

# 통계분석을 이용한 새만금호의 수질특성 평가

김종구\*†

\* 군산대학교 환경공학과 교수, 군산대학교 수산과학연구소

## Evaluation of Water Quality Characteristics of Saemangeum Lake Using Statistical Analysis

Jong Gu Kim\*

\* Professor, Division of Environmental Engineering, Kunsan National University, Fisheries Science Institute Kunsan National University

**요 약 :** 새만금호는 우리나라 최대의 인공호수로 호수의 수질은 갈수록 악화되어 가고 있어 호수의 특성에 맞는 새로운 수질관리 대책이 필요하다. 이에 새만금호의 국가수질측정망 자료를 이용하여 통계분석 기법에 의한 새만금호의 시공간적 수질특성을 분석하였다. 수질항목간의 상관성에서 수온과 TP는 상관성이 있고, 염분과 TN, 그리고 pH와 COD가 상관성이 높았다. 그 외 항목들 간에는 낮은 상관성을 나타내어 관련성이 낮았다. 주성분 분석을 이용한 새만금호의 공간적 수질특성을 보면, 크게 4개의 그룹으로 구분되었는데, 담수 영향구역과 해수 영향구역, 해수와 담수가 혼합되는 중간 구역이 2개 그룹으로 구분되어 각각 다른 수질특성을 나타내었다. 주성분분석을 이용한 시간적 수질특성은 계절적으로 4가지 그룹으로 구분되었다. 그룹 I은 늦봄과 초여름에 해당되는 5, 6월이고, 그룹 II는 계절적으로 초봄(3, 4월)과 늦가을(11, 12월)에 해당되는 시기로 나타났으며, 그룹 III은 낮은 수온에 의한 용존산소의 증가가 나타나는 계절인 겨울철(1, 2월)의 수질 특성을 보였고, 그룹 IV는 하계(7, 8, 9, 10월) 성층의 발달로 저층 퇴적물의 높은 인농도와 하계 고수온의 상관성을 가지는 그룹으로 구분되었다. 이는 새만금호가 인위적으로 조성된 호수로서 상류 만경강과 동진강의 유입 영향을 받는 것과 동시에 새만금 방조제에 설치된 가력파 신시갑문을 통한 외해수 유입의 영향을 받음으로써 수질의 변동요소가 달라진 것으로 평가된다. 새만금호의 목표수질을 달성하기 위해서는 상류 유역의 오염원 관리 대책과 함께 새만금호의 수질관리 대책을 수립할 필요가 있다.

**핵심용어 :** 새만금호, 수질특성, 주성분분석, 수질관리, 목표수질

**Abstract :** Saemangeum Lake is the largest artificial lake in Korea. The continuous deterioration of lake water quality necessitates the introduction of novel water quality management strategies. Therefore, this study aims to identify the spatiotemporal water quality characteristics of Saemangeum Lake using data from the National Water Quality Measurement Network and provide basic information for water quality management. In the water quality parameters of Saemangeum Lake, water temperature and total phosphorous content were correlated, and salt, total nitrogen content, pH, and chemical oxygen demand were significantly correlated. Other parameters showed a low correlation. The spatial principal component analysis of Saemangeum Lake showed the characteristics of its four zones. The mid-to-downstream section of the river affected by freshwater inflow showed a high nutrient salt concentration, and the deep-water section of the drainage gate and the lake affected by seawater showed a high salt concentration. Two types of water qualities were observed in the intermediate water area where river water and outer sea water were mixed: waters with relatively low salt and high chemical oxygen demand, and waters with relatively low salt and high pH concentration. In the principal component analysis by time, the water quality was divided into four groups based on the observation month. Group I occurred during May and June in late spring and early summer, Group II was in early spring (March - April) and late autumn (November - December), Group III was in winter (January - February), and Group IV was in summer (July - October) during high temperatures. The water quality characteristics of Saemangeum Lake were found to be affected by the inflow of the upper Mangyeong and Dongjin rivers, and the seawater through the Garuk and Shinshi gates installed in the Saemangeum Embankment. In order to achieve the target water quality of Saemangeum Lake, it is necessary to establish water quality management measures for Saemangeum Lake along with pollution source management measures in the upper basin.

**Key Words :** Saemankeum Lake, Water quality characteristic, The principal component analysis, Water quality management, The target water quality

† kjg466@kunsan.ac.kr, 063-469-1874

## 1. 서론

새만금호는 1987년 7월 정부가 “새만금 간척 종합개발사업”을 발표하면서부터 환경문제로 수많은 논쟁을 일으키며 많은 사람들의 주목을 받았다. 하지만 1991년 방조제 착공, 2006년 4월 방조제 최종 연결공사 완료되고 2010년 4월 새만금 방조제가 준공되었다.

현재 새만금호의 수질은 새만금 방조제가 2006년 4월 체결 되어 해수유입이 차단되면서 악화되었고, 내부개발계획에 따라 새만금호 내부 수위를 +1.5m로 유지하면서 갑문을 운용하고 있다.

“새만금 유역 2단계(2011~2020) 수질개선종합대책”에 따른 새만금 유역 및 새만금호 수질개선 대책사업을 보면, 상류대책으로 점오염 및 비점오염원 관리사업과 축산분뇨 관리대책과 하천유지용수 확보 사업으로 19개 사업이 계획 추진되었고, 호내 관리사업으로 유입수관리 및 호소수관리 등 5개 사업이 계획되었다.

그러나, 이러한 노력에도 불구하고 새만금 내측의 수질오염은 상당히 진행되었다. 최근에는 빈산소 수괴가 빈번하게 발생하고 있으며, 이로 인하여 어패류의 집단 폐사도 발생하고 있다.

새만금호는 유역이 넓으며, 크게 만경강이 유입되는 만경수계와 동진강이 유입되는 동진수계로 구분할 수 있다. 만경수계의 오염원으로는 주 오염원은 전주시와 익산시에서 배출되는 하폐수와 주변에 산재한 농업 및 축산폐수 등이 존재하고 있고, 하류부내 군산시가 위치하고 있으나, 대부분 오염원은 금강수계로 유입된다. 동진수계에는 부안군과 고창군 일부지역의 오염원과 주로 농업배수가 주 오염원이다. 또한 새만금 지역은 도시주거 형태보다는 농촌주거와 농업, 축산업으로 인한 비점오염원이 많이 산재해 있어 이러한 영향에 대한 관리가 중요한 수계이다.

새만금호 수질에 대한 조사연구는 전북지방환경청에서 5개년 사업으로 지속적으로 수행하고 있으며, 국가수질측정망 사업에서 호내 13개 지점에 대하여 월1회의 수질측정망을 운영하고 있다.

현재 새만금호의 수질문제는 내부개발에 따른 관리수위의 조정에 따른 영향을 들 수 있다. 새만금호 방조제 체결 후의 해수유통량은 체결 전에는 약 70억톤/년 정도이었으나, 체결 후에는 해수유통량이 10억톤/년으로 감소하였다. 새만금호 관리수위의 저하는 해수유통량의 감소 및 하천수 유입량의 증가에 따라 호내부의 염분성층의 강화와 정체수역의 형성에 따른 수질변화가 있고, 장기적인 염분성층 및 수온성층에 의한 빈산소수괴의 확대는 새만금호 해양생태계에 심각한 위협을 줄 수 있으며, 이로 인한 해양생물의 대량폐

사 현상도 자주 발생하고 있다.

수질관리 정책에도 불구하고 새만금호 수질은 매년 악화되어 가고 있는데, 전북지방환경청에서 보고한 “새만금호 자연생태계 퇴적물 모니터링 연구(IV) 및 관리방안 마련”(2017.8)에서 2008년 수질농도에 비해 2018년에 약 2배 정도 더 악화된 것으로 나타났다.

새만금의 경우 내부 담수호 과정에서 내부의 담수는 저염분수를 가지게 되고, 배수갑문을 통해 유입되는 외해역의 해수는 고염분수로 배수갑문 입구로 유입되면서 저층으로 침강을 일으키고, 침강된 저층수에 의해 호 내 저층수가 호 내부 상층부로 이동하게 된다. 이러한 물리적 메커니즘으로 염분성층이 발달하게 되며, 오염된 저층퇴적물이 존재할 경우 유기물 분해로 산소가 없는 무산소 환경이 발생하게 되며, 이러한 성층현상은 일반적인 호수에서는 온도성층에 의해 주로 결정되는데 반하여 새만금호의 경우 염분성층이 크게 작용하는 특징을 가지고 있으며, 특히 하계에 온도성층과 맞물려 강력한 성층을 형성함으로써 새만금호의 수질악화의 주요 문제로 작용한다.

새만금호에 대한 연구를 보면, 새만금호의 물리적 특성을 규명하기 위한 모델 연구로 유역의 특성과 수리변화에 대한 연구(Shin et al., 2012a; Shin et al., 2012b)와 새만금호 배수갑문의 해수유통에 따른 오염물질 변화 연구(Jeong et al., 2009) 그리고 새만금호 수질예측 모의 연구(Jeon et al., 2011; Jeon and Chung, 2012)가 있다. 또한 새만금호 수질관리를 위한 새만금호의 해수유통 정책관련 모델연구(Kim et al., 2020)가 수행되기도 하였다.

그리고 Park et al.(2013)은 새만금호 염분특성에 따른 어류 분포 연구를 수행하여 어류의 분포는 염도에 따라 담수어, 주연어, 해수어로 종의 구성이 달라진다고 보고하였고, Choi et al.(2013)은 새만금호에서의 식물플랑크톤 군집 변화와 환경요인과의 관계 연구에서 하천을 통한 담수 유입의 혼합에 따라 변화한다고 보고하였으며, Kim et al.(2006)은 새만금호 유입부의 수질 특성 조사에서 만경강과 동진강이 유입되는 말단부 지점에서 25시간 관측을 통하여 조석이 미치는 영향을 평가하였다. 새만금호의 갯벌 연구로 Na and Lee(2011)는 새만금 내 5개 지점에서 갯벌의 부착조류에 대해 조사하였다.

그러나, 새만금호 수질조사에 대한 평가 연구가 없었으며, 특히 호수의 구조적 특성에 의한 온도 및 염분성층이 발생하여 저층 빈산소수괴가 발생하고 있으며, 이로 인한 어류의 폐사가 자주 발생하고 있으나, 새만금호의 수질적 평가를 평가한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구는 전북지방환경청의 국가수질측정망 자료를 이용하여 통계분석 기법을 이용하여 새만금호의 시공

간적 수질특성을 분석하고, 향후 새만금호 수질 관리를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 대상유역 및 자료도출

가. 대상수계의 현황

새만금 유역에 대한 수질관리 정책을 수립하기 위한 근거 자료를 확보하고 수질관리정책의 효과를 평가하기 위해서는 새만금 유역 하천 및 호소수질에 대한 대표성을 가지고 있는 지점선정이 우선되어야 할 것이다. 그리고 그에 대한 자료는 정기적이고 지속적인 자료일 때 그 효용가치가 클 것으로 판단되는 지점을 선정하여야 한다.

새만금호의 경우에도 동서2축 도로 건설에 따라 새만금 수역이 만경수계와 동진수계로 분리되었고, 각 수계에 영향을 미치는 요인도 만경수계의 경우 상류에 위치한 만경강과 외해 신시갑문이 영향요소이며, 동진수계의 경우 상류에 위치한 동진강과 가력갑문을 통한 외해수 유입이 영향 요인이 된다. 따라서 이들 요인에 의한 수계의 수질변화에 대한 영향도 고려할 필요가 있다.

또한, 동진수계는 호소 중심부 수변도시 건설이 예정되어 있고, 주변수역의 수질기준도 Ⅲ등급수로 정해졌으며, 동진강 하류수역은 농업용수 기준인 Ⅳ등급수로 정해져 있다. 만경수계의 경우 신시갑문의 영향을 받는 호소수역은 수질기준도 Ⅲ등급수로 정해졌으며, 만경강 하류수역은 농업용수 기준인 Ⅳ등급수로 정해져 있다.

나. 자료의 도출

새만금 유역의 수질측정망은 2010년 이전에는 새만금 상류하천의 경우 금강물환경연구소와 전북보전환경연구원(전라북도), 전북지방환경청에서 운영하였고, 하구역과 새만금호 내수역은 한국농어촌공사에서 운영하였으며, 외해역은 해양수산부에서 측정망을 운영하였다.

2010년 이후 새만금 유역의 수질 통합모니터링체계를 구축하여 새만금호 측정망을 일원화하여 새만금호 측정을 담당하던 농어촌공사 수질측정 업무를 전북지방환경청으로 이관하여 새만금호와 하천은 전북지방환경청과 전라북도에서 담당하게 되었다.

새만금호의 수질을 통계적으로 평가함에 있어 자료의 신뢰성을 가질 수 있도록 환경부에서 조사한 측정망 자료인 2010년 이후 10년간 측정된 수질측정망 자료를 통계분석에 이용하였다.

새만금 유역의 수질을 관리하기 위하여 전북지방환경청에서 운영중인 새만금호 내 수질측정망 지점도는 Fig. 1에

나타내는데, 만경강 수계에 7개 정점과 동진강 수계에 6개 정점으로 총 13개 정점을 대상으로 월 1회 수질을 측정하고 있다. 수질측정항목은 총 16개 항목으로 일반항목에는 온도, pH, DO, COD, SS, 투명도, EC, 염분을 측정하고 있고, 영양염류 항목으로 TN, NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, TP, PO<sub>4</sub>-P, SiO<sub>2</sub>-Si를 측정하며, 호수 생산력을 평가하는 지표인 Chl-a,를 측정하고 있다.

본 통계분석에 활용한 자료는 자료의 중복성을 가진 항목인 투명도와 영양염류의 용존형태의 항목을 제외한 온도, pH, DO, COD, SS, EC, 염분, TN, TP, Chl-a의 9개 항목을 분석에 활용하였다.

새만금호 수질 측정자료를 수질인자별, 월별, 연도별, 지점별로 자료를 정리하여 통계 분석을 실시하였다.



Fig. 1. Water quality monitoring networks in Saemangeum lake.

### 2.2 통계분석 이론

다변량 분석은 여러개의 독립변수에 대한 여러개의 종속 변수를 동시에 분석해 보는 통계적인 기법을 말하며, 본 연구에서는 상관분석과 주성분분석 및 요인분석, 군집분석을 주로 실시하여 수질의 시공간적 특성을 파악하고자 하였다. 상관분석은 두 개의 변수에 대해 서로 상관되는 인자들이 어떤 관련성이 있고, 그 관련성이 어느 정도인지를 수치적으로 분석하는 것을 말한다.

군집분석은 특성들의 유사성 즉, 특성자료가 얼마나 비슷한 값을 가지고 있는지를 거리로 환산하여 거리가 가까운 대상들을 동일집단으로 구분하여 전체 다변량 자료의 구조를 파악하고 군집의 형성과정과 그 특징, 군집간의 관계를 분석하는 것이다.

군집분석은 비지도 통계학습(unsupervised statistical learning) 기법의 하나로, 자료로부터 서브그룹 또는 군집들을 찾는

기법들을 의미하며, 본 분석에는 비계층적 분할법의 하나인 k-평균 클러스터링 방법을 사용하였다. 이는, 자료를 k 개의 서로 다른 군집으로 분할하는 기법으로 각 집합 S의 원소인의 중심점이라 할 때, 아래와 같이 각 원소와 중심점 간의 거리의 제곱 합을 최소로 하는 집합 S를 찾는 방법이다.

$$\arg \min_S \sum_{i=1}^k \sum_{\mathbf{x} \in S_i} \|\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_i\|^2 \quad (1)$$

이를 통해서 k 값을 바꿔가며 가장 이상적인 클러스터 집합을 찾고, 이들 집합의 특성을 주성분 분석을 통하여 직관적으로 해석할 수 있으며, 분석된 클러스터들이 공간적 연속성과 특성을 가지고 있는지 통계적으로 검증할 수 있다.

주성분 분석(principle component analysis)은 변수 간에 상관성을 갖는 여러 종류의 특성치들의 변화 양상으로부터 이들 속에 내재하고 있는 상호 독립적인 고유의 패턴을 도출할 수 있다. 또한 다변량으로 구성되는 데이터로부터 소수의 특징적인 변량을 합성하여 주성분을 산출하고, 차원이 축소되어 데이터 분석이 용이해진 주성분을 사용하여 전체 다변량 데이터의 경향을 분석하게 된다. 요인분석은 특정 변수들 간의 상호 연관성을 보다 간결하게 분석해서 공통적으로 내재된 인자를 추출하여 전체 자료를 대변할 수 있는 변수의 수를 줄이는 기법으로 변수들 간 상관관계가 높은 것끼리 하나의 요인으로 간결하게 묶어주는 역할을 한다.

최초 분석된 자료를 근간으로 전체변수 중 보다 간결하고 명료한 관계를 가지는 요인을 추출하기 위하여 각 변수간의 상관행렬을 이용해서 주 대각선상의 값을 변형시키지 않는 그대로 공통 분산치 1, 0의 값을 추정값으로 하여 요인행렬을 추출하는 주 대각성분 요인 추출법을 이용하였다. 최초 요인을 추출한 뒤 회전시키지 않는 요인행렬로부터 몇개의 요인을 추출하기 위하여 고유치가 최소 1.0 이상이 되어야 한다는 기준으로부터 요인을 추출하였다.

요인이 해당되는 변수를 설명해 주는 의미를 가진 요인부하량을 산출한다. 그리고 여러 요인이 비슷한 요인부하량을 나타낼 경우 변수들이 어떤 요인에 높게 작용하는지를 알아보기 위하여 요인축을 회전시킨다. 요인의 회전을 통하여 변수와 요인사이의 관계를 더욱 명확히 하여 변수와 요인과의 해석을 보다 쉽게 판단할 수 있다. 요인회전 방법은 여러 종류가 있으나 직각회전방식중에서 각 요인은 다른 요인과 상호 독립적이면서 하나의 요인에 높게 적재되는 변수의 수를 줄여서 요인을 해석하는 데 중점을 주어 각 변수들의 분산구조보다 각 요인의 특성을 알고자 할 때 유용한 Varimax 방식을 적용하였다.

추출된 요인은 각 조사지점별, 연도별, 계절별로 변수별 응답을 요인들의 선형결합으로 표현된 요인 특점으로 아래 식으로 계산한다.

$$F_{jk} = \sum_{j=1}^p W_{jk} Z_{jk} \quad (2)$$

여기서,  $F_{jk}$ 는 k지점별, 연도별, 월별 수질변수 j에 의한 요인특점, P는 수질변수의 수,  $Z_{jk}$ 는 표준화된 변수의 인자부하량,  $W_{jk}$ 는 각 변수에 주어지는 가중치를 의미한다. 가중치는 회귀법을 통하여 변수별로 서로 다른 가중치를 산출하여 적용하는 방법을 이용하였다.

주성분분석 방법도 비지도 통계학습 기법의 하나로, 분산-공분산 구조를 변수들의 선형결합식의 주성분(principal component)으로 설명하고자 하는 접근방법(단, 정형화된 해석 방법은 없음)이며, 확률벡터가 모평균벡터와 모공분산행렬을 가진다고 할 때, p개의 새로운 좌표축을 형성하고, 주성분과 이들이 설명하는 변동량으로 공분산 구조를 해석한다. 제1주성분은 데이터의 변동(variability)을 최대로 설명해주는 방향으로의 변수들의 선형결합식이며, 제2주성분은 제1주성분과 독립적인 특성을 가진다. 이를 통해 먼저 군집분석을 통해 새만금 관측 정점들을 수역 특성별로 구분한 후, 차원 축소된 주성분을 통해 수역 특성을 해석하여 새로운 관측 정점을 선정하는 데 활용할 수 있다. 또한 시간적 자료를 분석하면 부차적으로 새만금 수역의 계절별 수질 특성을 파악할 수 있다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 새만금호의 수질특성 분석

가. 새만금호 수질특성

새만금호의 수질특성을 파악하기 위하여 전북지방환경청에서 수행하는 새만금호 수질측정망 자료 중 2011년부터 2019년까지 10년간의 조사자료를 이용하였다.

새만금호는 2006년 방조제 체질 이후 호 내 수질문제 및 토지이용 경제성, 지역의 요구 등에 의해 내부 개발계획이 많이 수정되었다. 2011년 새만금 유역 2단계(2011~2020) 수질개선종합대책이 수립되어 새만금호의 수질기준이 2015년 최종단계에 도시용수 구간과 농업용수 구간으로 구분되어 수질관리 정책이 확정되었다. 이에 본 연구에서는 2011년 이후 수질의 변동 특성을 파악하고, 수질관리를 위한 내부 수질특성의 기초연구를 시도하였다.

수질측정망은 새만금호 내 13개 조사정점에 대하여 월 1회 조사되었으며, 13개의 수질항목에 대해 측정하였다. 이들 수

통계분석을 이용한 새만금호의 수질특성 평가

질인자 중 중요한 수질지표인 COD, TN, TP 및 Chl-a에 대한 수질의 시공간적인 변화 특성을 분석하였다.

최근 10년간 새만금호의 수질인자의 지점별, 연도별, 월별 평균농도의 범위 및 평균농도를 Table 1~3에 나타내었다.

새만금호의 수질기준 설정을 위한 공간적 구분은 새만금 남북2축 도로를 중심으로 좌측 외해역 쪽은 도시용수 구간(MK7, ML2, ML3, ML4, DL1, DL2, DL3), 우측 만경 및 동진강 하류쪽은 농업용수 구간(ME2, SP1, ME1, DE2, DJ2, DE1)으로 구분하여 수질기준을 설정하였으며, 새만금호를 동서로 관통하는 동서2축 도로를 중심으로 북측은 만경강 수역이고, 남측은 동진강 수역으로 구분되어 있다. 새만금호의 목표 수질기준은 도시용수 구간(III등급수) COD 5 mg/L 이하, 총인 0.05 mg/L 이하, Chl-a 20 mg/m<sup>3</sup> 이하이며, 농업용수 구간(IV등급수) COD 8 mg/L 이하, 총인 0.1 mg/L 이하, Chl-a 35 mg/m<sup>3</sup> 이하로 목표수질이 설정되었다.

새만금호의 지점별 평균값의 범위는 동진수계에서 COD 5.8~8.8 mg/L, TN 0.847~3.660 mg/L, TP는 0.061~0.119 mg/L, Chl-a 17.7~38.4 mg/m<sup>3</sup>로 나타났고, 만경수계에서 COD 4.5~9.9 mg/L, TN 0.658~5.157 mg/L, TP는 0.056~0.196 mg/L, Chl-a 13.2~40.4 mg/m<sup>3</sup>로 나타났다. 모든 수질항목에서 만경강과 동진강 중하류역에서 높게 나타났고, 배수갑문으로 갈수록 낮아지는 경향이 뚜렷하게 보였다. 수계별로는 하천 중하류역에서 만경수계가 동진수계보다 높은 농도를 보였으나, 호소내 지점에서는 동진수계가 더 높은 농도를 보였다. 도시용수 구간과 농업용수 구간의 수질기준과 비교하면, 대부분 새만금호 목표수질을 모두 초과하는 농도를 나타내었다.

새만금호의 연도별 연평균 농도변화를 보면, COD 5.4~9.7 mg/L, TN 1.347~2.165 mg/L, TP는 0.061~0.114 mg/L, Chl-a 16.8~40.9 mg/m<sup>3</sup>로 나타났다. COD의 연도별 변화는 2010년이 가장 낮은 농도를 보였고, 약간의 증감은 있으나 전체적으로 증가하는 경향을 보였다. 총질소의 경우 2010년도가 가장 낮은 농도를 보였고, 2015년이 가장 높은 농도를 보였다. TP의 경우 연도별 증감은 있으나 큰 변화는 없었는데, 이는 상류 점오염원 및 비점오염원 저감시설의 확충의 효과로 판단된다. Chl-a의 농도는 연도별 증감의 변동성은 있으나, 2019년도에 COD와 함께 높은 농도를 나타내었는데, 이러한 조류 이상증식에 대한 원인 규명이 필요하다고 판단된다.

COD 농도는 연도별 평균값이 전 조사에서 도시용수 III등급수인 5 mg/L를 초과하는 농도를 보였으며, 특히, 2015년과 2019년도에는 농업용수 IV등급인 8 mg/L를 초과하는 높은 농도를 보였다. 총인(TP)의 농도는 연도별로 2015년 이전에는 높은 연평균 농도를 보였으나, 새만금 상류오염원 대책으로 2015년 이후 약간 감소하는 경향을 나타내었으나, 2019년 다시 조금 증가한 경향을 보였다. 전체적으로 도시용수

수질기준인 3등급수인 0.05 mg/L를 초과하는 농도를 보였다. Chl-a의 연도별 변동을 보면 2018~2019년도에 가장 높은 연평균 농도를 보였으며, 2019년에는 농업용수 4등급수인 35 mg/m<sup>3</sup>를 초과하였다.

새만금호의 월별 연평균 농도변화를 보면, COD 5.6~9.0 mg/L, TN 1.608~2.236 mg/L, TP 0.070~0.120 mg/L, Chl-a 17.1~33.6 mg/m<sup>3</sup>로 나타났다. TN의 월별 변동에서 2~4월에 높은 농도를 보였는데 이는 동계 유기물 분해에 의한 질소공급과 관련이 있는 것으로 판단되며, 하계 7월의 높은 농도는 강우 유출의 영향으로 판단된다. 총인의 월별 변동에서는 하계 6~9월에 농업용수 수질기준인 4등급수 0.1 mg/L를 초과하는 높은 농도를 보였는데, 이는 새만금호 저층에 형성된 빈산소수괴의 영향으로 퇴적물 중의 인유출 영향을 받는 것으로 판단된다. Chl.a의 월별 변동은 동계 1~2월을 제외하고 모든 시기에 농업용수 3등급수인 20 mg/m<sup>3</sup>를 초과하는 농도를 보였다. 특이한 현상은 조류성장이 억제되는 늦가을과 초겨울에도 높은 농도를 값을 나타내고 있었다.

Table 1. Range and average of water quality concentration by survey station of Saemangeum lake

Station		Item	COD	TN	TP	Chl-a	
			mg/L	mg/L	mg/L	mg/m <sup>3</sup>	
Upper	DE1	Range	3.8~19.6	1.436~12.700	0.022~0.289	0.2~189.9	
		Mean	8.2	3.660	0.109	24.9	
	DJ2	Range	3.0~22.6	0.535~6.814	0.021~0.526	1.1~685.6	
		Mean	8.8	2.577	0.119	38.4	
	Dongjin area	DE2	Range	2.3~22.4	0.219~5.301	0.031~0.346	1.3~203.9
			Mean	7.7	1.387	0.083	31.4
Lower	DL1	Range	1.0~21.7	0.205~2.947	0.014~0.201	0.9~225.6	
		Mean	7.0	0.987	0.069	24.7	
	DL2	Range	0.8~14.9	0.203~2.246	0.012~0.169	1.2~116.1	
		Mean	5.8	0.847	0.061	17.7	
	DL3	Range	1.2~23.1	0.115~6.110	0.014~0.181	0.4~120.4	
		Mean	7.1	0.955	0.065	22.4	
Upper	ME1	Range	4.0~21.0	1.273~12.834	0.026~0.598	1.3~104.4	
		Mean	9.7	5.157	0.196	34.9	
	SP1	Range	4.3~22.1	1.070~9.136	0.011~0.520	3.2~138.6	
		Mean	9.9	3.958	0.169	40.4	
	Man-kyeong area	ME2	Range	2.6~19.9	0.386~5.223	0.025~0.405	2.1~144.6
			Mean	8.2	1.870	0.097	31.8
Lower	MK7	Range	0.8~22.2	0.064~2.866	0.012~0.231	0.4~232.7	
		Mean	6.0	0.799	0.060	18.4	
	ML2	Range	0.6~21.9	0.058~2.886	0.013~0.190	0.7~247.4	
		Mean	6.3	0.805	0.060	19.8	
	ML3	Range	0.6~21.9	0.058~2.886	0.013~0.190	0.7~247.4	
		Mean	5.6	0.751	0.056	16.5	
ML4	Range	1.4~13.6	0.089~2.209	0.014~0.154	0.9~83.6		
	Mean	4.5	0.658	0.059	13.2		

Table 2. Range and average of water quality concentration by year of Saemangeum lake

Year	Item	COD	TN	TP	Chl-a
		mg/L	mg/L	mg/L	mg/m <sup>3</sup>
2010	Range	0.8~19.6	0.176~11.995	0.017~0.548	0.9~160.3
	Mean	5.4	1.347	0.091	17.2
2011	Range	1.7~21.4	0.416~6.955	0.018~0.432	1.2~685.6
	Mean	6.9	1.921	0.111	31.4
2012	Range	1.8~21.0	0.214~9.638	0.012~0.588	0.2~89.6
	Mean	5.9	1.745	0.090	20.9
2013	Range	0.6~14.1	0.238~9.136	0.018~0.520	0.4~96.9
	Mean	5.9	2.194	0.106	23.4
2014	Range	1.8~20.3	0.199~12.834	0.012~0.598	0.4~99.7
	Mean	7.2	1.999	0.114	25.5
2015	Range	2.0~23.1	0.344~7.044	0.022~0.313	2.1~98.0
	Mean	8.5	2.165	0.099	27.2
2016	Range	2.3~15.5	0.115~8.227	0.011~0.290	1.0~67.0
	Mean	7.6	1.716	0.071	16.8
2017	Range	1.6~22.6	0.234~9.410	0.019~0.242	0.9~108.8
	Mean	7.0	1.663	0.061	17.5
2018	Range	1.8~15.5	0.058~12.700	0.018~0.526	1.9~210.7
	Mean	7.6	1.990	0.086	30.2
2019	Range	4.5~22.4	0.194~8.493	0.026~0.231	2.0~247.4
	Mean	9.7	1.734	0.089	40.9

Table 3. Range and average of water quality concentration by monthly of Saemangeum lake

Month	Item	COD	TN	TP	Chl-a
		mg/L	mg/L	mg/L	mg/m <sup>3</sup>
1	Range	0.8~14.6	0.241~11.656	0.012~0.548	0.9~88.6
	Mean	5.6	1.981	0.080	17.5
2	Range	1.8~19.6	0.058~11.995	0.017~0.588	1.1~138.8
	Mean	5.8	2.236	0.070	17.1
3	Range	0.6~21.0	0.143~12.834	0.012~0.598	0.7~189.9
	Mean	6.7	2.071	0.075	22.4
4	Range	0.8~22.6	0.320~12.201	0.019~0.506	0.8~93.8
	Mean	7.0	2.050	0.083	19.0
5	Range	2.2~23.1	0.248~5.522	0.011~0.378	0.4~225.6
	Mean	8.5	1.608	0.078	33.2
6	Range	2.7~19.9	0.219~9.136	0.026~0.526	0.9~210.7
	Mean	9.0	1.850	0.110	27.3
7	Range	3.5~16.3	0.514~8.414	0.022~0.391	1.9~160.3
	Mean	8.1	2.037	0.112	26.8
8	Range	2.6~22.2	0.420~6.900	0.023~0.330	2.1~247.4
	Mean	7.9	1.739	0.120	26.5
9	Range	2.6~14.7	0.463~4.558	0.018~0.352	2.8~93.3
	Mean	7.4	1.628	0.097	26.1
10	Range	1.9~15.4	0.245~7.869	0.021~0.462	1.2~131.9
	Mean	7.1	1.611	0.095	28.0
11	Range	1.8~14.4	0.115~7.234	0.022~0.432	1.0~92.7
	Mean	6.3	1.680	0.084	24.4
12	Range	1.4~21.4	0.194~7.937	0.014~0.520	0.2~685.6
	Mean	6.7	1.818	0.094	33.6

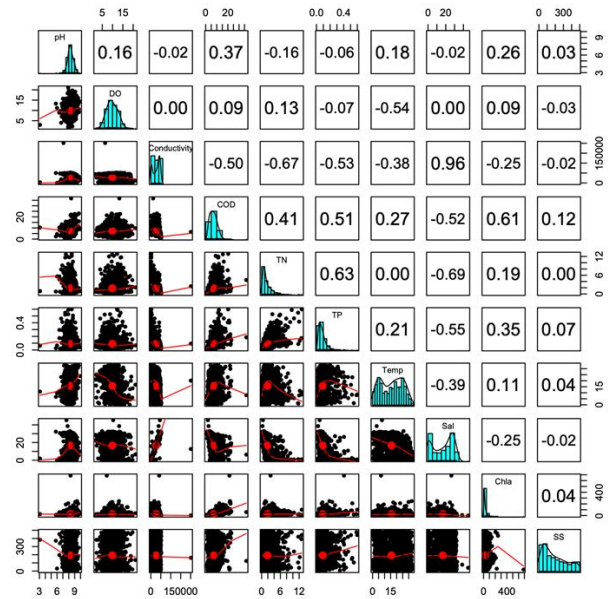


Fig. 2. Correlation characteristics between water quality factors in Saemangeum lake.

나. 수질인자간의 상관관계 분석

새만금호에서 측정된 수질인자간의 상관특성을 분석하기 위하여 R프로그램을 이용하여 분석을 실시하였고, 수질인자간의 상관 특성을 Fig. 2에 나타내었다.

수질인자간의 특성을 보면, 염분은 COD, TN, TP와 음의 상관성을 나타내고 있어, 이들 수질인자가 하천기원외로 외해수와의 혼합특성과 밀접한 관련성을 가지고 있음을 알 수 있다. COD는 TP, Chl-a와 양의 상관성을 보여, 하천유입기원과 유사함을 나타내고 있고, 특히, 내부 조류생산을 나타내는 Chl-a와 양의 상관성은 내부생산이 호소의 유기물 특성에 영향을 미침을 알 수 있다. TN과 TP가 서로 양의 상관성으로 하천기원의 특성을 가지고 있으며, TN과 염분의 강한 음의 상관성은 질소가 육역의 하천기원물질의 특성을 잘 보여주고 있었다. 수온과 염분은 원래 강한 음의 상관성을 가진 인자이나, 본 조사에서 음의 상관성이 약하게 나타나, 새만금호가 수온에 영향을 미치는 다른 요인인 갯벌 존재나 하천유입유량 변화에도 영향을 받는 것으로 판단된다.

3.2 주성분분석에 의한 시공간적 변화분석

가. 새만금호 수질의 공간적 변동특성

새만금 수질측정망 자료를 수질인자간의 상관성을 기초로 하여 분석하는 방법으로 10년간 월 측정자료를 이용하여 지점간의 수질인자간의 관련성을 통계 분석을 실시하였고, 군집분석과 주성분분석을 통해 공간적인 수질 변동특성을 분석하였다.



## 통계분석을 이용한 새만금호의 수질특성 평가

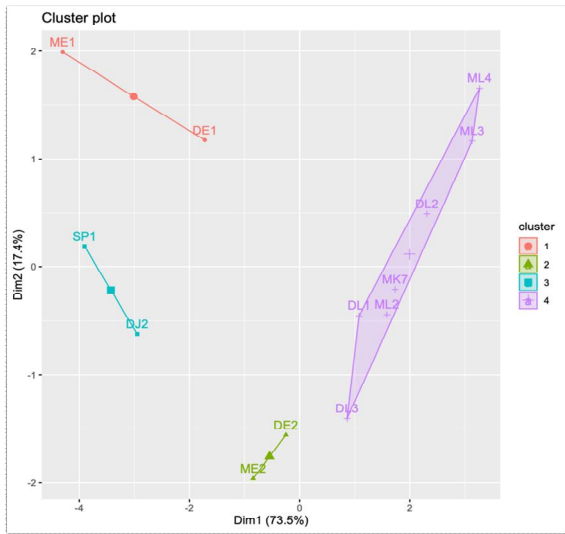


Fig. 3. The result of cluster analysis by water quality factors at survey station in Saemangeum lake.

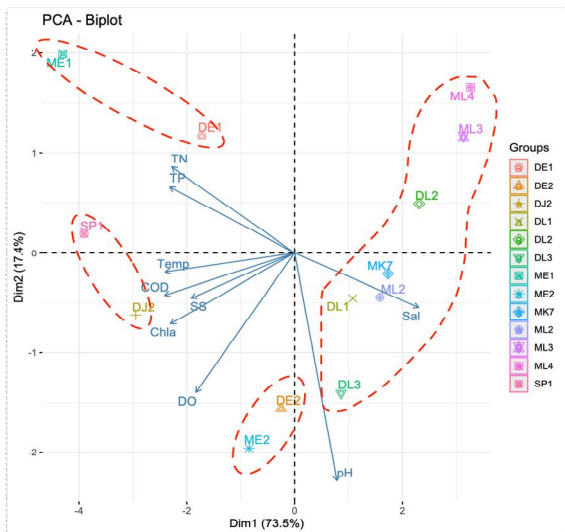


Fig. 4. The result of principal components analysis by water quality factors at survey station in Saemangeum lake.

공간적 분포 특성을 파악하기 위해 측정지점간의 군집분석 결과로 나타난 군집특성은 Fig. 3에 나타난 것과 같고, 이들의 주성분분석 결과는 Fig. 4와 같이 나타났다. 클러스터들은 공간적 연속성을 보이며 매우 이상적인 형태로 구분되었으며, 주성분 변수들은 이들의 특성을 잘 설명하고 있었다.

지점간의 특성은 크게 4개로 분류되었는데, 새만금호 상류의 하천 영향을 받는 ME1, DE1이 유사한 수질변화를 보였고, 하류부인 SP1, DJ2가 한 그룹으로 나타났으며, 수질변화가 가장 크게 나타나는 ME2, DE2가 한 그룹으로 분류되

었고, 나머지 외해수의 영향을 받는 수심이 깊은 호 중앙부 지점들이 유사한 수질 변동 특성을 나타내었다.

주성분분석(PCA)에서 첫번째 로딩 벡터(x-축 방향)는 염분 및 수온 가중치가 높고, 두번째 로딩 벡터(y-축 방향)는 pH에 가중치가 높았다. 즉, 첫번째 로딩 벡터는 물성적 특징을 나타내는 인자인 염분과 수온 함수에 대응하며 담수 영향인지 해수 영향인지의 측도에 대응하고, 두 번째는 담수와 해수 혼합에 따라 결정되는 수소이온농도인 산성화 측도에 대응하였다. 또한, TN, TP는 서로 상관성이 있고, 수온, COD, SS, Chl-a도 상관성이 있으며, 그 외 항목들 간에는 관련성이 낮다는 것을 알 수 있다.

즉, 새만금 내 관측정점 그룹은 4가지로 나눌 수 있는데, 하천의 영향을 받아 TN과 TP가 상대적으로 높은 그룹(I)과, 하천과 외해수 혼합영역에서 담수의 영향이 높은 염분 낮고 수온과 COD가 높은 그룹(II)과 하천과 외해수 혼합영역에서 해수의 영향으로 높은 염분 농도와 높은 pH를 가지는 그룹(III), 그리고 해수의 영향이 지배적인 염분이 높은 그룹(IV)으로 구분할 수 있다.

군집분석 결과와 주성분 분석 결과를 연계하여 새만금호의 공간적 수질특성을 보면, 담수 영향이 강한 하천 중하류 구간에서 담수 유입의 영향으로 높은 영양염 농도를 나타내고 있으며, 해수의 영향을 받는 배수갑문과 호수의 수심이 깊은 구간에서 높은 염분 농도를 보였다. 그리고 하천수와 외해수가 혼합되는 중간 수역에서는 하천 영향이 좀 더 크게 나타나 상대적으로 낮은 염분과 높은 COD 농도를 보인 수역과 상대적으로 낮은 염분과 높은 pH 농도를 보인 수역으로 구분되었다.

### 나. 새만금호 수질의 시간적 변동특성

새만금 수질측정망 자료를 수질인자간의 상관성을 기초로 하여 분석하는 방법으로 측정시기에 대한 측정지점의 수질인자를 월별 관련성을 통계 분석하였으며, 군집분석과 주성분분석으로 시간적 수질 변동특성을 분석하였다.

시간적 수질 변동 특성을 파악하기 위해 실시한 군집분석 결과에서 측정시기의 월별 군집특성은 Fig. 5에 나타난 것과 같고, 이들의 주성분분석 결과는 Fig. 6과 같이 나타났다. 클러스터들은 계절적 변동 특성을 보이며 매우 이상적인 형태로 구분되었으며, 주성분 변수들은 이들의 계절적 특성을 잘 설명하고 있었다.

새만금 유역의 시간적 군집분석에서 4개의 수질 변화를 나타내는 그룹이 뚜렷하게 나타났는데, 하계 7~10월의 수질이 유사한 변동특성을 보이는 그룹으로 나타났고, 동계 1~2월, 춘계 5~6월, 그리고 3월, 4월, 11월, 12월이 유사한 수질 변동을 나타내는 그룹으로 나타났다.

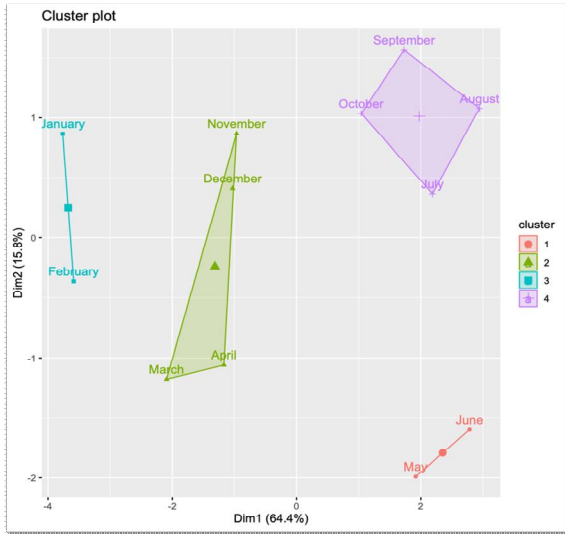


Fig. 5. The result of cluster analysis by water quality factors at monthly in Saemangeum lake.

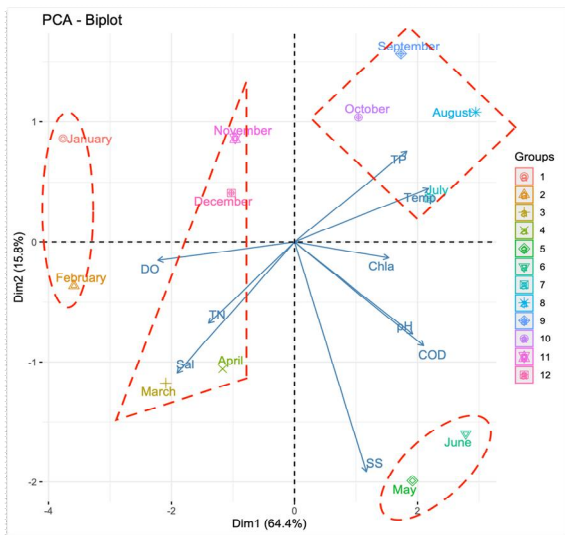


Fig. 6. The result of principal components analysis by water quality factors at monthly in Saemangeum lake.

이러한 변화 특성은 일반적으로 다른 수계에서 나타나는 하계 7~9월, 춘·추계 5~6월과 10~11월, 동계 12~4월의 수질 변화특성이 유사하게 나타는 경향에 비해 다른 양상을 보였으나, 추계와 동계의 변동 특성이 일반적인 다른 수계에서 보인 시기와 다소 차이가 있었다.

이는 새만금호가 인위적으로 조성된 호수로써 상류 만경강과 동진강의 유입 영향을 받는 것과 동시에 새만금 방조제에 설치된 가력과 신시갑문을 통한 외해수 유입의 영향을 받음으로써 수질의 변동요소가 달라진 것으로 평가되며, 특

히, 호 내부의 하계 수온성층과 외해수의 고염분수 유입에 따른 염분성층의 발달로 나타나는 빈산소수괴의 지속성 때문에 나타난 현상으로 판단된다.

시간별 주성분분석에서는 첫번째 로딩 벡터(x-축 방향)는 DO, 염분 및 Chl-a, 수온의 가중치가 높았고, 두번째 로딩 벡터(y-축 방향)는 부유물질 농도에 가중치가 높게 나타났다. 즉, 첫번째 로딩 벡터는 담수와 해수의 혼합특성에 따른 수질변화를 나타내는 측도에 대응하였고, 두번째는 부유물질로써 내부 생산 및 외래성 유입의 영향을 나타내는 특성에 대응하였고, 세번째 로딩벡터는 수온과 총인의 수질변동이 유사하였는데, 이는 하계 수온증가에 따른 성층발달로 인해 빈산소수괴가 발달하고, 저층의 무산소 상태에서 인의 용출에 의한 영향이 있음을 평가할 수 있다.

또한, 항목간 상관성에서 수온과 TP는 상관성이 있고, 염분과 TN, 그리고 pH와 COD가 상관성이 높았다. 그 외 항목들 간에는 낮은 상관성을 나타내어 관련성이 낮았다.

따라서, 관측 월에 따른 그룹은 4가지 유형으로 구분되었다. 그룹 I은 외래성 유기물 유입 및 내부 생산의 영향을 받아 조류의 농도가 증가하는 시기로 COD, SS, pH가 상대적으로 높게 나타나는 시기인 늦봄과 초여름에 해당되는 5, 6월이고, 그룹 II는 계절적으로 상하층간의 혼합이 발생하는 초봄(3, 4월)과 늦가을(11, 12월)에 해당되는 시기로 염분, TN, DO가 높게 나타났으며, 그룹 III은 동계 낮은 수온에 의한 용존산소의 증가가 명확하게 나타나는 계절인 겨울철(1, 2월)의 수질 특성을 보였고, 그룹 IV는 하계(7, 8, 9, 10월) 성층의 발달로 저층 퇴적물의 인용출 증가에 따른 높은 인농도와 하계 고수온의 상관성을 가지는 그룹으로 구분되었다. 새만금호의 하계 특성이 늦가을까지 지속되는 현상은 온도성층과 더불어 염분성층이 오랫동안 지속되는 특성에 기인한다고 볼 수 있다.

### 3.3 새만금호의 공간적 수질특성과 수질관리 정책 제언

새만금 유역의 수질측정망 자료를 이용하여 호 내 13개 정점의 시공간적 수질변동 특성을 통계분석 하였고, 이를 기초로 새만금 유역 내 수질변동 특성이 유사한 지점을 군집화하여 Fig. 7에 나타내었다.

공간적 수질변동 특성에서는 하천 담수유입의 영향을 받는 구간과 갑문을 통한 외해수 영향을 받는 구간, 그리고 해수와 담수가 혼합되는 기수역이 뚜렷하게 분리되어 수질변동 특성이 다르게 나타남을 알 수 있다.

이러한 새만금호의 수질을 관리하기 위하여 새만금호 하류유역을 도시용수 구역으로, 상류유역을 농업용수 구역으로 구분하여 목표수질을 각각 IV, III등급으로 설정하였고, 새만금으로 유입되는 오염부하 감소를 위하여 유역관리 대



## 통계분석을 이용한 새만금호의 수질특성 평가

책을 수립하여 추진중에 있다.

이러한 상류 오염원에 대한 관리정책에도 불구하고 새만금호의 수질은 점차 악화되어 가고 있다. 호수의 수질을 결정짓는 요소는 상류 오염원 뿐 만 아니라 일반적인 호수의 물리적 특성에 기인하는 성층과 전도현상, 해수와 담수의 혼합에 의한 밀도변화에 따른 염분성층, 인공적으로 조성된 호수내 퇴적물의 영향 등 다양한 수질 변화요인에 대한 연구가 필요하다.

이에 새만금호의 수질관리를 위한 제언으로 현재 새만금 상류 오염원에 대한 다양한 유역관리대책에 대한 수질개선의 효과의 정량적 평가할 필요하며, 새만금호의 호수 특성에 기인한 수질변화 특성에 미치는 영향을 평가하고, 이에 맞는 호수 관리정책의 도입이 필요하다. 특히 조류의 이상 증식과 관련하여 강우의 영향 및 퇴적물의 영향에 대한 평가가 필요하다.

또한 새만금 유역의 수질관리체계의 강화를 위한 통합모니터링 체계를 구축하고, 유역 통합관리 시스템의 구축을 통한 수질오염총량관리 제도의 도입이 필요하다.

수 영향구역, 해수와 담수가 혼합되는 중간 수역이 2개 그룹으로 구분되어 각각 다른 수질특성을 나타내었다.

주성분분석을 이용한 시간적 수질특성은 계절적으로 4가지 그룹으로 구분되었다. 그룹 I 은 늦봄과 초여름에 해당되는 5, 6월이고, 그룹 II는 계절적으로 초봄(3, 4월)과 늦가을(11, 12월)에 해당되는 시기로 나타났으며, 그룹 III은 낮은 수온에 의한 용존산소의 증가가 나타나는 계절인 겨울철(1, 2월)의 수질 특성을 보였고, 그룹 IV는 하계(7, 8, 9, 10월) 성층의 발달로 저층 퇴적물의 높은 인농도와 하계 고수온의 상관성을 가지는 그룹으로 구분되었다.

이는 새만금호가 인위적으로 조성된 호수로서 상류 만경강과 동진강의 유입 영향을 받는 것과 동시에 새만금 방조제에 설치된 가력과 신시갑문을 통한 외해수 유입의 영향을 받음으로써 수질의 변동요소가 달라진 것으로 평가되며, 새만금호를 목표수질을 달성하기 위해 현재 추진중인 상류유역의 오염원 관리 대책과 함께 새만금호 내부의 수질변동요인에 대한 특성을 파악하여 호내 수질관리 대책을 수립할 필요가 있다. 또한 새만금 유역의 통합관리 대책의 수립을 통한 수질오염총량관리제도의 도입이 필요하다.

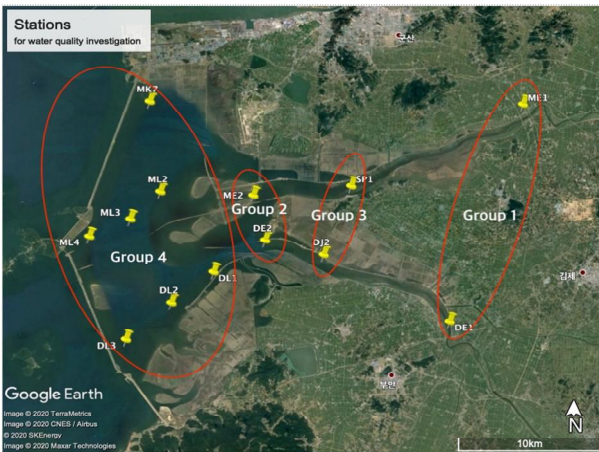


Fig. 7. Spatial cluster characteristics of water quality factors in Saemangeum lake.

## 4. 결론

새만금호의 국가수질측정망 자료를 이용하여 통계분석 기법에 의한 새만금호의 시공간적 수질특성을 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

수질항목간의 상관성에서 수온과 TP는 상관성이 있고, 염분과 TN, 그리고 pH와 COD가 상관성이 높았다. 그 외 항목들 간에는 낮은 상관성을 나타내어 관련성이 낮았다.

주성분 분석을 이용한 새만금호의 공간적 수질특성을 보면, 크게 4개의 그룹으로 구분되었는데, 담수 영향구역과 해

## 사 사

본 논문은 2023년도 군산대학교 수산과학연구소 학술연구비 지원으로 수행된 연구이며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## Reference

- [1] 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.
- [2] Jeong, H. Y., I. G. Ryu, and S. W. Chung(2009), Simulations of Pollutant Mixing Regimes in Saemangeum lake According to Seawater Exchange Rates Using the EFDC Model, J. of the Korean Soc. of Agri. Eng., Vol. 51, No. 6, pp. 53-62.
- [3] Jeon, J. H. and S. W. Chung(2012), A Sensitivity Analysis on Numerical Grid Size of a Three Dimensional Hydrodynamic and Water Quality Model (EFDC) for the Saemangeum Reservoir, J. of Korean Soc. on Water Environ., Vol. 28, No. 1, pp. 26-37.
- [4] Jeon, J. H., S. W. Chung, H. S. Park, and J. R. Jang(2011), Evaluation of EFDC for the simulations of Water Quality in Saemangeum Reservoir, J. of Korean Soc. on Water Environ.,

Vol. 27, No. 4, pp. 445-460.

- [5] 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 Experiments, *Environmental Police*, Vol. 28, No. 3, pp. 87-111.
- [6] Kim, J. O., W. J. Kim, and J. G. Hyun(2006), The characteristics of water quality in the inlet of Saemangeum area, *J. of Kor. Soc. Agri. Eng., Association Autumn Conference*, pp. 210-216.
- [7] Na, J. E. and H. Y. Lee(2011), Distribution of Benthic Algae in Tidal Flats of Saemangeum Lake, Korea, *Korean J. Environ. Biol.*, Vol. 29, No. 1, pp. 46-51.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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. 01. 12.

Revised : 2023. 03. 22. (1st)

: 2023. 06. 05. (2nd)

Accepted : 2023. 06. 27.