한국해안 · 해양공학회논문집
제 25 권 제 2 호, pp. 63~75, 2013년 4월
http://dx.doi.org/10.9765/KSCOE.2013.25.2.63

투수성 호안의 해수유통을 고려한 유동 수치모델링
Numerical Hydrodynamic Modeling Incorporating the Flow through Permeable Sea-Wall

방기영* · 박성진* · 김선우** · 조창우* · 김태인* · 송용식* · 우승범***
Ki-Young Bang*, Sung Jin Park*, Sun Ou Kim**, Chang Woo Cho*, Tae In Kim*, Yong Sik Song* and Seung-Buhm Woo***

요 지 : 평택·당진항 내항 2공구 수역은 3개의 투수성 호안으로, 그리고 내항 2공구 동측의 투기장 수역은 2개의 투수성 호안으로 둘러싸여 있다. 2010년 5월에 관측된 내항 2공구 외곽호안 내측 수역과 내항 2공구 투기장 내측 수역의 최대조차는 각각 4.70 m와 2.32 m로서, 동시에 호안 외측에서 관측된 최대조차 8.74 m의 54%와 27%에 달한다. 호안 내·외수위차와 내측 수용적 변화율간의 회귀식을 도출하고, 이 식을 이용하여 투수성 호안의 해수유통량을 매 계산시간마다 산정하는 모듈을 EFDC 모델에 추가하여 아산만의 3차원 해수유동 수치모형을 구축하였다. 2010년 5월 13~27일의 모의기간에 대하여 주요 5개 분조(M_2, S_2, K_1, O_1, N_2)의 합성조석과 아산, 삽교, 남양, 석문방조제의 담수방류량을 실시간으로 입력하여 해수유동을 모의하였다. 2공구 내측과 2공구 투기장 내측에서 평균고조위, 평균해면과 평균저조위의 실측치에 대한 모델치의 skill score는 96~100%로서 매우 양호한 재현율을 보인다. 투수성 호안의 해수유통을 차단한 모의결과와 비교하면, 최강유속은 주수로를 따라 0.05~0.10 m/s 증가하고, 2공구 외곽호안 외측에서 국지적으로 0.1~0.2 m/s 증가한다. 해저면 전단응력은 유속이 강한 주수로에서 0.1~0.4 N/m^{2}의 범위로 증가하고, 2공구 외곽호안 우각부 주변에서 국지적으로 0.4 N/m^2 이상 증가한다. 본 연구에서 적용한 투수성 호안의 해수유통 모의기법은 대규모 투수성 호안이 유지되는 해역에서 물질의 이류·확산과 해저지형의 침식 · 퇴적 및 호안 주변의 국부 세굴 등을 모의 · 예측하는데 유용하게 적용될 수 있다.

핵심용어 : 아산만, 평택 · 당진항, 투수성 호안, 해수유동, 수치모델링

Abstract : The Inner Port Phase 2 area of the Pyeongtaek-Dangjin Port is enclosed by a total of three permeable sea-walls, and the disposal site to the east of the Inner Port Phase 2 is also enclosed by two permeable sea-walls. The maximum tidal range measured in the Inner Port Phase 2 and in the disposal site in May 2010 is 4.70 and 2.32 m, respectively. It reaches up to 54 and 27%, respectively of 8.74 m measured simultaneously in the exterior. Regression formulas between the difference of hydraulic head and the rate of interior water volume change, are induced. A three-dimensional numerical hydrodynamic model for the Asan Bay is constructed incorporating a module to compute water discharge through the permeable sea-walls at each computation time step by employing the formulas. Hydrodynamics for the period from 13th to 27th May, 2010 is simulated by driving forces of real-time reconstructed tide with major five constituents(M_2, S_2, K_1, O_1 and N_2) and freshwater discharges from Asan, Sapkyo, Namyang and Seokmoon Sea dikes. The skill scores of modeled mean high waters, mean sea levels and mean low waters are excellent to be 96 to 100% in the interior of permeable sea-walls. Compared with the results of simulation to obstruct the flow through the permeable sea-walls, the maximum current speed increases by 0.05 to 0.10 m/s along the main channel and by 0.1 to 0.2 m/s locally in the exterior of the Outer Sea-wall of Inner Port. The maximum bottom shear stress is also intensified by 0.1 to 0.4 N/m^2 in the main channel and by more than 0.4 N/m^2 locally around the arched Outer Sea-wall. The module developed to compute the flow through impermeable sea-walls can be practically applied to simulate and predict the advection and dispersion of materials, the erosion or deposion of sediments, and the local scouring around coastal structures where large-scale permeable sea-walls are maintained.

Keywords : Asan Bay, Pyeongtaek-Dangjin Port, permeable sea-wall, hydrodynamics, numerical modeling

*(주)지오시스템리서치 (Corresponding author: Sung Jin Park, Geosystem Research Corp., 1-40 Geumjeong-dong, Gunpo-si, Gyeonggi-do, 435-824, Korea. Tel: 070-7019-0600, Fax: 031-479-7410, sjpark@geosr.com)
**충북대학교 토목공학과 (Department of Civil Engineering, Chungbuk National University)
***인하대학교 해양과학과 (Department of Oceanography, Inha University)

1. 서 론

서해 연안역의 각종 개발사업에 따른 해양환경 변화를 예측·평가하기 위한 다양한 수치모델링 연구가 활발하게 진행되어 왔다. 연구해역인 아산만은 대조차가 약 8. 0m에 달하여 조류속이 강하고 천퇴와 조간대가 넓게 발달해 있으며, 홍수시 주변 방조제로부터 대량의 담수가 유입되어 특징적인 물리 · 유동 현상을 나타낸다(박, 2008; 최 등, 2002; 조 등, 2008). 1973년에 아산방조제가 완공된 이래, 2002년까지 남양, 삽교, 석문, 화옹방조제가 완공되었고, 평택·당진항 건설공사가 1990년부터 계속 진행되고 있으며, 이 외에도 각종 해안 매립공사가 시행되었다(Fig. 1). 이렇게 아산만의 해안지형이 인공적으로 크게 변화함에 따라, 퇴적·침식 양상도 급격한 변화를 겪고 있는 것으로 보고되었다(국립해양조사원, 2008, 2009).

1980년대 초부터 현재까지 경기만의 유동·순환에 대한 많은 수치모델링 연구가 수행되었다(최, 1983; 정 등, 1994; 서, 2011; 윤과 우, 2012). 그러나 40여 년간 대규모 연안개발 사업이 시행되고 있는 아산만의 유동·순환에 대한 수치모델링은 상대적으로 적은 편이다. 정 등(2000)은 3차원 모델을 이용하여 화옹방조제와 평택·당진항 건설 전 상황에 대한 아산만의 조석과 조류를 모의하였는데, 수평 격자간격이 500 m로 구성되어 상세한 해저지형을 반영하지 못하였다. 이후 정 등(2002)은 최소 격자간격이 70 m인 3차원 유한요소 모델을 적용하여 평택·당진항 외항 건설에 따른 조석과 조류, 그리고 저면 전단응력의 변화를 평가하였다. 한편 박·이(2008)는 곡선격자망을 채용한 3차원 유동 모델을 구축하여 아산방조제 배수갑문 확장, 평택·당진항 외항 남측호안 철거, 그리고 화옹방조제 해수소통 차단에 따른 아산만의 조석과 조류속 변화를 모의하였다.

평택·당진항은 당초 외항과 내항을 갑문으로 연결하는 갑문식 항만으로 설계되었다. 1990년에 외항이 착공되어 남측호안, 서측호안, 도류제 등의 외곽시설물이 1996년에 완공되었고, 내항은 내항가호안이 1998~1999년에 먼저 시공된 후, 1공구 외곽호안이 2001년에, 그리고 2공구 외곽호안이 2006년에 체절되었다. 내항이 2004년에 감조식 항만으로 설계 변경되어, 2007년에 외항 남측호안이 철거되었다. 2007년 이후 내항 2공구는 외곽호안과 내항가호안으로 둘러싸여 해역과 분리된 상태를 유지하고 있으나, 두 호안 모두 완성 단면이 아닌 사석 제체로만 축조되어 있기 때문에 사석 공극을 통하여 상당량의 해수가 유통되고 있다. 또한 내항 2공구 내부의 투기장 가호안에서도 해수유통이 발생하고 있다(Fig. 2).

전술한 아산만의 유동 수치모델링에서는 투수성 호안에서의 해수유통을 고려하기 어렵기 때문에 내항 2공구 수역을 해수유통이 없는 육지로 처리하였다. 따라서 만 내측으로의 조량과 조류속이 실제보다 과소 산정되며, 이 유동장으로부터

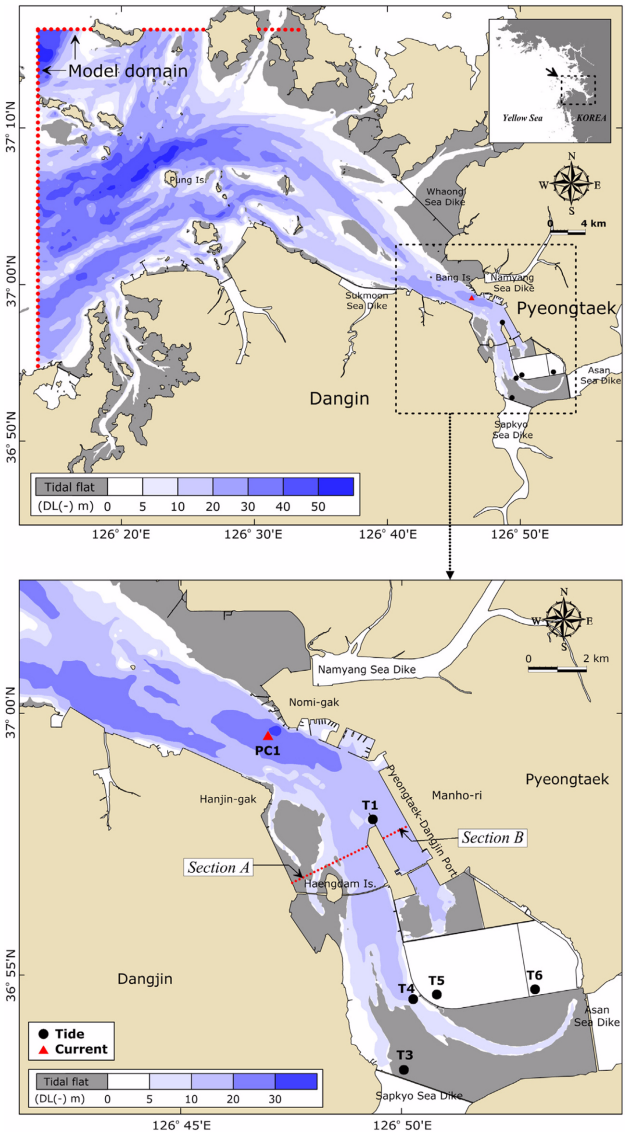


Fig. 1. Bathymetry of the Asan Bay, showing tide and current measurement stations with filled circles and triangle, respectively. The inner part of the bay designated by dotted rectangle in the upper panel is enlarged in the lower panel.

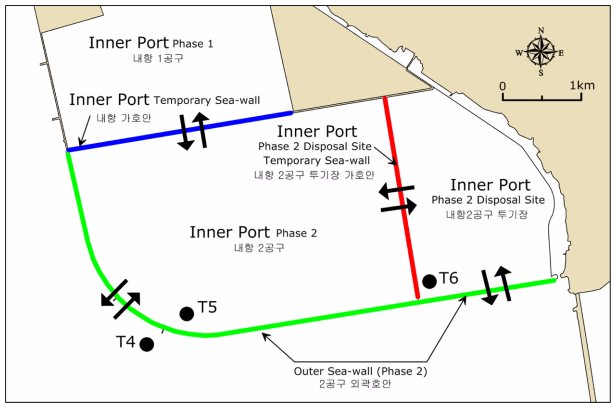


Fig. 2. Four sea-walls surrounding the waters of the Inner Port Phase 2 through which the seawater flows in and out due to water level difference between the inside and the outside of each sea-wall.

퇴적물 이동량을 산정하여 퇴적 양상을 추정하면(Park, 2000), 결과의 오류를 내포할 가능성이 커진다. 한편, 평택·당진항의 투수성 사석 호안을 통과하는 유량을 수치모델에 반영하기 위한 선행 연구들이 있었다. 최(2004a, b)는 non-Darcy 흐름으로부터 Li et al.(1998)이 유도한 공식을 적용하여 내항 1공구 외곽호안을 통과하는 유량 산정 모듈을 구성하여 수치모델링을 수행하였다. 이 식으로 유량을 산정하기 위하여 사석 제체의 평균 수리수심(mean hydraulic radius)과 공극율, 그리고 내·외수위차를 알아야 하는데, 현장 제체에 대한 수리수심과 공극율을 구하는 것은 현실적으로 매우 어렵다. 이후정(2006)은 비피압 대수층(unconfined aquifer)에 대한 Dupuit 방정식을 적용하여 내항 1공구 외곽호안 내·외수위차와 내측 조위 변화율간의 회귀식으로부터 외곽호안을 통한 해수유통량을 산정하는 모듈을 구성하여 수치모델링을 수행하였다. 그러나 정(2006)이 산출한 해수유통량 공식은 2003년의 지형 및 수심조건에서 내항 1공구 외곽호안에 대하여만 적용이 가능하다.

이 연구에서는 현재 4개의 투수성 호안를 통하여 해수유통이 발생하고 있는 내항 2공구 수역에서 호안 내·외측의 조위 자료로부터 호안을 통과하는 해수유통량을 산정하는 모듈을 3차원 유동 수치모델에 추가하였고, 투수성 호안의 해수유통을 고려하는 경우와 고려하지 않는 경우에 대한 모의를 통하여 단면 해수이동량, 유속과 해저면 전단응력 분포를 비교 · 분석하였다.

2. 연구 해역

2.1 해저지형과 수심 분포

한반도 중부 서해안에 위치하는 아산만은 일반적으로 노미각과 한진각을 연결하는 선의 내측 수역을 말한다. 행정구역상으로는 경기도 평택시와 화성시, 그리고 충청남도 아산시와 당진시로 분할되며, 수면적은 약 100 km^{2}이다.

외해로부터 아산만에 이르는 수로는 인천항 접근수로 중의 하나인 동수도의 중간에 위치한 풍도의 북방을 거쳐 동으로 약 15 km, 그리고 다시 남동으로 약 25 km 들어가는 폭 1~4 km, 수심 DL(–)10~(–)40 m의 수로이다. 아산만으로 연결되는 수로의 중앙부는 섬들과 중앙천퇴에 의해 북측 수로와 남측 수로로 분리되며, 그 수심은 대체로 DL(–)15~(–)30 m이다. 북측 수로는 방도 부근의 간출암 해역에서 거의 중단된다. 만 입구는 폭이 약 2 km인 협수로를 이루고 있으며 내측으로 가면서 폭이 넓어진다. 입구부터 북동측 해안을 따라 만호리까지 약 7 km의 수역은 수심 DL(–)10~(–)20 m인 평택·당진항 진입항로와 박지가 형성되어 있고, 외항 도류제부터 남서쪽의 행담도까지 수심 DL(–)7~(–)12 m의 수로가 형성되어 있다. 만 내측의 상당 부분은 저조시 노출되는 조간대로 구성되어 있으며, 조간대 사이로 좁고 얕은 수로가 아산방조제 및 삽교방조제 배수갑문으로 연결된다. 한편, 한진

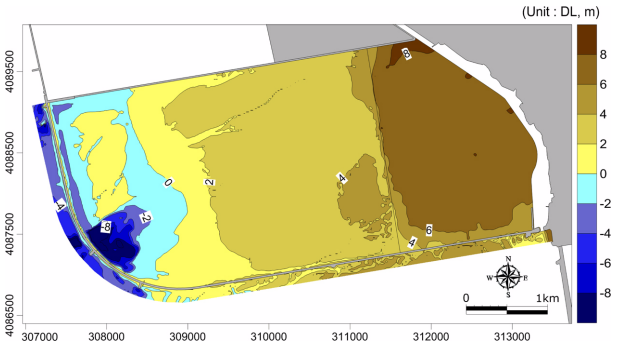


Fig. 3. Bathymetry of the Inner Port Phase 2 and of the Disposal Site, and along the exterior of the Outer Sea-wall surveyed in July, August, and May 2010, respectively. Raw data was provided by the Pyeongtaek Regional Maritime Affairs & Port Office.

각부터 외항 도류제 서측의 영암 사이에는 간출암이 산재하고 있다.

내항 2공구 외곽호안을 따라 외측의 수심 분포를 보면, 내항 1공구 외곽호안 끝부터 우각부까지 DL(–)5~(±)0 m의 분포이고, 우각부에서 국지적으로 최대 DL(–)16 m의 깊은 수심이 나타나는데 이는 호안 체절시 끝막이 위치로서 강한 유속에 의한 침식 지형이 유지되고 있는 것이다(Fig. 3). 우각부부터 아산방조제쪽으로 가면서 수심이 점차 얕아지는데 2공구 투기장 전면에서는 최고 DL(+)5 m 내외의 과거에 형성된 조간대가 유지되고 있다. 2공구 외곽호안의 길이는 7.7 km이며, 이 중에 5 km 정도는 DL(±)0 m 보다 높은 조간대에 위치한다. Fig. 3을 보면 호안으로부터 조간대를 가로지르는 다수의 좁은 골들을 확인할 수 있으며, 이는 투수성 호안을 통과하는 해수 흐름에 의하여 형성된 것이다.

내항 2공구 수역의 수심 분포를 보면, 서측 일부를 제외하면 조간대로 구성되어 있다. 내항 2공구 투기장 수역은 대부분 DL(+)6 m 보다 높은 조간대로 이루어져 있고, 외곽호안에 인접한 지역은 DL(+)2~(+)6 m의 수심을 유지하고 있다.

2.2 조석과 조류

아산만은 대조차가 약 8.0 m, 소조차가 약 3.5 m로서 인천만과 함께 한국에서 조차가 가장 큰 해역이다. 조석의 형태는 반일주조가 우세하고 일조부등이 비교적 크다. 조차는 만 내측으로 갈수록 증가한다. 즉, 만 내측으로 갈수록 고조위는 상승하고 저조위는 하강하는 양상을 나타낸다(국립해양조사원, 2009; 평택지방해양항만청, 2010).

조류 역시 반일주조류가 우세하여 1일 2회의 왕복성 조류가 나타난다. 유향은 대체로 만의 길이 방향에 평행하여, 창조류는 남동향, 낙조류는 북서향한다. 대조기 최강유속은 노미각 남측수로에서 0.9 m/s, 행담도 동측수로에서 1.0 m/s, 외항과 내항 사이 수역에서 0.5 m/s 정도이다(평택지방해양항만청, 2010).

Table 1. Statistics of freshwater discharge from the sluices of Asan, Sapkyo, Namyang and Seokmoon Sea Dikes

Parameter	Asan	Sapkyo	Namyang	Seokmoon
Annual Discharge (10^6 m^3/year)	891	940	159	241
Frequency of sluice opening (/year)	78	66	46	65
Duration of a sluice opening (hour)	3.8	3.3	3.1	2.6
Av. discharge during sluice opening (m^3/s)	835	1,199	310	396

※Raw data from Korea Rural Community Corporation for Asan (1983-2010), Sapkyo (1986-2010) and Namyang (1983-2010) Sea Dikes, and from Daesan Construction Company, Ltd. for Seokmoon (1996-2010) Sea Dike.

2.3 담수 방류량

만의 안쪽 끝에 아산방조제와 삽교방조제가 위치하고 만 입구의 동측에 남양방조제, 그리고 서측에 석문방조제가 위치하고 있다. 방조제 배수갑문을 통하여 주로 여름에 담수가 방류되는데, 연간 방류량은 각각 891, 940, 151, 241 × 10^6 m^3/y로서 삽교방조제와 아산방조제의 방류량이 상대적으로 크다. Table 1에 방조제별 방류량 통계를 제시하였는데, 아산방조제는 1983년 1월부터 2010년 10월까지, 남양방조제는 1983년 2월부터 2010년 11월까지, 삽교방조제는 1986년 1월부터 2010년 11월까지, 그리고 석문방조제는 1996년 12월부터 2010년 10월까지의 자료를 분석한 것이다.

연간 방류회수는 46~78회이고, 회당 개방시간은 2.6~3.8시간이며, 회당 평균 방류량은 310~1,199 m^3/s이다.

3. 호안통과 유량식

3.1 내항 2공구 수역의 관측 조석

평택·당진항 내항 가호안, 내항 2공구 외곽호안 및 내항 2공구 준설토투기장 가호안은 현재 사석으로만 축조되어 있고 완성 단면이 아니기 때문에 제체 공극을 통한 해수유통이 발생하고 있다. 따라서 내항 2공구 수역에서도 조석 현상이 나타나고 있다.

2010년 5월 13~27일에 내항 2공구 외곽호안 외측(정점 T4)과 내측(정점 T5), 그리고 2공구 투기장 내측(정점 T6)의 저면에 카나다 RBR Ltd.의 수압식 검조기 TGR-2050을 설치하고 조석 관측을 실시하였다. 세 정점에서의 조위 시계열은 Fig. 4에 제시되어 있으며, 수준측량과 검조표척 관측을 통하여 각 정점의 조위 기준면을 국립해양조사원이 운영하는 평택 조위관측소의 조위 기준면(DL)에 일치시켰다.

평균해면은 T4에서 DL(+)5.20 m, T5에서 DL(+)5.60 m, T6에서 DL(+)6.13 m로서 호안 내측이 외측 보다 높다. 평균조차는 T4에서 6.61 m, T5에서 3.50 m, T6에서 1.57 m로서 T4를 기준할 때 T5는 53%, T6는 24%에 해당한다. 관측기간 중 호안 외측(T4)의 조차가 가장 큰 2010년 5월 17일에 T4, T5와 T6의 최대 조차는 각각 8.74, 4.70, 2.32 m로서, T5와 T6의 조차는 각각 T4의 54%와 27%에 해당하여 평균조차의 비율과 유사하다.

T4에서 T6로 갈수록 평균해면이 상승하고 조차가 감소하는 양상과 더불어, 조시가 지연되고 창조 지속시간은 짧아지며, 낙조 지속시간이 더 길어지는 특성이 나타난다. 평균 창조 지속시간은 T4에서 5.9시간, T5에서 5.4시간, 그리고 T6에서 4.5시간이다. 외곽호안 외측의 조차가 증가할수록 외곽호안 내측의 창조 지속시간은 더 짧아지고, 낙조 지속시간은 더 길어진다. 즉 소조기에 평균 창조 지속시간은 T5와 T6에서 각각 5.8, 4.9시간인데, 대조기에는 각각 5.2, 4.3시간으로서 두 정점 모두 소조기보다 0.6시간 짧아진다. 2공구 수역에서의 이러한 조석 변형에 따라 호안 내·외측의 순간적인 수위차가 매우 커지게 된다. 순간 수위차는 호안 외측(T4)의 저조시 부근이 가장 크며, T4와 T5간의 최대 순간 수위차는 4.16 m, T4와 T6간의 최대 수위차는 5.37 m에 달한다. 이러한 호안 내·외측의 수위차에 의하여 제체 공극을 통한 해수유통이 활발하게 진행된다.

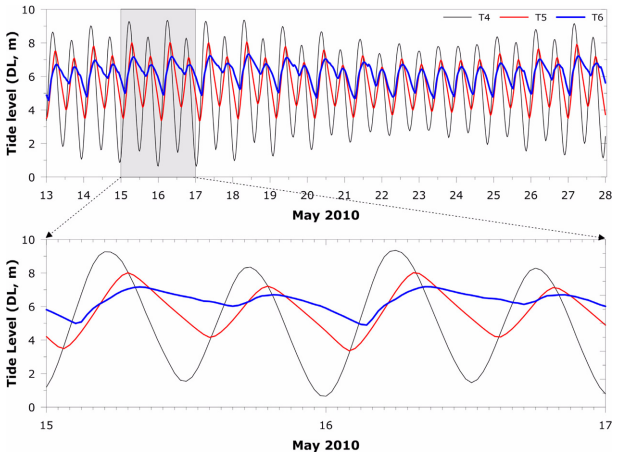


Fig. 4. Observed tide level variations at T4, T5 and T6 in May 2010. Enlarged time-series for 48 hours at spring tide is shown in the lower panel.

외해와 좁은 수로로 연결된 만 내부에서는 조량의 유출입이 제한되어 평균해면이 상승하는 소위 superelevation이 발생하며, superelevation Δ는 식 (1)과 같이 표현된다(Keulegan, 1967; 서와 조, 2007).

$$\Delta = a_o \sin\left(\frac{2\pi t_i}{T}\right) \Big/ \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi t_i}{T}\right)\right) \quad (1)$$

여기서, a_o는 외해 조석의 진폭, t_i는 창조(유입)류 지속시간, T는 조석 주기(12.42시간)이다. 내항 2공구 수역은 외측과 수

로로 연결되어 있지 않고 제체 공극을 통하여 해수유통이 발생하고 있지만, 식 (1)을 적용하여 superelevation을 산정하여 보았다. a_o는 T4의 평균 진폭인 3.30 m, t_i는 T5의 창조 지속시간인 5.43 hr, T는 조석 주기인 12.42 hr를 식 (1)에 대입하면 superelevation Δ는 0.66 m로서, T5와 T4에서 관측 평균해면의 차인 0.40 m 보다 0.26 m 높은 수치이다. 이와 같이 관측 Δ가 이론식 보다 다소 작게 나타나는 것은 내항 2공구 수역의 해수유통이 수로가 아닌 제체 공극을 통하여 발생하는 것 외에도 2공구 수역에 조간대가 넓게 발달하여 있고, 외해뿐만 아니라 2공구 투기장 가호안 공극을 통해서도 해수가 유통되는 등 복잡한 지형적, 수리적 영향을 받기 때문인 것으로 보인다.

3.2 호안통과 유량식의 유도

호안을 통과하는 순간 유량을 파악하는 방안은 크게 현장에서 간극수압을 측정하여 투수계수를 산정하는 방법(박 등, 2012)과 내·외수위차를 이용하여 호안통과 유량식을 유도하는 방법으로 구분된다. 현장계측 방법은 해당 지점에서는 정확한 값을 제공하지만 계측결과가 호안의 전체 단면에 대하여 동일하다고 보기는 어려우며, 비용과 시간이 많이 소요된다. 내·외수위차로부터 호안통과 유량식을 유도하는 방법은 non-Darcy 흐름을 가정하는 방법(Li et al., 1998; 최, 2004a, b)과 Dupuit 방정식을 적용하는 방법이 있다. 전자는 사석 호안의 공극율과 같은 파라메타를 필요로 하기 때문에 현실적으로 적용하기 어렵다.

정(2006)은 비피압 대수층(unconfined aquifer)에 대한 Dupuit 방정식을 적용하여 평택·당진항 내항 1공구 외곽호안 내·외수위차와 내측 조위 변화율간의 회귀식으로부터 외곽호안을 통한 해수유통량을 산정하는 모듈을 구성하여 수치모델링을 수행하였다. 그러나 당시 유도된 호안통과 유량식은 2003년의 지형조건하에서 내항 1공구 외곽호안에 대하여만 적용이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 정(2006)의 접근방법을 기본으로 하되, 2010년의 지형조건하에서 내항 2공구 수역을 둘러싸고 있는 호안을 통과하는 유량식을 유도하였다.

정(2006)은 내항 1공구 외곽호안에 대하여 식 (2)와 같이 호안 내측 수심(h_i)의 제곱과 외측 수심(h_o)의 제곱의 차와 내측 수위의 변화율($\Delta h_i/\Delta t$)간의 관계식을 유도하였다. 수위 변화율에 내측 수면적을 곱하면 순간 유량을 구할 수 있으며, 호안 내 · 외측의 바닥 높이는 동일한 것으로 가정하였다.

$$\ln(\Delta h_i/\Delta t) = 0.56 ln(|h_o^2 - h_i^2|) - 1.48 \quad (2)$$

그러나 내항 2공구 수역과 2공구 투기장 수역은 조간대가 넓게 분포하기 때문에 호안 내·외측의 바닥 높이가 조시에 따라 다르고, 호안 내·외측 수위 제곱의 차가 내측의 수위 변화율 보다는 내측의 수용적 변화율과 밀접한 상관성을 보인다. 따라서 본 연구에서는 퇴적층을 불투수층으로 가정하고 호안 내·외측 수심은 내측 바닥 높이를 기준으로 하였고(Fig. 5), 내측 수위 변화율이 아닌 내측 수용적 변화율과의 관계를 구하였다. 내항 2공구 수역의 수위별 수용적은 2010년 7월, 그리고 2공구 투기장 수역의 수위별 수용적은 2010년 8월의 수심도로부터 산출하였다(Fig. 6). 내항 2공구에 조간대가 넓게 분포하고 수심 기준을 내측 바닥 높이로 하였기 때문에 수위차와 수용적 변화율 관계식은 창조(유입)시와 낙조(유출)시가 상당히 다르게 나타난다(Fig. 7). 식 (3)과

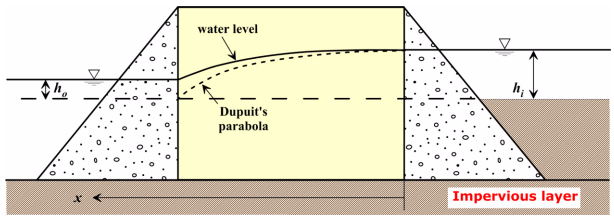


Fig. 5. Illustration of permeable sea-wall to define h_i (interior water depth) and h_o (exterior water depth referred to interior bottom level).

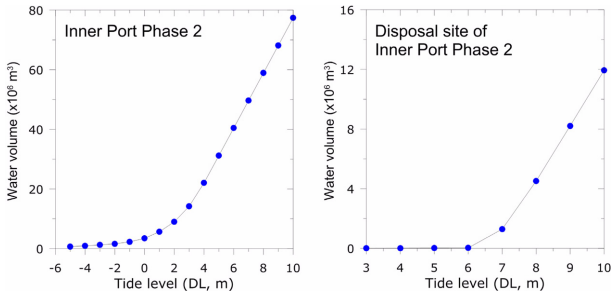


Fig. 6. Relationship between the tide level and the water storage in the Inner Port Phase 2 (left panel) and the disposal site (right panel).

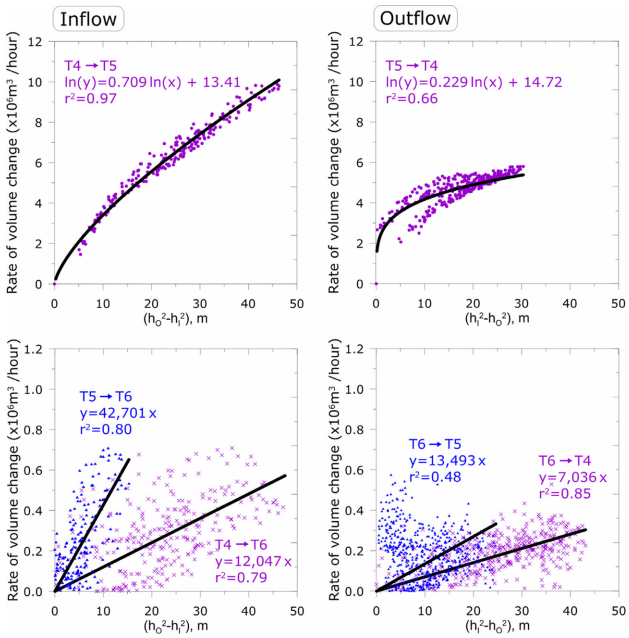


Fig. 7. Relationship between the measure of hydraulic head difference and the rate of interior water volume change.

(4)는 내항 2공구 및 투기장 수역에서 해수 유입시와 유출시의 회귀식이며, 결정계수가 가장 큰 식을 채택하였다. 유출시 내항 2공구와 외해측(T5 → T4) 및 내항 2공구 투기장과 내항 2공구(T6 → T4)간 회귀식의 상관관계가 비교적 낮으며, 이는 후술하는 바와 같이 호안 내측에서 대조기의 저조위 재현 정도를 감소시키는 원인이 된다.

유입시: T4 → T5 $\ln(\Delta V_i/\Delta t) = 0.709\ln(h_o^2 - h_i^2) + 13.41$ $r^2 = 0.97$ (3a)

T4 → T6 $\Delta V_i/\Delta t = 12{,}047(h_o^2 - h_i^2)$ $r^2 = 0.79$ (3b)

T5 → T6 $\Delta V_i/\Delta t = 42{,}701(h_o^2 - h_i^2)$ $r^2 = 0.80$ (3c)

유출시: T5 → T4 $\ln(\Delta V_i/\Delta t) = 0.229\ln(h_i^2 - h_o^2) + 14.72$ $r^2 = 0.66$ (4a)

T6 → T4 $\Delta V_i/\Delta t = 7{,}036(h_i^2 - h_o^2)$ $r^2 = 0.85$ (4b)

T6 → T5 $\Delta V_i/\Delta t = 13{,}493(h_i^2 - h_o^2)$ $r^2 = 0.88$ (4c)

여기서, V_i는 호안 내측의 수용적을 나타낸다.

4. 수치모델 구축

4.1 사용 모델

본 연구에서는 미국 VIMS(Virginia Institute of Marine Science)에서 개발한 연안, 하구, 호소 등의 유동 및 물질수송을 모의할 수 있는 3차원 수치모델링 시스템인 EFDC (Environmental Fluid Dynamics Code)의 유동 모듈을 사용하였다. EFDC의 지배방정식은 연속 방정식과 수평·수직방향의 운동량 보존방정식, 열·염 보존방정식과 상태 방정식으로 구성되어 있다. 열·염 보존방정식은 밀도차에 의한 경압력에 의하여 운동량 보존방정식과 연계되어 있다.

이 모델은 연직방향으로 σ좌표계를 사용하고, 수평방향으로는 직선 또는 곡선 직교좌표계를 사용한다. 연직 난류확산은 Mellor and Yamada(1982)의 level 2.5 난류 마감기법을 적용하고, 수평 난류확산은 Smagorinsky(1963)식을 적용한다. 또한 질량 보존기법을 적용하여 조간대에서의 노출·침수를 재현할 수 있다(Hamrick, 1994; Hamrick and Moustafa, 1996). EFDC의 이론적 배경과 수치해석 기법은 Hamrick(1994)에 상세하게 기술되어 있다.

4.2 아산만 모델 구축

모델의 계산영역은 평택·당진항 개발 사업에 따른 수리적 영향이 외해 개방경계에 영향을 미치지 않도록 충분히 넓게 설정하였으며, 남북 방향으로 60.8 km, 동서 방향으로 52.4 km이다(Fig. 1(a) 참조). 수평 격자망은 평택·당진항 외곽호안의 곡선형태를 재현하기 위하여 직교 곡선 격자체계를 채택하였다(Fig. 8). 내항 2공구 외곽호안 우각부 주변에서 최소 30 m 크기의 격자를 구성하였으며, 외해로 가면서 격자간격을 넓게 하였다. 연직 방향으로는 시그마 좌표계를 채택하였고, 무차원 두께가 동일한 5개의 층으로 구분하였다. 계산에 사용된 유효 격자수는 151,365개이다.

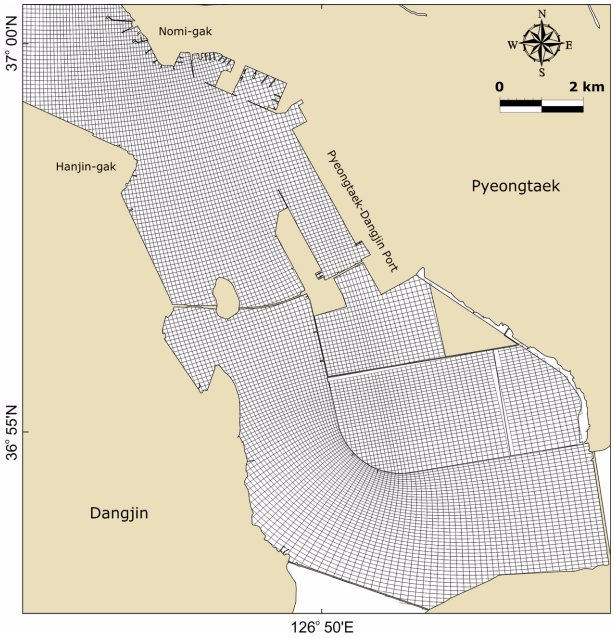


Fig. 8. Horizontal computation grids in the Asan Bay. Curvilinear grids are adopted to reproduce the arched Outer Sea-wall of Inner Port realistically.

해안선과 격자 수심은 2010년 5월을 기준으로, 국립해양조사원의 해도와 평택지방해양항만청의 수심도를 이용하여 입력하였다(Fig. 1 참조).

4.3 내항 2공구 호안의 해수유통 기법

Fig. 2에 제시한 바와 같이 내항 2공구 수역은 해수유통이 일어나는 3개의 호안으로 둘러싸여 있다. 북측의 내항 가호안을 통하여 내항 1공구 및 외항 수역과 해수유통이 일어나고, 남·서측의 2공구 외곽호안을 통하여 외측 해역과 해수유통이 발생하며, 동측의 2공구 투기장 가호안을 통하여 2공구 투기장 수역과 해수유통이 발생한다. 한편 내항 2공구 투기장 수역은 해수유통이 일어나는 2개의 호안으로 둘러싸여 있다. 남측의 2공구 외곽호안을 통하여 외측 해역과 해수유통이 발생하며, 서측의 2공구 투기장 가호안을 통하여 내항 2공구 수역과 해수유통이 발생한다. 한편 내항 1공구 서측호안도 현재 완성 단면이 아니지만, 내·외측 수위차가 거의 없기 때문에 내항 1공구 서측호안을 통한 해수 유출입은 없는 것으로 하였다.

내항 1공구 수역의 조위와 T4의 조위는 진폭과 위상이 거의 동일하므로 T4의 조위는 2공구 외곽호안 외측과 내항 1공구 수역의 조위를 대표하고, T5는 내항 2공구 수역을, 그리고 T6는 2공구 투기장 수역의 조위를 대표하는 것으로 설정하였다. 4초 간격의 매 계산시간마다 T4, T5 및 T6의 조위를 비교하여 각 호안을 통과하는 유향을 설정하였다. 호안별 해수유통량은 식 (3)과 (4)에 의해서 산정되며, 호안을 따라 바로 안쪽 격자의 수심으로부터 각 격자 및 각 호안의 통수단면적을 구하고, 호안 통수단면적에 대한 각 격자별 통수

단면적의 비율로부터 각 격자를 통과하는 유량을 산출하였다. T4와 T5의 조위로부터 산정된 외측과 내항 2공구간의 호안 통과 유량은 내항 2공구에 접하는 내항 가호안과 2공구 외곽호안의 격자별 통수 면적비를 적용하여 배분하였다. 즉 임의 계산시간의 격자별 유량(V_i)은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_i = V_T\left(h_i\Delta l_i / \sum_{i=1}^{n} h_i\Delta l_i\right) \tag{5}$$

여기서, V_T는 임의 시간에 해당 호안을 통과하는 총 유량, h_i는 격자 i의 내측 수심, Δl_i는 격자 i의 호안을 따른 길이, n은 해당 호안의 격자수이다.

5. 모델링 결과 및 토의

5.1 모델링 조건

수치모의는 내항 2공구 외곽호안 내·외측에서 조석관측이 시행된 2010년 5월 13~27일의 관측자료와 비교하기 위하여 5월 12일부터 27일까지 실시간으로 수행하였다. 모델링은 전 계산영역의 조위가 평균해면이고 유속이 없는 상태(cold start)로 시작하였다. 수온과 염분의 초기치는 국립해양조사원이 제공하는 평택 조위관측소의 자료 중, 모의기간의 평균값인 14.3°C와 28.3 psu를 입력하였다.

외해 개방경계에서는 국립해양조사원의 조석도와 모델 외해경계 인근에 위치하는 대산 및 안산(탄도) 조위관측소의 조석 관측자료로부터 5개 분조(M_2, S_2, K_1, O_1, N_2)의 반조차와 지각을 추출하여 매 계산시간마다 조위를 입력하였고, 보정실험을 통하여 조정하였다. 아산, 삽교, 남양, 석문방조제 배수갑문을 통하여 아산만으로 유입되는 실측 방류량을 해당 격자에 입력하였다. 외해 개방경계의 수온과 염분, 그리고 방조제 유입 담수의 수온은 초기치와 동일하게 입력하였고, 담수의 염분은 0 psu로 지정하였다. 위도를 35.1°N으로 입력하여 지구자전에 의한 전향력을 고려하였고, 모의기간 중 풍속이 강하지 않아 바람을 입력하지 않았다.

해저면 경계에서 연직 방향의 유속은 0으로 지정되며, x, y 방향의 저면 전단응력 $\tau_{b,x}$와 $\tau_{b,y}$는 다음과 같이 계산된다.

$$(\tau_{b,x}, \tau_{b,y}) = \frac{A_v}{H}\frac{\partial(u_1, v_1)}{\partial z} = c_b(u_1, v_1)\sqrt{(u_1^2 + v_1^2)} \tag{6}$$

여기서, A_v는 연직 난류점성계수, H는 순간 총 수심, u_1과 v_1은 가장 저층의 x, y 방향 유속이고, 저면 마찰계수 c_b는 식 (7)과 같이 계산된다.

$$c_b = \left\{\frac{\kappa}{\ln(\Delta_1 H / ez_0)}\right\}^2 \tag{7}$$

여기서, κ는 von Karman 상수이고, Δ_1은 가장 저층의 무차원 두께이다. 그리고 z_0는 조도로서 이 모의에서는 0.0025를 입력하였다.

계산시간 간격은 CFL(Courant-Friedrichs-Lewy) 조건을 만족할 수 있도록 4초로 설정하였다.

5.2 모델 검정

2010년 5월 13~27일의 대·소조기를 포함한 15일간에 대하여 5개의 조석 정점과 1개의 조류 정점의 관측 자료를 이용하여 모델링 결과의 실시간 검정을 수행하였다. T1은 국립해양조사원의 평택 조위관측소이고, T3~T6와 PC1은 평택지방해양항만청(2010)의 조석 및 조류 관측정점이다(Fig. 1 참조).

5개 정점에서의 관측 및 모델 조위 시계열을 Fig. 9에 제시하였다. 항로·수로에 위치하는 T1, T3, T4에서는 관측치와 모델치가 잘 일치하고 있다. 2공구 외곽호안 내측의 T5와 T6에서는 대조기의 저저조(lower low water)시에 모델치가 관측치 만큼 충분히 하강하지 않으나, 조석의 진폭과 위상은 비교적 일치하는 양상이다.

5.2.1 조석 조화분석

관측조석의 모델 재현성을 정량적으로 확인하기 위하여 1시간 간격의 조석 관측치와 모델치 각각을 TIRA(Tidal Institute Recursive Analysis) 방법(Murray, 1964)을 적용한 TASK (Tidal Analysis Software Kit)-2000 프로그램(Bell et al., 1999)으로 조화분석하였다. Table 2에 주요 4개 분조(M_2, S_2, K_1, O_1)의 조화상수와 모델의 오차(Bias error) 및 재현율(skill score)을 제시하였다. 오차와 재현율은 아래와 같이 정의된다.

$$\text{Bias error} = x_m - x_o \tag{8}$$

$$\text{Skill score} = 100 \times \left(1 - \frac{|x_o - x_m|}{x_o}\right) \tag{9}$$

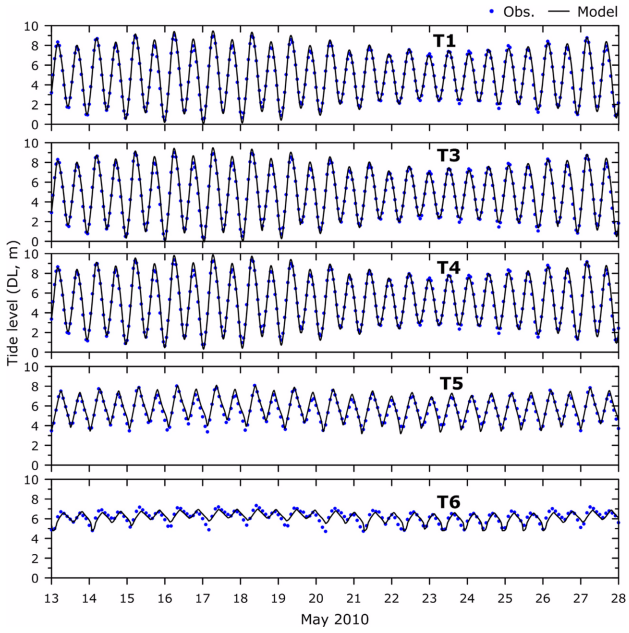


Fig. 9. Comparison of observed and modeled tide levels in May 2010 at 5 tide stations including two stations T5 and T6 within the Outer Sea-wall of Inner Port.

여기서 x_m은 모델치이고, x_o는 관측치이다. 식 (9)로 지각(phase lag)의 재현율을 계산할 때 분모의 x_o는 360°로 설정하였다(정과 노, 2010). 식 (9)의 재현율은 절대오차를 관측치로 나눈 값을 1에서 뺀 값으로서, 관측치가 0에 가까워지면 오차가 작더라도 재현율이 크게 감소하며, 분모에 관측치 대신 모델치를 대입하면 같은 오차에 대하여 재현율이 달라지는 문제점이 있으나(Ji and Gallo, 2006), 오차의 정도를 쉽게 판별할 수 있는 지표가 된다. 김과 윤(2011)은 해수유동 모델의 검정에서 재현율이 90% 이상일 때 '아주 우수(excellent)', 80~90%일 때 '우수(good)', 60~80%일 때 '보통(average)', 그리고 60% 이하일 때 '부적합(bad)'으로 구분하였다.

호안 외측의 수로에 위치하는 T1, T3, T4에서 관측된 M_2 분조의 반조차는 2.81~2.90 m의 범위이고, S_2분조의 반조차는 1.09~1.10 m이다. 2공구 외곽호안 내측의 T5에서 M_2분조의 반조차는 1.358 m이고 S_2분조는 0.474 m로서, 외곽호안 바로 외측의 T4와 비교할 때 각각 48%와 43%로 감소한다. 또한 2공구 투기장 내측의 T6에서 M_2분조의 반조차는 0.452 m이고 S_2분조는 0.116 m로서, T4와 비교할 때 각각 16%와 11%로 감소한다. 모델링 결과, 5개 정점에서 M_2와 S_2분조의 반조차는 절대오차가 0.08 m 이하이고, 재현율도 대부분 95% 이상으로 매우 양호하다. T6에서 M_2분조의 재현율이 89%로서 상대적으로 낮으나 오차는 0.05 m에 불과하다.

K_1분조의 경우, T1, T3, T4에서 관측된 반조차는 0.32~0.38 m의 범위이고, T5에서 0.186 m로 T4의 59%로 감소하지만, T6에서 0.374 m로 증가하여 T4보다도 18% 더 크다. 모델링 결과, T1, T3, T5에서 재현율이 95% 이상이며, T6에서는 모델 반조차가 관측치를 충분히 재현하지 못하고 있다. T1, T3, T4에서 관측된 O_1분조의 반조차는 0.29~0.30 m이고, T5에서 0.243 m로 T4의 80%로 감소하지만, T6에서 0.413 m로 증가하여 T4보다 36% 더 크다. T1, T3, T4에서의 모델 재현율은 95% 이상이고, T5에서는 68%로 다소 작게 모의되었으며, T6에서는 K_1분조와 같이 모델 반조차가 관측치를 충분히 재현하지 못하고 있다. 이와 같이 T6에서 일주조 반조차가 과소 모의된 것은 대조기에 고고조위(higher high water)의 상승과 특히 저저조위(lower low water)의 하강을 충분히 재현하지 못하여 일조부등 현상이 완화되었기 때문이며, 그 이유는 5.2.2절에 후술하였다.

항로·수로에서는 주요 4개 분조의 반조차 관측치에 대한 모델 재현율이 대부분 95% 이상으로 매우 우수하고, 2공구 호안 내측에서도 반일주조의 재현율이 대체로 90% 이상의 양호한 모의결과를 보인다. 반면에 일주조 반조차에 대한 모델치는 특히, 2공구 투기장 수역에서 매우 과소 평가되었다. 한편 항로·수로에서 4개 분조의 지각 관측치에 대한 모델 재현율은 97% 이상으로 매우 우수하다. 외곽호안 내측에서도 재현율이 비교적 양호하여, 재현율 최저치는 2공구 투기장 수역에서 S_2분조의 경우로서 83%이다.

5.2.2 조위와 조차

외곽호안 내측의 조위 변동 모의 정도를 확인하기 위하여 5개 관측 정점에서 평균고조위(mean high water), 평균해면(mean sea level), 평균저조위(mean low water), 평균조차(mean tidal range)의 관측치, 모델치, 오차와 재현율을 Table 3에 제시하였다. 평균고조위와 저조위는 매일 2회 나타나는 고

Table 2. Skill assessment for harmonic constants of tide

Tidal constant.	Station	Semi-range				Phase lag			
		Observed (m)	Model (m)	Bias error (m)	Skill score (%)	Observed (°)	Model (°)	Bias error (°)	Skill score (%)
M_2	T1	2.903	2.860	–0.043	98.5	134.4	134.2	–0.2	99.9
	T4	2.810	2.888	0.078	97.2	136.5	136.8	0.3	99.9
	T3	2.902	2.894	–0.008	99.7	136.5	137.7	1.2	99.7
	T5	1.358	1.374	0.016	98.8	190.4	187.3	–3.1	99.1
	T6	0.452	0.504	0.052	88.5	213.7	236.4	22.7	93.7
S_2	T1	1.092	1.068	–0.024	97.8	184.1	188.3	4.2	98.8
	T4	1.093	1.076	–0.017	98.4	181.8	187.3	5.5	98.5
	T3	1.101	1.077	–0.024	97.8	186.1	188.5	2.4	99.3
	T5	0.474	0.487	0.013	97.3	240.0	266.0	26.0	92.8
	T6	0.116	0.121	0.005	95.7	218.0	278.7	60.7	83.1
K_1	T1	0.370	0.387	0.017	95.4	301.7	303.1	1.4	99.6
	T4	0.316	0.384	0.068	78.5	306.4	305.0	–1.4	99.6
	T3	0.379	0.384	0.005	98.7	305.3	305.5	0.2	99.9
	T5	0.186	0.191	0.005	97.3	345.9	8.7	22.8	93.7
	T6	0.374	0.109	–0.265	29.1	54.9	55.9	1.0	99.7
O_1	T1	0.292	0.290	–0.002	99.3	269.8	271.1	1.3	99.6
	T4	0.304	0.291	–0.013	95.7	281.7	273.2	–8.5	97.6
	T3	0.285	0.290	0.005	98.2	272.2	273.5	1.3	99.6
	T5	0.243	0.164	–0.079	67.5	321.8	279.4	–42.4	88.2
	T6	0.413	0.066	–0.347	16.0	336.9	351.9	15.0	95.8

Table 3. Skill assessment for tide levels and tidal range

Tides	Station	Observed (m)	Model (m)	Bias error (m)	Skill score (%)
MHW	T1	8.023	8.238	0.215	97.3
	T4	8.400	8.638	0.238	97.2
	T3	7.981	8.052	0.071	99.1
	T5	7.311	7.540	0.229	96.9
	T6	6.781	6.740	–0.041	99.4
MSL	T1	4.867	4.902	0.035	99.3
	T4	5.195	5.215	0.020	99.6
	T3	4.780	4.860	0.080	98.3
	T5	5.597	5.766	0.169	97.0
	T6	6.134	6.130	–0.004	99.9
MLW	T1	1.505	1.400	–0.105	93.0
	T4	1.790	1.692	–0.098	94.5
	T3	1.338	1.302	–0.036	97.3
	T5	3.816	3.823	0.007	99.8
	T6	5.209	5.400	0.191	96.3
MTR	T1	6.518	6.838	0.320	95.1
	T4	6.610	6.946	0.336	94.9
	T3	6.643	6.750	0.107	98.4
	T5	3.495	3.717	0.222	93.6
	T6	1.572	1.340	–0.232	85.2

※MHW: Mean High Water, MSL: Mean Sea Level, MLW: Mean Low Water, MTR: Mean Tidal Range (= MHW-MLW).

조위와 저조위를 모의기간동안 평균한 값이고, 평균해면은 매 시별 조위를 평균한 값이며, 평균조차는 평균고조위에서 평균저조위를 뺀 값이다.

수로구역에서 평균고조위의 오차는 0.07~0.24 m이고, T5에서 0.23 m, 그리고 T6에서 –0.04 m이며, 재현율은 97~99%이다. 평균저조위의 오차는 수로구역에서 –0.11~–0.04 m이고, T5에서 0.01 m, 그리고 T6에서 0.19 m이며, 재현율은 93~100%이다. 따라서 평균조차는 수로구역과 T5에서 다소 과대모의되어, 오차는 0.11~0.34 m이고 재현율은 94~98%이다. 반면에 T6에서는 다소 과소 모의되었는데, 오차는 –0.23 m이고 재현율은 85%이다. 평균해면의 오차는 수로구역에서 0.02~0.08 m이고, T5에서 0.17 m로 관측치보다 약간 높게 모의되었으며, T6에서는 정확하게 일치한다. 재현율은 5개 정점에서 97~100%의 범위를 나타낸다.

T5(2공구 내측)에서 조차가 약간 크게 모의된 것은 수로구역에서 조차가 약간 크게 모의된 결과가 그대로 반영된 것이며, 평균해면이 다소 높게 모의된 것은 대조기에 저조위가 관측치만큼 충분하게 하강하지 않기 때문이다. 이는 Fig. 7에서 보듯이 내·외수위차가 큰 대조기의 해수유출시에 수위차-유량 회귀식에 의한 유출량이 관측치보다 적기 때문이다. 대조기의 저저조위(lower low water)시에 모델치가 관측치 만큼 충분하게 하강하지 않는 양상은 T6(2공구 투기장 내측)에서 보다 뚜렷하게 나타난다. 따라서 평균저조위가 관측치보다 다소 높고, 평균조차는 관측치보다 다소 작게 모의된 결과를 보인다. 식 (4b)와 (4c)에서 보듯이 T6를 기준으로 T4와의 수위차와 T5와의 수위차가 같을 경우, 2공구 투기장(T6)에서 2공구 투기장 가호안을 통과하여 2공구 내측(T5)으로의 유출량이 2공구 외곽호안을 통과하여 수로측(T4)으로의 유출량의 약 2배가 된다. 즉, 대조기의 낙조 후반에 2공구 내측의 해수가 호안 외측으로 충분히 유출되지 못하기 때문에 조위가 다소 높게 유지되고, 그 영향으로 2공구 투기장 내측 해수의 유출이 지체되는 것으로 해석된다.

항로·수로뿐만 아니라 2공구 외곽호안 내측수역의 고조위, 평균해면, 저조위, 그리고 조차가 대체로 양호하게 재현되었다. 특히 투수성 호안 내측의 평균해면 상승과 조차 감소가 현실적으로 모의된 것으로 평가된다. T5(2공구 내측)와 T6(2공구 투기장 내측)의 조석현상이 2공구 외곽호안, 내항 가호안 및 2공구 투기장 가호안을 통한 해수유통에 의하여 서로 연계되어 있으나, 이 연구에서는 각 호안 단면을 통과하는 해수유통량을 T4-T5, T4-T6 및 T5-T6간의 수위차로부터 독립적으로 산정하여 적용하였다. 향후 수위차-해수유통량 관계식을 보다 정교화하고, 해수유통이 발생하는 호안을 동시에 고려하는 다변량 회귀분석방법을 도입하면, 외곽호안 내측에서 대조기의 저조위를 보다 정확하게 재현할 수 있을 것으로 보인다.

5.2.3 조류 조화분석

평택·당진항 진입항로에 위치하는 노미각 남측수로(정점 PC1, Fig. 1 참조)에서 미국 Teledyne RD Instruments의 ADCP(300 kHz)를 이용하여 2010년 5월 13~27일에 매 10분마다 연직 1 m 간격으로 유향·유속을 관측한 자료를 모델링 결과와 비교하였다. Fig. 10은 표층 유속의 동서 성분(u)과 남북 성분(v) 유속을 비교한 것이고, 표 · 중 · 저층에서 주요 4개 분조류에 대한 조화분석 결과는 Table 4에 제

Table 4. Skill assessment for semi-major axis of tidal current ellipse

Tidal constant	Layer	Observed (m/s)	Model (m/s)	Bias error (m/s)	Skill score (%)
M_2	Surface	0.578	0.574	−0.004	99.3
	Mid	0.634	0.561	−0.073	88.5
	Bottom	0.623	0.503	−0.120	80.7
S_2	Surface	0.231	0.271	0.040	82.7
	Mid	0.192	0.265	0.073	62.0
	Bottom	0.164	0.246	0.082	50.0
K_1	Surface	0.046	0.032	−0.014	69.6
	Mid	0.047	0.031	−0.016	66.0
	Bottom	0.043	0.019	−0.024	44.2
O_1	Surface	0.033	0.017	−0.016	51.5
	Mid	0.031	0.016	−0.015	51.6
	Bottom	0.029	0.017	−0.012	58.6

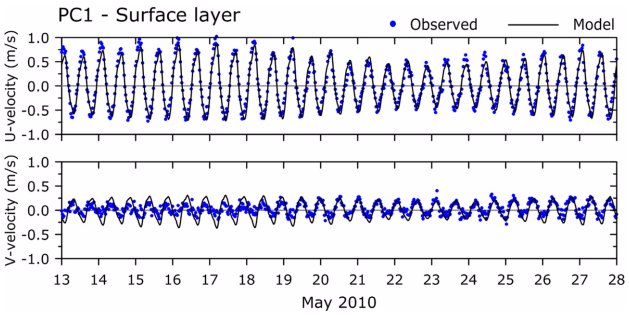


Fig. 10. Comparison of observed and modeled tidal currents in the surface layer at PC1.

시하였다. PC1의 수심은 DL(−)19 m이고, 표·중·저층은 수면으로부터 순간 총 수심의 각각 20, 50, 80% 위치로 설정하여 10분 간격마다 총 수심으로부터 추출하였다. 조화분석은 카나다 해양연구소의 IOS Tidal Package를 이용하였다(Forman, 1978). 이 프로그램은 조류속을 동서 및 남북 성분으로 분해하지 않고, 벡터적으로 조화분석한다.

관측 및 모델 유속의 시계열을 보면, 조류의 위상은 관측치와 대체로 유사하게 모의되었다. 유속의 동서 성분(u)중 창조류인 동향 성분이 약간 약하게 모의되었으며, 남북 성분(v) 중 낙조류인 북향 성분은 유사하게 모의되었으나 창조류인 남향 성분은 관측치보다 다소 강하게 모의되었다. 따라서 창·낙조류속의 크기는 유사하게 모의되었으며, 창조류의 유향이 관측치보다 시계방향으로 약간 편차를 보임을 의미한다.

관측된 M_2 조류타원의 장축 크기는 표층보다 중·저층에서 약간 더 크지만, 모델링 결과는 표층에서 저층으로 가면서 약간씩 감소한다. 따라서 표층에서 M_2 조류타원의 장축 크기에 대한 재현율은 99%로 매우 정확하게 모의되었지만, 중·저층에서 각각 89%와 81%로 감소한다. 반면에 관측된 S_2 조류타원의 장축 크기는 표층에서 저층으로 갈수록 감소 양상이 뚜렷하지만, 모델에서는 감소율이 크지 않다. 모델 재현율은 표층의 83%에서 저층으로 갈수록 감소하여 저층에서 50%이다. 한편 관측 일주조류 타원의 장축 크기는 0.029~0.047 m/s로 비교적 약하며, 모델 오차는 −0.024~−0.012 m/s로 약간 과소 모의되었다.

5.3 호안 통과유량을 고려하지 않은 경우와 비교

2010년 5월에 내항 2공구 외곽호안 내측 수역(T5)의 관측 최대조차는 4.70 m이고, 2공구 투기장 내측 수역(T6)의 최대조차는 2.32 m로서, 수로 구역(T4)의 최대조차인 8.74 m의 각각 54%와 27%에 해당한다. 이는 2공구 수역의 경우 2공구를 둘러싸고 있는 호안을 통하여 호안이 없을 때의 54%에 해당하는 조량이 유출입한다는 의미이고, 2공구 투기장 수역의 경우 호안이 없을 때의 27%에 해당하는 조량이 유출입한다는 의미가 된다. 최대조차가 발생한 날의 고조위와 저조위를 Fig. 6에 대입하여 조량을 산출하면 2공구 수역의 경우 42.5×10^6 m^{3}이고, 2공구 투기장 수역의 경우 1.8×10^6 m^{3}이 된다. 수치모델에서 내항 2공구 외곽호안, 내항 가호안과 2공구 투기장 가호안의 해수유통을 고려하지 않을 경우, 아산만의 조량과 유속을 과소평가하게 된다. 또한 과소 모의된 유속장을 적용하여 물질확산과 퇴적물이동 모의를 수행하면 이류·확산과 재부유 양상이 축소 모의되고, 퇴적물의 침강이 과도하게 산정될 수 있다. 따라서 내항 가호안과 2공구 외곽호안을 통한 해수유통이 고려되지 않은 경우에 대한 유동 모의를 수행하여, 해수유통을 고려한 경우와의 단면 해수이동량, 유속 및 해저면 전단응력 분포 차이를 분석하였다. 호안을 통한 해수유통이 없는 경우에 대한 모든 실험 조건은 호안 해수유통 차단을 제외하면 전술한 검정 실험조건과 동일하다.

5.3.1 단면 해수이동량

평택·당진항 입구부에서 항 외측 수로 단면 A와 항 내측 단면 B를 통과하는 해수이동량을 산정·비교하였다(단면 위치는 Fig. 1 참조). 호안의 해수유통을 고려한 경우에 단면 A의 최대 해수이동량은 25.0×10^3 m^3/s로서 창조시에 발생하며, 단면 B에서는 최대 4.7×10^3 m^3/s로서 역시 창조시에 나타난다(Fig. 11). 호안의 해수유통을 고려한 경우는 해수유통을 차단한 경우에 비하여 단면 A에서 최대 2.3×10^3 m^3/s (10%) 증가하고, 단면 B에서 최대 0.7×10^3 m^3/s(18%) 증가

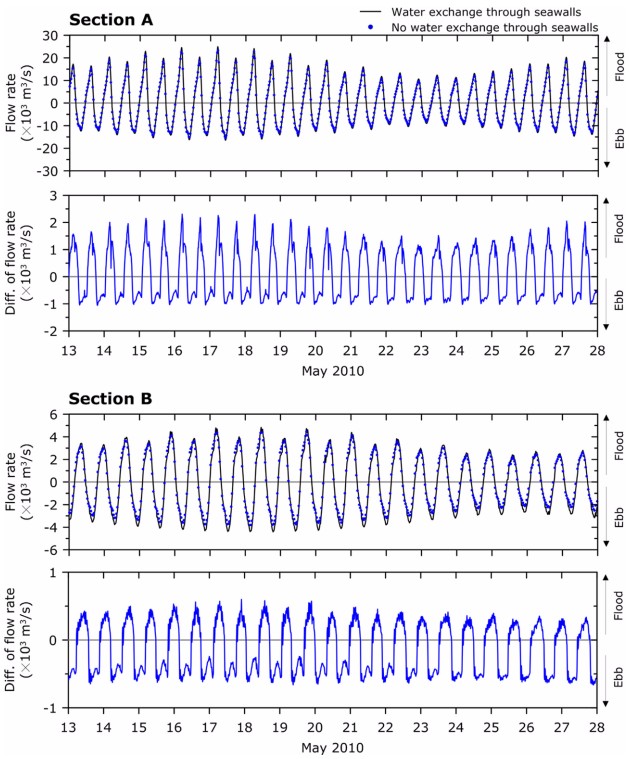


Fig. 11. Variations of modeled tidal flow rate through Sections A and B (the uppermost and the third panels, respectively), for the case incorporating the flow (solid line) and for the case of no water exchange (dot) through sea-walls. The time-series of flow rate increase by allowing water exchange through sea-walls are depicted in the second and the lowermost panels.

한다. 따라서 호안 해수유통 고려시, 행담도 동측 수로구역과 외항 수역의 최강유속은 호안 차단시보다 각각 약 10% 및 20% 증가할 것이다. 호안의 해수유통시 해수이동량 즉, 조량의 증가에 따라 수로구역의 대조차가 해수유통 차단시보다 0.01~0.02 m만큼 미약하게 증가한다.

5.3.2 유속

호안 해수유통을 고려한 경우 대조기 최강류시의 표층 유속 분포를 Fig. 12의 왼쪽에 도시하였다. 유속은 노미각 남측수로, 행담도 동측수로를 거쳐 2공구 외곽호안 우각부 전

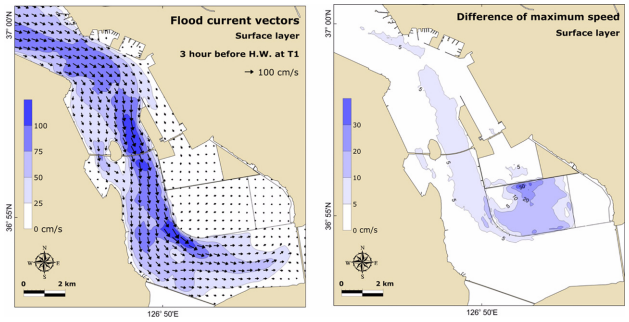


Fig. 12. Flood current vectors (left panel) and spatial distribution of maximum current speed increase in the surface layer by allowing the flow through permeable sea-walls (right panel).

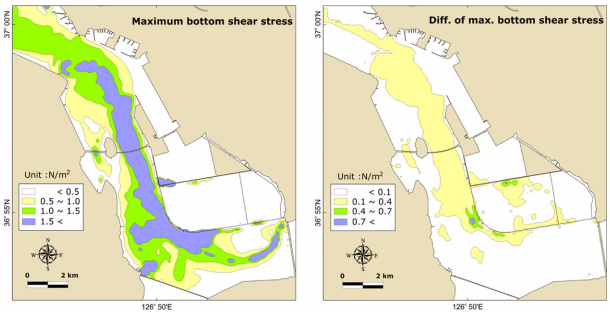


Fig. 13. Spatial distribution of modeled maximum bottom shear stress for the case of water exchange through permeable sea-walls (left panel) and its increase compared with the case of no water exchange (right panel).

면에서 강하게 나타난다. Fig. 12의 오른쪽 그림은 호안 해수유통을 차단한 경우에 대한 해수유통을 고려한 경우의 표층 최강유속 증가치 분포이다. 유속 증가는 노미각 남측부터 행담도 동측 수로에 걸쳐 0.05~0.10 m/s의 범위를 나타낸다. 한편, 2공구 외곽호안 외측에서 국지적으로 유속이 0.1~0.2 m/s 증가하고, 내항 가호안 남동측에서는 유속이 0.2 m/s 이상 증가하며, 2공구 수역에서 호안 해수유통에 의한 유속 증가 양상이 뚜렷하게 나타난다.

5.3.3 해저면 전단응력

해저면 전단응력은 유속의 제곱에 비례하므로 호안 해수유통 유무에 따라 해저면 전단응력 분포는 더욱 현저한 차이를 보인다. Fig. 13의 왼쪽 그림은 호안 해수유통시 최대 해저면 전단응력을 도시한 것으로, 노미각 남측수로, 행담도 동측수로를 거쳐 2공구 외곽호안 우각부 전면에 이르기까지 1.5 N/m^2 이상의 분포를 보인다. 또한 삽교 및 아산방조제 배수갑문 전면 수로에서도 담수 배출의 영향으로 1.5 N/m^2 이상을 나타낸다. Fig. 13의 오른쪽 그림은 호안 해수유통을 차단한 경우에 대한 해수유통을 고려한 경우의 최대 해저면 전단응력 증가치 분포이다. 전단응력의 차이는 최강유속의 차이 분포와 유사한 형태를 보인다. 즉, 유속이 강한 주수로에서 0.1~0.4 N/m^2의 범위로 증가하고, 내항 가호안 주위와 2공구 외곽호안 우각부 주변에서 국지적으로 0.4 N/m^2 이상 증가한다. 따라서 퇴적물이동 수치실험시 호안 해수유통 유무에 따라 수로구역의 침식과 퇴적 및 호안 주변의 국부 세굴 등의 모의결과가 유의한 차이를 나타낼 수 있다.

6. 결 론

평택·당진항 개발사업이 진행되고 있는 아산만을 대상으로 EFDC 모델을 적용하여 3차원 해수유동 모형을 구축하였다. 2010년 현재, 내항 2공구 수역은 3개의 호안으로 둘러싸여 있고 내항 2공구 투기장 수역은 2개의 호안으로 둘러싸여 있으며, 이 호안들은 사석 공극을 통하여 해수가 유출입하는 투수성 호안으로 유지되고 있다. 투수성 호안을 통한 해

수유통 현상을 수치모형으로 재현하기 위하여 호안 내·외측에서의 조석 관측자료를 이용하여 내·외수위차와 내측 수용적 변화율간의 회귀식을 도출하고, 수치모델에서 매 계산시간마다 계산되는 조위를 이용하여 투수성 호안의 해수유통량을 반영할 수 있도록 EFDC 모델을 개선하였다.

2010년 5월 13~27일의 모의기간에 대하여 주요 5개 분조(M_2, S_2, K_1, O_1, N_2)의 합성조석과 아산, 삽교, 남양, 석문방조제의 담수방류량을 실시간으로 입력하여 해수유동을 모의하였다. 2공구 내측과 2공구 투기장 내측에서 평균고조위, 평균해면과 평균저조위의 실측치에 대한 모델치의 skill score는 96~100%로서 매우 양호한 재현율을 보인다. 평균조차의 skill score는 두 수역에서 각각 94%와 85%로서 재현율이 다소 감소하며, 이는 대조기에 호안을 통한 해수 유출량 회귀식이 실측치를 과소평가하는데 기인한다. 향후 수위차-해수유통량 관계식을 보다 정교화하고, 해수유통이 발생하는 호안을 동시에 고려하는 다변량 회귀분석방법을 도입하면, 대조기의 저조위 및 조차를 보다 정확하게 재현할 수 있을 것이다.

투수성 호안의 해수유통을 차단한 모의결과와 비교하면, 아산만 수로와 외항 입구단면의 최대 해수이동량이 각각 10% 및 18% 증가한다. 최강유속은 노미각 남측부터 행담도 동측 수로에 걸쳐 0.05~0.10 m/s 증가하고, 2공구 외곽호안 외측에서 국지적으로 0.1~0.2 m/s 증가하고, 내항 가호안 남동측에서는 0.2 m/s 이상 증가한다. 최대 해저면 전단응력은 유속이 강한 주수로에서 0.1~0.4 N/m^{2}의 범위로 증가하고, 내항 가호안 주위와 2공구 외곽호안 우각부 주변에서 국지적으로 0.4 N/m^2 이상 증가한다. 따라서 퇴적물이동 수치모의시 호안의 해수유통 유무에 따라 수로구역의 침식·퇴적과 호안 주변의 국부 세굴 등의 실험결과가 유의한 차이를 나타낼 수 있으므로, 수리현황 재현 및 장래 예측 평가시에 대규모 투수성 호안의 해수유통을 고려한 수치모의가 긴요하다.

감사의 글

연구 기초자료를 제공해 주신 국토해양부 평택지방해양항만청 및 국립해양조사원의 관계관 여러분께 깊은 감사를 드립니다. 유익한 조언을 해주신 익명의 심사위원들께도 감사드립니다. 본 연구는 국토해양부 해양환경기술개발사업의 일환인 “하구역종합관리시스템 개발연구(No. 20100051)”의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

국립해양조사원 (2008). 황해 아산만 중앙천퇴 거동 연구. 11-1611234-000017-01, 한국지질자원연구원, 137p.

국립해양조사원 (2009). 황해 경기만 해저지형변화 연구. 11-1611000-000936-01, 132p.

김태윤, 윤한삼 (2011). 해수유동모델 검증을 위한 오차평가방법 비교 연구. 한국해양환경공학회지, 14(2), 107-113.

박문진 (2008). 화옹 (남양만) 방조제에 따른 아산만의 조석변화. 한국해양학회지 바다, 13(4), 320-324.

박병준, 이상화 (2008). 아산만 방조제 배수갑문 확장사업에 따른 주변해역 수리현상 변화 검토. 한국해안·해양공학회논문집, 20(2), 184-193.

박춘식, 김종환, 이선일 (2012). 현장조사와 침투모형시험을 통한 방조제 침투특성 연구. 한국해안·해양공학회논문집, 24(4), 247-256.

서승원 (2011). 서해연안 상세해상을 통한 천해조석 및 조석비대칭 재현. 한국해안 · 해양공학회논문집, 23(4), 313-325.

서승원, 조완희 (2007). 새만금호 완공전후의 수동역학변화 해석. 대한토목학회논문집, 27(3B), 361-369.

윤병일, 우승범 (2012). 한강하구 수로별 순 수송량과 대·소조기 변화에 따른 염하수로의 순 수송량 변동에 관한 수치해석적 연구. 한국해안·해양공학회논문집, 24(4), 257-268.

정광영, 노영재 (2010). 남해 강진만에서 성층 형성과 성층 파괴 과정. 한국해양학회지 바다, 15(3), 97-109.

정신택, 소재귀, 채장원 (1994). 인천해역 개발에 따른 조석변화 추정. 한국해안 · 해양공학회지, 6(3), 266-274.

정태성 (2006). 투수성 호안제체를 통한 해수교환을 고려한 해수유동 모의. 한국해안 · 해양공학회지, 18(4), 301-307.

정태성, 김성곤, 강시환 (2002). 3차원 흐름 모델링시스템(FEMOS)을 이용한 아산만 조류모의. 한국해안·해양공학회지, 14(2), 151-160.

정태성, 김진원, 박문진 (2000). GUI를 이용한 아산만의 조석 및 조류 예측시스템. 대한토목학회논문집, 20(2-B), 293-303.

조홍연, 조범준, 김상준 (2008). 계절별 염분 자료를 이용한 아산만 연안의 담수 영향범위 추정. 한국해안해양공학회논문집, 20(2), 219-231.

최병호 (1983). 경기만의 3차원 유동 해석모델. 한국해양학회지, 18(1), 10-20.

최양호, 노영재, 전호경 (2002). 서해 아산만 당진화력발전소 인근해역 수온 변동 특성. 한국해양학회지 바다, 7(2), 43-50.

최흥식 (2004a). 호안제체에서 Non-Darcy 흐름해석. 한국수자원학회논문집, 37(2), 87-96.

최흥식 (2004b). Non-Darcy 흐름특성을 고려한 최종체절 수치특성분석. 한국수자원학회논문집, 37(8), 613-622.

평택지방해양항만청 (2010). 평택당진항 수리현상조사 보고서. (주)지오시스템리서치, (주)해양정보기술, 436p.

Bell, C., Vassie, J.M. and Woodworth, P.L. (1999). POL/PSMSL Tidal Analysis Software Kit 2000 (Task-2000), Permanent Service for Mean Sea Level, CCMS Proudman Oceanographic Laboratory, Bidston Observatory, Birkenhead, Meyseyside CH43 7RA, U.K., 21p.

Forman, M.G.G. (1978). Manual for Tidal Currents Analysis and Prediction, Pacific Marine Science Report 78-6, Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, Sidney, B.C., 57p.

Hamrick, J.M. (1994). Application of the EFDC, Environmental Fluid Dynamics Computer Code to SFWMD Water Conservation Area 2A. A Report to South Florida Water Management District, JMH-SFWMD-94-01.

Hamrick, J.M. and Moustafa, M.Z. (1996). Development of the

Everglades wetlands hydrodynamic model: 1. Model formulation and physical process representation. In review.

Ji, L. and Gallo, K. (2006). An agreement coefficient for image comparison. Photogrametric Engineering & Remote Sensing, 72(7), 823-833.

Keulegan, G.H. (1967) Tidal flow in entrances: water level fluctuations of basins in communication with seas. Technical Bulletin No. 14, Committee on Tidal Hydraulics, U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.

Li, B., Garga, V.K. and Davies, M.H. (1998). Relationship for non-Darcy flow in rockfill. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 124(2), 206-212.

Mellor, G.L. and Yamada, T. (1982). Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. Rev. Geophys. Space Phys., 20, 851-875.

Murray, M.T. (1964). A general method for the analysis of hourly heights of the tide. International Hydrographic Review, 41(2), 91-101.

Park, M.J. (2000). Modeling of sediment transport and sand bank formation in a macrotidal sea. Journal of the Korean Society of Oceanography, 35(1), 1-10.

Smagorinsky, J. (1963). General circulation experiments with the primitive equations, I. The basic experiment. Mon. Weather Rev., 91, 99-164.

원고접수일: 2013년 3월 13일
수정본채택: 2013년 4월 2일
게재확정일: 2013년 4월 5일