 것 같이 Carlson은 각 항목의 부영양도 지수를 이용하여 기존의 TSI의 개념을 엽록소와 투명도간의 편차와 엽록소와 영양염 간의 편차를 이용하여 2차원 그래픽 개념을 적용한 사분면 해석을 제시하였다.

이는 엽록소와 영양염, 투명도에 기초한 지수값의 편차는 조류에 의한 영향과 조류 이외의 비조류에 의한 영향으로 구분하였고, 엽록소 지수와 투명도 지수가 조류의 빛 감쇠를 지배한다는 가정하에 해석하였다. 이들 편차로부터 조류 성장의 제한인자로서 작용하는 영양염을 판단할 수 있고, 비조류의 세스톤(부유 입자상 물질)에 의한 영향을 추론할 수 있다.

새만금호의 만경수계와 동진수계에서 엽록소 지수에 대한 총인 지수, 총질소 지수 및 투명도 지수와의 편차를 이용한 사분면 분석 결과를 Fig. 10~11에 나타내었다.

TSI(CHL)에 대한 TSI(TP) 및 TSI(SD)와의 편차를 2차원 평면으로 나타낸 결과를 보면, 모든 수계에서 조류 성장에 미치는 총인의 제한적 영향은 나타나지 않았고, 2월과 7월을 제외하고는 빛 감쇠에 영향을 미치는 외부로부터 유입된 작은 입자상 물질에 의한 영향이 있는 것으로 나타났다. 특히, 하계 강우 후에는 작은 입자상 물질에 의한 영향이 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수 있다.

TSI(CHL)에 대한 TSI(TN) 및 TSI(SD)와의 편차를 2차원 평면으로 나타낸 결과를 보면, 조류 성장에 대한 총질소의 제한적 영향은 동진수계에서 5~10월에 나타났으나, 만경수계에서는 나타나지 않았다. 빛 감쇠와 관련있는 입자에 의한 투명도에 미치는 영향에서 동진수계의 2~3월과 7월을 제외하고는 대부분 작은 입자의 영향을 받는 것으로 나타났다.

이는 Kong and Kim(2019)이 국내 81개 호수를 대상으로 분석한 결과에서 대부분 제3사분면에 해당되며, 용존 유기물 및 비조류성 현탁물에 의해 투명도가 낮고 조류의 인의 이



## 새만금호의 수질 특성 및 영양상태지수를 이용한 부영양화 평가

용성이 낮아진다는 보고와 유사하였다. 또한 국내 인공호를 대상으로 연구한 An(2000)과 Kim and Kim(2004)의 연구에서 강우시 비조류성 현탁물과 인 유입에도 불구하고 짧은 체류 시간으로 조류증식에 대한 인 이용성이 상대적으로 낮다는 보고와는 일치하고 있다.

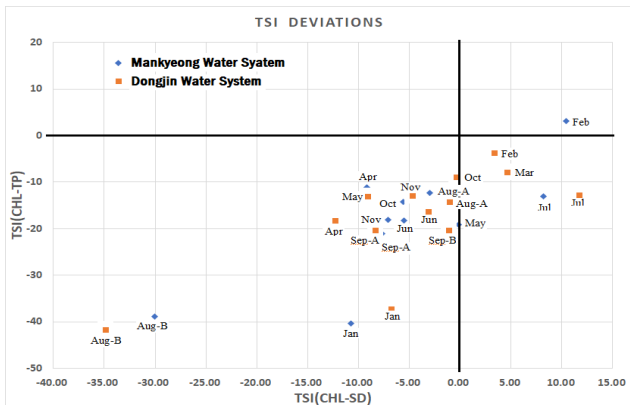


Fig. 10. Quadrant analysis for deviation of TSI indicate both the degree of nutrient limitation and the composition of seston for Dongjin watersheds in Saemangeum Lake.

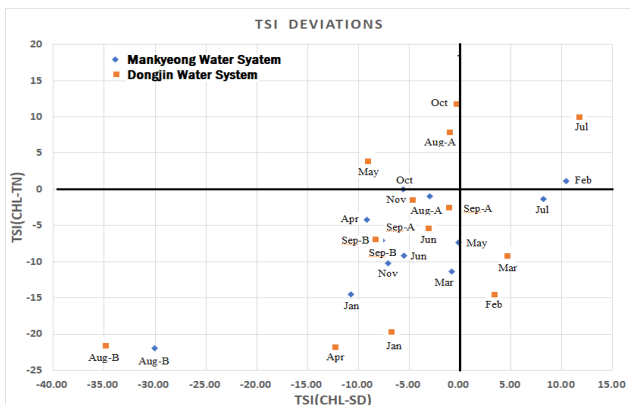


Fig. 11. Quadrant analysis for deviation of TSI indicate both the degree of nutrient limitation and the composition of seston for Mankyong watersheds in Saemangeum Lake.

Havens et al.(1999)은 Okeechobee 호수의 TSI 지수를 이용한 공간적 추론에서  $TSI(TP) < TSI(CHL)$ 인 경우 P가 제한인자가 되고,  $TSI(TN) < TSI(CHL)$ 인 경우는 N이 제한인자가 되며,  $TSI(TP)$  및  $TSI(TN) < TSI(CHL)$ 인 경우는 P와 N이 공동 제한 인자가 되고,  $TSI(TP)$  및  $TSI(TN) > TSI(CHL)$ 이며 P와 N이 모두 제한인자가 되지 않는다고 규정하였다. 또한  $TSI(CHL) < TSI(SD)$  구간에서는 빛이 제한 요인으로 작용하고,  $TSI(CHL) > TSI(SD)$  구간에서는 동물성 플랑크톤 방목이 제한 요인으

로 작용한다고 하였다.

새만금호의 부영양화지수를 적용해 보면, 동진수계에서 TSI(TP)는 연중 높은 지수값을 가지고 있어 제한인자로 작용하지 않으며, 조류 발생시기인 하계 5-8월에  $TSI(TN) < TSI(CHL)$ 로 나타나 일시적으로 총질소가 제한인자로 작용하였다. 만경수계의 경우  $TSI(TP)$  및  $TSI(TN) > TSI(CHL)$ 를 나타내어 영양염류가 제한인자로 작용하지 않았다

동진과 만경수계 모두  $TSI(SD) > TSI(CHL)$ 로 나타나 빛이 제한요인으로 작용하고 있으며, 특히 강우 발생 후 더욱 뚜렷하게 나타났는데, 이는 강우에 의한 세스톤 입자의 증가에 의한 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

새만금호의 수질측정 자료를 이용한 수질변동 특성 및 부영양화지수를 이용한 부영양화 변동 특성은 다음과 같다.

1. 새만금호의 유기물 농도의 수질 변동특성은 COD의 경우 만경수계와 동진수계 모두 하계와 추계에 호소 수질환경 기준 4등급수와 유사하거나 상회하는 수질을 나타내었으나, TOC농도의 경우 3등급수 이내의 수질을 보였다. 총인 농도의 경우 전 조사에서 호소 수질환경기준 4등급수를 초과하는 농도를 나타내었고, 1월과 강우 후 8월에 높게 나타났다. 총질소의 경우도 총인과 마찬가지로 전 조사에서 호소 수질환경기준 4등급수를 초과하였다. 조류의 농도를 나타내는 Chl.a의 농도는 동계에는 만경수계가 약간 높았고, 춘계와 하계에는 동진수계가 약간 높게 나타났으나, 일부 시기를 제외하고는 전체적으로 호소 수질환경기준 3급수와 비슷하거나 낮은 농도를 나타내었다.

2. 수질인자간의 상관성 분석에서 염분에 대한 유기물, 총인, 총질소의 상관성이 상대적으로 높게 나타나 배수갑문을 통한 해수유입과 상류 하천을 통한 담수 유입에 의한 담수역, 기수역, 해수역의 수질 특징을 반영하고 있었다.

3. 부영양화 지수에 의한 새만금호의 부영양화 변동 특성을 보면, Chl.a와 SD, TN의 지수에서 부영양화 초기 단계의 수질을 보였으며, TP 지수의 경우 심각한 부영양화 상태를 나타내고 있었다. 수질인자간 부영양화 지수의 크기는 모든 수계에서  $TSI(TP) > TSI(TN) > TSI(SD) > TSI(CHL)$ 의 순으로 나타났다.

4. TSI(CHL)에 대한 TSI(TP) 및 TSI(SD)와의 편차를 2차원 평면으로 나타낸 사분면 분석 결과를 보면, 조류 성장에 대한 총인의 영향에서는 모든 수계에서 대부분의 총인(TP)에 의한 제한적 영향은 나타나지 않았으며, 빛 감소에 영향을 미치는 인자는 외부로부터 유입되는 적은 입자상 물질에 의한 영향이 크게 나타나는 것으로 평가할 수 있다.

## Reference

- [1] Ahn, D. H., S. K. Han, S. J. Jo, and M. Lim(2013), Water Quality Assessment for Geumgang River Area using th Korean Trophic State Index, *J. Wat. Treat.*, Vol. 21, No. 3, pp. 13-20.
- [2] Devi Prasad, A. G. and Siddaraju(2012), Carlson's Trophic State Index for the assessment of trophic status of two Lakes in Mandya district, *Advances in Applied Science Research*, 3(5), pp. 2992-2996.
- [3] An, K. G.(2000), Monsoon inflow as a major source of in-lake phosphorus, *Korean Journal of Limnology*, 33(3), pp. 222-229.
- [4] Choi, C. H., S. W. Jung, S. M. Yun, S. H. Kim, and J. G. Park(2013), Changes in Phytoplankton Communities and Environmental Factors in Saemangeum Artificial Lake, South Korea between 2006 and 2009, *Korean J. Environ. Biol.*, Vol. 31, No. 2, pp. 213-224.
- [5] Carlson, R. E.(1977), A Trophic state index for lakes, *Limnology ans Oceanography*. 22(2), pp. 361-369.
- [6] Carlson, R. E.(1991), Expanding the trophic state concept to identify non-nutrient limited lakes and reservoirs, *Enhancing the State's Lake Management Programs 1991*, pp. 59-71.
- [7] Edmondson, W. T.(1980), Secchi disk and chlorophyll, *Limnology and Oceanography* 25, pp. 378-379.
- [8] Havens, K. E., H. J. Carrick, E. F. Lowe, and M. F. Coveney (1999), Contrasting relationships between nitrientsm chlorophyll a and Secchi transparency in two shallow eutrophic lakes ; Lakes Okeechobee ans Apopka (Florida, USA). *lake and Reservoir Management* 15, pp. 298-309.
- [9] Havens, K. E.(2000), Using Trophic State Index (TSI) Values to Draw Inferences Regarding Phytoplankton Limiting Factors and Seston Composition from Routine Water Quality Monitoring Data. *Korean J. Limnol.* 33(3), pp. 187-196.
- [10] Kim, B. C. and D. S. Kong(2019), Examination of the Applicability of TOC to Korean Trophic State Index (TSIko), *J. of Korean Soc. on Water Environ.*, Vol. 35, No. 3, pp. 271-277.
- [11] Kim, B. and Y. Kim(2004), Phosphorus cycle in a deep reservoir in Asian monsoon area (Lake Soyang, Korea) and the modeling with a 2-D hydrodynamic water quality model [CE-QUALW2], *Korean Journal of Limnology*, 37(2), pp. 205-212. [Korean Literature]
- [12] Kong, D. S. and B. C. Kim(2019), Suggestion for Trophic State Index of Korean lakes (Upper Layer), *J. of Korean Soc. on Water Environ.*, Vol. 35, No. 4, pp. 340-351.
- [13] Kong, D. S.(2019), Statistical Analysis on Water Quality Chaeacteristics of Large Lakes in Korea, *J. of Korean Soc. on Water Environ.*, Vol. 35, No. 2, pp. 165-180.
- [14] Kim, E. S., K. B. Sim, S. D. Kim, and H. I. Choi(2012), Water Quality Assessment for Reservoirs using th Korean Trophic State Index, *J. of Korean Soc. on Water Environ.*, Vol. 28, No. 1, pp. 78-83.
- [15] Kim, J. G.(2023), Evaluation of Water Quality Characteristics of Saemangeum Lkae Using Statistical Analysis, *J. the korean Soc. of Marine environ. & Safety*, Vol. 29, No. 4, pp. 297-306.
- [16] Kim, N. H., Andy S. Choi, and C. O. Oh(2020), Assessing Public Preferences for Politics on Seawater Flowing of the Saemangeum Reclamation Site Using Choice Experiemtns, *Environmental Police*, Vol. 28, No. 4, pp. 87-111.
- [17] Kratzer, C. R. and P. L. Brezonik(1981), A Carlson type trophic state index for nitrogen in Florida lakes. *Water Resources Bulletin* 17, pp. 713-715.
- [18] Ministry of Environment(2016), Saemangeum Lake Ecosystem and Sediment Monitoring (III), Final Report. Saemangeum National Environmental Protection Agency, pp. 48-49.
- [19] Ministry of Environment(2018), Saemangeum Lake Sediment Monitoring (V), Final Report. Saemangeum National Environmental Protection Agency, pp. 48-49.
- [20] Park, H. J. and K. G. An(2007), Trophic State Index (TSI) and Emprical Models Based on Water Quality Parameters in Korean Reservoirs, *Korean J. Limnol.*, Vol. 40, No. 1, pp. 14-30.
- [21] Park, J. G.(2005), Water Environmental Factors and Trophic States in Lake Daecheong, *Korean J. Limnol.*, Vol. 38, No. 3, pp. 382-392.
- [22] Park, S. C., J. O. Kim, W. B. Lee, S. H. Park, and S. D. Lee (2017), Characteristics of Eutrophication of Yeongsan River Area using the Trophic State Index (TSIko), *J. Wat. Treat.*, Vol. 25, No. 6, pp. 3-15.
- [23] Park, S. H., J. W. Lee, J. H. Kim, and S. H. Baek(2013), Fish Distribution and Salinity in the Saemangeum Reservoir, *Korean J. Environ. Biol.*, Vol. 31, No. 4, pp. 411-418.
- [24] Park, S. H., J. G. Kim, and M. S. Kwon(2023), Development of Mass Proliferation Control Algorithm of Phytoplankton Using Artificial Neutral Network, *J. the korean Soc. of Marine environ. & Safety*, Vol. 29, No. 5, pp. 435-444.

- [25] Ryu, J. W., J. H. Choi, S. D. Jeong, K. H. Kang, D. C. Nam, M. P. Kim, S. R. Park, J. J. Park, and T. S. You(2018), Investigation of Pollutant Load of Saemangeum Watershed (Mangyeong River, Dongjin River). Jeollabukdo Institute of Health & Environment Research, Vol. 27, pp. 33-80.
- [26] Shin, Y. R., J. Y. Jang, J. H. Choi, and K. W. Jung(2012a), Hydrodynamic Modeling of Saemangeum Reservoir and Watershed using HSPF and EFDC, J. of Korean Soc. on Water Environ., Vol. 28, No. 3, pp. 384-393.
- [27] Shin, Y. R., J. Y. Jung, J. H. Choi, and Y. K. Cho(2012b), The Comparison of Grid Resolutions using EFDC in Saemangeum Reservoir, J. of Korean Soc. on Water Environ., Vol. 28, No. 5, pp. 646-656.

---

Received : 2023. 08. 09.

Revised : 2023. 10. 20.

Accepted : 2023. 10. 27.