

Delft3D 모델을 이용한 진해만 해역의 빈산소수괴 3차원 시공간 변동 예측

박성은 · 조창우^{1*} · 조준모 · 김청숙 · 김종홍 · 임월애국립수산과학원 해양환경연구과, ¹(주)지오시스템리서치

Spatiotemporal Behavior of Hypoxic Zones in Jinhae Bay Determined with Delft3D Model

Sung-Eun Park, Chang-Woo Cho^{1*}, Junmo Jo, Chung-Sook Kim, Jong-Hong Kim and Weol-Ae Lim

Marine Environment Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Republic of Korea

¹Geosystem Research Corporation, Gunpo 15807, Republic of Korea

Coastal hypoxia is driven by nutrient loading, organic matter accumulation, and limited water circulation, causing problems in semi enclosed bays, such as Jinhae Bay, on the southeastern Korea coast. This hypoxia is affecting aquaculture and fisheries. Three-dimensional hydrodynamic and water quality Delft3D modules were used to simulate the seasonal dynamics of hypoxia in Jinhae Bay. The model captured the stratification and bottom water behavior in the bay. The 2021 data on tides, currents, temperature, salinity, and dissolved oxygen (DO), content were used for model calibration and validation, the model results strongly agreed with observations. Hypoxia initiated in late spring, intensified in summer due to stratification and elevated sediment oxygen demand (SOD), and dissipates in autumn with increased water mixing. Organic matter consumption contributed to DO depletion; however, the main drivers of hypoxia were the responses of SOD to temperature and DO levels. Including DO-threshold dynamics in SOD modeling produced deeper and more persistent hypoxia. These findings highlight the need to incorporate dynamic benthic processes and stratification into regional hypoxia models. Specifically, the Delft3D framework effectively simulates these processes, offering a scientific basis for developing accurate hypoxia forecasting and effective mitigation strategies for coastal ecosystems.

Keywords: Hypoxia, Delft3D, Jinhae Bay, SOD, Stratification

서론

1960년대 이후 하천을 통한 인위적인 영양염 유입 증가는 해수유동이 정체된 연안을 중심으로 발달하는 빈산소수괴(hypoxia) 발생의 주 원인으로(Diaz and Rosenberg, 2008), 현재 전세계 강 어귀와 해안 수역에는 600개 이상의 빈산소 지역이 존재한다. 빈산소수괴 발생 기작에 관한 원인 파악 및 어업인을 포함한 이해관계자들에게 필요한 정보를 제공하기 위해 빈산소수괴 상습발생 해역에서는 수치모델을 활용한 연구가 다수 수행되었다. 최근 수 년간의 연구 성과로 전지구 및 국지 모델은 빈산소수괴를 수 시간 및 수 킬로미터 정도의 시·공간 해상도 스케일로 계절적 변동성을 재현할 수 있는 수준에 도달하였

으며, 보다 미세한 공간 해상도를 고려하는 추세로 발전하고 있다(Holt et al., 2014). 수치모델을 이용한 빈산소수괴 연구 사례를 살펴보면, 미국 체사피크 만에서 빈산소수괴에 대한 이해와 인간 활동에 의한 영양염 부하의 효율적인 관리 정책에 필요한 정보를 제공하기 위하여, Tian et al. (2021)은 CH3D-ICM 모델을 사용하여 체사피크만의 수질과 빈산소수괴 형성에 지구온난화가 미치는 영향에 관한 연구를 수행한 바 있으며, Wiggert et al. (2017)은 모델 매개변수의 민감도 분석을 통해 빈산소수괴 형성에 영향을 미치는 핵심 기작을 평가하였다. Hetland and Zhang (2017)은 미시시피강과 아차팔라야강의 봄철 홍수 1-2 개월 후 빈산소가 발생하는 현상을 발견하고, 홍수 시 크게 증가하는 영양염 유입 부하량은 저층의 산소 고갈에 기여할 수 있다

*Corresponding author: Tel: +82. 31. 5180. 5830 Fax: +82. 31. 624. 4917

E-mail address: cwjo@geosr.com



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

<https://doi.org/10.5657/KFAS.2025.0403>

Korean J Fish Aquat Sci 58(4), 403-417, August 2025

Received 28 May 2025; Revised 7 July 2025; Accepted 13 August 2025

저자 직위: 박성은(연구사), 조창우(상무), 조준모(연구원), 김청숙(연구원), 김종홍(연구원), 임월애(과장)

는 가설을 세운 후 염료 추적 모델링을 통해 빈산소수괴 형성에 영향을 미치는 담수 유입 기여도를 정량화하였다.

Laurent and Fennel (2017)은 영양염 중 인의 제한이 빈산소수괴 역학에 미치는 영향에 관한 모델링 연구를 수행한 바 있으며, Allahdadi and Li (2017)는 태양 복사에너지에 따른 수온성층 강도 변화는 하계에 계절적 빈산소수괴 발생에 일차적인 기여 요인으로 작용할 수 있음을 모델링을 통해 밝혔다. 최근 Alosairi and Alsulaiman (2019, 2020)은 쿠웨이트만에서 질소 유입과 해수유동 조건이 빈산소수괴의 형성에 미치는 역학적 과정을 규명하기 위하여 Delft3D 모델을 이용한 연구를 수행하였다.

국내의 경우, 마산만을 포함한 진해만 일대, 가막만, 시화호, 영산강 하구, 천수만, 남대천 하구, 고성만, 자란만, 한산만, 북신만 등에서 빈산소수괴가 빈번히 발생하는데, 이는 해수유동 흐름이 미약한 내만역 또는 하구역이라는 공통된 특성을 보인다. 빈산소수괴가 양식 굴의 대량폐사 원인으로 밝혀진 이래, 양식장이 밀집된 남해안 연안 어장의 경제적 피해를 최소화하기 위해 빈산소수괴의 층별 실시간 관측정보 제공, 빈산소수괴의 발생 전 예측기술 개발 연구의 필요성이 꾸준히 제기되어 왔다. 하지만 국내 연구에서는 주로 빈산소수괴의 현상과 영향의 관찰(해양환경 조건, 퇴적물 내 지화학성분의 분포 및 순환과정, 유기물 분해특성 영향 등)에 집중되었으며(Jung et al., 2014), 수치모델링 연구로는 용존산소(dissolved oxygen, DO) 농도 변화에 중점을 둔 연구가 주를 이루고 있었다.

영산강 죽산보를 대상으로 Delft3D 모델을 활용하여 빈산소수괴 현상을 재현하고, 낙동강, 금강, 영산강을 대상으로 빈산소 형성을 위한 퇴적물 산소요구량(sediment oxygen demand, SOD) 기준치를 선정 한 연구가 수행되었으며(NIER, 2018, 2019), 새만금호를 대상으로 Delft3D 모델을 활용하여 새만금호 내측을 구역별로 구분짓고 성층강도 및 저층 빈산소에 대하여 분석하였다(MOF, 2022). Kang (2019)은 당동만에서 빈산소수괴 발생의 시간 변화를 예측하기 위해 성층을 시·공간적으로 재현하고, EFDC 모델의 수질모듈을 이용하여 DO 농도 변화를 재현한 바 있다.

빈산소수괴 형성 메커니즘은 다양한 선행 연구에서 공통적으로 지적하듯이 표층으로부터 산소 공급이 차단되는 하계에 저층의 활발한 산소 소모 기작에 기인하며, 인근 하천과 양식장으로부터 유입되는 유기물 부하는 해당 현상을 가속화시킨다. 그러나 대부분의 연구들은 계절적 DO 농도 변화나 표·저층 간의 차이에 주목했으며, 수층별 DO 농도의 세밀한 시간적 변동과 변동을 일으키는 기작(예: 성층 강도, SOD 반응 정도)의 복합적 작용에 대한 설명은 제한적이다. 현장에서 관측되는 저층 DO 농도의 감소는 단순한 감소 여부에 그치지 않고, 시기별·위치별로 단계적인 변동 패턴을 보이며, 이는 성층 강도의 시·공간적 분포와 밀접하게 연관되는 것으로 파악된다(Lim, 2019). 특히, SOD가 저층의 DO 농도에 따라 달라지는 비선형 반응성과 성

층 강도에 따라 달라지는 수직적인 산소 공급 제한 효과는 빈산소수괴가 발생하는 계절적 시기와 수직적 확장 범위를 결정짓는 주요 인자임에도 불구하고, 기존 연구에서는 충분히 조명되지 않았다. 이는 실제 해역에서 저층 DO 농도와 주변의 환경에 따라 반응성이 달라지는 SOD를 고려하지 않고, DO 농도를 포함한 수질 모델링 연구시 일정한 산소 소비율을 적용하여 모의되는 경우가 일반적이기 때문이다.

연구 해역인 진해만은 우리나라 남해 동쪽 해안에 위치하며, 가덕도, 거제도 등 여러 섬들로 둘러싸인 반폐쇄성 내만으로 해수교환이 원활하지 않다. 임해공단과 인근 밀집으로 공업 폐수와 생활하수가 유입되며 만 내 위치한 양식장은 오염물질과 영양염 공급을 증가시켜 부영양화 현상이 나타나고 있음이 연구 결과를 통해 확인되었다(Kang et al., 2001). 만 내 자체생산 유기물과 외부기원 유기물들이 해저로 가라앉아 분해되면서 많은 양의 산소를 소비하므로, 특히 성층이 강화되는 여름철 저층에서는 빈산소수괴가 발달하는 계절적 특징을 보인다(Yang and Hong, 1988). 진해만은 굴, 미더덕 등의 양식 산업이 활발하게 이루어지고 어류의 산란장으로서의 가치가 높은 해역이다. 하지만 빈산소수괴의 지속적인 발생이 양식업과 어업 피해를 야기하므로, 최근에는 이런 피해를 줄이기 위한 환경 개선 노력의 필요성이 대두되고 있다(Kim et al., 2012).

본 연구에서는 빈산소수괴가 상습적으로 발생하는 진해만 해역을 대상으로 장기간에 걸친 관측자료 및 정밀한 격자 기반의 Delft3D 모델링을 통해 저층 DO 농도의 단계적 변화와 수직 성층 구조 간의 상호작용을 정량적으로 해석하여, 빈산소수괴의 시간에 따른 발생·소멸 과정 및 공간적 변동 구조에 관한 빈산소수괴 형성 메커니즘을 규명하고자 한다. 본 연구 결과는 진해만에서 발생하는 빈산소수괴의 장·단기 예측체계 구축의 기반 마련을 위한 과학적 근거를 제공하며, 이를 바탕으로 지속 가능한 어업생산 터전 조성과 빈산소수괴 발생에 따른 어업피해 최소화 관리 방안 수립에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

재료 및 방법

사용 모델

본 연구에는 네덜란드의 Deltares에서 개발한 Delft3D 모델을 사용하였다. Delft3D 모델은 유동과 퇴적(Delft3D-FLOW), 파랑(Delft3D-WAVE), 수질(Delft3D-WAQ) 모듈로 구분되어 있으며, 각각의 모듈은 연동이 가능하기 때문에 연구목적에 따라 필요한 모듈을 선택적으로 사용이 가능하다. Delft3D 모델은 조석 및 조류에 의한 흐름을 모의할 수 있으며, 성층화된 수체 내의 밀도에 의한 흐름, 하천과 연안에서 복잡한 흐름 그리고 보존성 및 비보존성 물질의 이송 등을 모의할 수 있다. 그 밖에 하구역의 염분 침투와 발전소의 온배수 확산 등을 모의하는 등 개발국인 네덜란드를 비롯하여 전 세계적으로 수 많은 해역 및 하천의 연구에 적용된 바 있다.

Delft3D는 Arakawa C-grid를 사용하며, 수평방향으로 직교(cartesian) 또는 직교곡선(orthogonal curvilinear) 격자체계를 사용한다. 수직방향으로 σ -좌표계 또는 Z -좌표계를 선택하여 사용이 가능한 장점이 있다. 본 연구에서는 해수유동 및 수질 변화, 특히 빈산소수괴 형성 과정을 모의하기 위해 Delft3D-Flow와 Delft3D-WAQ 모듈을 연계하여 진해만 해역의 빈산소수괴를 모의하였다.

Delft3D-FLOW는 2차원 또는 3차원 비정상 상태의 흐름을 계산하며, 비압축성 유체의 지배 방정식인 연속 방정식과 레이놀즈 평균 나비에-스토크스 방정식으로 구성된다. 본 연구에서는 조석, 기압, 바람 응력, 밀도차 등 외력을 고려한 3차원 유동장을 구성하였다. 지배 방정식은 연속방정식 식 (1)과 운동방정식 식 (2a), 식 (2b), 상태방정식 식 (3), 그리고 물질보존방정식 식 (4)으로 구성되어 있으며, 상태방정식은 밀도차에 의한 경압력이 운동방정식과 연계되어 있다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial [hU]}{\partial x} + \frac{\partial [hV]}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial z} = Q \dots \dots \dots \text{식 (1)}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\omega}{h} \frac{\partial U}{\partial z} - fV = \\ - (g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + g \frac{h}{\rho_0} \int_z^0 (\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial z}{\partial x} \frac{\partial \rho}{\partial z}) dz) + F_x + M_x + \frac{1}{h^2} \frac{\partial}{\partial z} (v_v \frac{\partial u}{\partial z}) \end{aligned} \dots \dots \dots \text{식 (2a)}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\omega}{h} \frac{\partial V}{\partial z} - fU = \\ - (g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + g \frac{h}{\rho_0} \int_z^0 (\frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\partial z}{\partial y} \frac{\partial \rho}{\partial z}) dz) + F_y + M_y + \frac{1}{h^2} \frac{\partial}{\partial z} (v_v \frac{\partial v}{\partial z}) \end{aligned} \dots \dots \dots \text{식 (2b)}$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -g\rho h \dots \dots \dots \text{식 (2c)}$$

$$\rho = \rho(p, S, T) \dots \dots \dots \text{식 (3)}$$

여기서, ζ 는 기준면 상 수위, h 는 총 수심, t 는 시간, x 와 y 는 직교하는 곡선좌표계상 수평방향 좌표를, U 와 V 는 좌표계 x , y 에서의 수평 유속을 나타낸다. ω 는 수직유속, z 는 연직방향의 좌표, Q 는 단위면적당 공급-소멸(source-sink) 부하량, ρ_0, ρ 는 해수의 기준 밀도와 밀도, F_x, F_y 는 수평방향 레이놀즈 응력, P_x, P_y 는 수평방향 압력, M_x, M_y 는 운동량의 공급-소멸항, v_v 는 수직 난류점성계수, g 는 중력가속도, T, S 는 수온, 염분이다.

Delft3D-WAQ는 다항목 수질 모델로, 본 연구에서는 DO의 시-공간적 분포를 모의하기 위해 산소 관련 반응 항목들을 포함한 생지화학적 반응 모델을 구성하였다. 기본방정식은 열염 보존방정식과 유사하며, 생지화학적 내부 생성과 소멸이 추가되어 다음과 같이 식 (4)로 표현할 수 있다.

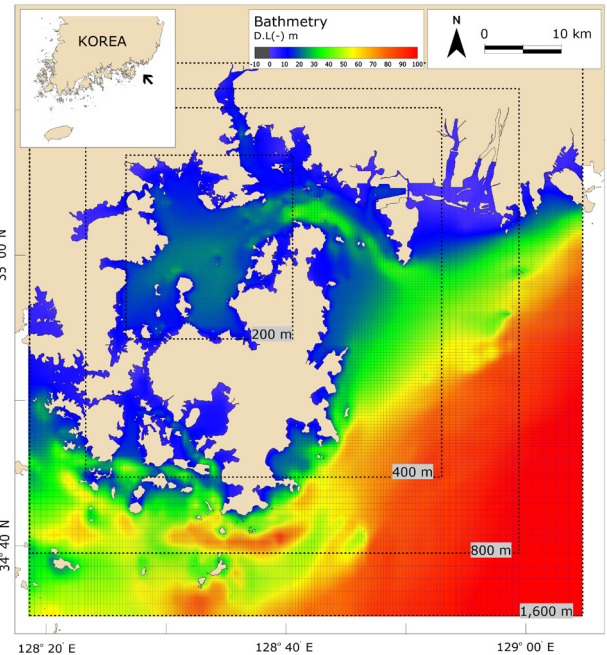


Fig. 1. Computational grid mesh representing the model domain of the study area.

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial (UC)}{\partial x} + \frac{\partial (VC)}{\partial y} + \frac{\partial (\omega C)}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_z \frac{\partial C}{\partial z}) + S_c \dots \dots \dots \text{식 (4)} \end{aligned}$$

여기서, C 는 수질 항목별 농도를, K_x, K_y, K_z 는 수평 및 수직 방향의 난류 확산 계수이며, S_c 는 내부 또는 외부로부터 유입되는 부하량을 의미한다. Delft3D-WAQ에서 수체 내 DO 농도는 유기물 산화와 질산화와 같은 주요 산소 소비 과정이 DO 농도에 따라 반응 속도가 비선형적으로 변화하는 특징이 반영된 Michaelis-Menten식으로 계산된다(식 5).

$$R = \frac{R_{max} \cdot DO}{K_s + DO} \dots \dots \dots \text{식 (5)}$$

여기서, R 은 단위 시간당 산소 소비 속도(mg/L/day), R_{max} 는 최대 산소 소비 속도(포화상태에서의 반응 속도), K_s 는 반포화상수(반응 속도가 $R_{max}/2$ 에 도달하는 DO 농도를 의미한다). 이러한 반응식은 DO 농도가 낮을수록 산소 소비 속도가 둔화되는 실질적인 현상을 반영하며, 빈산소수괴 형성과 관련한 DO 소모량 추정의 정확도를 향상시킨다. 즉, 산소가 충분할 때는 반응이 R_{max} 에 근접하고, 산소가 낮을 때는 선형적으로 반응 속도가 감소하는 특징을 가지므로, 산소 소비 기작인 SOD를 포함한 모델링 연구에 주로 활용된다.

모델 구축

모의 영역은 개방경계가 직접적으로 진해만 내측까지 영향을 미치지 않으면서 외해의 영향을 고려할 수 있도록 남측으로는 거제도를 포함하고, 동측으로는 부산 외해까지 설정하였다 (Fig. 1). 진해만 내측의 수평 격자크기는 200 m로 구성하였으며, 외해의 경우 연산시간의 효율성을 확보하기 위해 1,600 m로 구성하였다. 가덕도 남단에는 Delft3D 모델의 dry point와 thin dam 기능을 이용하여 실제 지형과 유사하게 격자를 구성하였고, 부산신항만과 가덕도 사이는 box colvert 형태로 해수가 소통되고 있으므로 모델에서도 해당 구간에 격자를 부여하여 해수가 흐르도록 구성하였다. 수직 좌표체계는 수온과 염분 성층 재현 성능이 입증된 z-level 수직 좌표체계를 사용하였다. 진해만 내측의 성층 재현성 확보를 위해 수직 층수를 32개로 구성하고, 양식장 인근 수심을 고려하여 해면하 25 m까지 층 두께를 1 m 간격으로 설정하였다. 모델에 입력된 수심은 국립해양조사원의 BADA 수심 자료를 활용하였으며, 수질모델은 해수 유동모델과 off-line으로 결합(coupling)하여 해수유동모델에서 계산된 유동장을 사용하도록 설정하였다.

입력 조건

2017년부터 2021까지 진해만에서 관측된 정점별 DO 농도 시계열 자료를 기반으로 빈산소 출현일수(DO<2 mg/L)를 분석한 결과, 정점별 확보된 관측자료 수가 가장 많고 빈산소 출현일수가 가장 많은 2021년을 모의기간으로 선정하였다(Table 1).

조위와 유속의 초기조건으로는 '0'으로 시작하는 cold start를 적용하였고, 이때 조위는 평균해면(mean sea level)을 기준으로 하였다. 모의 시작 시기인 2021년 1월 1일은 수위가 수직적으로 완전히 혼합되어 있으므로 모의 영역내 관측자료를 평균하여 층별로 동일하게 부여하였으며, 이때 수온과 염분의 초기 조건은 각각 15.7°C, 31.5 psu를 적용하였다. 수질 항목별 초기 조건으로는 진해만 내에 위치하는 해양환경관리공단의 해양환경측정망 자료를 이용하여 겨울철 표·저층 평균값을 초기조건으로 구성하였다.

개방경계의 조석과 수온·염분 조건은 다양한 연구에서 개방경계 조건으로 사용하고 있는 전지구 모델인 NAO.99jb와 HYCOM 모델 결과를 각각 사용하였다. 조석 조건은 주요 8개 분

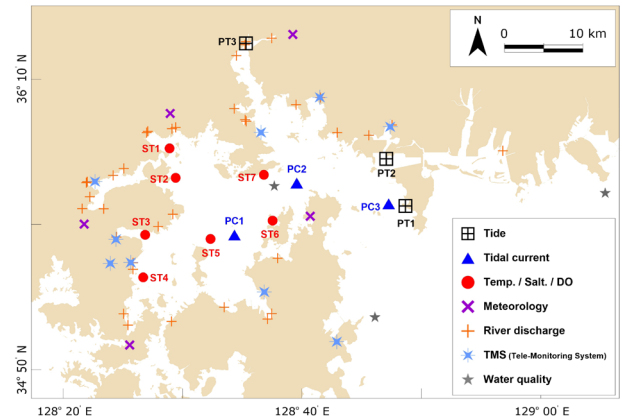


Fig. 2. Locations of observational data used for model calibration and validation. DO, Dissolved oxygen.

조(M_2 , S_2 , K_1 , O_1 , N_2 , K_2 , P_1 , Q_1)의 조화상수를 합성하여 모델에 입력하였으며, 수온·염분은 격자별 층별로 제공하는 일별 시계열 결과를 진해만 모델에 공간적으로 선형 보간하여 사용하였다. 수질 조건으로는 개방경계 최인근의 해양환경측정망 정점 자료를 활용하였다(Fig. 2).

담수 유입은 모델의 수온과 염분성층 재현에 직접적으로 연관되는 중요한 입력 요소 중 하나이므로 합리적인 반영이 필요하다. 본 연구에서는 진해만으로 유입하는 담수 유입원인 낙동강 하굿둑과 인근의 35개 유입하천을 고려하였다(Fig. 2). 대형 하천인 낙동강은 실측 자료를 제공하므로 하굿둑 방류량은 한국수자원공사의 일별 자료를, 수온은 상류에 위치한 수질측정망 자료를 사용하였다. 진해만으로 유입하는 지천의 위치는 환경부 물환경 정보시스템에서 제공하는 물환경지리정보 지천 자료를 활용하였고, 제공하지 않는 지천 유량을 적절히 근사하기 위해 본 연구에서는 홍수유출 프로그램인 HEC-HMS (hydrologic engineering center-hydrologic modelling system) 모델을 활용하여 추산하였다. HEC-HMS 모델의 입력조건으로 유역 정보와 강우 자료가 필요하다. 유역 정보 중 지천별 유역면적은 물환경지리정보에 제시된 자료를 사용하였고, 유역 내 유출곡선 번호, 도달시간, 토지이용도는 각 지천별 하천정비기본계획서에서 제시된 자료를 활용하였다.

유효우량 산정에는 SCS Curve Number 기법과 Clark unit hydrograph 기법을 적용하였으며, 저류 상수 계수는 Yoon and Park (2002)이 제시한 낙동강 값을 사용하였다. 강우 자료는 유입지천 인근에 위치한 장목 기상관측소의 매시별 자료를 사용하였다. 진해만 유입 하천 중 남천(창원천, 내동천), 고성천, 진전천, 연초천 말단에는 환경부 수질측정망 자료가 있으므로 해당 수온 및 수질 자료를 활용하였으며, 이외 하천에서는 가장 인접한 하천의 자료를 준용하였다.

진해만으로 방류하는 환경기초시설 중 일별 처리용량이 1,000 m³/day 이상인 시설을 모델에 반영하였다(Fig. 2). 진해

Table 1. Number of hypoxic days at monitoring statins (unit : days)

Year	ST1	ST2	ST3	ST4	ST5	ST6	ST7
2017	49	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
2018	89	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
2019	40	92	62	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
2020	107	90	89	121	113	68	n.d.
2021	102	122	113	118	124	16	35

The locations of the monitoring stations are shown in Fig. 2. Reference of hypoxia : DO<2 mg/L.

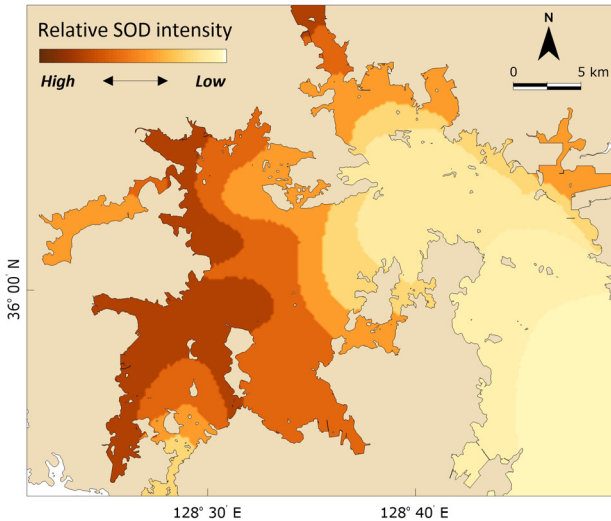


Fig. 3. Spatial distribution of Relative SOD intensity in the study area used for model calibration. SOD, Sediment oxygen demand.

만으로 분류하는 환경기초시설 중 마산하수처리장의 처리수는 해안선으로부터 680 m 이격된 지점의 수심 13 m에서 방류되므로(Kang et al., 1999, 2001), 수중에 설치된 처리수 방류시설의 수직적 위치를 모델에 반영하였다. 시설별 방류량과 수질은 한국환경관리공단에서 제공하는 수질원격감시체계(tel-monitoring system) 자료를 활용하였다. 대기와 해양 표면의 열교환 및 바람에 의한 취송 효과를 고려하기 위하여 기상자료를 모델에 입력하였다. 진해만 인근에는 5개의 기상관측소가 있으나, 이 중 주변 지형지물의 영향이 작고 모델 영역 중앙에 위치한 장목기상대 자료를 사용하였다.

수체 내 저층에서 DO는 SOD에 큰 영향을 받으므로 빈산소수괴의 재현을 위해서는 합리적인 SOD 반영이 필요하다. 본 연구에서는 기존 관측자료를 활용하여 양식장 인근과 이외 구간으로 구분하였고, 수심에 따라 SOD를 가변적으로 적용하였다. 유기물 농도가 높고, 저서생물이 많으면 산소소모가 커져 SOD가 클 가능성이 있으므로, 진해만을 대상으로 관측·조사한 total organic carbon (TOC) 농도와 저서생물 분포 자료를 활용하였다. TOC 농도와 저서생물 공간분포 자료 또한 빈도, 시기 등에 따라 제한적이므로 상대적인 분포 특성을 고려하였다. TOC 농도는 진동만 내측과 고성-가조도 인근에서 높고, 만 중앙부에서는 상대적으로 낮다. 저서생물은 진동만 내측과 고현만 내측에서 높고, 외측만 및 입구부와 견내량 인근에서는 낮다. 따라서, 진동만 서측, 당동만과 원문만 내측, 고현만 내측의 SOD는 상대적으로 크게, 견내량 수로, 가조도 남서측 및 가덕수로 입구부는 SOD를 상대적으로 낮게 구성하여 모델에 입력하였으며(Fig. 3), DO 농도의 변화가 관측값과 일치할 수 있도록 반복 실험을 수행하였다.

성층강도 계산

성층강도와 빈산소수괴의 수직발달 상관성을 파악하기 위하여, 성층강도 지수인 브룬트-바이살라 주파수(Brunt-Väisälä frequency, BVF)를 다음과 같이 계산하였다(식 6).

$$N^2 = \frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz} \dots \dots \dots \text{식 (6)}$$

여기서, N^2 은 BVF, g 는 중력가속도, ρ 는 밀도 z 는 수심이다. 수온과 염분에 의한 BVF의 강도차이를 구분하기 위하여, 수온과 염분에 의해 각각 계산하고, 수온에 의한 BVF를 N_T^2 , 염분에 의한 BVF를 N_S^2 로 구분하였다.

Table 2. Experimental design for DO sensitivity analysis

	Scenario	Description
N	Reference experiment	Baseline simulation for comparison
A	Effect of organic matter increase	Simulation scenario with elevated organic matter concentrations to increase oxygen consumption rates (WOD) in the water body
B	Effect of temperature coefficient in SOD	Scenario designed to assess variations in SOD in response to changes in water temperature (SOD tends to decrease under lower water temperature conditions)
C	Effect of critical coefficient in SOD	Scenario to investigate variations in the critical threshold of SOD under different DO concentrations (Continuous DO consumption is assumed due to substantial organic matter influx and its contribution to increased SOD)

DO, Dissolved oxygen; SOD, Sediment oxygen demand.

Table 3. Summary of observed data for model calibration and validation

Contents	Stations	Period	Frequency
Tide	PT1	'21.01.01–12.31	Hourly
	PT2	'21.01.01–12.31	
	PT3	'21.01.01–12.31	
Tidal current	PC1	'18.03.25–10.03	10 min
	PC2	'18.04.11–10.30	
	PC3	'18.04.26–10.30	
Water temperature	ST1	'21.03.31–11.28	Hourly
	ST2	'21.04.30–11.28	
	ST3	'21.04.29–11.20	
	ST4	'21.04.27–11.25	
Salinity	ST5	'21.04.01–11.28	
	ST6	'21.05.30–11.28	
	ST7	'21.05.30–11.28	

SOD 조건에 따른 모델 민감도 실험안

SOD 조건에 따른 빈산소수과 특성을 파악하기 위하여 DO 농도 소모 기작에 대한 매개변수를 대상으로 모델 민감도 실험안을 수립하였다(Table 2). 유기물량 및 유기물 분해율, SOD를 변화시키는 수온 계수와 임계 계수 조절을 통해 DO 농도 변화에 영향을 미치는 주요 인자가 총 4개의 시나리오에서 시간적인 DO 농도의 수직 분포 변화 정도를 살펴보았다.

결 과

모델 검증

모델 결과의 신뢰성 확보를 위해 수위, 조석, 조류, 염분, DO를 포함한 일반수질 항목에 대한 검정을 수행하였다(Table 3). 관측 결과와 모델 결과의 비교를 위해 관측지점과 동일한 위치의 모델 격자점에서 검정 항목별로 계산된 결과를 추출하였다.

조석과 조류는 동기간의 자료에 대해 조화분석을 수행하여 관측과 모델의 주요 분조에 대한 조화상수를 비교하고 정량적 재현율을 skill score (식 7)를 사용하여 백분율로 표현하고(Bang et al., 2013; Jung et al., 2013), 수온, 염분, DO 및 수질 검정은 진해만 내 7개 정점에서 시계열 자료를 이용하여 PBIAS (percent BIAS)와 IOA (index of agreement)를 계산하고 등급별로 평가하였다(식 8, 식 9). Skill score는 높을수록 모델이 관측치와 유사함을 의미하며, PBIAS은 10 미만일 경우 재현율이 'very good', 10~15인 경우 'good'을 의미한다. IOA는 1에 가까울수록 모델의 신뢰도가 높다(Ostojski et al., 2016).

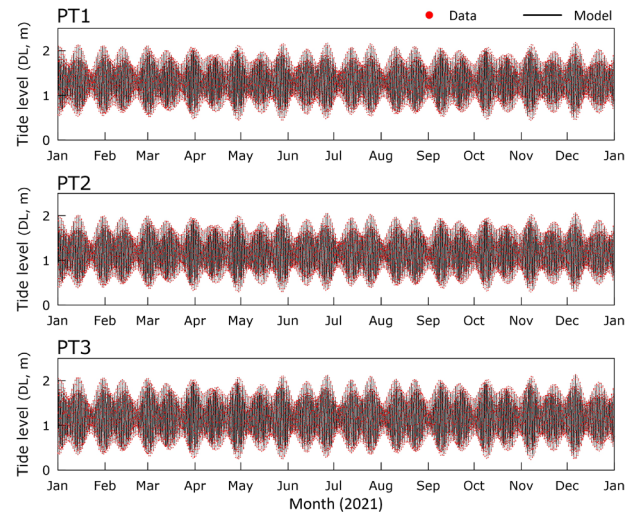


Fig. 4. Time series comparison of observed and modeled tide levels at tide stations.

$$\text{Skill score} = \left(1 - \frac{|P_i - O_i|}{O_i}\right) \times 100 \dots\dots\dots \text{식 (7)}$$

$$\text{PBIAS} = \left(\frac{|\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i|}{\sum_{i=1}^n O_i}\right) \times 100 \dots\dots\dots \text{식 (8)}$$

$$\text{IOA} = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}\right) \times 100 \dots\dots\dots \text{식 (9)}$$

Table 4. Validation results of tidal harmonic constants

Stations		Amplitude (m)				Phase (°)			
		Data	Model	Error	Skill*	Data	Model	Error	Skill*
PT1	M ₂	0.53	0.49	-0.04	92.5	243.4	237.7	-5.70	98.4
	S ₂	0.25	0.23	-0.02	92.0	278.8	271.9	-6.90	98.1
	K ₁	0.08	0.08	0.00	100.0	163.1	165.0	1.90	99.5
	O ₁	0.04	0.04	0.00	100.0	131.7	132.1	0.40	99.9
	N ₂	0.11	0.10	-0.01	90.9	234.6	225.3	-9.30	97.4
PT2	M ₂	0.53	0.49	-0.04	92.5	243.4	237.7	-5.70	98.4
	S ₂	0.25	0.23	-0.02	92.0	278.8	271.9	-6.90	98.1
	K ₁	0.08	0.08	0.00	100.0	163.1	165.0	1.90	99.5
	O ₁	0.04	0.04	0.00	100.0	131.7	132.1	0.40	99.9
	N ₂	0.11	0.10	-0.01	90.9	234.6	225.3	-9.30	97.4
PT3	M ₂	0.52	0.47	-0.05	90.4	243.4	237.1	-6.30	98.3
	S ₂	0.25	0.22	-0.03	88.0	278.9	271.2	-7.70	97.9
	K ₁	0.08	0.07	-0.01	87.5	163.4	164.2	0.80	99.8
	O ₁	0.04	0.04	0.00	100.0	132.3	133.9	1.60	99.6
	N ₂	0.11	0.10	-0.01	90.9	234.5	224.6	-9.90	97.3

*Skill score (%).

여기서, $P_r O_i$ 는 모델치와 관측치를 각각 의미하며, $\bar{O}$ 는 관측치의 평균을 의미한다.

모든 분조에 대한 조석 반조차와 지각의 평균 재현율은 각각 93.8%, 98.6% (Table 4, Fig. 4), 조류속 M_2 분조의 평균 절대오차와 재현율은 각각 3.3 cm/s, 71.3% (Table 5, Fig. 5)로 본 모델이 연구해역의 조석 및 조류 특성을 잘 반영한 것으로 판단된다. 창조시와 낙조시 표·저층에서 조류 벡터도를 Fig 6에 제시하였다. 창조류는 거제도과 가덕도 사이의 가덕수로에서 서향 또는 북서향하고, 견내량을 통해 북향하는 흐름이 우세하다. 낙조류는 창조류와 반대로 진해만 내측에서 거제도과 가덕도 사이, 그리고 견내량으로 유출된다. 표층과 저층에서의 흐름 경향

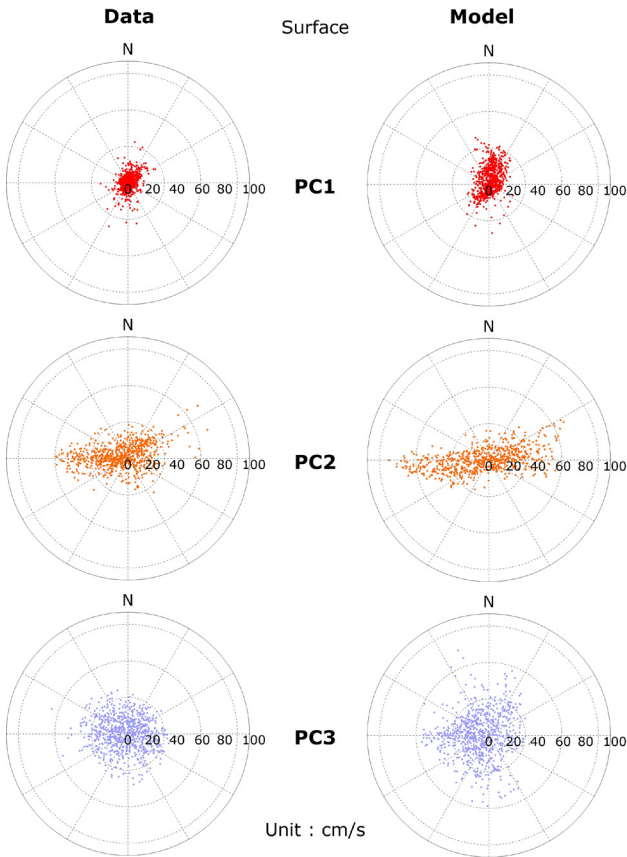


Fig. 5. Validation of current velocity distribution between observations and model simulations at tidal current stations.

Table 5. Validation results of tidal current harmonic constants (M_2 major axis)

Stations	Data (cm/s)	Model (cm/s)	Error (cm/s)	Skill (%)
PC1	4.12	5.83	1.71	58.5
PC2	20.97	26.07	5.10	75.7
PC3	15.14	12.09	-3.05	79.9

은 유사하며, 가덕도와 거제도 사이의 좁은 수로에서 유속이 상대적으로 크다.

수온과 염분의 표·저층에서 모델치와 관측치를 시계열로 비교한 결과, 모델은 표·저층에서 관측 수온과 염분의 연변동 특성을 적절히 재현하였다 (Table 6, Fig. 7, Fig. 8). 정량적 평가 결과, 표층과 저층에서 수온의 평균 IOA는 각각 0.98, 0.86이고, 평균 PBIAS는 각각 1.47, 6.31이다. 표층과 저층에서 염분의 평균 IOA는 각각 0.65, 0.44이고, 평균 PBIAS는 각각 1.37, 1.21이다. 수온과 염분의 PBIAS는 모두 10 이하이므로 'very good' 등급에 해당한다. 진해만 내측 모든 점점 정점에서 모델은 표층과 저층에서 관측 수온을 잘 재현하였고, 특히 8월 말 이후 수온이 급격히 상승하는 양상을 잘 재현하였다. 관측 염분은 표층에서 7월 중순부터 8월 초까지 하강하고 이후 점차 회복하는데, 모델은 이러한 양상을 잘 재현하였으며, 특히 7월 홍수시 염분 하강과 최저치를 잘 재현하였다.

DO 농도는 저층에서 5월 이후 점차 감소하다가, 7-8월에 2 mg/L 이하를 유지하고, 9월 이후 점차 증가하는 계절적 변동 특성을 보인다. 빈산소수괴는 7월 말에 최대로 발달하고, 9월 말 이후 소멸된다. 모델은 이러한 빈산소수괴의 시기적 발생·소멸 특성을 잘 재현하였다. 모델의 변동양상을 평가하는 지표인 IOA는 0.84로 관측치 변동 재현성이 높으며, 정량적인 등급 평가지표인 PBIAS는 16.59로 'good' 등급에 가까운 'satisfactory' 등급에 해당된다 (Table 6, Fig. 9). 진해만 내측(ST1, ST2, ST3)에서는 5월부터 빈산소수괴가 발생하기 시작하여 7월 초까지

Table 6. Model validation results for temperature, salinity and DO

Items	Station	Temperature		Salinity		DO	
		surface	bottom	surface	bottom	surface	bottom
IOA	ST1	0.98	0.96	0.81	0.32	n.d.	0.88
	ST2	0.98	0.91	0.63	0.53	n.d.	0.86
	ST3	0.98	0.94	0.74	0.47	n.d.	0.75
	ST4	0.98	0.75	0.60	0.50	n.d.	0.82
	ST5	0.99	0.78	0.65	0.51	n.d.	0.93
	ST6	0.97	0.87	0.56	0.37	n.d.	0.89
	ST7	0.97	0.84	0.57	0.41	n.d.	0.77
	average	0.98	0.86	0.65	0.44	-	0.84
PBIAS	ST1	1.33	3.12	0.75	0.57	n.d.	3.43
	ST2	0.70	3.14	1.39	2.06	n.d.	8.05
	ST3	0.18	4.09	0.63	1.61	n.d.	40.70
	ST4	2.03	10.97	0.60	1.53	n.d.	34.38
	ST5	2.08	12.49	0.74	2.30	n.d.	3.61
	ST6	1.20	2.86	3.52	0.08	n.d.	6.99
	ST7	2.76	7.48	1.99	0.32	n.d.	18.99
	average	1.47	6.31	1.37	1.21	-	16.59

DO, Dissolved oxygen; IOA, Index of agreement; PBIAS, Percent BIAS.

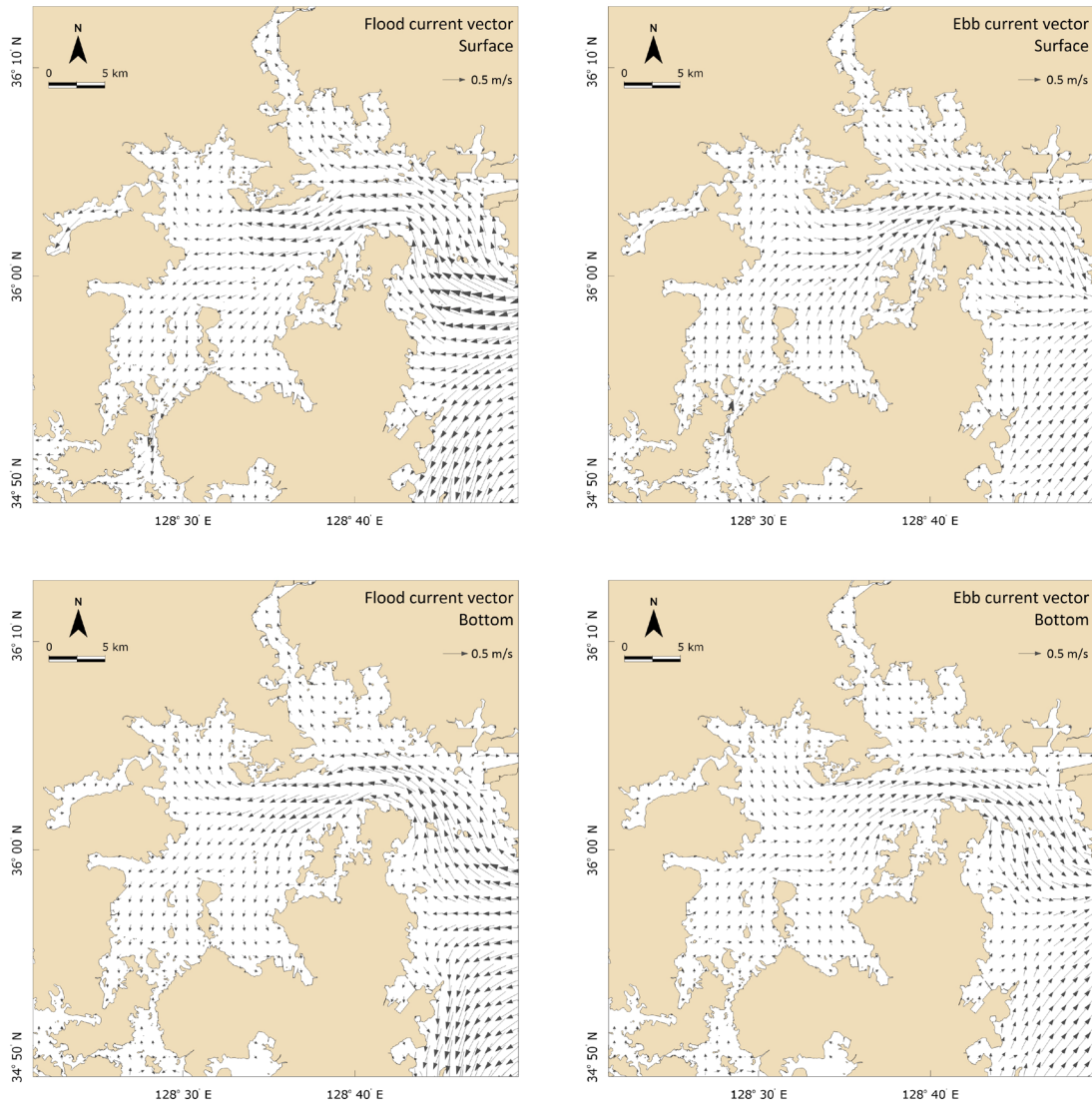


Fig. 6. Simulated flood (left panel) and ebb (right panel) tidal current vectors at surface and bottom derived from the model.

발생과 소멸이 반복적으로 나타난다. 5월부터 9월까지 DO 농도의 전반적인 경향과 추이는 모델이 재현하였지만, 특정 시기에 일시적이고 간헐적으로 DO 농도가 증가하고 다시 감소하는 현상에 대한 재현성은 다소 낮은 한계점을 보인다. 이는 본 연구에서 수온, 염분의 성층에 따른 DO 농도변화의 재현성을 확보하기 위해 수직층을 z-level로 구성하여, 수직층 단차로 인한 저층의 유동 흐름이 저평가되었고, 외해에서 공급되는 고농도의 DO가 진해만 내측까지 전달되지 않았기 때문으로 판단된다. 왜냐하면, 진해만 외측 정점(ST5, ST6, ST7)에서 6-8월의 DO 농도를 비교적 정확하게 재현하고 있기 때문이다. 비록 일시적인 저층 DO 농도 변화 재현에 한계를 보이지만, 진해만 내에서 봄철에 빈산소수괴가 처음 발생하고 여름철에 발달하고 가을철

에 소멸되는 현상을 Delft3D 모델을 활용하여 해수유동과 함께 시계열 검정을 통해 확인하였다.

빈산소수괴의 시·공간 변동 특성

진해만에서 시기별 빈산소수괴의 수평적인 거동 특성을 파악하기 위하여 빈산소수괴를 형성기(appearence)-발달기(development)-유지기(maintenance)-소멸기(disappearance)로 구분하고 각 과정별 저층 DO 농도의 공간분포와 수직분포를 Fig. 10에 제시하였다. 2021년 5월부터 10월까지의 모델로 계산한 DO 농도 결과를 분석한 결과, 진해만의 빈산소수괴(DO 농도 2 mg/L 이하)는 기온이 상승하는 봄철에 시작되어 여름철 성층 강화와 함께 발달하여 가을까지 유지되다가, 수직혼합이 강해지는 가을철에 소멸되는 특징을 보이며, 시기별로 그 공간적 범

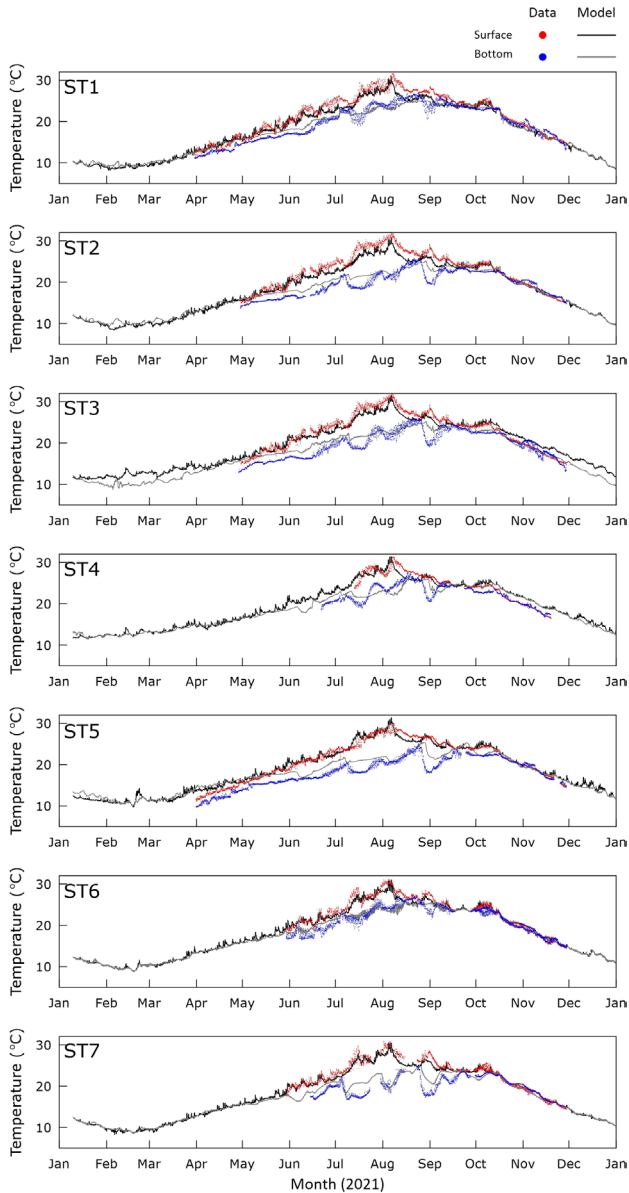


Fig. 7. Time series of observed and modeled water temperatures at monitoring stations.

위와 분포 특성이 뚜렷하게 달라졌다.

초기 형성기인 5월에는 가조도 서측(당동)과 동측(고현)의 수심 약 15 m 이상에서 빈산소수괴가 최초 형성되기 시작하여 진해만 서부해역인 진동만, 당동만, 원문만까지 빈산소수괴가 확장된다. 이렇게 형성된 빈산소수괴는 6~7월에 발달기를 거치는데 진해만 남측에서 시작하여 진해만 중앙부까지 발달하며, 8월에는 최대로 확장된다. 빈산소수괴가 최대로 확장되는 시기에는 수심이 얇은 만 가장자리까지도 빈산소수괴가 수직적으로 발달하기도 한다. 8월에 최대로 발달된 빈산소수괴는 9월 초까

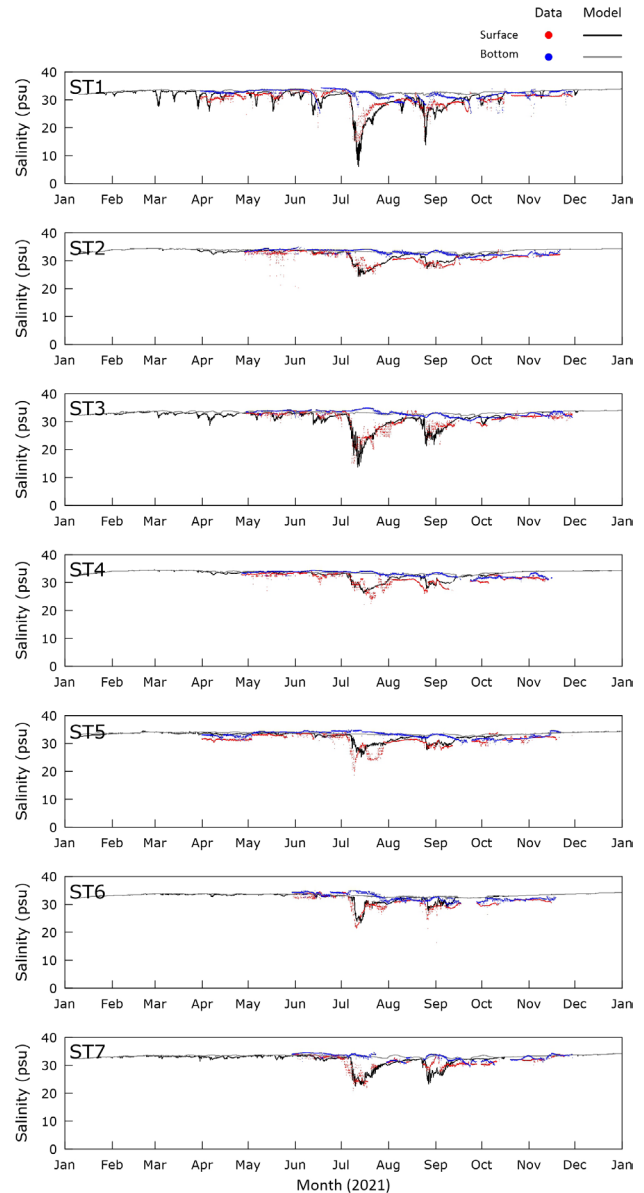


Fig. 8. Time series of observed and modeled salinity at monitoring stations.

지 유지되며 진해만 입구부를 포함하는 대부분의 구간에서 수심 10 m 내외까지 빈산소수괴가 나타난다. 9월 중순 이후 빈산소수괴는 진해만 입구부를 중심으로 소멸하기 시작하며, 수직적인 빈산소수괴 위치 또한 수심 15 m 이상 저층으로 하강한다. 10월에는 가조도 북측을 제외한 대부분 구간에서 빈산소수괴는 소멸하고, 빈산소수괴는 수심 20 m 아래에 위치한다. 이후 진해만 모든 구간에서 빈산소수괴는 완전히 소멸된다. 즉, 진해만에서 빈산소수괴는 초기에는 국지적으로 발생한 뒤 여름철에 최대 확산된 이후 점진적으로 해소되는데, 이러한 결과는 성

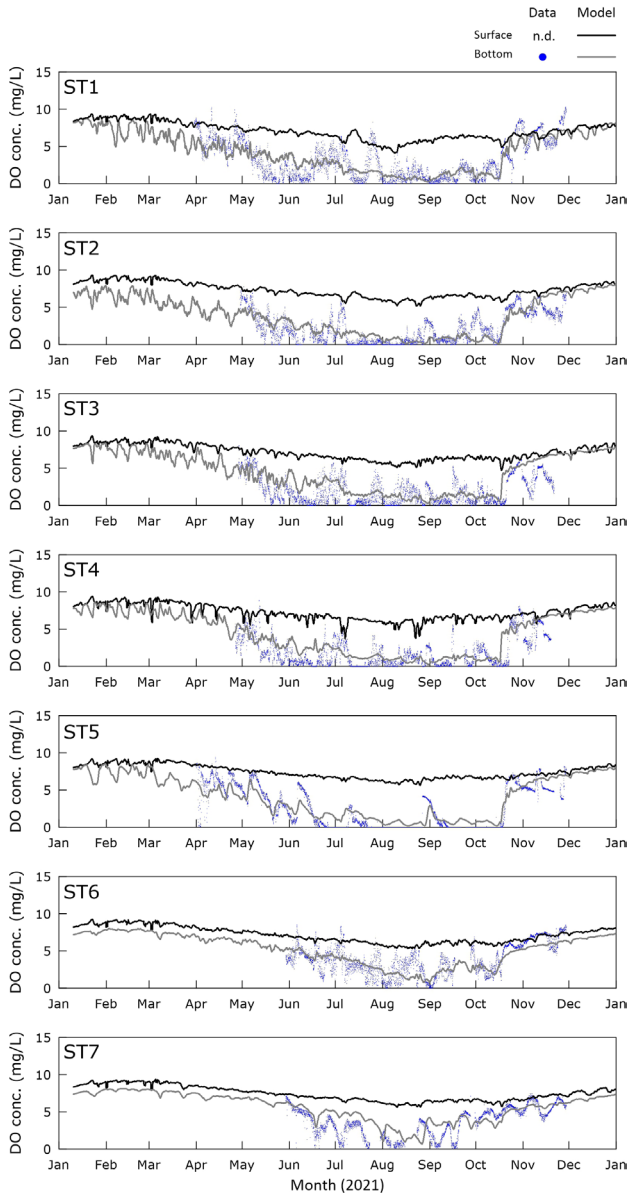


Fig. 9. Time series of observed and modeled DO at monitoring stations. DO, Dissolved oxygen.

층 발달에 의한 표층으로부터 산소공급 감소, 유기물 분해가 강해지는 여름철 저층 DO 농도의 감소로 광범위한 빈산소수괴가 형성됨을 입증한다. 또한 가을철 기온 하강과 혼합 강화로 인한 산소 공급 회복이 빈산소 상태를 해소하는 주요 원인임을 시사한다. 모델로 계산한 모의 시기별 빈산소수괴의 형성-발달-유지-소멸 과정을 부록의 Fig. A1에 제시하였다.

고 찰

성층이 빈산소수괴 발달에 미치는 영향

SOD 입력 조건이 저층에서 DO 농도를 직접적으로 소모시키더라도, 상층에서 지속적으로 고농도의 DO를 공급한다면 빈산소수괴가 형성될 확률은 낮아지게 된다. 하계 수온이 상승하고, 하천유량이 증가하는 시기에는 표층과 저층간의 밀도차로 인한 성층이 강하게 형성되어 상층 대기로부터의 해양 표층으로 유입되는 DO공급을 차단할 때, 저층에서의 강한 SOD로 인해 빈산소수괴는 밀도 약층까지 수직적으로 발달이 가능하다.

Fig. 11은 수온에 의한 BVF와 염분에 의한 BVF를 수직적 DO 농도의 시간적 변화와 함께 도시한 것으로 첫 번째 패널은 장목기상대의 강수량과 풍속을, 두 번째 패널부터는 각 정점에서 실측된 자료를 이용하여 식 (6)에 의해 계산한 것이다. 정점별 수직 DO 농도 분포의 시간적 변화를 분석한 결과, 성층 강도와 빈산소수괴의 발달 사이에 명확한 상관성이 나타났다. 수온 또는 염분에 의해 계산된 BVF가 증가하는 시기에 DO 농도가 2 mg/L 이하인 빈산소수괴가 주로 형성되고 심화되었다. 이는 성층 강도의 증감 시기와 빈산소수괴의 수직 발달 양상이 유사하며 발생하는 시기가 대체로 일치함을 의미한다. 즉, 수직 혼합을 제한하는 물리적 장벽으로서 성층 구조가 작용하여 산소공급을 차단하고 있다는 것을 알 수 있다. 특히, 약 190~210일 사이 성층 강도가 강해지는 시기와 일치해서 빈산소수괴가 수직적으로 발달하는 양상이 나타났다. 이와 같은 결과는 수직 성층 구조가 빈산소의 발생, 강도, 수직 범위에 중요한 영향을 미치며, 수온과 염분으로 인한 밀도변화가 연안 해역의 산소 역학을 결정짓는 핵심 요인임을 나타낸다. 즉, 수온 및 염분에 의해 형성된 성층 구조가 수직 혼합을 억제하여 대기로부터 DO공급을 제한함으로써 빈산소수괴의 생성 및 지속성에 주요한 영향을 미친다는 것을 시사한다.

SOD 조건에 따른 모델 반응성 평가

기준 실험(N)에서는 저층에서 일시적으로 DO 농도가 낮아지는 양상이 나타났으나, 빈산소수괴($DO \leq 2 \text{ mg/L}$)의 발생은 비교적 제한적으로 나타났다. 실험 A에서는 유기물 입력량과 무기화율을 증가시켜 수체 내 산소 소비가 실험 N에 비해서는 강화되었으나, 빈산소수괴의 수직 확장은 제한적인 수준에 머물렀다. 반면, 실험 A+B와 A+B+C에서는 SOD에 관련된 인자(수온 반응 계수 및 임계 DO 계수)를 단계적으로 추가 적용함에 따라 빈산소수괴가 광범위하게 형성되었으며, 특히 A+B+C 실험에서는 수심 10 m 이내의 중층까지 DO 농도가 2 mg/L 이하로 급격히 감소하는 현상이 재현되었다. 이는 유기물 자체의 증가보다 퇴적물의 SOD가 DO 농도 저하에 결정적인 역할을 한다는 것을 의미한다. 또한, 실험 B에서 온도에 따른 SOD 반응 계수만을 고려할 경우 상대적으로 낮은 수온에 의해 산소 소비가 제한되어 DO 농도는 일정 수준 유지되었지만, 실험 A와 결합된 A+B 및 A+B+C에서는 그 효과가 상쇄되어 빈산소 상태가 심화되었다. 특히, 임계 DO 농도 이하에서 SOD가 지속적으로 산소를 소비한다고 가정한 C 조건의 추가는 빈산소층

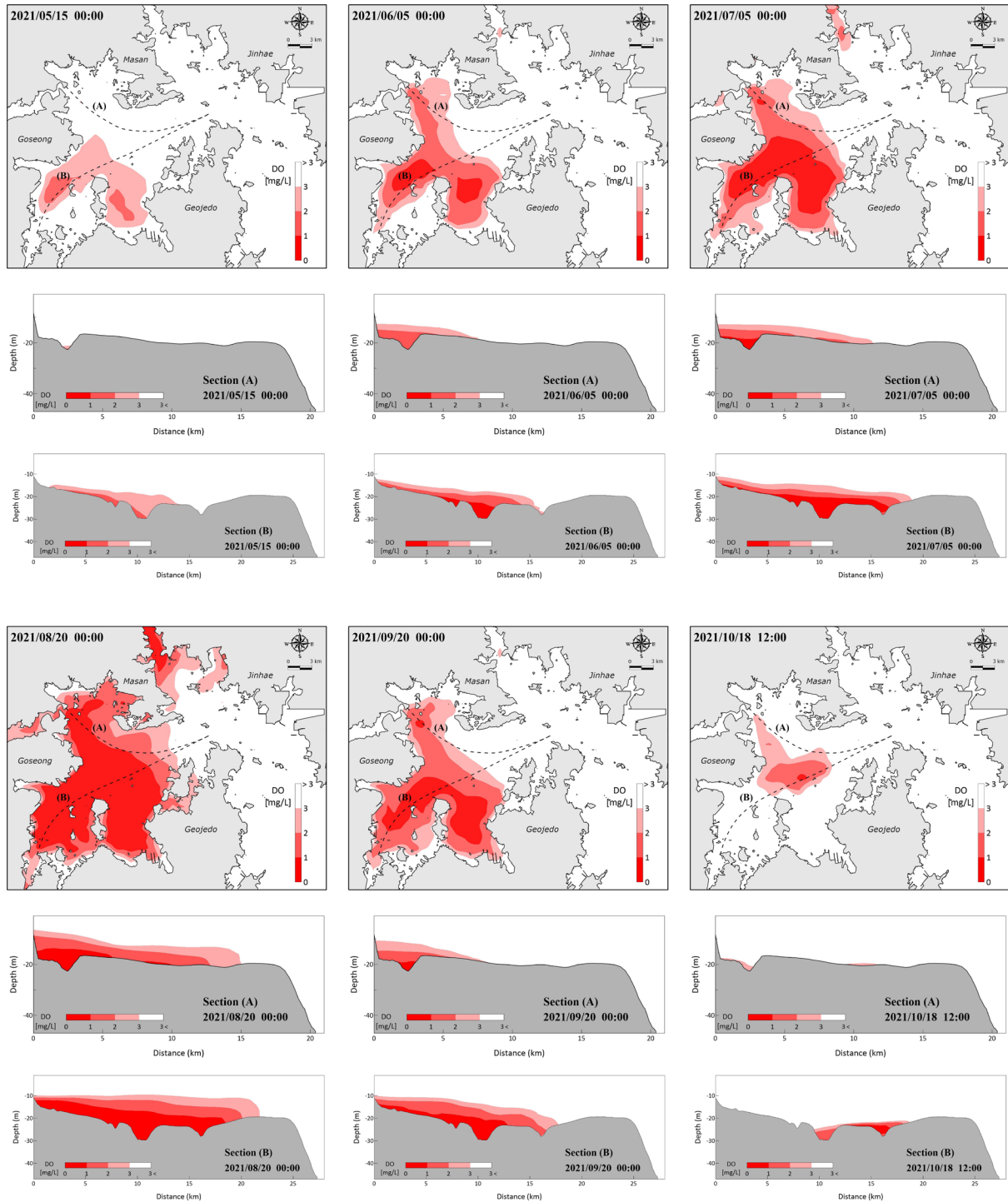


Fig. 10. Simulated bottom DO concentration map and vertical cross-section (A) and (B) showing the development of hypoxia in the study area. DO, Dissolved oxygen.

경계면을 수직적으로 더 상승시키는 결정적인 역할을 하였다 (Fig. 12).

종합적으로 분석한 결과, DO 농도에 가장 큰 영향을 미친 인

자는 SOD 관련 반응 인자로, 특히 수온 및 DO 농도에 따른 SOD 반응성 증가가 빈산소수괴의 생성 및 심화에 핵심적인 역할을 한 것으로 판단된다. 이를 통해 빈산소수괴 재현에 중요한

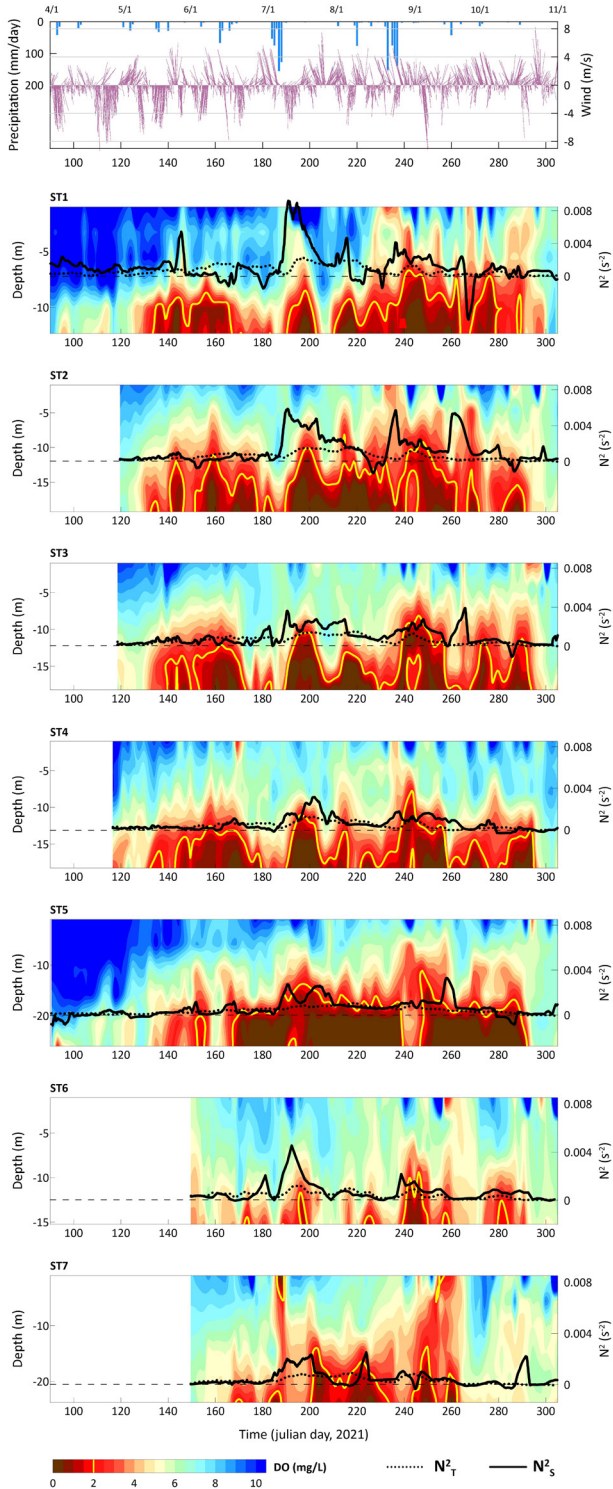


Fig. 11. Sensitivity analysis results showing the impact of varying SOD on DO concentrations. DO, Dissolved oxygen; SOD, Sediment oxygen demand.

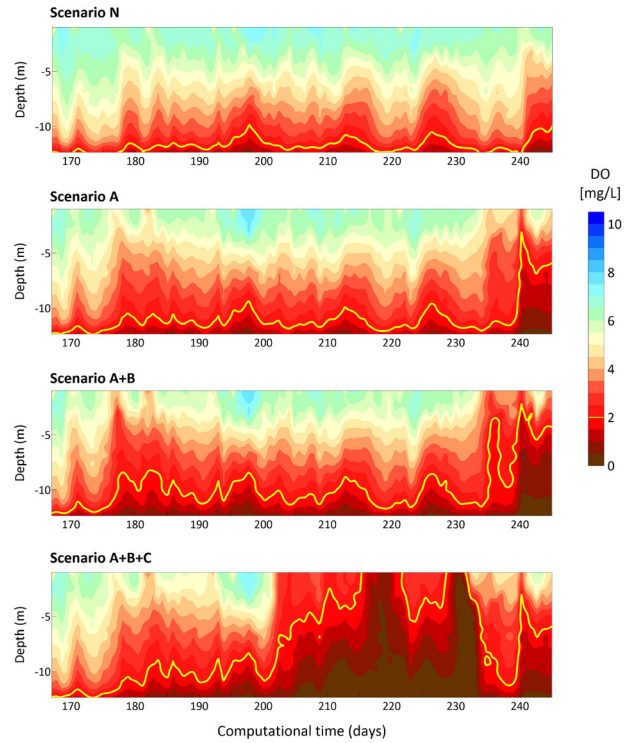


Fig. 12. Sensitivity analysis results showing the impact of varying SOD on DO concentrations. DO, Dissolved oxygen; SOD, Sediment oxygen demand.

SOD는 공간적 분포 특성 뿐만 아니라, 시간적 변동이 매우 크다는 것을 확인할 수 있었고, 이는 시간에 대한 SOD의 변동성을 고려해야만 진해만의 빈산소수괴 특성 재현이 가능함을 시사한다.

시사점 및 후속 연구 방향

본 연구는 진해만을 대상으로 Delft3D 모델을 활용하여 빈산소수괴의 시·공간적 발생 특성과 주요 영향 요인을 정량적으로 분석하였다. 모델 결과는 성층 강화와 SOD가 빈산소수괴 형성에 핵심적임을 보여주었으며, 여름철에 광범위하게 발달한 빈산소수괴가 가을철 혼합에 의해 점진적으로 해소되는 계절적 변동 특성도 잘 재현되었다. 특히 SOD의 반응 계수 및 DO 임계농도는 빈산소수괴의 수직 확장과 지속성에 중대한 영향을 미쳤다.

진해만이라는 반폐쇄성 만에서 수직 성층 구조는 저층 DO 농도의 공급과 소비를 조절하는 주요 메커니즘으로 작용하며, 이러한 분석 결과는 지점 기반의 수질 모니터링 결과를 해석하는데 이론적 근거를 제공할 뿐만 아니라, 수치모델링을 통한 시·공간적 예측에 필요한 필수적인 구조적 지표로 활용될 수 있음을 시사한다. 또한, 성층의 시작 및 소멸 시점과 연계한 저층 DO 농도 변화에 미치는 영향 파악은 향후 빈산소수괴 형성 시점을

사전 예측하기 위한 조기경보 시스템 개발의 기초자료로 제공될 수 있으며, 이는 고수온기, 홍수기시 양식장 관리 등과 같은 실시간 대응체계 구축을 위한 과학적 기반을 마련하고, 어업 피해 저감을 위한 관리 방안 수립에 충분히 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 본 연구는 특정 시기, 특정 해역에 대한 분석에 국한되었기 때문에 모의 연도에 해당하는 환경 조건에서 진해만 내로 특정지어지는 한계를 갖는다. 빈산소수괴 형성 메커니즘을 일반화하기 위해서는 시기적, 공간적으로 다양한 환경 변화가 고려된 외력을 입력 조건으로 하는 수치모델링 후속 연구와 DO 농도 변화와 관련된 생지화학적 반응에 대한 통합적 연계 분석이 필요할 것으로 보인다.

사 사

이 논문은 2025년 국립수산물품질관리원 수산시험연구사업(빈산소수괴 변동 예측기술 개발, R2025043)의 지원으로 수행된 연구이며 연구비 지원에 감사 드립니다.

References

- Allahdadi N and Li C. 2017. Numerical experiment of stratification induced by diurnal solar heating over the louisiana shelf. In: *Modeling Coastal Hypoxia: Numerical Simulations of Patterns, Controls and Effects of Dissolved Oxygen Dynamics*. Dubravko J, Kenneth AR, Robert DH and Katja F, eds. Springer, Dordrecht, Netherlands, 1-22.
- Alosairi Y and Alsulaiman N. 2019. Hydro-environmental processes governing the formation of hypoxic parcels in an inverse estuarine water body: Model validation and discussion. *Mar Pollut Bull* 144, 92-104. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.04.067>.
- Alosairi Y and Alsulaiman N. 2020. Hydro-environmental processes governing the formation of hypoxic parcels in an inverse estuarine water body: Assessment of physical controls. *Mar Pollut Bull* 157, 111311. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111311>.
- Bang KY, Park SJ, Kim SO, Cho CW, Kim TI, Song YS and Woo SB. 2013. Numerical hydrodynamic modeling incorporating the flow through permeable sea-wall. *J Korean Soc Coast Ocean Eng* 25, 63-75. <https://doi.org/10.9765/KSCOE.2013.25.2.63>.
- Diaz RJ and Rosenberg R. 2008. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science* 321, 926-929. <https://doi.org/10.1126/science.1156401>.
- Hetland RD and Zhang X. 2017. Interannual variation in stratification over the Texas-Louisiana continental shelf and effects on seasonal hypoxia. In: *Modeling Coastal Hypoxia*. Justic D, Rose K, Hetland R and Fennel K, eds. Springer, Cham, Switzerland, 49-60. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54571-4_3.
- Holt J, Allen JJ, Anderson TR, Brewin R, Butenschön M, Harle J, Huse G, Lehodey P, Lindemann C, Memery L, Salihoglu B, Senina I and Yool A. 2014. Challenges in integrative approaches to modelling the marine ecosystems of the North Atlantic: Physics to fish and coasts to ocean. *Prog Oceanogr* 129, 285-313. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2014.04.024>.
- Jung KY, Ro YJ and Kim BJ. 2013. Characteristics of tidal current and tidal residual current in the Chunsu Bay, Yellow sea, Korea based on numerical modeling experiments. *J Korean Soc Coast Ocean Eng* 25, 207-218. <https://doi.org/10.9765/KSCOE.2013.25.4.207>.
- Jung WS, Lee WC, Hong SJ, Kim JL and Kim DM. 2014. Hypoxia estimation of coastal bay through estimation of stratification degree. *J Korean Soc Mar Environ Saf* 20, 511-525. <https://doi.org/10.7837/kosomes.2014.20.5.511>.
- Kang H. 2019. A study on prediction of hypoxia occurrence from inner bay. Ph.D. Thesis, Kunsan National University, Kunsan, Korea.
- Kang SW, Park KS, Kim SI and You SH. 1999. Seasonal variations of near-field dilutions of submerged multipoint-diffuser discharges in Masan Bay. *J Korean Soc Coast Ocean Eng* 11, 116-126.
- Kang SW, You SH, Kim SI, Oh BC and Park KS. 2001. Concentration changes of wastewater effluent discharge in the mixing zone of Masan sea outfall. *J Korean Soc Mar Environ Eng* 4, 15-24.
- Kim SY, Lee YH, Kim YS, Shim JH, Ye MJ, Jeon JW, Hwang JR and Jun SH. 2012. Characteristics of marine environmental in the hypoxic season at Jinhae bay in 2010. *Korean J Nat Conserv* 6, 115-129. <https://doi.org/10.11624/KJNC.2012.6.2.115>.
- Laurent A and Fennel K. 2017. Modeling river-induced phosphorus limitation in the context of coastal hypoxia. In: *Modeling Coastal Hypoxia*. Justic D, Rose K, Hetland R and Fennel K, eds. Springer, Cham, Switzerland, 149-171. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54571-4_7.
- Lim JH. 2019. Coastal hypoxia in Jinhae Bay: Its mechanism, spatiotemporal variability, and biogeochemical implications. Ph.D. Thesis, Busan National University, Busan, Korea.
- MOF (Ministry of Oceans and Fisheries). 2022. Integrated Management of Marine Environment and Ecosystems Around Saemangeum. Korea Institute of Marine Science & Technology Promotion (KIMST) Report, Seoul, Korea, 1-489.
- NIER (National Institute of Environmental Research). 2018. Development and Evaluation of Next-Generation Water Quality and Aquatic Ecosystem Prediction Models. NIER-SP2017-406, NIER, Incheon, Korea, 1-294.
- NIER (National Institute of Environmental Research). 2019. Continuous Water Quality Monitoring Using Real-time Sensors in Weir Segments (II). NIER-SP2019-270, NIER, Incheon, Korea, 1-178.
- Ostojski MS, Gebala J, Orlińska-Woźniak P and Wilk P. 2016.

Implementation of robust statistics in the calibration, verification and validation step of model evaluation to better reflect processes concerning total phosphorus load occurring in the catchment. *Ecol Model* 332, 83-93. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2016.04.004>.

Tian R, Cerco CF, Bhatt G, Kinker LC and Shenk GW. 2021. Mechanisms controlling climate warming impact on the occurrence of hypoxia in Chesapeake Bay. *J Am Water Resour Assoc* 58, 855-875. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12907>.

Wiggert JD, Hood RR and Brown CW. 2017. Modeling hypoxia and its ecological consequences in Chesapeake Bay. In: *Modeling Coastal Hypoxia*. Justic D, Rose K, Hetland R and Fennel K, eds. Springer, Cham, Switzerland, 119-147. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54571-4_6.

Yang DB and Hong JS. 1988. On the biogeochemical characteristics of surface sediments in Chinhae Bay in September 1983. *Bull Korean Fish Soc* 21, 195-205.

Yoon TW and Park JW. 2002. Improvement of the storage coefficient estimating method for the clark model. In: *Proceeding of the 2nd Korea Water Resources Association*. Korea Water Resources Association Press, Busan, Korea, 1334-1339.

부 록

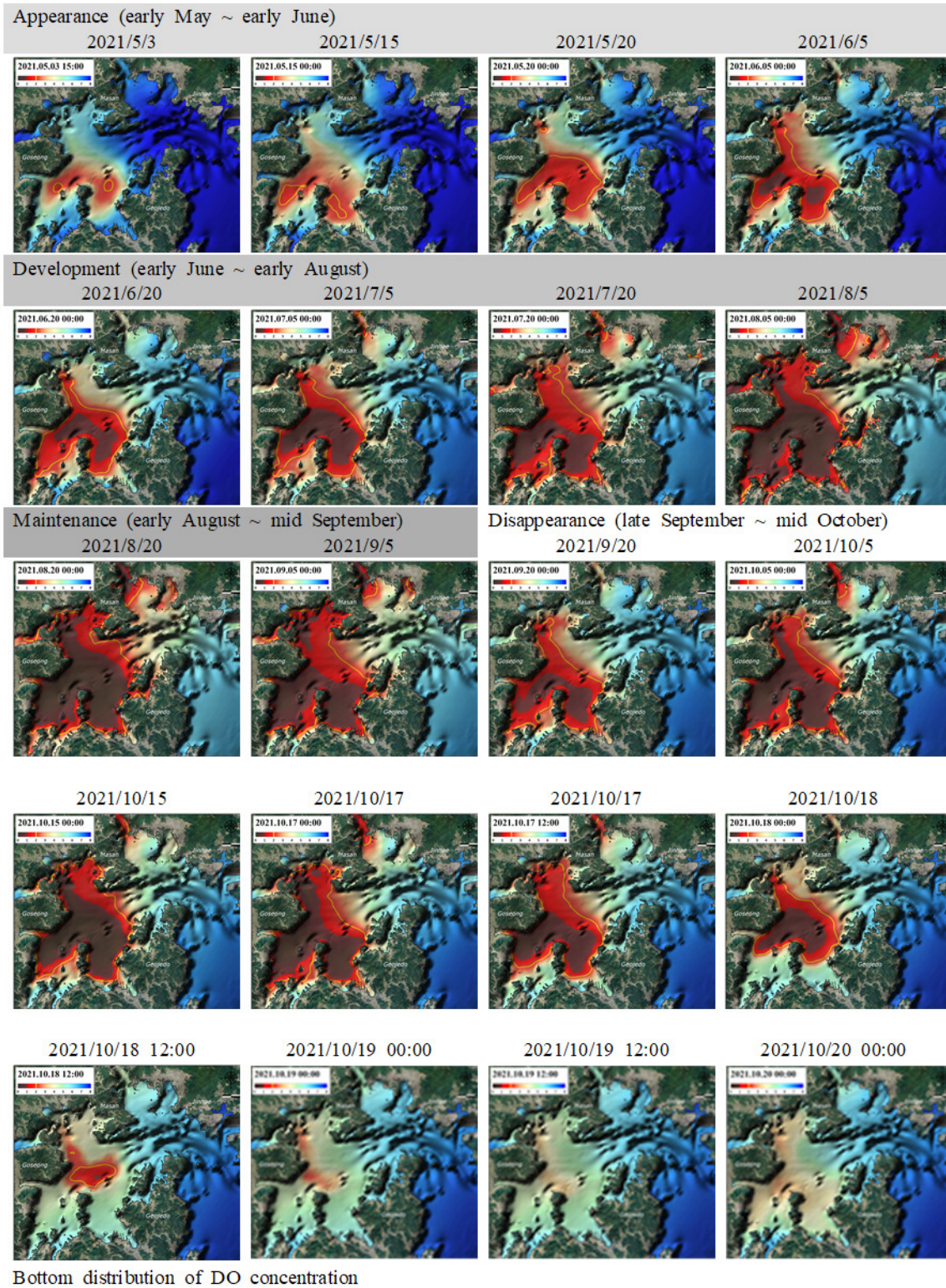


Fig. A1. Model-predicted spatiotemporal behavior and evolution of hypoxic water mass formation in Jinhae Bay.