

# 입자추적 실험을 이용한 새만금 배수갑문 유출수의 영향 범위 연구 A Study on the Influence of the Saemangeum Sluice-Gates Effluent Discharge using the Particle Tracking Model

조창우\* · 송용식\*\* · 방기영\*\*\*

Chang Woo Cho\*, Yong Sik Song\*\* and Ki Young Bang\*\*\*

**요지** : 입자추적 실험 결과를 이용하여 새만금 배수갑문 유출수의 영향 범위 파악을 위한 방법론을 수립하고, 2017년을 대상으로 새만금 배수갑문 유출수의 영향 범위를 계절별 확률 분포로 제시하였다. 물질 수송 시간의 지표 중 하나인 water age를 계산하고 입자추적 실험 결과와 비교하여 계산 결과의 타당성을 입증하였다. 배수갑문 유출수는 신시 또는 가력 배수갑문을 중심으로 그 영향 범위가 방사형으로 증가하는데 계절풍의 영향으로 동계에는 남측으로, 하계에는 북측으로 영향 범위가 치우치는 것으로 예측되었다. 예측 결과는 2017년 상황에 한정되지만, 본 연구에서 수립한 입자추적 실험을 이용한 배수갑문 유출수 영향 범위 산정 기법은 현재 변화하고 있는 새만금 해역의 장래 배수갑문 유출수의 영향 범위 산정 연구에 활용이 가능하다.

**핵심용어** : 입자추적 모델, 새만금 배수갑문, 유출수 영향 범위, water age

**Abstract** : This study suggested a method calculating the influence of effluent discharge from Saemangeum sluice-gates using the particle tracking model. For 2017, we presented the seasonal effects of effluent discharge as probability spatial distributions and compared with the results of the water age, one of the indicators of transport time scale. The influence of sluice-gates effluent discharge increases radially around Sinshi or Gaseok gates, which are expected to be biased toward the south in winter and north in summer due to the effect of seasonal winds. Although the results of the prediction are limited to the 2017 situation, the method of calculating the influence of sluice-gates effluent discharge using the Lagrangian particle tracking model can be used to predict the future of the around Saemangeum.

**Keywords** : particle tracking model, Saemangeum sluice-gate, influence of effluent discharge, water age

## 1. 서 론

새만금 해역은 2006년 방조제 건설 후 새만금 종합개발계획에 따라 방조제 외측의 새만금 신항 공사와 내측의 내부 개발 공사(준설, 매립, 방수제 등)가 진행 중에 있으며, 신시 및 가력 배수갑문을 통해 내·외측으로 해수가 유통되고 있는 상황이다. 2개의 배수갑문은 새만금호의 관리수위 유지를 위해 운영되는데, 해수를 제한적으로 유통시킨 2011년에 호내 수질이 크게 악화되면서 호내 수질 개선을 위해 2013년부터는 내측과 외측의 일정 이상 수위의 차이가 발생하는 대조기를 대상으로 배수갑문을 하루에 한 번 정기적으로 개문하여 해수 유입량을 증가시키는 방안으로 운영되었다. 새만금 외해역 측면에서 살펴보면 신시 및 가력 배수갑문을 통해서만 새

만금호에 존재하는 저밀도의 기수가 외해역으로 배출되므로, 배수갑문이 새만금 외해역의 수질 변화를 일으킬 수 있는 유일한 점오염원에 해당한다고 볼 수 있다. 이는 새만금 내부의 개발 공사 또는 하천 오염 부하량의 급증으로 인해 호내가 오염된다면, 새만금 배수갑문을 통해 오염물질이 새만금 외해역으로 유출되어 인근 해역에 악영향을 미칠 수 있음을 시사하므로, 새만금 배수갑문 유출수가 외해역에 미치는 영향범위에 대한 연구가 필요한 시점이다.

Lagrangian 기반의 입자추적 실험은 Eulerian 방법에 비해 수치적인 오류가 적고 안정적인 장점이 있어서, 연안의 물질 확산 연구에 주로 사용하는 방법이다. 입자추적 실험은 성질이 없는 가상의 입자가 모델 영역 내에서 해수의 흐름에 따라 이동하는 위치를 계산하는 방법으로 동시간, 동위치에 방

\* (주)지오시스템리서치 부설연구소 책임(Corresponding author: Chang Woo Cho, Principal Engineer, Research and Development Institute, GeoSystem Research Corporation, 172 LS-ro, Gunpo-si, Gyeonggi-do 15807, Korea, Tel: +82-70-7019-0624, Fax: +82-70-7016-0673, cwjo@geosr.com)

\*\* (주)지오시스템리서치 부설연구소 수석(Managing Director, Research and Development Institute, GeoSystem Research Corporation)

\*\*\* (주)지오시스템리서치 부설연구소 책임(Principal Engineer, Research and Development Institute, GeoSystem Research Corporation)

류된 입자의 이동 경로가 동일하게 계산되는 것을 방지하기 위해 임의의 확산을 가정하는 무작위 행보(random walk) 기법이 수반된다(Suh, 2006; Suh and Lee, 2011; Kim et al., 2020).

입자추적 실험은 입자 방출 이후 각각 입자의 공간적 위치와 이동시간을 계산하여 해수의 이동 양상과 체류시간(residence time)을 얻을 수 있는 장점이 있으나, 정확한 확산범위 산정을 위한 적절한 입자의 방출 개수 및 방출 시기 설정의 어려움이 있는 단점이 있다. 따라서 입자의 방출 조건, 환경 조건, 무작위 행보 등에 의한 서로 다른 이동 경로를 갖는 입자가 대변하는 대상 물질의 거동 특성을 파악하기 위해서는 여러 가지 조건에 따라 방류 입자의 수를 증가시켜 하나의 입자가 가질 수 있는 오차 범위를 축소시키고, 다양한 입자 경로에 대한 통계적인 분석이 필요하다. Water age는 점오염원에서 유출되는 오염물질의 확산을 설명하기에 적합한 개념으로 오염원(source)으로부터 유출된 물질이 임의의 해역에 도달하기까지 소요되는 시간, 즉 대상 물질이 시스템 내에 머무르는 시간으로 정의 될 수 있다(Bolin and Rodhe, 1973; Kim et al., 2020). 본 연구에서는 입자추적 기법을 활용하여 배수갑문으로부터 유출되는 물질의 영향범위를 확률 분포로 제시하고, 물리환경 특성에 따른 다양한 물질 수송 시간 정의 중에서 water age를 계산하여 그 결과를 비교하였다.

본 연구에서는 배수갑문 유출수의 영향범위 산정 방법론을 정립·적용하여 2017년을 대상으로 새만금 외해역에 영향을 미칠 수 있는 배수갑문 유출수의 영향범위를 예측하고자 한다. 현재 새만금은 종합개발계획에 따라 지속적인 내부 개발이 진행되고 새만금 외해역의 해양환경 변화 보다는 새만금호의 목표 수질 달성 여부에 관심이 집중되고 있으며, 새만금유역 2단계 수질개선종합대책 결과에 따라 새만금호의 수질 및 배수갑문 운영 방안 또한 가변적인 상황이다. 본 연구에서 제시한 배수갑문 유출수의 확산 범위 영향을 진단할 수 있는 영향 범위 추정 기법은 향후 새만금 개발에 따른 외해역 환경의 부정적인 영향을 최소화 할 수 있는 관리기술 개발의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. 수치모델 및 영향 범위 산정 방법

### 2.1 모델 구축

본 연구에서 사용한 Delft3D 모델은 네덜란드의 Deltares에서 개발하였다. Delft3D 모델은 유동·퇴적(Delft3D-FLOW), 파랑(Delft3D-WAVE), 수질(Delft3D-WAQ) 모듈로 구분되어 있으며, 각각의 모듈은 연동이 가능하기 때문에 연구 목적에 따라 필요한 모듈을 선택적으로 사용이 가능하다. Delft3D 모델은 조석 및 조류에 의한 흐름을 모의할 수 있으며, 성층화된 수체 내에서의 밀도에 의한 흐름, 하천과 연안에서의 복잡한 흐름 그리고 보존성 및 비보존성 물질의 이송 등을 모의할 수 있다. 또한 하구역의 염분 침투와 발전소의 온배수

확산 등을 모의하는 등 개발국인 네덜란드를 비롯하여 전 세계적으로 수많은 해역 및 하천의 연구에 적용되었다. Delft3D는 Arakawa C-grid를 사용하며, 수평방향으로 직교(cartesian) 또는 직교곡선(orthogonal curvilinear) 격자체계를 사용한다. 수직방향으로  $\sigma$ -좌표계 또는  $z$ -좌표계를 선택하여 사용이 가능한 장점이 있다. 본 연구에서는 새만금 배수갑문 유출수의 영향범위 파악을 위하여 연안, 하구, 하천, 호소, 습지 등의 유동 및 물질 수송을 모의하는 Delft3D-FLOW 모듈을 사용하였다. Delft3D-FLOW 모듈은 연속방정식(식 1)과 운동방정식(식 2a와 2b), 상태방정식(식 3), 그리고 퇴적물을 포함한 물질보존방정식(식 4)으로 구성되어 있으며, 상태방정식은 밀도차에 의한 경압력이 운동방정식과 연계되어 있다. Delft3D 모델의 이론적 배경과 수치해석 기법은 Delft3D Hydro-Morphodynamics 사용자 매뉴얼에 상세하게 기술되어 있다(Deltares, 2013).

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial [hU]}{\partial x} + \frac{\partial [hV]}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = Q \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\omega \partial U}{h \partial \sigma} - fV \\ = - \left( g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + g \frac{h}{\rho_0 \sigma} \int_0^1 \left( \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \sigma'}{\partial x} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma'} \right) d\sigma' \right) \\ + F_x + M_x + \frac{1}{h^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \nu_V \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right) \end{aligned} \quad (2a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\omega \partial V}{h \partial \sigma} - fU \\ = - \left( g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + g \frac{h}{\rho_0 \sigma} \int_0^1 \left( \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\partial \sigma'}{\partial y} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma'} \right) d\sigma' \right) \\ + F_y + M_y + \frac{1}{h^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \nu_V \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right) \end{aligned} \quad (2b)$$

$$\frac{\partial P}{\partial \sigma} = -g\rho h \quad (2c)$$

$$\rho = \rho(p, S, T) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial hc}{\partial t} + \frac{\partial Uc}{\partial x} + \frac{\partial Vc}{\partial y} + \frac{\partial \omega c}{\partial \sigma} \\ = h \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( D_H \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_H \frac{\partial c}{\partial y} \right) \right] + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ D_V \frac{\partial c}{\partial \sigma} \right] + hQ \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,  $\zeta$ 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.  $\omega$ 는 수직유속,  $\sigma$ 는 연직방향의 시그마(sigma) 좌표,  $\sigma'$ 는 연직방향 시그마 좌표의 변화율( $\sigma' = d\sigma/dz$ ),  $Q$ 는 단위면적당 공급-소멸(source-sink) 부하량,  $\rho_0$ ,  $\rho$ 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,  $\nu_V$ 는 수직 난류점성계수,  $g$ 는 중력가속도,  $T$ ,  $S$ 는 수온, 염분,  $c$ 는 용존 또는 부유물질의 농도,  $D_H$ ,  $D_V$ 는

수평 및 수직 난류확산계수이다.

모델 입력 조건의 불확실성을 줄이고 정확도를 높이기 위하여 광역 모델인 황·동중국해 모델을 구축하고 상세역 모델인 새만금 주변해역 모델에 경계조건을 부여하는 등지형 기법을 사용하였다. 광역 모델인 황·동중국해 모델 영역은 쿠로시오로부터 분기하여 우리나라 서해 및 남·동해로 들어오는 대마난류의 재현과 새만금 주변해역 모델의 조위 및 수온·염분의 개방경계 조건을 제공한다. 모델 영역은 황해 및 동중국해를 포함하는 동서 방향으로 1,340 km, 남북 방향으로 1,864 km로 설정하였다. 서해의 지형 및 유동 조건을 재현하면서 외해에서의 계산시간을 절약하기 위해 최소 3.8 km 크기의 직교 곡선 격자체계를 사용하고, 수직방향으로 시그마 좌표계를 적용하여 11개 층으로 구성하였으며, 수직 격자별 두께는 동일한 비율로 설정하였다. 상세역 모델인 새만금 주

변해역 모델 영역은 서해의 새만금 일대를 중심으로 남측으로 영광, 북측으로 대천을 포함하는 동서 방향 85 km, 남북 방향 127 km의 영역으로 설정하였다. 계산 격자망은 개방경계에서는 800~1,000 m로 황·동중국해 모델 격자 크기와 4:1~5:1 비율을 유지하면서 새만금 방조제 전면 외해역에서 최소 200 m, 호내에서 최소 80 m 크기의 직교 곡선 격자체계를 사용하고 수직방향으로는 황·동중국해 모델과 동일하게 격자별 두께의 비율이 동일한 시그마 11개 층으로 구성하였다. Fig. 1에 황·동중국해 모델과 새만금 주변해역 모델의 격자망도와 모델의 보정 및 검정에 사용한 관측 정점의 위치를 나타냈다.

새만금 주변해역의 해양환경 특성을 재현하기 2013년 1월 1일부터 모의를 시작하여 매년 관측한 현지 측정 자료를 이용하여 모델을 보정하고 검정하는 과정을 거쳤으며, 본 연구

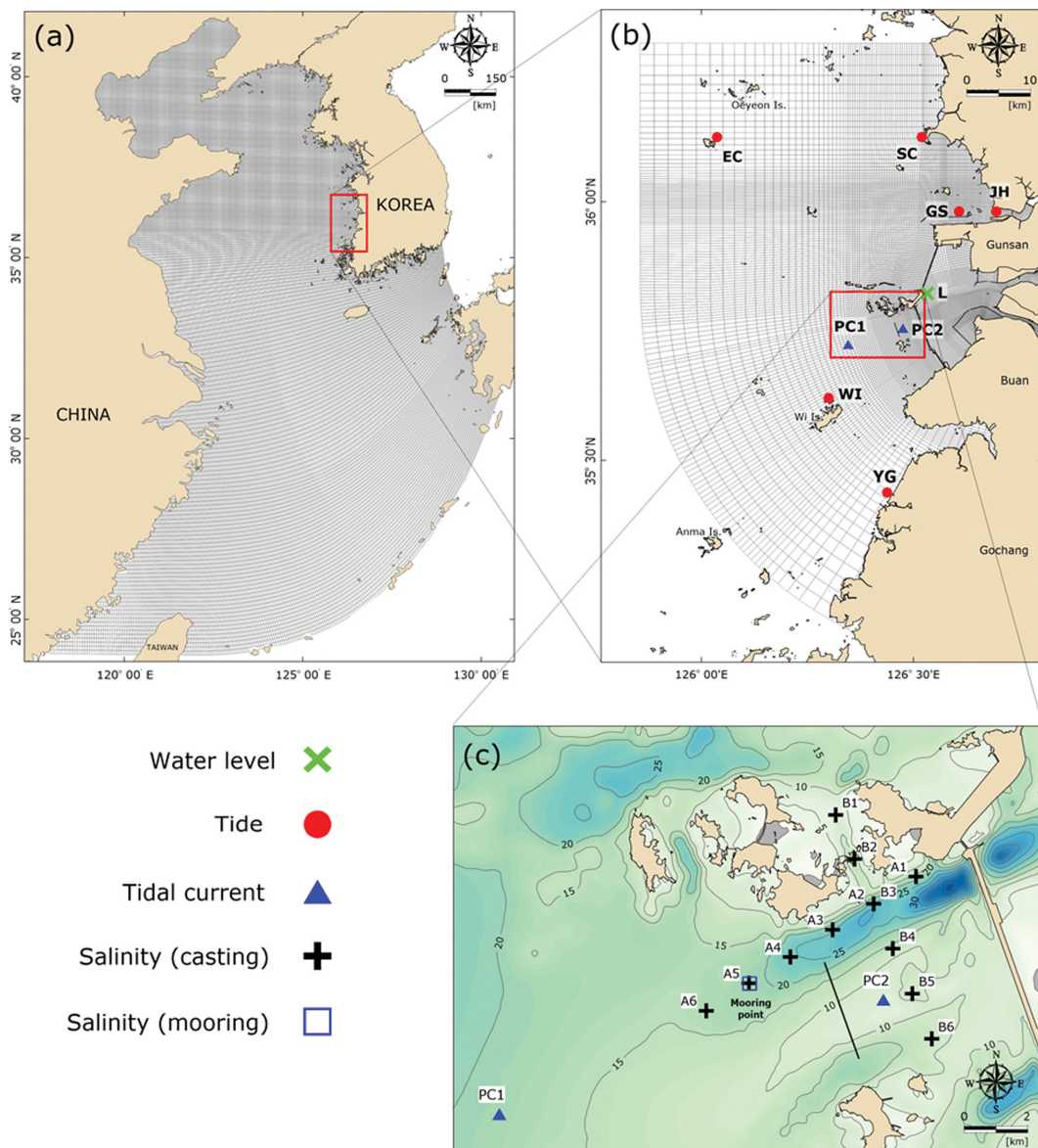
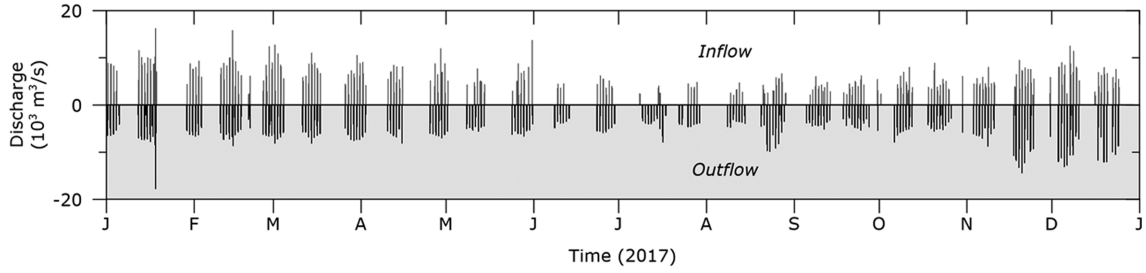


Fig. 1. Computation grids and observation points. Yellow sea model domain (a), Saemangeum model domain (b) and salinity measurement stations in front of the Sinsi sluice-gate (contour line is depth in meters below D.L.) (c).



**Fig. 2.** Time series of inflow and outflow through the two sluice-gates. The inflow means flow from the sea to the Saemangeum lake and the outflow is the opposite.

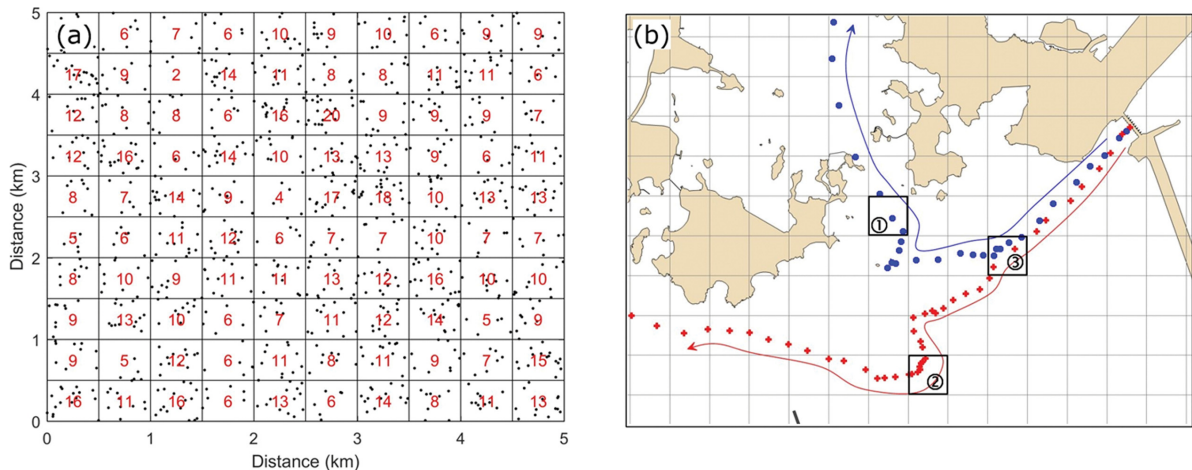
는 그 중에서 2017년 1년의 결과를 대상으로 수행되었다. 황·동중국해 모델의 수심은 ETOPO1 자료를, 새만금 주변해역 모델은 최신 해도를 기준으로 수심을 입력하였다. 초기 조건을 위해 WOA13(World Ocean Atlas 2013)의 1월 평균 수온 및 염분 자료와 국립수산물과학원 정선관측자료를 보간하여 황·동중국해 모델의 3차원 격자별로 부여하였다. 새만금 주변해역 모델은 황·동중국해 모델의 3차원 수온·염분 결과를 공간적으로 보간하여 사용하였다. 조석 개방경계 조건은 NAO(National Astronomical Observatory)의 NAO.99jb 조석 모델에서 제공하는 주요 5개 분조(M<sub>2</sub>, S<sub>2</sub>, K<sub>1</sub>, O<sub>1</sub>, N<sub>2</sub>) 조화상수를 합성하여 황·동중국해 모델의 개방경계에 매 계산시간마다 입력하였으며, 수온 및 염분 개방경계 조건은 WOA13의 월평균 자료를 사용하여 황·동중국해 모델 개방경계 격자에 수심별로 다르게 입력하였다. 새만금 주변해역 모델의 조석 및 수온·염분 개방경계 조건은 황·동중국해 모델의 결과를 공간적으로 보간하여 입력하였다. 모델에 입력되는 양쯔강과 황하의 유량은 ORNL DAAC(Oak Ridge National Laboratory, Distributed Active Archive Center)의 1976~1979년의 월평균 유량 자료를, 한강 유량은 한국수력원자력에서 제공하는 팔당댐 수문 자료를, 금강 하구둑 및 영산강 하구둑의 방류량은 한국농어촌공사가 제공한 하구둑 방류량 자료를 사용하였다. 지형 조건으로는 모의 대상인 2017년도에 해당하는 새만금신항 방파제와 비안도 방파제의 지형 조건을 적용하였다

(Fig. 1c). 격자별 해상풍과 해양-대기 열교환을 위해, 해상풍 및 기상 자료(대기온, 상대습도, 전운량)는 황·동중국해 모델에는 미국 국립해양대기청의 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)에서 제공하는 공간 22 km, 시간 1시간 간격의 해상도를 갖는 CFSv2(Climat Forecast System Version 2) 자료를, 새만금 주변해역 모델에는 우리나라 기상청에서 제공하는 공간 1.5 km, 시간 1시간 간격의 해상도를 갖는 국지예보모델(Local Data Assimilation and Prediction System, LDPAS) 자료를 각각 사용하였다.

한국농어촌공사에서 제공하는 새만금호 내측의 수위자료와 배수갑문 운용 기록을 이용하여 신시 및 가력 배수갑문의 유·출입량을 사전에 계산하고 모델에 입력하였다. 2개의 배수갑문을 통해 새만금 외측에서 내측으로 유입되는 총 유량(Q<sub>m</sub>)과 내측에서 외측으로 유출되는 총 유량(Q<sub>out</sub>)은 다음과 같다 (식 5).

$$Q_{in} = \frac{V_b - V_a - D_{riv}}{t_{in}} \quad Q_{out} = \frac{V_b - V_a}{t_{out}} \quad (5)$$

여기서, V<sub>a</sub>와 V<sub>b</sub>는 해수의 유입 전·후 체적, D<sub>riv</sub>는 호내로 유입되는 하천 유량, t<sub>in</sub>과 t<sub>out</sub>은 해수의 유입과 유출 지속시간을 의미한다. 이렇게 산정된 총 유출입량을 신시와 가력 배수갑문 폭의 상대비(신시:가력 = 10:8)로 나누어 각 배수갑문에 입력하였다(Fig. 2).



**Fig. 3.** Schematic diagram for particles counting (a) and trajectories (b).

**2.2 배수갑문 유출수 영향 범위에 대한 확률 분포**

입자추적 실험에서 사용되는 입자는 입자의 방류 시기 및 개수와 방류시의 해수 흐름에 따라 그 이동 경로가 달라질 수 있으며, 동일한 조건이라고 할지라도 입자의 무작위 행보 (random walk)에 의해 입자는 서로 다른 위치로 이동한다. 따라서 이동하는 입자를 이용하여 배수갑문 유출수의 영향 범위를 계산하기 위해서는 입자 방출 조건과 환경 조건을 포괄할 수 있는 다수의 입자를 활용해야 하며, 다수의 입자가 이동하는 위치를 배수갑문 유출수가 영향을 미칠 수 있는 범위

라고 가정하는 확률론적인 해석이 가능하다. 본 연구에서는 배수갑문 유출수가 새만금 외해역으로 미치는 영향 범위를 파악하기 위하여 환경조건(조시, 갑문 유출입량, 바람 등)에 따라 달라질 수 있는 확산 범위를 확률로서 제시하기 위하여 모델 영역 내에 가상의 격자를 설정하고, 입자추적 실험 결과를 분석하여 단위 격자별 통과 입자 개수를 백분율로 나타내는 방법을 도입하였다.

1,000개의 입자가 가로, 세로 5 km 공간에 무작위로 위치한다고 가정하자. 공간을 가로, 세로 방향으로 500 m 등간격

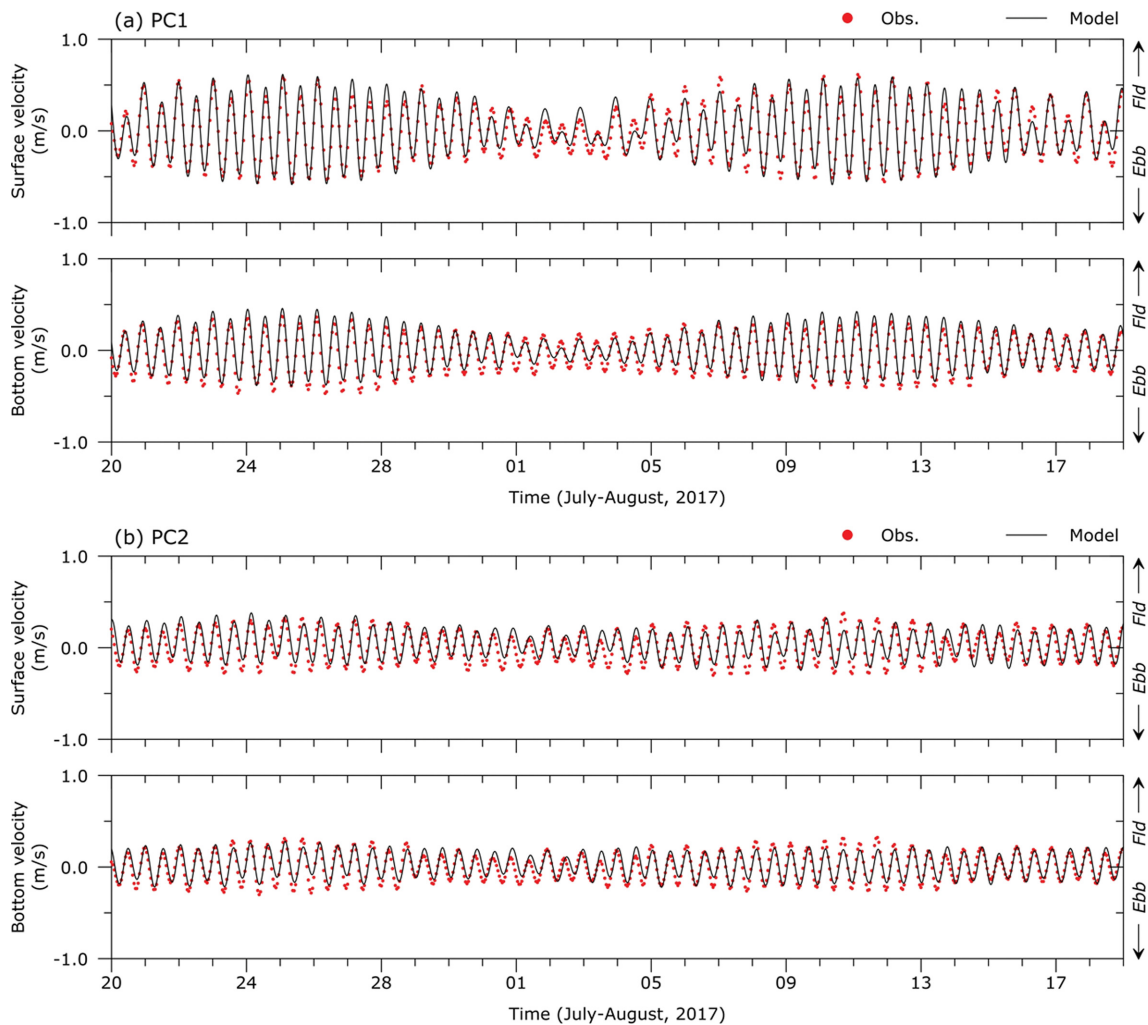
**Table 1.** Outlines of field data and surveys for model validation

Item	Station	Period	Reference
Water level	L	Jan. 1~Dec. 31, 2017	KRCC <sup>1)</sup>
Tide	EC, SC, GS, JH, WI, YG	Jan. 1~Dec. 31, 2017	KHOA <sup>2)</sup>
Tidal current	PC1, PC2	Jul. 20~Aug. 18, 2017	GROOF <sup>3)</sup>
Salinity (casting)	A1-A6, B1-B6	Aug. 8, 2017	This study
Salinity (mooring)	A5	Aug. 9~Aug. 15, 2017	This study

<sup>1)</sup>Korea Rural Community Corporation.

<sup>2)</sup>Korea Hydrographic and Oceanographic Agency.

<sup>3)</sup>Gunsan Regional Office of Oceans and Fisheries.



**Fig. 4.** Comparison of tidal current time series between observed and model results on the surface and bottom ( $\theta$  applied to both observed and model results for PCA are  $39^\circ$  (PC1) and  $142^\circ$  (PC2), respectively).

으로 격자화하고 단위 격자속에 들어있는 입자의 개수를 세면 단위 격자속에 포함된 입자의 개수를 전체 입자에 대한 백분율로 나타낼 수 있다(Fig. 3a).

하지만, 실제 모델 결과에 이 방식을 적용하는 것은 적절치가 않다. 왜냐하면 방출된 입자는 시간에 따라 그 위치가 달라지기 때문이다. 만약 입자추적 모델링에서 1,000개의 입자를 10분 간격으로 출력한 경우, 모델 영역 밖으로 입자가 나가지 않는다고 가정한다면 100분 후에는 10,000개의 입자가 시간에 따라 서로 다른 위치에 존재할 것이기 때문이다. 본 연구에서는 이 문제를 해결하기 위하여 각 입자에 대해 고유 ID를 부여하고, 단위 격자에 한번 이상 포함되지만 확인하였다.

$$P = \frac{N_{pid}}{T_{pid}} \times 100 \quad (6)$$

여기서,  $P$ 는 단위 격자에서 계산한 백분율이고,  $N_{pid}$ 는 단위 격자에 한번 이상 출입한 입자의 개수,  $T_{pid}$ 는 총 입자의

개수이다. 왕복성 조류에 의한 중복을 무시하기 위하여 가장의 단위 격자를 통과하는 입자는 입자별로 한번만 카운트하고, 단위 격자를 통과한 입자의 개수를 총 입자의 개수로 나누어 백분율로 나타낸다. 예를 들어 총 2개의 입자가 모의 기간 동안 신시 배수갑문으로부터 출발하여 Fig. 3b에서 제시한 경로로 이동하였다면, 모든 상자에서  $T_{pid}$ 는 2가 된다. 상자 1번과 2번의  $N_{pid}$ 는 각각 1로서 50%의 확률을 갖으며, 상자 3번의  $N_{pid}$ 는 2로서 100%의 확률을 갖는다. 입자가 지나가지 않는 상자의 확률은 0%이며, 방출 입자가 많아질수록 확률 오차는 감소한다.

### 3. 결 과

#### 3.1 모델 검정 결과

모델 결과의 신뢰성 확보를 위해 수위, 조석, 조류, 염분에 대한 검정을 수행하였다. 검정에 사용한 관측 자료의 항목, 정점, 기간 및 출처를 Table 1에 제시하였으며, 정점별 위치는

**Table 2.** Comparison of tidal constituents between observed and model results

St.	Tc.	Amplitude (m)				Phase (°)			
		Obs.	Model	Error	Skill	Obs.	Model	Error	Skill
EC	M <sub>2</sub>	1.767	1.790	0.023	98.7	87.6	85.0	-2.6	99.3
	S <sub>2</sub>	0.708	0.710	0.002	99.7	137.7	139.0	1.3	99.6
	K <sub>1</sub>	0.319	0.330	0.011	96.6	282.0	281.8	-0.2	99.9
	O <sub>1</sub>	0.246	0.243	-0.003	98.8	246.0	240.2	-5.8	98.4
	N <sub>2</sub>	0.364	0.342	-0.022	94.0	63.8	65.8	2.0	99.4
SC	M <sub>2</sub>	2.051	2.067	0.016	99.2	86.1	81.8	-4.3	98.8
	S <sub>2</sub>	0.832	0.823	-0.009	98.9	142.2	133.6	-8.6	97.6
	K <sub>1</sub>	0.344	0.356	0.012	96.5	280.0	282.2	2.2	99.4
	O <sub>1</sub>	0.263	0.267	0.004	98.5	240.9	241.9	1.0	99.7
	N <sub>2</sub>	0.360	0.410	0.050	86.1	60.4	59.3	-1.1	99.7
GS	M <sub>2</sub>	2.077	2.055	-0.022	98.9	84.1	79.8	-4.3	98.8
	S <sub>2</sub>	0.840	0.833	-0.007	99.2	136.3	131.6	-4.7	98.7
	K <sub>1</sub>	0.339	0.354	0.015	95.6	280.8	281.2	0.4	99.9
	O <sub>1</sub>	0.246	0.266	0.020	91.9	241.1	241.3	0.2	99.9
	N <sub>2</sub>	0.345	0.395	0.050	85.5	59.3	57.3	-2.0	99.4
JH	M <sub>2</sub>	2.159	2.200	0.041	98.1	88.7	80.1	-8.6	97.6
	S <sub>2</sub>	0.811	0.852	0.041	94.9	142.7	132.1	-10.6	97.1
	K <sub>1</sub>	0.340	0.358	0.018	94.7	283.1	281.6	-1.5	99.6
	O <sub>1</sub>	0.249	0.270	0.021	91.6	243.5	241.6	-1.9	99.5
	N <sub>2</sub>	0.372	0.414	0.042	88.7	65.0	58.1	-6.9	98.1
WI	M <sub>2</sub>	1.897	1.900	0.003	99.8	75.7	71.1	-4.6	98.7
	S <sub>2</sub>	0.701	0.725	0.024	96.6	125.0	122.1	-2.9	99.2
	K <sub>1</sub>	0.330	0.345	0.015	95.5	274.7	277.4	2.7	99.3
	O <sub>1</sub>	0.252	0.264	0.012	95.2	239.9	238.1	-1.8	99.5
	N <sub>2</sub>	0.376	0.371	-0.005	98.7	53.9	48.4	-5.5	98.5
YG	M <sub>2</sub>	1.965	1.977	0.012	99.4	71.8	67.7	-4.1	98.9
	S <sub>2</sub>	0.723	0.754	0.031	95.7	123.9	118.6	-5.3	98.5
	K <sub>1</sub>	0.325	0.345	0.020	93.8	273.5	275.2	1.7	99.5
	O <sub>1</sub>	0.255	0.265	0.010	96.1	236.0	236.0	0.0	100.0
	N <sub>2</sub>	0.378	0.374	-0.004	98.9	46.4	45.4	-1.0	99.7
Average	-	-	0.014	95.9	-	-	-2.6	99.1	

Phase reference is 135°E.

Fig. 1b와 1c에 도시되어 있다. 광역모델인 황·동중국해 모델에서 수행한 조석, 해조류, 수온, 염분에 대한 모델 검증 결과는 논지방 필요하지 않다고 판단하여 제외하고, 본 지문에서는 Table 1에 제시된 상세역 모델인 새만금 주변해역 모델의 검증 정점에 해당하는 결과만을 수록하였다.

관측 결과와 모델 결과의 비교를 위해 관측 지점과 동일한 위치의 모델 격자점에서의 수위, 조석, 조류, 염분 모델 결과를 추출하였다. 조석과 조류는 동기간의 자료에 대해 조화분석을 수행하여 관측과 모델의 주요 5개 분조에 대한 조화상수를 비교하고 정량적 재현율을 산출하였다. 조류의 경우는 관측된 층별로 주성분 분석(Principal Component Analysis, PCA)을 수행하고, 관측 조류의 주축 성분의 방향으로 관측 및 모델 조류에 대한 변환 과정을 거친 후(Fig. 4), 조석과 동일한 방법으로 조화분석을 수행하고 층별 조화상수를 비교하였다. 관측과 모델의 정정별, 분조별 조화상수로 계산한 오차

(Error)에 따른 재현율(Skill score)은 다음과 같다(Bang et al., 2013; Jung et al., 2013).

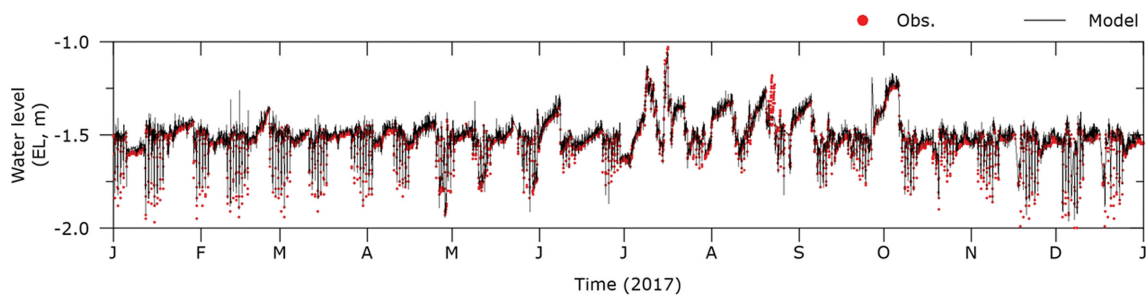
$$Skill\ score = \left(1 - \frac{|Error|}{X_{obs}}\right) \times 100 \quad (7)$$

여기서,  $Error(X_{model} - X_{obs})$ 는 모델치( $X_{model}$ )와 관측치( $X_{obs}$ )의 분조별 조화상수의 차이를 나타내는데, 지각의 경우 분모에는 관측치 대신 360°를 적용하였다. 조석관측 6개 정점에서 주요 5개 분조의 조석 반조차와 지각의 평균 재현율은 각각 95.9%, 99.1%이며, 조류관측 2개 정점에서 층별 조류속과 지각의 평균 재현율은 각각 75.8%, 92.8%로, 구축한 모델이 대상해역의 조석 전과 및 조류 특성을 대체로 잘 재현하는 것으로 나타났다(Table 2와 3). 그 밖에 새만금 내측 수위(Fig. 5)와 염분(Fig. 6과 7) 검증을 위해 관측과 동기간의 모델 결과를 추출하여 시계열 또는 단면을 정성적으로 비교

**Table 3.** Comparison of tidal current constituents between observed and model results ( $\theta$  applied to both observed and model results for PCA are 39° (PC1) and 142° (PC2), respectively)

St. / Layer	Tc.	Velocity (m/s)				Phase (°)			
		Obs.	Model	Error	Skill	Obs.	Model	Error	Skill
PC1 / surface	M <sub>2</sub>	0.343	0.337	-0.006	98.3	25.8	19.3	-6.5	98.2
	S <sub>2</sub>	0.130	0.161	0.031	76.2	84.9	79.7	-5.2	98.6
	K <sub>1</sub>	0.073	0.104	0.031	57.5	231.3	188.8	-42.5	88.2
	O <sub>1</sub>	0.046	0.050	0.004	91.3	161.1	159.1	-2.0	99.4
	N <sub>2</sub>	0.061	0.072	0.011	82.0	1.6	1.8	0.2	99.9
PC1 / bottom	M <sub>2</sub>	0.257	0.246	-0.011	95.7	355.0	1.0	6.0	98.3
	S <sub>2</sub>	0.090	0.112	0.022	75.6	58.2	62.0	3.8	98.9
	K <sub>1</sub>	0.032	0.044	0.012	62.5	216.6	189.9	-26.7	92.6
	O <sub>1</sub>	0.017	0.013	-0.004	76.5	178.9	148.6	-30.3	91.6
	N <sub>2</sub>	0.046	0.063	0.017	63.0	318.6	349.1	30.5	91.5
PC2 / surface	M <sub>2</sub>	0.204	0.185	-0.019	90.7	61.3	86.0	24.7	93.1
	S <sub>2</sub>	0.060	0.047	-0.013	78.3	113.2	134.0	20.8	94.2
	K <sub>1</sub>	0.028	0.037	0.009	67.9	196.8	237.3	40.5	88.8
	O <sub>1</sub>	0.012	0.020	0.008	33.3	204.1	130.5	-73.6	79.6
	N <sub>2</sub>	0.025	0.031	0.006	76.0	4.2	48.9	44.7	87.6
PC2 / bottom	M <sub>2</sub>	0.187	0.163	-0.024	87.2	53.5	74.1	20.6	94.3
	S <sub>2</sub>	0.058	0.044	-0.014	75.9	105.8	116.3	10.5	97.1
	K <sub>1</sub>	0.029	0.031	0.002	93.1	173.8	165.7	-8.1	97.8
	O <sub>1</sub>	0.010	0.014	0.004	60.0	234.6	121.6	-113.0	68.6
	N <sub>2</sub>	0.024	0.030	0.006	75.0	15.6	26.4	10.8	97.0
Average		-	-	0.036	75.8	-	-	-4.7	92.8

Phase reference is 135°E.



**Fig. 5.** Comparison of water level time series between observed and model results in Saemangeum lake (station L).

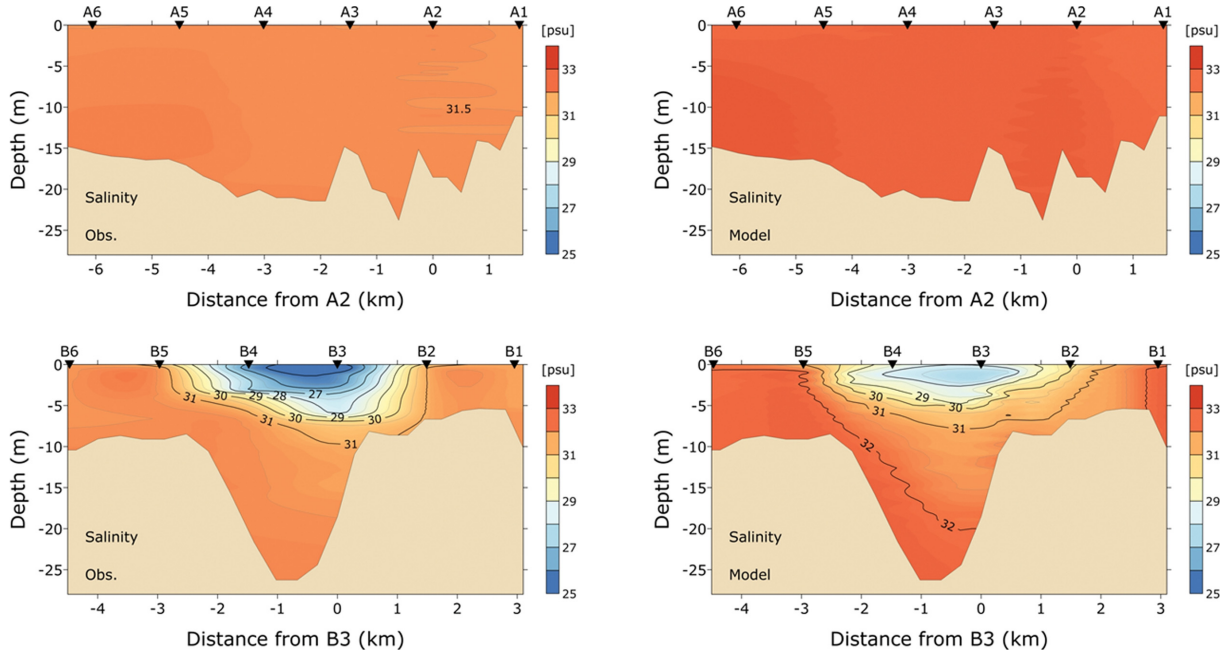


Fig. 6. Comparison of salinity vertical profiles between observed (left) and model results (right). Line A and B are up and down panels in respectively.

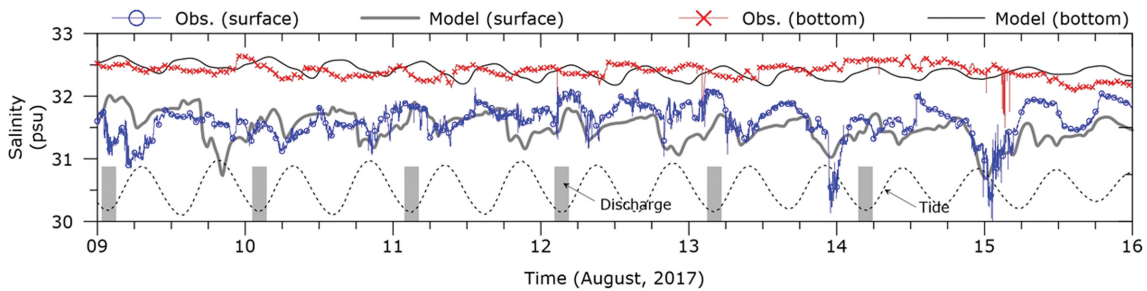


Fig. 7. Comparison of salinity time series between observed and model results on the surface and bottom with tide level and sluice-gates discharge.

한 결과, 모의 기간 동안 본 모델은 호내 수위와 배수갑문 유출수에 의해 새만금 방조제 전면 해역에서 나타나는 밀도 성층 특성을 대체로 잘 모사하는 것으로 판단된다.

### 3.2 입자추적 실험을 통한 배수갑문 유출수의 계절별 영향 범위

신시 및 가력 배수갑문에서 나오는 유출수의 거동 특성을 계절별로 파악하고 그 영향 범위를 확률론적 개념을 도입하여 정량적인 백분율로 제시하기 위하여 검정이 완료된 모델을 이용하여 계절별로 입자추적 실험을 수행하였다. 모의 기간인 동계(2017.1.8~2.6)에는 총 13번의 갑문 운영이, 하계(2017.7.20~8.18)에는 총 14번의 갑문 운영이 있었다. 갑문 운영이 있었던 시기 동안 신시와 가력 배수갑문 전면 표층 격자에서 회당 750개의 입자를 방출하였다. Fig. 8에 모의 기간별로 조위 시계열과 배수갑문을 통해 해수가 유출된 시간인 입자 방출 시기를 도시하였다.

모델 입력 바람으로 사용한 LDAPS 해상풍의 모의 기간 동

안의 계절별 바람장미도를 살펴보면, 동계는 NNW가, 하계에는 SSW와 S 계열의 바람이 우세하게 나타났다(Fig. 9). 배수갑문으로부터 방출된 입자들은 조류의 흐름에 따른 왕복 운동을 하지만, 새만금 일대에 나타나는 계절풍이 배수갑문 유출수로 대변되는 입자를 원거리까지 이동시키는 주원인으로 파악된다. 계절별 실험결과를 살펴보면, 동계에 배수갑문에서 방류된 입자는 북서 계절풍의 영향으로 주로 남측으로 이동한다. 50% 이상 확률에 대한 신시 배수갑문 유출수의 영향 범위는 갑문 전면부터 고군산군도 남측 일대이며, 가력 배수갑문 유출수의 영향 범위는 갑문 전면부터 1호 방조제 일대이다. 신시 배수갑문 유출수는 10% 이상 확률로 변산반도 남측까지 영향을 미친다. 하계에 배수갑문에서 방류된 입자는 남-남남서 계절풍과 조류의 영향으로 북측으로 이동한다. 50% 이상 확률에 대한 신시갑문 유출수 영향 범위는 갑문 전면부터 고군산군도 일대이며, 가력갑문 유출수 영향 범위는 갑문 전면부터 2호 방조제 일대이다. 가력 배수갑문 유출수는 10% 이상의 확률로 고군산군도 북측과 4호방조제까지 영향을 미



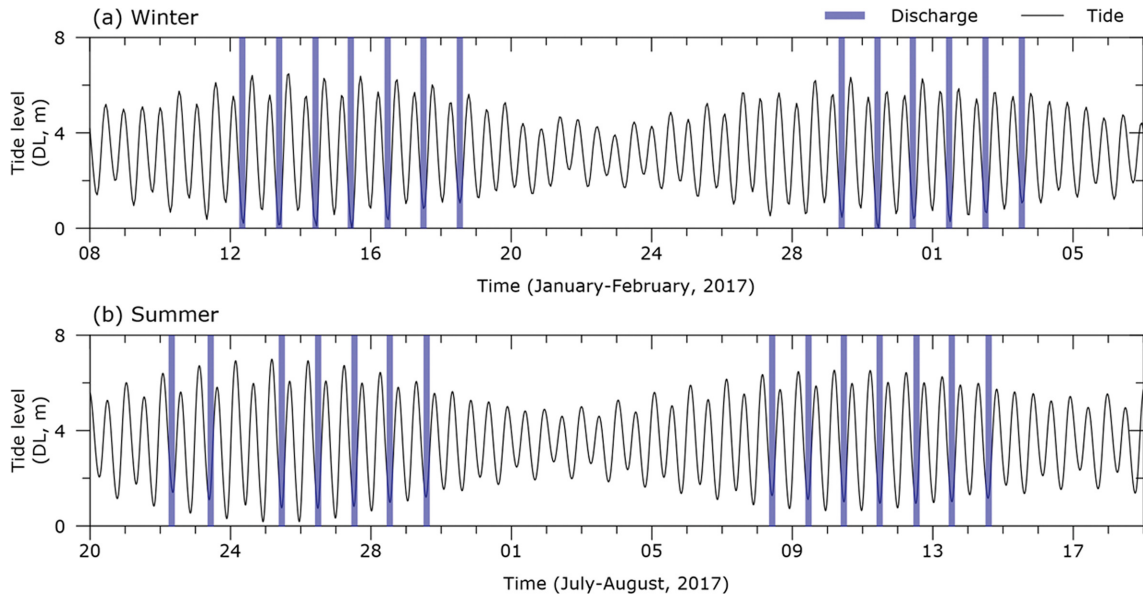


Fig. 8. Time series of discharge events (bars) and tide level (lines) in the winter (a) and summer (b).

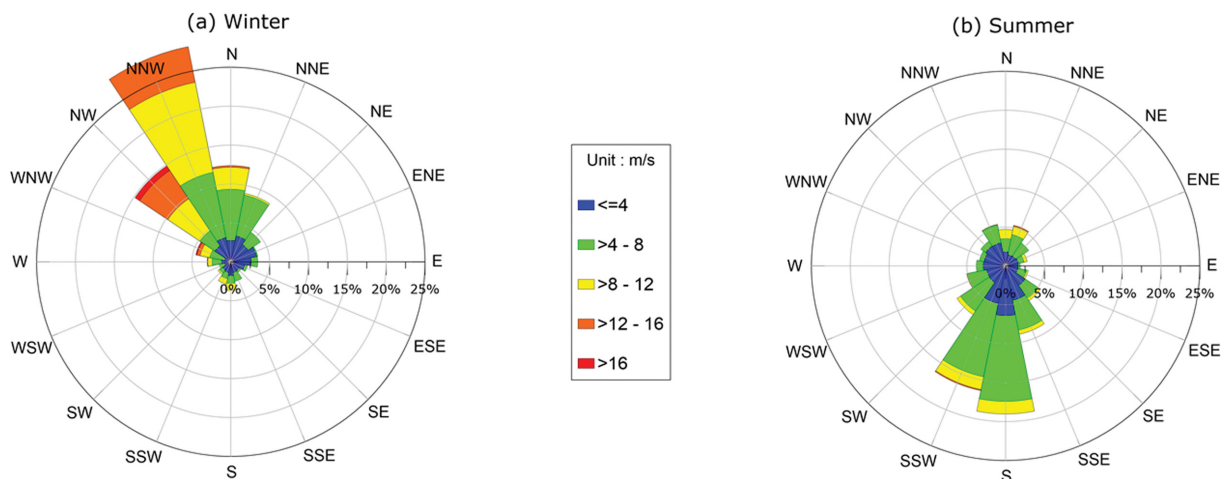


Fig. 9. Wind roses for model input data (LDAPS) during the simulated period in the winter (a) and summer (b).

치는 것으로 예측되었다(Fig. 10).

## 4. 고 찰

### 4.1 배수갑문 유출수의 water age

Water age는 원천이 되는 지점으로부터 유체 또는 물질이 빠져나와 특정 해역까지 이동하는데 걸리는 시간으로, 시스템 내에 유체 또는 물질이 얼마나 오랜 시간 체류하는지를 나타내는 체류시간(Residence time)과 함께 물질 수송 시간을 표현하는 대표적인 정의 중 하나이다. 시간이 짧을수록 방류되는 유체 또는 물질에 빠르게 노출되고 반대로 시간이 길수록 노출에 많은 시간이 소요됨을 의미하는 water age는 시간에 따른 확산 범위로 표현하기 때문에 특정 물질의 확산을 설명하기에 적합하다(Kim et al., 2020).

시·공간적으로 변화되는 water age 계산을 위해 다양한 계

산 방법이 존재하는데(Delhez et al., 1999), 대부분의 연구자는 water age를 계산하기 위하여 입자를 방출하고 시간에 따른 궤적을 모니터링하는 입자추적 방법을 주로 사용한다(Perianez and Elliott, 2002; Salama and Rabe, 2013; Smyth et al., 2016; Kim et al., 2020). 본 연구에서는 Delft3D 모델을 이용해서 Liu(2013)가 적용한 다음과 같은 water age 계산 방법을 적용하였다(식 8).

$$ageTr_i = \frac{\ln\left(\frac{dTr_i}{cTr_i}\right)}{RcDecTr_i} \quad dDecTr_i = RcDecTr_i \times dTr_i \quad (8)$$

여기서,  $ageTr_i$ 는 입자  $i$ 의 water age(day),  $cTr_i$ 과  $dTr_i$ 은 보존성 입자  $i$ 와 비보존성 입자  $i$ 의 농도( $g\ m^{-3}$ ),  $RcDecTr_i$ 는 비보존성 입자  $i$ 의 감소율( $day^{-1}$ ),  $dDecTr_i$ 는 비보존성 입자  $i$ 의 플럭스( $g\ m^{-3}\ day^{-1}$ )이다. 위의 식을 이용하여 신시 및 가

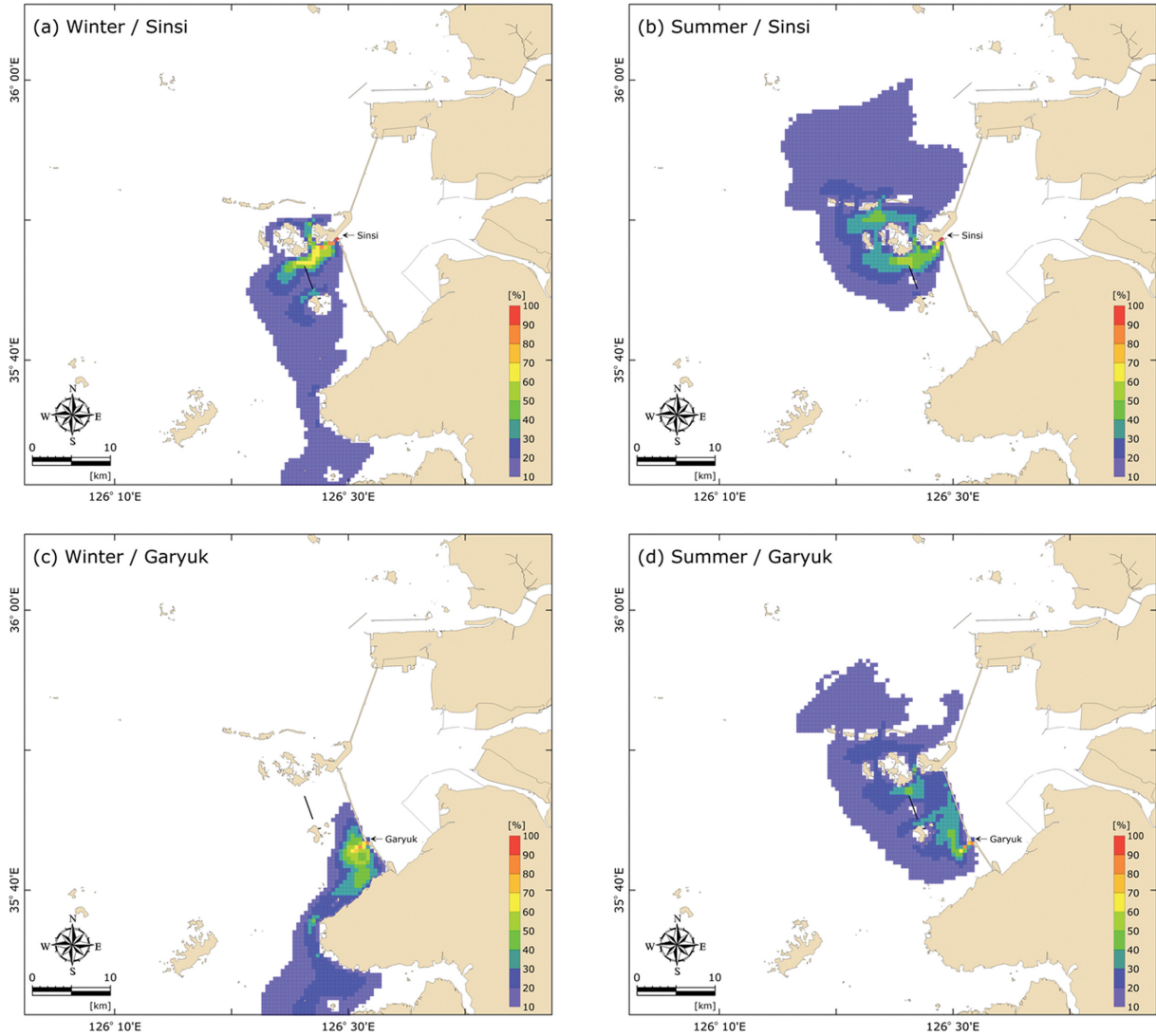


Fig. 10. Spatial distribution of probability for the influence of the sluice-gates effluent discharge.

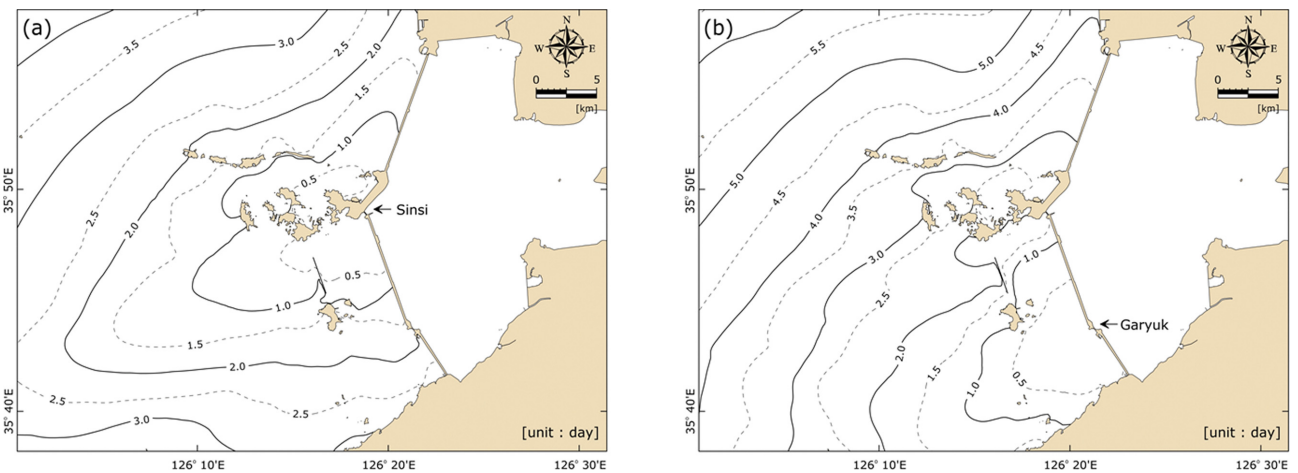


Fig. 11. Spatial distribution of water age for the Sinsi sluice-gate effluent discharge (a) and the Garyuk sluice-gate effluent discharge (b) during one year.

력 배수갑문 유출수의 2017년 1년 동안의 water age를 각각 계산하였다. 계산된 water age는 배수갑문으로부터 유출된 유

출수가 해당 해역에 도달할 수 있는 시간을 나타낸 것으로 컨투어 라인에 나타난 수치가 작을수록 해당 해역에 짧은 시간

에 도달할 수 있음을 의미한다. Fig. 11a와 11b는 신시 및 가력 배수갑문 유출수의 water age를 각각 계산하여 나타낸 것이다. 계산 결과에 따르면 신시 또는 가력 배수갑문을 중심으로 방사형으로 water age가 증가하는 것으로 나타났다. 신시 배수갑문 유출수의 water age의 1일 이내는 남서측으로 최대 15.3 km, 2일 이내는 남서측으로 최대 26.9 km로 나타났으며, 가력 배수갑문 유출수의 water age의 1일 이내는 남서측으로 최대 12.6 km, 2일 이내는 남서측으로 최대 22.3 km로 나타났다.

#### 4.2 입자추적 실험 결과와 water age 결과 비교

실험 결과의 신뢰성을 확인하기 위하여 입자추적 실험 결과와 water age 실험 결과를 비교하였다(Fig. 12). 비교를 위한 입자추적 실험 결과는 신시 및 가력 배수갑문으로부터 유출수가 방류될 때, 각각 입자를 투하한 실험에서 특정 1일 동안의 경로만을 추출하였다. 입자추적 실험 결과를 확률분포로 제시한 경우 모의 기간 동안 계절풍의 영향을 크게 받아 모의 시기별로 확산 범위 분포가 다르게 나타나지만, 모의 기간이 짧은 1일의 경우 조류의 영향이 지배적이기 때문에 계절풍 영향이 크게 작용하지 않는다. 따라서 입자 방출 후 1일 동안에 해당하는 모델 결과는 그 추출 시기가 다르더라도 입자의 이동 경로와 분포는 유사하다. 신시 및 가력 배수갑문 water age 실험에서 각각 계산된 water age의 최소값을 추출하여 새만금 배수갑문 유출수의 영향 범위를 산정한 결과, 배수갑문 유출수의 1일 이내 영향 범위는 신시 배수갑문으로부터 남서측으로 최대 15.3 km, 4호 방조제를 따라 북측으로 최대 8.5 km이고, 가력 배수갑문으로부터 남서측으로 최대 12.6 km, 남측으로는 변산반도까지 나타난 것으로 파악되었다. 두 실험의 결과를 비교했을 때, water age 1일에 해당하는 컨투어 라인이 입자추적 실험결과(방출 입자의 1일 동안 이동 범위)와 대체로 일치하는 경향을 보였다.

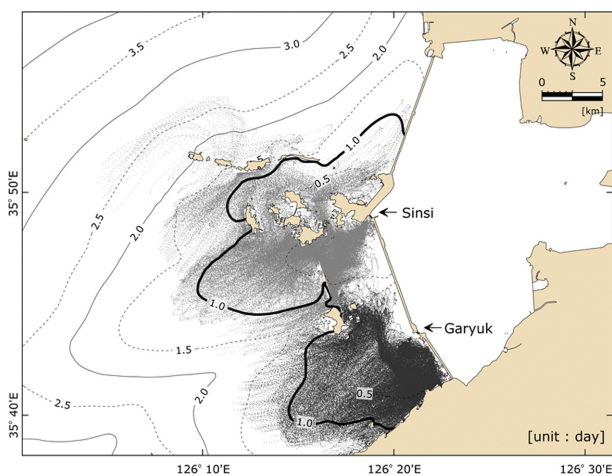


Fig. 12. Spatial distribution of water age for the Sinsi and Garyuk sluice-gates effluent discharge during one year overlapped particles trajectories during one day.

## 5. 결 론

배수갑문 유출수가 새만금 외해역에 미치는 영향 범위를 파악하기 위하여 입자추적 실험을 수행하여 계절별 영향 범위를 확률 분포로 제시하였다. 계산 결과, 배수갑문으로부터 유출된 입자들은 동계에 북서 계절풍의 영향으로 주로 남측으로 이동하고, 하계에는 남-남남서 계절풍의 영향으로 북측으로 이동한다. 배수갑문 유출수 영향 범위의 간접 지표로 사용할 수 있는 water age를 계산하고 배수갑문 유출수가 외측 해역에 도달하는 시간을 정량적으로 파악한 결과, 배수갑문 유출수의 영향 범위는 신시 또는 가력 배수갑문을 중심으로 방사형으로 증가하는 것으로 나타났으며, water age 계산 결과와 입자추적 실험 결과가 대체로 일치하는 경향을 보였다.

배수갑문 유출수의 영향 범위는 모의 기간에 해당하는 지형 및 환경조건의 영향을 받는다. 본 연구는 2017년 당시의 조건을 모델에 반영했기 때문에, 해당 기간에 대한 배수갑문 유출수의 영향 범위에 한정된다. 그럼에도 불구하고, 본 연구에서 제시한 입자추적 실험을 이용한 배수갑문 유출수의 영향 범위 산정 방법을 모의 또는 예측하고자 하는 시기의 재현성이 입증된 모델에 적용한다면 시기와 조건에 따라 달라질 수 있는 배수갑문 유출수의 영향 범위를 파악하고 이해하는데 도움이 될 것이라고 판단된다. 새만금은 지금도 변화가 진행 중에 있다. 새만금 해역의 여건변화에 따른 해양환경 변화를 지속적으로 추적하기 위한 모니터링의 설계나 그 결과를 해석하기 위해서 수치모델로서 예측한 배수갑문 유출수의 외해역 영향 범위가 중요한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 해양수산부 해양수산환경기술개발사업의 일환인 “새만금 주변해역 해양환경 및 생태계관리 연구개발(No. 20140257)”의 지원으로 수행되었습니다.

## References

Bang, K.Y., Park, S.J., Kim, S.O., Cho, C.W., Kim, T.I., Song, Y.S. and Woo, S.B. (2013). Numerical hydrodynamic modeling incorporating the flow through permeable sea-wall. *J. Korean Soc. Coast. Ocean Eng.*, 25(2), 63-75.

Bolin, B. and Rodhe, H. (1973). A note on the concepts of age distribution and transit time in natural reservoirs. *Tellus*, 25(1), 58-62.

Delhez, E.J.M., Campin, J.M., Hirst, A.C. and Deleersnijder E. (1999). Toward a general theory of the age in ocean modelling. *Ocean Modell.*, 1(1), 17-27.

Deltares, (2013). Delft3D-FLOW Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments User Manual Hydro-Morphodynamics. Version: 3.15.30808,

- The Netherlands.
- Jung, K.Y., Ro, Y.J. and Kim, B.J. (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(4), 207-218.
- Kim, J.H., Park, S.E., Kim, H.C., Hong, S. and Lee, W.C. (2020). Spatiotemporal characteristics of anthropogenic pollutant dispersion near shellfish growing area in Jaran Bay: A tracer-based water age approach. *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 23(1), 29-36.
- Liu, S. (2013). Numerical modeling of hydrodynamic circulation in Lake Taihu. Master's Thesis, Delft University of Technology.
- Perianez, R. and Elliott, A.J. (2002). A particle-tracking method for simulating the dispersion of non-conservative radionuclides in coastal waters. *J. Environ. Radioact.*, 58(1), 13-33.
- Salama, N.K.G and Rabe, B. (2013). Developing models for investigating the environmental transmission of disease-causing agent within open-cage salmon aquaculture. *Aquacult. Env. Interac.*, 4, 91-115.
- Smyth, D., Kregting, L., Elsaber, B., Kennedy, R. and Roberts, D. (2016). Using particle dispersal models to assist in the conservation and recovery of the overexploited native oyster (*Ostrea edulis*) in an enclosed sea lough. *J. Sea Res.*, 108, 50-59.
- Suh, S.W. (2006). A hybrid approach to particle tracking and Eulerian-Lagrangian models in the simulation of coastal dispersion. *Environ. Modell. Software*, 21(2), 234-242.
- Suh, S.W. and Lee, H.Y. (2011). Analysis of hydrodynamic change around the Saemangeum area using a particle tracking method. *J. Korean Soc. Coast. Ocean Eng.*, 23(6), 442-450.
- 
- Received 15 July, 2020  
Revised 13 August, 2020  
Accepted 14 August, 2020