

해상어류가두리양식장 기원 유기물 영향범위 예측을 위한 해수유동 모델링 - Delft3D

정우성¹ · 조창우² · 이원찬³ · 김동명⁴ · 홍석진^{5,†}¹(주)지오시스템리서치 수치모델사업부 선임²(주)지오시스템리서치 수치모델사업부 책임³국립수산과학원 어장환경과 과장⁴부경대학교 생태공학과 교수⁵국립수산과학원 어장환경과 연구사

Hydrodynamic Modeling to Predict the Impact Range of Organisms from Marine Fish Cage Farms - Delft3D

Woo Sung Jung¹, Chang Woo Cho², Won Chan Lee³, Dong Myung Kim⁴, and Sok Jin Hong^{5,†}¹Senior Engineer, Department of Numerical Modeling, Geosystem Research Corporation, Gunpo, Gyeonggi 15807, Korea²Principal Engineer, Department of Numerical Modeling, Geosystem Research Corporation, Gunpo, Gyeonggi 15807, Korea³Director, Marine Environmental Management Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea⁴Professor, Department of Ecological Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea⁵Scientific Officer, Marine Environmental Management Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

요 약

해상어류가두리양식장은 어류 분변 및 미섭이 사료와 같은 유기물 발생에 의해 환경문제가 발생하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 관리방안을 도출하기 위해 모델링은 유용한 수단으로 사용되고 있다. 본 연구는 어류가두리양식장 기원 유기물의 영향범위 예측을 위한 기반 연구로 Delft3D 모델을 사용하여 양식장 인근 해수유동을 재현하는 것이 목적이다. 효율적인 격자구축을 위해 nesting-grid 및 DD-boundary 기법을 사용하였으며, 양식장 시설물 저항에 따른 유동변화를 재현하기 위해 porous-plate 기능을 사용하였다. 연구결과 양식장 시설물 저항을 고려하면 양식장 인근의 유동장을 잘 재현할 수 있었다. 시설물이 위치한 구역의 전층 평균유속은 창조시에 -58.80% 변화하였고 낙조시에는 -62.63% 변하는 것으로 나타났다. 본 연구방법은 양식장 시설물이 위치한 해역을 대상으로 해수유동 모델링을 수행할 경우 유용한 수단이 될 것으로 기대된다.

Abstract – Marine fish cage farms are causing environmental problems due to the generation of organic matter such as fish feces and wasted feed. Modeling is used as a useful tool to derive management plans to solve these problems. This study is to reproduce the hydrodynamic flow near the fish farm by using the Delft3D model as a basic study for predicting the impact range of organic matter caused by marine fish cage farms. The nesting-grid and DD-boundary methods were used for efficient grid construction, and the porous-plate tool was used to reproduce the hydrodynamic change according to the farm facility resistance. As a result of the study, the hydrodynamic flow near the farm could be well reproduced when the farm facility resistance was considered. The average velocity across the entire layer in the area where the farm facilities are located was found to change by -58.80% during flood tide and -62.63% during ebb tide. This study method is expected to be a useful tool when performing hydrodynamic modeling for the sea area where farm facilities are located.

Keywords: Marine Fish Cage Farm(해상어류가두리양식장), Hydrodynamic Modeling(해수유동 모델링), Farm Facility Resistance(양식장 시설물 저항), Grid construction(격자구성)

[†]Corresponding author: 71sj@korea.kr

1. 서 론

사료를 공급하는 해상 어류가두리양식장은 어류 분변 및 미섭이 사료와 같은 입자 유기물을 배출한다. 이러한 유기물은 가라 앉아 최종적으로 퇴적층에 침전되는데(Silvert and Sowles[1996]; Fernandes *et al.*[2007]), 침전된 유기물은 저층 퇴적물의 산소를 소비하여 무기 영양분을 배출한다. 이는 부영양화와 산소고갈을 발생시켜 인근 해역의 수질에 영향을 미칠수 있으며(Hevia *et al.*[1996]; Page *et al.*[2005]; Skogen *et al.*[2009]), 극도의 혐기성 조건을 발생시켜 퇴적물과 저서생물상 구조에 변화를 줄 수 있다(Pearson and Black[2001]; Islam[2005]; Hargrave[2010]). 이러한 문제들은 양식개발을 제한하는 중요한 요인으로 알려져 있다(Page *et al.*[2005]; Giles *et al.*[2009]; Navas *et al.*[2011]; Sanz-Lázaro *et al.*[2011]).

가두리에서 배출되는 유기물은 입자의 특성(침강속도, 분해율 등), 가두리 시설물 특성(유속 변화) 및 유동특성(이류-확산, 재부유 등)에 따라 해양환경에 미치는 영향정도와 범위가 달라지게 된다. 따라서, 어류 가두리 인근 해양 환경관리를 위해서는 입자 유기물의 영향범위와 해수흐름에 따른 축적 정도, 퇴적물의 농도 등 정확한 현장 관측을 통해 얻은 결과를 통합하여 관리방안을 마련할 필요가 있다.

현상 재현 및 예측을 통해 관리방안 마련이 가능한 모델링은 유용한 도구로 사용되고 있다. 현재 유기물 관리방안 마련을 위해 사용되는 DEPOMOD(Cromey *et al.*[2002])의 경우 가장 널리 사용되고 있는 모델 중 하나이며, 국내에서는 유일하게 Kwon *et al.*[2005]이 DEPOMOD를 사용한 사례가 있다. 하지만 DEPOMOD는 수평적으로 동일한 유동장을 사용하는 것이 일반적이는데, 이는 유기물 침강량 및 영향범위를 과대 또는 과소평가할 수 있는 단점이 존재한다(Broch *et al.*[2017]). 이러한 문제점을 해결하기 위해 Broch *et al.*[2017]은 시-공간적 해상도를 고려한 3차원 모델에서 계산된 유동장을 사용하였다. 더 나아가, 양식장 시설물의 저항효과에 의해 양식장 인근 해역의 유속이 변화하는데, 이는 양식장 기원 유기물의 영향범위를 결정하는 중요한 요인이다(Inoue[1972]; Grant and Bacher[2001]; Wu *et al.*[2014]). 이에 발맞추어 양식장 시설물 저항을 고려한 3차원 유동모델에 대한 연구가 진행되고 있다(Wu *et al.*[2014]; Zhang and Kitazawa[2015], Jung *et al.*[2020]). 따라서, 어류가두리양식장 기원 유기물의 거동에 대한 정밀한 재현 및 예측을 위해서는 어류가두리시설물 저항을 고려한 3차원 해수유동 모델링을 필수적으로 수행할 필요가 있다고 판단된다.

본 연구는 해상 어류가두리양식장 기원 유기물의 영향범위 예측을 위한 기반 연구로 어류가두리양식장 시설물 특성이 반영된 해수유동을 재현하는 것을 목적으로 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구해역

연구대상 지역은 경남 하동군 금남면 대치리 인근 해역에 위치

한 어류가두리양식장이다. 이곳은 승어를 중심으로 어류가두리양식이 이루어지며 12 m × 12 m 크기의 양식장이 약 108개가 배치되어 있다. 양식장이 위치한 해역 수심은 약 11 m~16 m 이며 양식장 중심부에서 남서쪽으로 갈수록 수심이 깊어지는 형태를 나타내고 있다(Fig. 1(b-c)).

2.2 모델 검증

해수유동모델 결과의 신뢰성 확보를 위한 검증을 실시하였다. 검증 항목은 조석, 조류, 수온 및 염분이다(Table 1). 조석은 국립해양조사원(KHOA)에서 제공하는 광양, 여수, 삼천포 및 통영 조위관측소 자료와 국립수산과학원(NIFS)에서 조사를 실시한 하동양식장(HD-OUT) 자료를 사용하였다(Fig. 1(a)). 조류는 하동 양식장 내·외측(HD-IN, HD-OUT)에서 조사된 자료를 사용하였으며(Fig. 1(c)), 양식장 내측은 표·저층, 양식장 외측은 표·중·저층 자료에 대한 검증을 실시하였다. 조류검정시 모델에서의 수직적 검정위치는 관측자료의 깊이를 고려하여 양식장 내측은 2 layer(표층)와 10 layer(저층)이며, 양식장 외측은 3 layer(표층), 6 layer(중층), 10 layer(저층)이다. 수온·염분은 여수, 삼천포, 통영 조위관측소의 표층자료에 대한 검증을 실시하였다.

모델 검증을 위해 Kim and Yoon[2011]이 제시한 오차평가방법(AAE, RMSE, RAAE, PME, CC, IA, MEF, CF)을 사용하였다.

2.3 해수유동모델 선정

Jung *et al.*[2020]은 EFDC(Environmental Fluid Dynamics Code) 모델을 사용하여 어류가두리양식장 시설물에 의한 유동변화를 재현하는 연구를 수행하였다. 어류가두리양식장 시설물의 특성을 반영하기 위해 미세격자(24 m × 24 m)를 사용하였으며, 시설물에 의한 저항을 고려하여야 해역의 유동특성을 잘 재현할 수 있다는 결과를 나타내었다. 하지만, 양식장 시설물을 표현하기 위한 미세격자가 양식장 시설물이 없는 해역까지 다수 포함되어 모델 계산시간 증가를 유발하며, 시설물 깊이만큼 저항이 발생하는 것이 아니라 시설물이 위치한 격자 전층에서 저항이 발생하도록 되어 있는 한계를 가진다. 미발표된 연구에서는 시설물 깊이만큼 저항이 발생하도록 EFDC 소스코드를 수정하였지만, 여전히 불필요한 미세격자가 다수 존재하는 문제를 가졌다. 따라서, 어류가두리양식장이 위치한 해역의 유동장을 재현하기 위해서는 위에서 제시한 한계점을 개선할 수 있는 모델이 필요하다고 판단되었다.

타 모델들을 검토한 후 본 연구에서는 Delft3D(<https://oss.deltares.nl/web/delft3d>)를 선정하였다. Delft3D 모델은 네덜란드 수자원 관리 연구소 Deltares에서 개발한 모델로 다양한 연구사례가 많으며 수직격자체계(σ -layer, Z-level) 선택, 격자병합, 다양한 수리구조물, Nesting grid 격자 구성, 반비정수압(pseudo-nonhydrostatic) 등 다양한 기능을 포함하는 장점을 가진다. 무엇보다도 Nesting grid 및 DD-boundary(Domain Decomposition) 기능을 활용한 효율적인 고해상도 격자구성과 투과성 수중 구조물(porous plate) 기능을 활용하여 시설물 저항에 의한 유동변화 계산이 가능한 점이 본 연구의

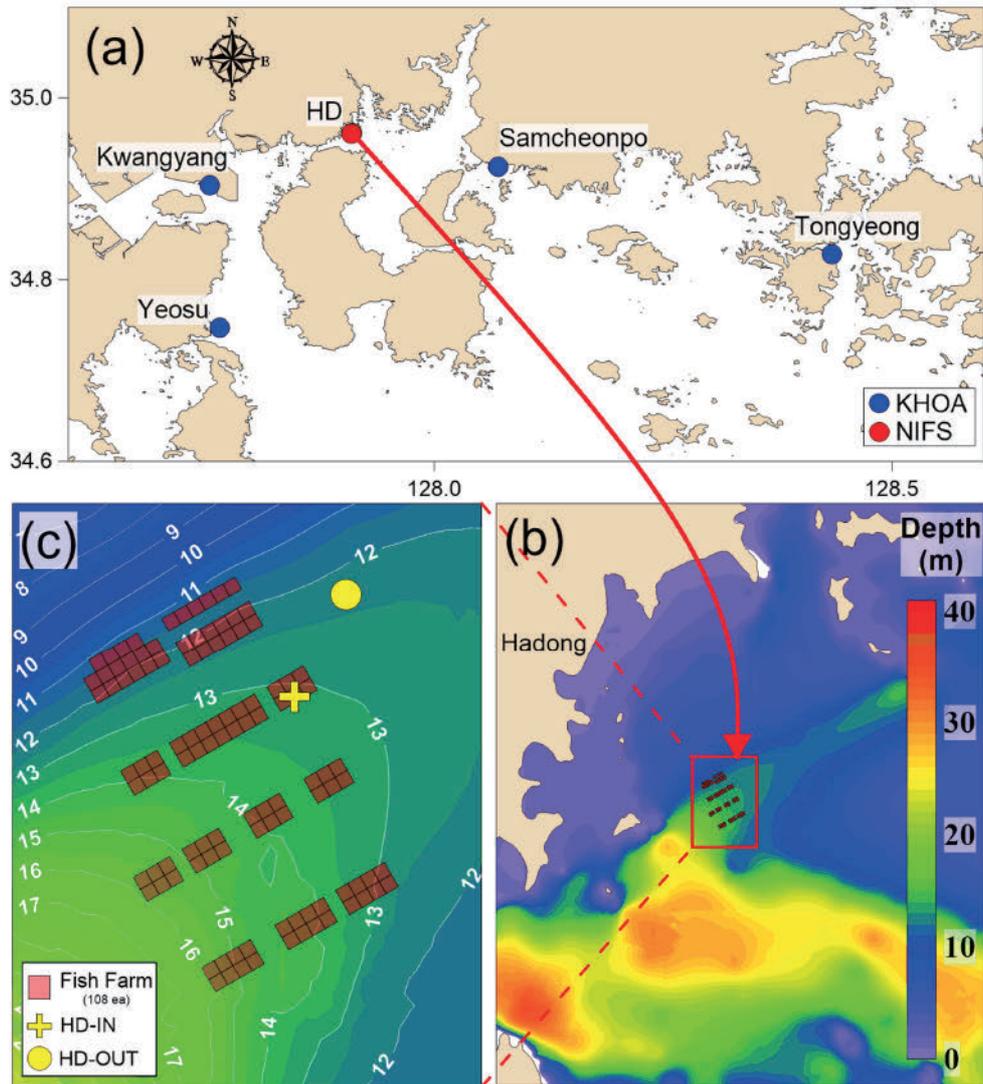


Fig. 1. Study area and validation points of hydrodynamic model. (a) all validation points, (b) depth and farm location of study area, (c) zoom-in view of study area, HD-IN and HD-OUT are expressed as HD in (a).

Table 1. Overview of hydrodynamic model validation data

Item	Validation point name	Location		Observation period	Observation frequency
		Latitude	Longitude.		
Tide	Kwangyang	34°54'13"	127°45'17"	21.01.03~21.02.02	1 hour
	Yeosu	34°44'50"	127°45'56"		
	Samcheonpo	34°55'27"	128°04'11"		
	Tongyeong	34°49'40"	128°26'05"		
	HD-OUT	34°57'42"	127°54'36"		
Tidal current	HD-IN	34°57'39"	127°54'34"	21.04.02~21.04.17	10 minute
	HD-OUT	34°57'42"	127°54'36"		
Temperature & Salinity	Yeosu	34°44'50"	127°45'56"	21.01.01 ~ 21.12.31	1 hour
	Samcheonpo	34°55'27"	128°04'11"		
	Tongyeong	34°49'40"	128°26'05"		

목적 달성을 위한 적합한 기능으로 판단되었다. 또한, 향후 진행할 어류가두리양식장에서 발생하는 유기물의 영향범위 및 정도를 재현 및 예측함에 있어 Delft3D-PART는 해수유동 결과와의 연계,

입자의 이류·분해·침강·재부유 등 다양한 기능이 포함되어 있는 강점을 가진다.

Table 2. Hydrodynamic model experiment outline

Item		Contents
Model		Delft3D
Calculation area	Level-1	108.2 km (east-west) × 84.0km (south-north)
	Level-2	8,859 m (east-west) × 8,232m (south-north)
	Level-3	2,518 m (east-west) × 3,145m (south-north)
	Level-4	1,425 m (east-west) × 1,445m (south-north)
Grid number	Level-1	80×78, effective grid : 2,460ea
	Level-2	32×25, effective grid : 288ea
	Level-3	36×43, effective grid : 925ea
	Level-4	86×91, effective grid : 7,650ea
Grid construction	Level-1	horizontal : approximately 800 m × 800 m vertical : 11 layer, σ
	Level-2	horizontal : 300 m × 300 m vertical : 11 layer, σ
	Level-3	horizontal : 60m × 60m vertical : 11 layer
	Level-4	horizontal : 12m × 12m vertical : 11 layer, σ
Depth condition		Numerical map + Topographic map + Precise topographic map around fish farm
Initial condition		cold start
Air-Sea heat exchange		LDAPS (Spatial distribution of temperature, humidity, total cloudiness, and barometric pressure hourly)
Wind condition		LDAPS (Spatial distribution of wind speed and direction hourly)
Boundary	Level-1	Tide : M_2, S_2, K_1, O_1, N_2 Temp & Sal : Yellow and East China Sea model result (MOF [2018])
	Level-2	Water level, temperature, salinity result of Level-1
Fishfarm	Number	108 ea
	Depth	5 m below sea level
Calculation period		365 day (2021.01.01.~2021.12.31.)

2.4 해수유동모델 구축

모델구축에 대한 개요는 Table 2에 나타내었다. 가두리양식장 시설표현 및 정밀한 유동장 재현을 위해 모델은 광역 및 협역모델로 총 4단계로 구성을 실시하였다. 수심의 경우 수치지도, 지형도, 양식장 인근 정밀수심자료를 사용하였다. 기상과 관련된 자료는 기상청에서 제공하는 LDAPS 모델 결과를 사용하였다. 광역모델의 조석 개방경계는 주요 5대 분조 값을 사용하였으며, 수온 및 염분 경계는 황동중국해를 대상으로 구축한 모델(MOF[2018])결과를 활용하였다. 양식장은 현장조사 및 인공위성 자료를 기반으로 배치하였으며, 각 양식장 시설물의 깊이는 5 m로 통일하였다. 계산기간은 365일로 2021년을 대상으로 한다. 격자구성 및 시설물 저항에 관련된 내용은 다음절에서 상세하게 설명된다.

2.4.1 격자구성

현장조사 결과에 따르면 하동 어류가두리양식장 1칸의 크기는 12 m × 12 m이며 깊이는 5 m이다. 양식장시설물을 정밀하게 표현하기 위해 모든 수평격자를 12 m × 12 m로 구성하는 것은 비효율적이기 때문에 Delft3D에 포함된 Nesting grid와 DD-boundary 기능을 사용하여 격자를 구축하였다. 이러한 기능을 사용한 사례는

Nguyen *et al.*[2011]; Hu *et al.*[2015]; Symonds *et al.*[2016] 등이 있다. Nesting grid 기능은 광역모델에서 계산된 조석, 조류, 수온, 염분 등을 상세역 모델의 개방경계 조건으로 사용하는 방법이다. 이 방법은 Jung *et al.*[2020] 연구보다 비효율적인 격자를 줄일 수 있는 장점을 가지나 모델의 안정성을 고려하여 구축할 경우 여전히 비효율적인 격자가 다수 존재하는 단점을 가진다. 이러한 한계점을 개선하기 위해 모델 domain별로 격자 크기를 자유롭게 구성하고 연계할 수 있는 Delft3D의 DD-boundary 기능을 추가적으로 사용하였다.

격자구성 결과는 Fig. 2에 나타나 있다. Fig. 2(a)는 광역모델로서 Level-1으로 표기하였으며 nesting grid 기법을 사용하는 상세역은 Fig. 2(b)에 나타낸바와 같이 Level-2로 표시하였다. Level-1의 결과는 Level-2의 경계조건으로 사용된다. 상세역 모델은 Level-2, Level-3(Fig. 2(c)), Level-4(Fig. 2(d))의 조합으로 구성되어 동시에 계산된다. Level-2-4는 점진적으로 격자크기가 감소하도록 구성되어 있다. Level-1은 약 800 m의 직교가변 격자이며, Level-2-4는 정방격자로 Level-2는 300 m, Level-3은 60 m, Level-4는 12 m로 구성하였다. 즉, Level-4는 가두리시설물 크기인 12 m × 12 m 격자이다. 모든 격자의 수직층은 시설물에 의한 층별 유속 변화를 상세히 재현하기 위하여 σ -layer를 사용하여 11개 층으로 구성하였다.

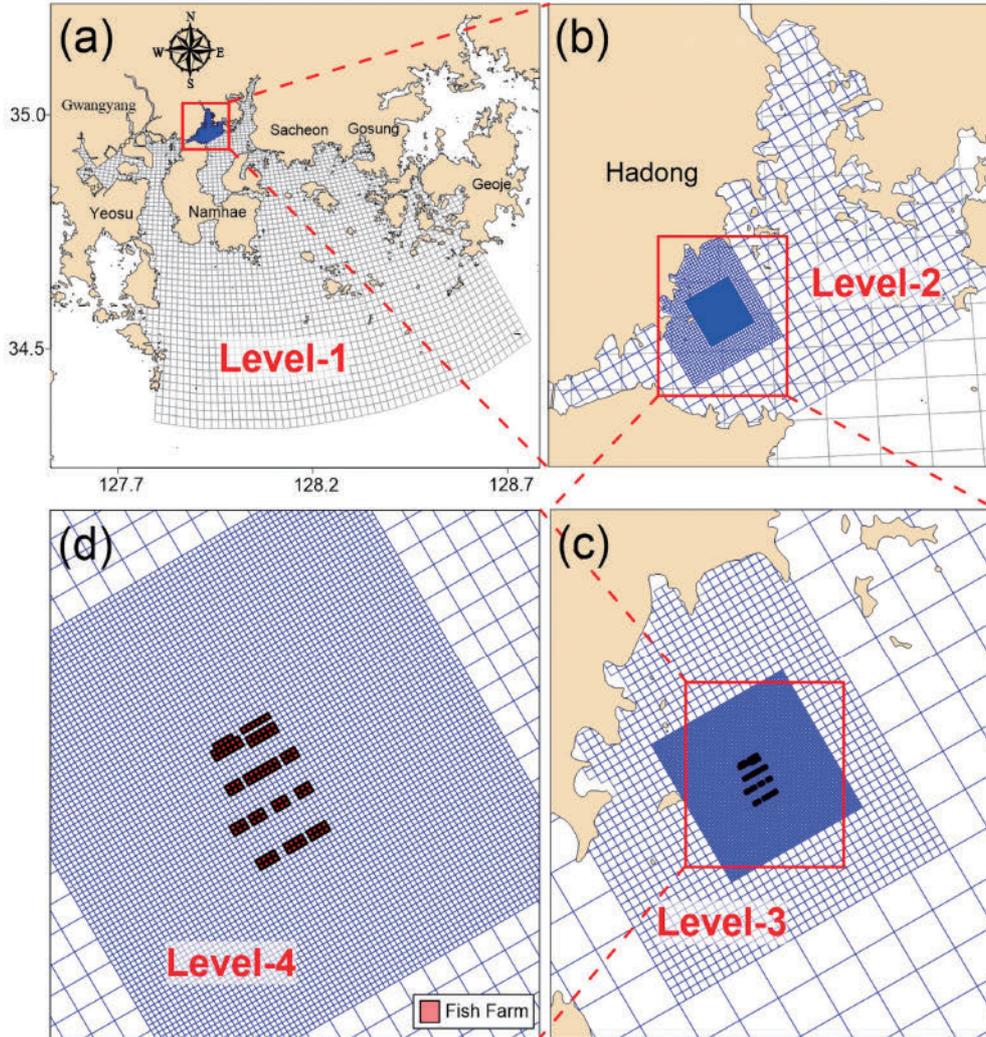


Fig. 2. Grid of hydrodynamic model (boundary data of Level-2 is result of Level-1 using nesting grid method. Level-2 ~ Level-4 are calculated simultaneously using DD-boundary method).

2.4.2 시설물 저항기능

실제 양식시설에 의한 유속감소는 물의 흐름을 완전히 막는 것이 아니라 그 정도를 감소시키거나 유향을 변하게 한다. Delft3D에 포함되어 있는 투과성 수중 구조물(porous plate) 기능은 이러한 현상을 모의하는 기능으로 본 연구에 적합하다고 판단된다. 이 기능은 운동방정식에 에너지 손실계수(C_{loss})를 고려하여 양식장 구조물을 모의하며, 구조물에 해당하는 모델 격자면의 유속을 감소시키고, 그로 인한 주변의 유속크기와 진행방향을 변화시킨다. Delft3D의 투과성 수중구조물 적용식은 다음과 같다.

$$M_{\xi(\eta)} = -C_{loss-U(V)} \frac{U(V)_{m,n} |\vec{U}_{m,n}|}{\Delta x(y)} \quad (1)$$

여기서 $M_{\xi(\eta)}$ = $\xi(\eta)$ 방향으로의 운동량 변화(m/s^2),
 $U(V)_{m,n}$ = 격자위치(m,n)에서 $\xi(\eta)$ 방향으로의 유속(m/s)
 $|\vec{U}_{m,n}|$ = 격자위치(m,n)에서 수평유속 벡터의 크기(m/s)
 $\Delta x(y)$ = 특정격자에서 x, y 방향으로의 격자크기(m)
 $C_{loss-U(V)}$ = $U(V)$ 에 대한 에너지 손실계수

$C_{loss-U(V)}$ 의 값이 커질수록 유속의 감소정도가 커진다. 투과성 수중구조물 기능을 활성화하기 위해 입력하는 정보는 격자의 위치, 수직격자 적용범위, 에너지 손실계수로 구성되어 있다.

연구해역에 투과성 수중구조물 기능을 적용하기 위해 실제 양식장 분포 및 위치를 확인하고 해당하는 위치와 일치하는 모델격자를 대상으로 시설물 저항기능을 활성화 하였다(Fig. 2(d)). 실제 현상과 동일하게 모든 양식장 격자의 사면에서 시설물 저항이 발생하도록 구성하였다. 입력하는 에너지 손실계수는 계산값과 모델값이 잘 일치하도록 모델 보-검정 과정을 통해 조절하여 10.0을 사용하였으며, 시설물 저항 수직방향 적용 범위는 개별 양식장 시설물의 깊이와 수심을 고려하여 각각 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 해수유동모델 검증

조석검정 결과는 Fig. 3, Table 3에 나타내었으며 Kim and

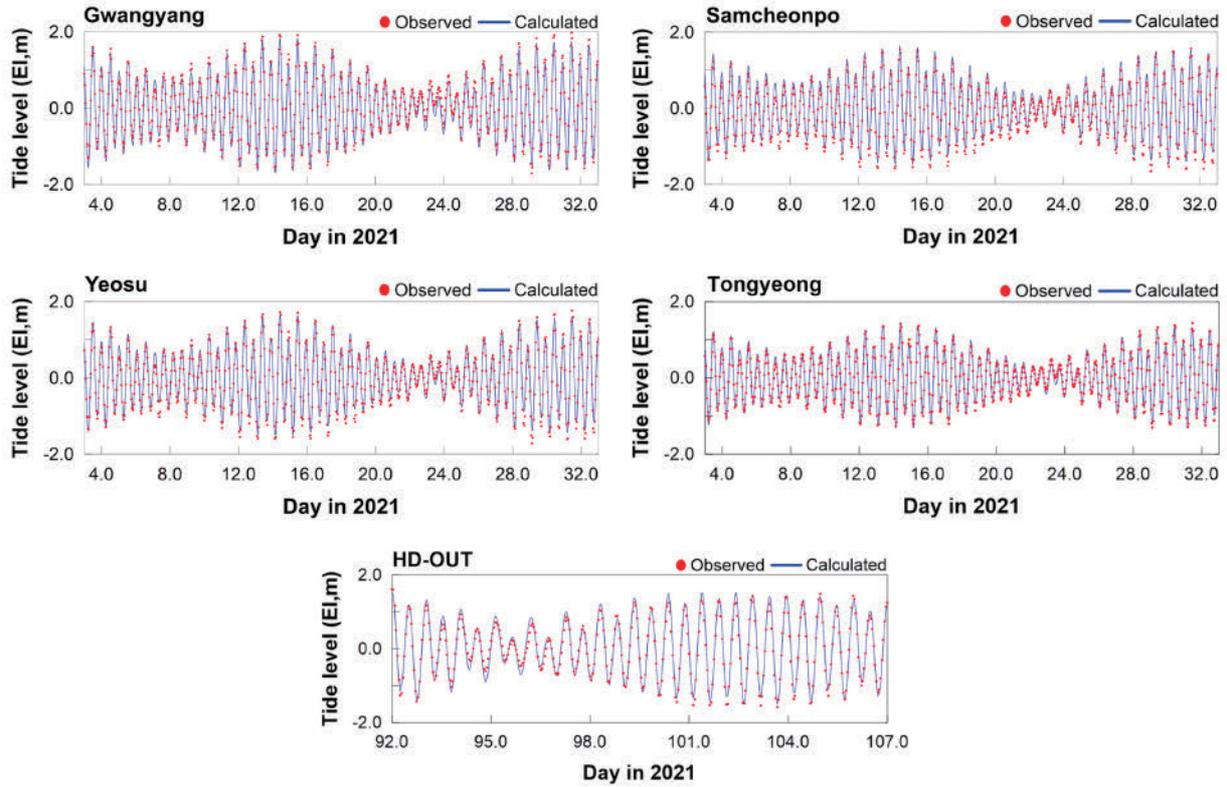


Fig. 3. Time-series comparison of tide level composed observed data (red circle) and calculated data (blue line).

Table 3. Result of various skill assessments for tide validation

Skill assessments	Gwangyang	Samcheonpo	Yeosu	Tongyeong	HD-OUT
AAE (cm)	0.08	0.13	0.06	0.03	0.13
RMSE (cm)	0.09	0.13	0.06	0.04	0.16
RAAE (%)	3.22	6.05	2.44	1.60	5.82
PME (%)	11.47	21.30	8.74	5.72	20.43
CC(-)	1.00	1.00	1.00	1.00	0.97
IA(-)	1.00	0.99	1.00	1.00	0.99
MEF(-)	0.99	0.97	0.99	1.00	0.96
CF(-)	0.10	0.18	0.07	0.05	0.17

***Bold:** Exceed the assessment range (Kim and Yoon[2011]) of well-reproduced hydrodynamic model

Yoon[2011]이 제시한 AAE(10% 이내), CC(0.95 이상), IA(0.98 이상), MEF(0.93 이상), CF(0.21 이내) 점정 기준값을 모두 만족하는 것으로 나타났다.

HD-IN 정점의 조류검정 결과는 Fig. 4와 Table 4에 HD-OUT 정점의 조류검정 결과는 Fig. 5와 Table 5에 나타내었다. Table 4와 Table 5에는 시설물 저항을 고려한 모델 계산값(α), 시설물 저항을 고려하지 않은 모델 계산값(β), 시설물 저항 고려 유무에 따른 모델 결과의 차이($\beta-\alpha$)값이 제시되어 있다. 조류검정에 대한 평가는 Kim and Yoon[2011]이 제시한 RAAE(20% 이내), CC(0.7 이상), IA(0.8 이상), MEF(0.5 이상), CF(0.5 이내) 항목에 대하여 실시하였다. HD-IN 정점의 U, V 성분의 시계열을 살펴보면 양식장 시설물 저항을 고려할 경우(α)가 고려하지 않을 경우(β)에 비해 일치성이 높은 것을 볼 수 있으며, 특히 시설물의 영향을 직접적으로 받는 표

층에서 그 정도가 뚜렷한 것을 볼 수 있다(Fig. 4). HD-IN 정점의 오차 평가 결과를 살펴보면 시설물 저항을 고려하지 않을 경우 오차가 크게 나타났으며 특히 표층의 경우 시설물 저항을 고려하지 않으면(β) 평가기준을 크게 벗어나는 것을 볼 수 있다(Table 4). HD-OUT 정점의 U, V 성분의 시계열 또한 양식장 시설물 저항을 고려할 경우(α)가 재현성이 더 좋았으며(Fig. 5), 시설물 저항 고려 유무에 따른 재현을 차이는 HD-IN 보다 적게 나타났다(Table, 5). 하지만, 정점 위치 및 평가항목에 따라 재현 평가범위를 벗어난 결과도 존재하였다. 이는 조류 관측 기간이 16일로 비교적 짧은 기간이라는 점과 격자구성이 양식장 시설물 특성을 완벽하게 반영하지 못한 부분에 의한 것으로 판단된다. 실제 양식장 크기는 12 m × 12 m 크기로 표준화되어 있으나, 가두리 시설물 배치에 따라 1~2 m 간격으로 띄어져 있는 부분이 존재하고 양식장 시설을 고정하기 위

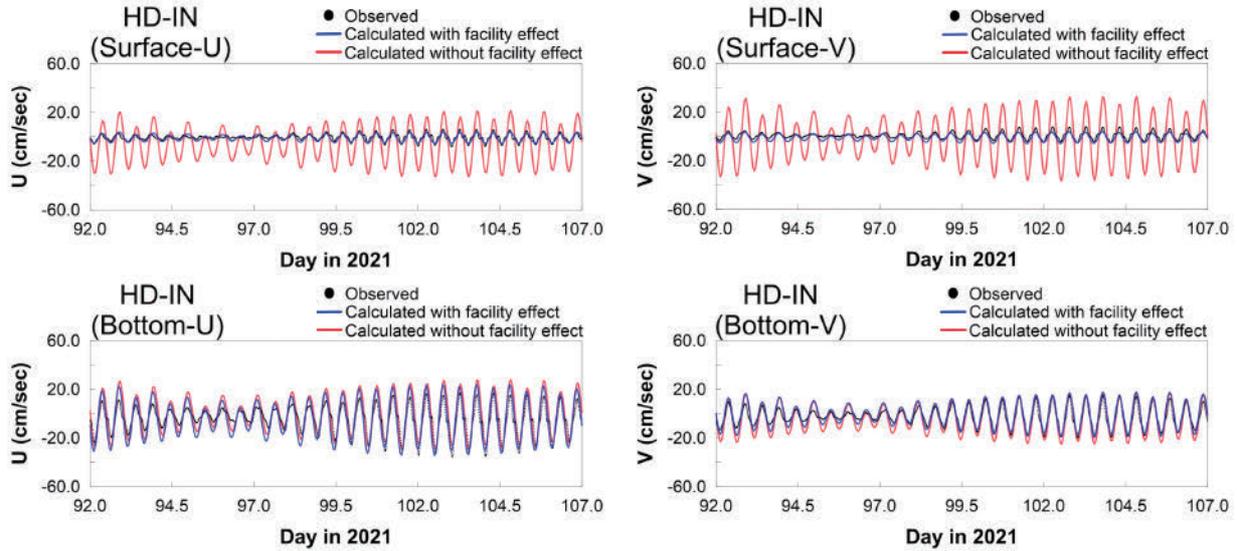


Fig. 4. Time-series comparison of velocity component composed observed data (black circle), calculated data with cage effect (blue line) and calculated data without cage effect (red line) at HD-IN point.

Table 4. Result of various skill assessments for tidal current validation at HD-IN point

Comparison point		Skill assessments							
		AAE (cm/s)	RMSE(cm/s)	RAAE(%)	PME(%)	CC(-)	IA(-)	MEF(-)	CF(-)
HD-IN (Surface-U)	α	1.14	1.60	15.50	68.73	0.82	0.90	0.60	0.52
	β	11.93	14.01	138.37	613.55	0.79	0.39	-29.27	4.69
	$\beta-\alpha$	10.79	12.41	122.87	544.82	-0.03	-0.51	-29.87	4.17
HD-IN (Surface-V)	α	1.77	2.10	22.08	83.53	0.90	0.86	0.37	0.67
	β	14.79	16.99	184.57	698.31	0.86	0.38	-40.53	5.61
	$\beta-\alpha$	13.02	14.89	162.49	614.78	-0.04	-0.48	-40.90	4.94
HD-IN (Bottom-U)	α	7.10	8.39	21.24	81.92	0.88	0.90	0.38	0.67
	β	6.64	8.28	19.85	76.57	0.91	0.90	0.39	0.63
	$\beta-\alpha$	-0.46	-0.11	-1.39	-5.35	0.03	0.00	0.01	-0.04
HD-IN (Bottom-V)	α	3.38	4.18	15.04	52.12	0.94	0.94	0.69	0.45
	β	4.59	5.51	20.43	70.80	0.93	0.94	0.46	0.61
	$\beta-\alpha$	1.21	1.33	5.39	18.68	-0.01	0.00	-0.23	0.16

***Bold**: Exceed the assessment range (Kim and Yoon[2011]) of well-reproduced hydrodynamic model

한 장치가 있음에도 창·낙조와 같은 해수흐름에 따라 양식장의 이동 및 그물망의 형태가 변화한다. 또한, 본 연구에서 시설물 저항에 관련된 손실계수는 일정한 값을 입력하였는데, 시설물 형태 외에도 양식하는 어류의 입식 수 및 크기에 따라라도 손실계수가 변할 수 있을 것이라 판단된다. 추가적으로, 현장조사시 동일한 양식장이라도 유속계 설치 위치에 따라 관측값이 다르며 어장시설물이 유속감소에 영향을 미치는 범위를 검증하기 위한 정점이 부족하기 때문에 관측정점을 늘려서 대표성을 확보해야 되는 과제도 남아있다.

수온·염분 검증 결과는 Fig. 6과 Table 6에 나타내었다. 염분 검증에 대한 평가는 Kim and Yoon[2011]이 제시한 RAAE(10% 이내), PME(10% 이내), CC(0.9 이상), CF(0.1 이내) 항목에 대하여 실시하였으며 수온에 대하여는 제시된 바가 없어 염분과 동일한 방법을 사용하였다. Yeosu 염분의 경우 계산값이 관측값의 변동을 잘 재현하지 못하여 CC값이 낮게 나타났다. 이는 Yeosu정점 관측위

치가 담수 영향을 직접적으로 받은 위치이거나 본 광역모델 격자 크기가 약 800 m로 구성되었기 때문에, 국지적인 특성을 반영하지 못한 것이 원인으로 판단된다.

결과적으로 아직 연구결과를 개선하기 위한 추가적인 조사 및 연구가 필요하지만, 양식장시설물의 영향을 직접적으로 받는 영역은 시설물 고려 유·무에 따른 재현성 차이가 상당히 크게 나타나기 때문에, 양식장 시설물이 존재하는 해역의 해수유동을 재현할 경우에는 시설물 저항을 필수적으로 고려해야 될 것으로 판단된다(Wu *et al.*[2014]; Jung *et al.*[2020]).

3.2 양식장 시설물 저항 유무에 따른 해수유동변화

양식장 시설물 저항 유무에 따른 표, 중, 저층 유속 공간분포도를 창·낙조시로 구분하여 Fig. 7과 Fig. 9에 나타내었으며, 이때의 유속 차이 및 유속 변화율에 대한 공간분포도는 Fig. 8과 Fig. 10에,

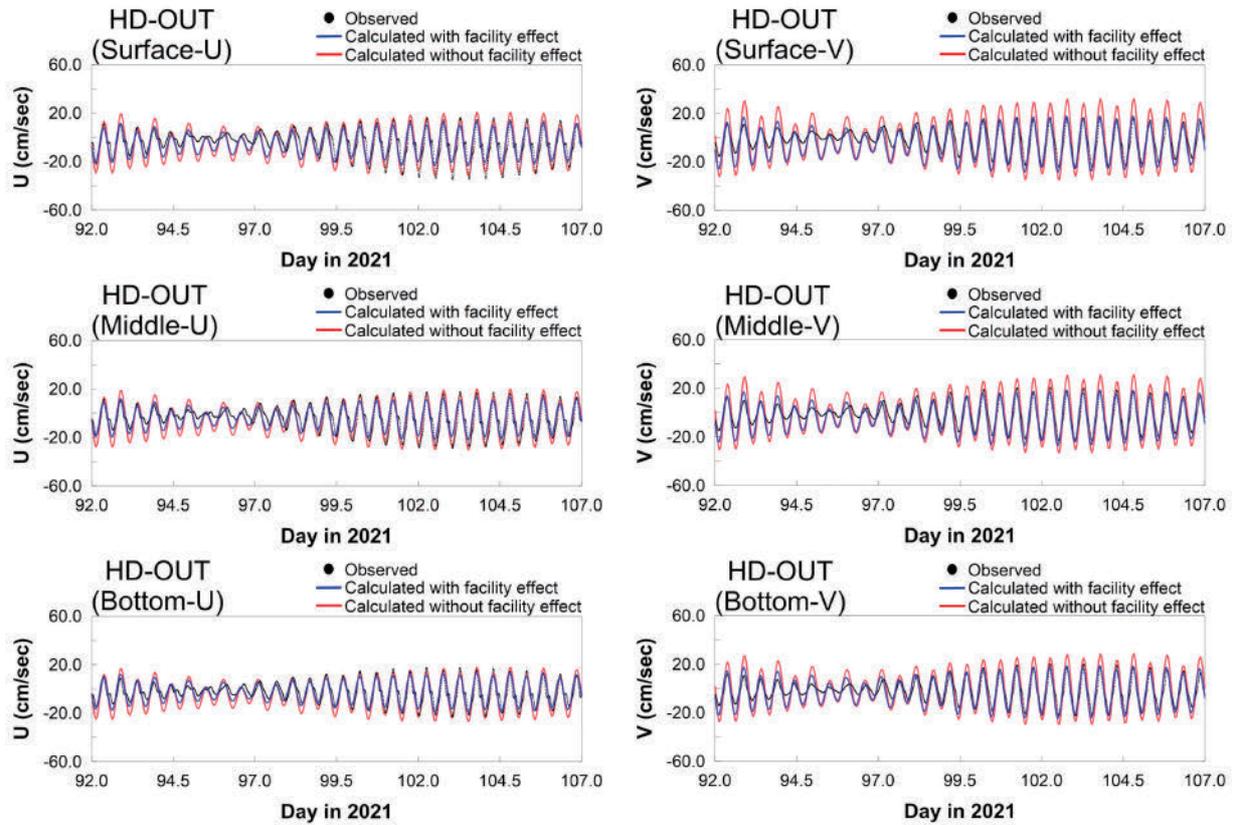


Fig. 5. Time-series comparison of velocity component composed observed data (black circle), calculated data with facility effect (blue line) and calculated data without facility effect (red line) at HD-OUT point.

Table 5. Result of various skill assessments for tidal current validation at HD-OUT point

Comparison point		Skill assessments							
		AAE (cm/s)	RMSE(cm/s)	RAAE(%)	PME(%)	CC(-)	IA(-)	MEF(-)	CF(-)
HD-OUT (Surface-U)	α	5.77	6.94	18.35	68.05	0.77	0.87	0.55	0.55
	β	6.82	8.29	21.71	80.54	0.82	0.88	0.36	0.66
	$\beta-\alpha$	1.05	1.35	3.36	12.49	0.05	0.01	-0.19	0.11
HD-OUT (Surface-V)	α	5.82	7.38	21.50	75.76	0.85	0.89	0.39	0.61
	β	9.12	10.39	33.65	118.57	0.92	0.86	-0.20	0.96
	$\beta-\alpha$	3.30	3.01	12.15	42.81	0.07	-0.03	-0.59	0.35
HD-OUT (Middle-U)	α	5.20	6.19	17.23	61.90	0.80	0.89	0.61	0.52
	β	6.32	7.63	20.94	75.23	0.84	0.89	0.41	0.64
	$\beta-\alpha$	1.12	1.44	3.71	13.33	0.04	0.00	-0.20	0.12
HD-OUT (Middle-V)	α	5.13	6.30	18.06	64.74	0.88	0.92	0.58	0.53
	β	8.17	9.31	28.76	103.12	0.93	0.88	0.07	0.85
	$\beta-\alpha$	3.04	3.01	10.70	38.38	0.05	-0.04	-0.51	0.32
HD-OUT (Bottom-U)	α	3.88	4.60	15.12	56.29	0.85	0.92	0.69	0.47
	β	5.46	6.68	21.26	79.15	0.87	0.89	0.34	0.67
	$\beta-\alpha$	1.58	2.08	6.14	22.86	0.02	-0.03	-0.35	0.20
HD-OUT (Bottom-V)	α	4.76	5.76	17.66	64.55	0.88	0.92	0.59	0.53
	β	7.31	8.34	27.10	99.06	0.93	0.89	0.15	0.81
	$\beta-\alpha$	2.55	2.58	9.44	34.51	0.05	-0.03	-0.44	0.28

***Bold**: Exceed the assessment range(Kim and Yoon[2011]) of well-reproduced hydrodynamic model

어장이 위치한 영역의 층별 유속 변화율 값은 Table 7과 Table 8에 나타내었다.

창조시 좌상단 양식장 인근에서는 시설물 저항에 의해 유향이 동 북방향에서 북북서 방향으로 변화하였으며 유속이 증가하였다. 양식

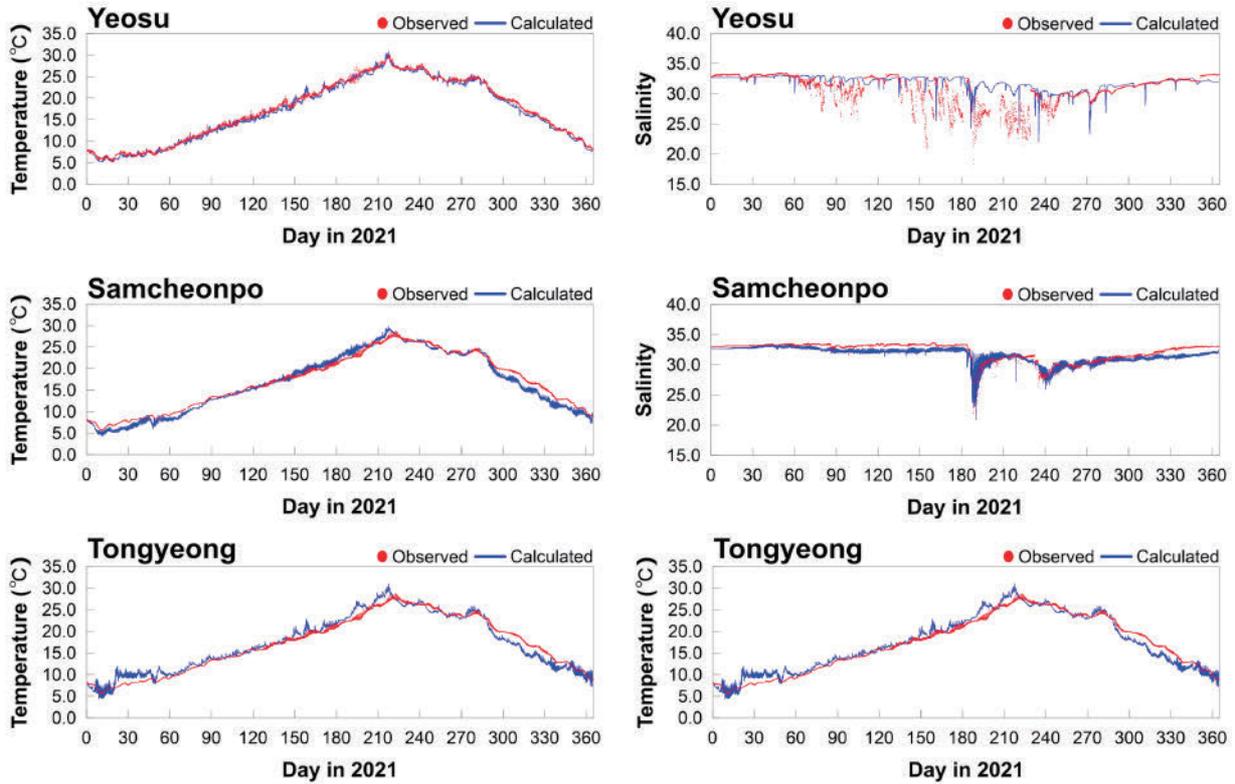


Fig. 6. Time-series comparison of temperature & salinity composed observed data (red circle) and calculated data (blue line).

Table 6. Result of various skill assessments for tide validation

Skill assessments	Yeosu		Samcheonpo		Tongyeong	
	Temp.	Sal.	Temp.	Sal.	Temp.	Sal.
AAE (°C, -)	0.58	1.52	0.87	0.70	1.04	0.53
RMSE (°C, -)	0.70	2.51	1.17	0.85	1.32	0.64
RAAE (%)	2.31	10.01	3.94	6.05	4.54	12.71
PME (%)	3.33	4.96	5.05	2.18	6.10	1.61
CC(-)	0.99	0.43	0.98	0.90	0.96	0.85
IA(-)	1.00	0.57	0.99	0.91	0.99	0.90
MEF(-)	0.99	-0.03	0.97	0.68	0.96	0.72
CF(-)	0.08	0.62	0.13	0.47	0.16	0.44

***Bold:** Exceed the assessment range (Kim and Yoon[2011]) of well-reproduced hydrodynamic model

장 내측기준 표·중층에서 유속이 감소하였으며, 특히 양식장 시설물의 영향을 직접적으로 받는 표층에서 그 정도가 가장 크며 저층으로 갈수록 유속변화가 작게 나타났다(Fig. 7). 양식장 시설물이 위치한 구역의 표층에서는 -0.61 m/sec ~ -0.18 m/sec 범위로 평균 -0.39 m/sec 변화였으며, 최하단에 위치한 양식장 인근에서 가장 크게 유속이 감소하였다. 표층 유속변화율은 -93.98% ~ -74.16% 범위로 평균 -89.49%로 나타났다. 중층에서는 -0.54 m/sec ~ -0.15 m/sec 범위로 평균 -0.34 m/sec 변화였으며, 유속변화율은 -87.18% ~ -62.00% 범위로 평균 -81.05%로 나타났다. 저층에서는 -0.13 m/sec ~ 0.20 m/sec 범위로 평균 -0.01 m/sec 변화였으며, 유속변화율은 -46.69% ~ 104.66% 범위로 평균 2.05%로 나타났다. 표층과 중층은 양식장 시설물의 직접적인 영향을 받아 유사한 경향을 나타내었으며, 양식장

시설물의 직접적인 영향을 받지않는 저층의 경우 유속이 증가하는 영역이 발생하거나 유속감소가 표·중층에 비해 작게 나타났다(Fig. 8, Table 7).

낙조시 양식장 시설물 인근의 해수유동은 시설물 배치에 따라 남서쪽 흐름이 서남서 흐름으로 변경된 것을 볼 수 있다. 또한, 양식장 북서쪽의 표·중층 시계방향 흐름이 변화된 것을 볼 수 있다. 창조때와 마찬가지로 양식장 내측에서는 유속이 약해진 것으로 나타났다며, 표·중층에서 유속감소가 뚜렷하게 나타났다(Fig. 9). 양식장 시설물이 위치한 구역의 표층에서는 -0.60 m/sec ~ -0.32 m/sec 범위로 평균 -0.41 m/sec 변화였으며, 창조때와 마찬가지로 최하단에 위치한 양식장에서 유속감소가 가장 크게 발생하였다. 표층 유속변화율은 -95.52% ~ -81.37% 범위로 평균 -90.98%로 나타났다. 중

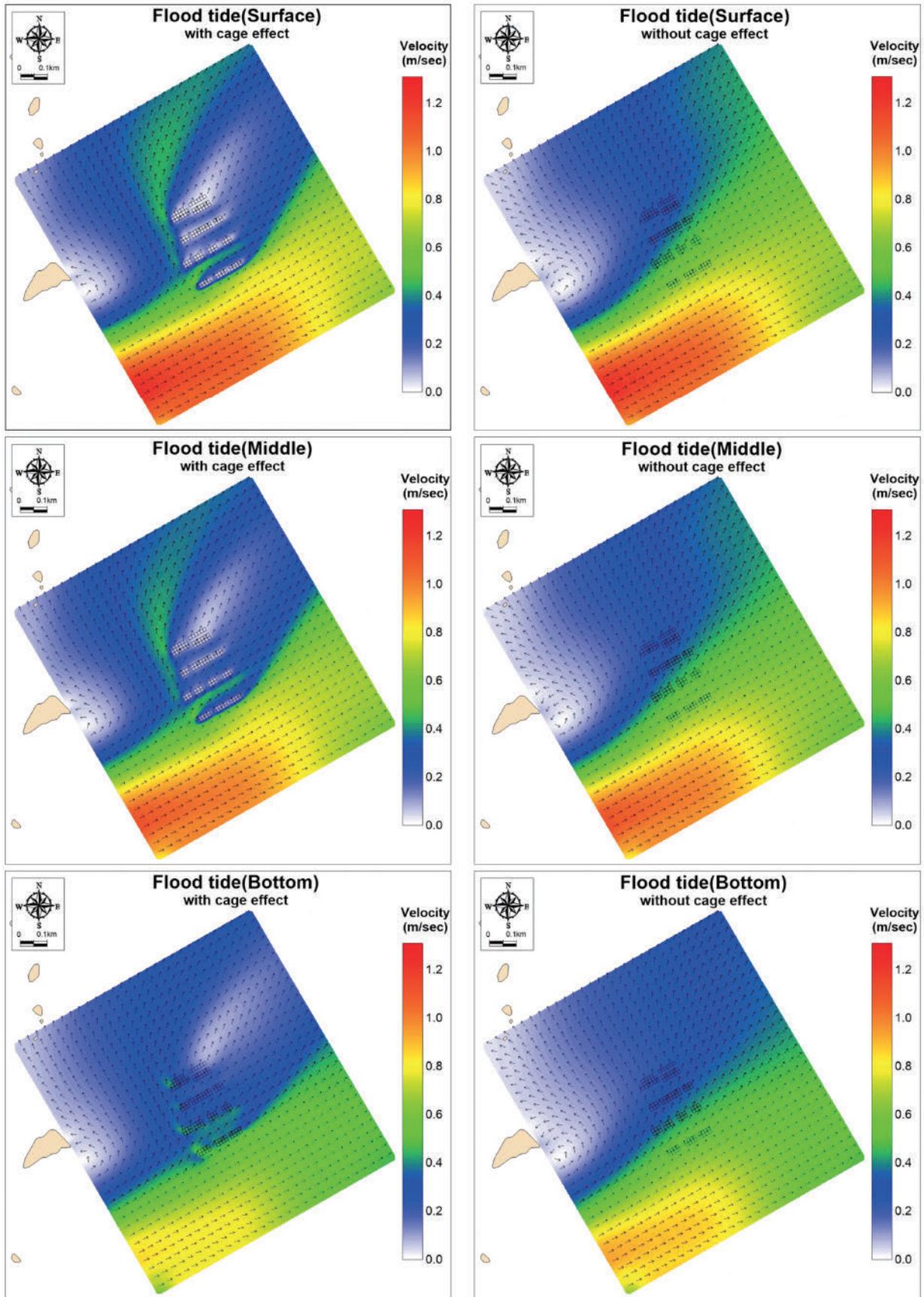


Fig. 7. Spatial distribution of velocity according to the with (left) or without (right) of farm facility resistance at flood tide.

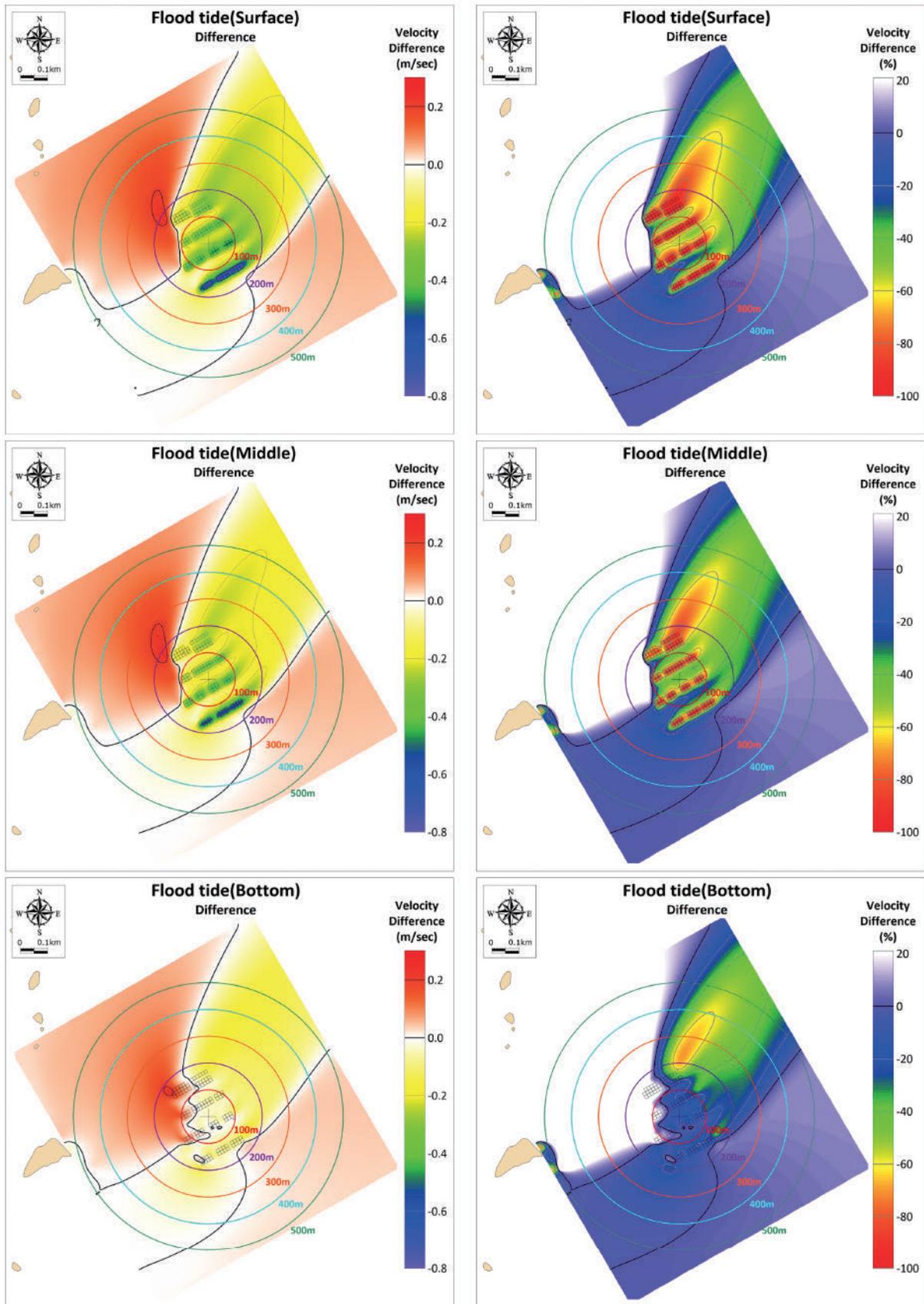


Fig. 8. Spatial distribution of velocity difference (left : amount, right : rate) according to the with or without of farm facility resistance at flood tide.

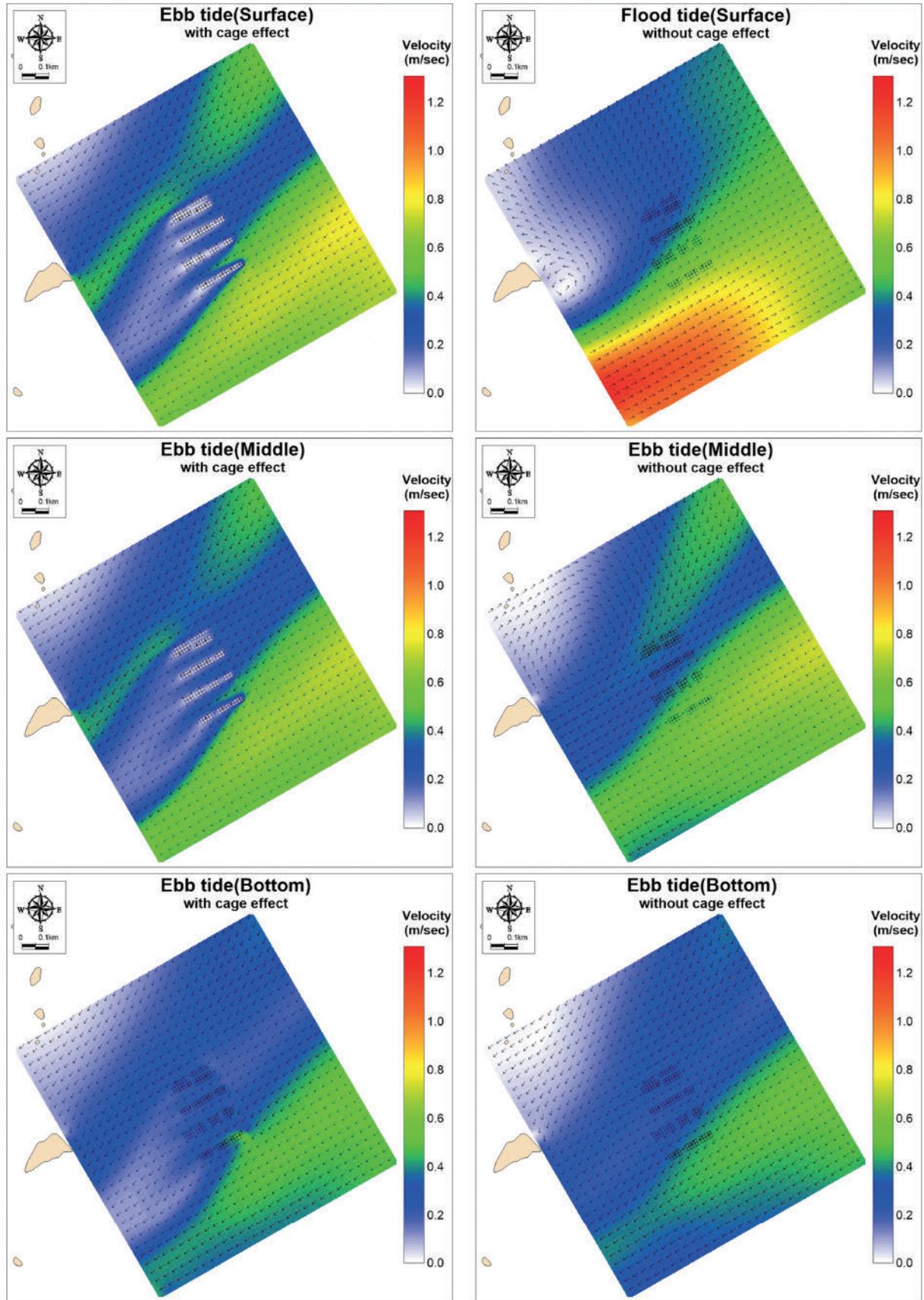


Fig. 9. Spatial distribution of velocity according to the with (left) or without (right) of farm facility resistance at ebb tide.

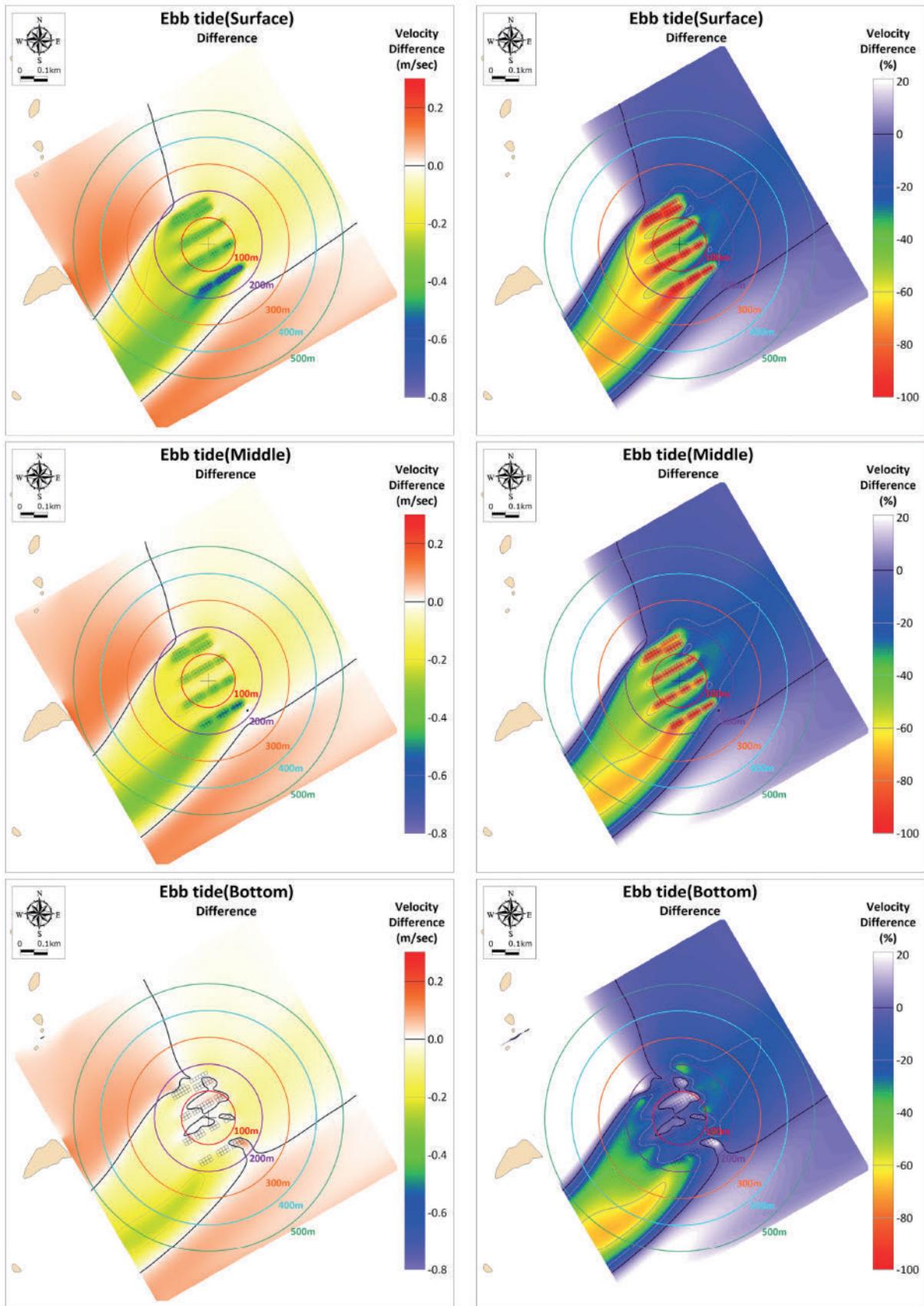


Fig. 10. Spatial distribution of velocity difference (left : amount, right : rate) according to the with or without of farm facility resistance at ebb tide.

Table 7. Velocity difference ($\beta-\alpha$) by layer according to the with or without of farm facility resistance at flood tide

Layer	Velocity Difference			
	Range (m/sec)	Average (m/sec)	Range (%)	Average (%)
1(Surface)	-0.61 ~ -0.18	-0.39	-93.98 ~ -74.16	-89.49
2	-0.61 ~ -0.18	-0.38	-93.67 ~ -74.07	-89.34
3	-0.60 ~ -0.18	-0.38	-93.20 ~ -73.995	-89.09
4	-0.59 ~ -0.18	-0.38	-92.38 ~ -73.60	-88.51
5	-0.58 ~ -0.17	-0.37	-90.88 ~ -72.56	-86.86
6(Middle)	-0.54 ~ -0.15	-0.34	-87.18 ~ -62.00	-81.05
7	-0.42 ~ 0.01	-0.23	-77.37 ~ 4.23	-55.24
8	-0.33 ~ 0.11	-0.16	-69.34 ~ 46.05	-36.84
9	-0.26 ~ 0.17	-0.10	-62.19 ~ 75.48	-22.37
10	-0.19 ~ 0.20	-0.05	-55.16 ~ 96.52	-10.04
11(Bottom)	-0.13 ~ 0.20	-0.01	-46.69 ~ 104.66	2.05

Table 8. Velocity difference ($\beta-\alpha$) by layer according to the with or without of farm facility resistance at ebb tide

Layer	Velocity Difference			
	Range (m/sec)	Average (m/sec)	Range (%)	Average (%)
1(Surface)	-0.60 ~ -0.32	-0.41	-95.52 ~ -81.37	-90.98
2	-0.59 ~ -0.32	-0.41	-95.37 ~ -81.12	-90.81
3	-0.58 ~ -0.31	-0.40	-95.13 ~ -80.70	-90.55
4	-0.57 ~ -0.30	-0.39	-94.64 ~ -79.91	-90.02
5	-0.55 ~ -0.29	-0.37	-93.42 ~ -78.21	-88.62
6(Middle)	-0.50 ~ -0.27	-0.34	-89.59 ~ -73.83	-83.79
7	-0.38 ~ -0.14	-0.24	-74.07 ~ -41.52	-60.92
8	-0.30 ~ -0.06	-0.16	-62.27 ~ -16.24	-43.50
9	-0.23 ~ 0.01	-0.10	-52.22 ~ 2.01	-28.86
10	-0.18 ~ 0.07	-0.05	-43.27 ~ 14.99	-16.05
11(Bottom)	-0.13 ~ 0.10	-0.01	-35.00 ~ 22.22	-4.88

층에서는 -0.50 m/sec ~ -0.27 m/sec 범위로 평균 -0.34 m/sec 변화였으며, 유속변화율은 -89.59% ~ -73.83% 범위로 평균 -83.79%로 나타났다. 저층에서는 -0.13 m/sec ~ 0.10 m/sec 범위로 평균 -0.01 m/sec 변화였으며, 유속변화율은 -35.00% ~ 22.22% 범위로 평균 -4.88%로 나타났다. 창조시와 마찬가지로 양식장시설물의 영향을 직접적으로 받는 표층중에서 유속감소가 뚜렷하게 나타났다(Fig. 10, Table 8).

본 연구결과 창조시 전층 유속변화율은 -58.80%, 낙조시 전층 유속변화율은 -62.63%로 나타났다. Grant and Bacher[2001]의 연구에 따르면 양식장시설물에 의해 유속이 50% 감소할 수 있다고 하였으며, Inoue[1972]는 최대 65%까지 유속이 감소될 수 있다고 하였다. 또한, 본 연구해역 인근에 위치한 하동가두리양식장을 대상으로 수행한 Jung et al.[2020]의 연구에서는 양식장 시설물에 의해 유속이 약 65% 감소하는 결과를 제시하여 본 연구와 유사한 결과를 나타내었다.

Jung et al.[2020]의 연구는 Wu et al.[2014] 연구결과를 기반으로 가정을 통해 연구를 수행하였는데, 2.3에서 언급하였듯이 양식장 시설물 저항이 전층에 적용되는 한계를 가지고 있어 전층에서 유속이 감소하는 결과를 나타내었다. 즉, 다양한 해역을 대상으로 동일한 방법을 적용할 수 없으며, 가두리시설물의 영향을 제대로

모의하였다고 하기는 어렵다. 이를 개선하기 위해 본 연구는 양식장 시설물에 의한 영향을 상세히 모의하기 위하여 11개의 수직층을 사용하였으며 양식장 시설물 깊이를 반영하여 시설물 저항기능을 적용하였다. Wu et al.[2014]는 수심대비 양식장 시설물 깊이가 수심의 절반 이하일 때는 저층유속이 증가할 수 있다고 하였다. 이와 유사하게 본 연구해역에 위치한 양식장 시설물 깊이는 수심대비 절반 이하로 연구결과에서 저층유속이 증가하는 영역이 나타났다. 즉, 가두리시설이 위치한 다양한 해역에 본 연구방법이 적용 가능할 것으로 판단된다.

시설물에 의한 유속변화는 어류가두리양식장 기원 유기물의 거동을 결정하는 중요한 요인이다(Fredriksson et al.[2003]; Wu et al.[2014]). 본 연구결과에 의하면 창·낙조 흐름에 따라 양식장을 중심으로 유속이 변하는 영역이 500 m 이상인 것으로 나타났다(Fig. 8, Fig. 10). 현재 국내 모델링 연구들을 살펴보면 Park et al.[2009]; Park et al.[2011]; Kim et al.[2016]; Jung et al.[2019]; Kim et al.[2021]에 의해 해수유동 재현 및 입자를 활용한 해역의 체류시간에 관련된 연구들이 다양하게 진행되었으나, 양식장 시설물에 의한 유속변화가 고려된 연구는 없다. 이러한 연구들은 연구해역의 전반적인 해수유동 특성을 파악하고 예측함에 있어서는 문제가 없으나,

양식시설이 있는 국지적인 영역이거나 남해안과 같이 양식시설이 많은 해역을 대상으로 연구를 수행할 때는 양식시설물 저항에 따른 유동변화를 고려해야 될 필요가 있다고 판단된다.

추후 공간적으로 부족한 관측자료를 확보하여 모델결과의 신뢰성을 향상시킨다면, 양식장 시설이 있는 해역의 유기물 영향범위 예측, 체류시간 및 해역 특성 파악 등을 통해 관리방안을 마련하는 모델링 연구의 기초가 될 것으로 기대된다.

4. 결 론

본 연구는 해상 어류가두리양식장 기인 유기물의 영향범위 예측을 위한 기반 연구로 Delft3D 모델을 사용하여 가두리시설이 위치한 해역의 유동을 재현하고자 하였다. Delft3D에 내장된 기능을 활용하여 이전 연구보다 개선된 격자구성 및 가두리시설물에 의한 해수유동 변화 재현을 실시하였다.

연구결과 양식장 시설물 저항을 고려하여야 모델의 재현성이 높았다. 특히 시설물의 영향을 직접적으로 받는 양식장 표층에서 시설물 저항 고려 여부에 따른 재현성 차이가 가장 크게 나타났다. 양식장 시설물이 위치한 구역의 전층 유속은 창조시 -58.80%(표층 : -89.49%, 중층 : -81.05%, 저층 : 2.05%) 변화하였고, 낙조시 -62.63%(표층 : -90.98%, 중층 : -83.79%, 저층 : -4.88%) 변하는 것으로 나타났다. 또한, 시설물 저항 고려 유·무에 따라 양식장 인근의 해수유동 흐름 변화가 발생하였다. 해수유동 흐름 변화는 양식장 기인 유기물의 거동에 큰 영향을 미치기 때문에 양식장 시설물이 위치한 곳의 해수유동 모델링시 시설물 저항을 필수적으로 고려해야 됨을 의미한다.

현재 관측자료 부족으로 인한 공간적인 재현성 확보의 부족함, 세부적인 양식장 시설물 배치 미구현, 시설물 저항정도에 관련된 손실계수의 변동 미고려 등 개선해야 될 부분들이 존재한다. 하지만, 양식장 시설물 인근의 유동을 재현함에 있어 재현성이 월등히 개선될 수 있으며 세부적인 해수흐름의 변화를 예측할 수 있었다. 따라서, 본 연구방법은 양식장 시설이 있는 해역을 대상으로 유기물 및 오염물질의 영향범위, 체류시간, 해역의 특성 등을 모델링함에 있어 유용한 수단이 될 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 빈산소수괴 변동 예측 기술 개발(R2023043)의 지원으로 수행된 연구입니다.

References

- [1] Broch, O.J., Daae, R.L., Ellingsen, I.H., Nepstad, R., Bendiksen, E.Å., Reed, J.L. and Senneset, G., 2017, Spatiotemporal dispersal and deposition of fish farm wastes : a model study from central Norway. *Front. Mar. Sci*, 4, 199.
- [2] Cromey, C.J., Nickell, T.D. and Black, K.D., 2002, DEPO-MOD—modelling the deposition and biological effects of waste solids from marine cage farms. *Aquac*, 214, 211-239.
- [3] Fernandes, M., Angove, M., Sedawie, T. and Cheshire, A., 2007, Dissolved nutrient release from solid wastes of southern bluefin tuna (*Thunnus maccoyii*, Castelnau) aquaculture. *Aquac. Res*, 38(4), 388-397.
- [4] Fredriksson, D.W., Swift, M.R., Irish, J.D., Tsukrov, I. and Celikkol, B., 2003. Fish cage and mooring system dynamics using physical and numerical models with field measurements. *Aquac. Eng*, 27(2), 117-146.
- [5] Giles, H., Broekhuizen, N., Bryan, K.R. and Pilditch, C.A., 2009, Modelling the dispersal of biodeposits from mussel farms: the importance of simulating biodeposit erosion and decay. *Aquac*, 291(3-4), 168-178.
- [6] Grant, J. and Bacher, C., 2001, A numerical model of flow modification induced by suspended aquaculture in a Chinesebay, *Canadian J. Fish. and Aquat. Sci*, 58(5), 1003-1011.
- [7] Hargrave, B.T., 2010, Empirical relationships describing benthic impacts of salmon aquaculture. *Aqua. Environ. Interact*, 1(1), 33-46.
- [8] Hevia, M., Rosenthal, H. and Gowen, R.J., 1996, Modelling benthic deposition under fish cages. *J. Appl. Ichthyol*, 12(2), 71-74.
- [9] Hu, K., Chen, Q. and Wang, H., 2015, A numerical study of vegetation impact on reducing storm surge by wetlands in a semi-enclosed estuary, *Coast. Eng*, 95, 66-76.
- [10] Inoue, H., 1972, Water exchange in a net cage stocked with fish, *Hamachi, Bull. Japanese Soc. Sci. Fish*, 38(2), 167-176.
- [11] Islam, M.S., 2005, Nitrogen and phosphorus budget in coastal and marine cage aquaculture and impacts of effluent loading on ecosystem: review and analysis towards model development. *Mar. Pollut. Bull*, 50(1), 48-61.
- [12] Jung, W.S., Hong, S.J., Lee, W.C., Kim, H.C., Kim, J.H. and Kim, D.M., 2019, Modeling the Resident Characteristics of Land-Based Pollutant Inflow to Suyeong Bay. *J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf*, 25(1), 45-57.
- [13] Jung, W.S., Yoon, S.P., Lee, W.C., Kim, D.M., 2020, Numerical Modeling for Assessment of the Hydrodynamic Field and Pollutant Impact Range in Marine Fish Cage Farm. *Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, Vol, 23(4), 221-23.
- [14] Kim, J.H., Lee, W.C., Hong, S.J., Park, J.H., Kim, C.S., Jung, W.S. and Kim, D.M., 2016, A study on temporal-spatial water exchange characteristics in Gamak Bay using a method for calculating residence time and flushing time. *J. Environ. Sci. Int*, 25(8), 1087-1095.
- [15] Kim, J.H., Park, S.E. and Lee, W.C., 2021, Modeling Variation in Residence Time Response to Freshwater Discharge in Gangjin Bay, Korea. *Korean J. Fish. Aquat. Sci*, 54(4), 480-488.
- [16] Kim, T.Y. and Yoon, H.S., 2011, Skill assessments for evaluating the performance of the hydrodynamic model. *J. Korean Soc.*

- Mar. Environ. Energy, 14(2), 107-113.
- [17] Kwon, J.N., Jung, R.H., Kang, Y.S., An, K.H. and Lee, W.C., 2005, Environmental management of marine cage fish farms using numerical modelling, *The Sea*, 10(4), 181-195.
- [18] MOF, 2018, R&D for marine environment and ecosystem management in the sea area around Saemangeum (VII), Korea.
- [19] Nguyen, D., Etri, T., Runte, K.H. and Mayerle, R., 2011, Morphodynamic modeling of the medium-term migration of a tidal channel using process-based model. *Coast. Eng. Proc.*, (32), 70-70.
- [20] Navas, J.M., Telfer, T.C. and Ross, L.G., 2011, Application of 3D hydrodynamic and particle tracking models for better environmental management of finfish culture. *Cont. Shelf Res.*, 31(6), 675-684.
- [21] Page, F.H., Losier, R., McCurdy, P., Greenberg, D., Chaffey, J. and Chang, B., 2005, Dissolved oxygen and salmon cage culture in the southwestern New Brunswick portion of the Bay of Fundy. *Environ. Eff. Mar. Finfish Aquac.*, 1-28.
- [22] Park, S.E., Hong, S.J. and Lee, W.C., 2009, Calculating average residence time distribution using a particle tracking model. *J. Ocean Eng. Technol.*, 23(2), 47-52.
- [23] Park, S.E., Lee, W.C., Hong, S.J., Kim, H.C. and Kim, J.H., 2011, Variation in residence time and water exchange rate by release time of pollutants over a tidal cycle in Masan Bay. *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 14(4), 249-256.
- [24] Pearson, T.H. and Black, K.D., 2001, The environmental impacts of marine fish cage culture. *Environ. impacts Aquac.*, 1-31.
- [25] Sanz-Lázaro, Carlos. and Marin, A., 2011, Diversity patterns of benthic macrofauna caused by marine fish farming. *Divers.*, 3(2), 176-199.
- [26] Silvert, W. and Sowles, J.W., 1996, Modelling environmental impacts of marine finfish aquaculture. *J. Appl. Ichthyol.*, 12(2), 75-81.
- [27] Skogen, M.D., Eknes, M., Asplin, L.C. and Sandvik, A.D., 2009, Modelling the environmental effects of fish farming in a Norwegian fjord. *Aquac.*, 298(1-2), 70-75.
- [28] Symonds, A.M., Vijverberg, T., Post, S., Van Der Spek, B.J., Henrotte, J. and Sokolewicz, M., 2016, Comparison between Mike 21 FM, Delft3D and Delft3D FM flow models of western port bay, Australia. *Coast. Eng.*, 2, 1-12.
- [29] Wu, Y., Chaffey, J., Law, B., Greenberg, D.A., Drozdowski, A., Page, F. and Haigh, S., 2014, A three-dimensional hydrodynamic model for aquaculture: a case study in the Bay of Fundy, *Aquac. Environ. Interact.*, 5(3), 235-248.
- [30] Zhang, J. and Kitazawa, D., 2015, Numerical analysis of particulate organic waste diffusion in an aquaculture area of Gokasho-Bay, Japan. *Mar. Pollut. Bull.*, 93(1-2), 130-143.

Received 11 April 2023

1st Revised 15 June 2023, 2nd Revised 7 July 2023

Accepted 3 August 2023