

## 조력발전소 가동에 따른 시화 해역의 해수특성 변화 Changes in Sea Water Characteristics Due to Operation of Shihwa Tidal Power Plant

강영승\* · 채영기\* · 이형래\*\*

Young Seung Kang\*, Yeongki Chae\* and Hyung Rae Lee\*\*

**요 지 :** 시화조력발전소 가동에 따른 인근 해역의 해수특성 및 성층변화를 파악하기 위하여 3차원 수치모델을 이용하였다. 여름철의 경우, 하천을 통해 유입되는 담수의 영향으로 인해 시화호 내측의 밀도는 수온보다는 염분에 의해 더 영향을 받는다. 조력발전소 가동 전에 호 내측에서는 외해에 비해 상대적으로 고온, 저염의 해수특성을 보이는 반면에 조력발전소 가동 시에는 호 내측의 수온이 소폭 낮아지고 염분이 증가하는 경향을 보인다. 또한 조력발전소 가동 시 해수의 유입·유출이 활발해짐에 따라 혼합효과의 증대로 인해 시화호의 밀도는 증가하고 성층은 약화되는 것으로 나타났다.

**핵심용어 :** 밀도성층, 조력발전소, 시화호

**Abstract :** In order to investigate the changes in sea water characteristics and stratification due to operation of Shihwa tidal power plant, three dimensional numerical model is used. In summer, the density of inner part of Shihwa Lake is more affected by salinity than water temperature due to fresh water discharge. Before tidal power plant operation, the sea water characteristics in Shihwa Lake shows relatively high temperature and low salinity. After tidal power plant operation, water temperature decreases slightly and salinity tends to increase in Shihwa Lake. Also, density increases and stratification tends to weaken by mixing with sea water.

**Keywords :** density stratification, tidal power plant, Shihwa Lake

### 1. 서 론

시화호는 경기도 시흥시와 안산시, 화성시에 둘러싸인 인공호수로 1994년 1월에 12.7 km의 시화방조제 공사가 완료되었다(Korea Water Resources Corporation, 1998). 방조제 완공 이후 시화호 유역의 산업단지에서 배출되는 점오염원 및 농경지 등에서 배출되는 비점오염원의 유입과 더불어 외해수와 호 내측의 해수교환이 제한됨에 따라 호내측의 증감속 및 수질오염이 가속화되었다(KORDI, 1997). 이와 같은 일련의 문제를 해결하고자 1997년부터 해수를 유통시켰고 2000년 12월에 시화호의 담수화를 포기하고 해수화를 확정된 후, 2011년에 조력발전소가 완공되어 현재 가동 중에 있다.

시화호는 공단의 배수로와 하천으로부터 담수가 유입되고 조력발전소 가동으로 인해 외해로부터 해수가 호 내측으로 유입되는 반폐쇄형 하구(estuary)의 형태를 나타내고 있다. 담수가 유입되는 하구역은 수평방향의 염분구배에 의해 저층에서는 외해에서 연안 방향으로 경압력(baroclinic force)이 작용하고, 표층에서는 연안의 하천에서 외해쪽으로 순압력(barotropic force)이 작용하는 2층 순환구조(two-layer circulation)가 형성된다.

하구에서 해수의 순환과 혼합작용은 담수와 해수의 상호작용에 의한 밀도차에 기인하는데 보통 수온의 영향 보다는 염분의 영향이 더 크게 작용하며, 생물학적, 화학적 그리고 퇴적작용에 영향을 준다(Dyer, 1973). 하구에서 바람, 조류, 해저면 마찰 등은 성층을 약화시키는 반면 일사량, 담수유입, 강수 등은 성층을 강화시키는데 이러한 요인들의 상호작용으로 인해 밀도성층의 변화가 나타난다(Kim et al., 2006). 시화호는 이와 같은 자연적인 요인 이외에도 인공적인 구조물의 설치 이후에 급격한 환경변화를 일으켰다. 물막이 공사 후 담수호 시기에 6 m 이심에 갇혀 있던 저층해수로 인해 수직적으로 강한 염분 의존형 밀도성층에 의한 2층 구조가 형성되었고, 여기에 시화호로 유입되는 막대한 양의 유기물질로 인해 시화호의 저산소 및 무산소 환경을 가속화시킨 것으로 보고된 바 있다(Park et al., 1997).

한편, 1997년 7월부터 갑문을 통해 해수유통이 시작되었는데 Choi et al.(2000)은 해수유통 이전인 1997년 2월부터 해수유통 이후인 1998년 7월까지 총 33회에 걸쳐 시화호 내측 11개 정점에서 장기 관측한 수온, 염분자료를 이용하여 배수갑문 운용에 따른 시화호의 물성변화를 파악하였다. 그 결과에

\*(주)전략해양(Corresponding author: Young Seung Kang, Ocean Research and Strategy Corporation, Seoul 153-706, Korea. Tel: +82-70-8650-4730, Fax: +82-2-862-7568, yskang@oceanrms.com)

\*\*서울대학교 해양연구소(Research Institute of Oceanography, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea)

의하면 해수유통이 없었던 시기에는 11 m 수심을 경계로 염분에 의한 강한 성층이 관측되었으나, 해수유통 이후에는 성층이 크게 약화된 것으로 보고된 바 있다. 이렇게 갑문을 통해 해수교환이 이루어지면서 성층이 약화되었지만 여전히 계절적 요인에 의해 시화호는 강한 성층이 형성되고 있으며, 특히 여름철에 저층에서 활발한 유기물 분해로 인해 빈산소층이 형성되는 것으로 보고되었다(Jang et al., 2011; Park et al., 2003).

기존의 연구들은 대부분 관측자료를 이용하여 시화호 내측에서 형성되는 성층에 대한 정성적인 연구가 이루어졌으나 본 연구에서는 계절별 수온, 염분 등 관측자료를 이용하여 검증된 수치모델을 통해 시화호의 해수흐름과 밀도성층 범위에 대해 보다 정량적인 해석을 시도하였다. 또한 조력발전 상황을 모의함으로써 조력발전소 가동으로 인한 해수유통의 변화와 밀도성층의 변화를 분석하였다. 시화호로 유입되는 담수의 영향을 보다 정밀하게 고려하기 위해 유역모델로 산정한 계절별 유량 자료와 인천기상대와 수원기상대의 기상자료(Korea Meteorological Administration, <http://www.kma.go.kr>)를 활용하여 시화호 해역의 해수순환을 재현하고, 조력발전소 가동으로 인한 물리적 특성변화를 분석하였다.

## 2. 자료 및 연구방법

### 2.1 자료

연구해역에 대한 수심과 조석 및 조류자료, 수온 및 염분자료, 하천유량 등의 관측자료를 수집하여 모델의 입력자료와 보정 및 검정을 위한 자료로 이용하였다(Fig. 1). 모델에 입력한 수심은 국립해양조사원에서 간행한 해도와 시화호에서 측량한 수심자료를 이용하였다(Fig. 2와 Fig. 3). 모델 입력자료의 기준년도는 2010년으로 하여 가용한 자료를 수집하여 사용하였다.

해수유통모델의 개방경계와 보정 및 검정을 위한 관측자료는 인근 해역의 조석 4개 정점(PT1, PT2, PT3, T1)과 조류 4개 정점(PC1, PC2, PC3, PC4) 자료를 이용하였다(Fig. 2와 Table 1).

조석은 인천(PT1), 안산(PT2), 평택(PT3)의 고정 조위관측소에서 2010년에 관측한 자료와 시화방조제(T1, 2002.4~2003.4)에서 기존에 관측한 자료를 이용하였다. 조류는 시화방조제 전면 수로에서 2009년 12월과 2010년 1월에 3개점(PC1, PC2, PC3)에서 관측한 중층유속 자료와 송도신도시 인근 해역에서 기존에 관측한 층별유속 자료(PC4, 2004.12~2005.1)를 이용하였다.

수온 및 염분자료는 시화호 해양환경개선사업(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2010)에서 관측한 시화호 내측자료(Fig. 3)와 국가해양환경측정망 자료 중 인천, 아산, 가로림 연안 자료를 이용하여 초기조건을 구성하였다. 개방경계의 수온과 염분은 연안정지관측 자료 중 소청도와 선미도의 일 관측자료와 정선해양관측 자료 중 307 line의 3번 정점의 연직자료를 이용하여 연간 일 자료를 적용하였다

(National Fisheries Research and Development Institute, <http://portal.nfrdi.re.kr>). 또한, 하천경계는 한강, 임진강, 예성강과 시화호 내측 21개 소하천을 고려하였는데, 한강의 유량은 행주대교, 임진강의 유량은 적성지역의 2010년 자료를 각각 적용

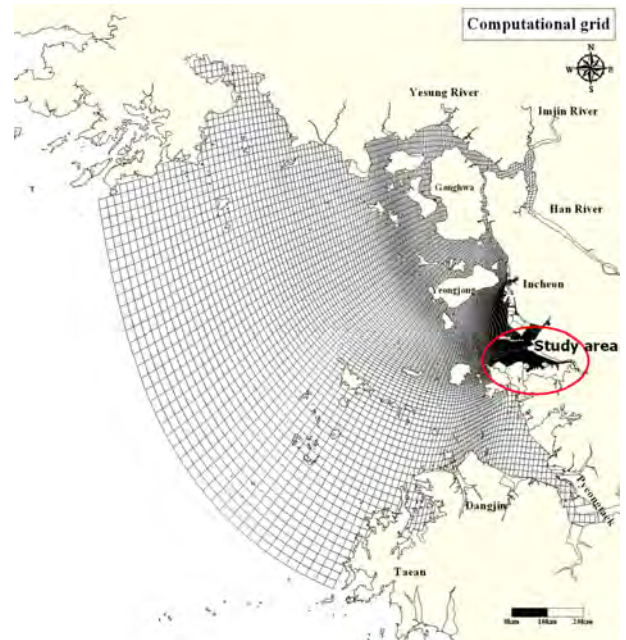


Fig. 1. Computational grid system of model domain.

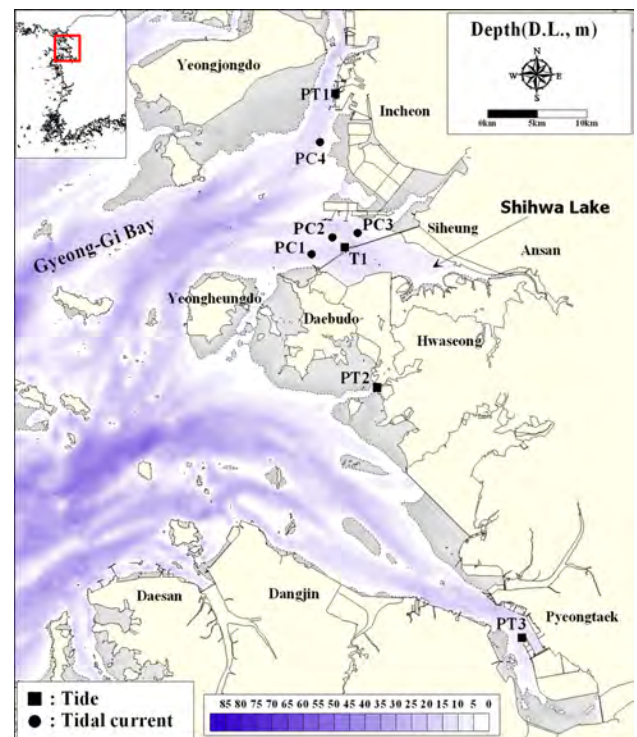


Fig. 2. Bathymetry of the study area in Gyeong-Gi Bay. Squares and circles represent observation points of tide and tidal current respectively.

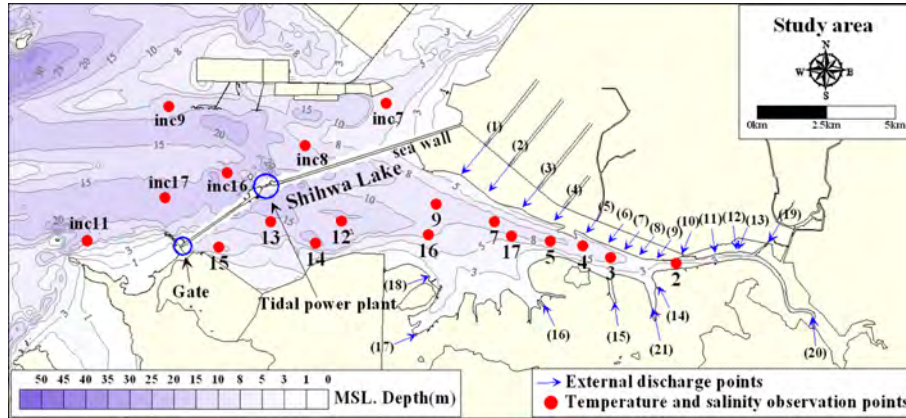


Fig. 3. Detailed depth contour and observation points of temperature and salinity around Shihwa Lake.

Table 1. Observed tide and tidal current stations

	Station	Location(WGS-84)	Observation period
Tide	PT1	37-27-07 N 126-35-32 E	2010.01.01 ~2010.12.31
	PT2	37-11-32 N 126-38-52 E	2010.01.21 ~2010.12.31
	PT3	36-58-00 N 126-49-21 E	2010.01.01 ~2010.12.31
	T1	37-18-42 N 126-36-36 E	2002.04.25 ~2003.04.25
Tidal current	PC1	37-18-26 N 126-34-15 E	2009.12.17 ~2010.01.03
	PC2	37-19-23 N 126-35-38 E	2010.01.03 ~2010.01.17
	PC3	37-19-40 N 126-37-20 E	2009.12.17 ~2010.01.03
	PC4	37-24-32 N 126-34-36 E	2004.12.22 ~2005.01.10

Table 2. Fresh water discharge points flows into Shihwa Lake

No.	Name
(1)	Shihwa Industrial Complex #1 main water way
(2)	Shihwa Industrial Complex #2 main water way
(3)	Shihwa Industrial Complex #3 main water way
(4)	Shihwa Industrial Complex #4 main water way
(5)	Shingil river
(6)	Banwol Industrial Complex #7 outfall
(7)	Banwol Industrial Complex #6 outfall
(8)	Banwol Industrial Complex #5 outfall
(9)	Banwol Industrial Complex #4 outfall
(10)	Banwol Industrial Complex #3 outfall
(11)	Banwol Industrial Complex #2 outfall
(12)	Banwol Industrial Complex #1 outfall
(13)	Banwol Industrial Complex drainage
(14)	Tidal flat 1
(15)	Tidal flat 2
(16)	Tidal flat 3
(17)	Tidal flat 4
(18)	Tidal flat 5
(19)	Ansan-Hwajung stream
(20)	Banwol-Donghwa-Samhwa stream
(21)	Munsan stream

하였다. 예성강의 유량은 임진강의 유량에 유역면적비를 적용하여 환산하였으며, 유입되는 모든 하천의 염분은 0psu로 입력하였다. 한강, 임진강, 예성강의 담수 유입시 적용한 수온 자료는 환경부의 월별 하천수 수질현황 자료를 이용하였다.

시화호 내측으로 유입되는 하천 자료는 유역모델로 산정된 21개 지점의 유량을 입력하였다. 시화호 내측으로 유입되는 각 하천은 Table 2에 정리하였고, 하천의 위치와 유역모델을 통해 산정한 유량은 Fig. 3과 Fig. 4에 각각 제시하였다.

표층경계 조건으로 입력하기 위해 인천기상대와 수원기상대에서 2010년의 매 시간 기상자료 및 바람자료를 수집, 분석하였다. 기온, 운량, 기압, 상대습도, 강우량, 태양복사에너지 등은 인천기상대와 수원기상대의 자료를 평균하여 모델에 입력하였으며, 풍향, 풍속 등의 바람자료는 인천기상대의 자료를 사용하였다(Fig. 5).

## 2.2 연구 방법

시화호 해역의 해수유동특성을 재현하기 위해 사용한 모델은 EFDC(Environmental Fluid Dynamics Code)로 모델의 설명은 Hamrick(1992)에 자세하게 제시되어 있다. EFDC를 활용한 연구결과로는 해수와 담수의 혼합과 성층현상 모의(Kang et al., 2011; Kim et al., 2008), 새만금 방조제 완공 후 유동 및 수질모의(Suh et al., 2010), 광양만의 수질모의(Park et al., 2005), 남해안의 조위 및 조류 모의(Kwon and Kang, 2007), 한강하구 및 염하수로의 순 수송량 모의(Yoon and Woo, 2012) 등이 있다.

모델의 계산영역은 시화호를 포함하여 동서방향으로 139.3 km, 남북방향으로 150.2 km로 설정하였고 수평방향으로는 80~2,400 m의 직교곡선격자체계(orthogonal curvilinear grid system)를 채택하여 해안선과 지형을 모델에 재현하였다(Fig. 1). 연직방향으로는 5개의 sigma층으로 설정하였고, 모델의 초기조건은 해수의 흐름이 없는 상태(cold-start)로 하였으며 모델의 외해경계조건은 NAOJ(National Astronomical Observatory of Japan)의 NAO.99Jb(Matsumoto et al., 2000)로부터 유도된 조석의 주요 4개 분조( $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ )를 합성한 조위를 경계면에 부여하였다.



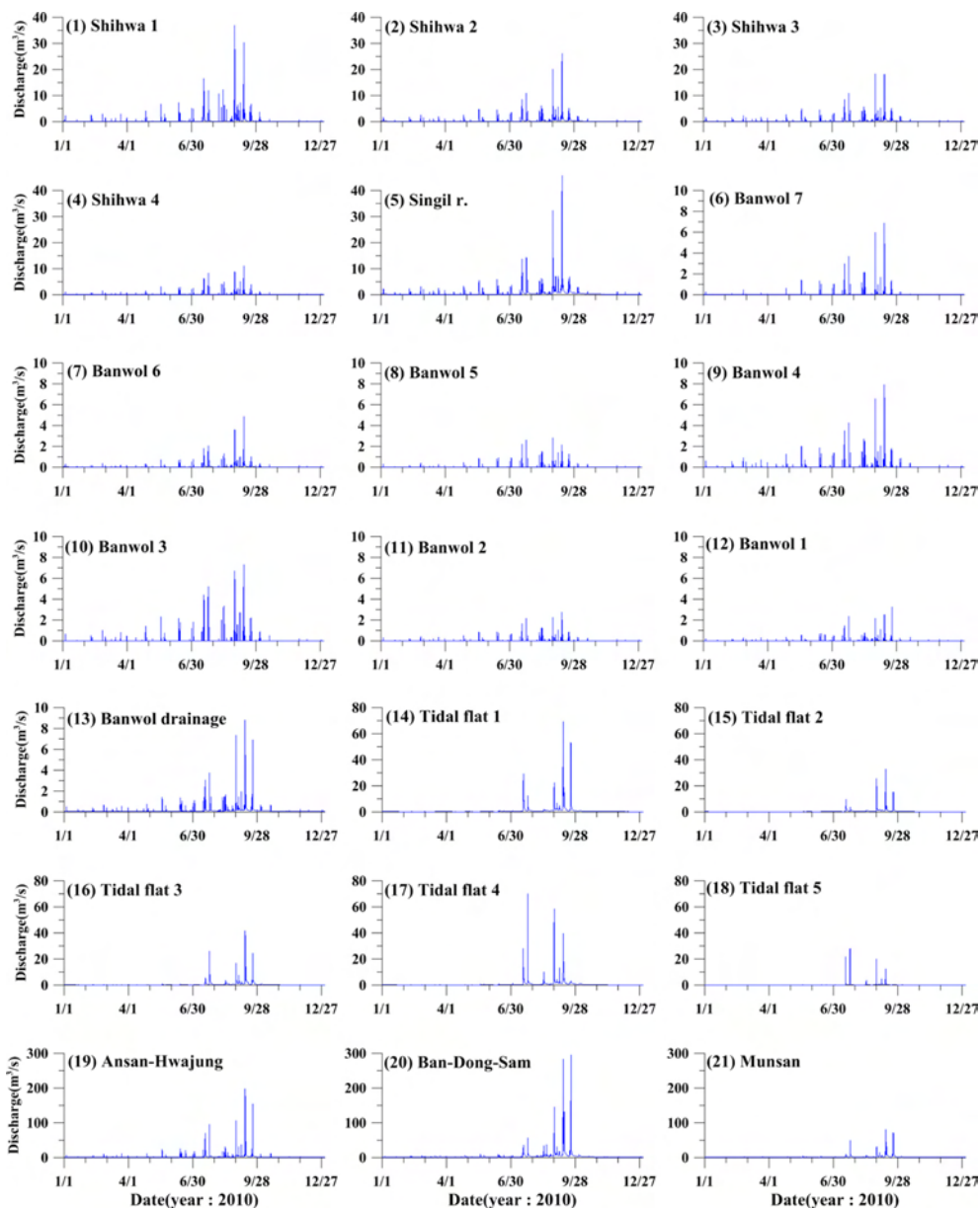


Fig. 4. Fresh water discharge into Shihwa Lake.

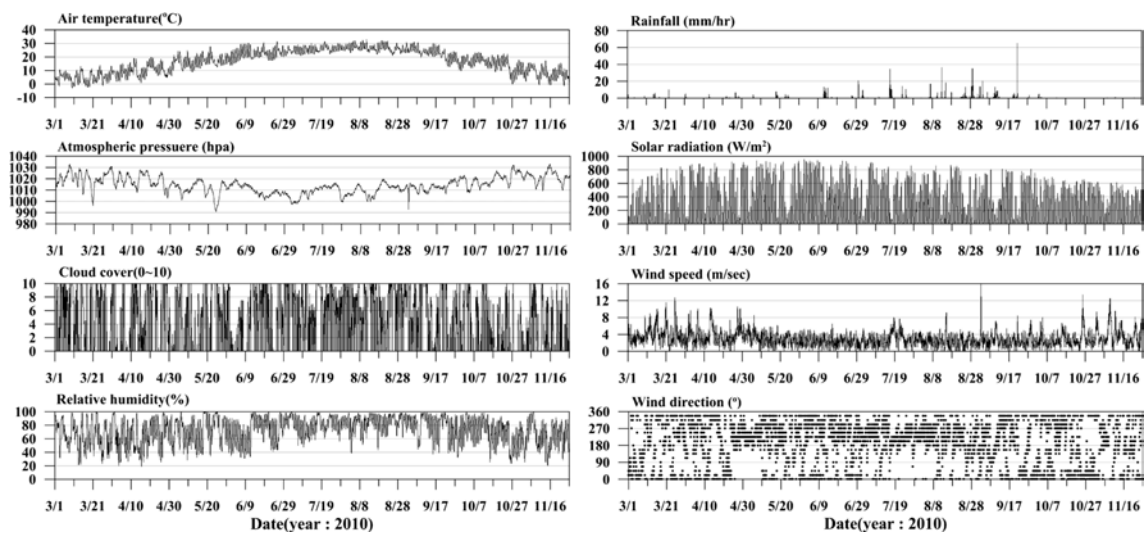


Fig. 5. Time series of meteorological data.

Table 3. Model simulation cases

Case	Contents
Case N	validation (conditions in 2010)
Case A	prediction (with tidal power plant in operation)

수치모델 실험안은 조력발전소가 가동되지 않은 상황인 2010년 관측자료를 기준으로 시화호 해역 현황(Case N)과 조력발전소 가동상황(Case A)으로 구성하였다(Table 3). 모델실험은 2010년 4월부터 11월까지 8개월간 계산하였다.

조력발전소 비가동시에는 시화호 남서측에 위치한 기존 갑문을 통해 해수가 유통되고, 조력발전소 가동시에는 기존갑문과 시화방조제 중앙에 건설된 조력발전소의 수문과 수차를 통해 해수가 유통된다.

시화호 기존 갑문은 8대로 구성되어 있고, 조력발전소는 10대의 수차와 8대의 수문으로 각각 구성되어 있다. 시화조력발전소의 운영은 낙조시 수문, 수차, 기존 갑문을 통해 배수하고 창조시 수차를 통해 낙차를 이용한 단류식 발전 방식으로 운영된다. 시화호 내측의 유지관리 수위는 평균해면(M.S.L.) 하 1.0m이며, 시화방조제 기존 갑문과 시화조력발전소 운영계획에 따른 유량특성식은 아래에 제시하였다(Korea Water Resources Corporation, 2005). 유량특성식에 따른 통과유량(수차, 수문 및 기존갑문)을 시화방조제 내측과 외측의 수위차 조건에 따라 모델 내부에서 방조제 내측 또는 외측 방향으로 이동하도록 적용하였다.

- (1) 시화방조제 기존 갑문의 유량 특성식(수문 1대당)  
시화방조제 기존 갑문의 유량특성식은 다음과 같다.

$$Q = C \times B \times H_2 \times (2g\Delta H)^{0.5}$$

여기서,

$Q$ : 해수 유입 · 출입량( $m^3/s$ )

$C$ : 유량계수(0.8),  $B$ : 갑문폭(12 m)

$H_2$ : 외수위(시화호측 바닥 기준, m)

$g$ : 중력가속도( $m/s^2$ )

$\Delta H$ : 수두차(|내수위-외수위|, m)이다.

- (2) 시화조력 수차의 유량 특성식(수차 1대당)

시화조력 수차의 발전시 및 방류시의 터빈 특성식을 제시하였다.

가. 발전시 터빈 특성식

$$\begin{aligned} Q &= 0 & (0.00 < \Delta H < 1.07) \\ Q &= 150.433 \times \Delta H + 113.248179 & (1.07 \leq \Delta H < 1.95) \\ Q &= 18.1077 \times \Delta H + 371.3606 & (1.95 \leq \Delta H < 5.69) \\ Q &= 1767.8881 - 346.5186 \times \Delta H + 20.9571 \times \Delta H^2 & (5.69 \leq \Delta H < 7.43) \end{aligned}$$

나. 방류시 터빈 특성식(수차 1대당)

$$\begin{aligned} Q &= 800 \times \Delta H & (0.00 < \Delta H < 0.05) \\ Q &= 600 \times \Delta H + 10 & (0.05 \leq \Delta H < 0.10) \\ Q &= 250.0 \times \Delta H + 45 & (0.10 \leq \Delta H < 0.30) \\ Q &= 59.56939963 + 231.1052218 \times \Delta H - 94.5018523 \times \Delta H^2 \\ &\quad + 26.29460961 \times \Delta H^3 - 2.754795024 \times \Delta H^4 & (0.30 \leq \Delta H < 2.50) \end{aligned}$$

- (3) 시화조력 수문의 유량 특성식(수문 1대당)

시화조력 수문의 유량특성식은 다음과 같다.

$$Q = 839 \times \Delta H^{0.3855}$$

### 3. 수치모델의 검증

모델의 검정을 위하여 조위 4개 정점(PT1, PT2, PT3, T1)과 조류 4개 정점(PC1, PC2, PC3, PC4), 그리고 시화호 내측과 외측을 포함한 시화방조제 인근 18개 정점(Fig. 3)에서 계절별로 관측된 수온 및 염분에 대한 모델 결과가 관측자료의 변동 특성을 잘 재현하도록 반복실험을 수행하였다.

조석의 검정은 관측된 조석의 조화상수와 계산 결과의 조화상수를 비교하였으며 모델의 정확도를 정량적으로 평가하기 위해 절대상대오차(Absolute Relative Error)와 평균오차(Mean Error)를 산정하였다.

$$ARE = \left| \frac{X_{modeled} - X_{observed}}{X_{observed}} \right| \times 100(\%) \quad (1)$$

$$ME = X_{modeled} - X_{observed} \quad (2)$$

각 정점에 대한 조석검정 결과,  $M_2$ 분조,  $S_2$ 분조,  $K_1$ 분조,  $O_1$ 분조의 진폭에 대한 절대상대오차(ARE)의 범위는 0.1~1.9%로 4개 정점에서 모두 98% 정도의 정확성을 보였다(Table 4).

조류검정은 각 정점별로 모델결과와 관측결과의 조류조화상수로부터 산정된  $U$ (동서성분),  $V$ (남북성분)와 합성유속을 비교하는 방법으로 수행하였다. 비교결과, 각 정점별 유속에 대한 절대상대오차(ARE)의 범위는 0.9~10.5%로 90% 정도의 정확성을 나타냈다(Table 5).

한편, 수온과 염분의 검정은 시화호 해양환경개선사업에서 관측한 시화호 내측 조사자료와 시화방조제 외측의 국가해양환경측정망자료(inc정점)를 이용하여 계절변동 특성을 재현하였다(Fig. 3).

시화호 해양환경개선사업에서는 호 내측 12개 정점에서 2010년 4월, 6월, 7월, 8월, 10월의 5회에 걸쳐서 공간적인 표층조사가 수행되었고, 이 중 3개 정점(정점 5, 9, 12)에서는 표층과 저층에서 조사가 수행되었다. 특히 정점 9에서는 공간조사 이외에도 3월, 4월, 6월, 8월, 10월, 11월에 시기별로 3~10일간 3~6시간 간격으로 표층과 저층에서 수온, 염분

**Table 4.** Comparison of tidal constituents between observed and model results

Station	Constituent	Amplitude(cm)				Phase(°)		
		Observed	Model	ME	ARE(%)	Observed	Model	ME
PT1	M <sub>2</sub>	284.2	282.7	-1.5	0.5	129.6	132.4	2.8
	S <sub>2</sub>	114.7	113.6	-1.1	1.0	181.3	186.8	-1.2
	K <sub>1</sub>	39.4	39.5	0.1	0.1	303.3	302.1	-1.2
	O <sub>1</sub>	28.0	28.5	0.5	1.7	264.2	269.0	4.8
PT2	M <sub>2</sub>	269.2	270.7	1.5	0.5	124.9	128.8	3.9
	S <sub>2</sub>	109.0	108.7	-0.3	0.3	181.3	181.3	0.0
	K <sub>1</sub>	38.8	39.0	0.2	0.6	301.2	300.3	-0.9
	O <sub>1</sub>	28.3	28.1	-0.1	0.5	261.6	267.5	6.0
PT3	M <sub>2</sub>	285.2	290.3	5.1	1.8	126.3	136.0	9.8
	S <sub>2</sub>	115.4	117.1	1.7	1.5	183.4	191.7	8.3
	K <sub>1</sub>	39.4	38.7	-0.7	1.9	301.7	304.5	2.9
	O <sub>1</sub>	28.1	28.2	0.1	0.3	262.7	272.4	9.7
T1	M <sub>2</sub>	278.5	276.5	-2.0	0.7	138.0	129.9	-8.1
	S <sub>2</sub>	111.7	111.1	-0.6	0.5	186.0	182.4	-3.6
	K <sub>1</sub>	39.1	39.4	0.3	0.7	301.2	300.7	-0.5
	O <sub>1</sub>	28.7	28.4	-0.3	1.1	273.4	267.7	-5.7

**Table 5.** Comparison of tidal currents between observed and model results(unit: cm/s)

Station	Layer	Component	Observed	Model	Error (ARE)
PC1	middle	U	41.2	45.8	4.6
		V	9.9	5.6	-4.3
		speed	42.4	46.1	3.7 (8.8%)
PC2	middle	U	33.6	38.4	4.7
		V	17.6	15.0	-2.6
		speed	38.0	41.2	3.2 (8.4%)
PC3	middle	U	51.3	54.4	3.2
		V	9.9	2.4	-7.4
		speed	52.2	54.5	2.3 (4.4%)
	surface	U	44.6	39.0	-5.6
		V	88.3	90.0	1.6
		speed	98.9	98.0	-0.9 (0.9%)
PC4	middle	U	39.3	35.6	-3.7
		V	82.7	83.4	0.6
		speed	91.6	90.7	-0.9 (1.0%)
	bottom	U	32.1	27.0	-5.1
		V	71.8	65.0	-6.8
		speed	78.7	70.4	-8.3 (10.5%)

조사가 수행되었다. 시화호 외측의 국가해양환경측정망 자료는 연 4회(2월, 5월, 8월, 11월)에 걸쳐 각 시기별로 1회씩 측정된 자료이다. 따라서 수온과 염분에 대한 모델 검증은 각 정점의 계절변동을 비교하는 방법으로 수행하였다.

**Table 6.** Observed surface temperature and salinity at each station

St.	2010.04.30		2010.06.25		2010.07.09		2010.08.23		2010.10.14	
	Temp.	Sal.	Temp.	Sal.	Temp.	Sal.	Temp.	Sal.	Temp.	Sal.
2	-	-	-	-	27.6	13.2	28.7	5.7	19.9	12.0
3	9.9	26.3	25.6	19.1	27.2	16.8	28.9	11.4	20.5	16.3
4	10.0	27.5	25.8	21.2	26.4	25.6	29.0	16.1	20.3	17.4
5	9.9	27.4	25.5	23.2	26.7	26.0	28.8	18.1	20.9	17.6
7	9.5	28.4	24.8	24.8	27.2	24.0	28.6	19.3	20.1	17.0
9	9.7	28.4	23.9	25.2	27.1	25.0	28.3	20.3	19.8	16.8
12	10.0	29.0	24.2	26.2	27.0	26.4	28.1	21.5	19.9	16.9
13	9.8	29.1	23.1	27.0	25.9	27.2	27.9	22.0	19.5	17.3
14	9.9	29.1	23.7	27.1	27.1	26.9	28.1	21.7	20.0	17.1
15	9.7	29.3	22.9	27.7	25.5	27.5	27.2	23.4	19.2	17.7
16	9.9	28.4	24.5	25.4	28.1	25.7	28.1	20.9	20.2	17.2
17	9.7	28.2	25.3	25.0	27.5	25.6	28.2	20.8	20.9	18.2
Avg.	9.8	28.3	24.5	24.7	26.9	25.2	28.3	19.6	20.1	17.2

수온과 염분의 계절별 관측 결과(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2010)에 의하면 하계에 수온 상승과 담수 유입량 증가로 인해 염분이 낮아지며, 공간적으로 수온은 정점별로 차이가 크지 않지만 염분의 경우에는 담수 유입의 영향이 큰 호 상류에서 낮게 나타난다(Table 6).

2010년 4월부터 11월까지 수온과 염분에 대한 모델 계산 결과를 계절별 연속측정 자료(정점 9)와 비교한 결과를 Fig. 6에 제시하였고, 시화호 내측에서 연 5회 공간 조사 자료(12개 정점)와 비교한 결과를 Fig. 7과 Fig. 8에 수온과 염분의

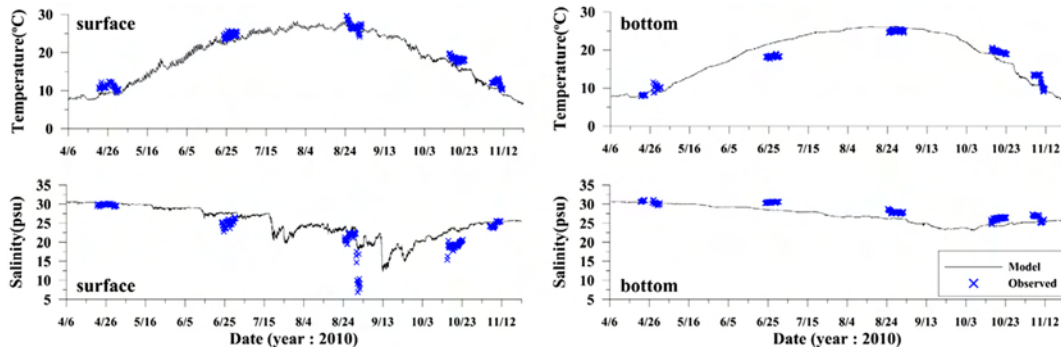


Fig. 6. Comparison of temperature and salinity between observed and model results at station 9.

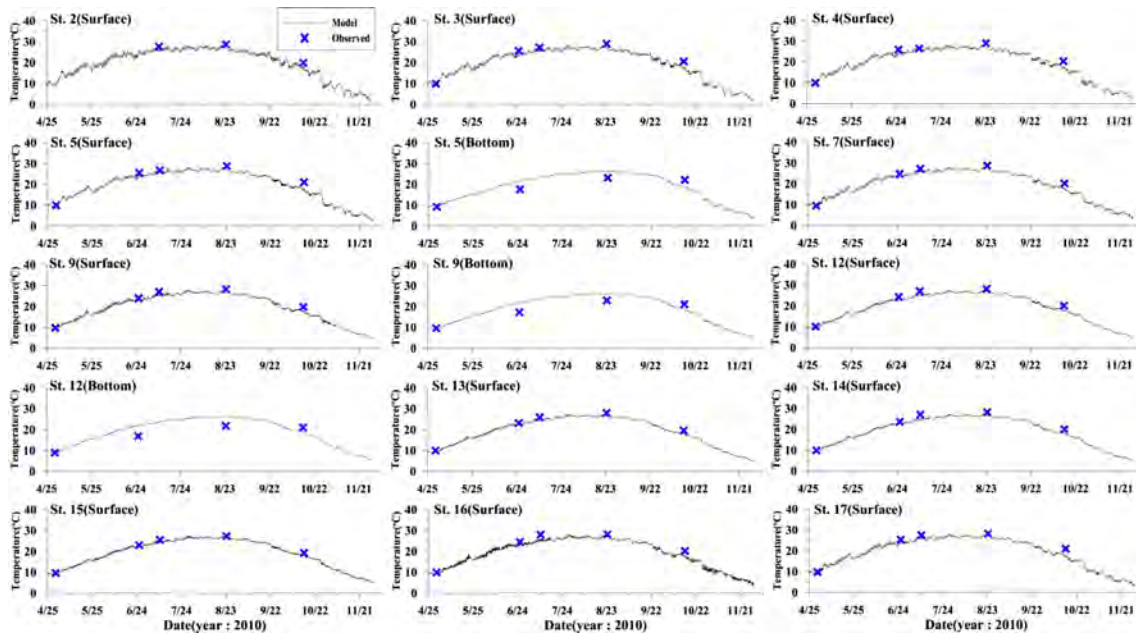


Fig. 7. Comparison of temperature between observed and model results at stations inside Shihwa Lake.

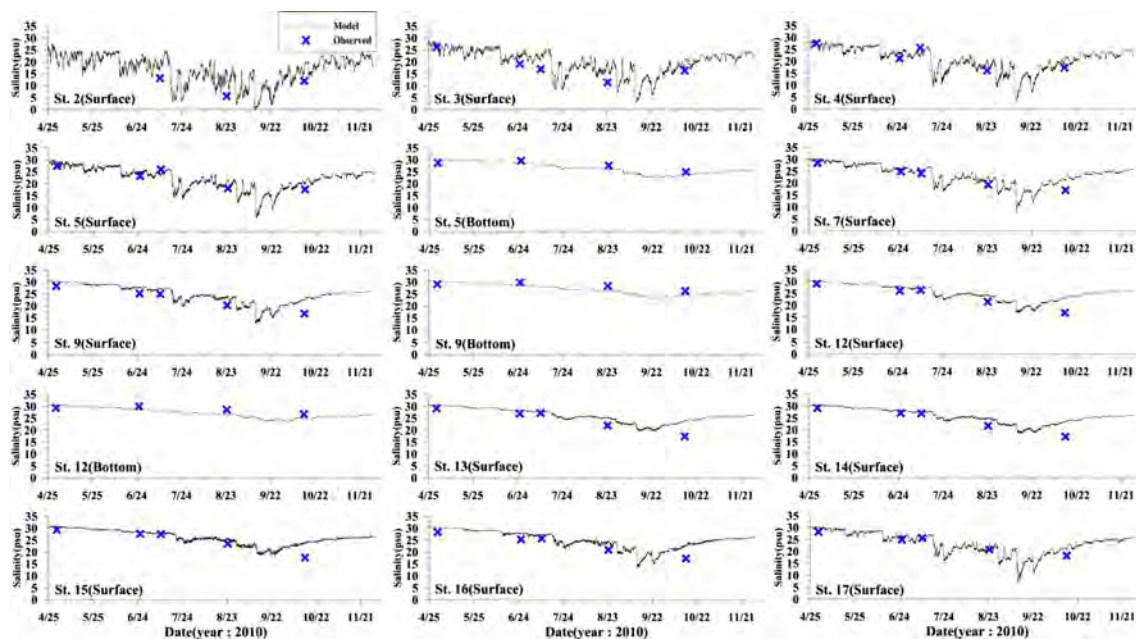


Fig. 8. Comparison of salinity between observed and model results at stations inside Shihwa Lake.



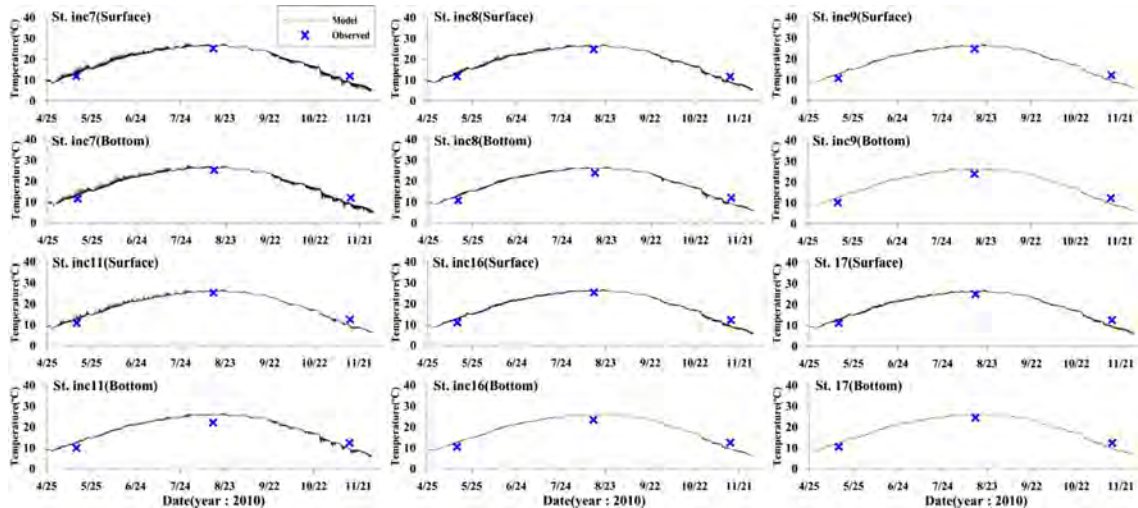


Fig. 9. Comparison of temperature between observed and model results at stations outside Shihwa Lake.

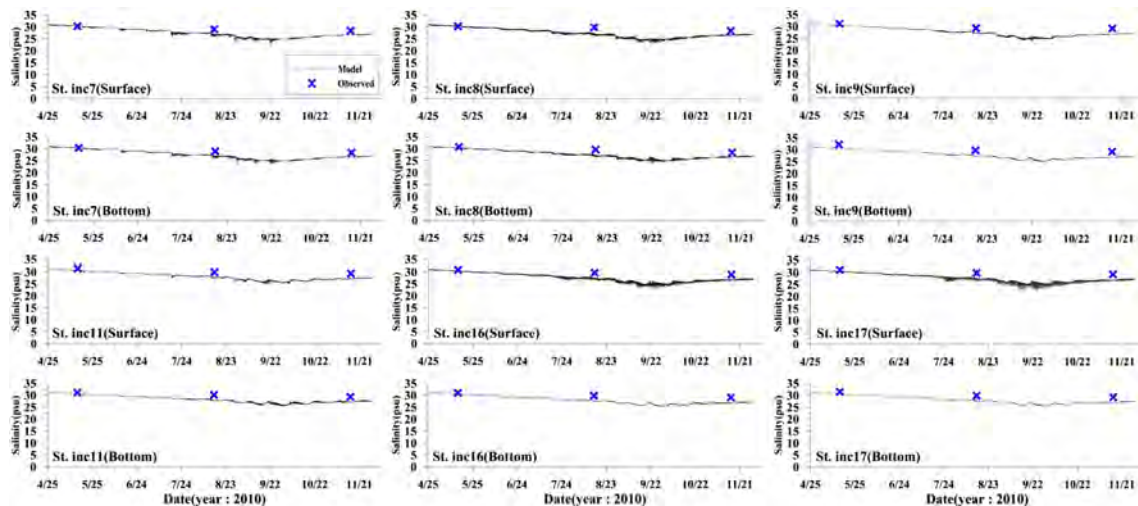


Fig. 10. Comparison of salinity between observed and model results at stations outside Shihwa Lake.

로 각각 구분하여 제시하였다. 또한 시화호 외측 6개 정점의 관측 자료와 비교한 수온과 염분의 검정결과를 Fig. 9와 Fig. 10에 제시하였다.

정점 9에서 연속측정한 자료의 경우 8월 29일~30일에 염분이 큰 폭으로 낮아지는 현상과 모델 결과가 편차를 나타내고 있다. 관측자료에 나타난 낮은 염분은 기상자료 분석결과, 8월 29일의 강우의 영향으로 판단되며 모델에 적용한 강우조건은 인천기상대와 수원기상대의 평균 강우자료를 이용함에 따라 기상대와 시화호의 위치에 따른 편차로 인해 국지적인 강우의 영향을 모델이 잘 반영하지 못한 것으로 사료된다. 시화호 내측의 정점별 모델의 염분 시계열을 보면, 상류로 갈수록 수심이 얕아지고 유입되는 담수의 영향을 받아 염분의 변동폭이 크게 나타난다(Fig. 8). 모델결과를 관측자료와 비교 결과, 각 정점에서 8개월간 계산된 수온과 염분의 시계열은 일부 정점에서 차이를 보이지만 전반적으로 관측자료의 연변동 추세를 잘 재현한 것으로 판단된다.

이와 같은 검정과정을 통해 구축된 모델을 이용하여 시화호 조력발전소 운영 전과 운영 후 상황에 대한 시화호의 해수특성 변화를 분석하였다.

## 4. 연구 결과

### 4.1 현황

#### (1) 조력발전소 비가동 상황

조력발전소가 가동되지 않는 상황(Case N)에서 기존 갑문을 통한 창조시와 낙조시의 유향과 유속을 표층과 저층으로 구분하여 Fig. 11과 Fig. 12에 각각 제시하였고, 최강유속 분포를 Fig. 13에 제시하였다. 여기서 최강유속은 대조·중조·소조기를 포함하는 모델 계산기간 동안 각 격자점에서 계산된 유속의 최대치를 나타낸 것이다.

계산 결과, 기존 갑문을 통해서 창조시에 유입되고 낙조시에 유출되는 것을 볼 수 있고, 시화호 외측 방조제 전면에서



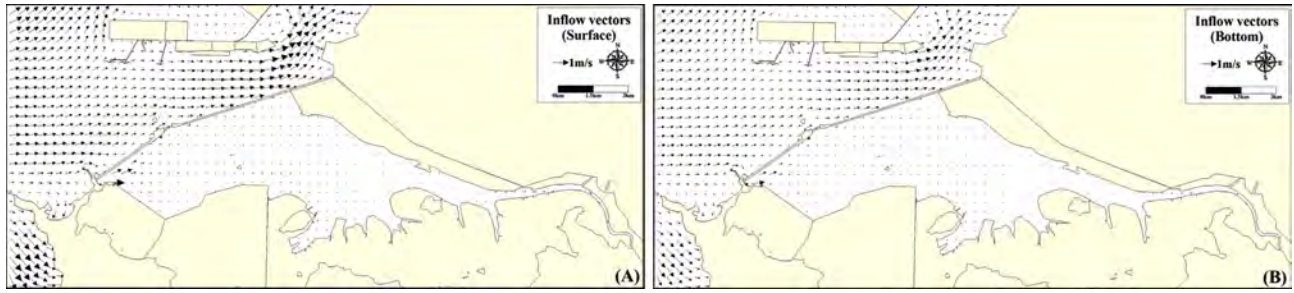


Fig. 11. Inflow vector plots at the surface(A) and bottom(B) without tidal power plant operation(Case N).

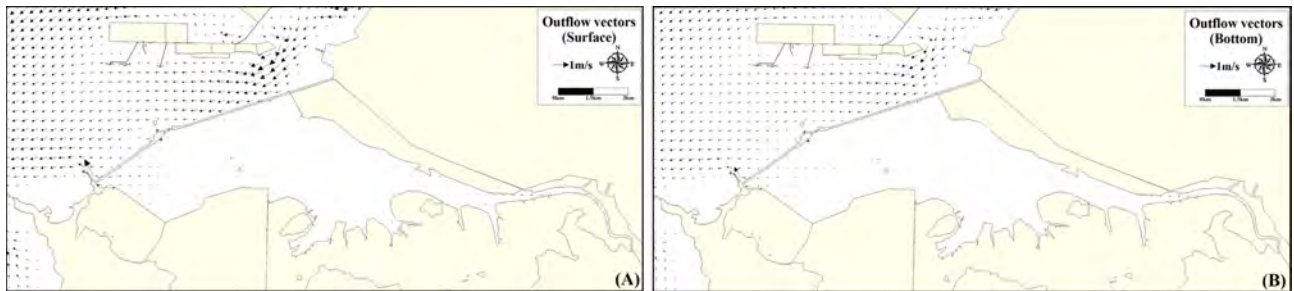


Fig. 12. Outflow vector plots at the surface(A) and bottom(B) without tidal power plant operation(Case N).

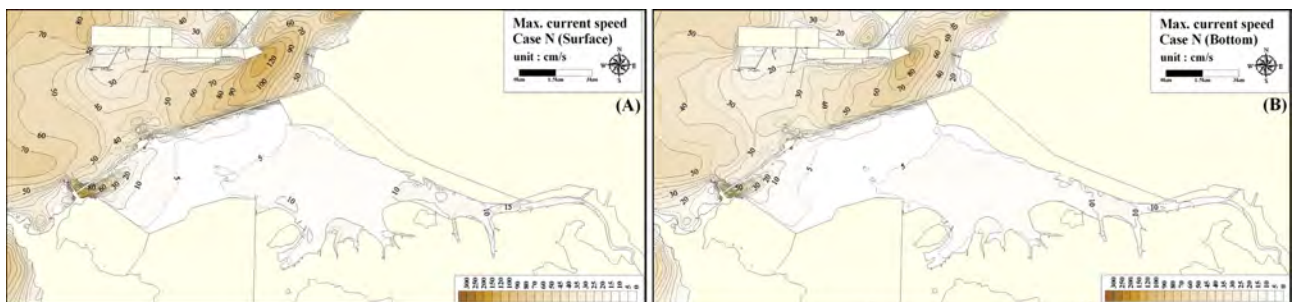


Fig. 13. Maximum current speed at the surface(A) and bottom(B) without tidal power plant operation(Case N).

는 창조시 수로를 따라 동북동 방향으로 진행하고 낙조시에는 이와 반대 방향의 흐름이 나타난다. 시화호 내측의 표층 유속은 시화호 기존 갑문을 통해 해수가 유통됨으로써 갑문과 상류부 수로 부근을 제외하고는 10 cm/s 이하의 약한 유속분포를 보이는 반면 시화호 갑문 인근에서는 100 cm/s 이상으로 나타나며, 시화호 외측 방조제 전면 수로에서는 강한 조류의 영향으로 40~150 cm/s의 유속분포를 나타낸다.

## (2) 조력발전소 가동 상황

조력발전소 가동상황(Case A)에 대한 실험결과를 분석하였다. 시화 조력발전소는 8대의 수문과 10대의 수차로 구성되어 있으며, 조력발전시 수문과 수차 및 시화방조제의 기존 갑문을 통해 유입·유출되는 해수에 의한 내측과 외측의 수위 및 조위 변화는 Fig. 14에 조력발전소 비가동 상황과 함께 제시하였다. 시화호 내측의 수위는 유지관리수위 평균해면(M.S.L.) 하 1.0 m를 유지하고 있으며, 기존 갑문을 통해 해수가 유통되는 조력발전소 비가동 상황보다 조력발전소 가

동시 수위가 큰 폭으로 변화한다.

조력발전소를 운영할 때 수차를 통한 호내측으로 해수 유입시(발전시)와 수차와 수문 및 기존갑문을 통한 유출시(배수시)에 대한 유속과 유향을 표층과 저층으로 구분하여 제시하였으며(Fig. 15와 Fig. 16), 조력발전시 최강유속의 분포를 Fig. 17에 제시하였다. 계산 결과, 발전소 가동시 해수의 유입과 유출에 따라 북서·남동방향으로 빠른 유속 분포를 나타낸다. 조력발전소 외측으로 배수시 최대 유속이 200 cm/s 이상이며 시화호 내측도 발전소 가동에 따른 수위 변화폭이 증가함에 따라 유속이 증가한다.

## 4.2 결과 분석

시화호 해역의 조석, 조류, 수온, 염분에 대한 검정 과정을 거친 수치실험 결과로부터 조력발전소 가동으로 인한 해수특성의 변화를 분석하였다. 담수의 영향을 분석하기 위하여 여름철(7월~9월) 상황에 대한 결과를 이용하였다.

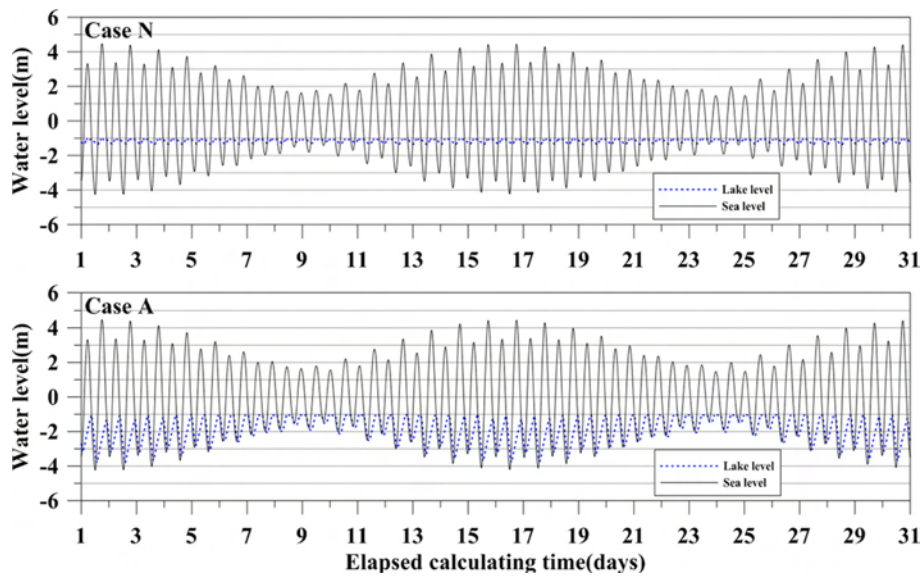


Fig. 14. Water level variations: Upper panel represent without tidal power plant operation and lower panel represent with tidal power plant operation.

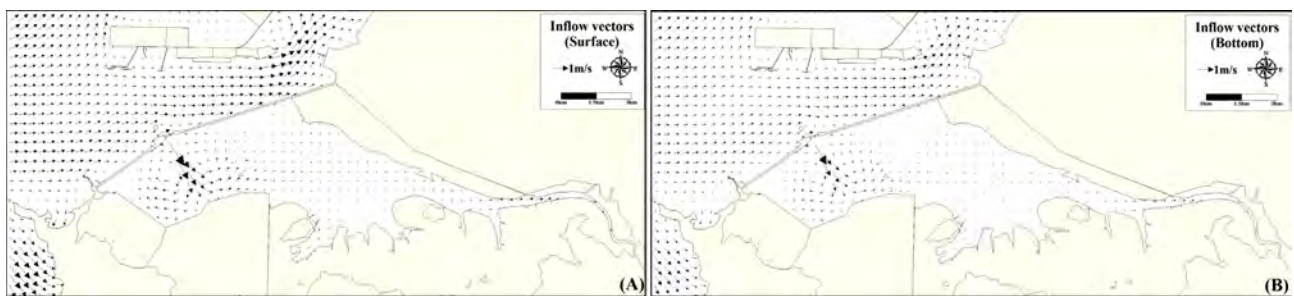


Fig. 15. Inflow vector plots at the surface(A) and bottom(B) with tidal power plant operation(Case A).

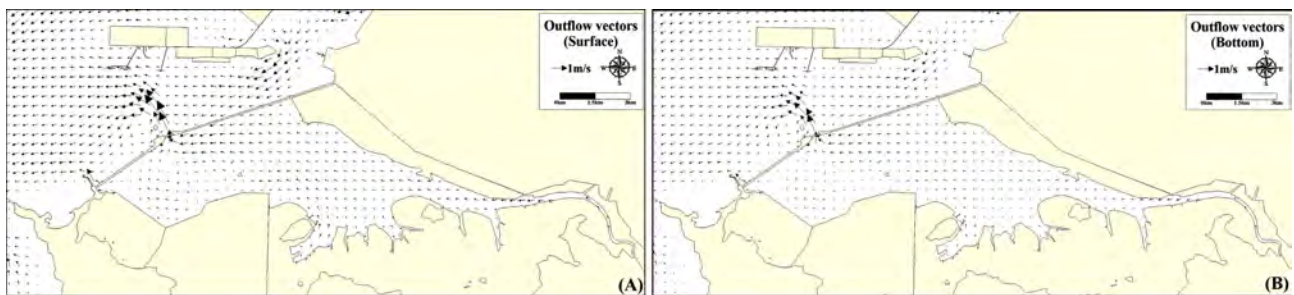


Fig. 16. Outflow vector plots at the surface(A) and bottom(B) with tidal power plant operation(Case A).

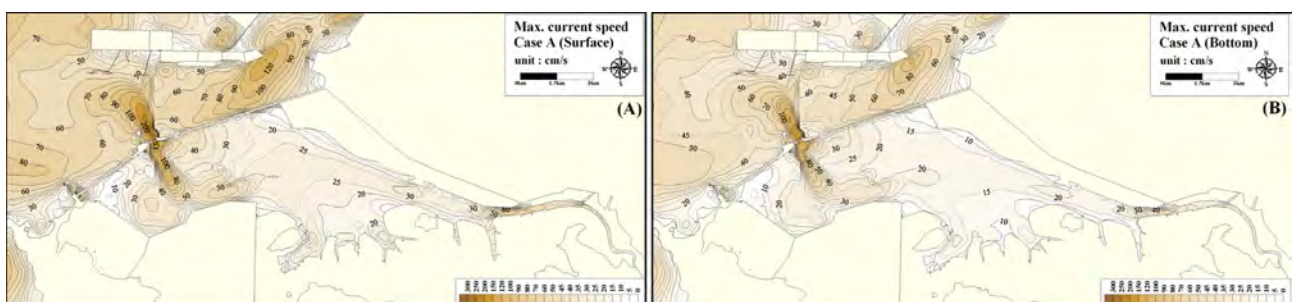


Fig. 17. Maximum current speed at the surface(A) and bottom(B) with tidal power plant operation(Case A).



## (1) 밀도 수평분포 변화

여름철(7월~9월)의 수온, 염분 및 밀도에 대한 평균값과 시계열자료로부터 표층과 저층에 대한 표준편차(Standard deviation)를 구하였다.

$$STD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

여기서, STD는 표준편차, N은 총 자료 수,  $\bar{x}$ 는 N개 자료에

대한 평균이다.

시화호 내측의 밀도분포는 조력발전소 가동 전에는 표층의 경우 호 내측에서 상류로 갈수록 표준편차가 크게 나타나는데 이는 염분 표준편차에서 볼 수 있듯이 하천에서 유입되는 담수의 영향을 많이 받기 때문인 것으로 보인다. 한편, 조력발전소 가동시에는 호 내측 중앙부까지 유입되는 해수에 의해 표준편차가 작아지는 경향을 보이거나 수심이 얕은 상류에서는 배수에 따른 수위 하강으로 인해 유입되는 담수의 단위

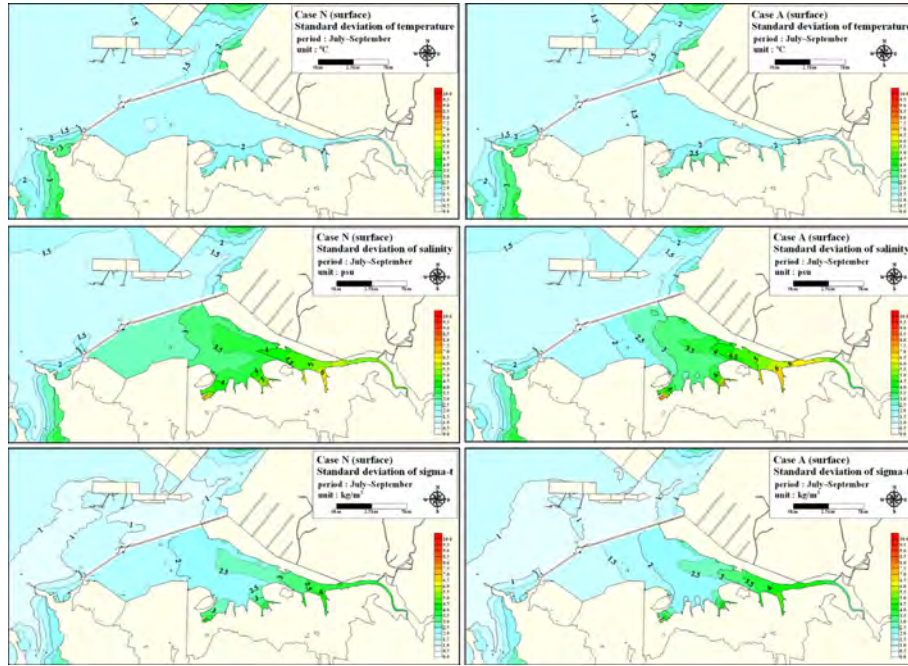


Fig. 18. Standard deviation of surface temperature, salinity and sigma-t( $\sigma_t$ ) in summer : Left panels represent without tidal power plant operation and right panels represent with tidal power plant operation.

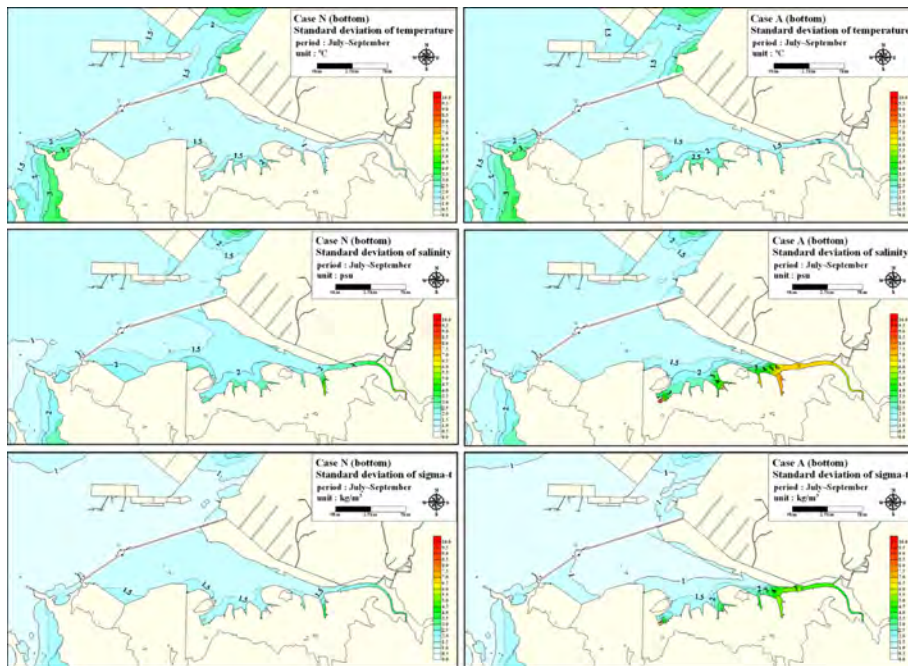


Fig. 19. Standard deviation of bottom temperature, salinity and sigma-t( $\sigma_t$ ) in summer : Left panels represent without tidal power plant operation and right panels represent with tidal power plant operation.

부피당 영향이 증가하기 때문에 표준편차가 소폭 커지는 경향을 보인다(Fig. 18과 Fig. 19).

이러한 결과는 시화호 내측의 밀도분포에 영향을 미치는 주요 인자가 하천을 통해 유입되는 담수와 조력발전소 가동에 의해 유입·유출되는 해수에 의한 염분의 변화임을 알 수 있는데, 이러한 양상은 잔차류 분포에서도 나타난다. Fig. 20과 Fig. 21에 잔차류에 대한 streamline과 흐름의 방향을 함께 제시하였다.

조력발전소 가동 전 표층의 잔차류는 호 내측으로 유입되는 담수의 영향으로 인해 하류 방향으로 호 중앙부까지 이동하는 반면에 저층은 시화호 기존 갑문을 통해 유입되는 해수가 표층과 반대로 상류 방향으로 이동하는 2층 순환구조(two-layer circulation)를 보인다. 기존 갑문을 통한 해수유통과 상류부에서 내려오는 하천수의 영향으로 인해 방조제 내측의 잔차류는 조력발전소를 기준으로 서측에서는 시계방향, 동측에서는 반시계방향의 흐름을 보인다.

한편, 조력발전소 가동시의 잔차류는 조력발전소를 통해 해수유통량이 증가함에 따라 염분이 증가하고, 배수시 수위하강에 따라 하류방향으로 담수의 영향이 증가하면서 시화호 중앙과 상류에서 2층 구조가 상대적으로 뚜렷해지는 경향을 보인다. 조력발전소 가동시 표층 잔차류가 외해방향으로 우세한 것은 발전소 운영시 배수로 인한 유속의 증가 때문이다. 조력발전소를 통한 해수유통의 영향으로 방조제 내측의 잔차류는 조력발전소를 기준으로 서측에서 시계방향, 동측에서 반시계방향의 흐름을 보임으로써, 조력발전소 가동 전과 유사한 경

향을 보이거나 발전시 수차를 통한 유입효과가 크게 나타난다.

## (2) 밀도 수직구조 변화

조력발전소 가동으로 인한 하계의 평균밀도 수직구조 변화를 파악하기 위해, 시화호 내측의 6개 정점(St. 5, 7, 9, 12, 13, 15)에서 모델을 통해 계산된 수온과 염분 및 밀도의 수직 분포를 조력발전소 가동전과 가동후 상황으로 구분하여 도시하였다(Fig. 22). 하계의 평균 수직구조는 호 상류로 갈수록 표층에서 고온, 저염의 특성을 나타내고 밀도의 수직구배가 큰 반면, 하류로 갈수록 수직적으로 균질한 형태를 나타낸다.

조력발전소 가동시 수온은 호 상류 일부구간에서 상승하지만 하류에서는 하강하는 것으로 나타나는 반면, 염분의 경우에는 호 전체적으로 증가하는 것으로 나타난다. 따라서 조력발전소 가동시 밀도는 수층에서 전체적으로 증가하며, 호 하류에서는 수직구배가 상대적으로 약화되는 것으로 나타났다.

## (3) 밀도 수직단면 변화

조력발전소 가동시 해수의 유입양상을 살펴보기 위해 조력발전소를 통과하는 단면(Line 1)과 기존갑문을 통과하는 단면(Line 2)을 설정하여 조력발전소 가동으로 인한 수직 방향의 수온과 염분분포 및 밀도분포를 분석하였다(Fig. 23). 조력발전소를 통과하는 Line 1의 경우 조력발전소 가동시 외해수의 유입으로 인해 호 내측의 평균수온이 가동 전보다 소폭 하강하고 평균염분은 증가한다. 고염수가 저층으로 유입되는 2층

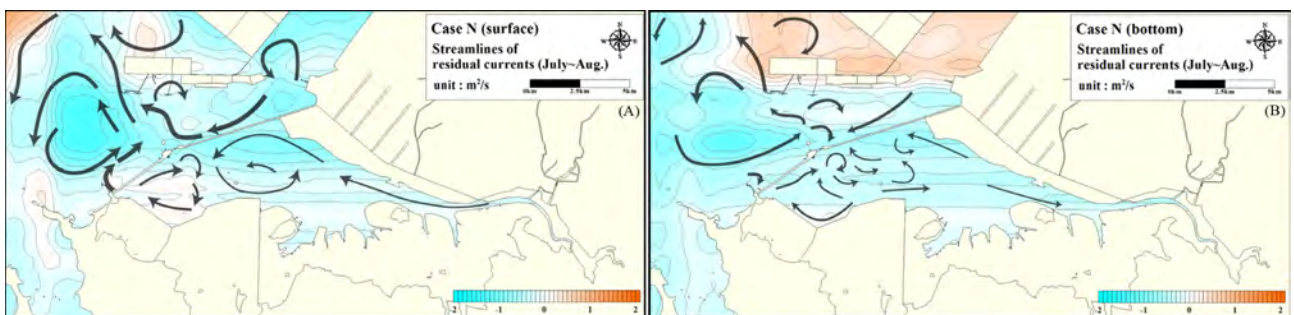


Fig. 20. Streamlines of residual currents at the surface(A) and bottom(B) without tidal power plant operation.

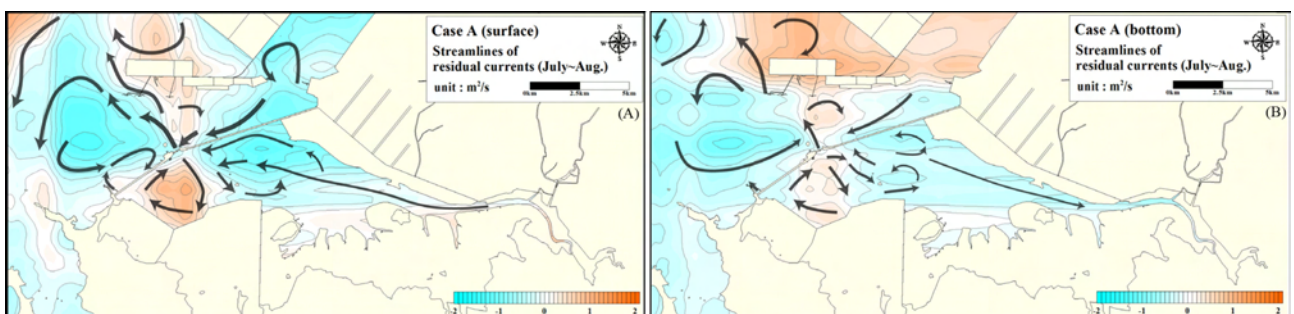


Fig. 21. Streamlines of residual currents at the surface(A) and bottom(B) with tidal power plant operation.



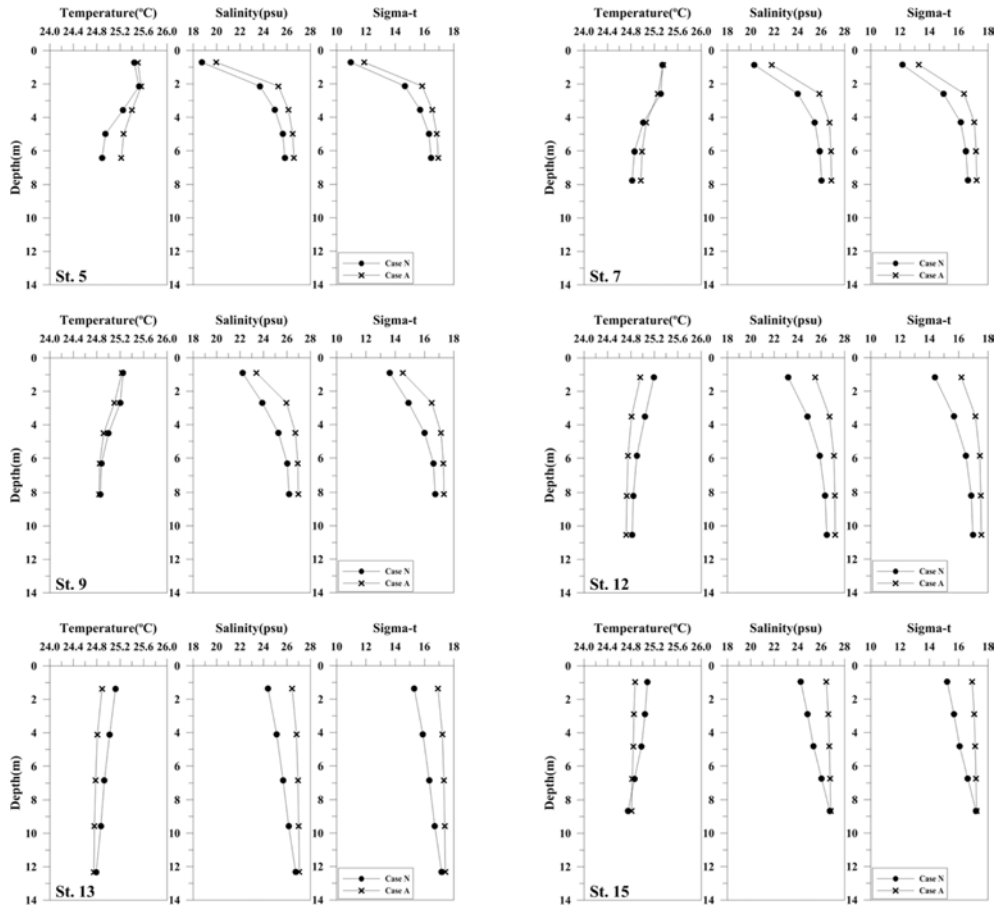


Fig. 22. Averaged vertical profile of temperature, salinity and sigma-t( $\sigma_t$ ) at 6 stations(St. 5, 7, 9, 12, 13, 15) : circle symbol(●) represent without tidal power plant operation(Case N) and x symbol(x) represent with tidal power plant operation(Case A).

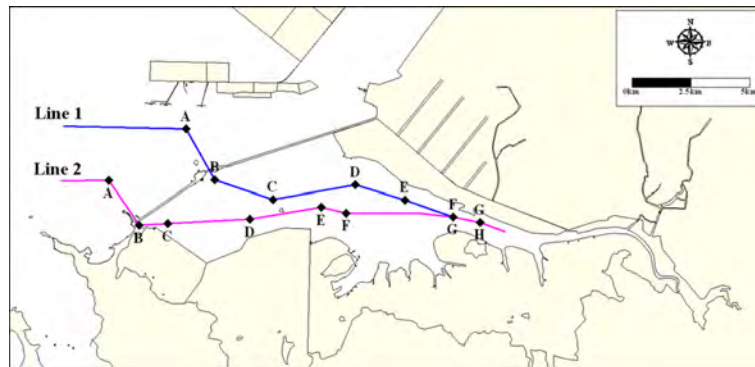


Fig. 23. Location of lines for cross-sectional analysis.

순환구조(two-layer circulation)가 상대적으로 뚜렷해지며, 이에 따라 평균밀도도 증가하는 경향을 보인다(Fig. 24). 기존 갑문을 통과하는 Line 2의 경우 Line 1과 마찬가지로 조력발전소 가동시 호 내측의 수온은 소폭 하강하는 반면 평균염분과 평균밀도는 증가하는 경향을 보인다(Fig. 25).

#### (4) 구역별 수괴 특성

조력발전소 가동으로 인한 시화호 내측의 수괴특성을 파악하기 위해 시화호를 6개의 구역으로 구분하였고(Fig. 26), 각

구역에 대한 하계의 모델 격자별 평균수온과 평균염분을 산정하여 T-S Diagram을 표층과 저층으로 구분하여 작성하였다(Fig. 27).

조력발전소 가동시 시화방조제에 인접한 Zone A와 Zone B 그리고 Zone C에서는 해수유통량의 증가로 인한 염분 상승으로 전체적으로 밀도가 증가하고, 시화호 중앙부인 Zone D와 Zone E에서는 조력발전소 가동 전·후의 밀도 변화가 크지는 않지만 배수시 상류에서 유입되는 담수의 영향에 의해 각 구역 내에서 밀도가 큰 폭으로 감소하는 구역이 나타

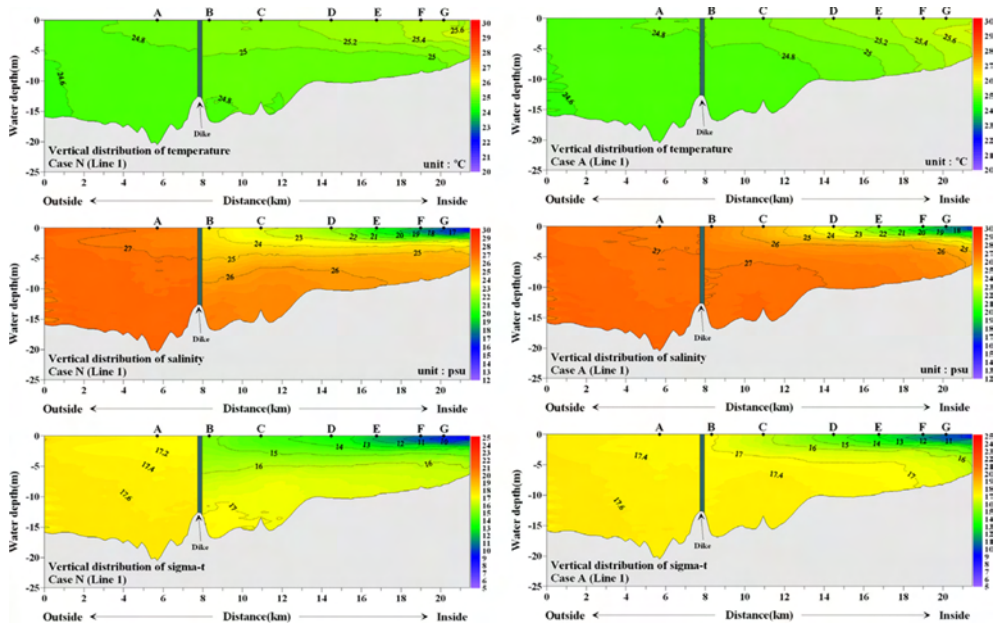


Fig. 24. Averaged vertical distribution of temperature, salinity and sigma-t( $\sigma$ ) along line 1 in summer: Left panels represent without tidal power plant operation and right panels represent with tidal power plant operation.

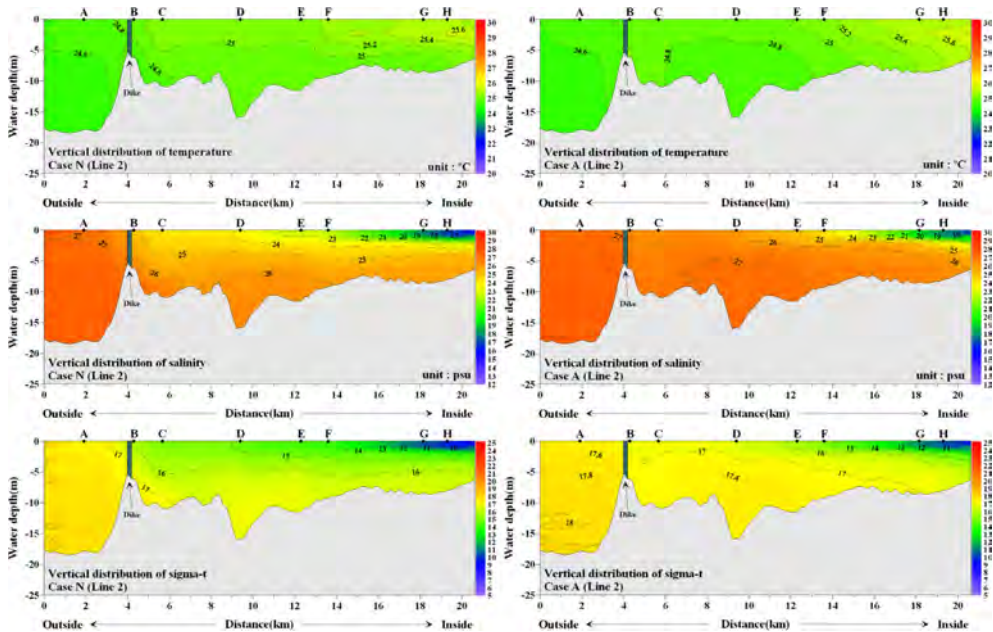


Fig. 25. Averaged vertical distribution of temperature, salinity and sigma-t( $\sigma$ ) along line 2 in summer : Left panels represent without tidal power plant operation and right panels represent with tidal power plant operation.

났다. 한편 담수의 영향을 가장 크게 받는 상류 지역 Zone F에서는 조력발전소 가동 전·후의 표층 밀도분포는 비슷하지만 저층의 밀도분포는 조력발전소 배수시 수위하강으로 인해 단위부피당 담수의 영향이 저층까지 작용하여 밀도가 큰 쪽으로 감소하는 것으로 나타났다.

#### (5) 구역별 성층 변화

조력발전소 가동으로 인한 시화호 내측의 6개 구역(Fig. 26)에 대한 밀도성층의 변화를 분석하였다. 밀도성층의 변화

는 성층강도 계산을 통해 분석하였는데 여러 연구에 사용된 수직 적분한 potential energy anomaly(이하 PEA) 개념을 도입하여 하구 및 연안의 성층분석을 수행하였다(Choi et al., 1998; Lee and Cho, 1998; Simpson and Bowers, 1981; Simpson et al., 1990; Rippeth et al. 2001; Lie et al., 2002; Palacios-Hernandez et al., 2002). PEA는 수층을 완전 혼합시키는데 필요한 단위 체적당의 일인데 수층의 현재 위치에너지와 이 수층이 수직적으로 완전히 혼합되었을 경우의 위치에너지의 차이를 의미한다(Kim et al., 2006).

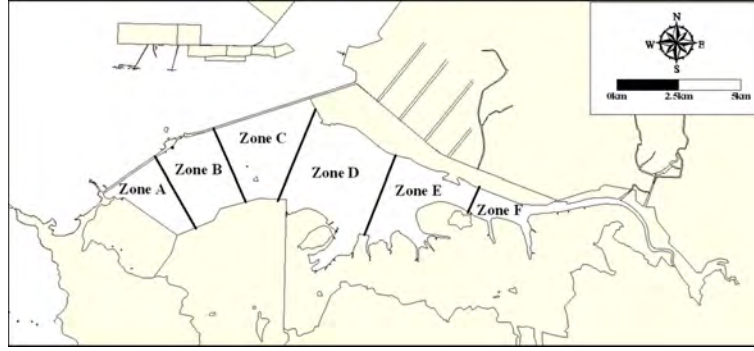


Fig. 26. A segmentation map.

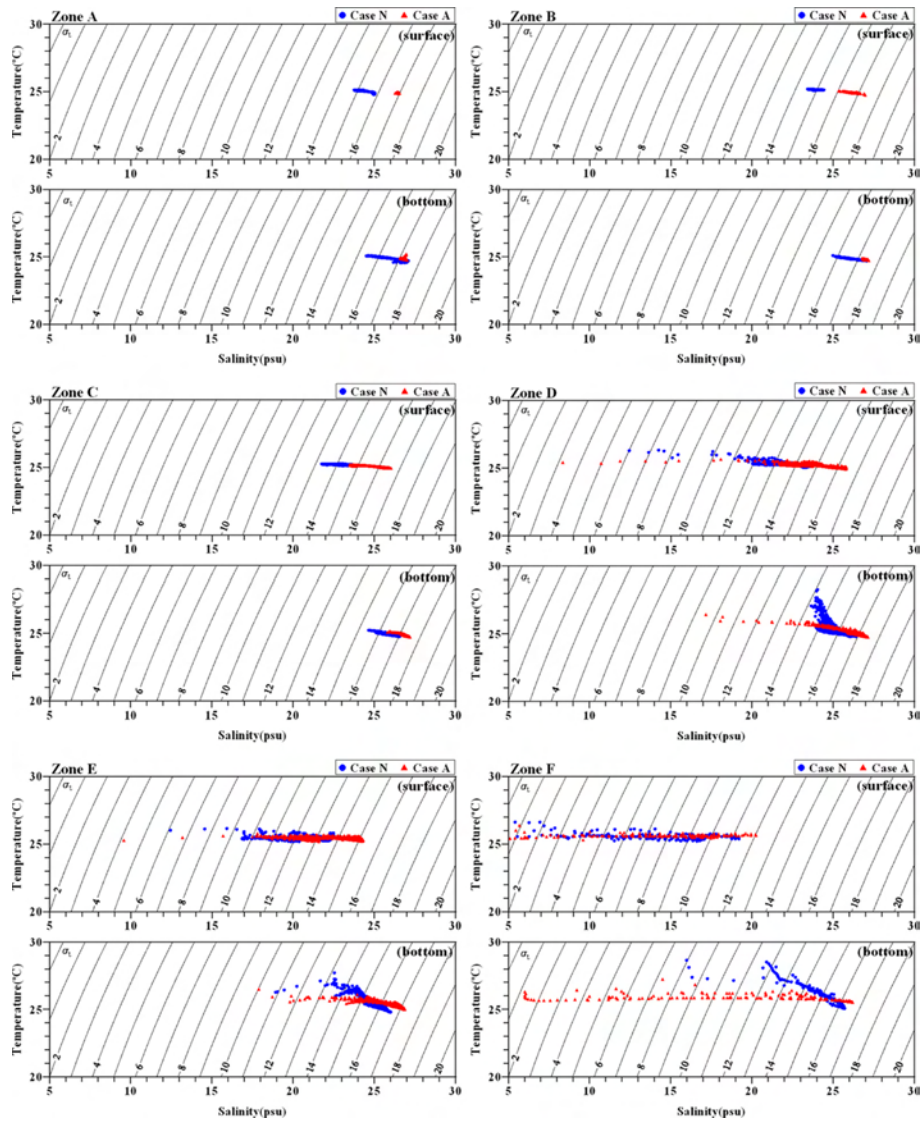


Fig. 27. Averaged T-S diagrams for water mass analysis in summer.

$$PEA = \frac{1}{h} \int_{-h}^0 (\bar{\rho} - \rho(z)) g z dz$$

$$\bar{\rho} = \frac{1}{h} \int_{-h}^0 \rho(z) dz$$

여기서,  $\rho(z)$ 는 총 수심  $h$ 인 수층의 수직밀도분포이고,  $g$ 는 중

력가속도,  $\bar{\rho}$ 는 수심평균 밀도이다. PEA가 0이면 완전혼합된 것이고 성층이 강할수록 값이 커지는 반면, 수직적으로 밀도가 역전된 경우는 음의 값이 된다.

여름철(7월~9월)에 6개 구역에 대한 평균 PEA를 분석한 결과(Table 7), 조력발전소 가동 전에 시화호의 PEA는 구역

**Table 7.** Spatially averaged potential energy anomaly( $J \cdot m^{-3}$ )

Case	Zone					
	Zone A	Zone B	Zone C	Zone D	Zone E	Zone F
Case N	6.8	9.2	12.9	13.0	15.1	37.0
Case A	1.5	2.9	7.7	9.1	11.4	20.1

별로 6.8~37.0  $J \cdot m^{-3}$ 으로 시화호 상류로 갈수록 성층강도가 커지는 것으로 나타났다. 조력발전소 가동 시에는 PEA가 구역별로 1.5~20.1  $J \cdot m^{-3}$ 으로 상류로 갈수록 성층강도가 커지는 경향은 유사하나 조력발전소 가동 전에 비해 성층이 약해지는 것으로 나타났다. 이는 조력발전소 가동으로 인해 해수의 유입·유출이 활발해지고 수위의 변화가 커짐에 따라 혼합효과가 증가하기 때문인 것으로 사료된다.

## 5. 요약 및 결론

본 연구에서는 수치모델을 이용하여 하계 시화호 해역에서 조력발전소 가동으로 인한 해수유동 및 밀도성층의 변화를 분석하였다.

시화호는 하천으로부터 담수가 유입되며 수차와 수문을 통해 외해와 해수가 교환되는 반폐쇄형 하구의 형태를 가지고 있다. 시화호의 내측과 외측의 수위차를 이용하는 갑문 개폐 또는 조력발전소 가동에 따른 흐름 외에도, 시화호 내측의 해수순환은 담수와 해수의 상호작용에 의한 밀도차에 기인하는데 이러한 밀도차는 수온보다 염분의 영향이 더 크게 작용한다.

조력발전소 가동으로 인해 호 내측 중앙부까지는 해수유통량 증가에 따라 밀도의 표준편차가 작아지는 반면, 호 상류부에서는 발전시 배수로 인한 수위하강으로 인해 단위부피당 담수의 영향이 증가하여 밀도의 표준편차가 커지는 것으로 나타났다.

연구결과, 시화호 내측은 조력발전소 가동 전에도 갑문을 통해 유입되는 해수와 하천으로부터 유입되는 담수의 영향으로 표층과 저층의 잔차류 방향이 서로 반대인 2층 순환구조가 형성되는 것으로 나타났다. 조력발전소 가동시 고염의 해수유입량이 증가하고 배수시 큰 폭으로 수위가 하강하면서 상류로부터 유입되는 담수의 영향이 증가함에 따라 시화호 중앙부와 상류지역에서는 2층 순환구조가 상대적으로 뚜렷해지는 것으로 나타났다.

구역별 성층강도(PEA) 분석결과, 조력발전소 가동시 호 중앙과 상류부에서 2층 순환구조가 뚜렷해지지만, 해수의 유입·유출량 증가로 인해 시화호 전체적으로는 밀도가 높아지고, 혼합효과가 증가하여 성층이 약화된다.

조력발전소 가동시는 모델로 예측한 결과이므로 발전소 가동 상황에 대한 시화호 내측의 유속자료가 확보될 경우 연구결과와 비교, 분석하는 과정이 필요할 것으로 판단된다.

시화호는 방조제 건설 이후 인근 공단에서 유입되는 오염물

질의 영향으로 호 내측의 수질이 악화되고 해수교환이 제한됨에 따라 성층이 형성되어 수질악화가 가속화된 바 있다. 조력발전소 가동으로 인해 일부 수질개선 효과가 나타나고 있으나 시화호 인근에 추가적인 개발계획이 예정되어 있으므로, 향후 종합적인 해양관리를 위한 모니터링과 더불어 유역을 통해 유입되는 비점오염원과 점오염원에 의한 해양환경 변화의 지속적인 평가에 본 연구가 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부의 시화호 해양환경개선사업(2012)을 통해 시행되었습니다. 연구를 위해 시화호의 관측자료를 제공해주신 한국해양과학기술원과 유역모델 자료를 제공해주신 (주)하이드로코어에 감사드립니다.

## 참고 문헌

- Choi, J.H., K.Y. Kim and D.A. Hong (2000). Impact of seawater inflow on the temperature and salinity in Shihwa lake. Jour. Korean Earth Science Society, v. 21, no. 5, pp. 541-552.
- Choi, H.Y., S.H. Lee and I.S. Oh (1998). Quantitative Analysis of Thermal Front in the Mid-eastern Coastal Area of the Yellow Sea, 「The Sea」 The Journal of the Korean Society of Oceanography, Vol.3, No.1, pp. 1-8.
- Dyer K. R. (1973). Estuary, a physical introduction. John Wiley, New York. pp 195.
- Hamrick. J.M. (1992). A three-dimensional environmental fluid dynamics computer code: theoretical and computational aspects. Special Report in Applied Marine Science and Ocean Engineering(SRAMSOE) No. 317, Virginia Institute of Marine Science(VIMS), VA.
- Jang, J.I., I.S. Han, K.T. Kim and K.T. Na (2011). Characteristics of water quality in the Shihwa and outer sea. Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety. Vol 17 No.2, pp. 105-121.
- Kang, Y.S., Y.K. Chae and H.R. Lee (2011). Variation of density stratification due to fresh water discharge in the Kwangyang Bay and Jinju Bay. Journal of Korea Society of Coastal and Ocean Engineers, 23(1), pp. 126-137.
- Kim, J.K., G.I. Kwak and J.H. Jeong (2008). Three-dimensional mixing characteristics in Seomjin river estuary. Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering, 11(3), pp. 164-174.
- Kim, T.I., H.R. Lee and K.I. Chang (2006). Seasonal variation of density stratification in the Saemangeum water, Korea Ocean and Polar Research, Vol. 28(3):339-352.
- Korea Meteorological Administration, Meteorological data. <http://www.kma.go.kr>
- Korea Ocean Research Development Institute (1997). A study on



- environment changes in Shihwa Lake(1st). p. 169.
- Korea Water Resources Corporation (1998). Establish research the water quality control measures Shihwa lake. p. 130.
- Korea Water Resources Corporation (2005). Execution plan for construction of Shihwa tidal power plant.
- Kwon, S.J., T.S. Kang (2007). Numerical simulation for behavior tidal elevation and tidal currents in the South Sea. *Journal of Korea Society of Costal and Ocean Engineers*. 19(3), pp. 253-265.
- Lee, B.-G. and H.-D. Cho (1998). The spatial characteristics of stratification in Deukryang Bay, Korea. *J. Kor. Environ. Sci. Soc.*, 7, 223-231.
- Lie, H.-J., S. Lee, S.-H. Cho, and C.-H. Kim (2002). Tidal front in the main tidal channel of Kyunggi Bay, eastern Yellow Sea. *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, 37, 10-19.
- Matsumoto, K., T. Takanezasa, and M. Ooe (2000). Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: a global model and a regional model around Japan, *J. Oceanogr.*, 56, 567-581.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2010). Shihwa Lake Marine Environment Improvement Project.
- National Fisheries Research and Development Institute, <http://portal.nfrdi.re.kr>
- Palacios-Hernández, E., E. Beier, M.F. Lavin, and P. Ripa (2002). The effect of the seasonal variation of stratification on the circulation of the northern Gulf of California. *J. Phys. Oceanogr.*, 32, 705-728.
- Park, J.K., E.S. Kim, S.R. Cho, K.T. Kim and Y.C. Park (2003). Annual variation of water qualities in the Shihwa Lake. *Ocean and Polar Research*, Vol. 25(4):459-468.
- Park K., H.S. Jung, H.S. Kim and S.M. Ahn (2005). Three-dimensional hydrodynamic-eutrophication model(HEM-3D) : application to Kwang-Yang Bay, Korea. *Marine Environmental Research*, 171-193.
- Park, Y.C., J.K. Park, M.W. Han, S.K. Son, M.K. Kim and S.H. Huh (1997). Biogeochemical study of dissolver organic and inorganic compounds under oxic/anoxic environment in Lake Shihwa, <sup>3</sup>The Sea<sup>4</sup>The Journal of the Korean Society of Oceanography, Vol.2, No.2, pp. 53-68.
- Rippeth, T.P., N.R. Fisher, and J.H. Simpson (2001). The cycle of turbulent dissipation in the presence of tidal straining. *J. Phys. Oceanogr.*, 31, 2458-2471.
- Simpson, J.H. and D. Bowers (1981). Models of stratification and frontal movement in the shelf seas. *Deep-Sea Res.*, 28, 727-738.
- Simpson, J.H., J. Brown, J.P. Matthews, and G. Allen (1990). Tidal straining, density currents and stirring in the control of estuarine stratification. *Estuaries*, 13, 125-132.
- Suh, S.W., H.Y. Lee and S.C. Yoo (2010). Simulation of water quality changes in the Saemangeum reservoir induced by dyke completion. *Journal of Korea Society of Costal and Ocean Engineers*, 22(4), pp. 258-271.
- Yoon, B.I. and S.B. Woo (2012). Numerical study on spring-neap variability of net volume transport at Yeomha channel in the Han River estuary. *Journal of Korea Society of Costal and Ocean Engineers*, 24(4), pp. 257-268.

---

원고접수일: 2013년 6월 28일

수정본채택: 2013년 7월 31일(1차)

2013년 8월 19일(2차)

게재확정일: 2013년 8월 28일