

냉배수 방류에 따른 하계 진해만의 성층강도 및 용존산소농도 변화 예측

박성식¹ · 윤석진² · 이인철³ · 김병국⁴ · 김경희^{3,†}

¹부경대학교 해양공학과 대학원생

²국립수산과학원 독도수산연구센터 해양수산연구사

³부경대학교 해양공학과 교수

⁴한국가스공사 통영기지본부 안전환경부 과장

Prediction of Stratification Strength and Dissolved Oxygen due to Cold Discharge of Jinhae Bay in Summer

Seongsik Park¹, Seokjin Yoon², In-Cheol Lee³, Byeong Kuk Kim⁴, and Kyunghoi Kim^{3,†}

¹Graduate Student, Department of Ocean Engineering Pukyong National University, Busan 48513, Korea

²Researcher, Dokdo Fisheries Research Center, National Fisheries Research & Development Institute, Pohang 37709, Korea

³Professor, Department of Ocean Engineering Pukyong National University Busan 48513, Korea

⁴Manager, Tongyeong Terminal Division, Korea Gas Corporation, Tongyeong 53007, Korea

요 약

본 연구에서는 통영 LNG 기지에서 방류되는 냉배수에 의한 하계(8월) 진해만의 물리적 특성 및 용존산소농도(DO, Dissolved Oxygen) 변화를 조사하였다. 실제 냉배수 방류량 조건인 Case1($10 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$) 모의 결과, 냉배수가 진해만의 물리적 특성에 미치는 영향은 매우 미미하였으며, DO 변화 또한 관측되지 않았다. 모의 조건인 Case2($100 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$) 모의 결과, 방류구 반경 0.5 km 범위에서 수온이 약 1°C 감소하였다. Case3($1000 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$)에서는 방류구 반경 0.5 km 범위에서 수온이 약 $4\sim 5^\circ\text{C}$ 감소하였으며, 냉배수가 진해만 전 해역으로 확산하였다. 냉배수 방류에 따른 수온 감소는 PEA(Potential Energy Anomaly)와 DO를 증가시키는 것으로 나타났다. PEA는 거제-가덕 수로에서 최대 23.2 J m^{-3} , DO는 통영 연안에서 최대 1.0 mg L^{-1} 증가하는 것으로 예측되었다. 상기 결과로부터 냉배수가 하계 진해만의 환경에 미치는 영향은 매우 미미함을 확인하였다. 또한, 냉배수를 국소 해역의 빈산소수괴 해소에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract – The changes in physical properties and DO in Jinhae Bay by cold discharge were investigated. The results of Case1($10 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$), the actual cold discharge condition, showed that the effects of cold discharge on physical properties and DO in Jinhae Bay were very limited. The results of Case2($100 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$), simulation condition, showed a decrease in water temperature of ca. 1°C with the 0.5 km radius from the discharge outlet. In Case3($1000 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1}$), the water temperature decreased by ca. $4\sim 5^\circ\text{C}$ within a 0.5 km radius of discharge outlet, and the cold discharge spread throughout the Bay. The PEA and DO tended to increase according to decrease of water temperature. it was predicted that PEA increase up to 23.2 J m^{-3} at the Geoje-Gaduk channel, DO up to 1.0 mg L^{-1} at the TongYeong coastal area. From the above results, it was confirmed that the effects of cold discharge on the environment of Jinhae Bay, in summer season, are very limited. Moreover, it is expected that cold discharge can be used to improve the hypoxia water quality.

Keywords: Cold Discharge(냉배수), Jinhae Bay(진해만), Stratification Strength(성층강도), DO(용존산소), Prediction(예측)

[†]Corresponding author: hoikim@pknu.ac.kr

1. 서론

현대 사회의 산업화에 따라 에너지 수요가 증가하고 있으며, 그에 따른 환경 오염문제가 대두되고 있다. 세계는 환경 오염을 유발하는 기존 에너지원의 대체와 지속 가능한 발전을 위해 천연가스(NG; Natural Gas)에 주목하고 있다. 최근 국내 정책제안에서는 석탄 발전의 단계적 감축을 위해서 천연가스를 활용하는 방안을 제시하여 천연가스의 중요성은 앞으로 더욱 커질 것으로 전망된다(National Council on Climate and Air Quality[2020]).

천연가스는 부피를 줄이기 위해 액화된 상태로 기지에 저장되며, 이를 액화천연가스(LNG, Liquefied Natural Gas)라 한다. 수요처로의 NG 공급을 위해서는 LNG를 재기화시켜야 하며, 이 과정에서 주변 해수를 취수하여 열매체로써 사용한다. 사용된 해수는 수온이 취수 전보다 약 4°C 가량 감소하며 이는 다시 연안 표층으로 방류된다. 방류된 해수를 냉배수(Cold Discharge)라 하며, 이는 방류 지역의 수온을 변화시키는 열오염원으로 작용할 우려가 있다(Kim and Kim[2001]). 또한, Kim[2011]의 연구에 따르면 통영LNG기지 에서 방류되는 냉배수가 식물플랑크톤의 현존량에 영향을 미치는 것으로 나타났으며, Kim[2000]의 연구에서는 냉배수 방류로 인한 성층 변화 및 산소의 용해도 증가의 가능성을 제시하고 있다.

수온은 해양생물에 매우 민감하게 작용할 뿐만 아니라 해수의 밀도에까지 영향을 미친다. 외부 요인에 의한 연직적인 수온 변화는

밀도 단면(density profile)을 변화시키고 밀도 성층의 형성과 파괴의 원인이 된다(Doney[2006]). 밀도 성층은 해양의 생물학적, 환경적, 화학적 요인들에 밀접하게 관여되어 있다. 반폐쇄성만에서 하계의 집중호우 등에 의한 성층 현상은 식물플랑크톤의 군집 분포와 생물량을 변화시키며(Son *et al.*[2012]), 하계에 형성된 성층은 저층의 혐기성 조건과 수질 변화 특성과 밀접한 관계가 있다(Seo [1998]). 또한, 밀도 성층은 연직 혼합에 의해 발생하는 생지화학적 (biogeochemical) 과정에 대한 해양 반응(oceanic response)에까지 영향을 미친다(Yamaguchi *et al.*[2019]). 한편, 해양의 용존산소농도(DO, Dissolved Oxygen)는 염분, 압력과 수온에 영향을 받는다. 해양의 수온 증가는 산소의 용해도를 감소시키며, 이는 수온과 DO가 반비례의 상관관계에 있음을 의미한다(Fondriest Environmental[2013]; Wetzel[2001]). 이와 함께 밀도 성층의 발달로 인한 연직 혼합의 약화는 저층의 산소 고갈을 유발하여 빈산소수괴를 발생시킨다(Park and Ra[2014]). 이처럼 냉배수에 의한 해역의 수온 감소는 밀도 성층과 DO에 영향을 미칠 우려가 있으나, 이에 관한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 통영 LNG 기지에서 방류되는 냉배수에 의한 하계 진해만의 물리적 특성 및 DO 변화를 조사하였다. 이를 위해 3차원 유동 모델 POM(Princeton Ocean Model)을 사용하여 총 4개의 냉배수 방류량(0, 10, 100, 1000 m³ sec⁻¹)에 대한 진해만의 물리적 특성(유동, 수온, 염분, 성층강도) 변화를 모의하였다. 이후 모델의

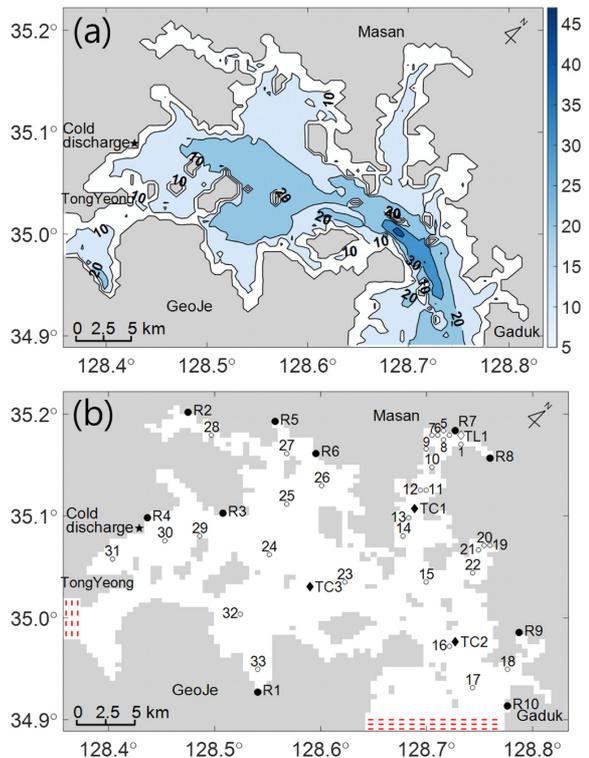


Fig. 1. The map showing study site. (a) Isobathymetric map of Jinhae Bay. (b) Location of river (R1~10, ●), observation stations for tide level (TL1, ◇), tidal current (TC1~3, ◆) and temperature, salinity (TS1~33, ○), cold discharge outlet (★) and open boundary (OB; red dotted line).

수온 결과치를 입력자료로 하여 냉배수 방류에 따른 DO 변화를 예측하기 위해 가우시안 과정 회귀분석(Gaussian Process Regression, GPR)을 진행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 POM(Princeton Ocean Model)

3차원 해양 수치모형인 POM은 해양은 물론 연안과 하구역에도 적용 가능하여 수심이 얇은 연안해역에서 널리 사용되고 있다(Choi[2009]; Oey *et al.*[1985]; Yoon and Kasai[2017]). POM의 계산 방식은 모드분리법을 사용하여 내부모드와 외부모드를 나누고 있다. 3차원 내부모드는 CFL 조건에 기초한 긴 시간 간격을 허용하기 때문에 모드분리법은 비용적인 측면에서 효율적인 기법으로 평가되고 있다(Simons[1974]; Madala and Piacsek[1977]). 연직 격자에는 sigma(σ) 좌표계를 사용하여 저층 경계를 실제에 가깝게 재현하고 있다.

2.2 유동 모델 조건

CFL 조건을 고려한 계산 시간 간격은 외부, 내부모드에 대해 각각 0.8, 24 sec로 설정하여 1년간(2018년) 모의하였다(식 (1)~(2)).

$$\Delta t_E \leq \frac{1}{C_t} \left| \frac{1}{\delta x^2} + \frac{1}{\delta y^2} \right|^{-1/2} \quad (1)$$

$$\Delta t_I \leq \frac{1}{C_t} \left| \frac{1}{\delta x^2} + \frac{1}{\delta y^2} \right|^{-1/2} \quad (2)$$

여기서, t_E 와 t_I 는 각각 외부, 내부 시간 간격, $C_t = 2(gH)^{1/2} + U_{\max}$, U_{\max} 는 최대 속도, C_t 는 최대 내부 중력과 속도를 의미한다. 본 계산 이전에 1년간의 안정화 기간을 거쳐 모형을 안정시킨 이후 모의를 진행하였다. 수평 격자 크기는 500 m이며, 격자 개수는 $87 \times 74 \times 10$ 로 총 10개의 σ 층을 고려하였다. σ 층은 해수면에 가까울수록 높은 해상도를 갖도록 비균일하게 설정하였다($\sigma = 0.000, -0.014, -0.034, -0.074, -0.130, -0.210, -0.332, -0.468, -0.604, -0.782, -1.000$). 개방경계는 통영-거제 수로와 거제-가덕 수로가 고려되었다. 각 경계에서의 조위는 각각 국립해양조사원(Korea Hydrographic and Oceanographic Agency)의 통영 조위관측소와 가덕도 조위관측소 데이터를 총 36개 분조로 조화분해하여 다음과 같이 강제진동으로 주었다(식 (3)).

$$\zeta(t) = \sum_{i=1}^n H_i \times \cos(w_i t - k_i) \quad (3)$$

유동 모델의 경계치 수온-염분과 기상조건은 각각 해양환경공단 '해양환경정보포털(Marine Environmental Information System)'과 기상청의 '기상자료개방포털(Korea Meteorological Administration)'에서 취득하여 사용하였다. 담수유입조건으로는 총 10개의 하천이 고려되었으며(R1:사동천, R2:보전천, R3:용정천, R4:황리천, R5:진전천, R6:진동천, R7:삼호천, R8:남천, R9:양곡천, R10:가덕도), 하천

Table 1. Cold discharge conditions

Condition	Value	Remark	
Temperature deviation	4 °C	Kim and Kim, 2001	
Discharge volume (m ³ sec ⁻¹)	Case0	0	Unreleased
	Case1	10	Verification
	Case2	100	-
	Case3	1000	-

유량은 Tank Model로 산출하였다.

냉배수의 방류량 조건은 0, 10, 100, 1000 m³ sec⁻¹로 4개의 Case를 고려하였으며, 취·배수는 각각 저층 취수, 표층 배수로 설정하였다. 취·배수 수온 편차는 모든 Case에 대해 4 °C로 설정하였으며, 냉배수의 염분 조건은 취수 해수의 염분을 따른다(Table 1). 실험방류 조건인 Case1의 방류량과 취·배수 수온 편차는 관측 자료를 바탕으로 계획되었다(Kim and Kim[2001]).

2.3 성층강도

본 연구에서는 진해만의 성층강도를 나타내기 위해 Simpson *et al.*[1981]에 의해 고안된 Potential Energy Anomaly(PEA)를 사용하였다. PEA는 성층이 형성된 수괴가 완전혼합되는데 필요한 에너지를 나타내며, 이는 형성된 성층의 강도와 비례한다(MacKenzie and Adamson[2004]). PEA는 수괴의 연직밀도분포에 따라 다음과 같이 계산된다(식 (4)~(5)).

$$PEA = \frac{g}{H} \int_{-H}^0 (\rho' - \rho) z dz \quad (4)$$

$$\rho' = \frac{1}{H} \int_0^z \rho(z) dz \quad (5)$$

여기서 g 는 중력가속도, H 는 수심, ρ 는 수괴의 밀도, ρ' 는 연직 평균된 밀도를 의미한다. PEA 값에 따라 해역의 성층화도가 나뉜다. PEA=0일 경우 완전혼합층(Complete mixing), PEA가 음수일 경우 비성층(Destratification)을 의미한다. PEA가 양수일 경우에는 성층(Stratification)이 형성됨을 의미하며 성층이 강할수록 높은 PEA 값을 갖는다.

2.4 Gaussian Process Regression(GPR)

본 연구에서는 진해만의 DO 농도를 예측하기 위해 GPR을 사용하였으며, GPR의 기계학습과 검증에는 해양환경공단의 해양환경 측정망 데이터가 사용되었다. 회귀분석의 종속변수는 DO 농도이며 특징(feature or input vector)으로는 수심을 포함한 30가지의 수질 데이터가 사용되었다. 초기 GPR은 일반적인 선형회귀를 따르며 그 가중치 벡터(weight vector)와 잠재 벡터(latent vector)를 확률 변수로 가정한다(식 (6)~(8)).

$$y(x) = w^T \phi(x) \quad \text{또는} \quad Y = \Phi w \quad (6)$$

$$P(w) = N(w|0, \alpha^{-1}I) \quad (7)$$

$$P(Y) = N(Y|0, K) \quad (8)$$

여기서 x 는 input vector, Y 는 latent vector, Φ 는 design matrix, w 는 weight vector를 의미한다. 식 (8)에서 Y 의 분산은 커널 함수 K 로 표현된다. K 의 모양에 따라 GPR의 모델이 결정되며, 본 연구에서는 지수 커널 함수를 사용하였다(식 (9)~(10)).

$$K = k(x_i, x_j) = \sigma_f^2 \exp\left(-\frac{r}{\sigma_l}\right) \quad (9)$$

$$r = \sqrt{(x_i - x_j)^T (x_i - x_j)} \quad (10)$$

여기서, σ_f 는 signal standard deviation, σ_l 는 length scale를 의미하며 두 변수를 커널 함수 K 의 Hyper parameters라 한다. 관측치의 기계학습을 통해 Hyper parameters가 결정된다.

한편, 위 Y 는 에러가 고려되지 않은 잠재적인 값이며 회귀모델에서 예측하고자 하는 Target vector인 T 는 Y 와 에러(gaussian noise)의 합으로 결정된다. 또한 T 의 확률분포는 ‘Law of Total Probability’에 의해 결정되며(식 (11)), 이는 다시 Multivariate Gaussian distribution의 확률밀도함수에 따라 아래 식 (12)~(13)와 같이 정리된다(Simon[2012]).

$$P(T) = \int P(T|Y)P(Y) dY = \int N(T|Y, \beta^{-1}I_N)N(T|0, K) dY \quad (11)$$

$$P(T|Y)P(Y) = P(T|Y) = N\left(Y, T|(0, 0), \begin{pmatrix} K & K \\ K & (\beta I_N)^{-1} + K \end{pmatrix}\right) \quad (12)$$

$$P(T) = N(T|0, (\beta I_N)^{-1} + K) = N(T|0, C) \quad (13)$$

여기서 C 는 T 의 공분산(Covariance matrix)을 의미한다. GPR의 목적은 d_{N+1} 에 대한 t_{N+1} 를 구하는 것이며, 이는 위에서 모델링된 T_N 을 통해 $P(t_{N+1}|T_N)$ 을 찾는 것으로 정형화된다. $P(t_{N+1}|T_N)$ 를 구하기 위해서는 t_{N+1} 와 T_N 각각의 평균과 분산 그리고 두 벡터의 공분산을 알아야 한다. t_{N+1} 의 분산과 두 벡터의 공분산은 T_N 의 확장을 통해 구할 수 있다(식 (14)~(17)).

$$P(T_N, t_{N+1}) = P(T_{N+1}) = N(T|0, C_{N+1}) \quad (14)$$

$$C_{N+1} = \begin{bmatrix} C_N & K_{N+1} \\ K_{N+1}^T & c \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$k_{N+1} = (K_{1(N+1)}K_{2(N+1)} \cdots K_{N(N+1)})^T \quad (16)$$

$$c = K_{(N+1)(N+1)} + \beta \quad (17)$$

여기서 c 는 t_{N+1} 의 분산, k_{N+1} 과 k_{N+1}^T 은 k_{N+1} 과 T_N 두 벡터의 공분산을 의미한다. 사전확률분포이론에 의해 $P(t_{N+1}|T_N)$ 는 다음과 같이 정의된다(식 (18); Eaton[1983]).

$$P(t_{N+1}|T_N) = N(t_{N+1}|0 + k_{N+1}^T C_N^{-1} (T_N - 0), c - k_{N+1}^T C_N^{-1} k_{N+1}) \quad (18)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 유동 모델 검증

냉배수 모의에 앞서 유동 모델의 조석·조류 및 수온·염분 재현도를 검증하였다. 조석·조류와 수온·염분 검증에는 각각 국립해양조사원과 해양환경공단 자료를 취득하여 사용하였다. 조석은 8월 한 달간의 조위를 비교하여 검증하였다. 조석 검증 결과, 모델 결과값과 관측값의 지각 차이는 0.5~7.4°, 반조차 차이는 1.0 cm 이내로 작은 오차를 보였다(Fig. 2(a)). 진해만의 조류는 반일주조가 지배적인 흐름을 보인다(Hong[2016]). 이에 따라 반일주조의 조류타원도를 토대로 조류 검증을 진행하였다. 조류 검증 결과, 조류타원도 장축과 단축 그리고 위상의 계산값과 관측값이 잘 일치함을 확인하였다(Fig. 2(b); Table 2).

수온·염분은 모델 계산값과 관측값을 1:1 비교하고 목적함수를 나타내어 검증하였다. 또한, TS11, TS15, TS27 그리고 TS30에서의 시계열 비교를 통해 계절 재현성을 확인하였다. 목적함수는 R^2 (Determination coef.)와 SS(Skill Score)를 사용하였다(Willmott

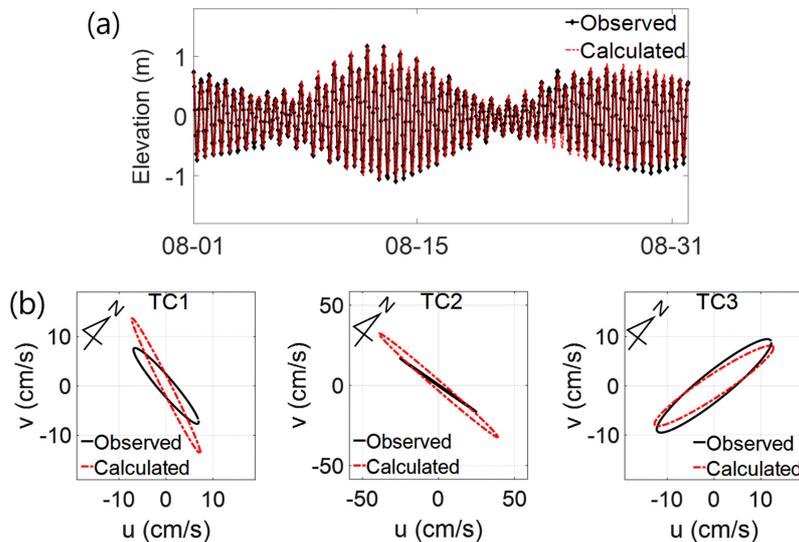


Fig. 2. Comparison between observed tide level(a), tidal ellipse of semi-diurnal current(b) and calculated ones.

Table 2. Comparison between observation and calculation for tidal current harmonic constant at TC1~TC3

		major (cm s ⁻¹)			minor (cm s ⁻¹)			inc (°)		
		Obs.	Cal.	Err.	Obs.	Cal.	Err.	Obs.	Cal.	Err.
TC1	M ₂	8.3	10.1	1.9	-1.1	-0.6	0.5	133.2	119.6	-13.6
	S ₂	2.9	5.5	2.7	-0.4	-0.3	0.1	127.3	115.0	-12.3
TC2	M ₂	23.5	31.9	8.4	-0.2	-1.9	-1.7	143.6	141.3	-2.3
	S ₂	10.7	19.5	8.8	-1.2	-0.6	0.6	149.0	139.3	-9.7
TC3	M ₂	12.0	10.4	-1.6	-1.6	-1.1	0.5	36.4	34.8	-1.6
	S ₂	4.1	4.7	0.6	-1.3	-1.0	0.4	32.4	24.7	-7.7

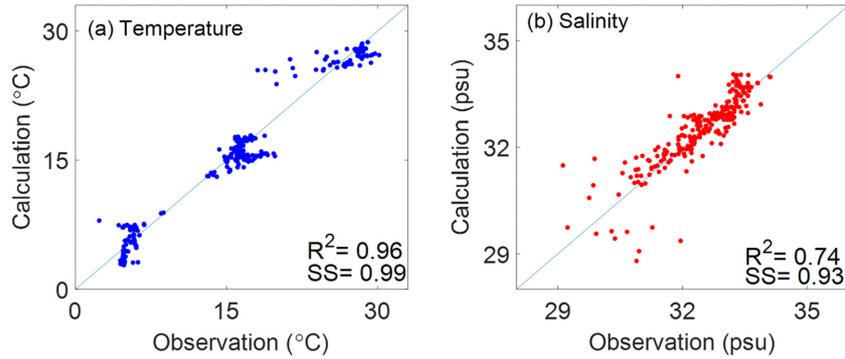


Fig. 3. Scatter plots between observations and calculations for (a) water temperature ($p < 0.05$) and (b) salinity ($p < 0.05$).

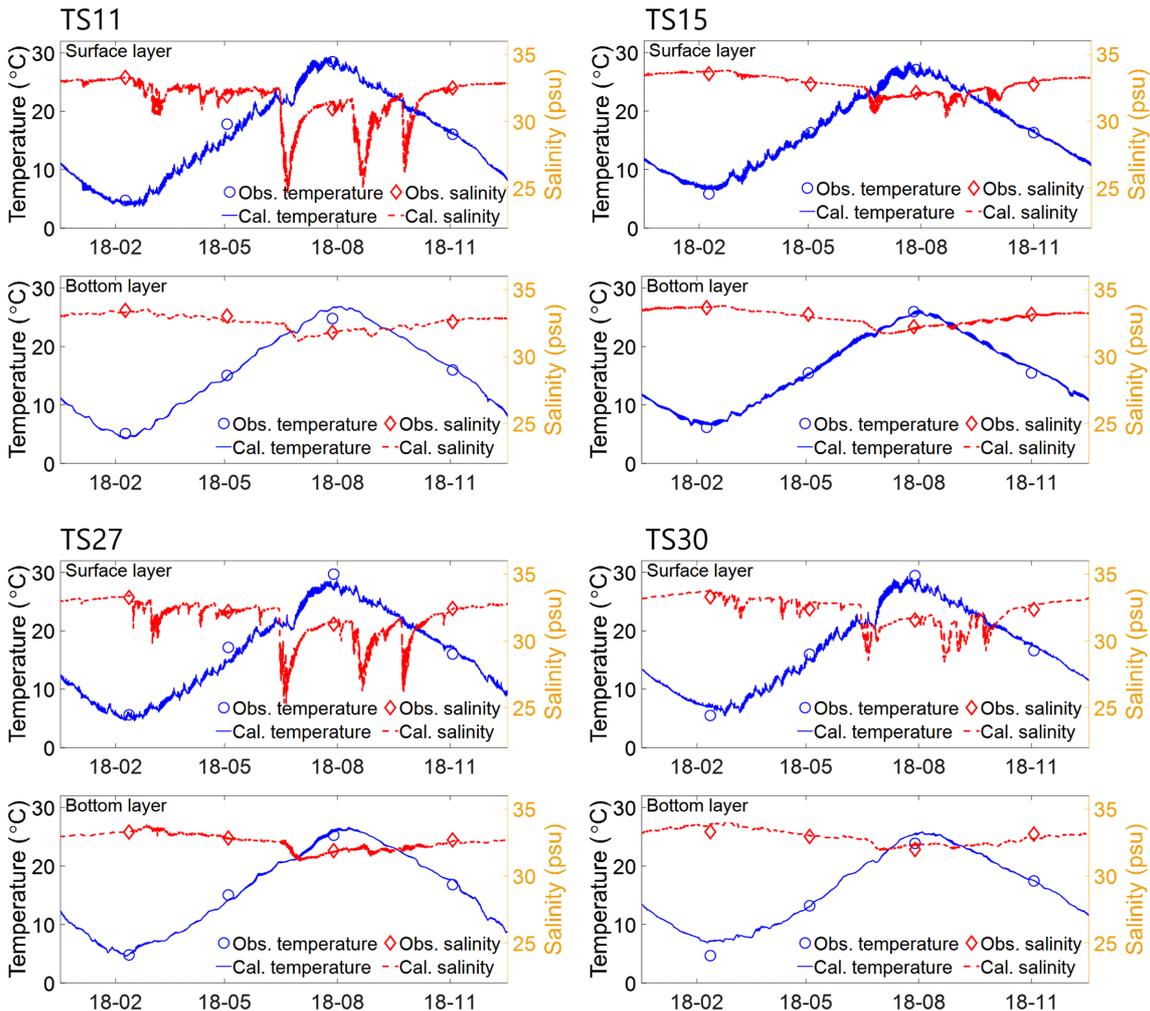


Fig. 4. Time series comparison between observations and calculations for water temperature and salinity at TS11, TS15, TS27 and TS30.

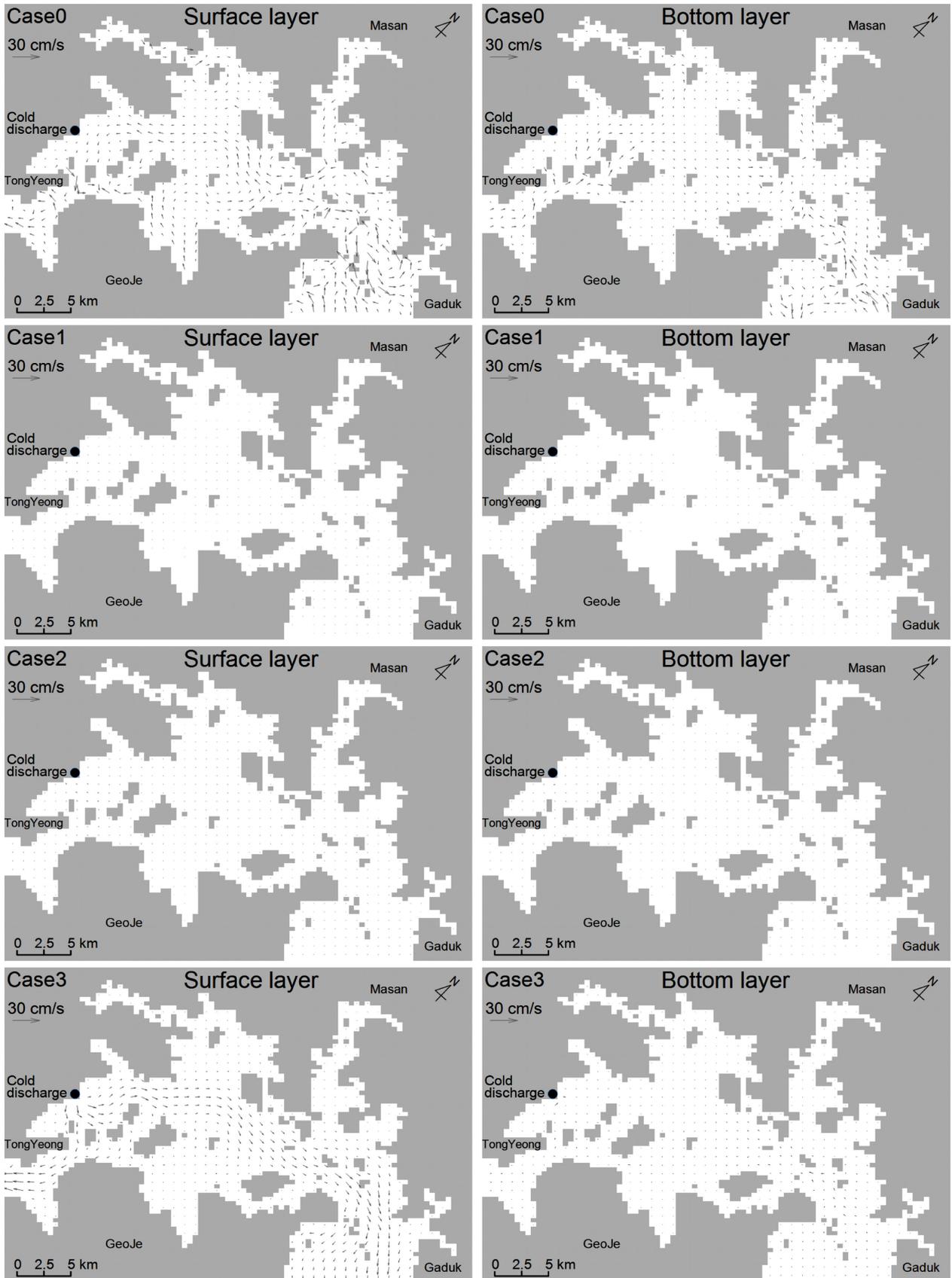


Fig. 5. The residual current vectors of Case0 and deviation for Case0 of Case1~Case3 in Aug.

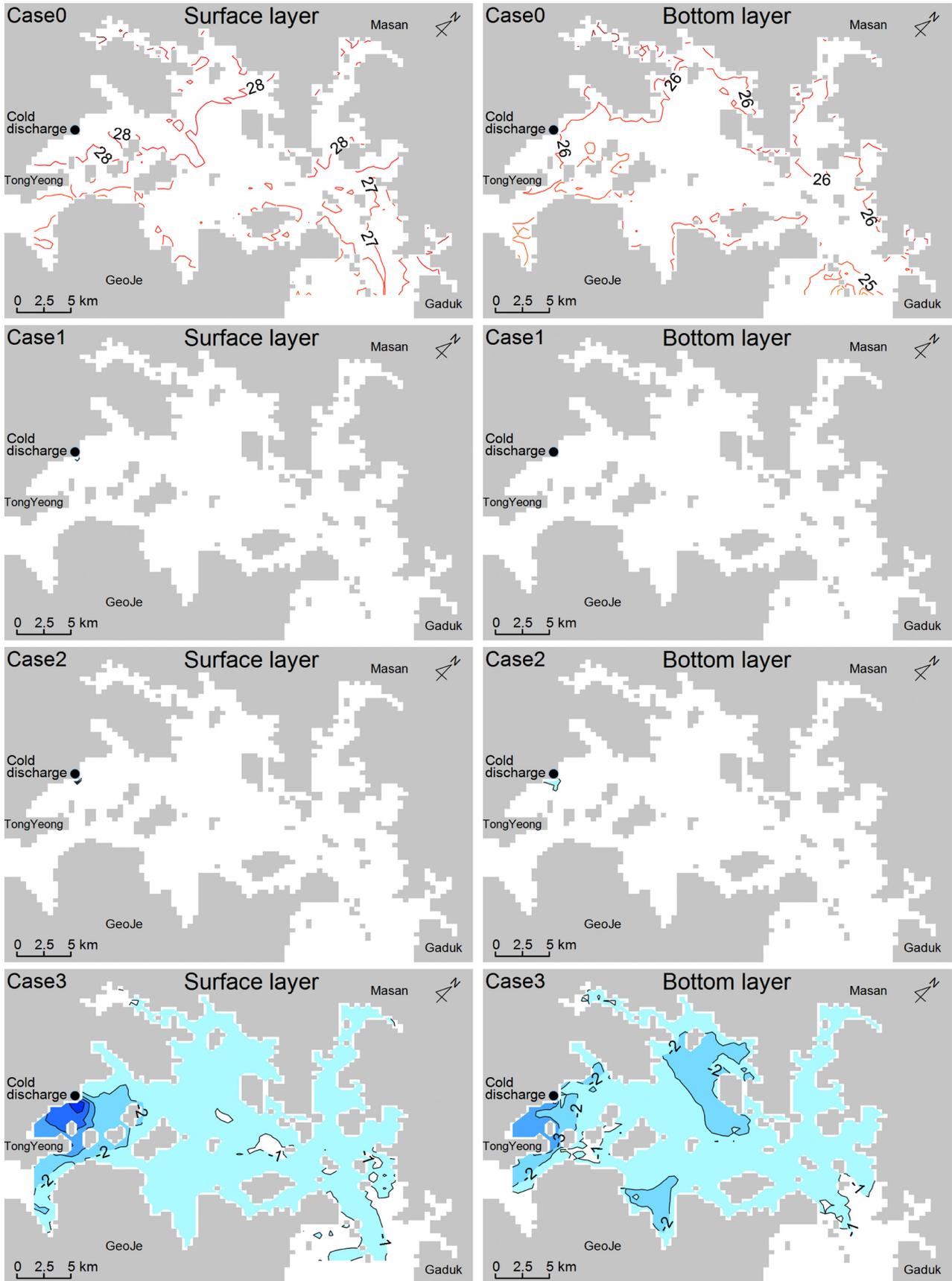


Fig. 6. Water temperature distribution of Case0 and deviation for Case0 of Case1~Case3 in Aug. (°C).

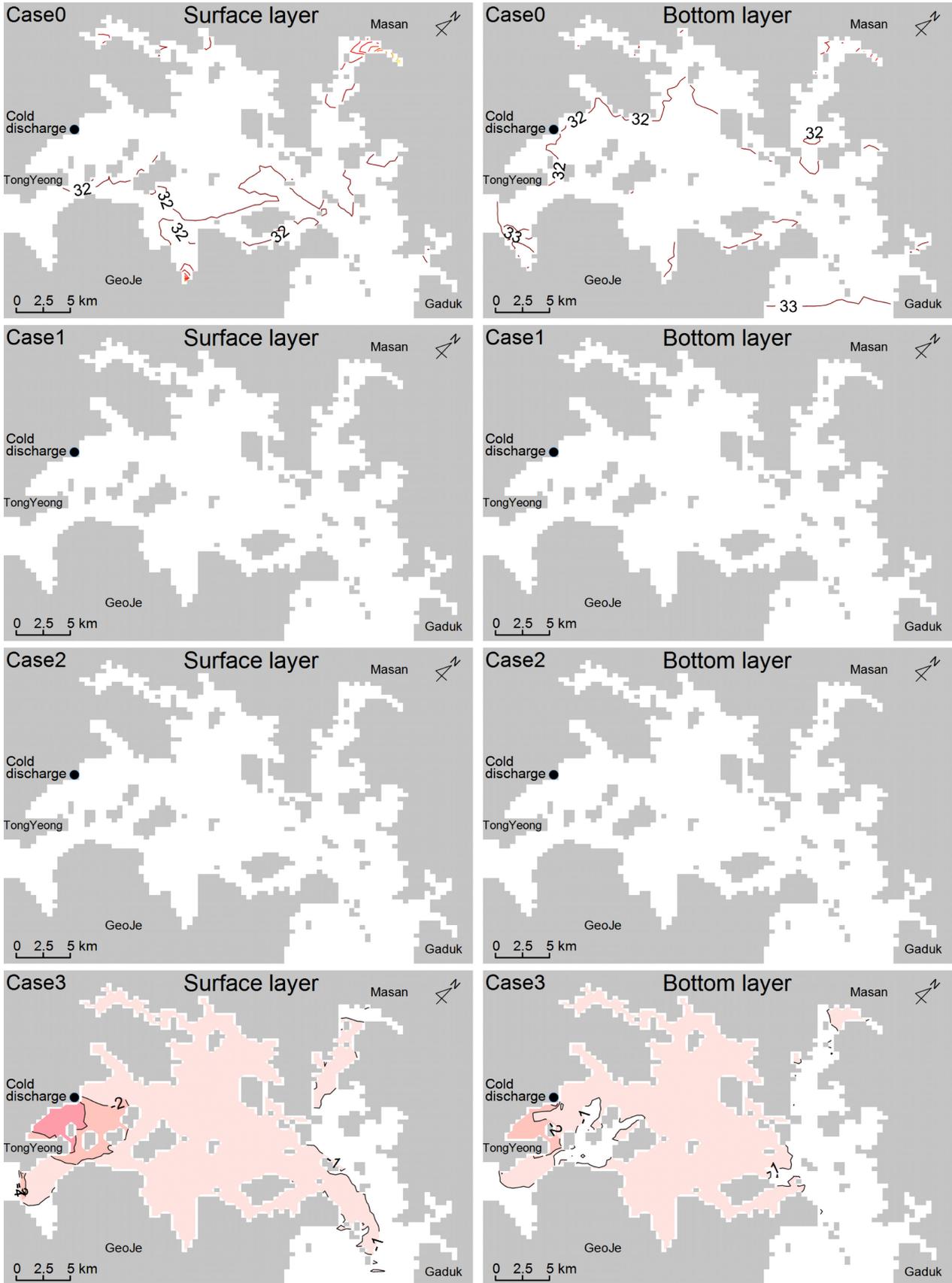


Fig. 7. Salinity distribution of Case0 and deviation for Case0 of Case1~Case3 in Aug. (psu).

[1981]). SS는 0과 1 사이의 값을 가지며 1에 가까울수록 계산값과 관측값이 잘 일치함을 의미한다. 수온·염분 검증 결과, 수온의 목적함수는 $R^2=0.96$, $SS=0.99$ 이며, 염분은 $R^2=0.74$, $SS=0.93$ 으로 나타나 높은 재현성을 확인하였다(Fig. 3). 시계열 비교 결과, 수온·염분의 계절적 변화가 잘 일치하였다(Fig. 4).

3.2 유동 모델 결과

냉배수 방류에 의한 성층강도 및 DO 변화는 8월에서 가장 크게 나타났다. 이에 따라 냉배수 방류로 인한 진해만의 잔차류, 수온, 염분 변화의 8월 결과를 Fig. 5~7에 나타내었다. 수온 및 염분 결과는 대조기 저조 결과를 나타내었으며, 잔차류는 대조기 저조를 기준으로 약 한 달간의 유동을 시간 적분한 후 평균치로 나타내었다. 본 결과의 잔차류는 조석잔차류, 취송류, 밀도류, 편향력을 포함한다. 냉배수 방류가 고려된 Case1~Case3의 결과는 미방류조건인 Case0과의 상대적인 편차로 나타내었다.

8월 Case0의 표층 잔차류는 거제-가덕 수로에서 약 10~20 cm sec⁻¹의 유속범위로 만 내부로의 흐름을 보였으며, 통영-거제 수로에서는 만 외부로 유출하는 흐름이 나타났다(Fig. 5). 이는 우세한 남동풍의 영향으로 인한 결과로 판단된다. 저층 잔차류는 통영-거제 수로에서 만 내부로 유입하는 흐름을 보였다. 이는 표층 잔차류의

향류(Counter current)로 판단된다. 냉배수 방류로 인한 Case1의 잔차류 변화는 나타나지 않았으며, Case2의 표층 잔차류는 평균적으로 약 0.1 cm sec⁻¹의 유속으로 만 외부로의 흐름이 미미하게 강해진 결과를 보였다. 이는 냉배수 방류에 의해 만의 흐름 구조가 변화하여 나타난 결과로 판단된다. Case3의 표층 잔차류는 평균적으로 약 2.3 cm sec⁻¹ 유속으로 만 외부로의 흐름이 강해지는 결과를 보였다.

Case0의 표층과 저층 수온은 각각 26.4~32.6 °C, 22.3~31.7 °C의 범위를 보였다(Fig. 6). 표층은 양측 수로에서 상대적으로 낮은 수온을 보였으며, 저층에서는 수심이 깊은 만 중앙부에서 낮은 수온 분포를 나타냈다. 냉배수 방류로 인한 Case1의 수온 감소는 관측되지 않았으며, Case2의 경우 방류구 반경 0.5 km 범위에서 1 °C 이내의 수온 감소만을 보였다. Case3의 표층 수온은 방류구 반경 0.5 km 범위에서 약 5 °C의 수온이 감소하였으며, 냉배수가 진해만 전 해역으로 확산하는 결과를 보였다. 저층 수온은 방류구 반경 0.5 km 범위에서 약 2~4 °C 감소하여 표층에 비하여 냉배수의 영향이 다소 약하게 나타났다.

Case0의 표층과 저층 염분은 각각 18.5~32.9 psu, 27.1~33.2 psu의 범위를 보였다(Fig. 7). 주로 하천 유입량이 많은 R1과 R8 지점에서 낮은 염분이 관측되었다. Case1과 Case2에서는 냉배수 방류로 인한 염분 변화가 관측되지 않았다. 반면 Case3에서는 전 해역의

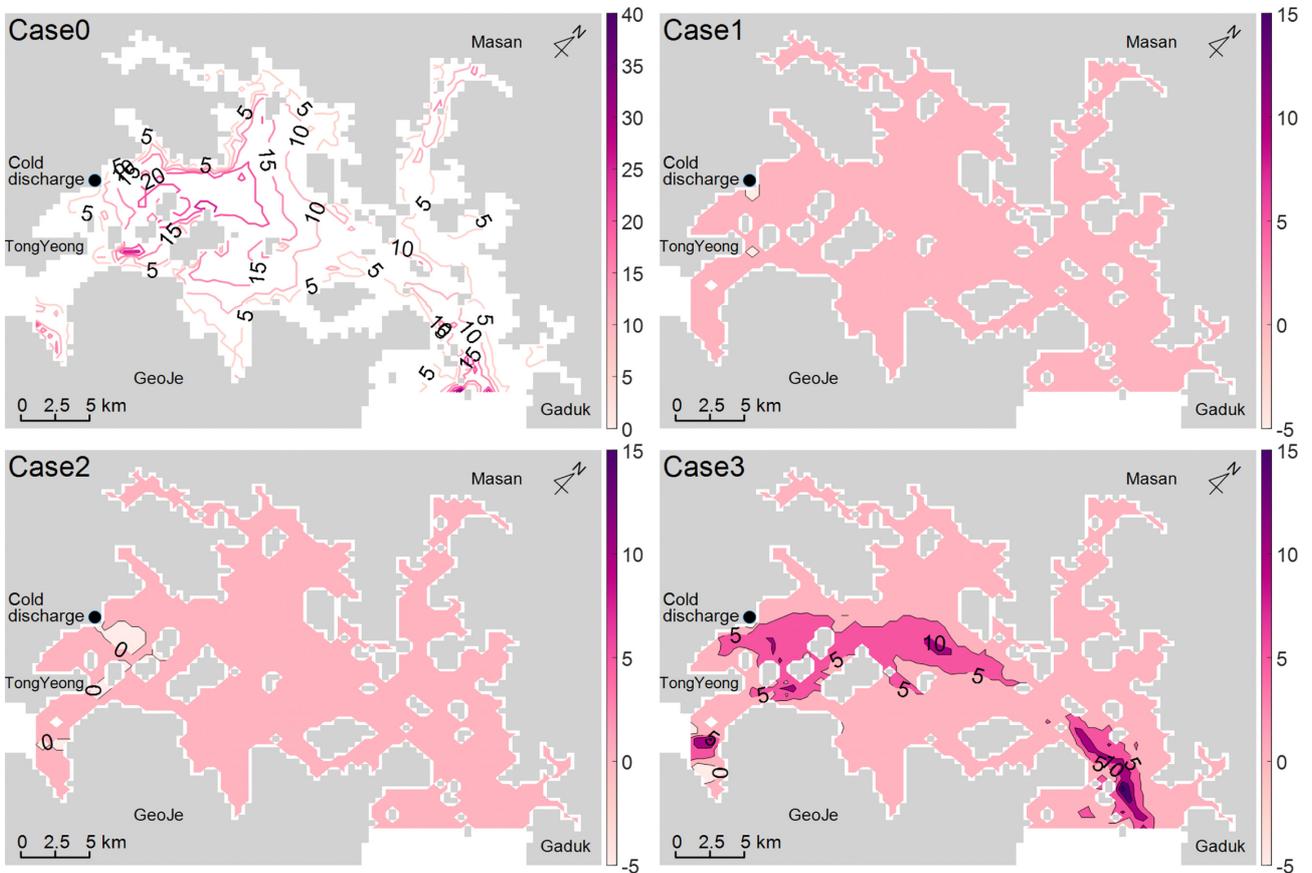


Fig. 8. The PEA distribution of Case0 and deviation for Case0 of Case1~Case3 in Aug. ($J m^{-3}$).

평균 염분이 약 0.4 psu 감소하는 결과가 나타났는데, 이는 다량의 냉배수 방류로 만의 흐름 구조가 변하면서 만 외부로의 염분수송이 발생하였기 때문으로 판단된다.

3.3 성층강도

본 연구에서는 해역의 성층강도를 나타내는 파라미터로 PEA를 사용하였다(식 (2)). 8월 Case0의 PEA 분포와 Case0에 대한 Case1~Case3의 상대적인 편차를 Fig. 8에 나타내었다. Case0의 PEA는 상대적으로 수심이 깊은 만의 중앙부와 거제-가덕 수로에서 20 J m^{-3} 이상으로 나타나 강한 성층이 형성된 것을 확인할 수 있다(Fig. 8). 이는 진해만에서 하계의 집중호우 등으로 인해 강한 성층이 형성된다는 기존의 다른 연구 결과들과 일치한다(Lim[2019]; Son et al.[2012]). Case1과 Case2에서 냉배수 방류에 의한 PEA 변화는 관측되지 않았다. Case3의 경우 냉배수 방류로 인해 PEA는 주로 증가하는 것으로 확인되었다. 방류구~거제-가덕 수로 구간(약 104 km^2)에서 5 J m^{-3} 이상 PEA가 증가하였다. 특히 거제-가덕 수로 부근(35.04°N , 128.77°E ; 1.5 km^2)에서는 $15.0\sim 23.2 \text{ J m}^{-3}$ 의 PEA 증가가 확인되었다. 이러한 PEA의 증가는 냉배수 방류로 인한 밀도 구조(density profile) 변화에 기인한다. 표층의 밀도 감소는 PEA를 증가시키는 반면 저층의 밀도 감소는 PEA를 감소시킨다. 만의

중앙부(TS24)와 거제-가덕 수로(TS17)의 Case0과 Case3의 'potential density profile'과 PEA 그래프를 Fig. 9에 나타내었다. Case3에서 냉배수 방류에 의한 TS24 정점의 밀도는 전 층에서 감소하였는데 특히 표층의 밀도 감소가 상대적으로 크게 나타났기 때문에 약 5 J m^{-3} 의 PEA가 증가한 것으로 판단된다(Fig. 9). Case3의 TS17 정점 PEA 증가는 약 10 J m^{-3} 로 TS24 정점보다 상대적으로 크게 나타났다. 이는 냉배수 방류로 인해 밀도가 표층에서 감소하고 저층에서는 증가하면서 PEA 증가가 극대화되었기 때문으로 판단된다.

3.4 용존산소농도

냉배수 방류에 따른 DO 변화를 예측하기 위해 가우시안 과정 회귀분석(Gaussian Process Regression, GPR)을 진행하였다. GPR의 기계학습과 검증에는 국립수산물학원(National Fisheries Research and Development Institute)의 어장환경모니터링 자료를 취득하여 사용하였다. 총 11년간(2009.02.~2019.12.) 표층과 저층에서 관측된 수심, 수온, 염분 등을 포함한 30종류의 환경 변수($n=1641$)를 특징(feature)으로 하여 DO 예측 모델의 기계학습($n=1479$)과 검증($n=162$)을 진행하였다. 모델 검증 결과, 표층과 저층에서 R^2 는 각각 0.91, 0.92이며, RMSE(Root Mean Square Error)는 0.43, 0.81로 높은 재현성을 보였다(Fig. 10).

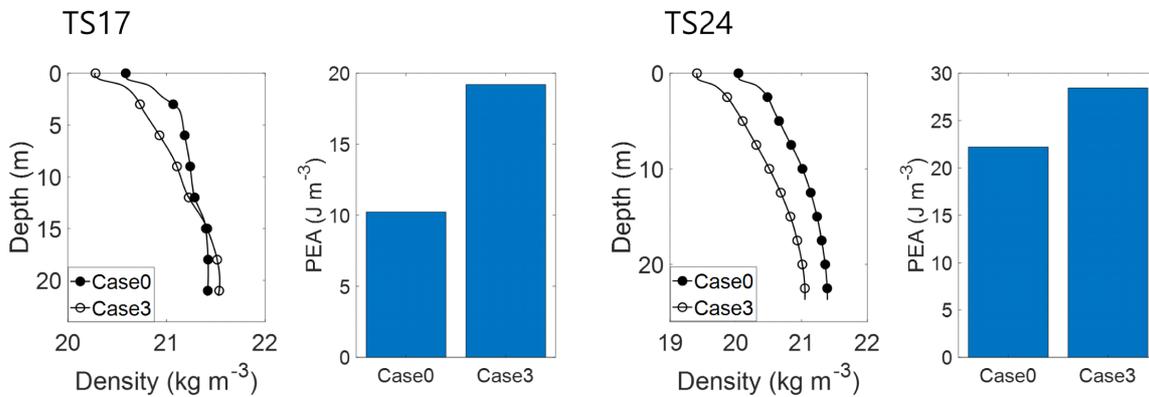


Fig. 9. The potential density profile and PEA for Case0 and Case3 at Ts17, TS24 in Aug.

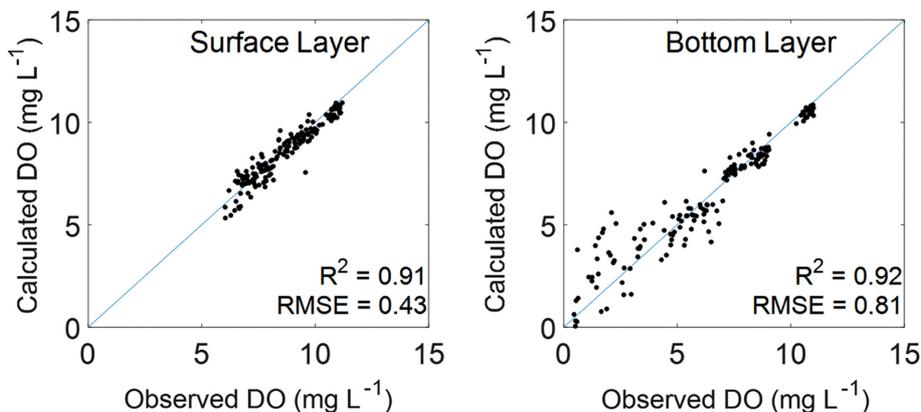


Fig. 10. Scatter plots between observed and calculated DO at Surface and Bottom Layers.

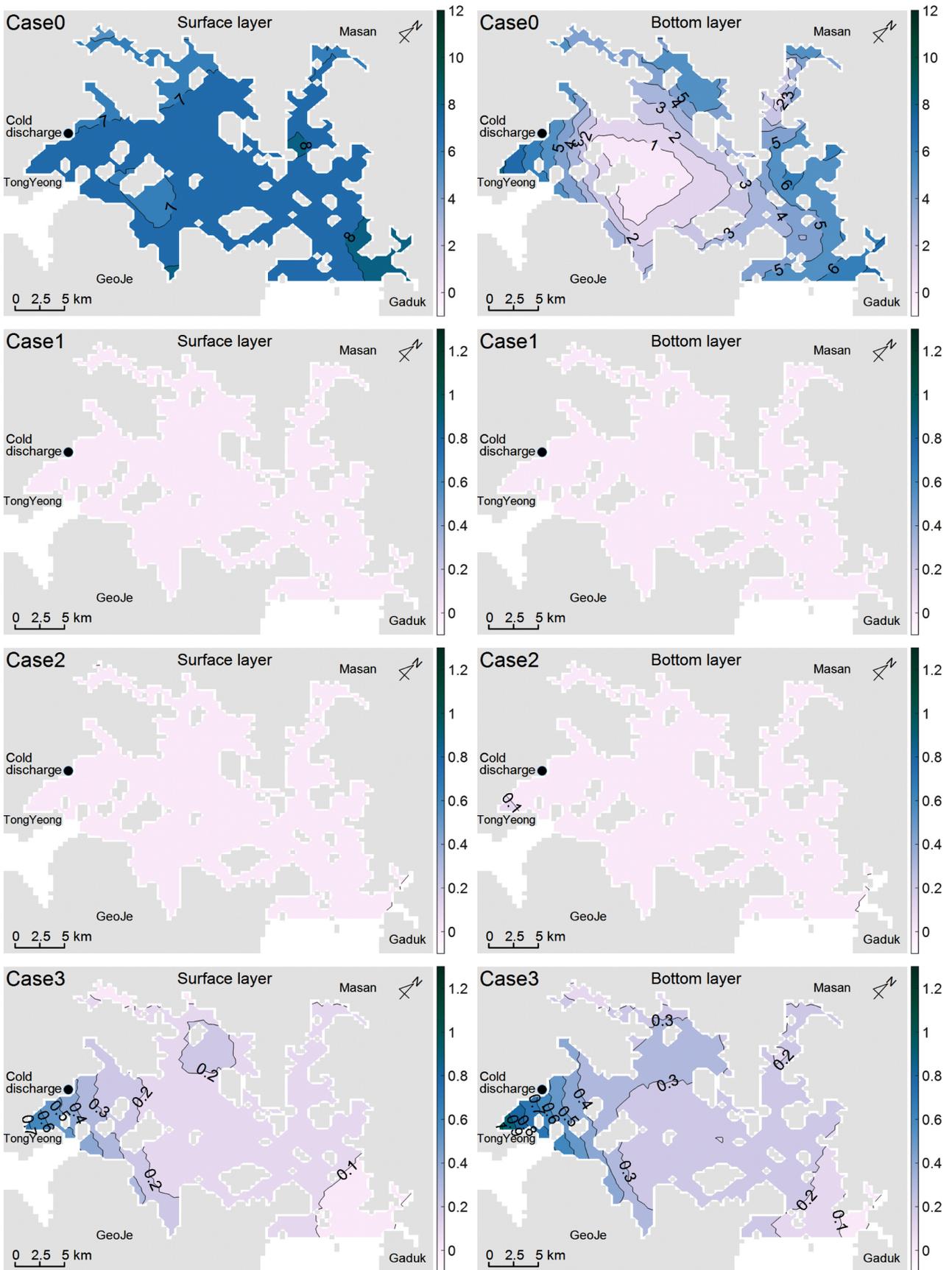


Fig. 11. DO distribution of Case0 and deviation for Case0 of Case1~Case3 in Aug. (mg L^{-1}).

검증된 DO 예측 모델에 해양환경측정망의 환경 변수와 유동 모델의 수온 결과치를 입력자료로 하여 Case별 냉배수 방류에 의한 DO 변화를 예측하였다. 8월 Case0의 DO 분포와 Case0에 대한 Case1~Case3의 상대적인 편차를 Fig. 11에 나타내었다. Case0의 표층 DO는 약 7~8 mg L⁻¹의 균일한 분포를 보였다(Fig. 11). 반면, 저층 DO는 0.3~8.5 mg L⁻¹로 해역별 편차가 크게 나타났다. 주로 수심이 깊은 만 중앙부와 마산만 일부 지역에서 2 mg L⁻¹ 이하의 빈산소수괴 형성이 예측되었다. 이는 만 중앙부에 형성된 성층으로 인해 저층으로의 DO 공급이 차단되어 발생한 결과로 판단된다. Case1과 Case2에서 냉배수 방류에 의한 DO 변화는 관측되지 않았다. Case3에서는 냉배수 방류로 인해 DO가 증가하는 결과를 보였으며, 진해만 남서부해역에 근접할수록 DO 증가가 크게 나타났다. 특히 냉배수 방류로 인해 수온이 약 3 °C 감소한 통영 연안(34.88°N, 128.42°E)의 표층과 저층에서 각각 최대 0.7, 1.0 mg L⁻¹의 DO 증가가 확인되었다. 이는 냉배수 방류로 인한 수온 감소로 DO가 증가한 것으로 판단되며, DO 변화에 미치는 수온 감소의 영향이 성층 강화로 인한 영향보다 큰 것으로 추론된다.

4. 결 론

본 연구에서는 통영 LNG 기지에서 방류되는 냉배수에 의한 하계 진해만의 물리적 특성 및 DO 변화를 조사하였다. 실제 방류량 조건인 Case1(10 m³ sec⁻¹) 모의 결과, 냉배수 방류로 인한 진해만의 환경변화는 관측되지 않았다. 모의 조건인 Case2(100 m³ sec⁻¹)에서는 방류구 반경 0.5 km 범위에서 약 1°C의 미미한 수온 감소만을 보였다. Case3(1000 m³ sec⁻¹)의 경우 방류구 반경 0.5 km 범위에서 약 4~5 °C의 수온 감소가 확인되었으며, 냉배수가 진해만 전 해역으로 확산하는 결과를 보였다. 수온 감소에 따라 PEA와 DO는 증가하였는데, PEA는 거제-가덕 수로에서 최대 23.2 J m⁻³, DO는 통영 연안에서 최대 1.0 mg L⁻¹ 증가하는 것으로 예측되었다.

상기 결과로부터 통영 LNG 기지에서 실제 방류되는 냉배수가 진해만에 미치는 영향은 매우 미미하지만, 방류량이 많아질 경우 빈산소수괴 해소에 효과적임을 확인하였다. 본 연구의 결과는 향후 빈산소수괴 해소를 위해 냉배수를 활용하기 위한 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2021학년도 부경대학교 연구년 교원 지원사업에 의하여 연구되었음.

References

[1] Choi, H.B., 2009, Numerical Experiments of Thermal Effluent using the 3-D Ocean Circulation Model, M.S. thesis, Dept. Ocean Eng., Chonnam Univ., Chonnam, South Korea.

[2] Doney, S.C., 2006, Plankton in a warmer world, *Nature*, 444, 695-696.

[3] Eaton, M.L., 1983, *Multivariate Statistics: a Vector Space Approach*. John Wiley and Sons, 116-117.

[4] Fondriest Environmental, Inc., "Dissolved Oxygen." *Fundamentals of Environmental Measurements*. <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/dissolved-oxygen/>, 2013.

[5] Hong, S.H., 2016, The characteristic of tidal current and temperature in Jinhae Bay by Numerical Model Experiments, M.S. thesis, Dept. Environ. oceanogr., Chonnam Univ, South Korea.

[6] Kim, J.K. and Kim, J.H., 2001, Diffusion Modelling of Cold Discharge on Coastal waters, *Jour. Fish. Mar. Sci. Edu.*, 13, 132-145.

[7] Kim, K.M., 2011, Structure of Phytoplankton Community by Cold Discharge in the Western Jinhae Bay, M.S. thesis, Dept. Fisheries Biology, Pukyong National Univ., Busan, South Korea.

[8] Kim, S.J., 2000, Effects of Cold Discharge on Marine Ecosystems, *J. Ins. Mar. ind.*, 13, 20-31.

[9] Korea Hydrographic and Oceanographic Agency, Real-time maritime observation information system (실시간해양관측정보시스템), <http://www.khoa.go.kr/oceangrid/koofs/kor/tide/tbm.do>, 2020.

[10] Korea Meteorological Administration, Automated Synoptic Observing System(ASOS), <https://data.kma.go.kr/data/grnd/selectAsosRltmList.do?pgmNo=36>, 2020.

[11] Lim, J.H., 2019, Coastal Hypoxia in the Jinhae Bay: Its Mechanism, Saptiotemporal Variability, and Biogeochemical Implications, Ph.D. dissertation, Dept. oceanogr., Busan Univ., South Korea.

[12] MacKenzie, L. and Adamson, J., 2004, Water column stratification and the spatial and temporal distribution of phytoplankton biomass in Tasman Bay, New Zealand: Implications for aquaculture, *Z. J. of Mar. and Freshw. Res.*, 38(4), 705-728.

[13] Madala, R.V. and Piacsek, S.A., 1977, A semi-implicit numerical model for baroclinic oceans, *J. Comput. Phys.*, 23, 167-178.

[14] Marine Environmental Information System, Marine Environment Observation & Survey(해양환경 관측&조사), <https://www.meis.go.kr/mei/observe/port.do>, 2020.

[15] National Council on Climate and Air Quality, 2020, Mid/Long-Term National Policy Proposal Report(중장기 국민정책제안보고서).

[16] National Fisheries Research and Development Institute, Monitoring the Fishing Environment(어장환경모니터링), <http://www.nifs.go.kr/femo/>, 2020.

[17] Oey, L.Y., Mellor, G.L. and Hires, R.I., 1985, A three-dimensional simulation of the Hudson-Raritan Estuary. Part I: description of the model and model simulations, *J. Phys. Oceanogr.*, 15, 1676-1692.

[18] Park, J. and Ra, B., 2014, Positive Research About Water Aeration Improvement to Break Thermal Stratification of Dam, *Int. J. of Fluid Mach. Syst.*, 17(5), 37-42.

- [19] Seo, D.I., 1998, Stratification Characteristics and Water Quality Management Strategies of Daechung Lake, *J. of Korean Soc. Environ. Eng.*, 20(9), 1219-1234.
- [20] Simon, J.D.P., 2012, *Computer Vision: Models, Learning, and Inference*. Cambridge University Press.
- [21] Simons, T.J., 1974, Verification of numerical models of Lake Ontario. Part I, circulation in spring and early summer, *J. Phys. Oceanogr.*, 4, 507-523.
- [22] Simpson, J.H., Crisp, D.J. and Hearn, C., 1981, The shelf-sea fronts: implications of their existence and behaviour, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 302, 531-546.
- [23] Son, M., Hyun, B.G., Kim, D.S., Choi, H.W., Kim, Y.O. and Baek, S.H., 2012, The Correlation between Environmental Factors and Phytoplankton Communities in Spring and Summer Stratified Water-column at Jinhae Bay, Korea, *Korean J. Environ. Biol.*, 30(3), 219-230.
- [24] Wetzel, R.G., 2001, *Limnology: Lake and River Ecosystems*, 3rd ed.. San Diego, CA: Academic Press.
- [25] Willmott, C.J., 1981, On the Validation of Models, *Phys. Geogr.*, 2, 184-194.
- [26] Yamaguchi, R., Suga, T., Richards, K.J. and Qiu, B., 2019, Diagnosing the development of seasonal stratification using the potential energy anomaly in the North Pacific, *Climate Dyn.*, 53, 4667-4681.
- [27] Yoon, S. and Kasai, A., 2017, Relative contributions of external forcing factors to circulation and hydrographic properties in a micro-tidal bay, *Estuar., Coast. and Shelf Sci.*, 198, 225-235.

Received 4 May 2021

Revised 16 June 2021

Accepted 14 July 2021