

ORIGINAL ARTICLE

## 체류시간과 교체시간 계산을 통한 가막만의 시·공간적 해수교환 특성 연구

김진호 · 이원찬\* · 홍석진 · 박정현 · 김청숙 · 정우성 · 김동명<sup>1)</sup>

국립수산과학원 어장환경과, <sup>1)</sup>부경대학교 생태공학과

### A Study on Temporal-Spatial Water Exchange Characteristics in Gamak Bay using a Method for Calculating Residence Time and Flushing Time

Jin Ho Kim, Won Chan Lee\*, Sok Jin Hong, Jung Hyun Park, Chung Sook Kim, Woo Sung Jung, Dong-Myung Kim<sup>1)</sup>

Marine Environment Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

<sup>1)</sup>Department of Ecological Engineering, Pukyong National University, Busan 46513, Korea

#### Abstract

The concepts of residence time and flushing time can be used to explain the exchange and transport of water or materials in a coastal sea. The application of these transport time scales are widespread in biological, hydrological, and geochemical studies. The water quality of the system crucially depends on the residence time and flushing time of a particle in the system. In this study, the residence and flushing time in Gamak Bay were calculated using the numerical model, EFDC, which includes a particle tracking module. The average residence time was 55 days in the inner bay, and the flushing time for Gamak Bay was about 44.8 days, according to the simulation. This means that it takes about 2 months for land and aquaculture generated particles to be transported out of Gamak Bay, which can lead to substances accumulating in the bay. These results show the relationships between the transport time scale and physical the properties of the embayment. The findings of this study will improve understanding of the water and material transport processes in Gamak Bay and will be important when assessing the potential impact of coastal development on water quality conditions.

**Key words** : Residence time, Flushing time, Gamak bay, Water exchange

#### 1. 서론

가막만은 전체 해역에 걸쳐 패류 및 어류 가두리 양식장이 넓게 분포되어 있어, 양식생물의 배설물이나 잔여사료에 의한 오염이 심각하다고 보고된 바 있다

(Noh et al., 2006). 만의 북서 내만인 응천동 인근 해역으로는 여러 곳에서 하천수가 유입되고 있다. 이에 따라 하천이나 양식장에서 유입된 오염물질에 의해 수질저하 및 빈산소 수괴 발생이 문제 되고 있다(Kim et al., 2006). 여기에 가막만의 중앙부에서 만 입구까지

Received 11 May, 2016; Revised 7 June, 2016;

Accepted 28 June, 2016

\*Corresponding author : Won Chan Lee, Marine Environment Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea  
Phone : +82-51-720-2520  
E-mail : phdleewc@korea.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.  
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

수출용 패류생산을 위한 지정해역(제 4호해역, 4,188 ha)으로 설정됨에 따라 오염물질 유입과 수질저하 등에 대한 관심이 높아지고 있는 실정이다.

만약, 가막만으로 육상기인 오염물질이나 양식장에서 발생한 폐유류, 플라스틱 부이의 파편과 같은 부유성 오염물질이 유입된다면 양식생물의 성장 및 서식환경에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다. 이러한 부유성 오염물질의 영향정도는 체류시간이나 교체시간과 같은 물질 수송시간에 의해 결정될 것으로 판단된다. 특히, 2012년에 위생관리실태를 점검한 미국 FDA는 지정해역으로의 오염원 유입을 지적하고, 자국으로의 패류 수입을 중단하여 우리나라에 총 8,000억에 가까운 피해를 입힌바 있다(MOF, 2013).

해역의 물질 수송시간(transport time scale)은 연안에서의 해수 교환을 표현하는 유용한 개념으로 residence time, flushing time, turnover time 등 다양한 개념이 사용된다. 일반적으로 물질 수송시간이 긴 해역은 짧은 해역에 비해 수질이 악화될 가능성이 높다(Kenov et al., 2012). 체류시간(residence time)은 입자 물질이 해역 내에 얼마나 오래 체류하는지를 나타내며, 교체시간(flushing time)은 단위 해역에서의 체적 변화율로서 표현되며 방류된 물질의 절반(50%)이나 e-folding scale(63.21%)만큼 감소하기까지 소요되는 시간을 말한다(Monsen et al., 2002). 해수교환율(Kenov et al., 2012; Cavacante et al., 2012), 유해적조발생(Bricelj and Lonsdale, 1997), chlorophyll a(Wan et al., 2013), 영양염(Kargi and Uygur, 2004)과 관련된 연구들이 해역의 공간적인 생지화학적 과정 차이를 설명하기 위해 체류시간 및 교체시간을 이용한 바 있다. 따라서, 체류시간은 특정 위치에 있는 물질을 대상으로 하는 반면에 교체시간은 해역의 전체 수괴를 대상으로 하며 체류시간은 공간적으로 다르게 계산되지만 교체시간은 그렇지 않는 것이 특징이다.

가막만을 대상으로 한 연구는 생태계모형을 이용한 환경용량 산정(Kang and Kim, 2006)과 COD 분포 특성 연구(Kim, 2005), 퇴적환경과 미생물의 분포 특성(Lee et al., 2008), 저서환경 및 다모류 분포 특성(Yoon et al., 2007) 등 양식생물의 성장과 수질 및 저질 특성에 관한 연구에 집중되어 있어 해역의 물리환경적 특성, 체류시간이나 교체시간에 대한 연구는 부

족한 실정이다.

본 연구에서는 해수유동모형을 통해 가막만의 해수순환 특성을 재현한 다음, 입자추적모형을 이용하여 입자의 평균체류시간 공간분포와 대상해역의 교체시간을 계산하였다. 이를 통해 하천이나 양식장에서 유입된 오염부하원의 가막만 내 체류시간을 추정하고, 해역의 물리환경 특성을 파악하였다.

## 2. 수치모의

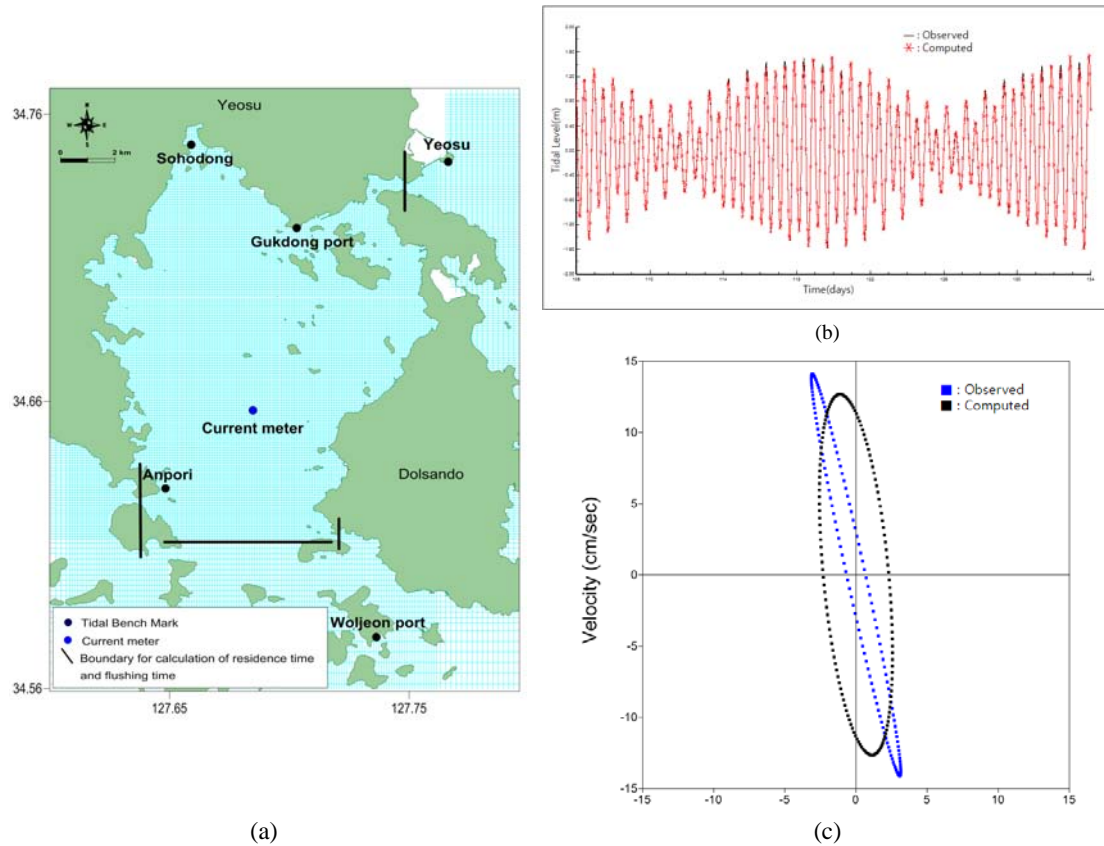
### 2.1. 해수유동 모델

본 연구에서는 EFDC (environmental fluid dynamics code)를 이용하여 해역의 물질체류시간을 계산하였다. EFDC는 Virginia Institute of Marine Science (Hamrick, 1992)에서 개발되었으며, 해수유동, 퇴적물 이동, 수질, 독성물질에 대한 예측으로 널리 이용되고 있다. Craig(2009)는 다양한 조건을 부여하여 입자추적모형의 적용성을 검증하였는데, 준정상상태 등류(quasi-steady state uniform flow)에서 상대오차가 -0.098% 이하임을 보였다. 특히, 입자추적모형에서는 Random walk Method를 적용하며 입자의 수평 및 수직 확산에 무작위로 생성되는 무작위 변수(-1~1, 평균 0)를 적용하여 난류확산에 의한 입자 이동에 대한 통계적처리가 가능하다.

### 2.2. 대상해역 및 모델 영역 구성

대상해역인 가막만은 북쪽의 여수반도, 동쪽의 돌산도, 서쪽의 고돌산반도로 둘러싸여 있으며 남쪽에는 백야도, 송도 등 10여개의 섬들이 위치하는 남북 15 km, 동서 9 km인 타원형 내만이다. 평균수심이 약 9 m로 얕으며 복잡한 해안선이 형성되어 있다(Kim et al., 2006; Lee et al., 2008). 북동쪽의 여수항과 돌산도 사이의 협수로와 남쪽 만 입구를 통해 성질이 다른 수괴가 가막만 내로 유입되어 복잡한 해수순환 구조를 나타낸다. 또한, 해저지형을 살펴보면 중앙부의 수심은 약 6~7 m 인데 반해 북서쪽 내만의 수심은 약 9~11 m로 만 중앙부에 비해 깊어 정체성 해수의 특성을 갖는다(Lee and Cho, 1990).

모델영역은 15×20 km에 이르는 영역으로 설정하였으며, 격자구성은 총 137×178개의 가변격자(100~400



**Fig. 1.** (a) Computational grid of Gamak bay and the sites of tidal bench mark and current measurement. (b) Time series used in the hydrodynamic model calibration at the Yeosu and (c) Semi-diurnal current ellipse at current meter site.

m)로 구성하였다(Fig. 1). 그림 상의 Current meter는 모델검증을 위한 조류관측 정점을 나타낸다. 해양조사원(KORDI)의 조위 자료(여수)를 이용하여 계산된 조위와 비교하였으며 해역 내의 5개 기본수준점(tidal bench mark)의 주요 4개 분조( $M_2$ ,  $S_2$ ,  $O_1$ ,  $K_1$ )에 대한 진폭과 위상을 모델결과와 평균오차(mean error)의 계산을 통해 검증하였다(Table 1). 검증결과, 유의한 조위변동 시계열과 조류타원도를 확인할 수 있었으며, 기본수준점의 진폭과 위상 비교에 있어서도 일부 일주성 성분을 제외하고는 비교적 유의한 값을 얻을 수 있어 해수유동 수치실험의 재현성이 양호한 것으로 판단된다.

입자추적모델의 총 계산시간은 가막만에서 방출된 입자가 충분히 수송될 수 있도록 입자 방출 이후 65일

동안 계산하였다. 또한, 가막만 영역 내에서 총 14,925개의 입자를 각 격자마다 1개의 입자를 고려하여 동시에 방출시켰으며, 방출된 입자의 위치정보는 30분 간격으로 저장하였다.

### 2.3. 체류시간 및 교체시간 계산

체류시간 계산에 적용된 조건은 아래와 같이 정리할 수 있다. i) 체류시간의 정의는 방류된 입자가 임의의 경계에 최초 도달할 때 까지 소요되는 시간(Monsen et al., 2002)으로 정의한다. ii) 체류시간 계산은 조시에 따라 각각 계산하여 각 입자별로 평균한다. iii) 입자의 재유입은 고려하지 않는다. 따라서, 대조기와 소조기에 각각 간조(low tide), 만조(high tide), 창조(flood tide), 낙조(ebb tide) 시에 입자를 방류하여 각 입자별로 체류시간을 계산하였으며 총 8회의

**Table 1.** Comparison between model results and observed tidal height

Station	Constituent	Amplitude (cm)			Phase (°)		
		Obs.	Mod.	ME	Obs.	Mod.	ME
Yeosu	M <sub>2</sub>	72.5	72.3	0.2	248.5	247.9	0.6
	S <sub>2</sub>	33.6	34.1	-0.5	274.7	270.3	4.4
	K <sub>1</sub>	14.1	13.7	0.4	173.6	178.3	-4.7
	O <sub>1</sub>	9.5	8.7	0.8	151.5	160.2	-8.7
Sohodong	M <sub>2</sub>	72.4	73.2	-0.8	248.1	248.7	-0.6
	S <sub>2</sub>	33.6	33.0	0.6	274.5	276.8	-2.3
	K <sub>1</sub>	14.0	14.7	-0.7	172.0	170.3	1.7
	O <sub>1</sub>	9.2	8.6	0.6	150.8	142.6	8.2
Gukdong port	M <sub>2</sub>	79.6	79.2	0.4	248.4	247.6	0.8
	S <sub>2</sub>	37.0	37.1	-0.1	275.9	274.7	1.2
	K <sub>1</sub>	14.7	14.4	0.3	172.6	180.9	-8.3
	O <sub>1</sub>	9.7	10.1	-0.4	149.4	146.4	3.0
Anpori	M <sub>2</sub>	71.0	70.8	0.2	248.5	248.1	0.4
	S <sub>2</sub>	32.7	32.5	0.2	274.4	272.0	2.4
	K <sub>1</sub>	13.8	14.0	-0.2	173.4	170.9	2.5
	O <sub>1</sub>	9.1	9.0	0.1	150.9	151.6	-0.7
Woljeon port	M <sub>2</sub>	70.8	70.7	0.1	247.0	246.1	0.9
	S <sub>2</sub>	32.7	32.9	-0.2	273.3	272.6	0.7
	K <sub>1</sub>	13.8	13.5	0.3	173.6	174.8	-1.2
	O <sub>1</sub>	9.3	9.5	-0.2	154.3	151.4	2.9

수치모의 결과를 각 입자별로 평균하여 평균체류시간의 공간분포를 산출하였다(Park et al., 2009).

교체시간의 계산은 체류시간 계산 조건과 동일하게 입자를 방류하여 진행하였으며, 각 계산 시간 간격마다 경계 내에 남아있는 입자의 수를 계산하였다. 교체시간 계산에서는 입자의 재유입을 고려하였다. 가막만의 경우 남쪽의 수로와 북동쪽의 협수로가 존재하고 있어 이 경계를 통해 빠져나가는 입자의 수도 계산하여 해수교환 비율 특성을 파악하였다.

### 3. 수치모의 결과

#### 3.1. 해수유동 결과

해수유동 모델의 계산 결과는 Fig. 2에 나타내었다. 가막만 해수의 교환은 남동쪽의 수로와 북동쪽의 협수로를 통해 이루어지며 가막만 중앙을 지나 내측으

로 갈수록 유속이 감소하는 패턴을 나타내고 있다. 대조기 결과에서는 남쪽 경계부근에서 약 40 cm/sec 전후의 유속을 나타낸다. 수심이 얕아지는 북쪽 내만에서는 약 10 cm/sec로 유속이 크게 감소하여 가막만 북쪽 해역의 해수 흐름이 원활하지 않은 것으로 판단된다. 소조기 결과는 대조기와 비교하여 유사한 흐름 패턴을 나타내고 있으며, 대조기에 뚜렷하게 보였던 대경도 부근의 유속 감소패턴이 약한 유속에 의해 뚜렷하게 나타나지 않았다.

창조시 남쪽 수로에서 해수가 유입됨과 동시에 북서쪽 수로에서도 해수가 유입되는 패턴을 나타내며, 이로 인해 대경도 부근에서 두 수괴가 서로 만나 이 부근의 유속이 미약하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이는 이전의 연구결과와 해수순환과 분포특성과 일치한다(Lee and Cho, 1990; Lee et al., 2005; Kang and Kim, 2006). 낙조시는 창조시 흐름 패턴과 반대의

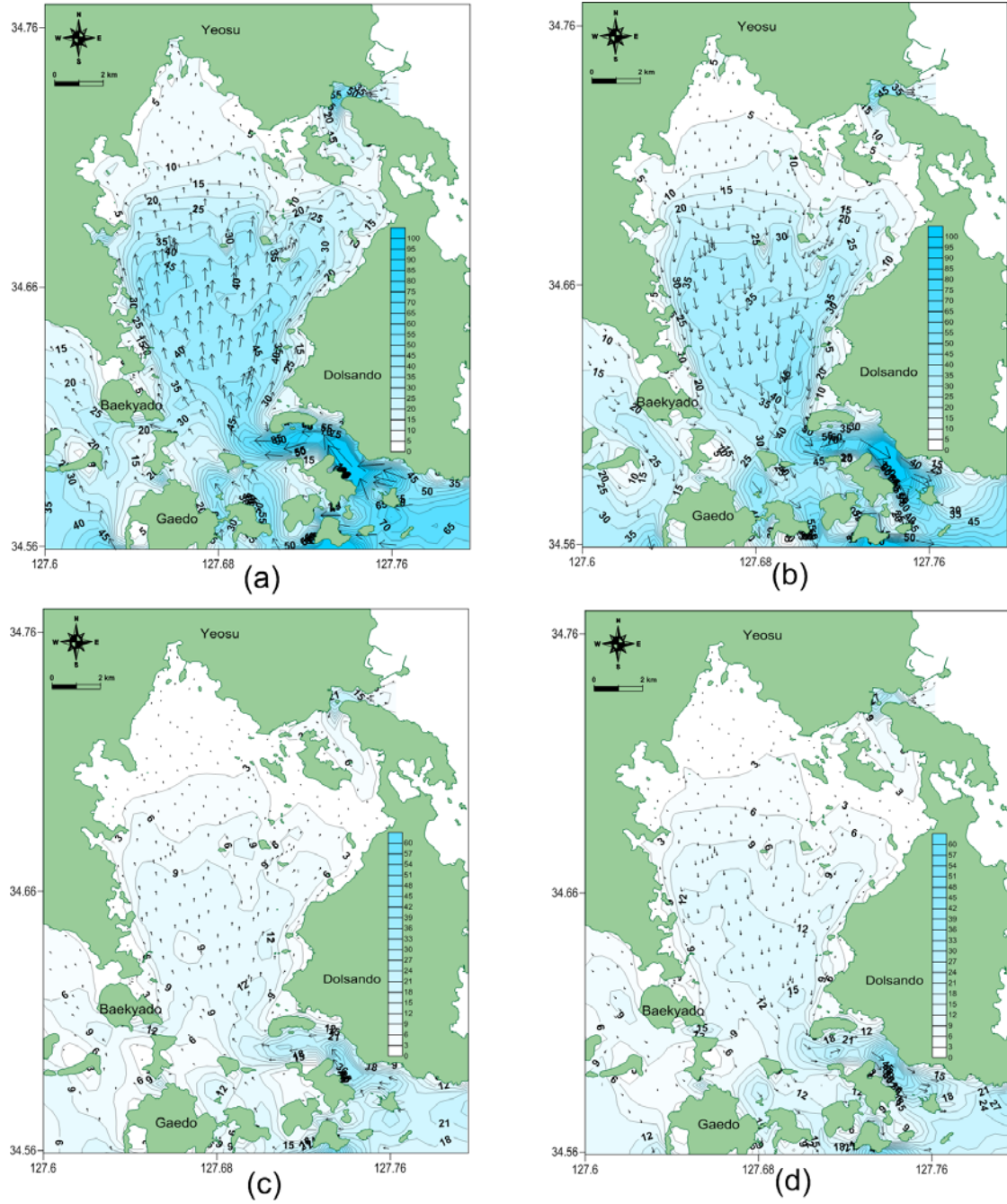


Fig. 2. Magnitude of the velocity (m/s) in spring tide: (a) flood; (b) ebb and neap tide (c) flood; (d) ebb.

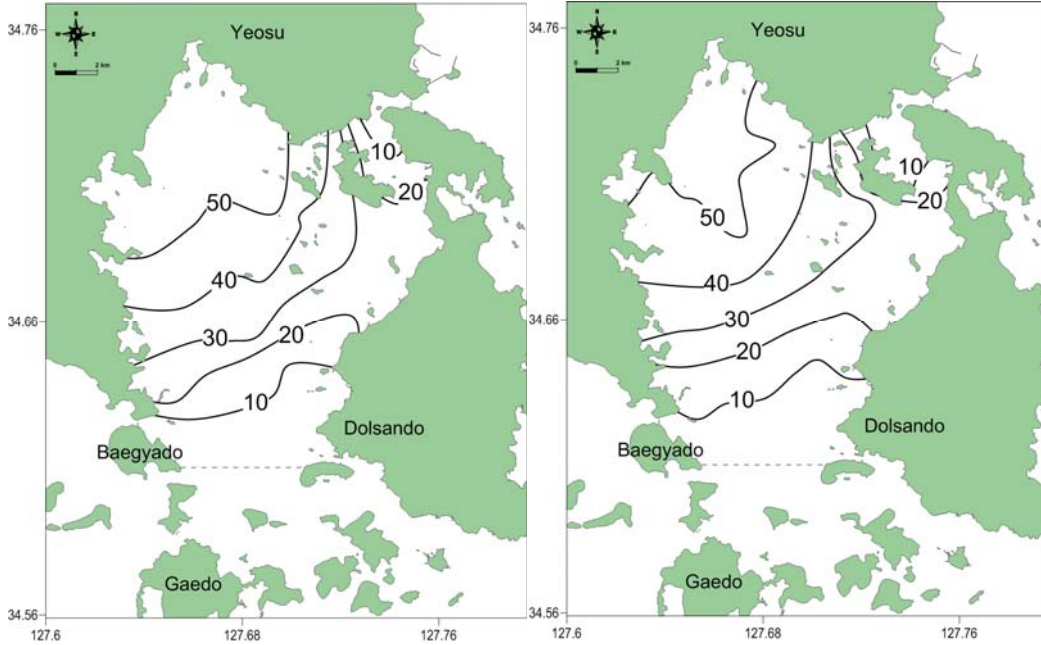


Fig. 3. Spatial distribution of residence time (days) in Gamak bay: (a) neap tide; (b) spring tide.

흐름을 가지며 유속의 패턴과 크기도 유사하게 나타났다.

3.2. 체류시간 계산 결과

입자추적모델을 이용하여 계산한 소조기와 대조기의 체류시간 결과를 Fig. 3에 나타냈다. 소조기와 대조기 모두 남쪽과 북동쪽의 경계에서부터 내만으로 갈수록 체류시간이 길어지는 전형적인 패턴 분포를 나타냈다. 단면적은 남쪽 경계가 약 80,600 m<sup>2</sup>이고 북동쪽 수로가 약 3,000 m<sup>2</sup>로 남쪽 경계 면적의 약 4%이다.

소조기와 대조기의 공간적인 분포에서는 다소 차이를 확인할 수 있었는데, 내만에서는 소조기보다 대조기에 더 긴 체류시간이 계산되었으며 남쪽의 경계 부근 해역에서는 소조기에 더 긴 체류시간이 계산되었다. 전체 입자의 체류시간을 평균한 결과 소조기는 약 10.99일, 대조기는 약 10.89일로 대조기에 방류된 입자가 평균적으로 약 0.1일 빠르게 빠져나가는 것을 알 수 있다.

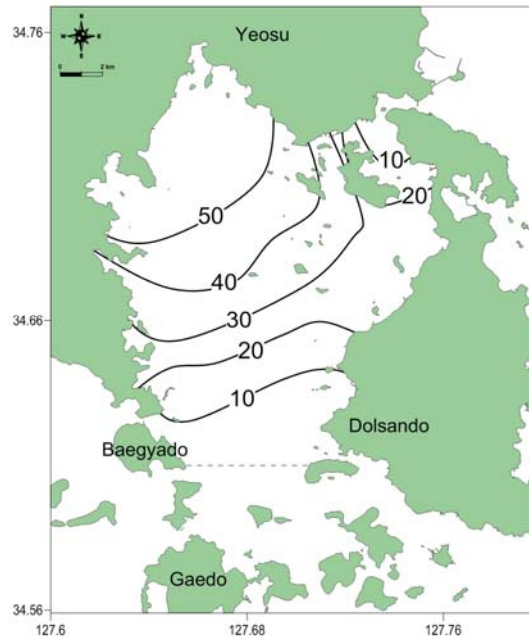


Fig. 4. Spatial distribution of average residence time (days) in the Gamak bay.

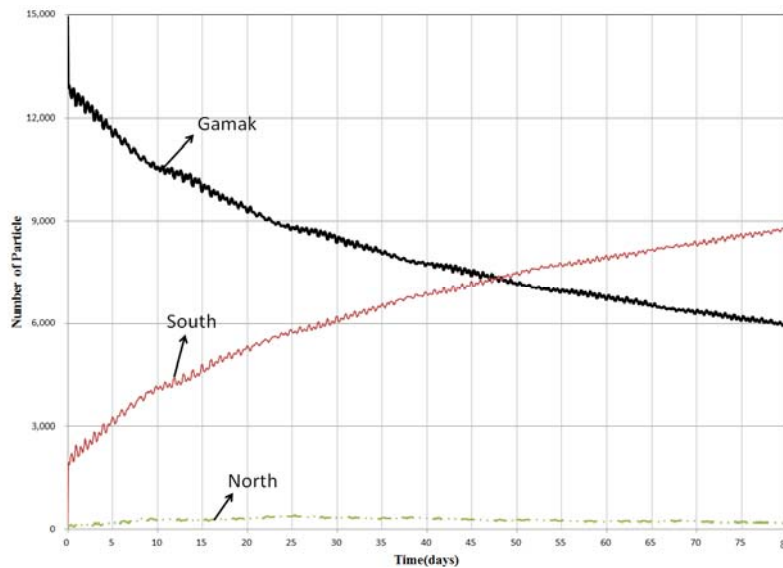


Fig. 5. The number of particle in the Gamak bay and out of Gamak bay by south and north channel.

평균체류시간 공간분포 결과는 Fig. 4와 같다. 가막만의 최내측에서 약 55일의 체류시간을 보였는데, 이는 해역으로 유입된 물질이 외해로 이동하는데 약 2달이 소요된다는 것을 의미한다. 이러한 결과는 마산만의 최내만에서 약 70일 이상(Park et al., 2011), 새만금 내만에서 약 100일 이상(Yoo et al., 2012)으로 이보다 짧다. 비록 해역의 면적이나 형상에서 차이가 나기 때문에 절대적인 비교는 힘들지만 경계까지의 거리가 유사한 마산만의 체류시간보다는 짧게 계산되어 가막만의 해수교환이 마산만보다 활발한 것으로 생각할 수 있다. 남쪽 경계부근에서 서쪽 해안에 비해 동쪽 해안에서 비교적 짧은 체류시간이 나타나는데, 이는 해당 해역에서 상대적으로 해수교환이 활발히 일어남에 따른 결과로 판단된다.

### 3.3. 교체시간 계산 결과

입자추적모델의 계산 시간 간격 마다 가막만 내에 존재하는 입자의 수와 남쪽 경계 및 북쪽 경계를 통해 유출되는 입자의 수를 Fig. 5에 나타냈다. 그래프 상의 단주기 변동은 유출된 입자가 조석의 흐름에 의해서 재유입된 결과로 판단된다. 동시에 방류한 14,925개의 입자에서 절반의 입자가 유출되기까지 약 44.8일

이 소요되었으며, 총 계산 시간인 65일 동안 약 43.7%의 입자가 해역 내에 체류하고 있어 e-folding scale은 계산할 수 없었다. 이는 마산만(Park et al., 2011)에서 120일 이상(50% 감소), Greenwich Bay(Abdelrhman, 2005)에서 200일 이상(e-folding scale), Bamengat Bay(Guo and Lordi, 2000)에서 24일(조량법), Lamma Island의 작은 만(Choi and Lee, 2004)에서 14~38일(e-folding scale)과 비교하였을 때 가막만의 해수교환이 비교적 원활하게 이루어지고 있다는 것을 알 수 있다. 가막만에서 유출된 입자 중에서 남쪽 경계를 통해 빠져나간 입자는 전체의 약 98%인 것으로 나타났다. 이런 결과는 해수교환이 주로 남쪽 수로를 통해 이루어지며 북서쪽의 수로와는 다른 수괴를 형성한다는 것을 의미한다. 이는 Lee and Cho(1990)의 수온과 염분의 분포 특성을 통한 가막만의 수괴특성 연구를 통해 가막만을 3개의 수괴로 구분한 것과 일치한다.

### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 가막만을 대상으로 입자추적 모델이 포함된 EFDC를 이용하여 평균체류시간의 공간적인 분포와 해역의 교체시간을 계산하였다. 계산된

평균체류시간과 교체시간을 통해 주요 하천과 양식장으로 부터 유입되는 부유성 오염물질이 외해로 유출되기까지 소요되는 시간을 추정하였으며 해역의 해수순환율과 각 경계를 통한 해수교환 비율을 계산하였다.

계산된 평균체류시간은 경계 인근에서 짧고 내만으로 갈수록 증가하는 경향이 나타났으며, 최내만인 소호동 인근 해역에서는 약 55일 이상의 평균체류시간이 계산되었다. 가막만의 서쪽 연안의 체류시간이 30~45일의 분포인데 반해 동쪽 연안의 체류시간은 25~30일로 비교적 짧은 체류시간을 나타냈다. 경계에서 같은 거리에 있음에도 5일 이상의 차이가 나타났으며, 이는 가막만 내외의 해수가 주로 동쪽 연안을 따라 소통하고 있는 것으로 판단할 수 있다.

가막만의 교체시간 계산에서 입자의 50%가 유출되기까지 약 44.8일이 소요되는 것으로 나타났으며, 입자의 98%는 남쪽 경계를 통해 유출되었다.

이러한 결과는 가막만에서 가장 북쪽하천(소호동 인근)을 통해 유입된 물질이 해수의 흐름이 원활한 백야도 인근으로 이동하기까지 약 두 달 이상, 해역의 중앙부까지 약 한 달 이상이 소요됨을 의미한다. 또한, 가막만의 해수의 50%가 교환되기까지 약 45일이 소요되는 것으로 계산되었는데 이는 육상이나 양식장에서 발생한 오염물질이 외해수와 희석 및 확산되기까지 상당한 시간이 소요된다는 것을 의미한다. 이러한 결과를 통해 가막만으로 유입된 오염물질이 외해로 배출되기 보다는 내부에서 분해·침강될 수 있는 물리환경적 특성을 가지고 있어 해역 내에서 물질의 집적이 예상할 수 있다. 이는 가막만 내 퇴적물의 유기물 분포특성(Lee et al., 2008)과 다모류군집 분포특성(Yoon et al., 2007)에 대한 연구결과와 일치한다.

가막만 지형에 관한 과거 연구(Kang and Chough, 1982; Lee and Cho, 1990)를 통해 가막만의 지형적인 특성으로 인해 바람 등에 의한 외력에 민감하게 반응할 것으로 판단할 수 있다. 추후, 가막만의 장기간 물질 이동에 미치는 바람과 성층의 영향에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

이 논문은 2016년도 국립수산과학원 수산과학연구

사업 연안어장 생태계 통합 평가 및 관리 연구(R2016055)의 지원으로 수행된 연구입니다.

### REFERENCES

- Abdelrhman, M. A., 2005, Simplified modeling of flushing and residence time in 42 embayments in New England, USA, with spacial attention to Greenwich Bay, Rhode Island, *Estuarine Coastal Shelf Sci.*, 62(1-2), 339-351.
- Cavallante, G. H., Kjerfve, B., Feary, D. A., 2012, Examination of residence time and its relevance to water quality within a coastal mega-structure: The Palm Jumeirah Lagoon, *J. Hydrol.*, 468-469, 111-119.
- Choi, K. W., Lee, J. H. W., 2004, Numerical determination of flushing time for stratified water bodies, *J. Mar. Syst.*, 50(3-4), 263-281.
- Craig, P. M., 2009, Implementation of a Lagrangian particle tracking sub-model for the environmental fluid dynamics code, Dynamic Solutions-International, LLC, Knoxville, TN, USA.
- Guo, Q., Lordi, G., 2000, Method for quantifying freshwater input and flushing time in estuaries, *J. Environ. Eng.*, 126(7), 675-683.
- Hamrick, J. M., 1992, A three-dimensional environmental fluid dynamics computer code: Theoretical and computational aspects, The College of William and Mary, VIMS, Special report 317.
- Kang, H. J., Chough, S. K., 1982, Gamagyang Bay, southern coast of Korea: Sedimentation on a tide-dominated rocky embayment, *Mar. Geol.*, 48(3-4), 197-214.
- Kang, H., Kim, J. G., 2006, The estimation of environmental capacity in the Gamak bay using an eco-hydrodynamic model, *J. Env. Sci. intern.*, 15(10), 951-960.
- Kargi, F., Uygur, A., 2004, Hydraulic residence time effects in biological nutrient removal using five-step sequencing batch reactor, *Enzyme Microb. Technol.*, 35(2-3), 167-172.
- Kenov, I. A., Garcia, A. C., Neves, R., 2012, Residence time of water in the Mondego estuary (Portugal), *Estuarine, Coastal Shelf Sci.*, 106, 13-22.
- Kim, D. M., 2005, Ecological modeling for estimation of



- a transport and distribution of COD in Kamak Bay, *J. Env. Sci. intern.*, 14(9), 835-842.
- Kim, J. B., Lee, S. Y., Yoo, J., Choi, Y. H., Jung, C. S., Lee, P. Y., 2006, The characteristics of oxygen deficient water mass in Gamak Bay, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 9(4), 216-224.
- Lee, M. O., Kim, B. K., Park, S. J., Kim, J. K., 2005, Some physical characteristics of Gamak bay observed in October and November of year 2004, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 8(4), 165-173.
- Lee, K. H., Cho, K. D., 1990, Distributions of the temperature and salinity in Kamak Bay, *Kor. J. Fish. Aquat. Sci.*, 23, 25-39.
- Lee, D. S., Kim, Y. S., Jung, S. Y., Kang, C. K., Lee, W. J., 2008, Environmental characteristics and distributions of marine bacteria in the surface sediments of Kamak Bay in winter and summer, *J. Env. Sci. intern.*, 17(7), 755-765.
- MOF, 2013, A study on improvement of a system of production stage health control for extermination of poor fishery products, 375.
- Monsen, N. E., Cloern, J. E., Lucas, L. V., Monismith, S. G., 2002, A comment on the use of flushing time, residence time, and age as transport time scales, *Limnol. Oceanogr.*, 47(5), 1545-1553.
- Noh, I. H., Yoon, Y. H., Kim, D. I., Park, J. S., 2006, The spatio-temporal distribution of organic matter on the surface sediment and its origin in Gamak Bay, Korea, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 9(1), 1-13.
- Park, S. E., Hong, S. J., Lee, W. C., 2009, Calculating average residence time distribution using a particle tracking model, *J. Ocean Eng. Tech.*, 23(2), 47-52.
- Park, S. E., Lee, W. C., Hong, S. J., Kim, H. C., Kim, J. H., 2011, Variation in residence time of pollutants over a tidal cycle in Masan Bay, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 14(4), 249-256.
- Wan, Y., Qiu, C., Doering, P., Ashton, M., Sun, D., Coly, T., 2013, Modeling residence time with a three-dimensional hydrodynamic model: Likage with chlorophyll a in a subtropical estuary, *Ecol. Modell.*, 268, 93-102.
- Yoo, S. C., Suh, S. W., Lee, H. Y., 2012, Impacts on residence time and water quality of the Saemangeum reservoir caused by inner development, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 15(3), 186-197.
- Yoon, S. P., Jung, R. H., Kim, Y. J., Kim, S. S., Lee, J. S., Park, J. S., Lee, W. C., Choi, W. J., 2007, Characteristics of benthic environment and polychaete communities of Gamak Bay, Korea, *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 12(4), 287-304.