

시화호 조력발전소 운영에 의한 시화호 외측 해역에서의 체류시간 변화 Residence Time Variation by Operation of Sihwa Tidal Power Plant in Outer Sea of Sihwa Lake

배운호*** · 윤병일** · 서창훈*** · 박성진**** · 방기영**** · 권효근***** · 우승범**
Youn Ho Bae***, Byung Il Yoon**, Chang Hoon Seo***, Sung Jin Park****,
Ki-Young Bang****, Hyo-Keun Kwon***** and Seung-Buhm Woo**

요지 : 입자추적기법(Lagrangian Particle Tracking; LPT)을 적용한 수치모델을 이용하여 조력발전소 운영에 의한 시화호 외측해역에서의 체류시간 변화를 파악하였다. 수치모델의 실험안은 공간적인 분포 특성을 살펴보기 위하여 시화호 외측 해역을 4개 구역으로 나누어 구역별 평균체류시간을 산정하였다. 구역별 평균체류시간은 운영 전과 운영 중 모두 가장 외해에 위치한 지역(약 3일)에서 내만에 위치한 지역(약 13일)으로 진입할수록 증가하는 특징이 나타났다. 구역별 평균체류시간 변화를 운영 전과 운영 중으로 비교하면 운영 전에 비해 운영 중에 가장 외해에 위치한 지역에서는 증가하고 나머지 구역에서는 감소하였다. 조력발전소 운영에 의한 인위적인 배수는 가장 외해에 위치한 지역에서 와동(vortex) 형성으로 입자 정체를 유발하였고, 나머지 지역에서는 연행작용(entrainment)을 발생시켜 체류시간의 변화에 영향을 주었다. 즉, 배수 시 발생하는 제트류(jet flow)와 와동, 연행작용으로 인한 체류시간 변화는 외해와 내만의 수평적 혼합 증가를 보여준다.

핵심용어 : 시화호 조력발전소, 체류시간, 제트류, 와동, 연행작용

Abstract : Numerical model with LPT (Lagrangian Particle Tracking) module was used to understand the variation of residence time in the outer sea of the Sihwa lake result operating from the Sihwa tidal power plant. Numerical model was composed in order to investigate the spatial distribution characteristics, the average residence time in each area was calculated by dividing the outer sea area of Sihwa lake into 4 areas. The average residence time of the areas appeared to be increase as it entered the areas located in the inner bay (13 days) from the area located in most outer sea (3 days) both before and during operation. Variation of average residence time by areas were increased in the area that was located in the most outer sea of during operation compared to before operation, and decreased in the other area. Artificial discharges from tidal power plant induces particle traps in the formation of vortex in the area located in the most outer seas, entrainment in the remaining areas, which affects variation in residence time. In other words, the jet flow generated during drainage and the change in the residence time due to the vortex and entrainment action indicate the increase horizontal mixing of water in the outer sea and in the inner bay.

Keywords : Sihwa tidal power plant, residence time, jet flow, vortex, entrainment

1. 서 론

시화호는 1994년 1월 12.7 km의 불도, 대선, 탄도, 시화방조제가 완공됨에 따라 조성되었다. 방조제 축조 이후 외해와의 해수유통이 차단되어 시화호 내부의 물 흐름이 정체되고, 주변 유역에 위치한 공단 및 주거단지에서 발생한 오염물질이 시화호로 유입됨에 따라 수질 문제가 대두되었다. 이에 해양수산부는 2000년 12월 담수호인 시화호를 해수호로 변경하

고 이 지역을 특별 관리해역으로 지정하였으며, 시화호 종합관리계획을 수립하였다(Korea Water Resources Corporation, 2004, 2005). 시화호 조력발전소는 시화호의 수질 문제를 해결하기 위한 여러 방안 중 하나로 제시된 후, 2004년 12월부터 2011년 8월까지 약 7년의 공사기간에 걸쳐 건설되어 현재 가동 중이다. 시화호 조력발전소의 운영에 채택된 창조식 발전은 창조 시에 외해의 해수가 시화호 내부로 유입되면서 발전하게 되고, 낙조 시에는 시화호의 물을 외해로 배수하게

*한국산업인력공단 기술자격출제실(Human Resources Development Service of Korea, Technical Qualification Question-Making Bureau)

**인하대학교 해양학과(Corresponding author: Seung-Buhm Woo, Department of Ocean Sciences, College of Natural Science, Inha University, 100 Inha-ro, Nam-gu, Incheon 22212, Korea, Tel: +82-32-860-7710, Fax: +82-32-860-5236, sbwoo@inha.ac.kr)

*** (주)도화엔지니어링(Dohwa Engineering Corp.)

**** (주)지오시스템리서치(GeoSystem Research Corp.)

***** 한국수자원공사 시화조력관리단(K-water Sihwa Tidal power Management team)

된다. 이러한 영향으로 시화호 및 시화호 외측 해역의 해수 순환은 조력발전소 건설 전과는 다른 상태로 변화되었다.

시화호 및 시화호 외측 해역에 대한 연구는 방조제 축조 이후부터 시화호 조력발전소 건설 전까지 오페수에 따른 식물 플랑크톤 대증식(Choi et al., 1997), 유, 무기 화합물과 원소의 생지화학적 분포특성(Park et al., 1997), 증금속 분포 특성과 오염(Kim et al., 2005) 등 주로 시화호의 수질 환경 연구에 집중 되었다. 최근에도 Kang et al.(2013), Ra et al.(2013)이 조력발전소 운영에 따른 시화호의 수질개선 효과에 대해 보고한 바 있다. 수질 개선을 위한 해수유통이 진행되었고 현재는 조력발전소가 운영되면서 주기적인 배수와 발전이 진행되고 있다. 이러한 조력발전소 배수는 송도 LNG 기지와 인천신항, 소래포구를 오가는 선박운항에 영향을 줄 수 있고, 인근 해역의 침식과 퇴적 변화를 일으킬 수 있다. 이에 더해 연구지역은 항로준설, 송도 매립, 송도 워터 프론트 사업 등 연안개발이 진행 또는 예정되어 있다. 배수 및 지형 변화에 의한 해수순환 변동이 예상되지만 조력발전소 배수가 주변 해역의 해수순환에 미치는 영향에 대한 연구는 미흡하다.

하구 및 연안에서 해수순환변화를 파악하는 여러 방법 중 시·공간적인 변화와 체류시간을 산정하는 방법으로 수치모델을 이용한 입자추적기법이 있다. 일반적으로 체류시간은 공간적으로 초기 위치가 다른 입자의 물질이 입의 구역의 특정 경계를 벗어나는데 걸리는 시간으로 정의된다(Zimmerman, 1976; Takeoka, 1974). 수치모델에서 입자추적기법은 입자의 초기 위치, 방출 시점 그리고 특정 경계로부터의 거리 등을 계산하여 체류시간을 산정한다. 입자추적기법을 이용하여 계산된 체류시간은 연안의 자정능력, 생지화학적 반응의 공간 분포 설명 등 국내외의 다수의 연구에 적용되었다. 국외에서는

Liu et al.(2011)가 입자추적기법을 이용하여 경압류가 체류 시간에 미치는 영향에 대해서 연구하였으며, Patgaonkar et al.(2012)는 염료추적 기법을 이용하여 계절에 따른 오염물질의 체류시간에 대해 연구를 수행하였다. 국내에서는 Park et al.(2009, 2011)이 입자추적기법을 이용하여 마산 만에서의 평균체류시간의 공간분포를 계산하였고, Yoo et al.(2012)이 새만금 내부개발에 따른 체류시간 변화에 대해 연구를 수행하였다.

본 연구는 국·내외 하구 및 연안에서 많은 수행실적으로 신뢰도와 객관성을 확보한 입자추적기법을 활용하여 조력발전소의 배수와 같은 인위적인 흐름이 발생하는 해역에서의 입자거동과 이에 따른 시·공간적 체류시간 변화를 제시하고자 한다. 실험안은 평균체류시간 산정을 위하여 운영 중과 운영 전 대·소조기 고조 시와 소조 시로 설정하였고, 수치모델 수행 지역은 조력발전소 영향 범위를 충분히 반영할 수 있는 영역으로 설정하였다.

2. 연구 지역 및 연구 방법

2.1 연구 지역

연구 지역은 서해 중부 연안에 위치하며 시화 방조제 중간에는 시화호 조력발전소, 서쪽에는 대부도, 북쪽에는 송도 LNG 기지와 인천신항 그리고 북동쪽에는 오이도와 송도신도시 그리고 소래포구가 위치해 있다(Fig. 1b). 시화호의 면적은 약 61 km²이고 유효 저수량은 1억 8천만 톤, 저수량은 3억 톤에 이르며, 주변의 5개 주요 하천으로부터는 연간 약 3억 톤의 담수가 유입된다(Park et al., 1997). 시화호의 수위는 하천으로부터의 유입, 강우 그리고 조력발전소의 발전 및

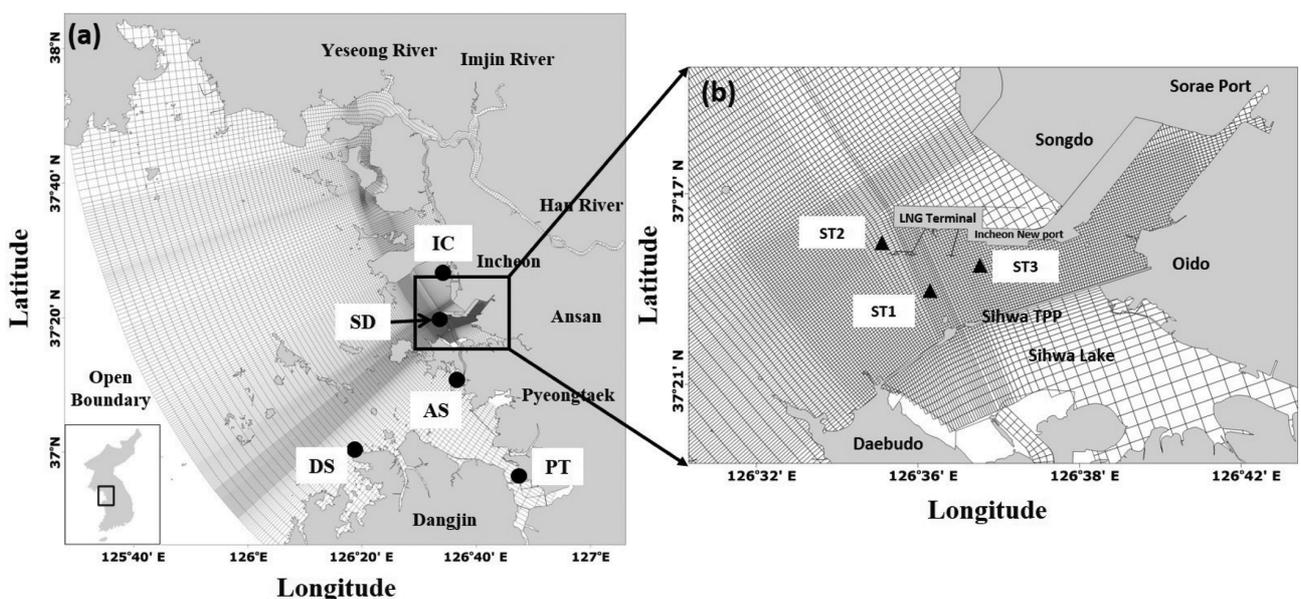


Fig. 1. Research area and computational grid system for the numerical experiment. (a) Gyeonggi Bay with open boundaries and tide observation site (black circles). (b) An enlarged view of study area, Sihwa tidal power plant (STPP) with tidal current observation site (black triangles).

배수 등에 의해 변동되며, 조력발전소 운영관리 규정에 따라 평균해면(mean sea level) 하 1.0 m로 관리되고 있다(Korea Water Resources Corporation, 2013). 시화호 외측 해역은 평균대조차가 7.7 m인 대조차 해역(Korea Hydrographic and Oceanographic Administration, 2012)으로 반일주조가 우세한 반 폐쇄성 해역이다. 특히, LNG기지과 인천신항, 소래포구를 오가는 선박을 위한 항로가 존재하고 조간대 및 작은 섬이 분포해 있어 복잡한 지형을 나타낸다(Fig. 1).

2.2 수치모델 소개

시화호 조력발전소 운영에 의한 유동 특성을 재현하기 위해 사용한 수치모델은 EFDC(Environmental Fluid Dynamics Code)로서, 미국 VIMS(Virginia Institute of Marine Science)에서 Hamrick(1992)에 의해 개발되었으며 연안, 하구, 호소, 습지, 저수지 등의 유동 및 물질수송 모의가 가능하여 국내 여러 대학 및 연구 기관에서 사용되고 있다. 또한, 국내외적으로 다양한 연구 사례가 있다(Zhou et al., 2014; Wang et al., 2014; Yoon and Woo, 2012; Park et al., 2011; Suh et al., 2011; Yoo et al., 2012; Bang et al., 2013). 수치모델에 대한 지배방정식 및 자세한 설명은 Hamrick(1992)에 제시되어 있다.

본 논문에 사용된 입자추적모델기법은 최근 EFDC에 적용된 LPT 모듈(Dynamic Solutions, 2009)이며, 여기서 3차원 이송확산방정식은 식(1)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla(\vec{V}c) = \frac{\partial}{\partial x}\left(D_H \frac{\partial c}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D_H \frac{\partial c}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(D_V \frac{\partial c}{\partial z}\right) \quad (1)$$

여기서, t 는 시간이며 x, y, z 는 입자의 동쪽, 북쪽, 수직방향의 Lagrangian 좌표, c 는 농도, \vec{V} 는 유속성분 그리고 D_H 와 D_V 는 각각 수평과 수직방향 와동점성계수이다.

입자의 Lagrangian 운동 미분방정식은 x, y, z 각각 식(2)-(4)와 같이 표현된다.

$$dx = dx_{drift} + dx_{ran} = \left(u + \frac{\partial D_H}{\partial x}\right)dt + \sqrt{2D_H dt}(2p - 1) \quad (2)$$

$$dy = dy_{drift} + dy_{ran} = \left(v + \frac{\partial D_H}{\partial y}\right)dt + \sqrt{2D_H dt}(2p - 1) \quad (3)$$

$$dz = dz_{drift} + dz_{ran} = \left(w + \frac{\partial D_V}{\partial z}\right)dt + \sqrt{2D_V dt}(2p - 1) \quad (4)$$

여기서 dt 는 계산시간 간격이며, p 는 평균이 0.5의 값을 가지는 난수(random value)이다. 위 식에서 구해진 난수는 이송된 위치에서의 입자에 적용되어 입자를 확률적으로 거동시키게 된다. Lagrangian 운동에 관한 수치적 적분 방법으로는 수치 정확도가 높은 Runge-Kutta 4 method를 사용하였다(Dynamic Solutions, 2009). 그리고 Dunsbergen and Stelling(1993)이 제안한 연직성분이 고려된 3차원 무작위 행보를 적

용하였다. 모델의 수평와동점성계수는 격자 크기와 유속 경사에 의해서 결정되는 Smagorinsky(1963) 식을 통해서 계산되며, 수직와동점성계수는 2차 난류 운동량 마감 모델(turbulence closure model)을 통해 계산된다(Mellor and Yamada, 1982; Galperin et al., 1988).

2.3 초기 및 경계조건

수치모델의 초기조건에는 전 계산영역의 조위와 유속을 ‘0’으로 하는 cold start를 부여하였으며, 이때 조위는 평균해면(mean sea level) 기준으로 설정하였다. 염분 초기조건은 국립수산과학원 국가해양환경측정망 인천 연안의 최근 10년간(2001~2010) 평균 염분인 31psu로 입력하였다. 수치모델에 적용된 수심은 국립해양조사원에서 제공하는 최신 수치 해도 자료를 기본으로 하였으며, 연구해역 인근은 기존 보고서(Korea Water Resources Corporation, 2012; Daewoo Engineering & Construction, 2013; Korea Gas Corporation, 2013)에서 실시된 수심측량 값을 바탕으로 적용하였다(Fig. 4).

수치모델의 계산영역은 시화호 조력발전소를 중심으로 동서로 148 km, 남북으로 145 km로 설정하였다. 격자구성은 수직적으로는 시그마 좌표계를 사용하여 11개 층으로 구성하였으며, 격자별 수직 층의 두께는 같은 비율로 설정하였다. 수평적으로는 79~2,800 m의 직교 곡선 가변 격자체계를 사용하여 구성하였다(Fig. 1). 외해 경계조건은 인천항 부근의 조류도(Korea Hydrographic and Oceanographic Administration, 2003)와 NAOJ(National Astronomical Observatory of Japan)의 NAO.99Jb 모델결과(Matsumoto et al., 2000)를 이용하여 5개 분조(M_2, S_2, K_1, O_1, N_2)를 입력하였다. 계산 시간 간격은 CFL(Courant-Friedrichs-Lewy) 조건을 만족하도록 8초로 설정하였다. 시화호 조력발전소 해수유통 시 유·출입량은 Korea Society of Oceanography(2013)에서 제시된 시화호 수위별 체적과 한국수자원공사 시화호조력관리단에서 매 주 고시하는 배수 또는 발전 전과 후의 호 수위를 이용하여 계산하였다. 계산된 2013년 3월 유·출입량을(Fig. 2) 수치모델에 입력하였다.

시화호 외측 해역의 조력발전소 운영 중 배수, 발전 시와 운영 전 창·낙조 시의 표층 유속 벡터도를 Fig. 3에 제시하였다(Korea Society of Oceanography, 2013). 조력발전소 운영 중 발전 시에는 조력발전소 발전으로 인하여 시화호 외측 해역에서 시화호 측으로인 남동 방향의 흐름을 나타내며(Fig. 3a), 배수 시에는 시화호 조력발전소 수문과 대부도에 위치한 배수갑문으로부터의 배수 영향으로 북서방향의 흐름이 나타난다(Fig. 3b). 운영 전의 최강 창조 시(Fig. 3c)에는 대부도 남서측에서 북동향하며 유입되는 창조류가 대부도를 지나 대부분 인천방향으로 북향하고 일부분은 시화호 외측 해역으로 분기하여 유입되게 된다. 유입된 창조류는 북동향하여 소래포구 인근까지 진행하게 되는데 수심이 낮아지며 수로폭이 좁아짐에 따라 유속이 증가한다. 최강 낙조 시(Fig.

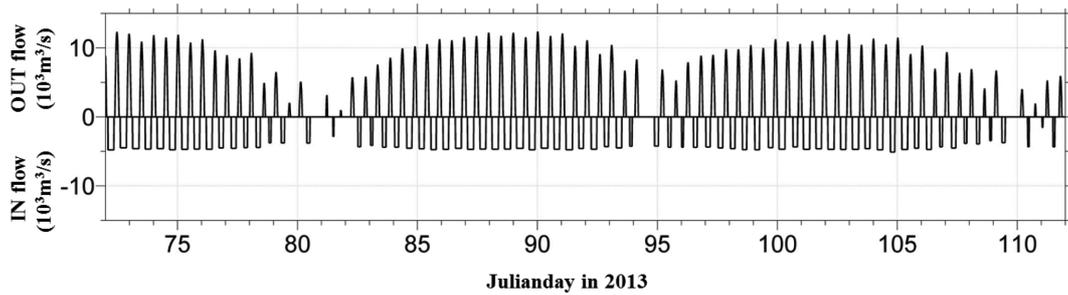


Fig. 2. Discharge rate of Sihwa tidal power plant during March 2013 (OUT flow : during drainage time, IN flow : during generation time).

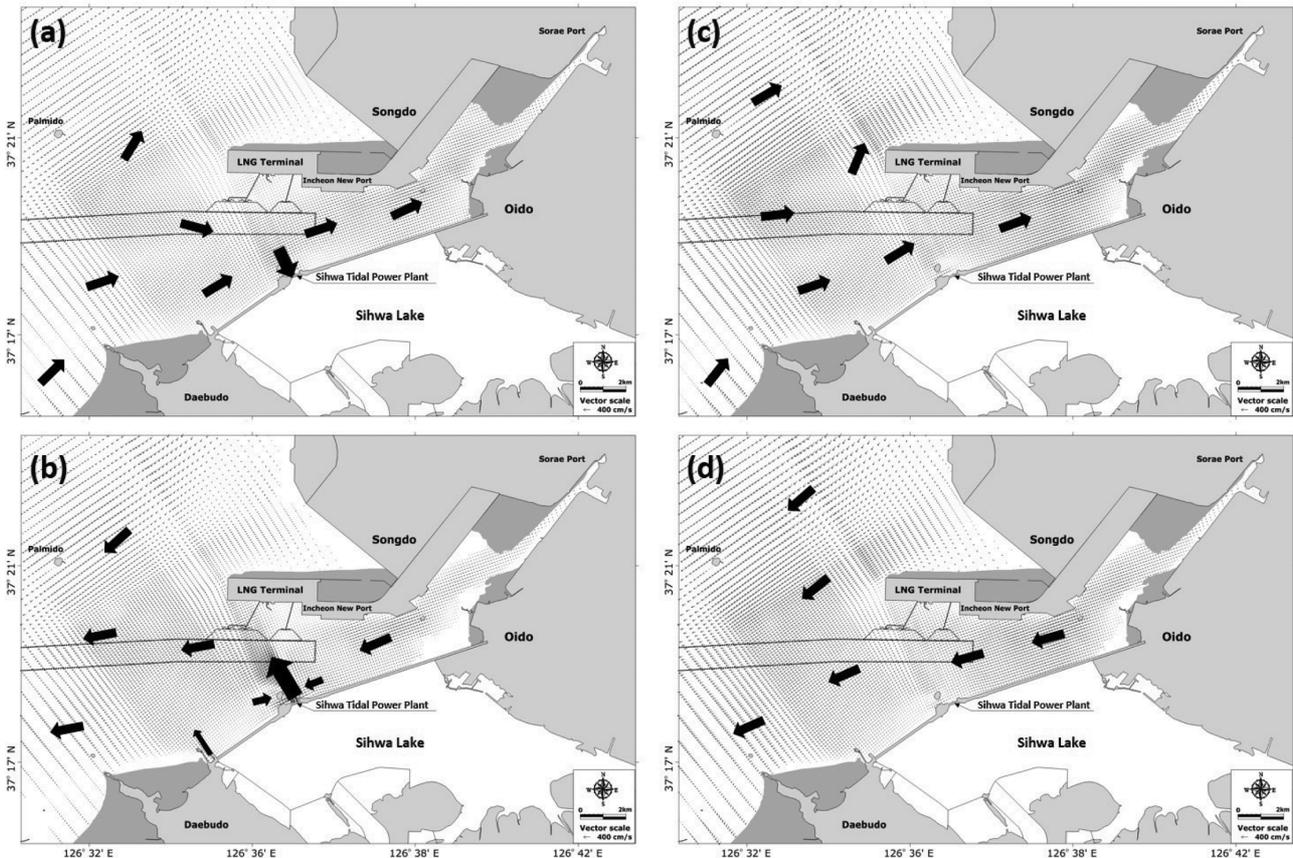


Fig. 3. Horizontal surface current vectors. (a) Flood flow during generation time on operation of STPP (b) Ebb flow during discharge time on operation of STPP (c) Maximum flood flow before operation of STPP (d) Maximum ebb flow before operation of STPP.

3d)에는 창조 시와 반대방향의 흐름인 남서향하는 낙조류가 발생한다. 낙조류는 인천에서 남하하는 주 흐름과 합류하여 외해로 빠져나가게 된다.

2.4 체류시간 산정 방법 및 실험안

체류시간은 초기 위치와 방출 시점이 다른 개별 입자가 특정 해역 범위 내에서 얼마나 오래 체류하였는지를 나타내는 Zimmerman(1976)과 Takeoka(1974)의 방법으로 정의하였다. 본 연구에서는 Fig. 4의 검정색 점선을 경계로 하여 입자 방출시점으로부터 경계를 벗어나는 시점까지의 시간을 체류시간으로 정의하였다. 다만, 방출시점으로부터 모의기간인 30일 동안 경계를 벗어나지 못할 경우 해당 입자의 체류시간은 30

일로 계산하였다. 연구지역과 같이 조석이 우세한 해역에서는 입자의 방출 시점에 따라 입자의 체류시간이 크게 달라질 수 있으므로 조시별(대조기 고조, 대조기 저조, 소조기 고조, 소조기 저조)로 방출된 입자의 체류시간을 평균한 값을 평균 체류시간으로 정의하였다(Park et al., 2011).

조력발전소 운영에 의한 영향을 살피기 위하여 운영 중과 운영 전의 실험안을 구성하였다. 조력발전소의 운영 중과 운영 전은 조력발전소 운영 중에 획득한 자료를 기반으로 검정이 완료된 수치모델을 운영 중으로 설정하였고, 운영 전은 운영 중과 모든 조건이 동일한 가운데 조력발전소에서의 해수 유통을 차단한 것으로 정의하였다. 총 8개의 실험안은 조력발전소 운영 중과 운영 전의 대조기 고조(Case 1, 5), 저조

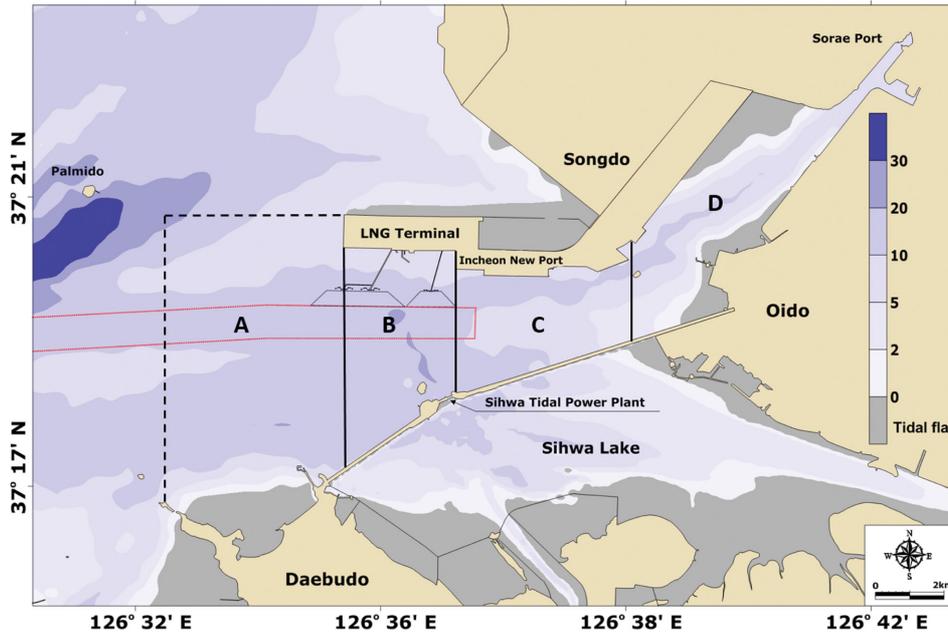


Fig. 4. Bathymetry of the study area with particle-drop area (A, B, C, and D). A area located the in front of Daebudo, B area located between STPP and LNG terminal, C area located in front of Incheon New Port, and D area located the between Oido and Songdo. Red dotted rectangle is indicated the 3rd Waterway.

Table 1. Numerical model experiment cases

Case	Case conditions		Particle conditions	
	STPP	Tidal conditions	Area	Particle number
Case1	During operation	Spring high tide	A	2264
Case2		Spring low tide		
Case3		Neap high tide	B	
Case4		Neap low tide		
Case5	Before operation	Spring high tide	C	982
Case6		Spring low tide		
Case7		Neap high tide	D	
Case8		Neap low tide		

(Case 2, 6) 그리고 소조기 고조(Case 3, 7), 저조(Case 4, 8)로 설정하였다(Table 1). 입자 방출은 7일의 모델 안정화 기간을 거친 후 표층에 방출하였고, 방출 후 대·소조기 동안의 해양환경 변화를 이해하고자 30일간 모의하였다. 각 실험안의 모의 기간과 조시별 입자 방출 시점은 Fig. 5에 제시하였다.

구역별 평균체류시간의 변화를 살펴보기 위하여 최근 연안 개발이 완료 또는 진행 중인 곳을 기준으로 시화호 외측 해역을 4구역으로 구분하였다(Fig. 4). 각 구역은 가장 외해에 위치하며 외해와 맞닿아 있는 대부도 구역(A), 연구해역에서 가장 큰 변화요인으로 간주되는 조력발전소 구역(B), 인천신항 구역(C)과 송도 구역(D)으로 구분하였고 각 구역별 입자

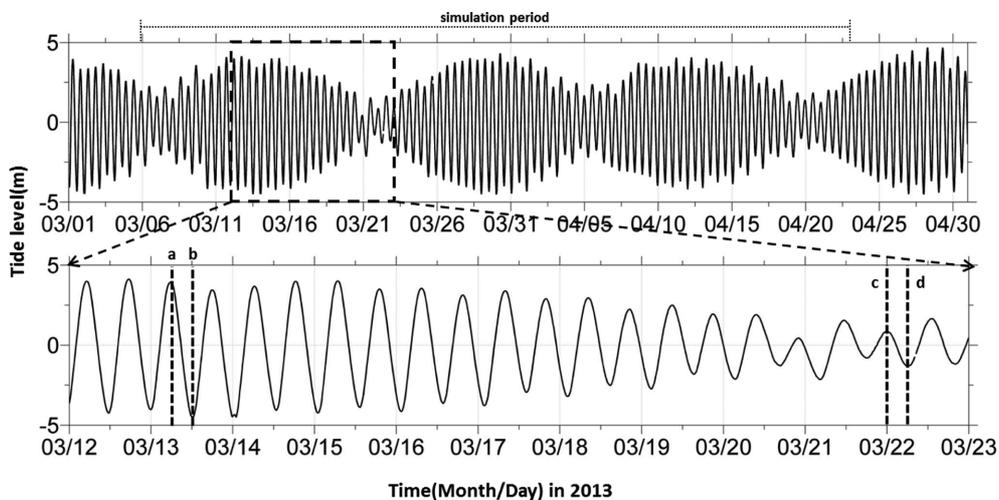


Fig. 5. Time series of tide level from Songdo (Incheon) tidal gauge (upper panel). a (high water at spring), b (low water at spring), c (high water at neap), and d (low water at neap) indicated that start time of drifter (lower panel).

수는 Table 1에 제시하였다. 시화호 외측 해역에서 나타나는 배수의 영향만을 파악하기 위하여 초기에 방출된 입자가 조력발전소 발전 시 시화호 내부로 유입되는 것은 고려하지 않았다.

3. 연구 결과

3.1 수치모델 검증

수치모델 검정을 위하여 국립해양조사원에서 운영하고 있는 조위관측소 5개 정점(Fig. 1a의 IC, SD, AS, PT, DS)과 Fig. 1b의 유속 3개 정점(Kim et al., 2017; Korea Society of Oceanography, 2013)에서 관측된 ST1~ST3의 자료를 사용하였다. 검증에 사용된 조위 및 조류 자료의 위치 및 관측

기간은 Table 2에 제시하였다.

유속자료는 ST1~3 정점에서 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)를 이용하여 층별 연속관측을 실시하였다. ADCP의 수직 해상도는 1.0 m로 설정하였으며, 10분 동안 각 층별로 600개의 자료를 획득하여 10분 평균 유향 및 평균 유속을 산출하였다. 획득된 자료는 ADCP의 Echo intensity, Correlation, Percent good 자료 등을 고려하여 원시자료의 특성 파악 및 이상 자료 보완 과정을 거쳐 자료 분석한 후 모델자료와 비교하였다.

조석의 검정은 관측과 수치모델의 조화상수를 비교하였으며 정량적으로 평가하기 위해 식(5)의 절대상대오차(Absolute Relative Error, ARE)와 식(6)의 평균오차(Mean Error, ME)를 계산하였다(Table 3).

Table 2. Stations of tide and tidal current observation

	Station	Location (WGS-84)	Observation period
Tide	IC	37°00'27"N 126°21'10"E	2011.08.01~2013.06.30
	SD	37°27'07"N 126°35'32"E	2011.08.01~2013.06.30
	AS	37°20'17"N 126°35'10"E	2011.08.01~2013.06.30
	PT	37°58'01"N 126°49'22"E	2011.08.01~2013.06.30
	DS	37°11'31"N 126°38'50"E	2011.08.01~2013.06.30
Tidal current	ST1	37°19'37"N 126°35'49"E	2013.03.11~2013.04.15
	ST2	37°20'19"N 126°34'45"E	2013.03.09~2013.04.15
	ST3	37°20'07"N 126°37'05"E	2013.06.09~2013.07.18

Table 3. Comparison of tidal constituents between observed and model result

Station	Constituent	Amplitude (cm)				Phase (°)			
		Obs.	Model	ME	ARE	Obs.	Model	ME	ARE
IC	M ₂	284.2	286.6	2.4	99.2	138.7	138.9	0.2	99.9
	S ₂	114.5	117.3	2.9	97.5	186.7	186.5	-0.2	99.9
	K ₁	40.0	39.9	-0.1	99.7	303.8	303.0	-0.8	99.8
	O ₁	28.1	29.0	0.8	97.0	273.5	272.9	-0.6	99.8
	N ₂	52.5	51.0	-1.6	97.0	122.6	122.8	0.2	99.9
SD	M ₂	278.8	279.0	0.2	99.9	136.1	126.4	-9.7	97.3
	S ₂	112.9	114.3	1.4	98.8	193.1	196.2	3.1	99.1
	K ₁	39.5	40.1	0.6	98.5	308.5	316.2	7.7	97.8
	O ₁	28.6	29.3	0.8	97.3	271.7	243.2	-28.6	92.1
	N ₂	51.7	50.2	-1.4	97.2	127.2	123.9	-3.3	99.1
AS	M ₂	268.5	268.8	0.3	99.9	134.6	134.2	-0.4	99.9
	S ₂	108.7	108.7	0.0	100.0	182.4	181.8	-0.6	99.8
	K ₁	39.0	37.8	-1.2	96.9	299.7	301.7	2.0	99.4
	O ₁	29.0	27.1	-1.9	93.6	268.1	260.9	-7.2	98.0
	N ₂	50.9	46.9	-4.0	92.2	119.3	118.3	-1.0	99.8
PT	M ₂	285.2	285.8	0.6	99.8	135.2	135.4	0.2	99.9
	S ₂	115.3	117.2	1.9	98.4	182.9	183.4	0.5	99.9
	K ₁	39.5	40.0	0.5	98.7	301.6	301.3	-0.3	99.9
	O ₁	28.3	28.8	0.5	98.3	271.1	260.9	-10.2	98.0
	N ₂	52.9	51.2	-1.7	96.8	119.6	119.4	-0.2	99.9
DS	M ₂	245.9	248.6	2.7	98.9	128.2	127.5	-0.7	99.8
	S ₂	98.5	102.1	3.6	96.4	174.0	173.7	-0.3	99.9
	K ₁	38.3	38.5	0.2	99.3	298.2	297.0	-1.2	99.7
	O ₁	27.5	27.8	0.3	99.0	268.2	260.9	-7.3	98.0
	N ₂	46.0	45.2	-0.8	98.3	111.5	110.7	-0.8	99.8

$$ARE = \left(1 - \left| \frac{X_{modeled} - X_{Observed}}{X_{Observed}} \right| \right) \times 100(\%) \quad (5)$$

$$ME = X_{modeled} - X_{Observed} \quad (6)$$

조석 검정결과 5개의 조위관측소에서 M₂, S₂, K₁, O₁, N₂ 분조의 절대상대오차(ARE)는 인천 조위관측소(IC)에서 0.1~0.2%, 송도 조위관측소(SD)에서 0.1~7.9%, 안산 조위관측소(AS)에서 0.1~2%, 평택 조위관측소(PT)에서 0.1~2% 그리고 대산 조위관측소(DS)에서 0.1~2% 범위로 나타났다. 모든 지역에서 O₁ 분조의 절대상대오차가 다른 분조에 비해 큰 것으로 나타났으나, O₁ 분조를 제외하면 97~99% 이상의 정확도를 나타내어 수치모델이 조석을 잘 재현하는 것으로 나타났다.

Korea Society of Oceanography(2013)에서 관측된 자료의

표층(전 수심 상부 20%), 저층(전 수심 하부 20%) 관측치와 수치모델에서 해당 층 모델치의 동·북방향분과 분조별 진폭 그리고 지각을 비교하였다(Table 4, 5). Fig. 6에서 Fig. 6a~c는 전체관측 기간에 대한 결과를 도시하였고, Fig. 6d~f는 Fig. 6a~c의 대조기 부분을 확대하여 나타내었다. Fig. 6d~f에 나타난 바와 같이 수치모델 결과가 조력발전소 운영 중 배수 시 나타나는 유속의 크기 및 경향성을 잘 재현하고 있는 것으로 나타났다.

3.2 입자 거동

Table 1에 제시된 조력발전소 운영 중(Case 1~4)과 운영 전(Case 5~8)의 입자 거동을 비교하고자 방류가 크게 발생하는 대조기 고조 시(Case 1, Case 5) 실험안의 입자 초기 방출시점, 6시간, 12시간 그리고 18시간 경과 후의 입자 분포

Table 4. Comparison of tidal constituents between observed and model result (U component)

Harmonic constant	Station	Amplitude (cm/s)			Phase (°)		
		Obs.	Model	Error	Obs.	Model	Error
M ₂	ST1	25.8	38.7	12.9	64.2	52.9	-11.3
	ST2	16.7	16.9	0.2	54.7	69.9	15.2
	ST3	23.9	33.7	9.8	46.1	27.9	-18.2
S ₂	ST1	11.3	13.0	1.7	119.6	110.9	-8.7
	ST2	7.7	8.3	0.6	120.9	126.5	5.6
	ST3	11.0	19.7	8.7	109.1	67.1	-42.0
K ₁	ST1	2.3	4.2	1.9	279.0	272.0	-7.0
	ST2	1.7	1.1	-0.6	18.5	210.7	192.2
	ST3	2.2	2.4	0.2	230.2	181.0	-49.2
O ₁	ST1	1.6	2.0	0.4	234.2	241.5	7.3
	ST2	1.4	2.8	1.4	210.5	255.1	44.6
	ST3	1.8	1.8	0.0	180.9	191.4	10.5
N ₂	ST1	4.6	7.9	3.3	50.9	26.2	-24.7
	ST2	3.6	4.4	0.8	30.8	20.5	-10.3
	ST3	4.1	4.7	0.6	31.5	10.8	-20.7

Table 5. Comparison of tidal constituents between observed and model result (V component)

Harmonic constant	Station	Amplitude (cm/s)			Phase (°)		
		Obs.	Model	Error	Obs.	Model	Error
M ₂	ST1	13.5	23.5	10.0	319.2	324.4	5.2
	ST2	16.3	19.4	3.1	54.8	334.6	279.8
	ST3	3.1	9.7	6.6	63.7	59.4	-4.3
S ₂	ST1	6.1	10.7	4.6	17.3	19.0	1.7
	ST2	7.3	7.6	0.3	120.8	12.6	-108.2
	ST3	2.1	4.7	2.6	49.6	107.2	57.6
K ₁	ST1	2.3	4.2	1.9	170.5	154.6	-15.9
	ST2	0.7	1.5	0.8	11.0	90.3	79.3
	ST3	1.0	0.6	-0.4	150.1	308.8	158.7
O ₁	ST1	1.7	3.6	1.9	99.1	118.4	19.3
	ST2	1.4	2.5	1.1	212.1	70.4	-141.7
	ST3	1.3	1.1	-0.2	333.9	308.5	-25.4
N ₂	ST1	2.0	5.7	3.7	286.9	283.2	-3.7
	ST2	3.3	3.4	0.1	35.1	288.6	253.5
	ST3	0.2	1.3	1.1	156.9	44.3	-112.6

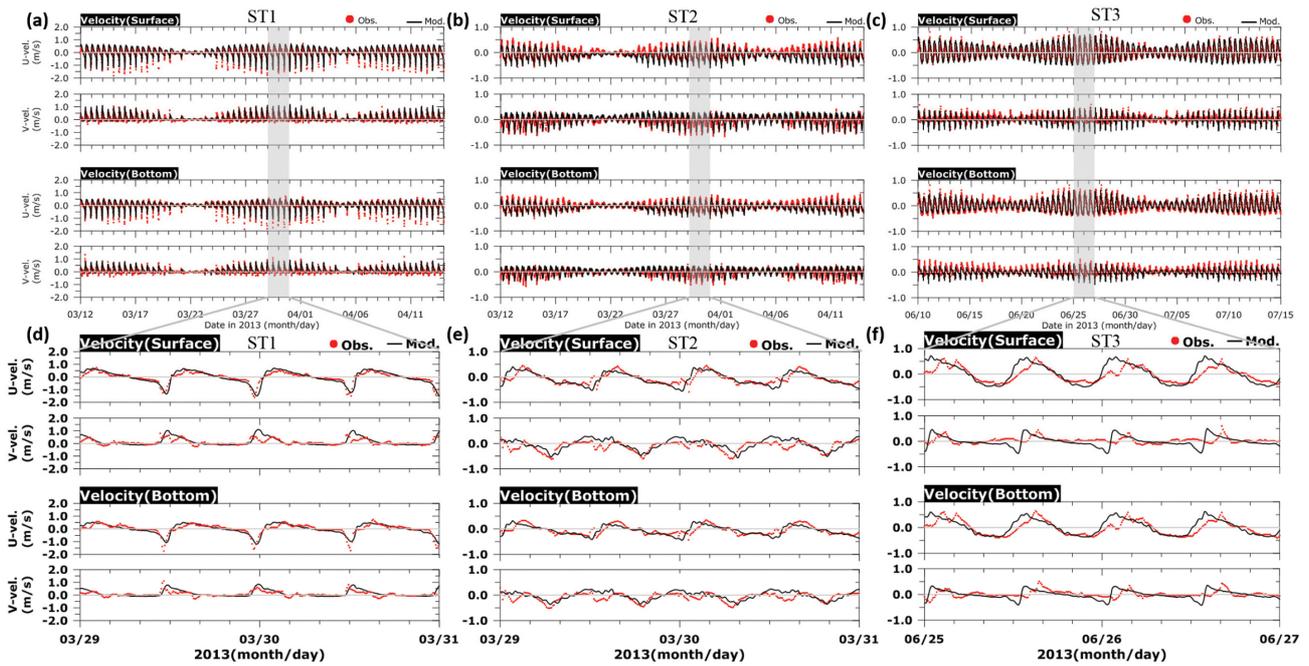


Fig. 6. Comparison of simulated (black line) and measured (red dot) current during observation period (upper panel). Lower panel ((d), (e), and (f)) is shows spring part of the upper panel.

도를 Fig. 7에 도시하였다. Fig. 7a~d는 운영 중 대조기 고조 시(Case 1)의 결과를, Fig. 7e~h는 운영 전 대조기 고조 시(Case 5) 실험안의 결과를 나타낸다. 각 구역별 입자거동을 구분하기 위하여 구역별 색을 달리 설정하였으며, 적색 입자는 대부도 구역(A), 녹색 입자는 조력발전소 구역(B), 청색 입자는 인천신항 구역(C), 노란색 입자는 송도 구역(D)을 나타낸다.

운영 중 (Fig. 7a~d)에는 조력발전소 운영으로 인해 입자 거동이 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. Fig. 7b를 보면 조력발전소 배수의 영향으로 조력발전소, 인천신항 그리고 송도 구역(B~D)의 입자들이 다수 혼합되어 외동의 형태로 나타났다. Fig. 7c에서는 외동에 정체된 입자들이 창조류의 영향을 받아 내만으로 유입되어 송도 구역(D)으로 이동된 것을 볼 수 있다. 운영 전(Fig. 7e~h) 입자 거동은 연구해역을 동서로 왕복하는 조석에 의해 지배되어 각 구역별 입자간의 혼합이 운영 중에 비해 적게 나타났다. 입자 방출 18시간이 지난 후 운영 전(Fig. 7d)과 운영 중(Fig. 7h) 입자의 분포가 크게 다르며, 운영 중은 운영 전에 비해 입자들의 혼합이 나타났고 이동 반경 및 분포 범위가 보다 큰 것으로 나타났다.

3.3 평균체류시간

입자 방출 시점에 따른 영향을 제거하여 연구해역의 평균적인 체류시간을 살펴보기 위해 각 입자의 조시별 체류시간을 평균한 평균체류시간을 계산하여 전체영역과 각 구역별로 제시하였다(Table 6). 전체영역에 대한 평균체류시간은 운영 중(5.58일)은 운영 전(5.76일)에 비해 약 0.18일 감소하였다. 구역별 평균체류시간의 차이는 대부도 구역(A)에서 0.4일 증가, 나머지 구역(B~D)에서는 각각 0.03일, 0.5일, 0.6일 감소

Table 6. Results of average residence time by areas

STPP	Average residence time (day)				
	A	B	C	D	Area mean
During operation	3.45	2.37	3.5	13	5.58
Before operation	3.07	2.4	3.97	13.6	5.76

하였다.

운영 중 평균체류시간과 운영 전 평균체류시간 차이의 공간분포를 Fig. 8에 도시하였다. 평균체류시간 차이의 공간적인 분포를 보면 대부도 구역(A)의 3항로 근방은 유지 또는 감소하였고, 대부도 전면의 조간대 인근은 증가이 교호하며 나타났다. 조력발전소 구역(B)의 중간부분에서 유지 또는 증가하였고, LNG 기지와 조력발전소 전면에서 감소하였다. 인천신항 구역(C)에서는 인천신항 부근에서 증가, 시화방조제 전면에서 감소하여 나타났고, 송도 구역(D)은 전체적으로 증가와 감소가 교호하며 나타나 감소하는 경향이 큰 것으로 나타났다.

4. 논 의

4.1 체류시간 변화의 원인

곶(headlands)이나 strait-basin system에서 주 흐름에 의해 발생하는 외동은 주변의 잔차류와 침식 및 퇴적 환경에 영향을 미치게 된다. 지금까지 곶이나 strait-basin system에서 외동에 대한 연구는 다수 진행되었으나(Pingree, 1978; Geyer and Signell, 1990; Fujiwara et al., 1992; Takasugi et al., 1993; Park and Wang, 2000) 조력발전소와 같이 인위적인

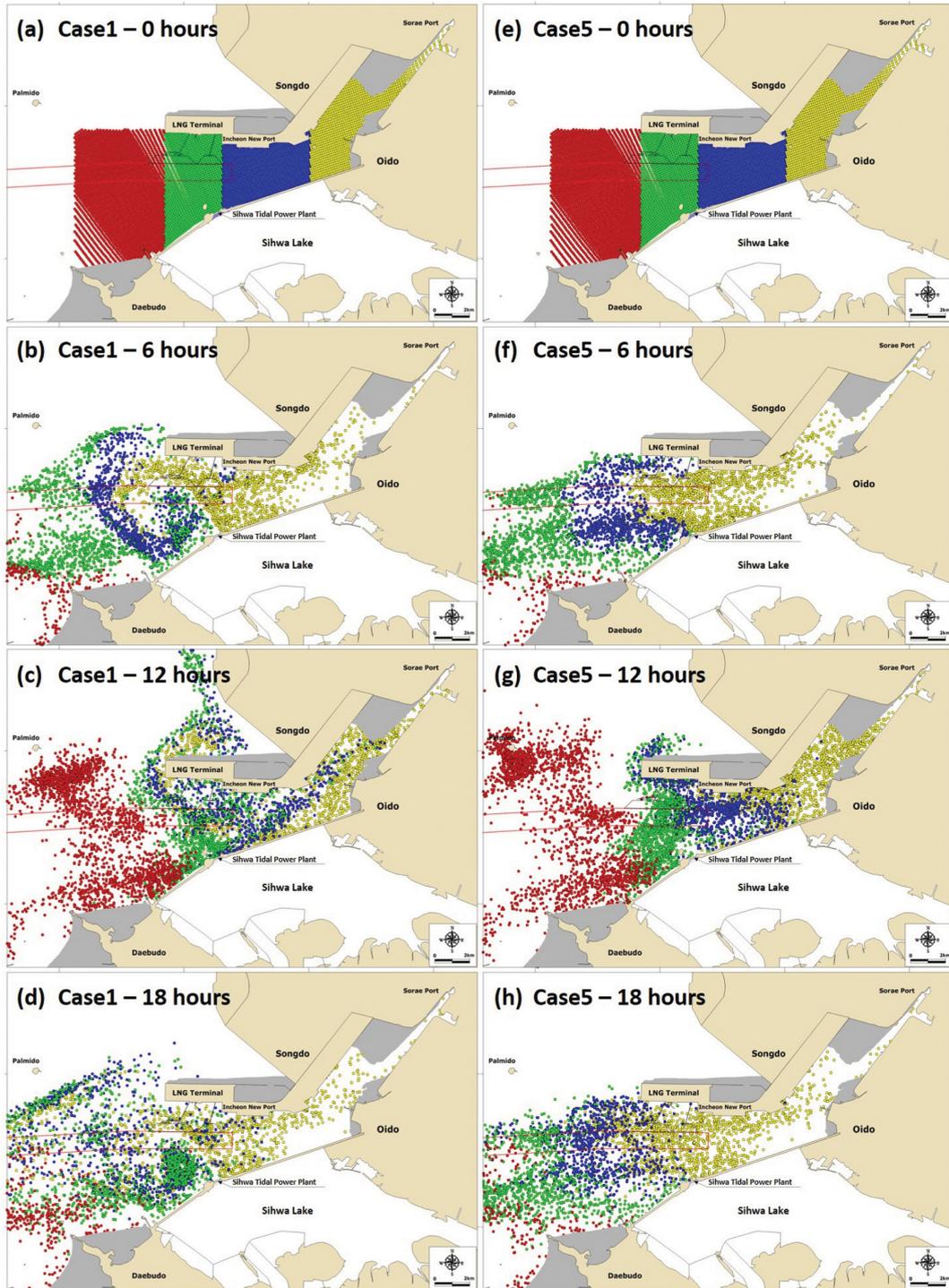


Fig. 7. Particle distribution of (a) to (d) Case 1 (high water at spring) and (e) to (h) Case 5 (high water at neap). Particle color according to starting area: A area (red circle), B area (green circle), C area (blue circle), and D area (yellow circle).

구조물에서 발생하는 흐름에 의한 외동에 대해서는 많은 연구가 이루어지지 않았다. 시화호 조력발전소는 창조식 운영 방식으로 인해 낙조 시에 배수를 하게 된다. 배수는 좁은 수문을 통해 이루어지기 때문에 강한 제트류가 발생하며, 기존 흐름과의 유속 차이로 인해서 외동이 발생한다. 이러한 artificial discharges에 대한 영향은 Kim et al.(2017)에 제시되어 있으며(Fig. 9), 이와 같은 원인으로 운영 중과 운영 전

에 입자거동에 차이가 발생하여 체류시간 변화가 발생하는 것으로 판단된다.

배수 시 발생하는 제트류는 대부도 구역(A) 입자의 정체를 유발시켜 체류시간을 증가시켰고, 나머지 구역(B~D) 구역의 연행작용을 형성하여 체류시간을 감소시켰다. 이를 확인하기 위해 대부도 구역(A)에서 소래포구 구역(D)으로 이동된 입자수의 시계열을 Fig. 10에 제시하였다. 조력발전소 운영 전 대

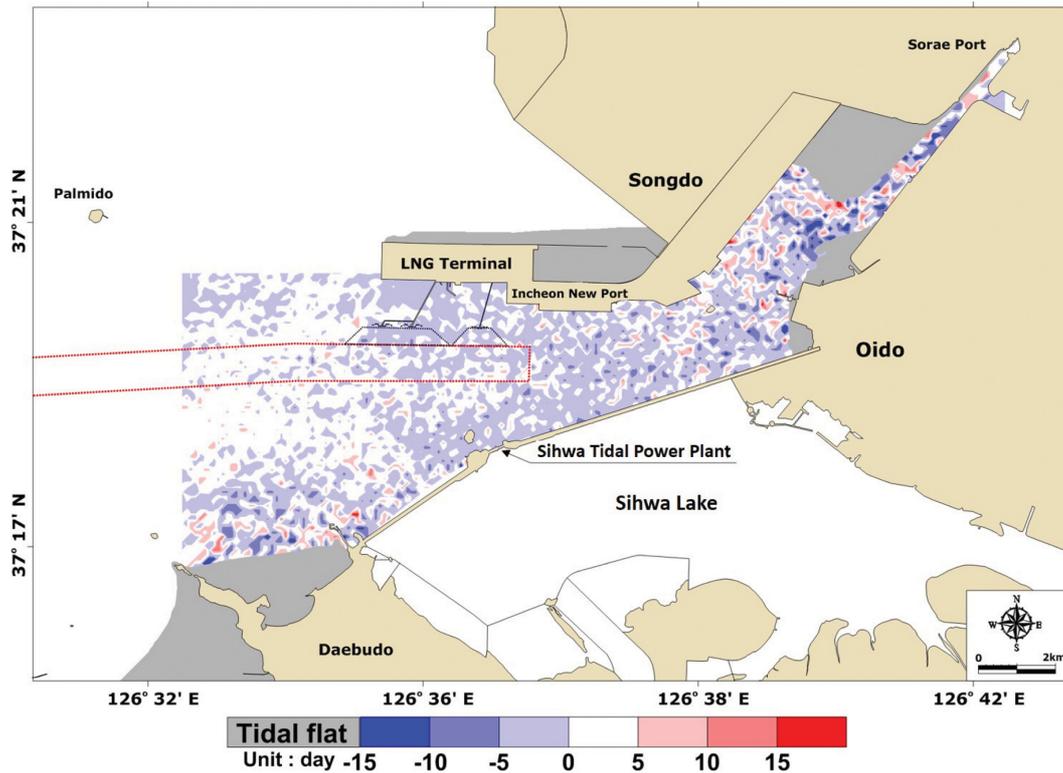


Fig. 8. Difference of average residence time distribution between operation STPP and before construct STPP.

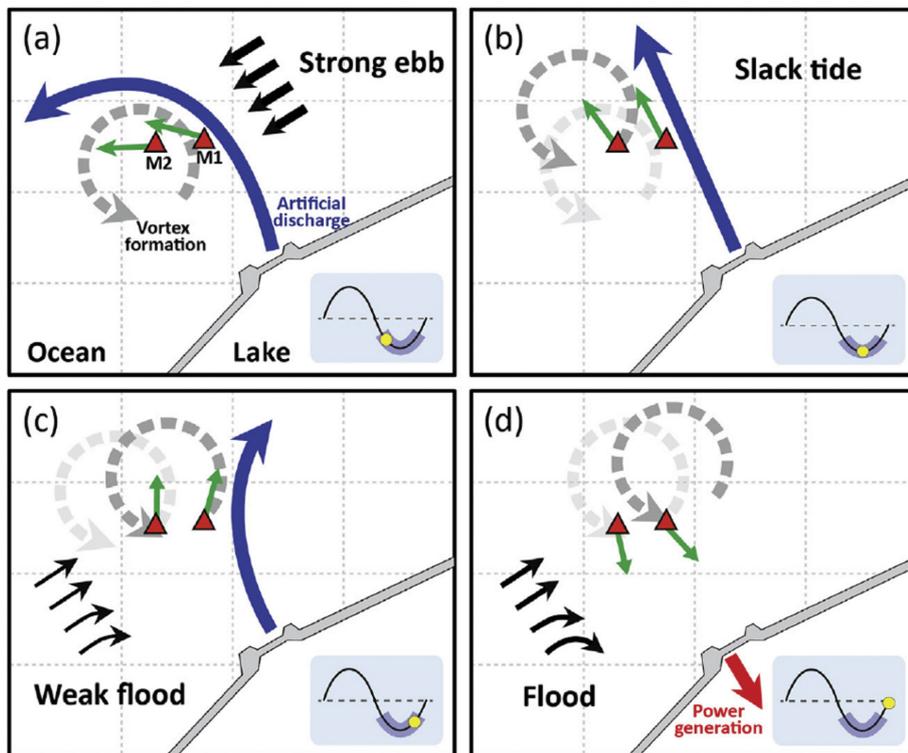


Fig. 9. Schematic mechanisms for explaining the anticlockwise rotating vortex and associated sediment transport: (a) strong ebb, (b) slack before flood, (d) mid-flood phases (for corresponding tidal phases, see below dots in the insets). Blue, red and black arrows indicate simplified flow patterns generated by the artificial discharge, power generation and tides, respectively. Green arrows represent the prevailing direction of sediment transport at the mooring stations. Dark and light grey dashed circles with arrows show respectively the location of the anticlockwise rotating vortex in present and previous time steps (for interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.). This figure adapted with permission from Kim et al. (2017, Fig. 10).

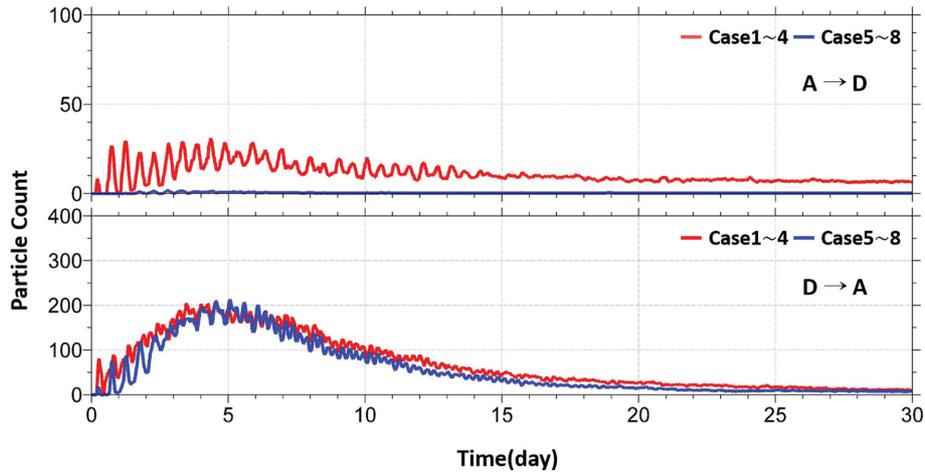


Fig. 10. The time series of the average number of particles (red line : Case 1 to Case 4, blue line : Case 5 to Case 8) moved from A area to D area (upper panel) and D area to A area (lower panel). An explanation of each case is in Table 1.

Table 7. Results of linear regression by areas

Area	STPP	Linear regression equation	Correlation coefficient (R^2)	Residence time (day)
A	During operation	$y = -49.6546x + 1443.2602$	0.8945	2.49
	Before operation	$y = -29.1022x + 884.9066$	0.8875	2.47
B	During operation	$y = -18.8937x + 435.0922$	0.8340	7.01
	Before operation	$y = -11.0928x + 732.5293$	0.6412	8.07
C	During operation	$y = -46.1217x + 1286.3421$	0.8591	5.63
	Before operation	$y = -29.1914x + 645.4345$	0.8006	5.47
D	During operation	$y = -14.0145x + 316.4429$	0.6737	7.24
	Before operation	$y = -11.1639x + 727.5379$	0.6146	7.07

부도 구역(A)에서 소래포구 구역(D)으로 이동된 입자 수는 조 시에 관계없이 입자 수가 적었으나, 운영 중 대조기 저조 시에 그 수가 가장 크게 나타났으며, 해당 시기의 전체 입자 수의 약 5% 정도가 소래포구 구역(D)으로 이동한 것으로 나타났다. 이는 Fig. 7c에서 나타난 바와 같이 와동에 정체된 입자들이 창조류의 영향으로 대거 소래포구 구역(D)으로 이동된 것으로 해석된다. 대부분 구역(A)에서 소래포구 구역(D)으로 이동된 입자 수는 약 15일이 지난 후에 일정한 값으로 수렴하는데, 이는 소래포구 구역(D)으로 이동된 입자가 소래포구 인근 조간대에 갇힌 것으로 나타났다.

조력발전소 운영 중 소래포구 구역(D)에서 대부분 구역(A)으로의 입자 이동은 운영 전에 비해 운영 중에 입자 이동이 빠르게 이루어졌으며, 소조기보다는 대조기에 소래포구 구역(D)에서 대부분 구역(A)으로 이동하는 시간이 약 1일 정도 빠르게 나타났다(Fig. 10). 이는 Fig. 7b에서 나타난 바와 같이 체트류의 연행작용으로 인해 입자들이 운영 전에 비해 대부분 구역(A)으로 빠르게 이동한 것으로 보인다.

각 구역별로 조력발전소 운영 중과 운영 전의 선형회귀방정식을 계산하여 Table 7에 제시하였다. x 는 시간으로 모델모의 기간인 0~30일의 범위를 가지며, y 는 해당 시점에서의 입자수를 나타낸다. 모든 실험안에 있어서 음의 상관관계를 보였으며, 운영 전에 비해 운영 중의 상관계수가 크고 기울기는

크게 나타났다. 이는 시간에 따라 입자수가 감소하는 추세를 나타내며, 운영 전에 비해 운영 중의 입자수 감소가 빠르다는 것을 나타낸다.

5. 결 론

시화호 조력발전소 운영에 의한 인근 해역의 입자거동과 체류시간 변화를 파악하고자 입자추적기법이 적용된 수치모델을 이용하여 조력발전소 운영 중과 운영 전의 구역별 평균체류시간을 계산하였다. 구역별 평균체류시간은 운영 중과 운영 전 대부분 구역(A)에서 3.45일, 3.07일 조력발전소 구역(B)에서 2.37일, 2.4일, 인천신항 구역(C)에서 3.5일, 3.97일 그리고 소래포구 구역(D)에서 13일, 13.6일로 나타났다.

운영 전에 비해 운영 중에 대부분 구역(A)의 체류시간이 증가하였는데, 이는 배수 시 체트류에 의해 발생된 와동에 의해서 입자 정체가 유발되었기 때문이다. 이후 창조류와 함께 내만으로 유입됨에 따라 대부분 구역(A)의 평균체류시간이 증가하였고, 나머지 구역(B~D) 입자들은 체트류의 연행작용으로 체류시간이 감소한 것으로 나타났다. 즉, 조력발전소 배수 시 발생하는 체트류로 인해 형성된 와동과 체트류의 연행작용으로 연구해역의 체류시간 변화가 발생하였고, 이에 따른 외해와 내만의 수평적 혼합이 증가할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2017년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(해양에너지 융복합 인력양성). 본 연구는 2015년~2017년 한국수자원공사 조력발전소 운영에 따른 해양물리변화 장기조사 · 연구 용역 사업의 지원을 받아 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. *Journal of Korea Society of Coastal and Ocean Engineers*, 25(2), 63-75 (in Korean).
- Choi, J.K., Lee, E.H., Noh, J.H. and Huh, S.H. (1997). The study on the phytoplankton bloom and primary productivity in lake sihwa and adjacent coastal areas. *The Journal of the Korean Society of Oceanography*, 2(2), 78-86 (in Korean).
- Daewoo Engineering & Construction (2013). Songdo International Business District 11-larea public water reclaiming work measurement report (in Korean).
- Davies, J.L. (1964). A morphogenetic approach to world shorelines. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 8 (Mortensen Sonderheft), 127-142.
- Dunsbergen, D.W. and Stelling G.S. (1993). The combination of a random walk method and a hydrodynamic model for the simulation of dispersion of dissolved matter in water. *Transactions on Ecology and the Environment*, 2, 235-242.
- Dynamic Solutions (2009). Implementation of a Lagrangian particle tracking sub-model for the environmental fluid dynamics Code. Knoxville, TN and Hanoi, Vietnam.
- Fujiwara, T., Nakata, H. and Nakatsuji, K. (1992). Tidal-jet and vortex-pair driving of the residual circulation in a tidal estuary. *Continental Shelf Research*, 14(9), 1025-1038.
- Geyer, W.R. and Signell, R. (1991). Measurements of tidal flow around a headland with a shipboard acoustic Doppler current profiler. *Journal of Geophysical Research*, 95, 3189-3197.
- Hamrick, J.M. (1992). A three-dimensional environmental fluid dynamics computer code: Theoretical and computational aspects. The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science. Special report 317, Williamsburg, VA. 1-40.
- Kang, Y.S., Chae, Y.K. and Lee, H.R. (2013). Changes in sea water characteristics due to operation of sihwa tidal power plant. *Journal of Korea Society of Coastal and Ocean Engineers*, 25(4), 219-235 (in Korean).
- Kim, K.T., Kim, E.S., Cho, S.R., Chung, K.H. and Park, J.K. (2005). Distribution and pollution of heavy metals in the environmental samples of the Lake Shihwa. *The Korean Society for Marine Environment & Energy*, 8(3), 148-157.
- Kim, J.W., Ha, H.K. and Woo, S.B. (2017). Dynamics of sediment disturbance by periodic artificial discharges from the world's largest tidal power plant. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 190 (2017), 69-79
- Korea Gas Corporation (2013). 13year Incheon base center. bathymetric survey in front of 1 · 2wharfs and mooring (in Korean).
- Korea Hydrographic and Oceanographic Administration (2003). Tidal current chart. *Bibliographie 634* (in Korean).
- Korea Hydrographic and Oceanographic Administration (2012). National Oceanographic Observation network (2012) (in Korean).
- Korea Society of Oceanography (2013). Ocean Physics changes survey by operation of tidal power plant (in Korean).
- Korea Water Resources Corporation (2004). Sihwaho Tidal Power Plant Construction Project Environment impact assessment report, 1157 (in Korean).
- Korea Water Resources Corporation (2005). Sihwaho Tidal Power Plant Construction Project Preconstruction phase Environment investigation, 536 (in Korean).
- Korea Water Resources Corporation (2012). The Environment impact survey and treatment method of Sihwa Lake sediments (in Korean).
- Korea Water Resources Corporation (2013). Operation Management Regulations of Sihwa Tidal Power Plant (in Korean).
- Liu, W.C., Chen, W.B. and Hsu, M.H. (2011). Using a three-dimensional particle-tracking model to estimate the residence time and age of water in a tidal estuary. *Computers & Geosciences*, 37, 1148-1161.
- Matsumoto, K., Takanezasa, T. and Ooe, M. (2000). Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: a global model and a regional model around Japan. *Journal of Oceanography*, 56, 567-582.
- Mellor, G.L. and Yamada, T. (1982). Development of turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 20, 851-875.
- Park, M.-J. and Wang, D.-P. (2000). Tidal vorticity around a coastal promontory. *Journal of Oceanography*, 56, 261-273.
- Park, S.E., Lee, W.C., Hong, S.J., Kim, H.C. and Kim, J.H. (2011). Variation in residence time and water exchange rate by release time of pollutants over a tidal cycle in masan bay. *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, 14(4), 249-256 (in Korean).
- Park, S.E., Hong, S.J. and Lee, W.C. (2009). Calculating average residence time distribution using a particle tracking model. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 23(2), 45-52 (in Korean).
- Park, Y.C., Park, J.K., Han, M.W., Son, S.K., Kim, M.K. and Huh, S.H. (1997). Biogeochemical study of dissolved organic and inorganic compounds under OXic/Anoxic Environment in Lake Sihwa. *The Journal of the Korean Society of Oceanography*, 2(2), 53-68 (in Korean).
- Patgaonkar, R.S., Vethamony, P., Lokesh, K.S. and Babu, M.T. (2012). Residence time of pollutants discharged in the Gulf of Kachchh northwestern Arabian Sea. *Marine Pollution Bulletin*,

- 64, 1659-1666
- Pingree, R.D. (1989). The formation of the Shambles and other banks by tidal stirring of the sea. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 58, 211-226.
- Ra, K.T., Kim, J.K., Kim, E.S., Kim, K.T., Lee, J.M., Kim, S.K., Kim, E.Y., Lee, S.Y. and Park, E.J. (2013). Evaluation of spatial and temporal variations of water quality in Lake Sihwa and outer Sea by using water quality index in Korea: A case study of influence of tidal power plant operation. *Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy*, 16(2), 102-114 (in Korean).
- Smagorinsky, J. (1963). General circulation experiments with the primitive equations I. The basic experiment. *Monthly Weather Review*, 91, 99-164.
- Suh, S.W. and Lee, H.Y. (2011). Analysis of hydrodynamic change around the saemangeum area using a particle tracking method. *Journal of Korea Society of Coastal and Ocean Engineers*, 23(6), 442-450 (in Korean).
- Takasugi, Y., Fujiwara, T. and Sugimoto, T. (1993). Formation of sand banks due to tidal vortices around straits. *Journal of Oceanography*, 50, 81-98.
- Takeoka, H. (1984). Fundamental concepts of exchange and transport time scales in a coastal sea. *Continental Shelf Research*, 3(3), 311-326.
- Wang, P., Lai, G., and Li, L. (2015). Predicting the hydrological impacts of the Poyang Lake Project using an EFDC model. *J. Hydrol. Eng.*, 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001240, 05015009.
- Yoo, S.C., Suh, S.W. and Lee, H.W. (2012). Impacts on residence time and water quality of the saemangeum reservoir caused by inner development. *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, 15(3), 186-197 (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 Korea Society of Coastal and Ocean Engineers*, 23(5), 383-392 (in Korean).
- Zimmerman, J.T.F. (1976). Mixing and flushing of tidal embayments in the Western dutch Wadden Sea, Part 1: distribution of salinity and calculation of mixing time scales. *Netherlands Journal of Sea Research*, 10, 149-191.
- Zhou, J., Falconer, R.A. and Lin, B. (2014). Refinements to the EFDC model for predicting the hydro-environmental impacts of a barrage across the Severn Estuary. *Renew. Energy*, 62, 490e505.

Received 29 September, 2017

Revised 25 October, 2017

Accepted 25 October, 2017