한국해안 · 해양공학회논문집/ISSN 1976-8192(Print), ISSN 2288-2227(Online)
Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers 33(1), pp. 1~12, Feb. 2021
https://doi.org/10.9765/KSCOE.2021.33.1.1

유수지로부터의 담수 방류가 항 내 해수순환에 미치는 영향
Effect of Freshwater Discharge from a Water Reservoir on the Flow Circulation in the Semi-Closed Harbor

최재윤* · 김종욱** · 이혜민*** · 윤병일**** · 우승범*****
Jae Yoon Choi*, Jong Wook Kim**, Hye Min Lee***, Byung Il Yoon**** and Seung-Buhm Woo*****

요 지 : 담수 유입이 항만 내 해수순환에 미치는 영향을 조사하기 위하여, 인천 남항의 남측에 위치한 신국제 여객터미널 해역에 3차원 유동 수치 모델을 구축 및 적용하였다. 수치 모델의 모의 기간은 경기만 지역의 평수기인 5월 15일부터 6월 30일까지 약 45일이며, 모델 결과와 관측자료의 비교를 통하여 유동과 염분 변화에 관한 모델의 재현성을 검증하였다. 신국제 여객터미널에 영향을 미치는 담수 공급원은 한강과 항만 동쪽에 위치한 용현 갯골 유수지가 있다. 유수지의 유무에 따른 잔차류 결과를 분석해 보면, 한강과 유수지가 모두 고려된 실험안이 한강만을 고려한 실험안보다 염분 경사에 의한 2층 흐름 구조(표층은 외해 방향, 저층은 항 내를 향한 흐름 구조)가 수평적으로 더 강하게 발달한다. 이는, 한강으로부터의 담수 영향보다 유수지로부터의 담수 영향이 신국제 여객터미널 해역에서 더 크다는 것을 시사한다. 또한, 잔차류의 2층 흐름 구조는 북쪽에 위치한 인천 남항보다, 남쪽에 위치한 신국제 여객터미널에서 더 강한 2층 흐름 구조가 발생한다. 이 프로세스는 유수지로부터의 담수와 항 내로 전파된 조류가 만나 신국제 여객터미널 방향으로 회전되어 전파되면서, 남쪽에 위치한 신국제 여객터미널에 저염수가 전달됨에 따라 형성된다. 이러한 흐름은 신국제 여객터미널 전면부에서 수평적인 염분 경사에 의한 성층을 강화시키며, 강화된 성층은 2층 흐름 구조를 형성 및 유지시킨다. 따라서, 항만 내의 경압 작용에 의한 해수순환과 물질이동을 재현하고자 할 때, 유수지와 같은 국지적인 담수 유입원이라도, 항만 내의 해수순환에 지배적인 영향을 미치므로, 현장 관측 자료를 기반으로 유수지에서 방류되는 실시간 담수 유량에 따른 수치모델을 수행해야 한다.

핵심용어 : 담수 방류, 한강, 유수지, 잔차 순환

Abstract : To investigate the effect of freshwater discharge on the seawater circulation in the semi-closed harbor, a 3-D hydrodynamic model was applied to the International Ferry Terminal (IFT). The model run is conducted for 45 days (from May 15 to June 30, 2020), and the reproducibility of the model for time-spatial variability of current velocity and salinity was verified by comparison with model results and observation data. There are two sources of freshwater towards inside of the IFT: Han River and water reservoir located in the eastern part of IFT. In residual current velocity results, the two-layer circulation (the seaward flow near surface and the landward flow near bottom)derived from the horizontal salinity gradient in only considering the discharge from a Han River is more developed than that considering both the Han River and water reservoir. This suggests that the impact of freshwater from the reservoir is greater in the IFT areas than that from a Han River. Additionally, the two-layer circulation is stronger in the IFT located in southern part than Incheon South Port located in northern part. This process is formed by the interaction between tidal current propagating into the port and freshwater discharge from a water reservoir, and flow with a low salinity (near 0 psu) is delivered into the IFT. This low salinity distribution reinforces the horizontal stratification in front of the IFT, and maintains a two-layer circulation. Therefore, local sources of freshwater input are considered to estimate for mass transport process associated with the seawater circulation within the harbor and It is necessary to perform a numerical model according to the real-time freshwater flow rate discharged.

Keywords : freshwater discharge, Han River, water reservoir, residual circulation

*인하대학교 해양과학과 석사과정(Master Course, Department of Ocean Sciences, College of Natural Science, Inha University)
**인하대학교 해양과학과 박사(Corresponding author: Jong Wook Kim, Ph. D, Department of Ocean Sciences, College of Natural Science, Inha University, 100 Inha-ro, Nam-gu, Incheon 22212, Korea, Tel: +82-32-860-8495, kaonesis@gmail.com)
***인하대학교 해양과학과 석사과정(Master Course, Department of Ocean Sciences, College of Natural Science, Inha University)
****인하대학교 해양과학과 연구교수(Research Professor, Department of Ocean Sciences, College of Natural Science, Inha University)
*****인하대학교 해양과학과 교수(Professor, Department of Ocean Sciences, College of Natural Science, Inha University)

1. 서 론

인구 약 300만 명의 항구도시 인천은 경기만에 접한 수도권 지역의 인구 약 2천 600만 명의 물동량, 여객, 화물 등 항만 활동을 위하여, 갯벌 매립, 항만 건설, 대교 건설 등 각종 연안개발 사업들이 진행되어 왔다(Yoo et al., 2017). 인천 북항과 남항은 연안개발 사업의 하나로, 인천과 중국 간 컨테이너 물동량과 여객 및 화물 유통을 위한 국내의 대표적인 항만들이다. 최근, 인천 남항의 운영 효율성을 개선하기 위하여, 2020년 6월 연수구 송도 아암물류 2단지 서측 해상에 신국제 여객터미널을 새롭게 건설하였다(Fig. 1). 하지만, 신국제 여객부두 건설 후, 해안선과 수심이 크게 변경됨에 따라, 주변 해역의 유동 및 퇴적 변화가 큰 주목을 받고 있다. 예를 들어, 특정 해역에서의 높은 퇴적물들의 누적 현상은 선박의 안전항해와 관련되어 수심 유지를 위한 지속적인 준설 비용을 발생시키고 있다.

항만의 유동 및 퇴적 환경은 항만의 반 폐쇄된 지형적인 조건과 조석에 의한 영향을 크게 받는 것으로 알려져 있다. 예를 들어, Beak(2010)은 송도 신도시 건설로 인하여 건설 전보다 유속과 조위가 2~5% 다소 증가하였다고 제시하였으며, 영종도 동쪽의 퇴적 현상과 인천 북항 전면수로에서의 침식 현상이 증가한다고 예측하였다. Lee et al.(2019)는 인천 북항을 향해 전파되는 조류와 항의 지형적인 구조로 인하여 시계방향의 와류가 항만 입구에서 발생함에 따라, 항 입구의 유속 감소와 함께 많은 퇴적물들이 집중된다고 제시하였다. 하지만 동시에, 이러한 인천항 주변 해역에서의 연구들은 담수 유입에 따른 변화도 고려가 필요하다고 제안하였다.

항만을 포함한 하구에서의 담수 유입은 2층 흐름과 같은 잔차 수송과 관련된 주요 요인 중 하나이다(Lerczak and Geyer, 2004; Ralston et al., 2013). 국내 연구 사례를 보면, Kang et al.(2011)은 광양만과 진주만 해역에서 담수 유입으로 인한 수평적인 성층 강화가 상류를 향한 순 물질 수송이 증가하는 것을 제안하였다. 또한 Kim et al.(2013)에서 제시한 바에 따르면, 구조물에 의해 인위적으로 형성된 잔차 유속의 이층 흐름 구조는 항 내의 염분 순환과 확산에 큰 영향을 주는 것으로 밝혀졌다.

본 연구지역인 신국제 여객터미널 해역은 한강과 용현 갯골 유수지의 두 지역으로부터의 담수공급이 존재하여, 계절적으로 담수 확산에 의한 흐름 구조가 복잡하게 나타나는 해역이다. Yoon and Woo(2011)에 따르면, 인천 북항 주변 해역이 평수기 동안의 한강으로부터의 담수 확산 한계 위치로 제시한 바 있다. 따라서, 인천 북항에서 10 km의 남쪽에 위치한 신국제 여객터미널에서의 염분 변화는 평수기 기간 동안 한강에 의한 담수 영향보다 유수지에 의한 담수 영향이 더 클 것으로 예상된다. 이러한 관점에서, 신국제 여객터미널 해역의 물질 이동에 영향을 미치는 와류형성 유무와 유수지 영향을 조사하기 위하여, 고해상도 비구조격자 모델인 Finite Volume Coastal Ocean Model(FVCOM, Chen et al., 2003)을 인천항 신국제 여객터미널 해역에 적용하였다. 본 연구의 목적은 1) 신국제 여객터미널 인근해역에서의 유수지와 한강으로부터의 담수 유입에 따른 공간적인 염분 분포를 분석하고, 2) 잔차류 패턴을 정량적으로 제시하여 항만의 해수순환 메커니즘에 관해 토의하고자 한다.

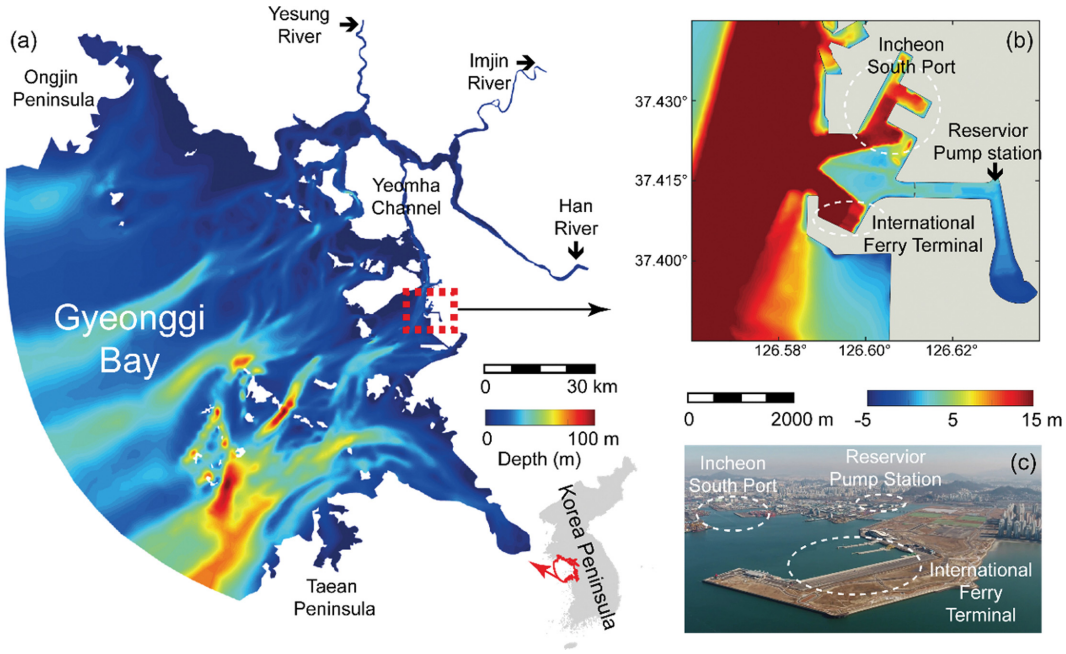


Fig. 1. Map showing the Gyeonggi-Bay and the region adjacent to the International Ferry Terminal (IFT): (a) the coastline and depth of Gyeonggi-Bay, (b) the coastline and depth of IFT, and (c) the sky view obtained from a drone for IFT, Incheon South Port and Reservoir Pump Station. Arrow markers (➔) indicate the river discharge from the Han river, Imjin river, Yesung river, and reservoir pump station.

2. 연구 방법

2.1 FVCOM

본 연구에 사용된 FVCOM은 Chen et al.(2003)이 개발한 비정형 그리드, 유한 체적, 3D 기본 방정식, 자유 표면 조건의 연안해양 순환 모델이다. 지배 방정식은 수직 와류 점도에 대한 Mellor 및 Yamada level 2.5 난류 해법(Mellor and Yamada, 1982)과 수평 확산 계수에 대한 Smagorinsky 와류 매개 변수화(Smagorinsky, 1963)를 기본으로 개발되었으며, 일반 해양 난류 모델(General Ocean Turbulence Model, GOTM) 모듈의 대안으로 선택하여 사용되어 왔다(Burchard, 2002). 또한, FVCOM은 매사추세츠 다트머스 대학 및 우즈홀 해양 연구팀에 의해 지속적으로 개선되고 있는 모델이다(Chen et al., 2004, 2006a, 2006b, 2007; Cowles, 2008). 예를 들어, 지속적인 업데이트를 통해 FVCOM 버전들은 공간적으로 가변적인 수직 분포를 갖는 일반화된 지형추적 좌표계로 개선되었고(Pietrzak et al., 2002), 극지환경, 해양구조물에 의한 해수 유동 모듈(Ge et al., 2012) 등 다양한 모듈이 개발되어 오고 있다. FVCOM에 대한 자세한 설명은 FVCOM 사용자 매뉴얼(Chen et al., 2006a)과 대표 소개 논문(Chen et al., 2006b)에 상세히 기술되어 있다.

2.2 격자 구성 및 수심 자료

연구 지역인 경기만 해역 전체의 모델 격자의 동-서 방향의 길이는 약 150 km, 남-북 방향의 길이는 약 145 km로 외해 방향으로 옹진반도와 태안반도를 잇는 호를 경기만의 끝부분으로 가정하고 해당 부분을 외해 개방 경계로 선언하였다(Fig. 2a). 외해에서는 약 5 km의 넓은 면적을 가지는 요소로 구성하여 계산의 효율성을 증가시키고자 하였으며, 연안으로 갈수록 급변하는 수심 변화와 해안선 재현을 위해 격자의 해상도를 높여 격자를 구성하였다(Fig. 2b). 연구지역인 신국제 여객 터미널은 서쪽으로는 외해와 연결된 주 수로, 동쪽으로는 용현 갯골이 존재하며 유수지와 연결되어 있다. 인천 남항과 신국제 여객터미널은 항만 준설 작업으로 약 18 m의 수심을 가지며, 인천 남항과 신국제 여객터미널 사이에 수심 약 2~3 m의 조간대가 위치한다. 신국제 여객 터미널 주변의 모델 격자는 최소 격자 크기 30 m의 고해상도로 구성하였다. 수치모델의 총 절점은 66,653개, 요소는 126,304개, 수직 시그마 층은 20개로 설정하였다. 수심 자료는 국립해양조사원에서 2019년 발행된 수치 해도 데이터를 이용하여 평균 해수면 기준으로 입력하였다.

2.3 초기 조건 및 경계 조건

수위와 유속의 초기 조건은 평균 해수면 기준 '0'으로 설정한 cold start를 부여하였다. 외해 개방 경계의 조화상수 입력자료는 TPX08-atlas 모델 조석 자료를 오리건 주립 대학교에서 개발된 Tidal Model Driver toolbox(TMD)로 추출된 조화상수를 사용하였다. 추출한 조화상수 중 5개의 주요 조석 분조(M_2, S_2, K_1, O_1, N_2)에 대한 조화상수를 외해 개방 경계에 선형 내삽 방법으로 입력하였다. 보정 과정에서 8개의 조위 검조소에서의 진폭과 위상을 보정하여 조석의 변동성을 재현하였다. 수온 및 염분에 대한 외해 개방 경계 조건은 국립수산과학원에서 제공하는 정선 해양관측자료의 최근 10년간(2010~2019년) 염분 자료 중 5월에 해당하는 연 평균된 자료를 입력하였다. 염분에 대한 초기장을 구성하기 위하여, 팔당댐에서의 2010~2019년 동안 5월 평균 담수 방류량과 함께 약 1년 동안 모델을 모의하였다. 1년동안 외해의 염분 유입과 육상으로부터의 담수와의 균형에 의해 안정된 염분 공간 분포를 추출하여 5월에 대한 모델 모의 시(2020년 5월 15일 0시)의 초기장으로 사용하였다.

모의기간에 활용한 담수 유량 데이터는 국가 수자원 관리 정보센터에서 제공하는 팔당댐 일 유량 자료를 이용하였다. Park et al.(2002)에서 제시한 담수 유입원의 입력조건과 동일하게 팔당댐의 방류량을 한강의 유량으로 산정하였고, 팔당댐 방류량의 30%가 임진강에, 팔당댐 방류량의 10%가 예성강에 입력되었다. 신국제 여객터미널 동쪽의 유수지는 과

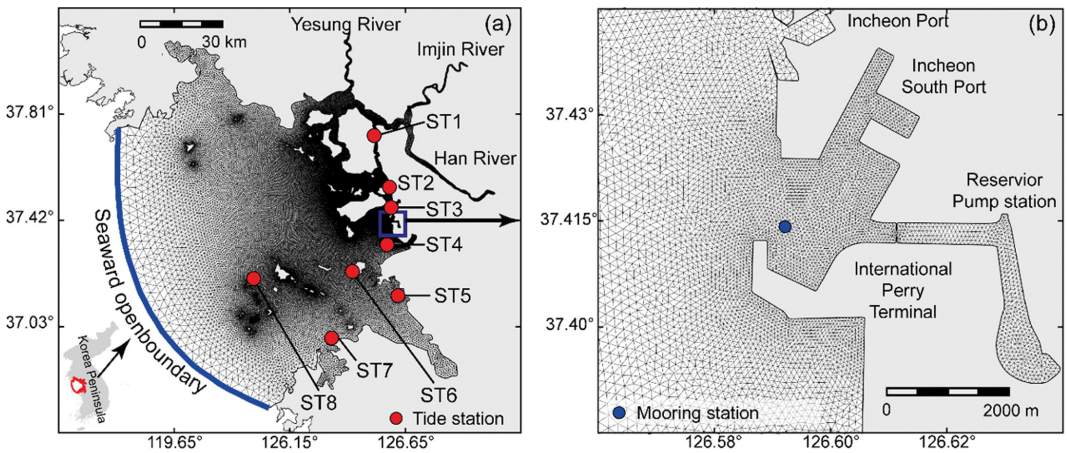


Fig. 2. (a) Model domain applied to Gyeonggi-Bay and (b) domain and grid system for region of International Ferry Terminal.

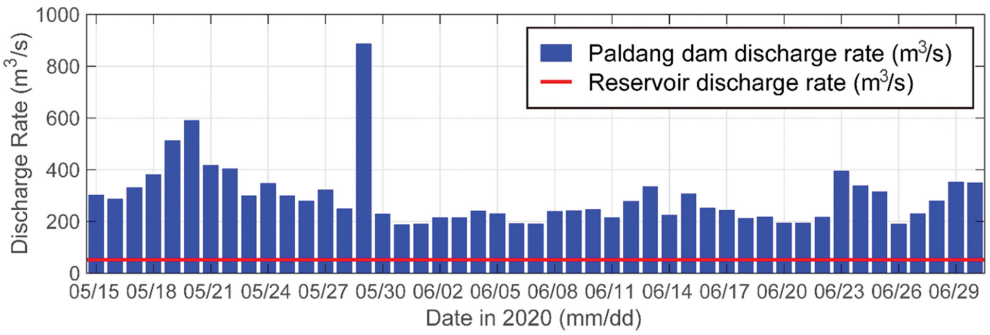


Fig. 3. Average daily discharge rates at Paldang Dam (blue bar) and reservoir pump station (red line) from May 20 to June 30, 2020.

거 지방하천의 하류 부근으로써 해수 유입 지역에 배수문이 설치되어 해수 유입을 차단함과 동시에 홍수 방재를 목적으로 펌프가 설치되어 담수를 방류하는 유수지 펌프장이 건설되었다. 인천광역시 미추홀구에서 제공하는 유수지 펌프장의 제원은 주 펌프 1,000 마력 6대와 30 마력 수중모터를 이용하여 미추홀구 및 중구 지역 12.76 km^2에 달하는 배수구역을 담당하고 있다. 담수 용량은 815,060 ton이며, 6 m × 4 m의 10개의 배수문이 존재한다. 유수지로부터 펌프를 이용하여 방류되는 유량은 분당 3120 m^3으로, 초당 52 m^3의 담수가 방류된다. 유수지로부터의 담수 방류 유량은 계측하고 있지 않으므로 본 연구에서 수치 모델의 담수 입력 자료인 유수지로부터의 담수 방류량은 제원에서 제공되는 52 m^3/s, 0 psu를 상수로 입력되었다. 모델 모의 기간에 활용한 팔당댐 일 유량자료와 유수지로부터의 담수 방류량은 Fig. 3에 도시하였다.

모델 모의 기간동안 팔당댐 일 평균 방류량은 약 300 m^3/s이다. 팔당댐 방류량의 30%을 입력한 임진강의 일 평균 유량은 90 m^3/s이며, 임진강과 한강이 합류하는 한강 하구로부터의 담수 방류량은 평균 390 m^3/s이다. 유수지로부터의 담수 방류량은 52 m^3/s로 모델 모의 기간동안 팔당댐 평균 방류량에 대해 약 15%의 방류량, 한강 하구의 평균 담수 방류량에 대해 약 10%의 담수 방류량이 입력되었다.

본 연구에서는 담수와 조석으로부터의 상호작용과 유수지로부터의 담수 방류가 항 내 해수 순환에 대해 미치는 영향을 수치 모델을 이용하여 분석하였으므로, 바람장은 수치모델의 경계 조건으로 입력되지 않았다.

2.4 현장 관측 자료 취득

신국제 여객터미널의 조간대 근처에 정점을 설치하여(blue circle in Fig. 2b), 2020년 5월 28일부터 6월 28일까지 약 30일 동안 Nortek사의 Signature(1000 kHz)를 고정시킨 Trawl Resistant Bottom Mounts(TRBM)를 해저면에 설치하여, 해저면 약 0.5 m 위에서 10분 간격으로 0.5 m 수직 간격을 가지는 수층별 유속 관측을 수행하였다(Fig. 4). 저층 염분 관측은 TRBM 옆에 Idronaut사의 Conductivity Temperature Depth(CTD) 센서를 설치하여 10분 간격으로 염분관측을 수행하였다. TRBM과 부표를 연결한 로프에 XR-420 CTD를 수면 아래 약 4 m 지점에서 로프로 고정하여 10분 간격으로

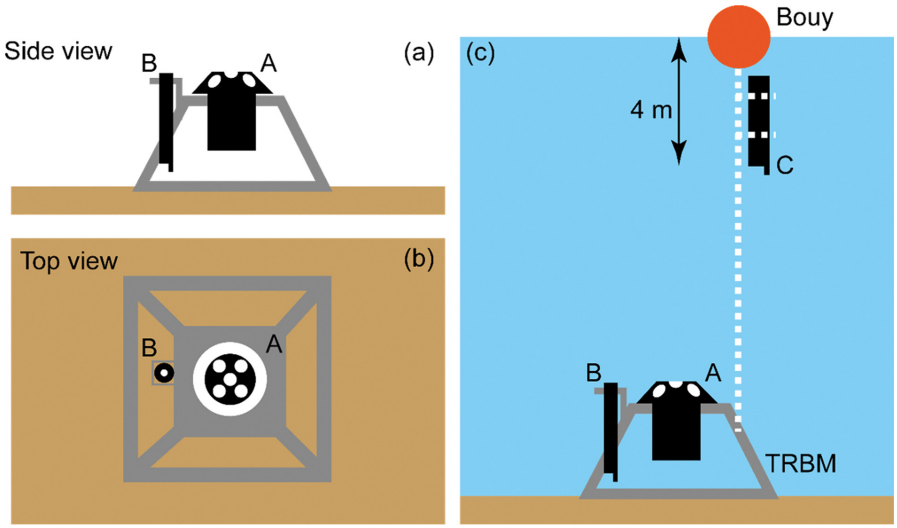


Fig. 4. Schematic diagram of instruments configuration at mooring station. (a) The TRBM look from the side view, and (b) The TRBM look from the top view. (c) View of the water layer from the side view to represent the position of the surface layer and the lower layer of the observation equipment. A, Nortek Signature (1000 khz); B, Bottom Idronaut CTD; C, Surface XR-420 CTD.

표층 염분 관측을 수행하였으며, 현장 관측 자료를 이용하여 수치모델의 결과와 비교하였다.

3. 수치모델 검증

5개의 주요 조석 분조(M_2, S_2, K_1, O_1, N_2)의 조화상수와 모델 결과 반조차의 평균 오차(Mean Error; *ME*), 평균 절대 오차(Mean Absolute Error; *MAE*), Wilmott(1981)가 제시한 예측 기술 지수(Skill Score; *SS*)는 식(1)~(3)으로 정의된다.

$$ME = \frac{\Sigma_{i=1}^{N}(M_i - O_i)}{N} \quad (1)$$

$$MAE = \frac{\Sigma_{i=1}^{N}|M_i - O_i|}{N} \quad (2)$$

$$SS = 1 - \frac{\Sigma_{i=1}^{N}|M_i - O_i|^2}{\Sigma_{i=1}^{N}(|M_i - \overline{O}| + |O_i - \overline{O}|)^2} \quad (3)$$

여기서, N은 데이터의 총 개수이며, M과 O는 모델 데이터와 관측 데이터를 지시한다. $\overline{M}$과 $\overline{O}$는 모델 데이터의 평균 값과 관측 데이터의 평균값이다. M_i와 O_i는 각 시간마다의 모델 데이터와 관측 데이터이다. *ME*는 모델 결과와 관측 자료에 대한 과소산정 혹은 과대산정을 지시한다. 양수일 경우 모델 결과가 관측 자료보다 과대산정 되었다는 것을 의미하며, 음수일 경우 모델 결과가 관측 자료보다 과소산정 되었다는 것을 의미한다. *MAE*는 모델 결과와 관측 자료 간의 모든 절대 오차의 평균을 의미한다. 모델의 예측 기술 지수 값은 모델 결과가 관측 자료에 대해 얼마나 정확한지를 나타내며, 모델 결과와 관측 자료의 시계열이 정확하게 일치한다면, *SS*의 값은 1이며, 0으로 갈수록 모델 데이터와 관측 데이터의 관계는 서로 발산한다. 이러한 측정기준은 Warner et al.(2005)과 Haidvogel et al.(2008)에서 현장 관측 자료와 모델 결과를 평가하는데 사용되었다.

조위의 재현성을 확인하기 위하여, 2020년 5월 18일부터 6

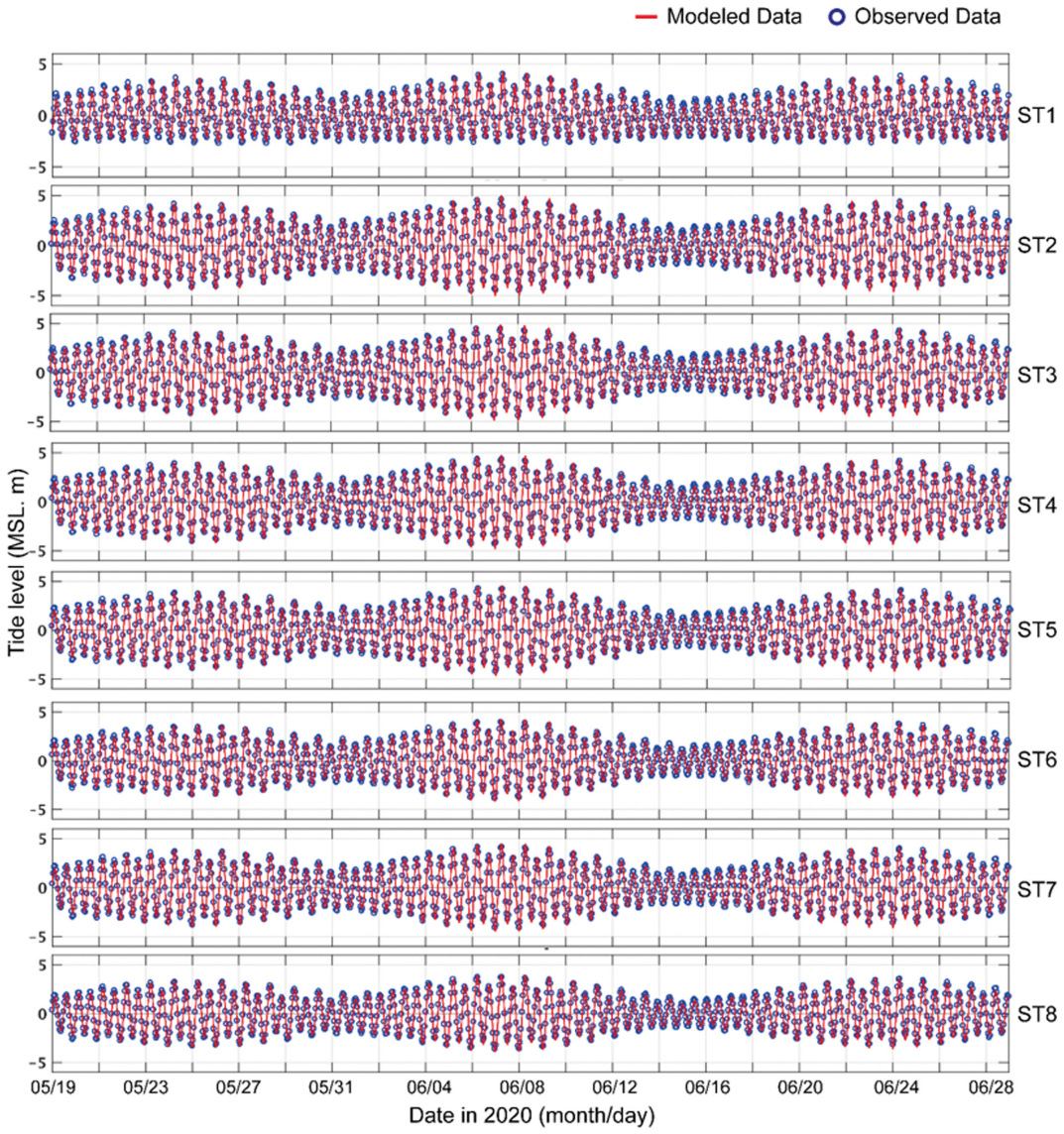


Fig. 5. Comparison of tide level between observation (blue circles) and model (red lines) results at ST1-ST8.

Table 1. Statistical results for model-data comparison associated with the tide level, current velocity, salinity

Station		*ME*	*MAE*	*SS*
Mooring	Surface U (cm/s)	−3.5	8.62	0.80
	Surface V (cm/s)	−2.3	6.22	0.65
	Bottom U (cm/s)	5.4	8.62	0.67
	Bottom V (cm/s)	8.1	9.70	0.62
	Surface salinity (psu)	−2.4	2.1	0.59
	Bottom salinity (psu)	1.8	1.9	0.72
ST1	Tide level (cm)	−4.5	17.81	0.99
ST2		−1.7	18.67	0.99
ST3		−4.5	18.23	0.99
ST4		−4.5	17.81	0.99
ST5		−4.6	16.63	0.99
ST6		−4.6	16.79	0.99
ST7		−6.5	17.10	0.99
ST8		−10.0	18.29	0.99

월 28일까지 약 40일 동안 8개의 조위 검조소에서의 모델데이터와 관측데이터의 조석 시계열 및 조화상수를 비교하였다(Fig. 5). ST1부터 ST8은 각각 강화대교, 영종대교, 인천항, 인천 송도, 안산, 영흥도, 대산, 굴업도 조위 검조소를 의미하며(Fig. 2a), 국립해양조사원에서 제공하는 각 조위 검조소에서의 조위 데이터를 사용하였다.

모델 모의 기간 동안 조위의 변동성에 대한 모델 결과와 관측데이터가 거의 일치하는 양상을 나타낸다. *ME*는 −10.0~−1.7 cm의 범위를 가지고 이는 모델 데이터가 관측 데이터에 비해 과소 산정되었다는 것을 의미한다. *MAE*는 16.63~18.67 cm의 범위를 가지고 있다(Table 1). 전 지점 *SS*는 0.99의 값들을 나타내며, 이는 모델의 조위가 관측자료의 조위 변동성을 잘 재현하고 있는 것을 의미한다.

2020년 5월 27일부터 6월 28일까지 31일의 기간에 대해 정점 관측 자료를 이용하여 모델데이터와 관측데이터의 유속을 Fig. 6에 시계열로 도시하였고 Table 1에 검정식을 이용한 검정 결과를 정리하였다. 표층의 U와 V에 대한 *ME*는 각각 −3.5 cm, −2.3 cm, *MAE*가 8.62 cm, 6.22 cm이고, *SS*는 0.80, 0.55이다. 저층의 U와 V는 각각 *ME*가 5.4 cm, 8.1 cm, *MAE* 8.62 cm, 9.70 cm이고, *SS*는 0.67, 0.52이다. 표층은 다소 과소산정, 저층은 과대산정 된 경향이 있지만 모델이 관측 시계열의 변동성을 잘 재현하고 있다.

염분 검증은 2020년 5월 27일부터 6월 14일까지 약 15일간 신국제 여객터미널 해역에서 정점 관측 자료를 이용하여 모델데이터와 관측데이터의 염분을 비교하였으며, Fig. 7에 표층 및 저층의 결과를 제시하였다. *ME*는 −2.4~+1.8 psu의 범위를 가지고, 이는 모델 데이터가 관측 데이터에 비해 과소 산정되었다는 것을 의미한다. *MAE*는 2.1~1.9 psu의 범위를 가지고 있다(Table 1). 표층과 저층의 *SS*는 각각 0.59와 0.72로 계산되었다. 표층에서의 염분 재현성이 다소 낮게 예측되었으나, 전체적인 염분의 변동성 범위를 모델이 재현하고 있

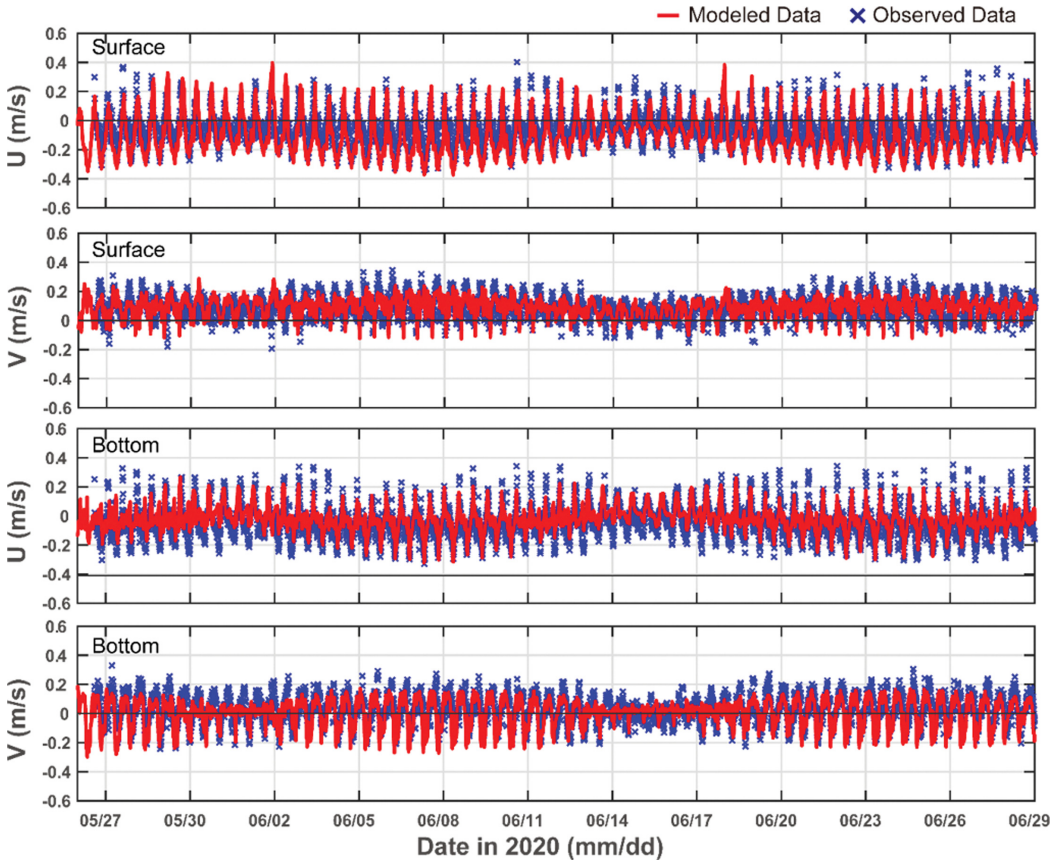


Fig. 6. Comparison of current velocity between observation (blue ×) and model (red lines) results at mooring station.

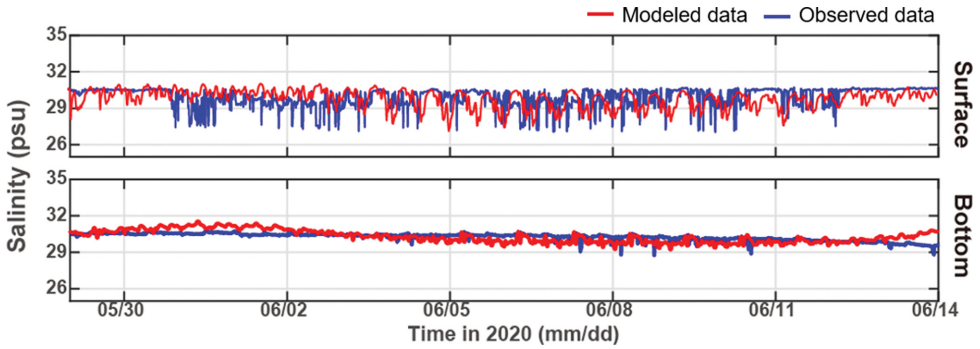


Fig. 7. Comparison of salinity between observation (blue lines) and model (red lines) results at mooring station.

고, 표층의 주기적인 창-낙조 시의 변동폭과 저층의 변동성을 모델이 재현하고 있다.

관측 기간동안 저층 염분 변화는 거의 없었다. 관측 초기인 5월 27일부터 5월 30일까지 표층의 염분변화는 30 psu로 거의 변화가 없었지만, 5월 31일부터 6월 12일 사이에 표층 관측 자료의 염분이 낙조 시기마다 주기적으로 30 psu에서 27~28 psu까지 2~3 psu가 감소한다. 이러한 염분변화는 추가적인 담수 유입원이 존재한다는 것을 시사하며, 신국제 여객터미널 동쪽의 용현 갯골 유수지에 의한 담수 방류가 원인으로 추정된다.

4. 연구 결과 및 토의

연구 지역인 신국제 여객터미널과 인천 남항 해역은 하나의 입구를 통하여, 조류 및 물질들이 유입되거나 유출되는 구조이다(Fig. 1b). 하지만, 항 입구에서의 30일 평균된 단면 잔차 유속을 보면, 인천 남항과 연결된 수로(0~0.7 km in Fig. 8)에서는 거의 수직 전체적으로 항 내부를 향하는 유속 흐름이 발생하는 반면, 신국제 여객터미널과 연결된 수로(0.7~1.3 km in Fig. 8)에서의 유속은 뚜렷한 2층 흐름 구조의 형태로 발달하게 된다. 이러한 유속 구조는 단면의 0.7 km에 위치한 곳의 해저 지형을 기준으로 구분되며, 항만 내 남단에 위치한 신국제여객부두 해안선에 인접할수록 외해 방향의 잔차 유속이 항만 내부를 향하는 잔차 유속보다 더 크게 발달하게 된다. 이러한 뚜렷한 1.3 km의 짧은 거리의 단면에서의 수평 및 수직적인 잔차 유속 구조의 차이, 특히 표층에서의 외해 방향 잔차, 저층에서의 육지 방향 잔차 유속은 항만 내 담수 유입으로 인한 염분 경사에 의하여 지배적으로 발달하는 대표적인 프로세스이다(Kim and Park, 2012).

앞서 언급했던 바와 같이, 신국제 여객터미널 주변 해역은 한강과 용현 갯골 유수지의 두 가지의 담수 공급원이 존재한다. 두 지역의 담수가 신국제 여객터미널 항만에 주요하게 미치는 영향을 분석하기 위하여, 본 연구에서는 Case 1, Case 2, Case 3의 총 3가지 실험을 모의하였다(Table 2).

Case 1은 담수 공급원이 입력되지 않은 실험이며, 오직 조석 현상에 관련된 잔차 순환 프로세스를 분석하기 위해 격자 내의 모든 절점과 수층에 염분은 32 psu로 일정하게 입력된 모의 결과이다.

Case 2는 한강, 임진강, 예성강 총 3개의 지역으로부터의 담수 공급원이 입력된 모의 결과이다.

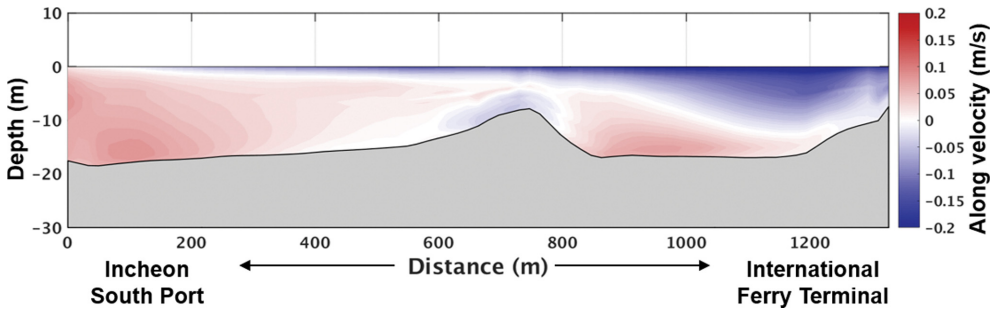


Fig. 8. Model results for the cross-sectional residual current at harbor entrance suggested in the Fig. 2b (thick red solid line).

Table 2. Summary of model cases

Case	Contents
Case 1	No river discharge, No salinity gradient, Only tide
Case 2	River discharge at Han river, Imjin river and Yesung river with tide
Case 3	River discharge Han river, Imjin river, Yesung river and Reservoir Pump Station with tide

Case 3은 한강, 임진강, 예성강과 신국제 여객터미널 동 측 유수지까지 총 4개의 지역으로부터의 담수 공급원이 입력된 모의 결과이며, 수치모델 검증(Section. 3)에 활용한 모의 결과이다.

Case 1, Case 2, Case 3 실험들 간의 비교를 통하여, 잔차 순환에 관한 조석의 영향(Section. 4.1), 한강, 예성강, 임진강의 담수가 미치는 영향(Section. 4.2)과 용현 갯골 유수지로부터의 담수가 미치는 영향(Section. 4.3)을 분석하였다.

4.1 조석에 의한 영향

Case 1의 잔차류 분포에서 최상층과 최하층 모두 항 입구의 중앙에서 강한 회전성 흐름이 발달한다(Fig. 9). 인천 남항과 연결된 수로(항 입구의 북단 해역)에서는 항만 내부를 향하는 잔차 흐름이 우세하지만, 신국제 여객터미널과 연결된 수로(항 입구의 남단 해역)에서는 회전된 흐름으로 인하여 외해 방향의 잔차 흐름이 우세하다. 항만 입구 와류 형성과 함께, 외측 최상층의 북쪽 해역에서 흐름이 회전되고, 해안선을 따라 다시 한강 방향을 향하는 역전된 흐름이 발달하게 된다. 또한 외측의 남쪽 해역에서 역시 한강 상류를 향하는 잔차 유속이 발달하게 된다.

항만 내 공간적으로 인천 남항 연결 수로로 유입된 수체적은 용현 갯골 입구에 있는 넓은 범위의 조간대(Fig. 1b)에서 회전되어 신국제 여객터미널을 걸쳐 입구 남단 연결 수로로 빠져나가는 잔차 순환 구조가 나타난다. Lee et al.(2019)가 인천 북항 사례를 통해 제시한 바에 따르면, 반 폐쇄적인 항만 구조에서 발생하는 항 입구에서의 강한 회전성 흐름은 항만 내부의 독립적인 해수순환과 외해로부터 전파되는 조류 사이의 위상차로 인하여 공간적인 유속 경사 발생에 의해 생성된다. 또한, 순압 모델에 의한 결과 외에도 항만 내부의 염분 경사로 인한 경압 효과를 고려하면, 회전성 흐름 패턴이 공간적으로 상이하게 발생할 수 있다고 제안했다. Case 1의 염분 분포는 전 영역이 32 psu로 염분 차이로부터 발생한 영향을 고려하지 않았다(Fig. 10).

4.2 한강, 임진강, 예성강으로부터의 담수 유입의 영향

Case 2의 항만 외측의 잔차 흐름은 Case 1과 다르게 최상층에서 외해 방향, 최하층에서 상류를 향하는 전형적인 2층 흐름 구조가 발달한다(Fig. 11). 최상층에서의 잔차 흐름은 Case 1과 동일하게 외해를 향하지만, 남쪽 방향이 우세하던 유향이 남서 방향의 유향으로 변화하였다. 항만 외측의 북쪽과 남쪽 해안선에 인접한 최하층 잔차 흐름은 항만으로부터 약 1km 떨어진 주요 수로에서의 흐름보다 더 강하게 발달하

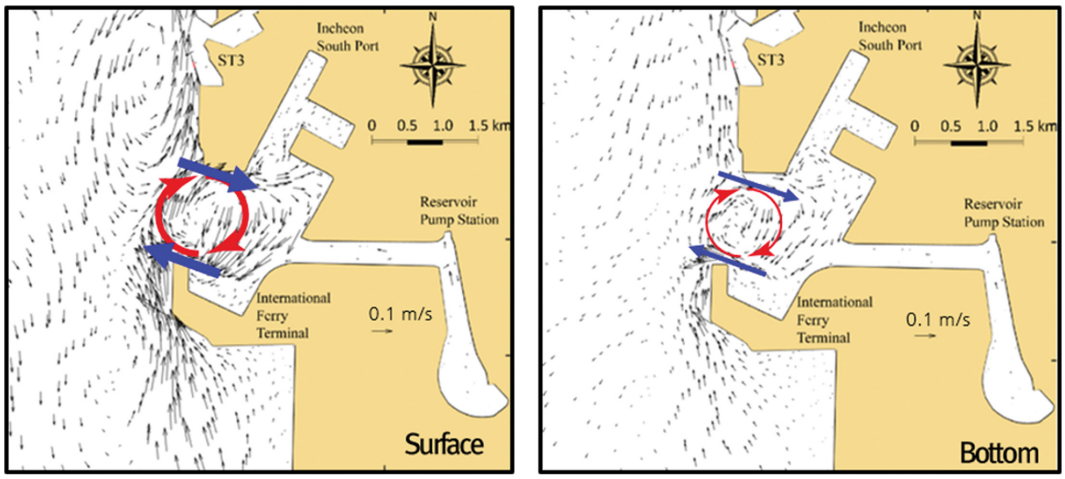


Fig. 9. Residual velocity fields at the surface (left panel) and bottom (right panel) layer for Case 1. Blue and red arrows indicate the flow intensity and patterns for the residual circulation.

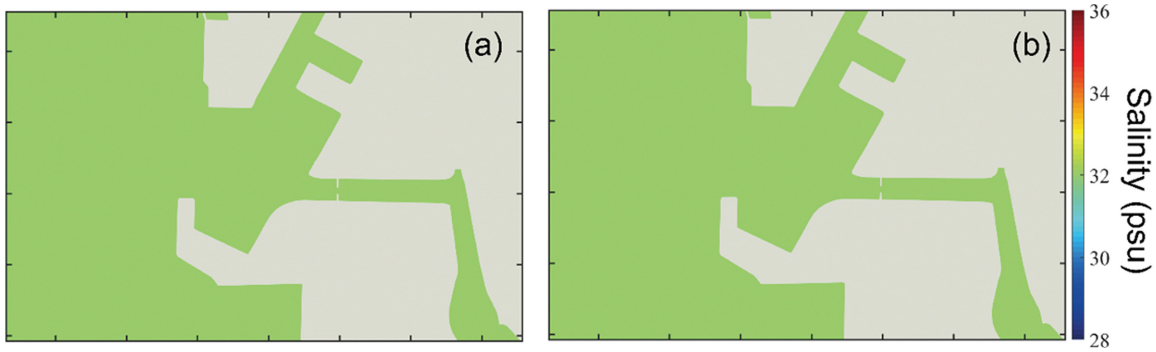


Fig. 10. Salinity fields at the (a) surface and (b) bottom layer for Case 1.

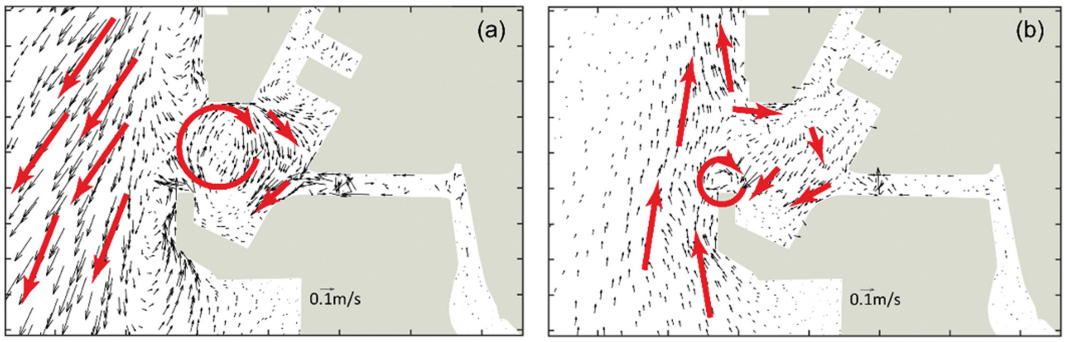


Fig. 11. Residual velocity fields at the (a) surface and (b) bottom layer for Case 2. Red arrows indicate the flow patterns for the residual circulation.

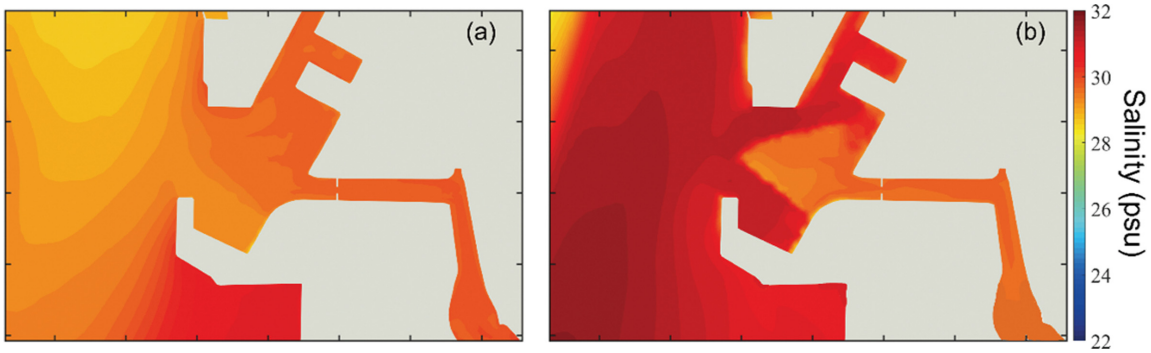


Fig. 12. Salinity fields at the (a) surface and (b) bottom layer for Case 2.

고, 그 방향은 한강을 향한다. 항만 입구에서의 회전성 흐름의 형성 위치와 강도는 Case 1과 다르다. Case 1에서 최상층과 최하층 모두 항만 입구의 중앙에서 회전성 흐름이 형성된 반면, Case 2에서는 최상층의 회전성 흐름은 조간대를 포함한 항만 내부에서 발달하고, 최하층의 회전성 흐름은 항만 입구의 남단에 발달된다. 따라서, Case 1에 의한 잔차 흐름은 신국제 여객터미널에서 외해 방향으로 주로 유출되는 경향성이 우세한 반면에, 수평적인 염분 경사가 고려된 Case 2에서는 최상층과 최하층에서 항 내부에서 순환되는 흐름이 우세하다.

한강으로부터의 담수와 경압 작용에 의한 최상층, 최하층의 염분 분포를 통해 각각의 수층에서 염분 경사를 이용하여 잔차류 변화를 분석하고자 하였다. 한강으로부터의 담수가 인천 남항 주변 해역보다 신국제 여객터미널 해역의 수평적인 염분 변화에 대해 더 높은 영향을 미친다. Fig. 12에 Case 2의 30일 동안 시간 평균된 최상층과 최하층의 염분 분포를 나타냈다. 항만 외측의 최상층 염분 분포는 북쪽 해역에서 약 28~29 psu로 가장 낮고, 외측의 남쪽 해역에서 약 30~31 psu의 염분이 분포한다. 신국제 여객터미널에서의 최상층 염분은 약 29 psu인 반면에, 인천 남항에서의 염분은 약 30 psu으로 상대적으로 높은 분포가 발생한다. 항만 내 조간대 해역을 기점으로 최하층 간 수평적인 염분 경사가 발생한다. 항만 외측, 인천 남항과 연결된 수로, 신국제 터미널과 연결된 수로 수심 15~20 m에서의 최하층의 염분 분포는 약 30~32 psu의 높은 염분 분포가 나타나며, 외해로 나갈수록 염분이 높아지는 경향을 보인다. 반면에, 조간대 수심 3~4 m에서의 최하층 염분 분포는 약 28~29 psu로 상대적으로 낮다. 최상층 혹은 최저층에서 이러한 수평적인 염분 경사 발생은 항만 외측과 내측에서의 한강을 향하는 최하층 잔차 유속 증가와 일치한다. 또한, 한강의 담수 유입은 인천 남항 해역보다 신국제 여객터미널 해역에서의 수직적인 염분 변화에 대해서도 더 높은 영향을 미친다. 최상층과 최하층에서의 염분 분포 차이는 인천 남항 해역보다 신국제 여객터미널 해역에서 약 1 psu로 더 크다.

4.3 용현 갯골 유수지의 담수 영향

Case 3의 잔차 분포에서, 최상층에서 항만 외측을 향한 강한 잔차 흐름이 발달한다(Fig. 13). 이러한 최상층 유속 강화는 수체적의 보존 때문에, 항 내 유입되는 최하층 유입 흐름을 증가시키고, 그로 인하여 Case 1과 Case 2보다 더 뚜렷한 2층 흐름 구조가 발생한다(Fig. 14). 또한, Fig. 6의 유속 검증에서 표층의 높은 동-서 방향(U 방향)의 높은 모델 예측 결과에 대한 *SS* 값들은 유수지로부터의 담수가 고려되어야만 재현될 수 있음을 시사한다. Case 1의 항만 입구에서의 회전성 흐름과 Case 2의 조간대 지역을 포함한 넓은 범위의 회전성 흐름과 다르게, Case 3에서는 최상층에서 형성되는 회전성 흐름의 위치가 인천 남항과 연결된 수로에서 약 500~700 m의 범위로 제한적으로 발생한다. 항만 내의 회전성 흐

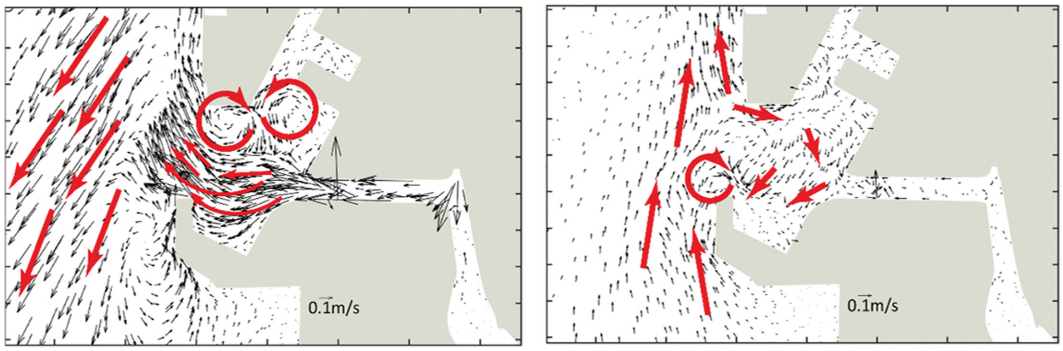


Fig. 13. Residual velocity fields at the surface (left panel) and bottom (right panel) layer for Case 3. Red arrows indicate the flow patterns for the residual circulation.

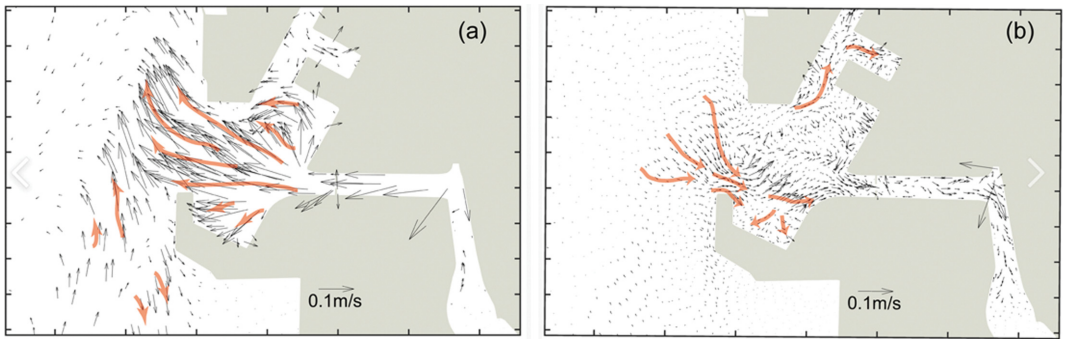


Fig. 14. Difference of residual velocity fields between Case 1 and Case 3 at the (a) surface and (b) bottom layer. Light orange arrows indicate the flow patterns for the residual circulation.

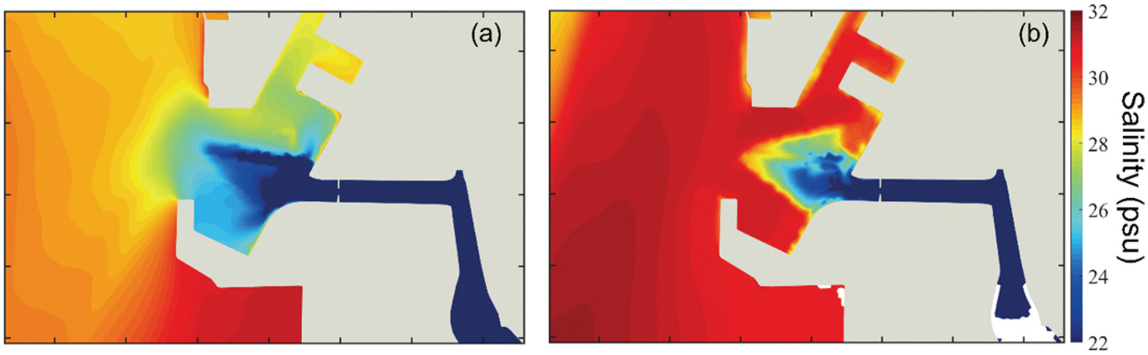


Fig. 15. Salinity fields at the (a) surface and (b) bottom layer for Case 3.

름은 조류 및 한강의 담수 유입보다 용현 갯골 유수지와 같은 국지적인 담수 공급원에 의하여 잔차 흐름 패턴에 더 큰 영향을 미칠 수 있다는 것을 시사한다.

Case 3에서, 신국제 여객터미널에서 Case 2에 비교하여 더 낮은 염분 분포와 더 높은 수평 및 수직적인 염분 차이가 발생한다. Case 3의 최상층과 최하층에서의 염분 분포는 Fig. 15에 제시되었다. 최상층 염분 분포는 조간대 부분에서 약 22 psu의 낮은 염분 분포를 보이며, 신국제 여객터미널 해역에서 약 25 psu의 염분 분포가 발생한다. 반면, 인천 남항에 인접한 최상층에서의 염분 분포는 약 28 psu로 상대적으로 높은 염분을 가진다. 이는, 유수지로부터의 담수 공급을 적용할 경우 신국제 여객터미널에서의 담수 체류 시간이 길어질 수 있다는 것을 의미한다. 항만 외측과 조간대를 제외한 항만 내측의 최하층에서의 수평 및 수직적인 염분 차이는 Case 2와 거의 유사한 1~2 psu의 값이 나타난다. 반면에, 수평 및 수직적인 염분 차이는 유수지의 담수 공급을 고려한 Case 3의 경우, 약 5~20 psu 이상으로, Case 2보다 약 4~8배 더 크다. 이것은 최상층과 최하층의 잔차 순환이 염분 경사에 의해 각각의 방향을 향해 증가할 수 있다는 것과 관련이 높다. 앞서 기술한 바와 같이, 유수지로부터의 담수 공급은 한강으로부터의 담수 공급보다 항만 내 잔차 순환에 대해 더 높은 변동성을 유발하기 때문에, 조석과 한강의 담수 외, 국지적인 유수지에 의한 영향도 고려해야 할 필요가 있다.

5. 결 론

항만 내 해수순환에 미치는 영향을 조사하기 위하여, 신국제 여객터미널을 대상으로 3차원 유동 수치 모델을 구축 및 적용하였다. 신국제 여객터미널 주변 해역의 잔차 순환에 관해 조석, 한강-임진강-예성강으로부터의 담수의 영향, 유수지로부터의 담수 영향을 각각 분석하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같이 정리된다.

1) 항만 내부를 향한 조류에 의하여, 항 입구의 중앙에서 강한 회전성 흐름이 발달한다. 또한, 공간적으로 인천 남항 연결 수로로 유입된 수체적은 조간대, 신국제 여객터미널을 걸쳐 항만 입구 남단 연결 수로로 빠져나가는 잔차 순환 구조가 나타난다.

2) 한강으로부터의 담수 유입은 항만 외측에서 전형적인 2층 잔차 흐름을 발달시킨다. 또한, 인천 남항 주변 해역보다 신국제 여객터미널 해역의 수평적인 염분 변화에 대해 더 높은 영향을 미친다. 그로 인하여, 수평적인 염분 경사가 발생함에 따라 해수 표면에서의 회전성 흐름은 조간대를 포함한 항만 상류부에서 발달하고, 해저층의 회전성 흐름은 항만 입구의 남단에서 발달한다.

3) 한강과 유수지가 모두 고려된 실험이 한강만을 고려한 실험보다 염분 경사에 의한 2층 흐름 구조(표층은 외해 방향, 저층은 항 내를 향한 흐름 구조)가 수평적으로 더 강하게 발달한다. 또한, 최상층에서 형성되는 회전성 흐름의 위치가 인천 남항과 연결된 수로에서 약 500~700 m의 범위로 제한적으로 발생한다. 이러한 수치 모델의 결과는 관측자료의 유속 재현성을 더 향상함에 따라, 항만 내의 회전성 흐름은 조류 및 한강의 담수 유입보다 용현 갯골 유수지와 같은 국지적인 담수 공급원에 의하여 잔차 흐름 패턴에 더 큰 영향을 미칠 수 있다는 것을 시사하였다.

본 연구에 이용한 수치 모델에서 유수지의 담수 유출량은 펌프장 제원의 유량을 사용한 상수로 입력하였기 때문에, 실시간으로 공급되는 유수지의 담수 유량을 적용할 수는 없었다. 하지만, 연구지역으로 제시된 인천항 신국제 여객부두 외에도, 국내에는 국지적인 담수 방류원이 존재하는 항만이 존재한다. 따라서, 항만 내의 유동 및 물질 이동과 관련하여 유수지 혹은 저수지의 담수 유량에 관한 관측 및 유지관리에 대한 관심이 필요하다. 향후 연구를 통해 펌프장 인근에 유속계를 설치하여 유수지 방류량을 현장 관측 자료에 맞게 재현하고 퇴적물 이동 모델을 이용하여, 항 내 물질 순환 및 퇴적에 대한 영향을 보다 정확하게 재현하고자 한다.

감사의 글

이 논문은 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(2020-0-01389, 인공지능융합연구센터지원(인하대학교)). 이 논문은 2021년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 시행된 연구임(해양수치모델링과 지능정보기술을 활용한 해양예측 정확도 향상 연구).

References

Baek, S.-H. (2010). A study on silt transport of seabed around Incheon Harbor. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 22(3), 133-142 (in Korean).

Burchard, H. (2002). Applied turbulence modelling in marine waters (Vol. 100). Springer Science & Business Media.

Chen, C., Liu, H. and Beardsley, R.C. (2003). An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: application to coastal ocean and estuaries. Journal Atmospheric and Oceanic Technology, 20(1), 159-186.

Chen, C., Zhu, J., Zheng, L., Ralph, E. and Budd, J.W. (2004). A non-orthogonal primitive equation coastal ocean circulation model: application to Lake Superior. Journal of Great Lakes Research, 30, 41-54.

Chen, C., Beardsley, R.C. and Cowles, G. (2006a). An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model (FVCOM) system. Advance in Computational Oceanography, 19(1), 78-89.

Chen, C., Beardsley, R.C. and Cowles, G. (2006b). An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model-FVCOM user manual, second edition, Tech. Rep. SMAST/UMASSD-06-0602, 318 pp., Sch. for Mar. Sci. and Technol., Univ. of Mass-Dartmouth, New Bedford.

Chen, C., Huang, H., Beardsley, R.C., Liu, H., Xu, Q. and Cowles, G. (2007). A finite-volume numerical approach for coastal ocean circulation studies: Comparisons with finite difference models. Journal of Geophysical Research, 112(C3).

Cowles, G.W. (2008). Parallelization of the FVCOM coastal ocean model. The International Journal of High-Performance Computing Applications, 22(2), 177-193.

Ge, J., Chen, C., Qi, J., Ding, P. and Beardsley, R.C. (2012). A dike–groyne algorithm in a terrain-following coordinate ocean model (FVCOM): Development, validation and application. Ocean Modelling, 47, 26-40.

Haidvogel, D.B., Arango, H., Budgell, W.P., Cornuelle, B.D., Curchitser, E., Di Lorenzo, E. and Levin, J. (2008). Ocean forecasting in terrain-following coordinates: Formulation and skill assessment of the Regional Ocean Modeling System. Journal of Computational Physics, 227(7), 3595-3624.

Kang, Y.S., Chae, Y.K. and Lee, H.R. (2011). Variation of density stratification due to freshwater discharge in the Kwangyang Bay and Jinju Bay. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 23(1), 126-137 (in Korean).

Kim, C.K. and Park, K. (2012). A modeling study of water and salt exchange for a micro-tidal, stratified northern Gulf of Mexico estuary. Journal of Marine Systems, 96, 103-115.

Kim, J.W., Yoon, B.I., Song, J.I., Lim, C.W. and Woo, S.B. (2013). Spatial and temporal variability of residual current and salinity according to freshwater discharge in Yeoungsan River estuary.

Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 25(2), 103-111 (In Korea).

Lee, G.H., Shin, H.J., Kim, Y.T., Dellapenna, T.M., Kim, K.J., Williams, J. and Figueroa, S.M. (2019). Field investigation of siltation at a tidal harbor: North Port of Incheon, Korea. Ocean Dynamics, 69(9), 1101-1120.

Lerczak, J.A. and Rockwell Geyer, W. (2004). Modeling the lateral circulation in straight, stratified estuaries. Journal of Physical Oceanography, 34(6), 1410-1428.

Mellor, G.L. and Yamada, T. (1982). Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. Reviews of Geophysics, 20(4), 851-875.

Park, K., Oh, J.H., Kim, H.S. and Im, H.H. (2002). Case study: mass transport mechanism in Kyunggi bay around Han river mouth, Korea. Journal of Hydraulic Engineering, 128(3), 257-256.

Pietrzak, J., Jakobson, J.B., Burchard, H., Vested, H.J. and Petersen, O. (2002). A three-dimensional hydrostatic model for coastal and ocean modelling using a generalized topography following co-ordinate system. Ocean Modelling, 4(2), 173-205.

Ralston, D.K., Geyer, W.R., Traykovski, P.A. and Nidzieko, N.J. (2013). Effects of estuarine and fluvial processes on sediment transport over deltaic tidal flats. Continental Shelf Research, 60, S40-S57.

Smagorinsky, J. (1963). General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment. Monthly Weather Review, 91(3), 99-164.

Warner, J.C., Sherwood, C.R., Arango, H.G. and Signell, R.P. (2005). Performance of four turbulence closure models implemented using a generic length scale method. Ocean Modelling, 8(1-2), 81-113.

Yoo, S.J., Cha, Y.D. and Yeo, G.T. (2017). An analysis on optimal port operation for new international passenger terminal using conjoint analysis: Focusing on Incheon Port. Journal of Navigation and Port Research, 41(1), 17-24 (In Korean).

Yoon, B.I. and Woo, S.B. (2011). Study on relationship between geographical convergence and bottom friction at the major waterways in han river estuary using the tidal wave propagation characteristics. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 23(5), 383-392 (In Korean).

Received 20 November, 2020
Revised 14 December, 2020
Accepted 17 December, 2020