조력발전소의 주기적 방류로 인한 인근 연안 해역 성층 형성 기작

김명환[1], 김종욱[2], 김기환[1], 우승범[1*]
[1]인하대학교 해양과학과
[2]인하대학교 인공지능융합연구센터
* 연락처: 김명환(mhkim980126@gmail.com), 우승범*(sbwoo@inha.ac.kr)

Introduction

- 시화 해역은 시화호 조력발전소에 의한 주기적인 방류가 영향을 미치는 대표적인 연안 해역으로서, 발전소 방류는 발전과 배수 두 단계로 구분된다
- 주로 현장 조사를 통해 발전소 방류로 인한 시화 해역의 염분 변동성 분석이 지금까지 수행되었으며, 공간적인 자료 부족으로 자세한 성층 형성 위치나 발생 기작에 대한 분석은 제한적이었다.
- 본 연구에서는, 검증된 수치모델을 사용하여 조력발전소의 주기적인 방류가 시화 인근 해역의 성층 형성 기작에 어떠한 영향을 미치는지 파악하고자 하였다.

Methodology

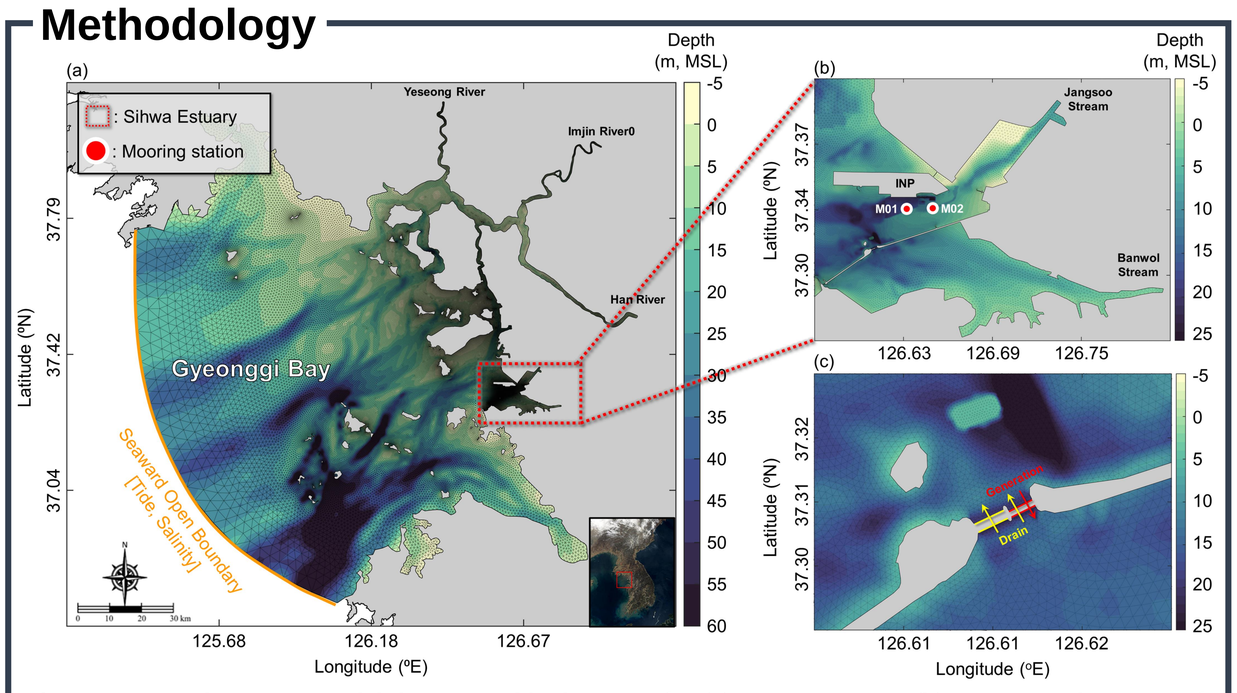


Figure 1. Map showing a model domain and bathymetry for (a) Gyeonggi Bay, (b) near coastal regions of the Sihwa tidal power plant (Sihwa TPP), and (c) sluice gates of Sihwa TPP. In (b), red circles indicate mooring stations (M01 and M02) located south part of the Incheon North Port (INP). The red and yellow lines in (c), represent the location of sluice gates and hydraulic turbine gates, respectively. Flow direction of each discharge stage of the Sihwa TPP is described by the yellow and red arrows in (c).

Table 1. Model configurations

Numerical model	Compositions	Configuration
Finite Volume Community Ocean Model (FVCOM)	Grid information	Triangular unstructured grid
	Grid resolution	9 – 4,500 m
	Bathymetry	Korea Hydrographic and Oceanographic Agency (KHOA)
	Freshwater runoff	WAter resource Management Information System (WAMIS)
	Tidal forcing	TPXO9-atlas (M_2, S_2, K_1, O_1, and N_2)
	Simulation period	2022/03/20~2020/04/30 (initial 10 days for spin-up)

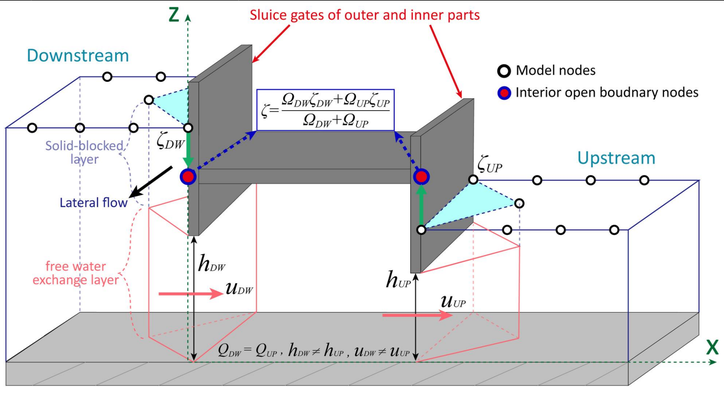


Figure 2. Schematic representation for water exchange process of the sluice gate. Orifice flow velocity was calculated by water level difference between upstream and downstream (Kim and Woo, 2023).

- **Stratification index: gradient Richardson number (Ri_g)**

$$Gradient\ Richardson\ number\ (\mathrm{Ri_g}) = \frac{buoyancy\ frequency^2}{vertical\ velocity\ shear^2} = \frac{\sqrt{(g/\rho_0)\times(\partial\rho/\partial z)}^2}{(\partial u/\partial z)^2+(\partial v/\partial z)^2}$$

g: $gravitational\ acceleration\ (m\ s^{-2})$
ρ: $density\ (kg\ m^{-3})$
u, v: horizontal velocity $(m\ s^{-1})$
z: depth (m)

- 유체의 수직적인 혼합 정도 (무차원 수) $\mathbf{\log_{10}(Ri_g/0.25) \geq 0}$ ➔ 성층 형성 / $\mathbf{\log_{10}(Ri_g/0.25) < 0}$ ➔ 수직 혼합

Validations

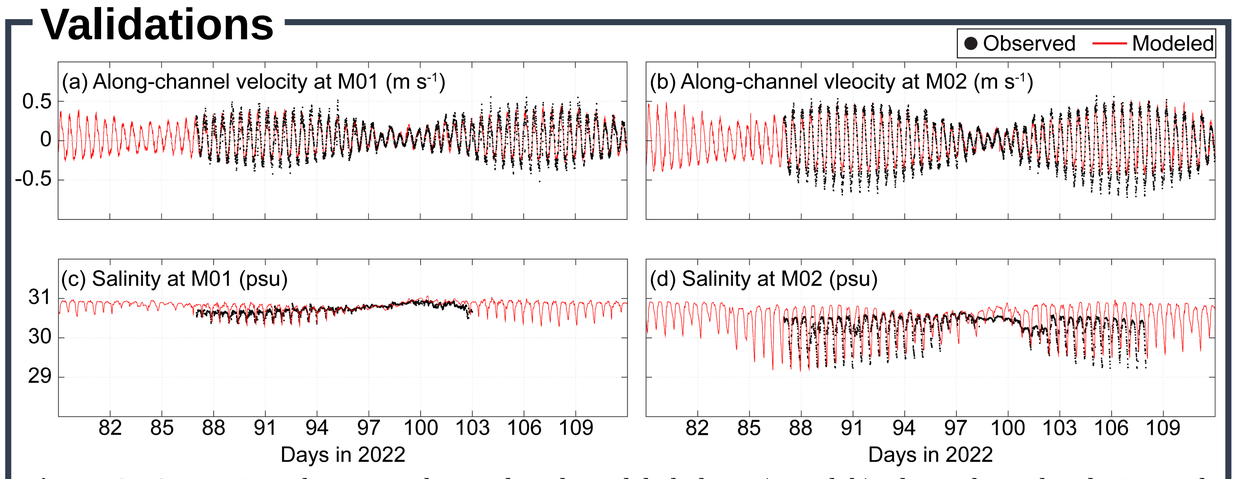


Figure 3. Comparison between observed and modeled data: (a and b) along-channel velocity and (c and d) salinity at 1.5 m above the bed (mab). Black dots and red lines indicate observed and modeled data, respectively.

Table 2. Model assessment

Variable	Period	Skill M01	Skill M02
Along-channel velocity (m s^{-1})	03/30 ~ 04/15 in 2022	0.93	0.96
Salinity (psu)	03/30 ~ 04/14 in 2022	0.77	0.73

- **Index of agreement : Skill**

M_n: $modeled\ data$
O_n: $observed\ (obs.)\ data$
$\bar{O}$: $time\ averaged\ obs.data$

$$Skill = 1 - \frac{\sum(M_n - O_n)^2}{\sum(|M_n - \bar{O}| + |O_n - \bar{O}|)^2}$$

Skill : 관측 값에 대한 모델 결과의 일치도 (0–1)

Results

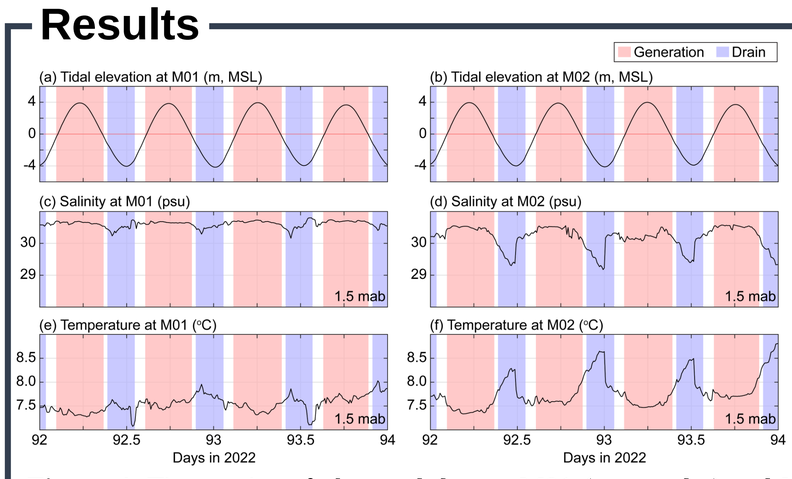


Figure 4. Time series of observed data at M01 (a, c, and e) and M02 (b, d, and f) during spring tide: (a and b) tidal elevation, (c and d) near-bed salinity, and (e and f) near-bed temperature.

[염분 및 수온 변동]
: 주기적 염분 및 수온 변동 (≤1 psu and 0.8 °C)

: 변동 폭(M01 < M02)
➔ 담수 영향(반월천<장수천)

시화 해역 내,
급격한 염분 및 수온 변동 발생

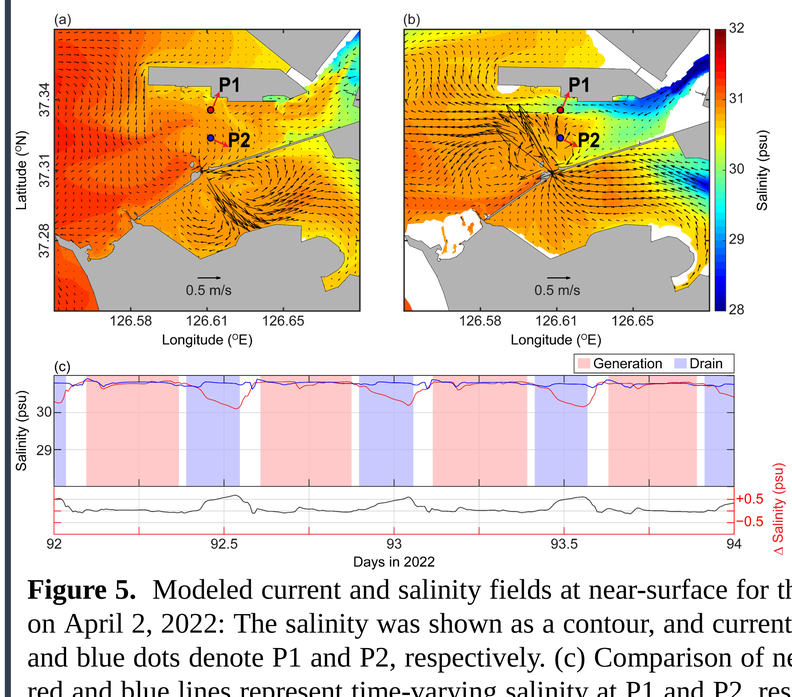


Figure 5. Modeled current and salinity fields at near-surface for the (a) generation and (b) drain phase on April 2, 2022: The salinity was shown as a contour, and current velocity was shown as vectors. Red and blue dots denote P1 and P2, respectively. (c) Comparison of near-surface salinity at P1 and P2: the red and blue lines represent time-varying salinity at P1 and P2, respectively. In (c), black line indicates difference of near-surface salinity between P1 and P2 (P2−P1).

[염분 수평경사]
:창조 (발전소 발전 단계)
➔ 외해 기원 고염수 유입 (>30 psu)
➔ 수평적 염분 차이 **약화**

:낙조 (발전소 배수 단계)
➔ 장수천 담수 유입
➔ 시화호 기원 고염수 유입 (>30 psu)
➔ 해역 북측으로의 **담수 집중**

낙조 시,조력발전소 배수에 의해
수평적 염분 경사 발생

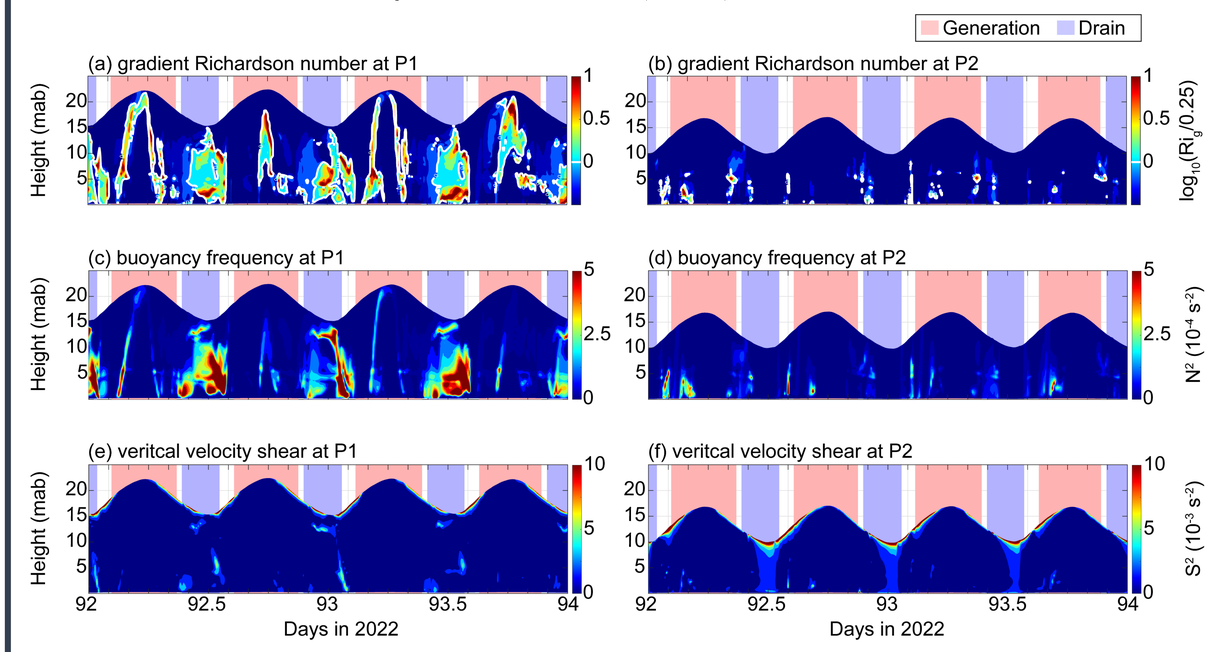


Figure 6. Time series of vertical profiles at P1 (a, c, and e) and P2 (b, d, and f). The ratio of (c and d) squared buoyancy frequency (N^2) and (e and f) squared vertical velocity shear (S^2) is used to produce (a and b) gradient Richardson number (Ri_g) during spring tide. White lines in (a and b) indicate critical Ri_g value for density stratification.

[시화호 조력발전소가 성층에 미치는 영향]
- 북측 해역 (P1)
  : 조력발전소 영향↓ ➔ 수직 밀도경사↑ (담수 유입 O) & 수직 유속경사↓ ➔ 수직 혼합↓
- 남측 해역 (P2)
  : 조력발전소 영향↑ ➔ 수직 밀도경사↓ (담수 유입 X) & 수직 유속경사↑ ➔ 수직 혼합↑

시화 해역 남측: 조력발전소 방류 ➔ 수직 혼합 ↑ ➔ 성층 형성 X

Summary and Conclusions

- 조력발전소 방류에 의해 시화 해역 남측으로의 **담수 유입이 차단**되고, **수직적인 혼합은 증가**되며 **성층 형성이 제한**된다.
- 반면에, 낙조 시 **담수 유입이 집중**되는 해역 북측의 경우, **수직 밀도경사가 증가**되며 비교적 **강한 성층이 발생**된다.
- 따라서, **조력발전소의 주기적인 방류**는 해역에서의 **성층 형성 위치 및 강도에 영향**을 미치며, 이는 해역의 오염물질 또는 퇴적물의 이동 특성 파악에 중요한 역할을 할 수 있다.

※ 이 연구는 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2022-00155915, 인공지능융합혁신인재양성사업 (인하대학교)). 이 연구는 2023년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(20220051, 경기·인천씨그랜트).