

시화호 해수유통량 증대에 따른 통계학적 수질 영향 분석

이범연^a · 이창희^{b,*}

명지대학교 환경에너지공학과

A Statistical Assessment of Increasing Tidal Mixing Effects on Water Quality in the Shihwa Coastal Reservoir

Bum-Yeon Lee^a · Chang-Hee Lee^{b,*}

Department of Environmental Engineering and Energy, Myongji University

(Received 18 August 2021, Revised 2 October 2021, Accepted 6 October 2021)

Abstract

A tidal power plant (TPP) has been in operation since the end of 2011 to improve the water quality of Shihwa Coastal Reservoir (SCR). Tidal mixing rate increased 5.6 times after the TPP operation so that in this study, its effects on water quality was assessed through statistical analysis of long-term water quality monitoring data. It was found that the increased tidal mixing contributed to solving the hypoxia problem in the bottom water by preventing the summer stratification. The analysis also showed that the increased tidal mixing had different effects depending on the relative concentration difference for each water quality substances between the SCR and the outside of SCR. The average concentrations of some substances (chemical oxygen demand, total phosphorus, chlorophyll-a) with higher concentrations than the outside of SCR decreased due to the dilution effect, but the other substances (total nitrogen, dissolved inorganic nitrogen, dissolved inorganic phosphorus) with lower concentrations compared to the outside ones increased on the contrary. Factor analysis also showed a consistent result that the first factor accounting for the water quality was changed from the organic-related substances to the nutrient-related substances after the increased tidal mixing. These results imply that the focus of future water quality management needs shifting from the organic substances to the nutrients, particularly dissolved inorganic nutrients. Considering the effect of inflow seawater on the nutrients, the management area should be extended to cover not only SCR but also a certain area outside of SCR.

Key words : Restoration management, Shihwa coastal reservoir, Tidal mixing, Tidal power plant, Water quality, Water quality assessment

^a 연구원(Researcher), armdry83@nate.com, <https://orcid.org/0000-0002-1623-2231>

^b Corresponding author, 교수(Professor), changhee@mju.ac.kr, <https://orcid.org/0000-0001-8066-6838>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. Introduction

최근에 연안지역의 방조제 건설 및 간척 사업 등의 인공구조물 설치를 통해 간척지에 용수공급 목적으로 조성한 담수호는 방조제 또는 하굿둑으로 인해 해수 순환이 차단되어 오염물질 농도가 높아지고 담수호 내부 생태계가 악화되고 있다. 이로 인해 수질 또는 수생태계 관리를 위한 해수유통의 증대 또는 방조제 수문을 통한 해수유통 확대 등의 개선 또는 복원 대책이 고려되고 있다(Kim et al., 2016; Schallenberg et al., 2010; Wijnhoven et al., 2010; Ysebaert et al., 2016). 일반적으로 담수호 수질관리의 가장 큰 난제 중 하나인 빈산소층 형성은 방조제 수문 개방의 경우 상대적으로 높은 용존산소 농도를 가진 해수와 혼합과 해수유통에 따른 유속의 증가 때문에 다소 완화될 수 있다고 알려져 있다(Gale et al., 2006). 이와 동시에 담수의 체류시간 감소로 인해 수질오염물질의 체류시간도 함께 감소함에 따라 호소 수질 개선에 긍정적 역할을 할 수 있다. 그러나 해수유통이 수질에 미치는 영향은 해당 지역의 지형과 유입오염원 부하 특성 등에 따라 지역적으로 차이를 보일 수 있다(Phlips et al., 2004; Schallenberg et al., 2010).

시화호는 방조제 건설 이후 담수화를 위해 갑문을 통한 해수유통을 차단한 이후 급격한 수질 악화로 인해 갑문 재개방을 통해 해수유통을 실시한 대표적인 사례 지역이다(Hong et al., 1997; Kim et al., 2002). 시화호 수질 악화 이후 정부에서는 갑문 재개방을 포함한 환경기초시설 증설, 하수관로 개량, 인공습지 건설 등 다양한 수질개선 대책을 실시하였으나 관리목표(COD \leq 2 mg/L)를 달성하지는 못하였다(Lee, Lee et al., 2014; ME, 1996; MOMAF, 2001; SCRMC, 2007). 이에 따라 해수유통량 증대를 통해 비교적 용존산소 농도가 높고 수질 오염물질 농도가 낮은 시화호 외측과의 희석효과로 근본적인 수질악화 문제 및 수생태 문제를 해결하는 동시에 조력에너지 생산을 위해 2004년 시화호 방조제 중앙부근에 조력발전소 건설이 시작되어 2011년에 완공되어 가동되기 시작되었다. 조력발전소 가동에 따라 일일 해수유통량은 시화호 총 저수용량(3억 3천만 m³)의 약 50%에 달하는 약 1억 6천만 m³으로 조력발전소 건설 시작 이전(3천만 m³)에 비해 약 5배 이상 증가되어 수질 개선을 기대하였다. 그러나 일부 지역에서는 지형적인 해수순환의 차이, 오염원 관리의 미흡, 상류 지역의 오염원 집중 등으로 제약적인 수질개선이 발생할 가능성이 있어 해수유통량 증대에 따른 수질영향 분석이 요구되었다. 이에 따라 시화호 조력발전소 가동에 따른 영향 분석을 위해 연구들이 진행되었으나 대부분의 연구들은 모델을 활용한 조력발전소 가동에 따른 수질 변화 예측, 단기간(전후 약 1~2년)에 걸친 조사 자료에 근거한 수질 또는 생태계영향 분석, 유동 변화 등에 초점을 두고 이뤄졌다(Kang et al., 2013; Kim and Koo, 2015; Lee, 2016; Ra et al., 2013).

따라서 본 연구에서는 조력발전소 가동에 따른 해수유통량 증대가 시화호 수질에 미치는 영향을 국가 측정망인 해양환경측정망의 장기간 측정자료(2007~2015년)를 활용하여 강우량 등의 자연적 요인에 의한 일시적 영향을 최소화하였으며,

비모수 및 다변량 통계 분석기법을 활용하여 유의한 변화 여부를 분석하였다. 본 연구 결과는 시화호 수질 관리방안을 위한 기초자료로 활용될 수 있으며, 나아가 최근 국내외에서 추진이 검토되고 있는 연안 지역의 인공호수 또는 하굿둑 개방 추진을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

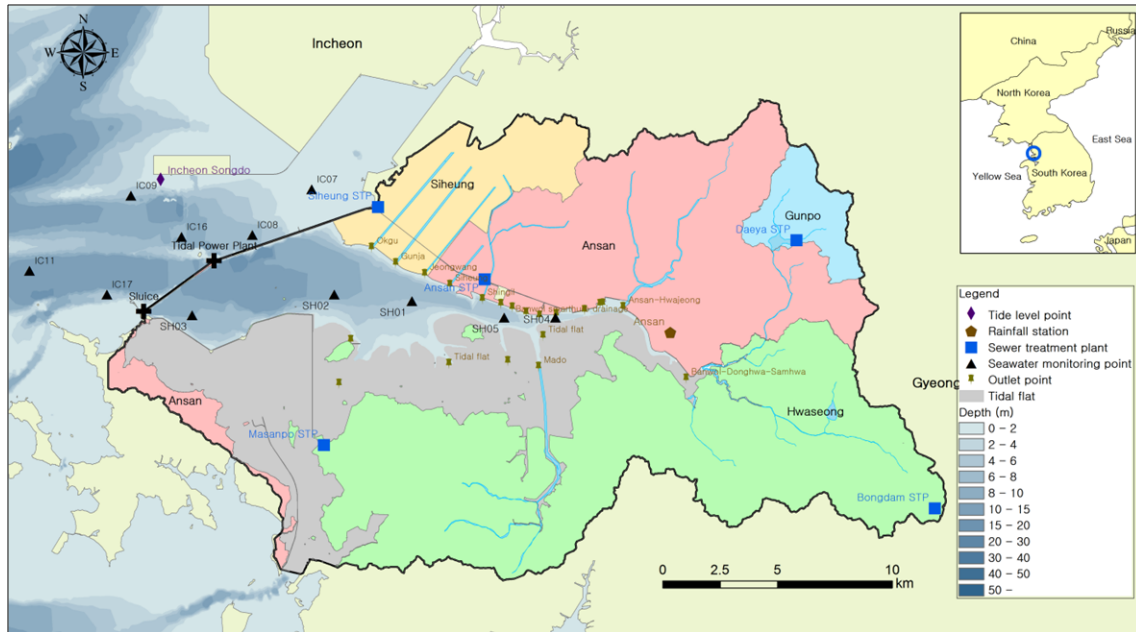
2. Materials and Methods

2.1 Study site

본 연구의 대상지역인 시화호는 1994년 오이도와 대부도를 잇는 12.7 km 길이의 방조제 건설로 형성된 인공호수로서 농업용지 확장 및 확장된 농업용지에 용수 공급을 위한 목적으로 건설되었다. 시화호 수면의 면적은 56.5 km², 유역면적 479.8 km², 총 저수용량 3억 3천 m³이며, 총 저수용량과 비슷한 연간 3억 4천 m³의 담수가 총 10개의 소규모 하천 및 간선수로(유하거리 10 km 미만)가 유입되고 있다. 해수유통에 따른 혼합 정도를 결정하는 중요한 인자 중의 하나인 수심 분포는 방조제 인근의 경우 약 20 m 정도로 깊으며, 방조제에서 멀어질수록 낮아져 상류지역의 경우 약 3 m 정도를 나타내고 있다. 또한, 담수 유입량과 체류시간, 내부생성뿐만 아니라 시화호 수질에 직접적인 영향을 미치는 유역의 대표적인 오염물질 배출원인 환경기초시설의 경우 2015년 기준 안산(543,000 m³/일), 시흥(279,000 m³/일), 봉담(8,000 m³/일), 대야(5,000 m³/일), 마산포(80 m³/일) 하수처리장의 5개 하수처리장이 유역 내에 위치하고 있으며, 그 중 대규모인 안산 및 시흥하수처리장이 시화호 외측으로 배출되고 있어 주로 비점오염원에 의한 영향을 크게 받는 지역으로 알려져 있다(Lee, Lee et al., 2014).

조력발전소 가동에 따른 수리학적 영향은 Table 1과 같다. 해수유통량은 조력발전소 가동 이전에 E.L. -2.0 m~E.L. -1.0 m로 유지되던 관리수위를 발전소의 가동 이후 E.L. -4.5 m~E.L. -1.0 m로 간조 시 최저수위를 약 2.5 m 더 낮게 유지함으로써 증가시켰다. 조력발전소 가동 모식도는 Fig. 2와 같다. 조력발전소는 창조 시 시화호 내측의 최고 관리수위(E.L. -1.0 m)까지 해수를 유입시켜 발전을 하고(창조 발전), 낙조 시에는 시화호 외측 수위가 내측 최고 관리수위 미만이 될 때부터 조력발전소 수문 및 기존 갑문을 동시에 열어 배수하는 방식으로 운영되고 있다.

조력발전소 가동은 시화호 내측의 물리적 흐름을 크게 변화시킨 것으로 보이나 실측 자료는 거의 부재한 실정이다. 일부 시화호의 방조제 내측 근처에서 실측한 자료에 의하면 발전(창조) 시 조력발전소 남동향으로 강한 유속의 해수가 유입(최대 유속 1.48 m/s)되고, 배수(낙조) 시에는 조력발전소 북서향으로 유속은 상대적으로 약하지만(최대 유속 0.88 m/s) 많은 수송량의 내수가 방류되는 것으로 나타났다(Lee, 2016). 이 같은 유속 분포는 Kang et al. (2013)의 3차원 모델 결과로도 확인되었다. 또한, 동 모델의 유속, 밀도, 및 잔차류 모의 결과분석에 따르면 조력발전소 가동에 따라 시화호 내측 하류 지역은 유속 및 해수 혼합 증가의 영향을 크게 받지만, 그 영향이 중상류지역으로 갈수록 점차 감소함을 보



※ SH04, SH05: Monitored from 2011

Fig. 1. The study site.

Table 1. Hydrodynamic impacts of Tidal Power Plant (TPP) operation

| Categories | Hydrodynamics impact |
|-------------------------|---|
| Type of TPP | Single effect flood generation |
| Maintenance water level | Before TPP: E.L. -2.0 m~E.L. -1.0 m After TPP: E.L. -4.5 m~E.L. -1.0 m |
| Tidal volume exchange | Before TPP: $0.025 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$ (Sluice only) After TPP: $0.15 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{d}$ (Sluice and TPP gates) |

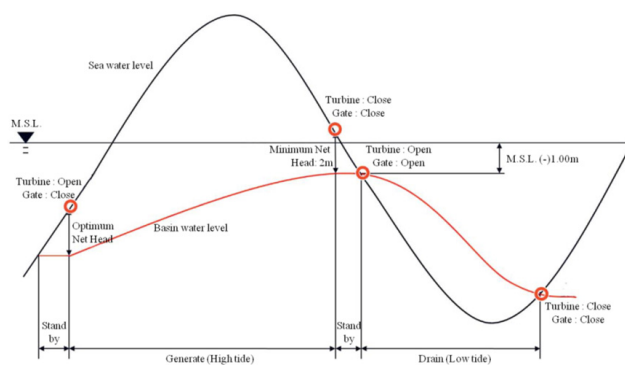


Fig. 2. Diagram of a single effect operation(flood) for the Shihwa TPP (Bae et al., 2010).

여준다. 반면, 조력발전소 가동 전보다 배수 시 수위가 크게 저하되므로 상류 지역의 담수 영향이 하류 지역으로 확대되는 것으로 나타났다.

2.2 Methods

해수유통량 증대에 따른 수질 변화를 분석하기 위해 본 연

구에서는 국가측정망인 해양환경측정망¹⁾의 2007~2015년 수질 자료를 수집하여 활용하였다(Table 2). 수집된 수질 자료는 조력발전소 가동 이전 (1단계; 2007~2010년), 조력발전소 가동 이후(2단계; 2012~2015년)로 구분하여 분석하였으며, 2011년 자료의 경우 시범적 운영 시기로 일부만 가동되어 분석에서 제외하였다. 이때 수집된 자료는 시화호 내측뿐만 아니라 내측의 영향을 미치는 시화호 외측의 방조제 인근 정점에 대해서도 비교 분석을 위해 함께 조사하였다. 수질농도 변화를 파악하기 위해 해수유통량 증대 전후 평균 농도 차이 비율, 시화호 상류에서 하류 및 외측의 공간적 수질 변화를 파악하였다. 이때 해수유통량 증대에 따라 변동된 수질의 유의미한 변화 여부를 파악하기 위해 Mann-Whitney 검정(Mann and Whitney, 1947)을 수행했으며, 요인분석을 통해 시화호 내측 단계별 수질 항목의 주성분 변화 여부 파악을 통해 수질특성 변화를 조사하였다. Mann-Whitney 검정은 해수유통량 증대 전후의 단계 추세(step trend)의 통계학적으로 유의한 차이 여부를 판단하기 위해 내측의 SH01~SH03 및 외측 IC16 (조력발전소 전면 지점)에 대해 실시하였으며, 검정 결과 유의확률 0.05 미만을 나타낼 경우 두 집단에 유의한 차이가 있는 것으로 분석하였다. 요인분석의 경우 요인분석에 사용된 자료가 적합하지를 판단하기 위해 Kaiser Meyer Olkin (KMO) 검정을 통한 적합도 분석을 수행하였으며 분석결과 KMO 값이 0.50 이상일 경우 요인분석에 적합한 것으로 판단하였다

1) 해양환경측정망은 해양환경관리법 제9조에 따라 국내 연안 및 근해역의 해양환경 현황과 변화를 파악하는 해양환경조사를 시행하기 위해 구성하여 정기적(연4회(2월, 5월, 8월, 11월); 연안오염총량관리 시행지역의 경우 추가 실시)으로 해양환경을 측정하기 위해 운영. 현재 전국연 안 425개 정점, 2개의 수층(표층, 저층)에 대해 수온, 염분 등 16개 일반항목에 대해 조사 중.

Table 2. Summary of the monitoring data and analysis from different sites

| Parameters | Sites | Frequency |
|--|--|--|
| Bottom DO, and surface Salinity, Chemical Oxygen Demand (COD), Dissolved Inorganic Nitrogen (DIN), Total Nitrogen (TN), Dissolved Inorganic Phosphorus (DIP), Total Phosphorus (TP), Suspended Solids (SS), Chlorophyll-a (Chl-a), Transparency, Temperature*, pH*, Silicon dioxide(SiO ₂ -Si)* | Inside: SH01 ~ 05, Outside: IC07 ~ 09, IC11, IC16-17 | 4 times per year (February, May, August, November) |

* Parameters used only for factor analysis

(Kaiser, 1974). 요인의 추출은 최소 고유값(eigenvalue) 기준으로 하나의 주성분이 변수 1개 이상의 분산을 설명한다는 것을 의미하는 고유값이 1 이상인 값을 추출하였으며, 요인의 회전은 가장 많이 사용하는 직교회전 중 Varimax를 적용하였다. 이때 통계분석에는 Statistical Package for Social Sciences (SPSS) version 22을 사용하였다. 시화호 상류구역(SH04 및 SH05)의 경우 해수유통량 증대 이전에 미측정(2011년 모니터링 시작)되어 대부분의 분석은 시화호 중하류(SH01~03) 및 외측 인근 정점 위주로 실시하였으며 상류구역 자료의 경우 해수유통량 증대 이후 현황 파악 및 다른 정점과의 비교에만 사용하였다.

3. Results and Discussion

3.1 Average water quality changes before and after operation of tidal power plant

해수유통량 증대에 따른 평균수질 변화율을 분석한 결과 시화호 방조제 내측이 외측에 비해 크게 나타났으며 이는 해수유통량 증대가 시화호 방조제 외측보다는 내측의 수질에 보다 큰 영향을 미친 것을 반영한다(Table 3). 항목별로는 해수유통량 증대에 따라 유속 및 수위 변동 폭 증가(해수유통전 최저수위 E.L. -2.0 m에서 유통 후 E.L. -4.5 m로 변화)이 증가하여 표층과 저층의 혼합이 보다 원활해짐에 따라 저층으로의 산소공급이 원활해져 내측 모든 지점에서 저층의 용존 산소 농도가 증가했다(Fig. 3(b)). 또한, 여름철 최저농도가 해수유통량 증대 이전에는 0.8 mg/L까지 감소하였으나 증대 이후에는 4.3 mg/L로 빈산소 기준인 2 mg/L 이상을 유지하여 타 연구 결과와 다르지 않았다(Gale et al., 2006; Kang et al., 2013; Lee, 2016; Ra et al., 2013). 이러한 해수 혼합의 증가는 보존성 물질인 염분의 변화에서 간접적으로 파악할 수 있다. 해수유통량 증대에 따라 상대적으로 농도가 높은 외측 해수의 유입량 증가로 인해 시화호 내측 표층에서도 농도가 증가한 것으로 나타났다(Fig. 3(a)). 밀도가 담수에 비해 상대적으로 높은 해수의 특성을 고려할 때 표층 염분 농도의 증가는 표층 및 저층 간의 혼합이 원활히 이뤄지고 있어 저층의 빈산소 문제가 개선된 것으로 판단된다. 특히 Table 3의 염분 분

Table 3. Average water quality change ratios and Mann-Whitney test results at the selected sites

| Parameters | Inside of SCR (SH01-03) | | | | Outside of SCR (IC07-09, 11, 16, 17) | |
|--------------|-------------------------|----------|----------|---------|--------------------------------------|---------|
| | SH01 | SH02 | SH03 | Average | IC16 | Average |
| Salinity | 15.8%* | 9.9%* | 8.5% | 11.2% | 0.2% | -0.2% |
| DO | 24.8%* | 9.6% | 14.3% | 16.1% | 3.5% | -0.9% |
| COD | -37.9% | -38.8% | -25.1% | -35.2% | -5.4% | 0.4% |
| DIN | 28.7% | 181.8%** | 166.9%** | 92.9% | 22.7% | 27.8% |
| TN | -9.8% | 50.5%* | 39.0%** | 18.6% | 6.9% | 14.9% |
| DIP | 45.9% | 30.8% | 74.2% | 49.6% | 16.0% | 10.3% |
| TP | -47.5%* | -29.8% | -26.6% | -36.9% | -20.1% | -22.8% |
| SS | -17.3% | -19.0% | -16.0% | -17.5% | -12.0% | 0.5% |
| Chl-a | -78.2%* | -43.8% | -32.6% | -65.1% | -43.8% | -41.3% |
| Transparency | 21.2% | -8.8% | -25.7%* | -8.6% | 20.6% | 3.5% |

* : Significant difference at $p < 0.05$ from Mann-Whitney test

** : Significant difference at $p < 0.01$

석결과를 살펴보면 담수의 영향을 상대적으로 크게 받고 있던 중류지역(SH01)으로 갈수록 변화를 증가가 크게 조사되어 해수유통량 증대에 따른 혼합이 상대적으로 더 확대된 결과가 반영된 것으로 보인다. 이는 Mann-Whitney 검정 분석결과에서 시화호 하류에 위치한 SH03 정점을 제외한 보다 상류 정점에서 통계적으로 유의한 변화가 보이는 것으로부터 재확인할 수 있다.

기타 일반수질 항목의 경우 영양염류(DIN, TN, DIP)와 투명도를 제외한 대부분 항목이 해수유통 후 시화호 내부에서 개선된 것으로 나타났고, 특히 Chl-a, COD, TP의 경우 전체 평균 농도가 30% 이상 감소하였다. 반면 DIN과 TN, DIP 등의 항목은 30% 이상 농도가 오히려 증가하여 항목별로 해수유통량 증대에 따른 영향에 차이가 있었다(Table 3). 이러한 결과는 일평균 유입량(한국수자원공사 시화호 조력발전소 운영현황 자료)이 25.2백만 m³(2007~2010년 평균)에서 140.7백만 m³(2012~2015년 평균)으로 시화호 총 저수용량 330백만 m³의 약 42.7%까지 증가됨에 따라 외측 수질에 영향이 크게 증가하여 외측(IC16) 정점에 비해 농도가 높았던 내측의 COD, TP, Chl-a 등은 농도가 감소한 반면 외측에 비해 상대적으로 농도가 낮았던 DIN, TN, DIP의 경우 해수유통량 증대 이후 농도가 증가한 것으로 판단된다(Fig. 3).

3.2 Spatial change of average water quality before and after operation of tidal power plant

시화호 내부의 육지 부근 정점으로부터 방조제 인근 및 시화호 외측 정점까지의 공간적 수질 변화를 살펴보면, 수질이 개선된 항목(COD, SS, TP, Chl-a)은 방조제 인근 하류지역(SH03)에 비해 중류지역(SH01)에서 수질개선이 상대적으로 높게 나타났으며, 수질이 악화된 항목(DIN, TN, DIP)의 경우에도 중류지역이 주수로 지역(SH02 및 SH03)에 비해 농도

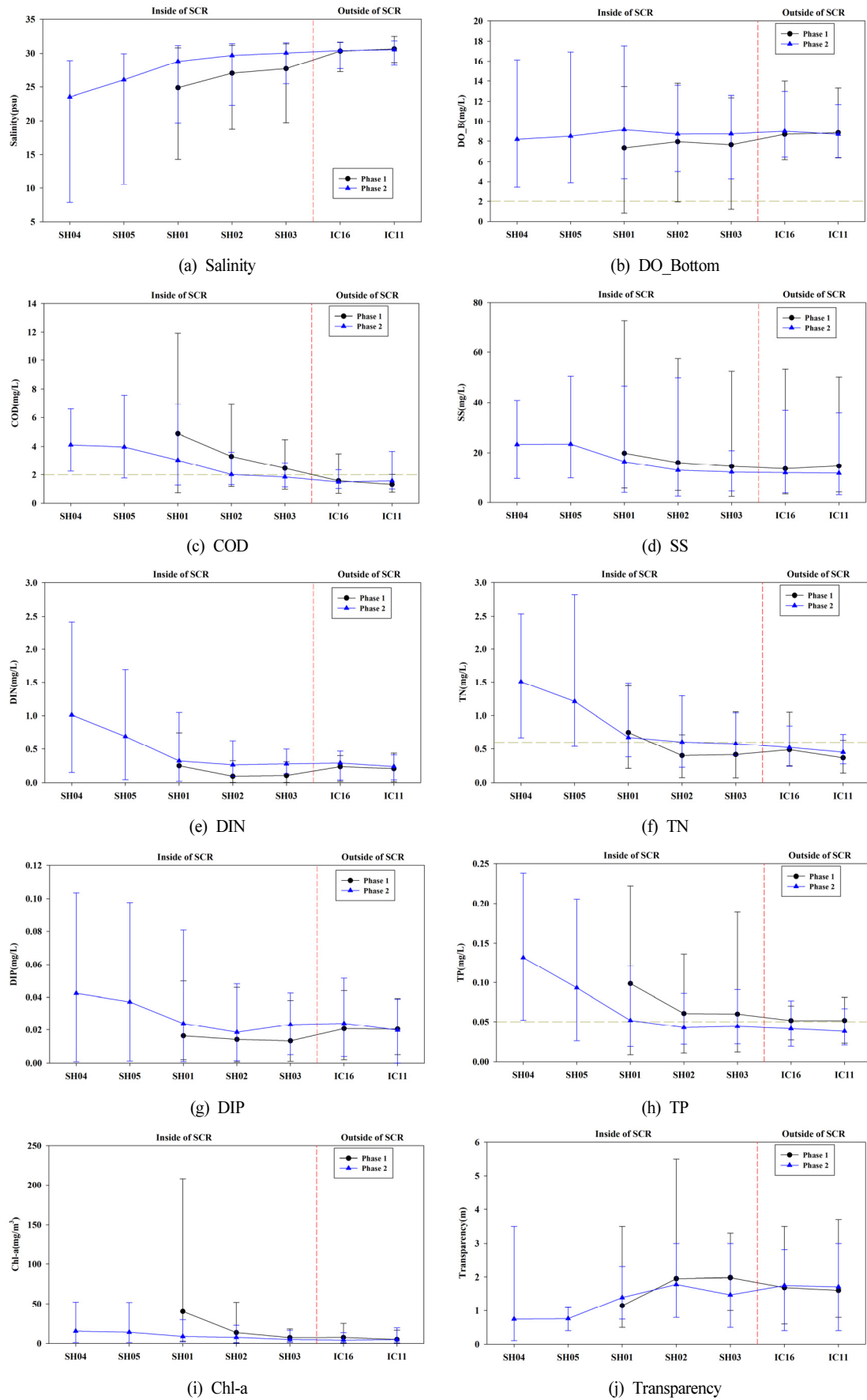


Fig. 3. Water quality changes within and outside of Shihwa coastal reservoir.

증가가 크지 않은 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 상대적으로 하류지역 및 외측에 비해 높은 농도를 나타낸 중류지역의 경우 해수유통량 증대에 따라 상대적으로 낮은 농도의 해수와 혼합작용 증대로 인해 항목에 따라 수질이 상대적으로 크게 개선되었거나 악화되지 않은 것으로 판단된다. 그러나 COD, TN 등 일부항목의 경우 해수유통량 증대에도 불구하고 가장 혼합이 잘 일어나는 방조제 근처의 주수로 지역에서도 외측에 비해 높은 농도 값을 나타내고 있어 해수유통량 증대만으로는 내측의 수질이 외측 수질과 동일한 수준으로 개선되지 않음을 보여주었다(Fig. 3(c) 및 (f)). 이는 해수유통량 증대 이후 수위의 변동 폭이 증가함에 따라 저수위 시 비교적 농도가 높은 육지 쪽의 해수가 방조제 부근까지 영향을 미쳤기 때문으로 판단된다.

이러한 일반 수질항목에 대한 변화는 Mann-Whitney 검정 (Table 3)을 이용한 통계적 유의성 평가결과에서도 확인할 수 있다. 즉, 해수 유통량 증대 이후 외측의 영향으로 농도가 증가한 DIN 및 TN의 경우 방조제와 가장 가까운 주수로 혼합 지역에서 유의한 변화가 나타났고, 농도가 감소한 TP, Chl-a의 경우 방조제와 떨어져 있지만 해수 순환이 가장 크게 증가한 중류지역(SH01)에서 유의한 변동이 있었던 것으로 나타났다. 이 같은 결과는 해수유통량 증가의 영향이 이전에 오염물질 농도가 방조제 근처 주수로 지역에 비해 상대적으로 높았고 해수 혼합이 원활하지 않았던 중류 지역에서의 수질변화가 가장 크게 나타남을 의미한다.

아쉽게도 시화호 내륙 근처지역의 경우(SH04 및 SH05) 해수유통량 증대 이전의 측정망 자료가 없어 해수유통량 증가 전후의 직접적인 수질변화 비교가 불가능하다. 하지만 해수유통량 증대 전후 수질분포 및 그 경향성을 볼 때 얇고 좁은 지형적 특성으로 인해 해수 혼합이 원활하지 않고 유역오염원의 영향을 직접 받는 내륙 근처의 수질개선 효과는 해수 혼합이 원활한 주수로 지역에 비해 매우 제한적인 것으로 판단된다. 실제 Ra et al. (2013)에 따르면 산업단지의 영향을 직접적으로 받는 내륙에 가까운 지역은 조력발전소 가동에 따라 저층 용존산소의 증가 등 일부 수질개선이 있었으나 유입오염원의 영향 등으로 인해 여전히 오염물질 농도가 높았음을

볼 수 있다. 또한 Lee, Hur et al. (2014)에 따르면 시화호 내륙 근처는 건기 시 인근 농촌지역 또는 산업단지지역으로부터 유입된 타생 유기물이 50% 이상 분포하고 있는 특성을 가지고 있어 유역오염원에 영향이 큰 것으로 조사되었다. 특히, 시화호 유역의 경우 2015년 기준 시화호 전체 하수처리장 방류량 중 약 97.8%를 차지하고 있는 안산 및 시흥하수처리장이 외해로 방류되고 있어 시화호 내부에 영향을 미치는 오염원 중 비점오염원에 대한 비중이 약 74.5%(2015년 COD 기준)로 높아 비점오염원에 대한 관리가 필요한 것으로 알려져 있다(MOMAF and Gyeonggido, 2017).

3.3 Water quality characteristics changes before and after operation of the tidal power plant

해수유통량 증대에 따른 수질특성 변화를 파악하기 위해 실시한 요인분석 결과 KMO 표본 적합도가 0.5 이상 (phase 1 0.552, phase 2 0.677)을 나타내어 사용된 자료가 요인분석에 적합한 것으로 나타났다(Kaiser, 1974). 요인분석 결과 해수유통량 증대 전후 모두 구성요소 4개가 고유값 1 이상을 나타내었으며(Fig. 4), 해수유통량 증대 전후 모두 70% 이상을 4개 구성요소(Phase 1 77.1%, phase 2 71.8%)가 요인을 설명하는 것으로 분석되었다.

요인분석 결과(Table 4)를 보면 해수유통량 증대 이전에는 제1요인으로 유기물과 일부 영양염류 등(투명도, TP, Chl-a, COD, Salinity), 제2요인은 영양염류(DIN, DIP, TN)로 분석되었다. 제3요인은 계절적 요인(DO, 수온, pH)이었으며, 제4성분은 SiO₂-Si, SS로 강우 시 많이 유입되는 입자성 물질과 규산규소 등으로 나타났다. 해수유통량 증대 이후에는 제1요인으로 영양염류(DIN, DIP, TN, TP), 제2요인은 계절적 요인(수온, 염분 등)과 자연적 영향을 크게 받는 영양염류와 유기물(SiO₂-Si, COD)로 나타났다. 제3요인은 계절적 요인(DO, pH, Chl-a)으로 분석되었으며, 제4요인의 경우 입자성 물질인 SS와 투명도로 나타났다. 해수유통량 증대 전후의 요인분석 결과를 비교해보면 해수유통량 증대에 따라 농도가 감소한 유기물과 Chl-a 등은 해수유통량 증대 전에는 제1요인에서 후에는 제2요인 및 제3요인으로 그 영향이 낮아진 것으로 분석되

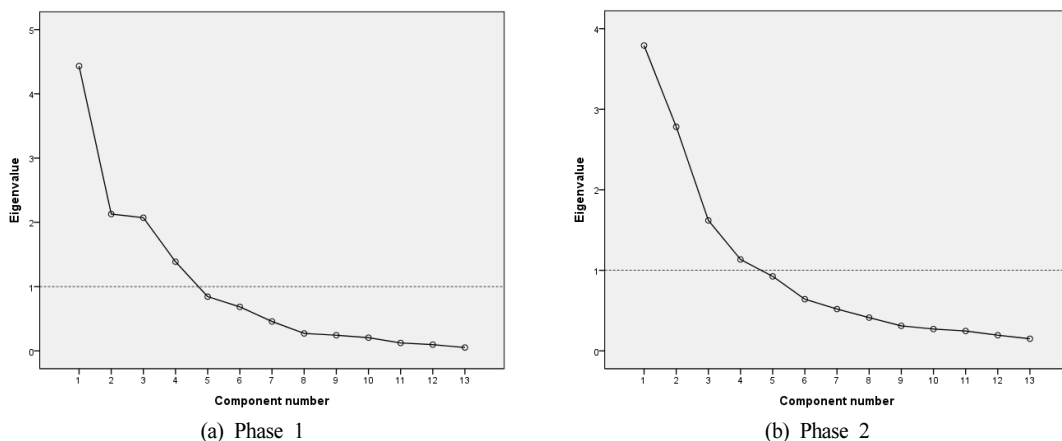


Fig. 4. Scree plot in the down area within SCR.

Table 4. Rotated component matrixes in the down area within SCR

| (a) Phase 1 | | | | | (b) Phase 2 | | | | |
|----------------------|-----------|-------|-------|-------|----------------------|-----------|-------|-------|-------|
| Parameters | Component | | | | Parameters | Component | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Transparency | -.861 | .086 | -.093 | -.103 | DIN | .894 | -.141 | -.017 | -.054 |
| TP | .848 | .205 | -.088 | .062 | DIP | .726 | .078 | -.466 | .080 |
| Chl-a | .809 | -.134 | .173 | -.009 | TN | .697 | .307 | .094 | .300 |
| COD | .741 | -.194 | .068 | .404 | TP | .528 | .446 | -.056 | .425 |
| Salinity | -.703 | .131 | .372 | -.155 | Temperature | -.062 | .856 | -.290 | .121 |
| DIN | -.096 | .856 | .307 | .144 | Salinity | .526 | .616 | .387 | -.017 |
| DIP | -.113 | .760 | -.202 | -.138 | SiO ₂ -Si | .405 | .596 | -.247 | .118 |
| TN | .627 | .634 | .081 | .011 | COD | -.186 | .576 | .526 | .362 |
| DO | .130 | .019 | .885 | -.113 | DO | -.058 | -.241 | .812 | .002 |
| Temperature | .519 | -.225 | -.734 | .069 | pH | -.027 | .051 | -.724 | .022 |
| pH | .331 | -.396 | .605 | .393 | Chl-a | -.325 | .263 | .554 | .519 |
| SiO ₂ -Si | -.006 | .259 | -.198 | .841 | SS | .184 | -.059 | -.019 | .821 |
| SS | .279 | -.270 | .099 | .777 | Transparency | -.064 | -.252 | -.021 | -.786 |

a. Rotation converged in 6 iterations

a. Rotation converged in 8 iterations

Extraction Method: Principal component Analysis

Rotation Method: Varimax with Kaiser Normalization

었다. 반면, 농도 값이 증가한 DIN, TN, DIP의 경우 제2요인에서 제1요인으로 그 영향이 더욱 증가한 것으로 분석되었다. 이는 해수유통량 증대 이후 시화호 수질에 영향을 미치는 주성분이 유기물 및 일부 영양염류에서 대부분의 영양염류(특히 용존무기영양염류)로 수질특성의 변화가 일어났음을 의미하므로 시화호 수질관리의 초점도 유기물 관리에서 영양염류의 관리로 전환할 필요가 있는 것으로 판단된다. 다만, 영양염류 영향의 증가는 상대적으로 높은 농도를 나타내었던 외측과의 해수유통량 증가가 주요 원인 중 하나이므로 시화호 내측의 영양염류 관리를 위해서는 외측과의 연계된 관리도 필요한 것으로 사료된다.

4. Conclusion

본 연구는 시화호 수질개선 대책의 일환으로 추진된 시화호 조력발전소 가동에 따른 해수유통량 증대가 수질에 미치는 영향을 파악하기 위해 장기간 수질측정 자료를 활용하여 통계적 접근방법으로 분석하였다.

시화호 해수유통량 증대 이후 외측의 해수의 영향이 공간적으로 차이는 있으나 시화호 전체로 확장되었으며, 혼합효과 증가로 인해 저층 빈산소 문제가 해결되었다. 그러나 시화호 내측 및 외측 수질항목별 수질 차이에 따라 개선 또는 악화되는 것으로 분석되어 해수유통량 증대를 통한 수질개선 효과를 보기 위해서는 호수 내외측에 대한 정밀한 수질분석을 통해 외측의 수질이 내측에 비해 현저히 양호한 상태에 경우에만 가능한 것으로 판단된다. 또한 해수유통량 증대 이후 사후 모니터링을 통한 수질특성 변화 분석을 통해 중점관리항목의 변화, 외측과의 연계 등 수질관리대책의 보완이 필

요한 것으로 사료된다. 해수유통량 증대로 인해 외측과의 희석효과가 증가가 발생하였더라도 오염원의 영향을 크게 받는 지역의 경우 수질개선 효과가 제약적으로 나타날 가능성이 있으므로 해수유통량 증대에 따른 수질농도 감소 효과를 유지하기 위해서는 오염원 관리는 필수적인 것으로 사료된다. 특히, 시화호 지역의 경우 대규모 하수처리장이 외측으로 방류되고 있어 비점오염원에 대한 영향이 큰 지역적으로 오염원 관리를 위해서는 비점오염원 관리(비점오염원 관리 지역 지정, 농업비점오염원 관리, 저영향개발 등)가 우선적으로 필요한 것으로 사료된다.

Acknowledgement

이 연구는 명지대학교 교원에게 부여되는 연구년 사업의 지원을 받았습니다.

References

- Bae, Y. H., Kim, K. O., and Choi, B. H. (2010). Lake Sihwa tidal power plant project, *Ocean Engineering*, 37(5), 454-463.
- Gale, E., Pattiaratchi, C., and Ranasinghe, R. (2006). Vertical mixing processes in intermittently closed and open lakes and lagoons, and the dissolved oxygen response, *Estuarine coastal and shelf science*, 69, 205-216.
- Hong, J. S., Jung, R. H., Seo, I. S., Yoon, K., Choi, B., and Yoo, J. W. (1997). How are the spatio-temporal distribution patterns of benthic macrofaunal communities affected by the construction of Shihwa dike in the west coast of Korea?.

- Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 30(5), 882-895. [Korean Literature]
- Kaiser, H. F. (1974). An index of factorial simplicity, *Psychometrika*, 39(1), 31-36.
- Kang, Y. S., Chae, Y., and Lee, H. R. (2013). Changes in sea water characteristics due to operation of Shihwa tidal power plant, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 25(4), 219-235. [Korean Literature]
- Kim, J. G., Kim, J. W., and Cho, E. I. (2002). The variation of water quality due to sluice gate operation in Shihwa lake, *Journal of the environmental sciences*, 11(12), 1205-1215.
- Kim, J. Y., Bhatta, K., Rastogi, G., Muduli, P. R., Do, Y., Kim, D. K., Pattnaik, A. K., and Joo, G. J. (2016) Application of multivariate analysis to determine spatial and temporal changes in water quality after new channel construction in the Chilika Lagoon, *Ecological Engineering*, 90, 314-319.
- Kim, M. and Koo, B. J. (2015). The intertidal area in Lake Sihwa after operation of the tidal power plant, *Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy*, 18(4), 310-316. [Korean Literature]
- Lee, C. H., Lee, B. Y., Chang, W. K., Hong, S., Song, S. J., Park, J., Kwon B. O., and Khim, J. S. (2014). Environmental and ecological effects of Lake Shihwa reclamation project in South Korea: A review, *Ocean & Coastal Management*, 102, 545-558.
- Lee, C. K. (2016). *Analysis of Flow characteristics during the operation of Sihwa tidal power plant*, Master's Thesis, Graduate School of Inha University. [Korean Literature]
- Lee, Y., Hur, J., and Shin, K. H. (2014). Characterization and source identification of organic matter in view of land uses and heavy rainfall in the Lake Shihwa, Korea, *Marine pollution bulletin*, 84(1), 322-329.
- Mann, H. B. and Whitney, D. R. (1947). On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other, *The annals of mathematical statistics*, 50-60.
- Ministry of Environment (ME). (1996). *A comprehensive water quality management measures of Shihwa coastal reservoir*, Ministry of Environment. [Korean Literature]
- Ministry of Maritime Affairs and Fishery (MOMAF). (2001). *The 1st phase Shihwa environmental management master plan*, Ministry of Maritime Affairs and Fishery. [Korean Literature]
- Ministry of Maritime Affairs and Fishery (MOMAF) and Gyeonggi-do. (2017). *The 2nd phase total pollution load management system master plan of Shihwa coastal reservoir*, Ministry of Maritime Affairs and Fishery, and Gyeonggi-do. [Korean Literature]
- Philips, E. J., Love, N., Badylak, S., Hansen, P., Lockwood, J., John, C. V., and Gleeson, R. (2004). A comparison of water quality and hydrodynamic characteristics of the Guana Tolomato Matanzas national estuarine research reserve and the Indian river lagoon of Florida, *Journal of Coastal Research*, 93-109.
- Ra, K. T., Kim, J. K., Kim, E. S., Kim, K. T., Lee, J. M., Kim, S. K., Kim, E. Y., Lee, S. Y., and Park, E. J. (2013). Evaluation of spatial and temporal variations of water quality in lake Shihwa and outer Sea by using water quality index in Korea: A case study of influence of tidal power plant operation, *Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy*, 16(2), 102-114. [Korean Literature]
- Schallenberg, M., Larned, S. T., Hayward, S., and Arbuckle, C. (2010). Contrasting effects of managed opening regimes on water quality in two intermittently closed and open coastal lakes, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 86(4), 587-597.
- Shihwa Coastal Reservoir Management Committee (SCRMC). (2007). *The 2nd-phase of Shihwa environmental management master plan*, Shihwa Coastal Reservoir Management Committee. [Korean Literature]
- Wijnhoven, S., Escaravage, V., Daemen, E., and Hummel, H. (2010). The decline and restoration of a coastal lagoon (Lake Veere) in the Dutch Delta, *Estuaries and Coasts*, 33(6), 1261-1278.
- Ysebaert, T., van der Hoek, D. J., Wortelboer, R., Wijsman, J. W., Tangelder, M., and Nolte, A. (2016). Management options for restoring estuarine dynamics and implications for ecosystems: A quantitative approach for the Southwest Delta in the Netherlands, *Ocean & Coastal Management*, 121, 33-48.