

## 수치모델을 이용한 진해만 내 소규모 내만의 해수교환율 비교

김남수 · 강 훈 · 권민선 · 장효상 · 김종구<sup>†</sup>  
군산대학교 환경경학과

## Comparison of Seawater Exchange Rate of Small Scale Inner Bays within Jinhae Bay

Nam Su Kim, Hoon Kang, Min-Sun Kwon, Hyo-Sang Jang and Jong Gu Kim<sup>†</sup>

Department of Environmental Engineering, Kunsan National University, Kunsan 54150, Korea

## 요 약

진해만의 소규모 내만인 당항포만, 당동만, 원문만, 고현성만, 마산만에서의 해수교환율 평가를 위하여 EFDC 모델을 이용해 진해만 전체의 해수유동을 재현하고, 라그랑지(입자추적) 및 오일러(염료확산) 모델기법을 병행하여 해수교환율을 각각 산정하였다. 그 결과 입자추적 방법으로 산정한 해수교환율은 당항포만에서 60.84%로 가장 높고, 마산만에서 30.50%로 가장 낮게 평가되었고, 염료확산 방법으로 산정한 해수교환율은 당항포만에서 45.40%로 가장 높고, 마산만에서 34.65%로 가장 낮게 평가되었다. 당항포만에서 해수교환율이 가장 좋은 이유는 좁은 만 입구로 인한 유속의 가속화 때문이며, 입자추적 방법의 경우 입자가 빠져나갔다가 다시 들어오기 힘든 형태적 특성 때문으로 판단되었다. 한편, 라그랑지 입자의 경우 낙조류에 의해 만을 빠져나갔다가 창조류에 의해 다시 유입될 때 온전한 입자가 그대로 유입하지만, 염료의 경우에는 만을 빠져나간 후 다시 유입하더라도 외해수에 의해 희석되어 유입하기 때문에 염료확산 방법으로 산정한 해수교환율이 전반적으로 더 높게 나타나는 경향을 보였고, 두 가지 방법에 의해 산정된 해수교환율은 같은 조건에서 비교하더라도 상대적으로 전혀 다르게 나타났다. 따라서, 해수교환율을 평가할 때에는 이 두 가지 방법을 병행하거나, 연구의 목적 및 해역의 특성을 충분히 고려하여 모델링 기법을 선정해야만 보다 합리적인 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 한편, 폐쇄도 지수와 라그랑지 및 오일러 방법으로 산정한 해수교환율을 비교한 결과, 폐쇄도 지수가 높을수록 수치모형 기법에 상관없이 해수교환율이 높게 나타났다. 따라서, 폐쇄도 지수가 만의 폐쇄성을 지시하는 지수로 사용하기에 적합하지 않고 수정 및 보완이 필요하다고 판단되었다.

**Abstract** – For the assessment of seawater exchange rates in Danghangpo bay, Dangdong bay, Wonmun bay, Gohyun-sung bay, and Masan bay, which are small-scale inner bays of Jinhae bay, an EFDC model was used to reproduce the seawater flow of the entire Jinhae bay, and Lagrange (particle tracking) and Euler (dye diffusion) model techniques were used to calculate the seawater exchange rates for each of the bays. The seawater exchange rate obtained using the particle tracking method was the highest, at 60.84%, in Danghangpo bay, and the lowest, at 30.50%, in Masan bay. The seawater exchange rate calculated based on the dye diffusion method was the highest, at 45.40%, in Danghangpo bay, and the lowest, at 34.65%, in Masan bay. The seawater exchange rate was found to be the highest in Danghangpo bay likely because of a high flow velocity owing to the narrow entrance of the bay; and in the case of particle tracking method, the morphological characteristics of the particles affected the results, since once the particles get out, it is difficult for them to get back in. Meanwhile, in the case of the Lagrange method, when the particles flow back in by the flood current after escaping the ebb current, they flow back in intact. However, when a dye flows back in after escaping the bay, it becomes diluted by the open sea water. Thus, the seawater exchange rate calculated based on the dye diffusion method turned out to be higher in general, and even if a comparison of the seawater exchange rates calculated through two methods was conducted under the same condition, the results were completely different. Thus, when assessing the seawater exchange rate, more reasonable results could be obtained by either combining the two methods or selecting a modeling technique after giving sufficiently consider-

<sup>†</sup>Corresponding author: [kjg466@kunsan.ac.kr](mailto:kjg466@kunsan.ac.kr)

ation to the purpose of the study and the characteristics of the coastal area. Meanwhile, through a comparison of the degree of closure and seawater exchange rates calculated through Lagrange and Euler methods, it was found that the seawater exchange rate was higher for a higher degree of closure, regardless of the numerical model technique. Thus, it was deemed that the degree of closure would be inappropriate to be used as an index for the closeness of the bay, and some modifications as well as supplementary information would be necessary in this regard.

**Keywords:** Seawater exchange rate(해수교환률), Residence time(체류시간), Euler method(오일러방법), Lagrangian method(라그랑주안방법), EFDC model(EFDC 모델), Jinhae Bay(진해만)

## 1. 서 론

진해만은 경상남도 남해안 동부에 위치한 만으로 경상남도 창원시·고성군의 남쪽, 거제시의 북서쪽 사이에 있는 만(灣)으로 남북 방향의 길이가 총 35 km 동서방향의 폭이 총 25 km 정도의 크기로서 매우 복잡한 지형을 이루고 있는 폐쇄성이 강한 내만으로 평균 수심이 10~20 m 정도 되는 천해이다. 동쪽으로는 가덕도 동두말에서 서쪽의 거제대교까지, 남북으로는 마산내만에서 장승포시까지 이르는 해역으로 내부해역은 마산만, 진동만, 당항포만, 당동만, 원문만, 고현만, 마산만, 행암만 등의 소규모 내만이 분포하고 있다.

진해만에서의 해수교환은 외해와 연결된 두 개의 수로인 만 입구의 가덕수로와 남쪽의 견내량수를 통하여 일어나고 있으나 대부분은 가덕수를 통하여 이루어지고 있다(Moon[2009]). 진해만과 같이 일부만 외해와 연결되어 있는 폐쇄성 내만에서는 해수교환이 적음으로 인해 해수의 체류시간이 길어져, 적은 오염물질의 유입에도 쉽게 오염이 되고, 오염물질이 축적되어 오염상태가 지속되게 된다.

특히, 진해만 내 산재한 소규모 내만의 경우 해수교환 정도가 낮음으로 인하여 적조 및 빈산소수괴가 매년 발생하고 있고 이로 인한 수산 및 어업생산에 미치는 영향이 크게 나타나고 있다.

일반적으로 적조 및 빈산소수괴가 자주 발생하는 해역의 경우 육역으로부터의 오염부하가 해역의 자정능력을 초과하고 있으며, 외해와의 해수교환이 잘 이루어지지 않는 특성을 가지고 있다. 연안역에서 해수순환에 영향을 미치는 것은 조류, 취송류, 밀도류, 해류 등이며, 특히 담수의 유입이 없는 폐쇄성 내만의 경우 조류와 취송류에 의해 해수순환이 결정되는 경우가 대부분이다. 또한 만의 구조적 특성에 기인한 해수교환 특성이 달라지며 이에 대한 많은 연구가 진행되었다. 특히, 수치모형실험을 이용하여 해수교환율을 산정하는 방법이 간편하고 활용도가 높기 때문에 많이 이용되고 있다. 모델로써 해수교환율을 산정하는 방법에는 Lagrange 방법의 입자추적방법과 Euler 방법에 의한 농도변화로 계산하는 방법과 박스모델을 이용한 해수교환율을 산정하는 방법이 있다. 이 두가지 방법은 서로 다른 특성을 가지고 있어 결과도 상이하게 나타날 수 있다.

해수교환율을 평가하는 수치모델 기법 중 입자추적기법을 적용한 국내사례에는 Ryu *et al.*[1998]이 마산만의 해수교환율을 평가한 연구가 있었고, Cho *et al.*[2010]은 바다숲 조성해역의 해조류 포자의 거동을 예측하는 등 주로 이송과 확산에 관한 연구에 Random Walk에 의한 입자추적방법을 적용하였다. Park *et al.*[2009]은 마산만에서

입자추적모델을 이용하여 평균체류시간 및 조석주기별 오염물질 방출에 따른 해수교환율 산정에 적용하였다. Suh *et al.*[2011]은 Lagrangian과 Eulerian 방법의 장점을 취한 결합 모형을 수립하여 실제해역에서 부유사 및 온배수의 이송·확산에 적용하여 모형의 효율성을 제시한 바 있다(Suh *et al.*[2011]). 또한 염료확산기법을 적용한 국내사례에는 Kim *et al.*[2013]이 마산만에서 재해방지시설을 이용한 해수교환율을 예측하기 위하여 Dye 확산모형을 사용한 연구가 있었고, Jang *et al.*[2010]은 주문진항에서 해수교환시설 설치에 따른 해수교환율을 산정하는 등 대부분 항만에서의 해수교환율 산정에 염료확산기법이 적용된 바 있다. 본 연구에서는 우리나라 연안 중 빈산소수괴가 빈번하게 발생하는 대표적인 폐쇄성 내만인 진해만의 해수유동을 재현하고, 진해만 내에 위치한 소규모 내만에서의 해수교환율을 앞서 언급한 입자추적과 염료확산의 두가지 방법으로 각각 계산하고 그 결과를 비교하였다.

소규모 내만은 당동만, 원문만, 고현성만, 당항포만, 마산만의 5개 내만으로 선정하였다. 진해만 남부해역에 위치한 당동만, 원문만, 고현성만은 내부 수역의 약 1/2 이상 수심 10 m 이상의 평탄한 해저지형을 이루고 있고, 유속의 크기도 5 cm/s 이하로 낮은 지역으로 해수교환이 잘 이루어지지 않을 것으로 예상된다. 또한, 진해만 서쪽해역에 위치한 당항포만은 만의 입구 폭이 좁고 입구에서 내측으로 1/3 지점까지 굴곡이 많고 수로폭이 매우 좁은 협수로로 이루어져 있고, 진해만 북부해역에 위치한 마산만은 남북으로 긴 형태를 가지고 있고 조류의 흐름 및 해수유통이 미약한 지역이다. 이들 지역은 매년 하계에 빈산소 수괴가 형성되고 있으며 양식어 폐류의 집단 폐사로도 이어지고 있는 실정이다.

한편, 해수교환율 산정과 관련된 연구중에서 만의 구조적 형태에 기인한 연구로는 International EMECS Center[2001]에서 보고한 “폐쇄도 지수”가 있는데, 이는 폐쇄성 해역(enclosed bay)을 식 (1)과 같이 정의하고 있다.

$$\sqrt{S} \times D_1 / W \times D_2 \geq 1 \quad (1)$$

여기서, S는 만의 면적, W는 만구 경계선의 길이,  $D_1$ 은 만의 최대 수심,  $D_2$ 는 만구 경계의 수심을 나타내는데, 이 값의 크기가 1.0 이상일 경우, 폐쇄성 해역으로 정의한다. 따라서 이는 만의 구조적 특성과 해수교환과의 관계를 이해하고 지수화하고자 하는 노력의 일환으로 판단된다. 본 연구에서는 폐쇄도 지수로써 해수교환의 정도를 간접적으로 비교할 수 있는지 판단하기 위하여 당항포만, 당동만, 원문만, 고현성만, 마산만에 대한 폐쇄도 지수를 구하고, 각 내

만의 해수교환율과의 관계를 비교하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 해수유동 수치실험

본 연구에서는 진해만의 소규모 내만에서 해수유동 및 해수교환율의 수치모의를 위하여 EFDC(Environmental Fluid Dynamics Code) 모형을 사용하였다. EFDC 모형은 Virginia Institute of Marine Science(Hamrick[1992])에서 개발된 3차원 수리 동역학 모형으로 수리·수질을 재현할 수 있으며, 연안, 강, 호수, 하구 등에 널리 적용되고 있다. EFDC 모형의 수동역학분야는 Hamrick[1992]에 의해 그리고 수질분야는 Park *et al.*[1995]에 의해 개발되었다. EFDC 모형은 연속방정식(continuity equation)과 운동방정식(momentum equation), 열 및 염 보존방정식(mass balance equation), 그리고 퇴적물을 포함한 물질 보존방정식들로 구성되어 있으며, 열 및 염 보존방정식은 밀도차에 의한 경압력(baroclinic)에 의하여 운동방정식과 연계되어 있다. EFDC 모형은 수직 방향으로  $\sigma$ -좌표계를 사용하고, 수평 방향으로는 직선 또는 직교곡선좌표계(curvilinear-orthogonal coordinate system)를 사용하고 있다. 연직 외동점성계수(eddy viscosity coefficient)의 산정에는 Mellor and Yamda[1982]의 level 2.5 turbulence closure scheme을 사용하고, 수평 외동점성계수(eddy viscosity coefficient)는 Smagorinsky 형태를 사용함 또한 질량보존기법을 사용한 조간대 처리가 가능하고, 유체정역학적 가정과 Boussinesq 근사를 적용하면 수심 적분된 기본방정식을 사용하고 있다.

연구해역의 해수유동을 재현하기 위해 계산영역을 동서방향 60 km, 남북방향 50 km로 영역을 구성하였으며, 모델 영역은 진해만 전체를 포함한 약 1,000 km<sup>2</sup>로 설정하였다. 수평격자는 x 방향으로 194.3 m ~ 422.7 m, y 방향으로 112.3 m ~ 311.9 m의 직교곡

선좌표계로 구성하였다. 수직 층은 총 5개의 시그마 레이어로 나누었고, 각 레이어의 분율은 0.2로 일정하게 두었다. 해안선 및 해저지형은 전자해도 접근도(KR4) G3A30, G3A40, G3B30, G3E10, G3E20, G3F10 및 수치해도 No. 206을 사용하였으며 Fig. 1에 모델의 격자망도와 수심도를 제시하였다. 또한, 전체 격자망에서 해수교환율의 산정에 적용한 각 소만의 경계는 Fig. 6 ~ Fig. 10에 제시한 바와 같이 라그랑지 추적자의 초기조건과 같으며, 각 소만의 면적과 체적은 Table 3에 제시한 바와 같다. 각 소만의 해수교환율 산정을 위해서 수치실험은 진해만 전체의 광역모델에 라그랑지 추적자와 오일러 추적자의 초기조건만을 다르게 하여 시나리오별로 수행하였다.

모델의 계산시간 간격은 4초 간격으로 총 31일 동안 수행하였으며, 초기 조건으로 해수의 운동은 없다고 가정하고, cold start 하였다. 모델의 개방경계는 국립해양조사원의 조위 관측소를 기준으로 통영, 거제도, 부산을 잇는 곡선으로 경계를 설정하였고, 조위 검증에는 마산, 부산항신항, 가덕도 조위관측소의 실시간 조위관측자료를 이용하였다.

조류 검증에는 통영(Current-1)에서 관측한 관측자료 중 표·중·저층의 값을 이용하였으며, 수치모형 실험기간 이후 당동만(Current-2)과 당항포만(Current-3)에서 관측한 조류 관측 자료를 조화분해한 후, 조화상수를 합성하여 위상의 시작일시(2015년 1월 15일 0 시)를 일치시켜서 모델 결과와 비교하였다.

소규모 내만들의 해수교환율 산정을 위해서는 당항포만, 당동만, 원문만, 고현성만, 마산만의 경계를 임의로 결정하고, 그 경계의 내부에 각각 입자와 염료를 투입하였다. 실험안은 5개의 소규모 만에 대해 입자추적 방법과 염료확산 방법으로 각각 나누어 총 10개의 실험안으로 구분하였다. 10개의 실험안은 초기입자와 염료의 투입 위치만 다르게 격자구성이나 외력, 계산 시간 등의 모든 조건을 같게 하였다.

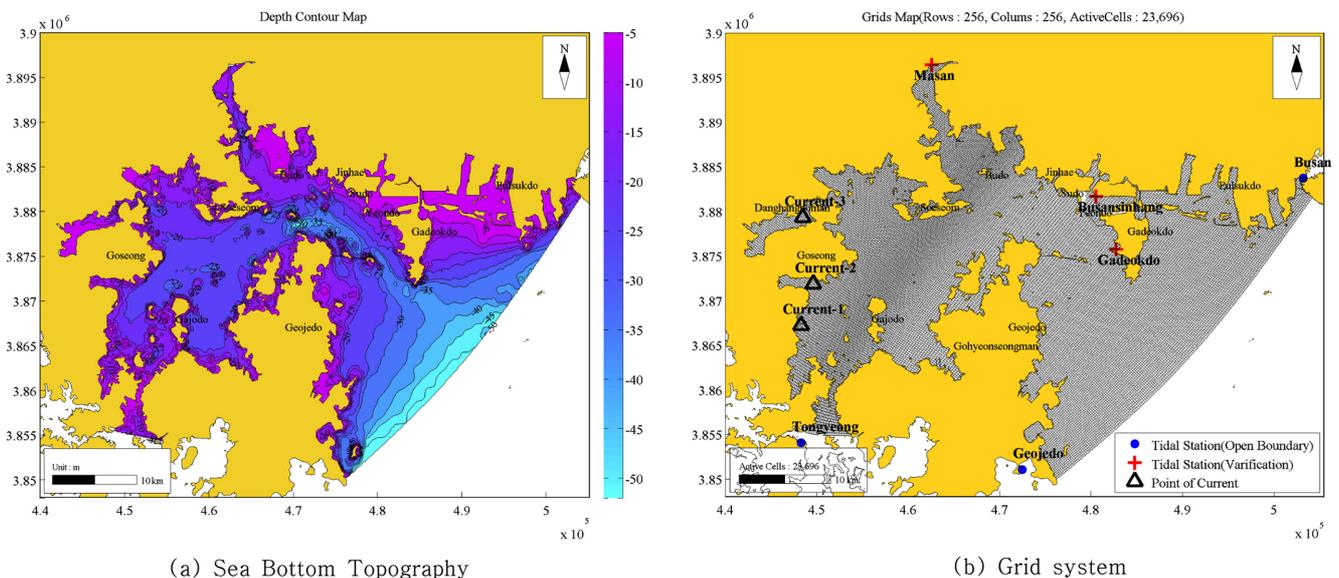


Fig. 1. Sea bottom topography (a) and Grid system (b).

2.2 입차추적에 해수교환율

수치모델을 이용한 해수교환율은 대상 해역내의 초기 투하 입자수에 대한 계산 수행 후 잔류 입자수의 비율로 정의할 수 있다(Park et al.[2011]).

$$R(\%) = \left[1 - \frac{P_i}{P_0}\right] \times 100 \quad (2)$$

여기서, R: 해수교환율, P<sub>0</sub>: 초기 입자수, P<sub>i</sub>: 잔류 입자수

본 연구에서는 해수교환율을 계산하기 위하여 초기 입자를 각 셀 하나당 수심 1미터 간격으로 하나씩 투하하였고, 총 31일간 계산을 수행하였다.

2.3 농도변화에 의한 교체시간(Flushing time) 및 해수교환율

교체시간(Flushing time)은 단위 Flux 당 유체의 체적 변화율로서 해양에서는 주로 조량(Tidal prism) 혹은 Kundsens식을 이용하며, 경우에 따라서 물질의 농도가 초기 농도의 절반(50%), e-folding Scale(63.21%), 혹은 완전 제거(100%)될 때까지 소요되는 시간으로 정의된다(Park et al.[2009]). 그러나, 염료 농도는 이론적으로 0이 될 수 없으므로 본 연구에서는 염료의 농도가 초기 농도의 96% 제거될 때까지 소요되는 시간으로 교체시간을 정의하였고, 또한 대상해역내의 초기 농도에 대한 잔류 농도의 비율을 백분율로 환산하여 해수교환율을 산정하였다..

$$C_r = \left[\frac{C_0 - C_m}{C_0}\right] \times 100 \quad (3)$$

여기서, C<sub>R</sub>: 해수교환율, C<sub>0</sub>: 초기농도, C<sub>m</sub>: 만 내부 평균농도

3. 결과 및 고찰

3.1 해수유동 수치실험

3.1.1 해수유동모델의 검증

Table 1. Result of skill assessments

Skill assessments	Masan	Busansinhang	Gadeokdo
ARE (cm)	5.64	5.36	3.78
RAAE (%)	2.98	3.07	2.24

해수유동모델의 재현성을 검토하기 위하여 조위와 조류 검증을 실시하였다. 조위 검증은 국립해양조사원의 마산항, 부산신항, 가덕도 조위 관측소에서 조사된 관측자료를 이용하여 실시하였으며, 조류 검증은 Fig. 1(b)에 나타낸 3지점에서의 현장 조류관측 자료를 이용하여 조류검증을 실시하였다. 조위와 조류검증 결과는 Table 1, 2 및 Fig. 2, 3에 나타내었다.

조위검증 결과를 보면, 절대평균오차(ARE)가 3.78~5.64 cm, 상대 절대평균오차(RAAE) 2.24~3.07%로 조위의 관측치와 계산치가 매우 잘 일치하였다.

조류검증은 통영(Current-1)의 경우는 관측지점에서 x-방향과 y-방향 유속성분의 관측치와 계산치를 직접적으로 비교하였고, 당동만(Current-2)와 당항포만(Current-3)은 조화상수를 합성하여 위상을 일치시킨 후 비교하였다. 비교 결과, 절대평균오차(ARE)가 0.65~3.97 cm/s, 상대 절대평균오차(RAAE) 7.61~26.99%로 계산치와 관측치가 잘 일치하였다

3.1.2 진해만 해수유동의 특성

진해만의 해수유동 특성을 Fig. 4에 나타내었으며, (Kim[1994])에 의해 언급된 바와 같이 진해만의 전체적인 흐름은 가덕수로를 통하여 유입한 해수는 크게 두 갈래로 구분되며, 하나는 부도수도를 통해 마산만 방향으로 유입되고 다른 하나는 중앙수도를 통해 서부해역으로 유입되어 각 내만으로 유입되는 흐름을 보여왔다. 낙조류시에는 창조류시 유입한 해수가 가덕수로에서 합쳐져서 외해로 유출되는 흐름을 보였다. 가덕수로를 통하여 대조기시 창조류 표층이 약 70~80 cm/s, 저층이 약 50~60 cm/s 정도의 강한 흐름이 나타나고, 진해만 중앙해역에서는 30 cm/s 이하의 흐름을 보이다 소

Table 2. Results of various skill assessments for current simulation

Skill assessments	Current-1					
	Surface layer		Middle layer		Bottom layer	
	u	v	u	v	u	v
ARE(cm)	1.74	1.70	1.59	1.64	1.60	1.48
RAAE(%)	7.61	13.84	9.53	14.81	10.04	14.53
Skill assessments	Current-2					
	Surface layer		Middle layer		Bottom layer	
	u	v	u	v	u	v
ARE(cm)	1.24	0.88	0.91	0.75	0.87	0.65
RAAE(%)	25.65	26.31	19.05	23.24	16.96	26.99
Skill assessments	Current-3					
	Surface layer		Middle layer		Bottom layer	
	u	v	u	v	u	v
ARE(cm)	2.66	3.73	2.61	3.97	2.71	3.05
RAAE(%)	15.89	17.85	16.62	25.14	20.15	22.28

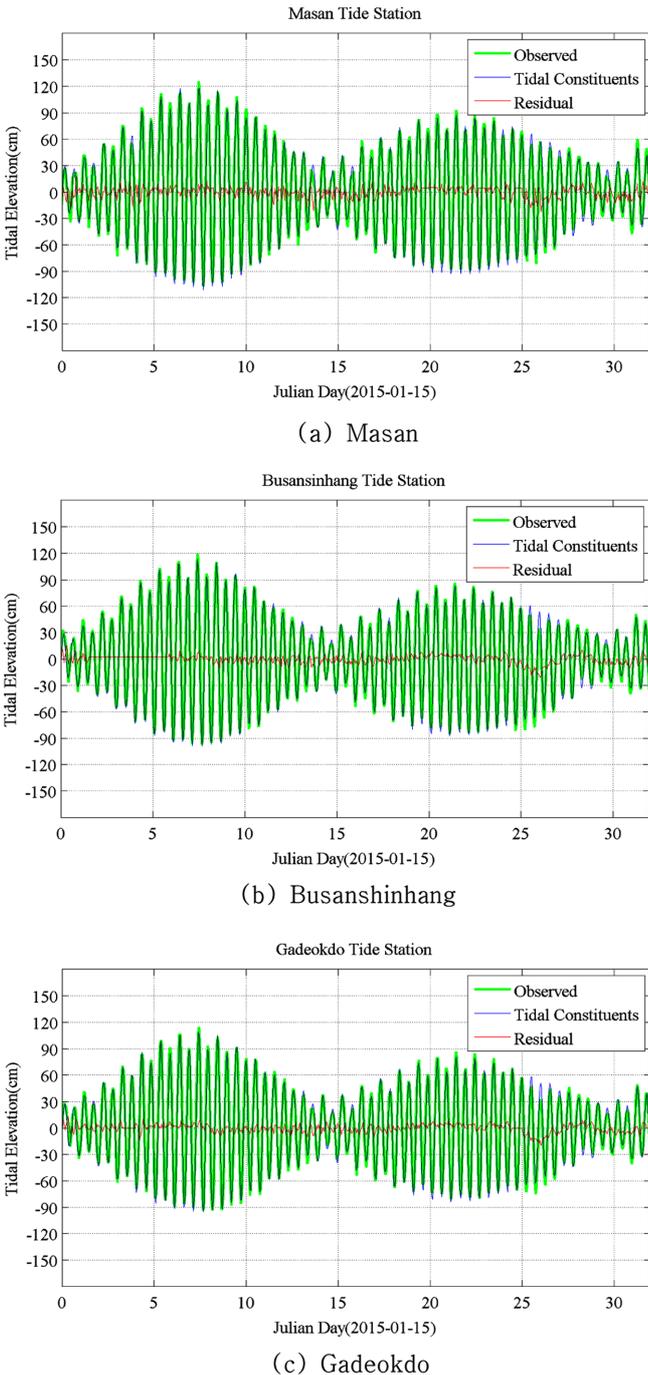


Fig. 2. Tide level verification.

규모 내만으로 갈수록 흐름은 현저히 작아졌다.

당항포만의 창조류는 동측 만 입구에서 서향하여 내만으로 유입하고, 낙조류는 이와 반대의 흐름을 보이고 있으며, 좁은 만입구에서 약 30~50 cm/s 정도의 강한 흐름이 나타나고, 만 내부로 진입할수록 유속이 30 cm/s 이하로 점점 약해지는 흐름을 보였다.

당동만의 창조류는 만 입구에서 일부는 통영으로 남향하고, 일부는 시계방향으로 회전하여 만 내부로 유입하며, 낙조류는 이와 반대의 흐름을 보였다. 만입구가 넓어 만입구에서 4~6 cm/s 이하의

약한 흐름이 나타나고, 만 내부로 진입할수록 유속이 4 cm/s 이하로 점점 느려지는 흐름을 보였다.

원문만의 창조류는 만 입구에서 남서진하여 만 내로 유입하고, 낙조류는 이와 반대의 흐름을 보였다. 원문만은 진해만의 최 내측에 위치하고 있어 유입되는 흐름이 작지만, 만 입구가 당항포만 보다는 넓고 당동만 보다는 좁아 만 입구에서 약 7~10 cm/s 정도의 흐름이 나타나고, 만 내부로 진입할수록 만 면적이 넓어져 유속이 4 cm/s 이하의 약한 흐름을 보였다.

고현성만의 창조류는 만 입구에서 남동진하여 만 내부로 유입하고, 낙조류는 이와 반대의 흐름을 보였다. 고현성만은 원문만과 마찬가지로 진해만의 최 내측에 위치하고 있어 유입되는 흐름이 작고 만 입구가 넓어 대조기시 창조류는 표층에서 3~4 cm/s 정도로 약한 흐름을 보였다.

마산만의 창조류는 만 입구에서 북서진하여 만 내부로 유입하고, 낙조류는 이와 반대의 흐름을 보였다. 마산만으로 진입한 해수는 만 입구 부근에서는 유속이 약 30~50 cm/s로 매우 빠르지만, 소모도와 행암만 입구를 지나면서 유속이 20 cm/s 이하로 나타났고, 마산만은 만의 체적이 크고 남북으로 길이가 길어 만 내측에서는 5 cm/s 이하로 약한 흐름을 보였다.

### 3.2 해수교환율 비교

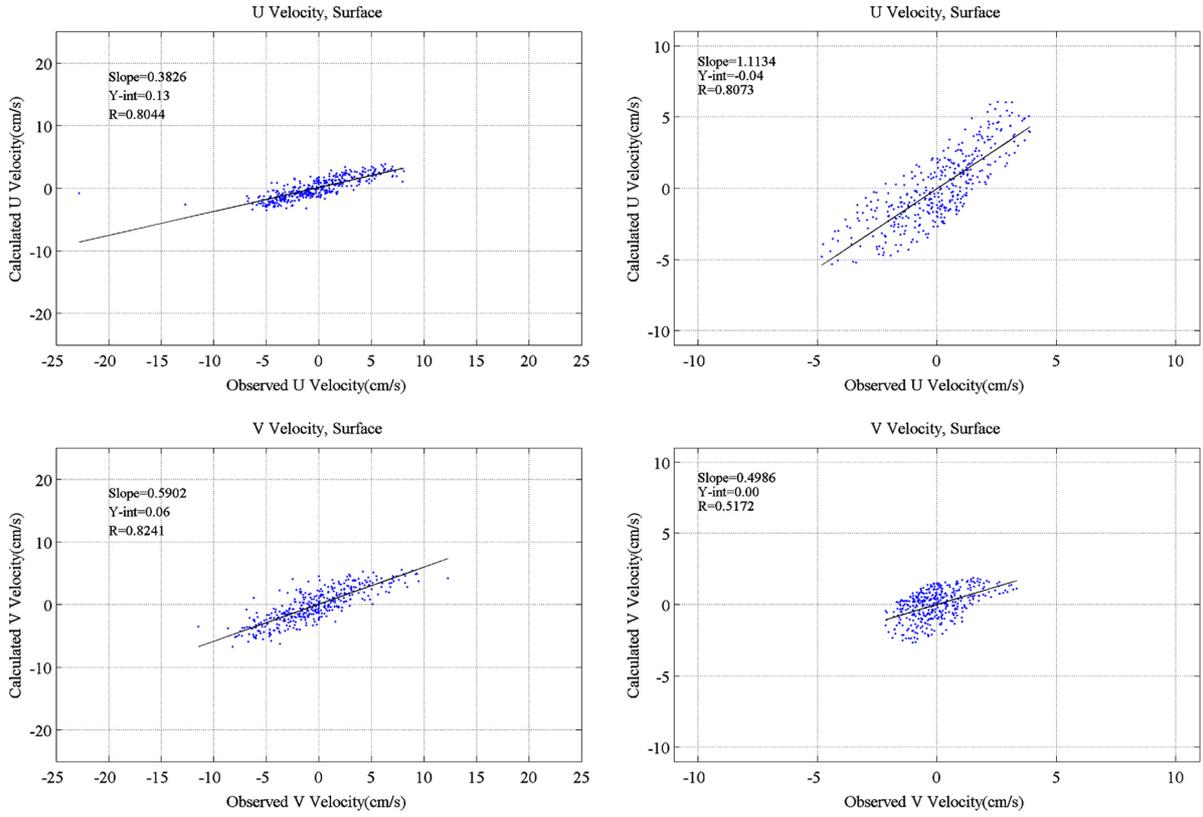
Lagrangian 방식(입자추적)과 Eulerian 방식(염료확산)의 해수교환율을 계산하기 위하여 초기의 입자수 및 농도와 31일후의 입자수 및 농도를 이용하여 식 (2)와 (3)에 의해 계산을 하였다.

진해만의 소규모 내만에 대한 각 내만의 형태 구조적 특성을 나타내는 제원을 Table 3에 제시하였다. 만의 면적은 마산만이 68,568,794 m<sup>2</sup>으로 가장 넓고, 다음으로는 당항포만이 16,591,205 m<sup>2</sup>로 넓었다. 고현성만, 당동만, 원문만은 유사한 면적을 가진다. 만 입구의 폭은 마산만이 7.7 km로 가장 길고, 당항포만이 520 m로 가장 좁은 만 입구 폭을 가지고 있다. 만구에서의 유속은 당항포만이 24.137 cm/s로 가장 유속이 강하고, 고현성만이 3.073 cm/s로 가장 유속이 느리게 나타났다.

식 (2), (3)을 이용하여 계산한 해수교환율 결과는 Table 4, 5 및 Fig. 5~9에 나타났다. 입자추적에 의한 해수교환율은 31일후 당항포만 60.84%, 당동만 33.36%, 원문만 35.64%, 고현성만 30.64%, 마산만 30.50%로 당항포만에서 가장 높고 마산만에서 가장 낮은 해수교환율을 보였다. 계산시간의 차이는 있으나 Kim[2012]의 가막만에서 15일후 해수교환율 24.2~27.3% 보다는 높은 해수교환율을 보였다.

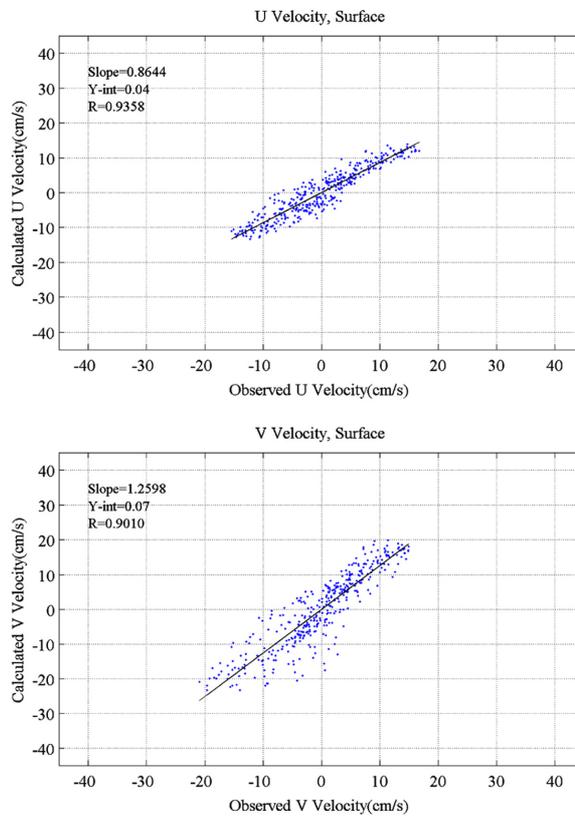
염료확산에 의한 해수교환율은 31일후 당항포만 45.40%, 당동만 41.46%, 원문만 42.83%, 고현성만 34.23%, 마산만 34.65%로 당항포만에서 가장 높고 원문만에서 가장 낮은 해수교환율을 보였다. 해수교체시간은 96%일 때는 당항포만 65.46day, 당동만 71.68 day, 원문만 69.40 day, 고현성만 86.82 day, 마산만은 85.78 day로 각각 산정되었다.

해수교환율의 평가 방법의 차이에도 입자추적 및 염료농도변화에



(a) Current-1

(b) Current-2



(c) Current-3

Fig. 3. Correlation between the observed and calculated tidal current values at Current1~3 (surface).

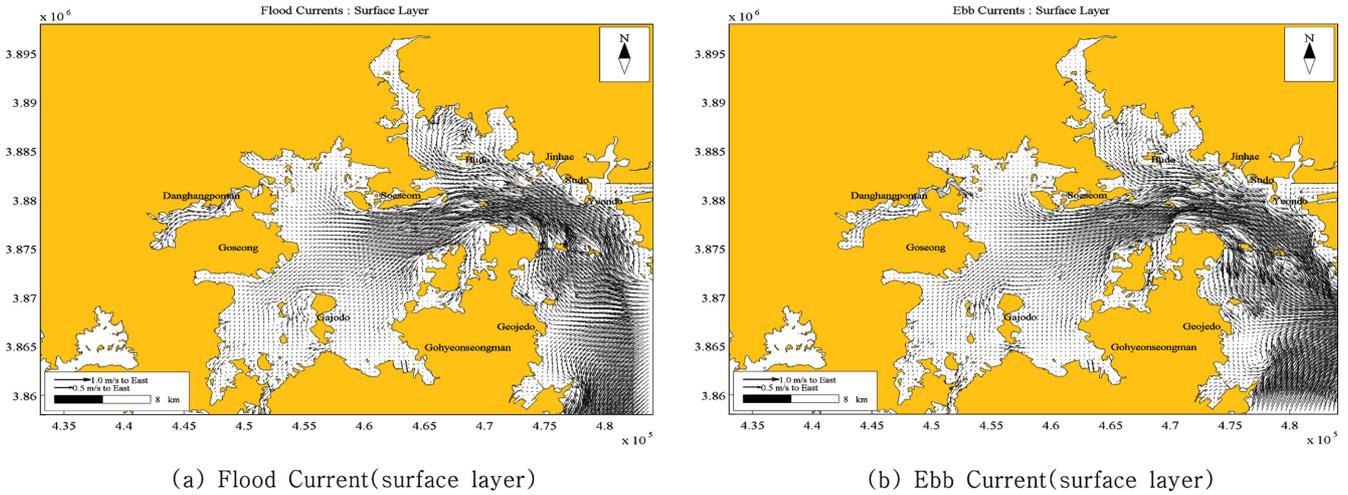


Fig. 4. Horizontal current vectors at spring tide in Jinhae bay.

Table 3. Compare Properties at each bay

Item	Danghangpo	Dangdong	Wonmun	Gohyeonseong	Masan
Total grid area (m <sup>2</sup> )	16,591,205	6,478,419	7,899,693	6,341,608	68,568,794
Grid volumn (m <sup>3</sup> )	75,829,604	56,181,048	52,582,744	58,382,423	597,715,569
Ave. depth (m)	4.570	8.672	6.656	9.21	8.717
Bay mouth width (km)	0.43	2.96	1.17	2.37	6.06
Ave. current (cm/s)	1.174	0.314	0.643	0.145	0.642
Bay mouth Max. current (cm/s)	24.137	5.082	6.541	3.073	13.530

Table 4. Seawater exchange rate by particle tracking method at each bay

Locations	Intial particle	Remained particle	Left particle	Average exchange rate(%)	
				31day	1day
Danghangpo	1,642	643	999	60.84	1.96
Dangdong	1,310	873	437	33.36	1.08
Wonmun	1,086	699	387	35.64	1.15
Gohyeonseong	917	636	281	30.64	0.99
Masan	21,085	14,654	6,431	30.50	0.98

Table 5. Seawater exchange rate and residence time by Dye Concentration method at each bay

Locations	Average exchange rate (%)		Flushing time (day)
	1day	31days	96%
Danghangpo	1.46	45.40	65.46
Dangdong	1.34	41.46	71.68
Wonmun	1.38	42.83	69.40
Gohyeonseong	1.10	34.23	86.82
Masan	1.12	34.65	85.78

의한 해수교환율은 당항포만이 가장 높고, 마산만에서 낮게 평가되었는데, 이는 당항포만의 입구가 매우 좁아 만내로 유입하거나 빠져나가는 유속이 가속화되어 해수교환율에 영향을 미쳤기 때문으로 판단된다. 당항포만의 경우 입자추적 방식에 의한 해수교환율 산정 결과와 염료확산 방법에 의한 해수교환율 산정 결과가 큰 차이를 보였는데, 이는 두가지 방법에 의한 차이가 당항포만에서 극명하게

나타난 것이라고 볼 수 있다. 당항포만의 경우 라그랑지 입자는 좁은 만 입구를 통해서 상대적으로 매우 넓은 외해로 빠르게 빠져나가지만 만의 입구가 좁기 때문에 빠져나간 입자가 다시 유입하기가 쉽지 않고, 만의 형태가 전반적으로 닫힌 형태이므로 내만에 갇히는 입자들이 적다. 반면에 염료확산 방법에 의해 산정된 해수교환율은 이러한 영향을 적게 받는다. 한편, 당항포만을 제외한 4개 만에서 라그랑지 방법으로 산정한 해수교환율은 유사한 범위로 나타났으나, 염료확산 방법으로 산정한 해수교환율은 당동만과 원문만에서 상대적으로 높게 나타났는데, 라그랑지 입자의 경우 낙조류에 의해 만을 빠져나갔다가 창조류에 의해 다시 유입될 때 온전한 입자가 그대로 유입하지만, 염료의 경우에는 만을 빠져나간 후 다시 유입하더라도 외해수에 의해 희석되어 유입하기 때문에 해수교환율이 더 높게 나타날 수 있다. 이는 두 가지 방법에 의해 산정된 해수교환율은 같은 조건에서 비교하더라도 상대적으로 전혀 다르게 나타날 수 있음을 시사한다. 따라서, 해수유통을 파악하기 위한 해

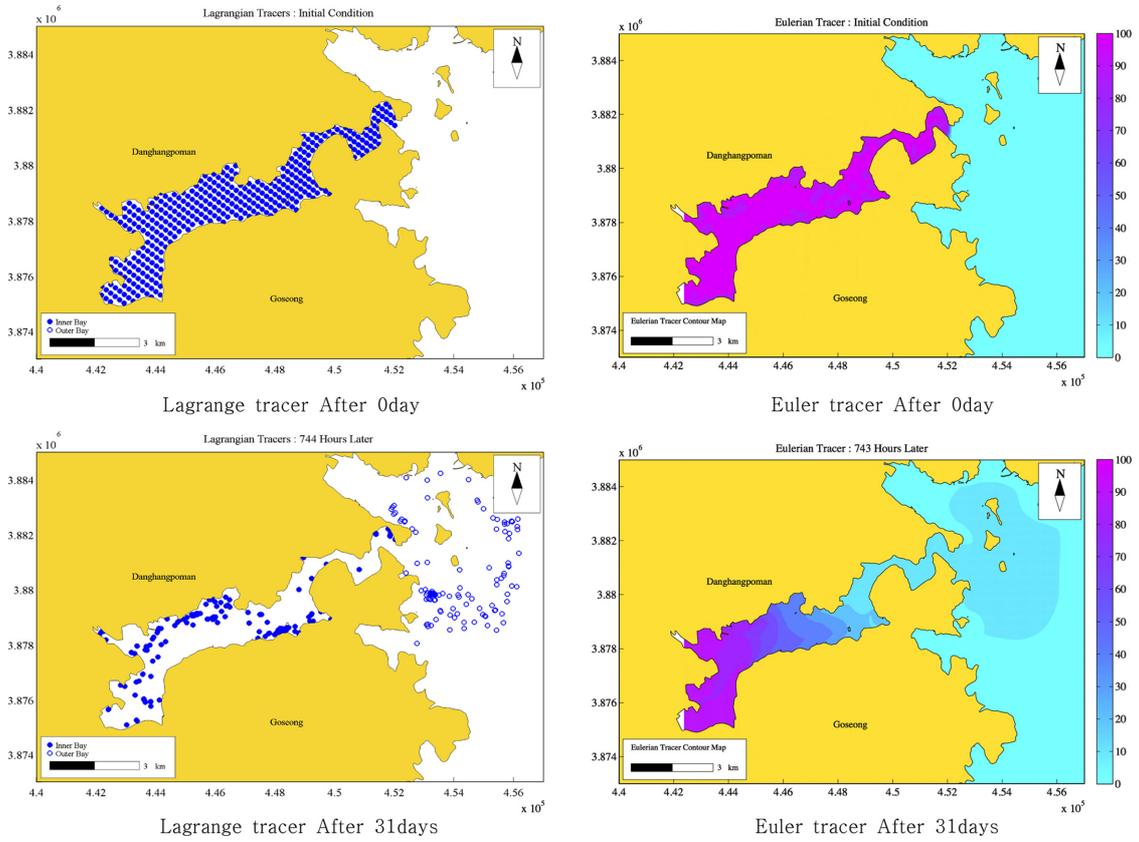


Fig. 5. Seawater exchange rate and residence time in Danghangpo bay.

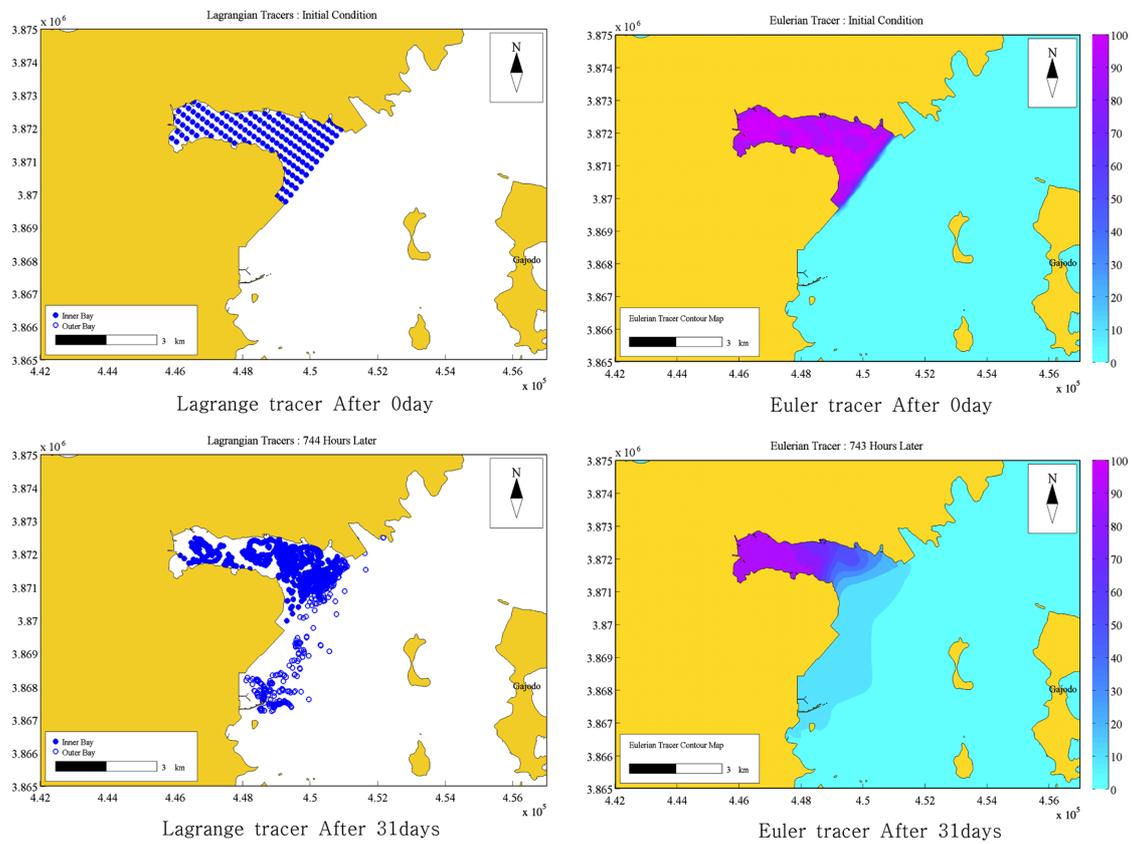


Fig. 6. Seawater exchange rate and residence time in Dangdong bay.

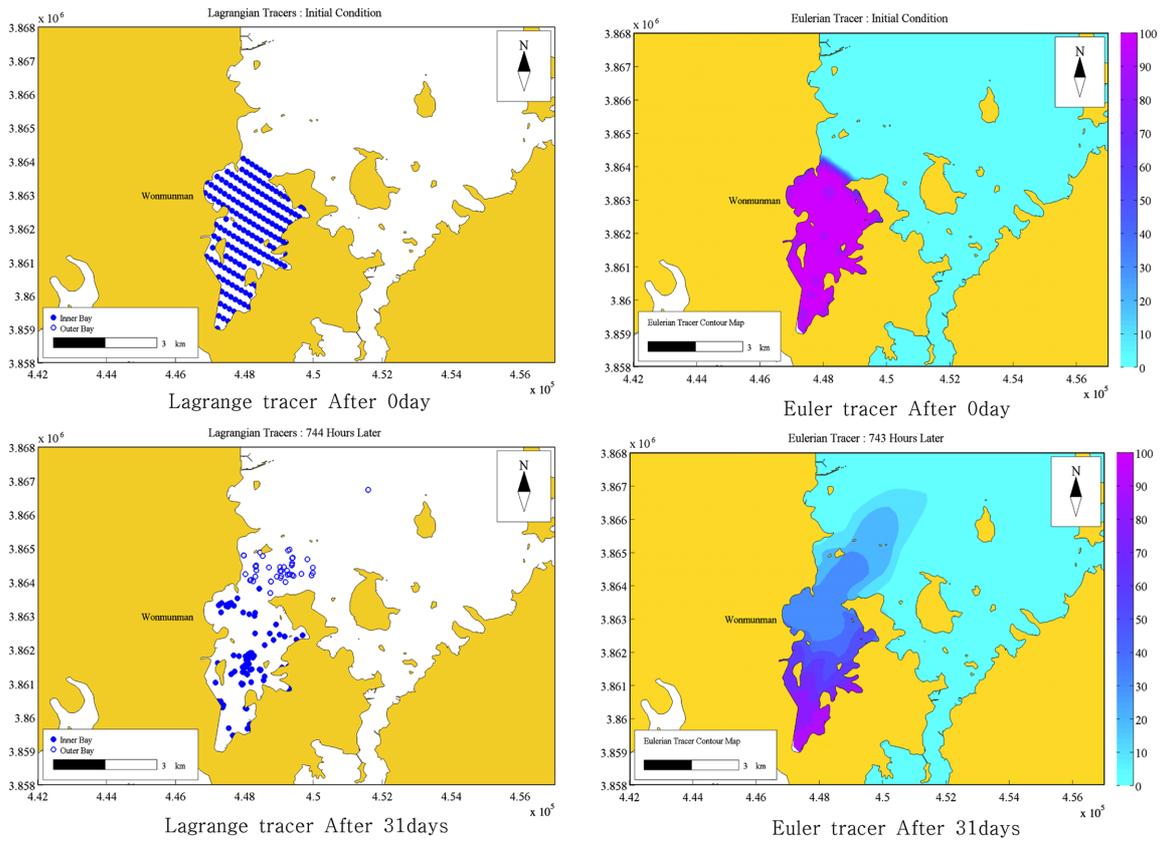


Fig. 7. Seawater exchange rate and residence time in Wonmun bay.

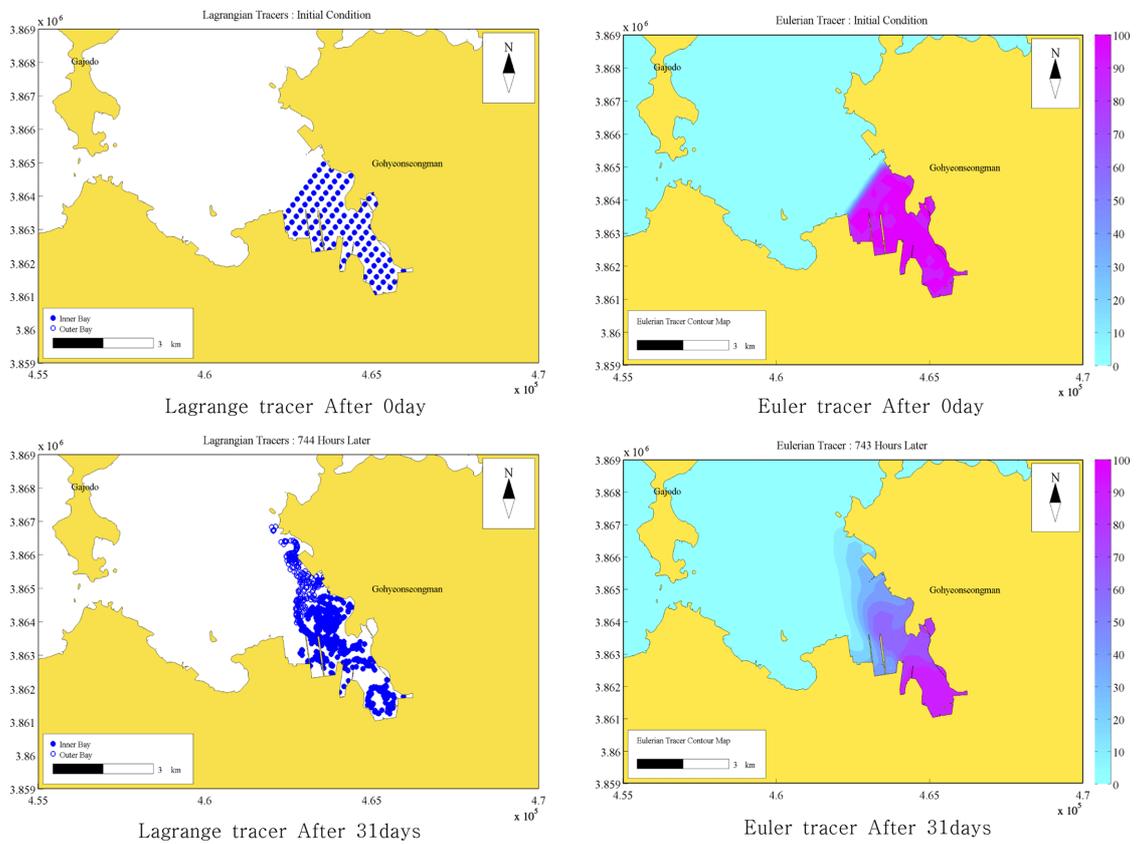


Fig. 8. Seawater exchange rate and residence time in Gohyeonseong bay.

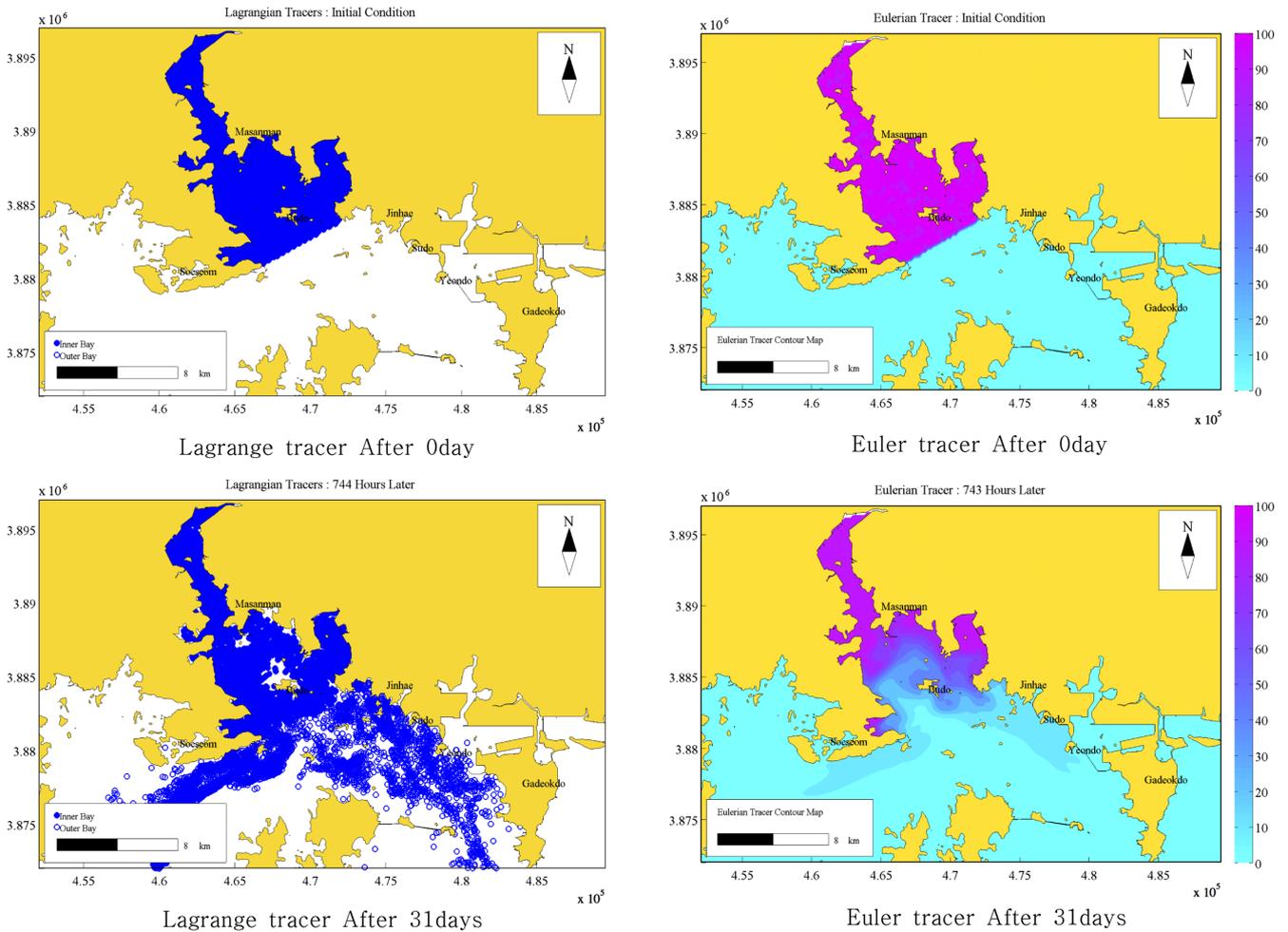


Fig. 9. Seawater exchange rate and residence time in Masan bay.

수교환율의 평가방법인 입자추적방법과 염료확산방법은 물리적 의미가 다르기 때문에 직접적으로 비교할 수는 없으나, 해수교환율을 평가할 때에는 이 두 가지 방법을 병행하거나, 연구의 목적 및 해역의 특성을 충분히 고려하여 모델링 기법을 선정해야만 보다 합리적인 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

3.3 만의 형상과 해수교환 특성의 비교

해수교환율 평가방법인 입자추적 방법과 염료확산 방법에서 서로 다른 해수교환율을 나타내는 것은 수치기법의 물리적 의미에서의 차이는 물론 만의 형태에 기인한 것으로도 판단할 수 있다. 만의 형태를 나타내는 지수로선 앞서 언급한 폐쇄도 지수(International

EMECS Center[2001])에 대한 연구가 있는데, 일반적으로 폐쇄도가 높다는 것은 해수교환율이 낮다는 것을 의미한다. 따라서, 폐쇄도 지수가 높을수록 해수교환율은 낮게 나타나야할 것이며, 이를 이용한 간접적인 방법으로 폐쇄도 지수로써 만의 해수교환의 정도를 상대적으로 비교할 수 있어야 할 것이다. 따라서, 본 연구에서는 5개 내만의 폐쇄도 지수를 각각 구하였고, 이를 해수교환율과 비교하였다.

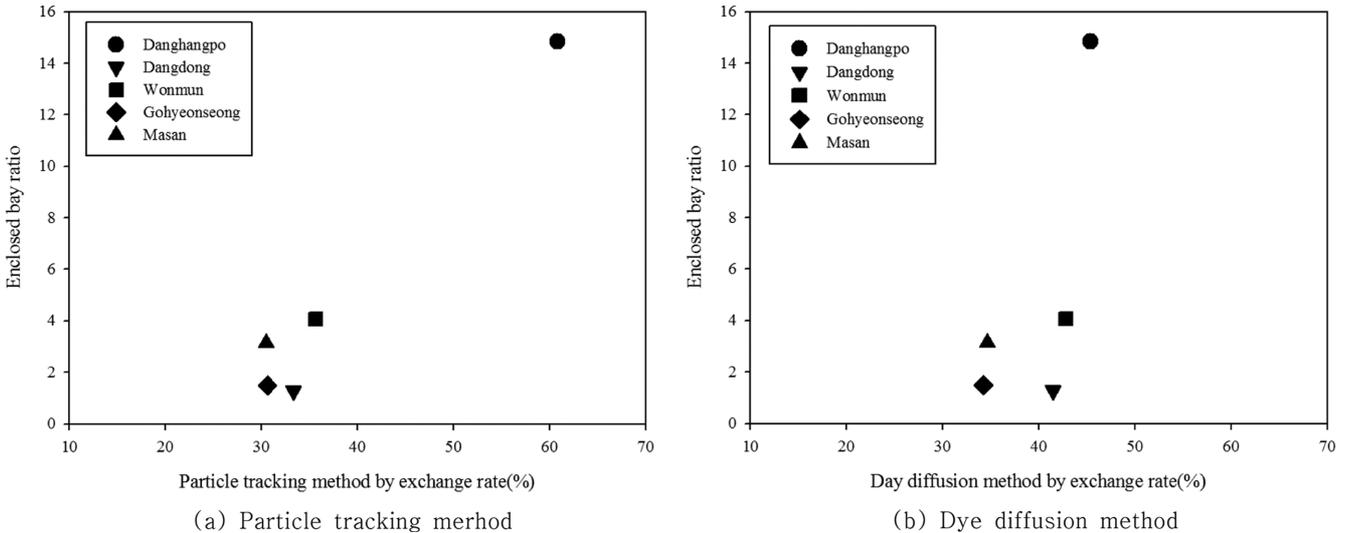
진해만 내 5개 소규모 만의 면적, 만입구의 길이, 수심 등의 제원과 이를 이용해서 구한 폐쇄도 지수를 Table 6에 제시하였고, 폐쇄도지수와 해수교환율과의 관계를 Table 7 및 Fig. 10에 제시하였다. 진해만의 소규모 내만은 폐쇄도 지수가 모두 1.0 이상으로 International EMECS Center[2001]에서 제시한 기준에 따라 폐쇄

Table 6. Results of Enclosed bay ratio at each bay

Item	Bay area (km <sup>2</sup> )	Maximum depth (m)	Bay mouth width (km)	Bay mouth depth (m)	Enclosed bay ratio
Danghangpo	16.69	20.51	0.428	13.15	14.86
Dangdong	6.5	19.45	2.975	13.11	1.27
Wonmun	7.9	14.85	1.165	8.8	4.07
Gohyeonseong	6.3	18.05	2.372	12.78	1.49
Masan	68.6	28.65	6.064	12.45	3.14

**Table 7.** Exchange rate and enclosed bay ratio at each bay

Item	Enclosed bay ratio	Particle tracking method by exchange rate (%)	Dye diffusion method by exchange rate (%)
Danghangpo	14.86	60.84	45.40
Dangdong	1.27	33.36	41.46
Wonmun	4.07	35.64	42.83
Gohyeonseong	1.49	30.64	34.23
Masan	3.14	30.50	34.65



**Fig. 10.** Seawater exchange rate(%) and enclosed bay ratio.

성 해역에 해당된다. 각 내만의 폐쇄도 지수와 해수교환율을 비교해 보면 폐쇄성 지수가 높을수록 수치모형 기법에 상관없이 해수교환율이 높게 나타났다. 즉, 폐쇄도 지수가 높을수록 해수교환율이 낮게 나타날 것이라는 예상과 정 반대의 결과가 나타났다. 이는 폐쇄도 지수로써 만의 해수교환 정도를 간접적으로 비교할 수 없다는 뜻이며, 폐쇄도 지수가 만의 폐쇄성을 지시하는 지수로 사용하기에는 수정 및 보완이 필요하다는 것을 의미한다. 폐쇄도 지수와 해수교환율의 관계가 각 내만에서 선형적인 음의 상관관계로 나타나지 않는 것에 비추어 판단할 때, 해수교환율의 결정에는 만의 형태적 특성들 중에서 폐쇄도 지수의 계산에 포함되지 않은 요소들(만의 폭, 길이 등)이 추가로 영향을 미쳤을 것으로 판단된다. 향후 이러한 특성들을 명확하게 이해하고 지수화하여 정립하는 연구가 추가적으로 필요하다.

### 4. 결 론

본 연구에서는 진해만의 소규모 내만에서의 해수교환율 평가를 위하여 입자추적 및 염료확산 모델기법을 병행하여 해수교환율을 각각 산정하고, 산정된 결과를 각 내만의 특성에 따른 차이를 비교하고자 하였다.

(1) 진해만의 해수유동 특성을 보면 전체적인 흐름은 가덕수로를 통하여 유입한 해수는 크게 두 갈래로 구분되며, 하나는 부도

수도를 통해 마산만 방향으로 유입되고 다른 하나는 중앙수로를 통해 서부해역으로 유입되어 각 내만으로 유입되는 유동 경향을 보인다.

(2) 진해만의 소규모 내만에서의 해수교환율을 산정한 결과 입자추적방법은 당항포만에서 60.84%로 가장 높고, 마산만에서 30.50%로 가장 낮게 평가되었다. 염료확산방법은 당항포만에서 45.40%로 가장 높고, 마산만에서 34.65%로 가장 낮게 평가되었다.

(3) 당항포만의 경우 입자추적 방식에 의한 해수교환율 산정 결과와 염료확산 방법에 의한 해수교환율 산정 결과가 큰 차이를 보였는데, 이는 라그랑지 입자가 좁은 만 입구를 통해서 상대적으로 매우 넓은 외해로 빠르게 빠져나가지만 만의 입구가 좁기 때문에 빠져나간 입자가 다시 유입하기가 쉽지 않고, 만의 형태가 전반적으로 곧은 형태이므로 내만에 갇히는 입자들이 적기 때문으로 판단되었다.

(4) 라그랑지 입자의 경우 낙조류에 의해 만을 빠져나갔다가 창조류에 의해 다시 유입될 때 온전한 입자가 그대로 유입하지만, 염료의 경우에는 만을 빠져나간 후 다시 유입하더라도 외해수에 의해 희석되어 유입하기 때문에 해수교환율이 더 높게 나타날 수 있으므로, 두 가지 방법에 의해 산정된 해수교환율은 같은 조건에서 비교하더라도 상대적으로 전혀 다르게 나타날 수 있다.

(5) 따라서, 해수교환율을 평가할 때에는 이 두 가지 방법을 병

행하거나, 연구의 목적 및 해역의 특성을 충분히 고려하여 모델링 기법을 선정해야만 보다 합리적인 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

(6) 폐쇄도 지수가 높을수록 수치모형 기법에 상관없이 해수교환율이 높게 나타났으므로, 폐쇄도 지수를 만의 폐쇄성을 지시하는 지수로 사용하기에는 수정 및 보완이 필요하다고 판단되었다.

## 후 기

이 논문은 2015년도 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

## References

- [1] Cho, J.K., Kim, D.K., Lee, M.O. and Oh, T.G., 2010, "A Numerical Estimation on Extension of Marine Afforestation Area using Particle Tracking Method", *J. Korean Soc. Mar. Environ. Eng.*, Vol. 34, No. 6, 922-934.
- [2] 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, VA. 1-63.
- [3] International EMECS Center, 2001, *Environmental Guidebook on the Enclosed Coastal Seas of Japan (88 sea areas)*, 1-177.
- [4] Jang, C.H., Kim, S.T., Kim, H.S., Kim, K.H. and Song, M.S., 2010, "Efficiency Tests of Seawater Exchange System for Enhancement of Seawater Quality", *J. Korean Soc. Mar. Environ. Eng.*, Vol. 13, No. 3, 206-215.
- [5] Kim, B.K., 2012, "Seawater exchange characteristics in a semi-enclosed bay based on field observations and numerical", PhD Thesis, Chonnam National Univ., Korea. 1-148
- [6] Kim, C.K., 1994, "Three-Dimensional Numerical Model Experiments of Tidal and Wind-Driven Currents in Chinhae Bay", *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, Vol. 29, No. 2, 59-106.
- [7] Kim, G.S., Ryu, H.S. and Kim, K.M., 2013, "A Study on the Water Exchange Plan with Disaster Prevention Facilities in Masan Bay", *J. Navig. Port Res.*, Vol. 37, No. 6, 637-645.
- [8] Mellor, G.L. and Yamada, 1982, "Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems", *Rev. Geophys. Space Phys.*, Vol. 20, 851-875.
- [9] Moon, J.H., 2009, A study of factors on algal bloom outbreaks in Jinhae Bay by numerical and PCA methods, Department of Ocean Engineering Graduate School Chonnam National Univ., 1-167.
- [10] Park, K, Kuo, A.Y. Shen, J., and Hamrick, J.M., 1995, "A three-dimensional hydrodynamic-eutrophication model (HEM-3D): description of water quality and sediment process submodels", Special Report in Applied Marine Science and Ocean Engineering No. 327, Virginia Institute of Marine Science.
- [11] Park, S.E., Hong, S.J. and Lee, W.C., 2009, "Calculating Average Residence Time Distribution Using a Particle Tracking Model", *J. Ocean Eng. Technol.*, Vol. 23, No. 2, 47-52.
- [12] 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", *J. Korean Soc. Mar. Environ. Eng.*, Vol. 14, No. 4, 249-256.
- [13] Ryu, C. R., Kim, J. K. and Seol. D. G., 1998, "The Tidal Water Exchange Estimation Method based on Particle Tracking Model", *J. Ocean Eng. Technol.*, Vol. 12, No. 4, 76-82.
- [14] Suh, S.W. and Lee, H.Y., 2011, "Analysis of Hydrodynamic Change around the Saemangeum Area Using a Particle Tracking Method", *J. Korean Soc. Coast. Ocean Eng.*, Vol. 23, No. 6, 442-450.

---

Received 29 January 2016

Revised 12 February 2016

Accepted 17 February 2016