

## 수치실험에 기초한 가막만의 퇴적 환경 특성

김병국<sup>1</sup> · 박성진<sup>2</sup> · 이문옥<sup>3,†</sup> · 이연규<sup>3</sup> · 김종규<sup>3</sup>

<sup>1</sup>국립공원관리공단 국립공원연구원

<sup>2</sup>(주)지오시스템리서치 해양조사부

<sup>3</sup>전남대학교 해양기술학부

## Characteristics of Sedimentary Environments in Gamak Bay based on Numerical Experiments

Byeong Kuk Kim<sup>1</sup>, Sung Jin Park<sup>2</sup>, Moon Ock Lee<sup>3,†</sup>, Yeon Gyu Lee<sup>3</sup> and Jong Kyu Kim<sup>3</sup>

<sup>1</sup>National Park Research Institute, Korea National Park Service, Namwon Jeonbuk 590-811, Korea

<sup>2</sup>GeoSystem Research Corporation, Gunpo Gyeonggi 435-824, Korea

<sup>3</sup>Faculty of Marine Technology, Chonnam National University, Yeosu, Jeonnam 550-749, Korea

### 요 약

한국 남해안의 중심에 위치한 가막만의 퇴적 환경을 파악하기 위해 수치실험을 실시하였다. 가막만에서는 추계와 춘계에 퇴적률이 증가하는 반면, 하계와 동계에는 퇴적률이 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 계절적 변화는 표층퇴적물 강열감량의 계절 변화와 정성적으로 일치하였다. 한편, 현장조사 결과에서 북동쪽과 남쪽에 위치한 두 개의 만구에서는 잔차류가 만내로 향하고 있고, 또한 만내에서는 대부분의 해역에서 퇴적이 침식에 비해 상대적으로 우세한 것으로 나타났다. 따라서, 가막만으로 유입된 오염물질들은 준설 등 특별한 이벤트가 없는 한 대부분 만내에 침강되어 퇴적할 것으로 판단되었다.

**Abstract** – We carried out numerical experiments to understand sedimentary environments in Gamak Bay where is located in the center of the southern coast of Korea. Deposition rates in Gamak Bay appeared to increase in the autumn and spring whereas they appeared to decrease in the summer and winter. These seasonal variations qualitatively coincided with seasonal variations of Ignition Loss (IL) for surface sediments. Furthermore, deposition rates turned out to be prevalent compared to erosion rates in most areas of the bay. On the other hand, current measurement results at both the northeast and south mouths of the bay showed their residual components to flow into the bay. Therefore, we can conclude that contaminated materials flowing into Gamak Bay will precipitate to be deposited in the bay as long as there is no specific events such as dredging.

**Keywords:** Sedimentary environments(퇴적 환경), Gamak Bay(가막만), Deposition(퇴적), Erosion(침식)

### 1. 서 론

가막만은 우리나라 남해안 중앙에 위치하며 동서방향으로 9 km, 남북방향으로 15 km의 타원형 내만으로서, 평균 수심 10 m 이하인 천해역이다. 가막만의 북동쪽과 남쪽에 있는 두 개의 만구를 통해 유출입하는 해수는 각각 13% 및 87% 정도로 알려져 있다(Lee and Chang[1982]). 가막만의 지형은 만의 북부에서 수심이 약 7 m 정도 까지 오목한 모양을 이루고 있으나, 만의 중앙부에서는 수심이 4 m 정도로 얕아지다가 만의 남측으로 갈수록 다시 깊어져 수심이 20 m

에까지 이른다(Fig. 1). 또한, 만의 남부는 동서 방향으로 다수의 섬이 산재하고 있어서 외해로부터 유입되는 심해파를 차단하고 있는 반면, 만의 동부 및 북부는 수심이 2 m 이내로 매우 얕거나 오목한 지형의 영향으로 바람에 민감하게 반응하는 해역이기도 하다(Lee[1992]). 이러한 지형적 특성 때문에 반폐쇄적 천해역인 가막만은 다양한 서식생물이 분포하고, 섬진강 유출수의 영향을 받아 기초 생산력 또한 매우 높은 해역으로서, 1960년대부터 굴을 비롯한 진주담치, 피조개 등 패류양식이 성행하고 있다. 그 중에서도 특히 굴은 전국 수하식 양식 굴 생산량의 1/3을 점하고 있으며, 가막만의 중앙부로부터 남측만 입구는 수질이 양호하여 미국 식품의약품국(FDA)

†Corresponding author: leemo@jnu.ac.kr

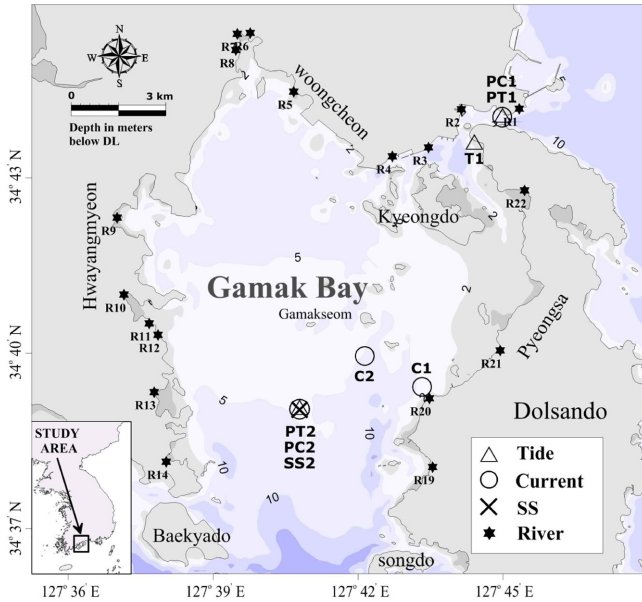


Fig. 1. Bathymetric topography and oceanographic stations for tide, current, SS, and freshwater discharge.

에 의해 청정해역으로 지정, 관리되고 있다(MOMAF[2001]). 그러나 1960년대 이후 여수시의 급격한 도시화와 인근 연안역의 대규모적인 산업단지 조성으로 상당한 기간 동안 생활하수와 산업 오폐수가 제대로 정화되지 않은 채 가막만 내로 계속 유입되었다. 여기에 더하여 만내의 과밀한 패류 양식시설과 가두리 양식장의 부적절한 관리, 자가 오염 등으로 인하여 가막만의 생태환경은 악화 일로에 놓여 있다(Je *et al.*[2008], Park[2003]). 특히, 만의 북서 내만역과 남쪽 만 입구에서는 높은 유기물 농도를 보이고 있는데, 이는 육상으로부터의 생활하수 또는 산업폐수의 유입, 그리고 분지형태를 가진 지형적 특성 때문에 유입한 오염물질이 장기체류하여 저질이 유기오염된 결과이다(Noh *et al.*[2006]). 이 결과, 1982년부터 1993년까지 약 10여 년간 거의 매년 하계를 중심으로 적조가 발생하여 만내의 양식 산업에 큰 피해를 가져왔으며, 1995년 이후는 유독성 외편모조류인 *Cochlodinium polykrikoides* 적조가 거의 매년 발생하여 수산생물에 대한 피해를 더욱 가중시키고 있다. Cho *et al.*[1994]은 이러한 적조발생이 부영양화로 인한 만내 유기물질 농도의 증가 때문이라고 지적하였다.

지금까지 가막만은 Cho *et al.*[1994], Je *et al.*[2008], Noh *et al.*[2006] 등이 가막만의 수질 및 저질 환경의 계절 변화에 관하여 연구하였다. 그러나, 수질 및 저질 환경을 해수흐름과 비교한 이들의 연구는 대부분 최소 10년 전의 자료를 바탕으로 하였고 또한, 이들 양자간의 관계를 간접적으로만 비교하였다. 한편, Lee[1992]에 의해 선구적으로 가막만의 해수흐름에 대한 본격적인 현장조사를 실시한 이래, Park *et al.*[1999], Lee and Park[2004], Lee and Kim[2009] 등은 해수흐름에 미치는 바람의 효과에 관해 연구하였다. 그러나, 이들 연구 역시 수질 및 저질 환경 등과 같은 타 분야와의 융합적인 연구 결과는 제시하지 못하였다. 그럼에도 불구하고 이

들 연구에서는 가막만의 해수유동은 물론, 수질이나 저질 환경에 미치는 바람의 효과를 결코 무시할 수 없음을 지적하였다. 따라서, 본 연구는 수치실험을 통해 바람에 의해 계절적으로 변화하는 만내 흐름이 퇴적 환경에 어떻게 영향을 미치는가를 정량적으로 검토하였으며, 타 연구자들의 결과와도 비교하여 종합적으로 가막만 퇴적 환경의 특성을 규명하기 위해 수행되었다.

## 2. 재료 및 방법

먼저, 가막만 표층 퇴적물 이동 실험의 주요 입력 자료인 침식임계 전단응력을 모델 영역에 공간적으로 설정하기 위하여 Lee *et al.*[1995]이 1994년 가막만의 표층 퇴적물 특성을 파악하기 위하여 수행한 입도자료와 NFRDI[2009]이 어장환경 실태 조사시 수행한 3월과 8월의 퇴적물 입도자료를 이용하였다. 또한, 해수유동 및 퇴적물 이동 실험을 위한 육상으로부터의 유입 하천수는 NFRDI[2009] 자료를 활용하였다. 참고로, NFRDI[2009]은 2009년 3월부터 12월 까지 가막만으로 유입되는 주요하천 22개에 대하여 일반 수질 및 부하량에 대하여 매월 1회 조사를 실시하였다. 연구 대상 해역에서의 계절별 해수유동 재현과 퇴적물 이동 실험을 위한 수치모형으로는 EFDC(Environmental Fluid Dynamics Code)를 사용하였다. EFDC 모형은 미국 VIMS(Virginia Institute of Marine Science)에서 개발되었으며, 연안, 하구, 호소, 습지, 저수지 등의 유동 및 물질수송을 모의할 수 있는 3차원 모델링 시스템이다. 특히 미국 환경청의 공인모델로 지정되어 있으며, 대표적인 수리학(hydrodynamics)적인 연구들로는 미국 버지니아의 James and York Rivers에서 담수유입으로 인한 희석효과(dilution effect), 국내에서는 3차원 수치모델을 이용한 경기만 해수의 시-공간적인 수리학적 거동과 환경조건 변화에 대한 예측 모델링 연구(Jeong[2006]), 남해안의 조위 및 조류거동 수치모의 연구(Kwon and Kang[2007]) 등이 있다.

### 2.1 해수유동 실험

해수유동에 실험에 사용된 EFDC 모델은 연속방정식과 운동방정식, 열염 보존방정식, 그리고 퇴적물을 포함한 물질 보존방정식으로 구성되어 있으며, 열염 보존방정식은 밀도차에 의한 경압력에 의하여 운동방정식과 연계되어 있다. 수직 방향으로  $\sigma$ 좌표계, 수평 방향으로는 직선 또는 직교곡선좌표계를 사용하며, 수직 외동점성계수의 산정에는 Mellor and Yamada[1982]의 level 2.5 turbulence closure scheme, 수평외동 점성계수는 Smagorinsky type diffusivity를 사용한다. 또한 mass conservation scheme을 사용한 조건대 처리가 가능하며, 유체정력학적 가정과 Boussinesq 근사를 적용하여 수심 적분된 기본방정식을 사용한다. 특히, 계절별 해수유동을 재현하기 위한 바람에 의한 해수면 전단응력은 다음과 같다.

$$(\tau_{sx}, \tau_{sy}) = c_s \sqrt{U_w^2 + V_w^2} (U_w, V_w) \quad (1)$$

$$c_s = 0.001 \rho_s \rho_w^{-1} (0.8 + 0.065 \sqrt{U_w^2 + V_w^2}) \quad (2)$$

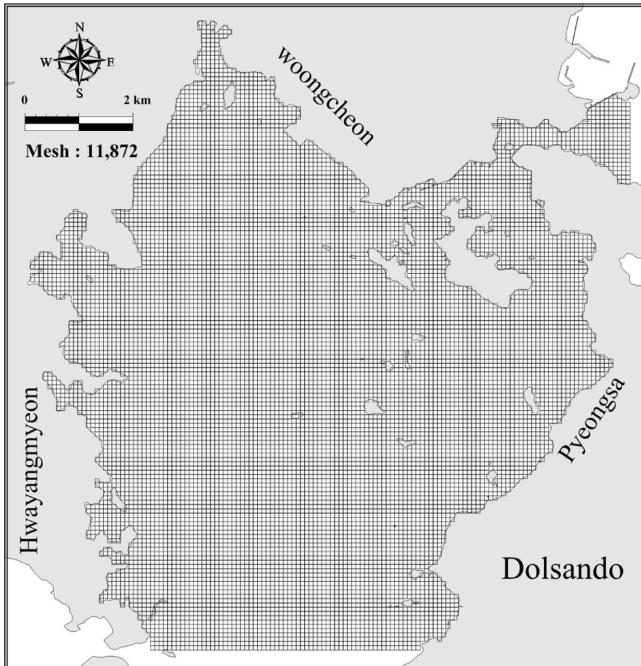


Fig. 2. Computational grid system for EFDC model.

여기서,  $\tau_{sx}$ ,  $\tau_{sy}$ 는 x, y 방향의 바람응력( $N/m^2$ ),  $U_w$ ,  $V_w$ 는 x, y 방향풍속(m/s),  $c_s$ 는 해수면 마찰계수,  $\rho_a$ 는 공기밀도( $kg/m^3$ ),  $\rho_w$ 는 해수밀도( $kg/m^3$ )를 나타낸다.

가막만 수치실험의 계산영역은 동서로 14.7 km, 남북으로 15.4 km로 설정하였으며, 총 격자수는 11,872개, 격자간격은 100m이다. 수직적으로는 가막만 북서내만역의 평균해면상의 평균수심을 고려하여 1층/1 m를 고려할 수 있도록 7개 층을 고려하였다. 모형의 수심은 국립해양조사원의 최신 해도자료를 보간하여 사용하였다. 모델에 입력된 격자망도는 Fig. 2와 같다. 검증용 실험에서 담수 방류는 없는 것으로 가정하였고, 계절별 실험에서는 NFRDI[2009]의 자료를 계절별로 평균하여 정리하였다. 바람조건은 여수기상대 자료를 이용하였으며, 계절별로 출현율이 높은 풍향을 선정한 후, 여수기상대의 30년간 자료 중 동일 풍향에 대하여 풍속을 평균하였다. 층계는 바람의 출현율이 유사한 3개의 풍향(NE, SW, WNW)에 대하여 모두 고려하였다. 가막만에 유입되는 22곳의 주요하천에 대한 유량 자료를 Table 1에 나타내었으며, 유사부하량은 고려하지 않았다. 하천위치는 Fig. 1, 해수유동 실험에 입력되는 바람자료는 Table 2에 제시하였다.

## 2.2 퇴적물 이동 실험

퇴적물 이동 실험에 사용된 모형은 EFDC의 퇴적모듈로서 DiToro and Fitzpatrick[1993]에 의하여 개발된 CE-QUAL-ICM의 퇴적물 부분을 기본으로 하고 있으며, 점착성과 비점착성의 다양한 크기를 가진 입자를 고려할 수 있다. 또한, 퇴적물의 침강, 퇴적, 침식, 재부유, 이류, 확산 및 소류를 모의할 수 있으며, 파랑에 의한 저면 전단응력의 증가 효과를 고려할 수 있다. 파랑과 흐름의 상호작용에 의한

Table 1. Freshwater discharge from the source points on land (Unit :  $m^3/s$ )

Station	Spring	Summer	Autumn	Winter
R1	0.574	0.608	0.728	0.779
R2	0.108	0.170	0.063	0.058
R3	0.011	0.010	0.004	0.007
R4	0.032	0.031	0.044	0.032
R5	0.071	0.091	0.000	0.000
R6	0.059	0.071	0.028	0.044
R7	0.061	0.032	0.018	0.021
R8	0.084	0.066	0.064	0.072
R9	0.018	0.023	0.003	0.002
R10	0.033	0.043	0.004	0.001
R11	0.000	0.014	0.003	0.000
R12	0.000	0.025	0.003	0.002
R13	0.086	0.069	0.009	0.002
R14	0.006	0.005	0.000	0.000
R19	0.038	0.102	0.040	0.046
R20	0.029	0.019	0.005	0.032
R21	0.026	0.009	0.000	0.000
R22	0.021	0.026	0.037	0.028

Table 2. Wind conditions for morphological change computations in the hydrodynamic model

Case	Wind Direction	Wind Speed (m/s)	Season
Case W1	-	-	No wind
Case W2	NE	4.94	Spring
	SW	4.27	
Case W3	WNW	6.40	Summer
	SSW	4.27	
Case W4	NE	5.55	Autumn
Case W5	NW	6.83	Winter

저면 전단응력  $\tau_{cw}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\tau_{cw} = \tau_c + \tau_w \quad (3)$$

여기서,  $\tau_c$ 는 흐름에 의한 저면 전단응력( $N/m^2$ ),  $\tau_w$ 는 파랑에 의한 저면 전단응력( $N/m^2$ )을 나타낸다. 먼저 파랑의 영향이 없는 저면에서 해조류에 의해 가해지는 전단응력  $\tau_c$ 는 다음과 같이 계산된다 (Bijker[1986]).

$$\tau_c = \frac{1}{8} \rho f_c u^2 \quad (4)$$

여기서,  $\rho$ 는 해수밀도( $kg/m^3$ ),  $f_c$ 는 저면마찰계수(-),  $u$ 는 수심평균 유속(m/s)을 나타낸다. 파랑경계층에서 파랑에 의한 케도유속에 의해 해저면에 가해지는 전단응력,  $\tau_w$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\tau_w = \tau_w = \frac{1}{4} \rho f_w U_b^2 \quad (5)$$

여기서,  $f_w$ 는 파 마찰계수,  $U_b$ 는 파 경계층에서 파랑에 의한 수립자의 최대유속(m/s)을 나타낸다.

연구 해역의 대조차는 3.6 m 정도이나, 가막만의 동측은 수심이 얇고, 북서내만역과 만 남측은 수심이 깊기 때문에 조위의 승강에 따라 파랑의 전파 양상이 크게 달라진다. 따라서, 조위에 따른 파고와 파장 분포의 변화를 고려하기 위하여 약최고고조위, 평균해면, 약최저저조위일 때에 대하여 각각 파랑 수치모형 실험을 수행하였으며, 임의의 조위( $\eta$ )에서의 파고( $H_t$ )를 다음과 같이 보간하여 적용하였다.

$$\begin{aligned} \eta_{hw} \leq \eta_t & : H_t = H_{hw} \\ \eta_{msl} \leq \eta_t < \eta_{hw} & : H_t = H_{msl} + (H_{hw} - H_{msl}) \frac{\eta_t - \eta_{msl}}{\eta_{hw} - \eta_{msl}} \\ \eta_{lw} \leq \eta_t < \eta_{msl} & : H_t = H_{lw} + (H_{msl} - H_{lw}) \frac{\eta_t - \eta_{lw}}{\eta_{msl} - \eta_{lw}} \\ \eta_t \leq \eta_{lw} & : H_t = H_{lw} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서,  $\eta_t$ 는 임의의 조위(m),  $\eta_{hw}$ 는 약최고고조위(m),  $\eta_{msl}$ 는 평균해면(m),  $\eta_{lw}$ 는 약최저저조위(m),  $H_t$ 는 임의의 조위의 파고(m),  $H_{hw}$ 는 약최고고조위의 파고(m),  $H_{msl}$ 는 평균 해면상의 파고(m),  $H_{lw}$ 는 약최저저조위의 파고(m)를 나타낸다.

또한, 퇴적물의 재부유와 퇴적은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_c = S_D + S_E \quad (7)$$

여기서,  $S_c$ 는 수주내의 부유 퇴적물량,  $S_D$ 는 단위시간 및 단위면적당 저면으로의 퇴적량,  $S_E$ 는 단위시간, 단위면적당 저면으로부터의 재부유량(침식량)이다.

수주로부터 저면으로 점성 부유 퇴적물의 플럭스는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} S_D = w_s S_c \left( \frac{\tau_d - \tau_b}{\tau_d} \right) : \tau_b \leq \tau_d \\ S_D = 0 : \tau_b \geq \tau_d \end{aligned} \quad (8)$$

여기서,  $\tau_b$ 는 해저면에 가해지는 전단응력( $N/m^2$ ),  $\tau_d$ 는 퇴적한계 전단응력( $N/m^2$ )를 나타낸다.

점성 퇴적물의 침강속도는 널리 사용되고 있는 Ariathurai and Krone[1976]의 실험식을 사용하였다.

$$w_s = w_{s0} \left( \frac{C}{C_0} \right)^\alpha \quad (9)$$

여기서,  $w_s$ 는 부유 퇴적물의 침강속도(m/s),  $w_{s0}$ 는 부유 퇴적물의 기준침강속도(m/s),  $C$ 는 부유 퇴적물의 농도(mg/L),  $C_0$ 는 부유 퇴적물의 기준농도(mg/L),  $\alpha$ 는 침강계수(-)를 나타낸다.

저면으로부터 수주로의 퇴적물 플럭스는 다음과 같이 침식율과 해저면에 가해지는 전단응력( $\tau_b$ ) 그리고 침식한계 전단응력( $\tau_{ce}$ )의 함수로 나타낼 수 있다.

$$S_E = \frac{dm_s}{dt} \left( \frac{\tau_b - \tau_{ce}}{\tau_{ce}} \right)^3 : \tau_b \geq \tau_{ce} \quad (10)$$

여기서,  $\tau_{ce}$ 는 침식한계 전단응력( $N/m^2$ ),  $dm_s/dt$ 는 기준침식율( $g \cdot s \cdot m^{-2}$ ),  $\beta$ 는 실험상수를 나타낸다.

침식한계 전단응력은 다음과 같이 결보기 밀도와 관련된다(Villaret and Paulic[1986]).

$$\tau_{ce} = \zeta(\rho_b - 1) \quad (11)$$

$$\rho_b = \rho + \left( \frac{\rho_s - \rho}{\rho_s} \right) \rho_d \quad (12)$$

$$\rho_d = 480\gamma + (1300 - 280\gamma)P_{sand}^{0.8} \quad (13)$$

여기서,  $\rho_b$ 는 결보기 밀도( $g/cm^3$ ),  $\zeta$ 는 실험상수(-),  $\rho_d$ 는 건조밀도( $g/cm^3$ ),  $\rho_s$ 는 퇴적물밀도( $g/cm^3$ ),  $P_{sand}$ 는 사질 함량비(0.0-1.0)(-),  $\gamma$ 는 압밀계수(0-2.4)(-)를 나타낸다.

퇴적물 이동 실험을 위한 계산영역 및 격자체계는 해수유동 실험과 동일하며, 실험은 1년을 계절별(춘계, 하계, 추계, 동계)로 구분하여 계절별 주 풍향에 대하여 15일간 각각 수행하였다. 각 계절별 실험 결과를 '바람 고려'와 '바람 미고려'에 대한 지속기간을 합산한 후 각 계절별 퇴적율을 산출하였다. Table 3에 퇴적물이동 실험안을 제시하였으며, 지속일수는 바람이 계절에 따라 주 풍향으로 불었던 일수이다.

퇴적물은 주로 조류와 파랑에 의해서 영향을 받는데 특히 대조기에는 강한 조류와 고파랑에 의해서 재 부유되어 이동되고, 조류와 바람에 의해 재 부유된 퇴적물이 이동하게 된다. 퇴적물 이동 실험은 이러한 외력 조건을 고려하기 위하여, 계절별 바람을 고려한 해수 유동장 및 파랑장을 입력자료로 이용하였다. 현상태의 경우 계산 초기에는 전 계산영역의 수위와 유속을 0으로 하는 cold start를 부여하였으며, 이때 수위는 평균해면(MSL) 기준이다. 개방경계에서 주요 5개 분조( $M_2$ ,  $S_2$ ,  $N_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ )의 조화상수를 합성하여 매 계산 시간마다 입력하였다.

Lee *et al.*[1995]은 가막만 표층퇴적물은 주로 silt(40~60%)와 clay(30~50%)로 구성되며, 평균입도는 6~9 $\phi$ , 퇴적상은 Clayer Silt Facies를 중심으로 Sandy Clay Facies, Silty Clay Facies를 수반하는 세립질 퇴적상의 특징을 보인다고 보고하였다. 또한, NFRDI[2009]에서 2009년 3월과 8월에 표층퇴적물 입도분석을 수행한 결과, 가막만의 북동측 여수항 입구를 제외한 가막만의 모든 정점에서 모래

**Table 3.** Wind conditions for morphological change computations in the sediment transport simulation

Case	Season	Wind	Duration (Day)	
Case SP_NE		NE	10	
Case SP_SW	Spring	SW	9	92
Case SP_WNW		WNW	7	
Case SP_No wind		-	66	
Case SU_SSW	Summer	SSW	12	92
Case SU_No wind		-	80	
Case AU_NE		Autumn	NE	
Case AU_No wind	-		76	
Case WI_NW	Winter		NW	19
Case WI_No wind		-	71	

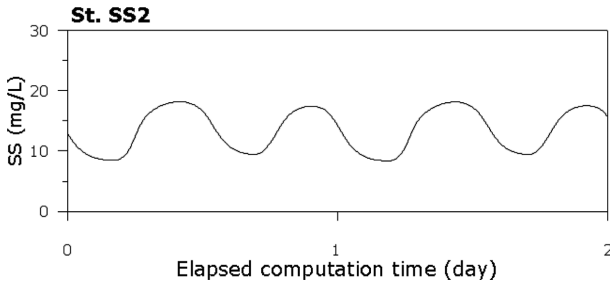


Fig. 3. Computation of SS at PC2.

함량이 2.98% 및 3.14%이하인 것으로 보고하였다. 따라서, 본 연구에서의 퇴적물 입력조건은 Lee *et al.*[1995] 및 NFRDI[2009]의 기존 연구결과 자료를 충분히 활용하고 퇴적입계 전단응력, 침강속도, 침식계수 등은 정점 SS에서 관측한 부유사 양상(Fig. 3)과 210Pb 분석을 통한 퇴적물 결과(기존자료)를 이용하여 시행착오법을 통하여 값을 설정하였다. 초기 및 외해 경계의 부유 퇴적물 농도와 하천 수로부터 유입되는 부유 퇴적물 유입 농도는 NFRDI[2009]의 관측 자료를 참고하여 결정하였다. 해저면에 가해지는 저면 전단응력을 계산하기 위해 사용하는 해저면 조도( $k_s$ )는 Soulsby[1983]의 연구결과 및 검증 실험을 통해 0.01 m로 적용하였다.

흐름과 파랑에 의한 전단응력이 퇴적입계 전단응력( $\tau_d$ )보다 작아지면 퇴적이 일어나기 시작한다. 일반적으로 퇴적입계 전단응력은 0.04~0.15 N/m<sup>2</sup>를 사용하는데(Mehta[1986]), 본 실험에서는 검증 실험을 통해 0.15 N/m<sup>2</sup>로 적용하였다. 기준 침강속도는 Lee *et al.* [1995]과 NFRDI[2009]의 표층 퇴적물의 입도분석 자료 및 검증 실험을 통해 0.01 mm/s를 사용하였으며, 부유사 기준 농도( $C_0$ )는 초기 농도와 동일하게 적용하고 침강계수( $\alpha$ )는 검증실험을 통해 0.0으로 적용하였다. 기준 침식율( $dm_d/dt$ )과 실험상수( $\beta$ )는 검증 실험을 통해 각각 0.003 g/s·m<sup>2</sup>과 1.0으로 적용하였으며, 침식한계 전단응력( $\tau_{ce}$ )은 Villaret and Paulic[1986]의 실험식과 Lee *et al.*[1995]의 자료를 이용하여 공간적으로 다르게 적용하였다. 침식한계 전단응력을 공간적으로 다르게 적용한 것은 공간적으로 해저질 입경의 크기가 다르고 입경 크기에 따라 부유되는 전단응력도 다르기 때문이다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 모델 보정 및 검증

모델 보정 및 검증을 위하여 PT1, PT2에서 관측한 조석 2개 정점과 PC1, PC2에서 관측한 조류 2개 정점의 실험 자료를 이용하여 조석 및 조류 검증을 수행하였다. 또한 모델 결과의 추가 보정 및 검

Table 4. Input data for sediment transport simulation

Parameter	Input data				Set up basis		
	Spr.	Sum.	Aut.	Win.			
SS Condition	Cint (mg/L)	Initial Condition	25.7	19.9	26.0	17.2	· Lee <i>et al.</i> [1995] · NFRDI [2009]
	Cobc (mg/L)	Boundary	25.7	19.9	26.0	17.2	· Existing data
	Csource (mg/L)	River	18.2	21.0	30.6	16.4	· NFRDI [2009]
Bottom	$k_s$ (m)	Roughness			0.01		· Research of Soulsby [1983] & Verification experiment
	$\tau_d$ (N/m <sup>2</sup> )	Deposition shear stress			0.15		· Research of Mehta [1986] & Verification experiment
Deposition	$W_{s0}$ (mm/s)	Settling velocity			0.01		· Grain size of surf. sediment & Verification experiment
	$\alpha$ (-)	SS Settling coefficient			0.0		· Verification experiment
	$dm_d/dt$ (g/s·m <sup>2</sup> )	Criteria Erosion rate (coefficient)			0.003		· Verification experiment
Erosion	$\beta$ (-)	Experiment constant			1.0		· Verification experiment
	$\tau_{ce}$ (N/m <sup>2</sup> )	Erosion shear stress			0.14~0.67		· Empirical formula of Villaret and Paulic [1986] and surface sediment

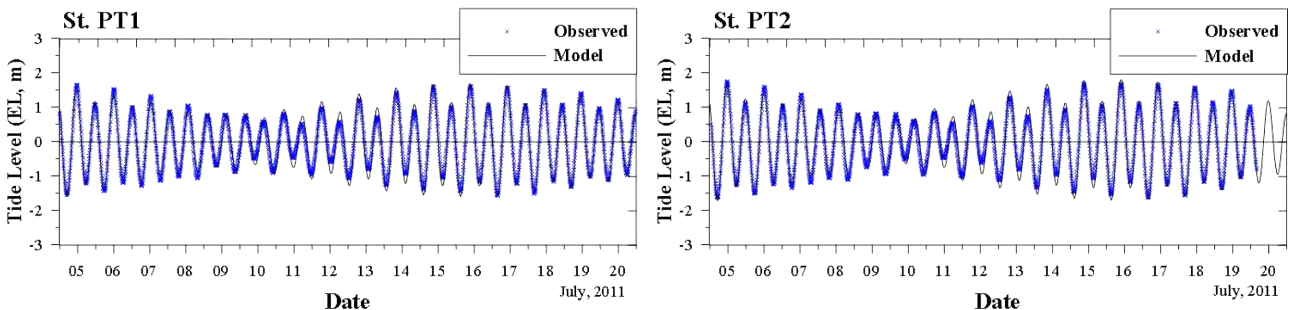


Fig. 4. Comparisons between the observed and computed tides at PT1 & PT2.

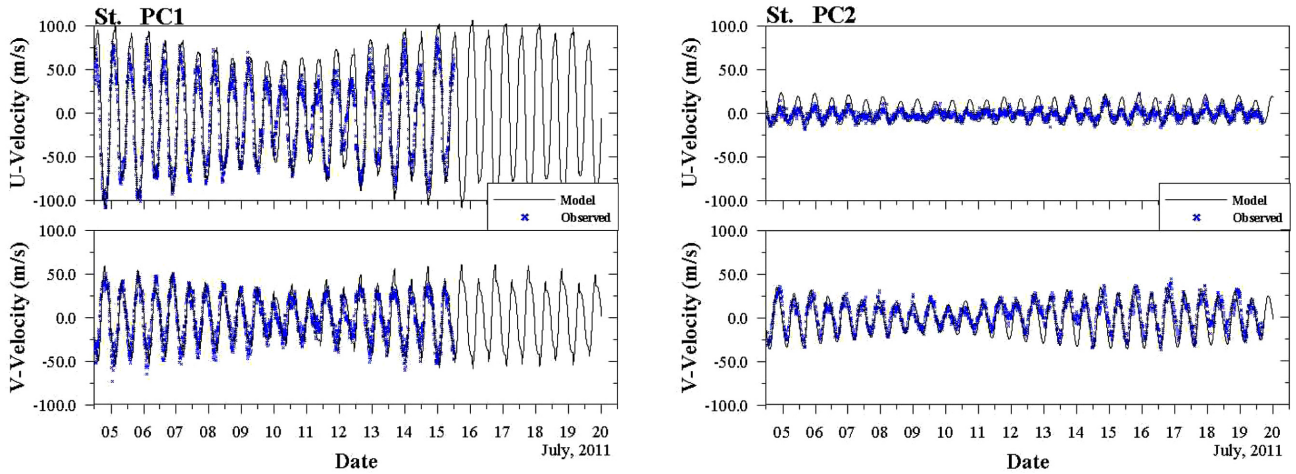


Fig. 5. Comparisons between the observed and computed tidal currents at PT1 & PT2.

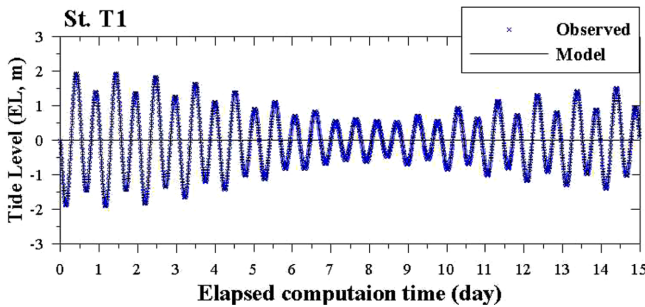


Fig. 6. Comparison between the observed and computed tides at T1.

증을 위하여 T1 및 C1, C2에서 관측한 자료를 조화분석한 후 주요 5개 분조( $M_2$ ,  $S_2$ ,  $N_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ )의 반조차와 지각을 비교하여 제시하였다. 실측 자료로 검증한 해수유동 모형의 조위 및 조류에 대한 보정 및 검증 결과를 Fig. 4와 Fig. 5에 제시하였으며 또한, 조석 및 조류에 대한 모델 결과치와 조화 분석하여 재구성한 결과를 Fig. 6과 Fig. 7에 제시하였다. 실측 자료 및 조화분해를 통하여 관측치와 모델치를 비교한 결과 모델이 대상 해역의 조석과 조류를 잘 재현하고 있는 것으로 판단된다.

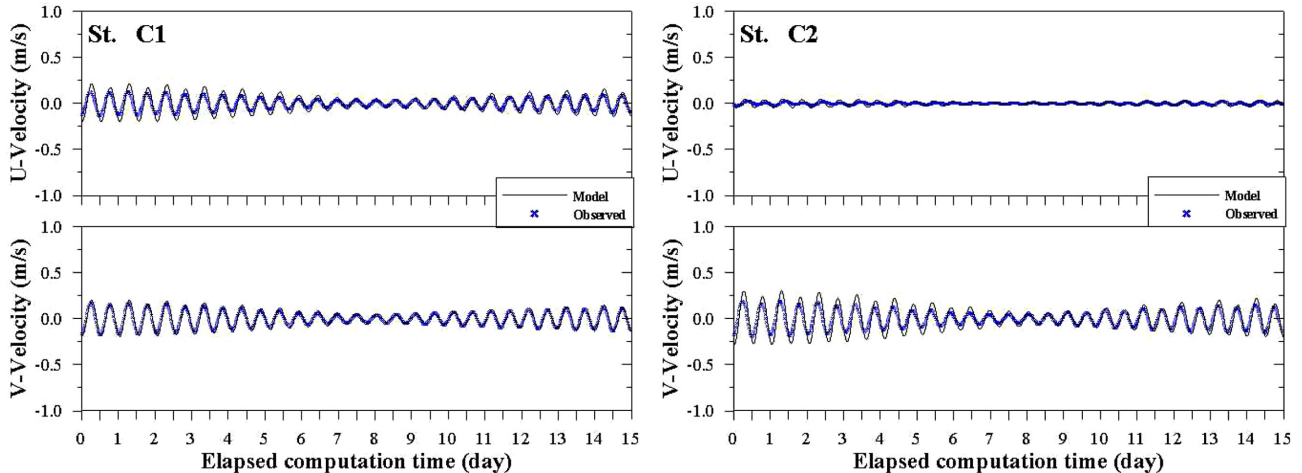


Fig. 7. Comparison between the observed and computed tidal currents at C1 & C2.

### 3.2 해수유동에 미치는 바람의 영향

바람에 의한 해수유동의 변화를 파악하고자 바람을 고려하지 않았을 경우와 계절별 대표 바람을 고려하였을 경우의 해수유동 변화를 검토하였다. 먼저, Fig. 8은 바람을 고려하지 않은 경우의 최강창·낙조류이며, Fig. 9~11은 각 계절별로 바람을 고려한 경우의 흐름 패턴에서 바람을 고려하지 않은 경우의 흐름 패턴을 뺀, 즉 흐름 패턴의 차이를 나타낸다. 그림 중 붉은 색으로 표기된 부분 중 - 값은 유속이 감소한 지역이며, + 값은 유속이 증가한 지역을 의미한다. 단, 여기서 춘계는 뚜렷한 탁월풍이 존재하지 않아, 흐름 패턴의 차이를 제시하지 않았다.

먼저, 바람을 고려하지 않은 경우의 가막만의 조류는 창조시 가막만 남측과 동측으로 유입된 해수는 대경도 남단과 소경도 북단에서 두 해수가 상접하고, 낙조시 이와 반대로 유출한다. 남측 만입구로부터 유입된 해수는 가막만 북측 수심이 깊어지는 해역에서 유속이 급격하게 감소한다. 창·낙조시 최강유속은 가막만 입구인 북동측에서 약 120 cm/s 정도로 나타난다.

한편, 하계는 탁월풍이 남남서풍으로, 바람을 고려하지 않았을 경우에 비하여 창조시 만의 남동부에서 유속이 다소 감소한 것으로 나

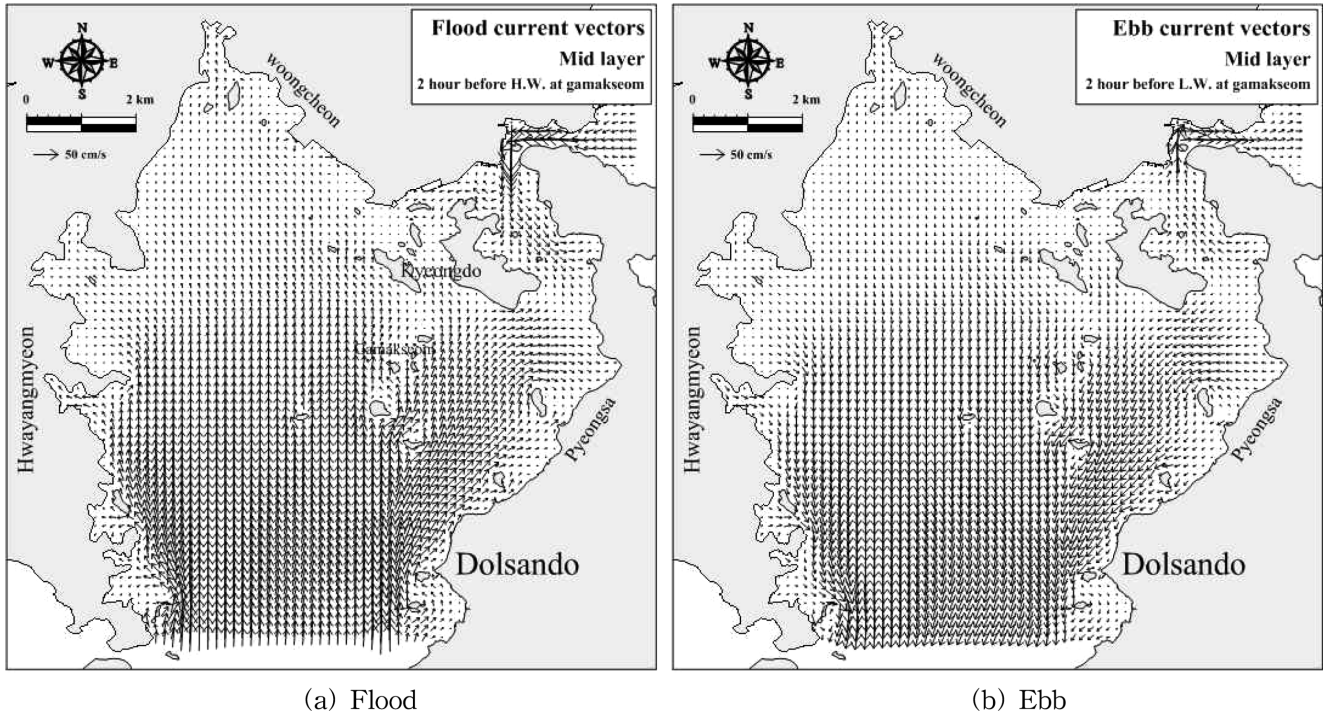


Fig. 8. Flow patterns for no wind forcing.

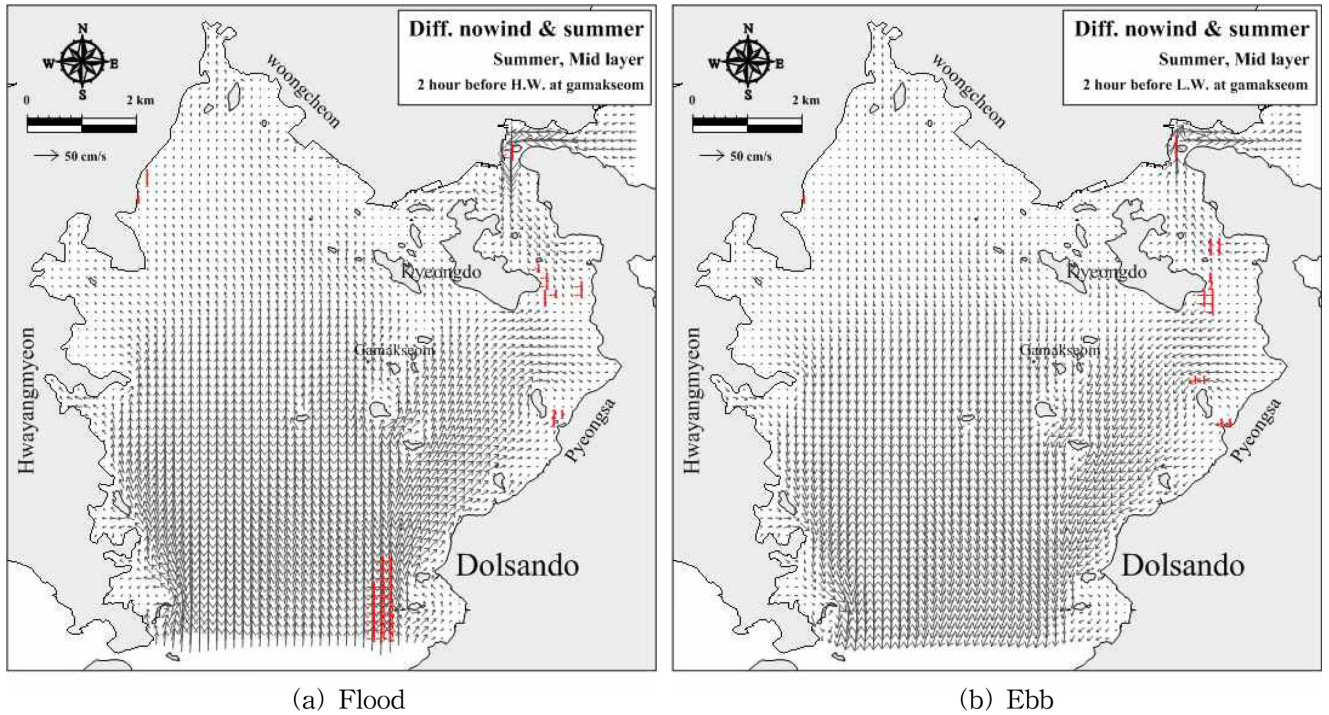


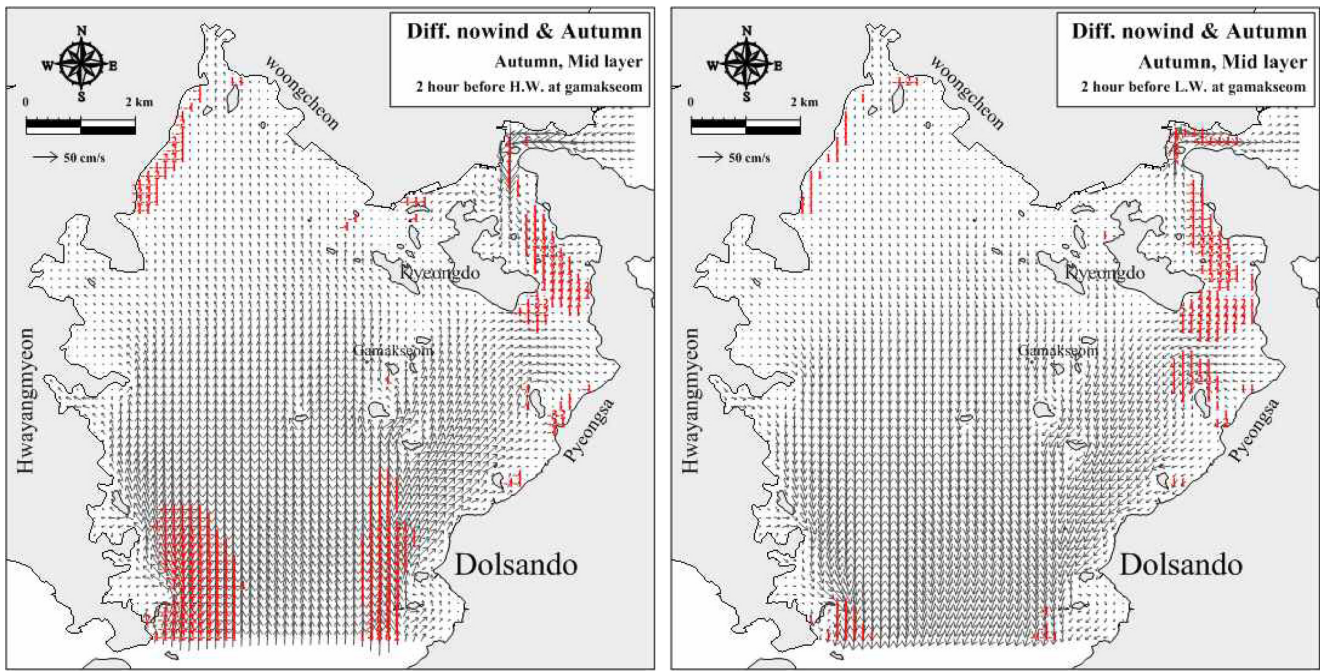
Fig. 9. Flow patterns in summer.

타났다. 추계는 탁월풍이 북동풍으로, 창조시에는 가막만 북서부 및 남서부에서의 유속은 감소하나, 만의 북동부 및 남동부에서의 유속은 증가하였다. 반면, 낙조시에는 대경도 북동측에서 유속이 감소하고 대경도 남동측에서 유속이 증가하였다. 동계는 탁월풍이 북서풍으로 창조시에 만의 남서부에서는 유속이 증가하였으나, 대부분 연

안에서의 유속은 감소하였다.

### 3.3 퇴적 작용에 미치는 바람의 영향

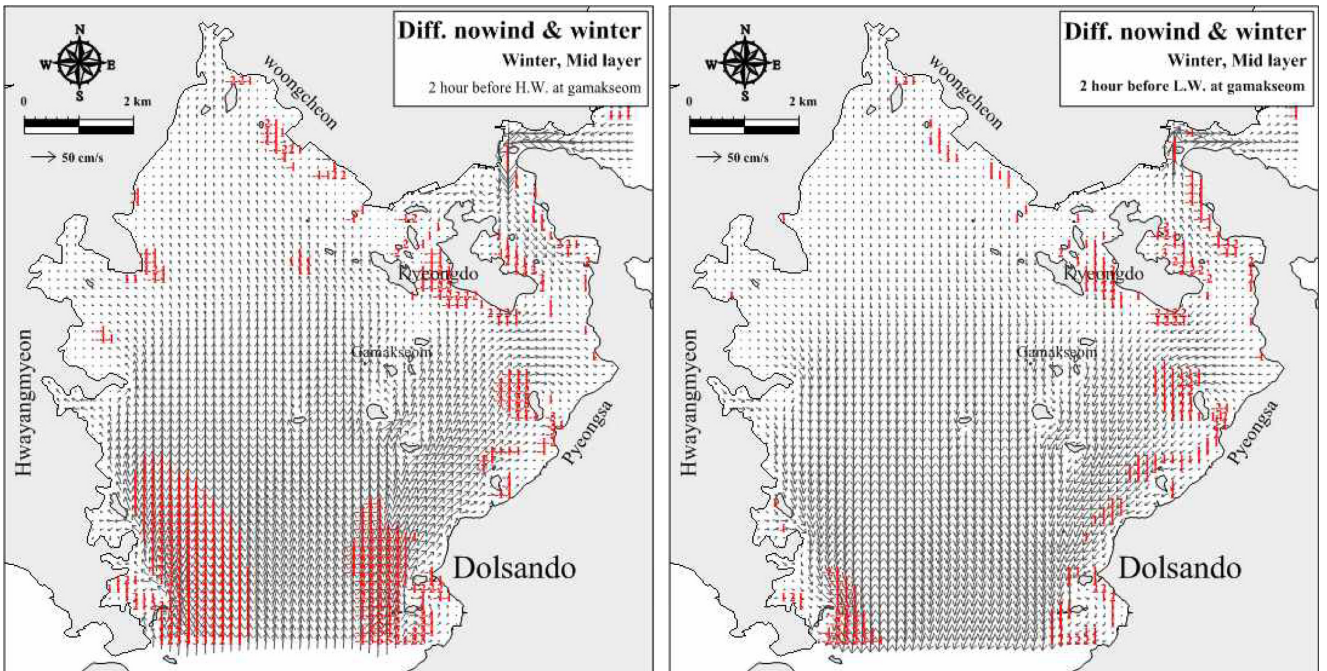
바람이 표층 퇴적물의 퇴적 작용에 어떠한 영향을 미치는가를 검토하기 위하여 각 계절에 따른 평균 풍향과 풍속을 사용하여 퇴적



(a) Flood

(b) Ebb

Fig. 10. Flow patterns in autumn.



(a) Flood

(b) Ebb

Fig. 11. Flow patterns in winter.

물 이동 실험을 수행하였다. 수치실험결과에서 나타난 연간 침식율 및 퇴적율의 분포는 Fig. 12와 같고, 또한 각 계절별 침식율 및 퇴적율의 분포는 Fig. 13 및 Fig. 14와 같다. 먼저, 연간 퇴적 작용의 변화를 보여 주는 Fig. 12의 결과에 따르면, 정점 PS1과 PS3에서의 퇴적율은 각각 6.3 mm/year과 6.1 mm/year로 나타났는데, 이들 값은

Jung[2011]과 kim[2002]이 210Pb 분석을 통해 추정된 퇴적속도인 6.4 mm/year 및 6.5 mm/year와 유사하였다. 반면, kim[2002]이 정점 PS2 및 PS4에서 얻은 퇴적율 0.90 cm/year 및 1.14 cm/year와는 상당한 차이를 나타내었다. 이것은 정점 PS2의 경우, 관측시점이 대규모 준설사업 시행 이전인 2000년으로 생활하수와 산업폐수 등이 만



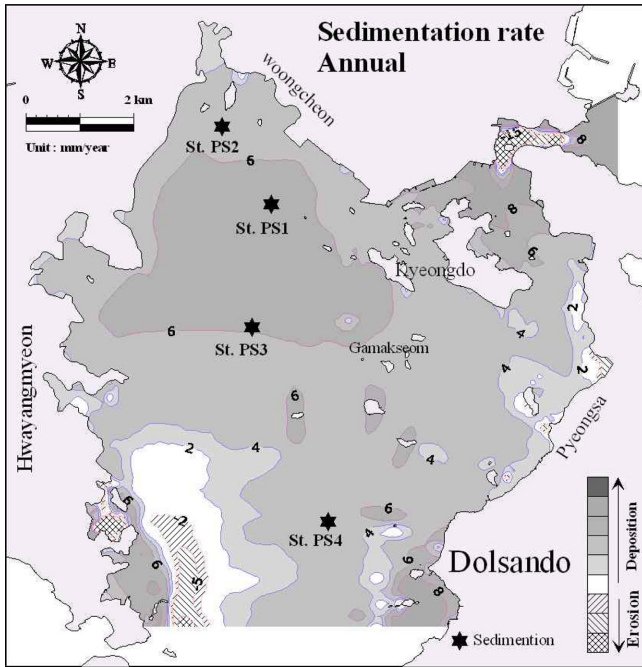


Fig. 12. Distributions of yearly deposition rates/erosion rates.

의 북부로 유입되고 있었던 시기였다는 점에서 그 이유를 찾을 수 있다. 왜냐 하면, 실제 모델의 입력자료로서 채용된 값은 2009년의 관측자료로서 2005년 1월 1일 이후 하수종말처리장을 운영함에 따라 웅천과 소호동측으로 유입되는 퇴적물의 공급원이 현저히 줄어들었기 때문이다. 한편, 정점 PS4에서의 퇴적율의 차이는, 이 지역은 굴양식이 성행하여 굴의 배설물은 물론 굴양식장에 부착된 고형

물질 등의 침강 퇴적에 의해 관측치가 계산치에 비해 더 높게 나타난 것으로 판단된다(kim[2002]). 또한, 해수의 유출입이 빈번한 가막만의 북동쪽과 남쪽의 두 개의 만구 부근에서는 침식이 다소 우세하나, 그 외 대부분의 수역에서는 퇴적이 우세하게 나타났다. 특히, 경도의 북동측과 만의 남동측에서는 연간 퇴적율이 최대 8 mm/year로 나타났고, 북서내만의 수심이 비교적 깊은 수역에서도 연간 퇴적율이 6 mm/year 이상을 보였다.

한편, 계절에 따른 퇴적 작용의 변화를 보여주는 Fig. 13 및 Fig. 14에 의하면, 먼저, 탁월풍 없이 북동, 서북서, 남서풍이 유사한 출현율을 보이는 춘계의 경우, 만입구인 북동측, 중앙부 서측 그리고 만의 일부지역에서 국부적으로 침식이 발생하지만 대부분 해역에서는 퇴적이 우세하였다. 특히, 수심이 깊은 만의 북부와 경도의 북동부에서는 퇴적율 1.8 mm/3 month 이상을 보였다. 하계는 남남서 및 남풍이 탁월한데, 퇴적 작용은 춘계와 유사하지만, 전체적으로 퇴적율은 춘계보다 작았다. 특히, 수심이 깊은 만의 북부에서 춘계에는 퇴적율이 최대 1.8 mm/3 month를 보인 반면, 하계에는 1.2 mm/3 month였고, 만의 동부에서의 퇴적율은 0.8 mm/3 month 이하를 보였다. 또한, 만 중앙부 서측에서의 침식율도 춘계에 비해 다소 증가하였다. 북동풍이 탁월한 춘계의 퇴적 작용 역시 전술한 춘계 및 하계와 대체로 유사하지만, 평사리 인근을 포함한 만의 동측에서의 퇴적율이 다소 높았다. 또한, 만의 북부에서의 퇴적율은 춘계보다 감소하였으나, 돌산도 서부에서의 퇴적율은 전반적으로 증가하였고, 만 중앙부의 서쪽에서의 침식율도 1.5 mm/3 month로, 타 계절에 비하여 감소하였다. 동계는 북서풍이 우세한데, 전체적인 퇴적 작용은 다른 계절과 거의 유사하지만, 퇴적율이 4계절 중 가장 낮았다. 특히, 만의 북부에서의 퇴적율은 1.2 mm/3 month 이상이지만, 그 출

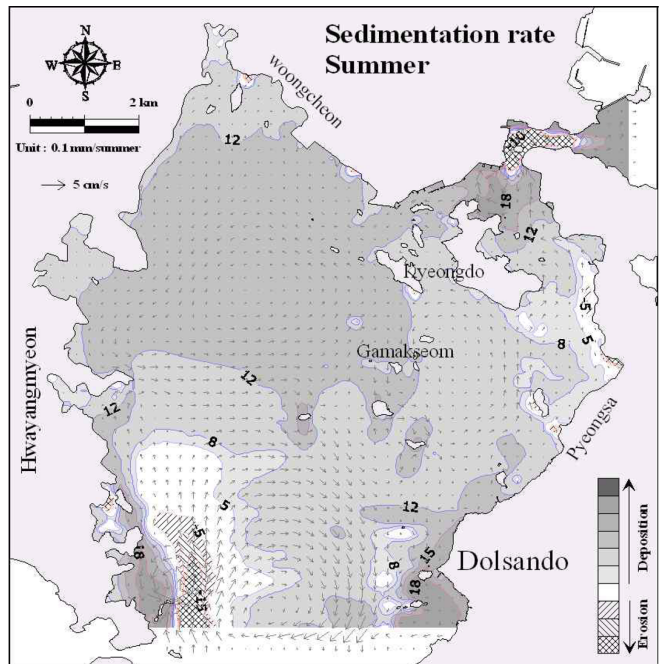
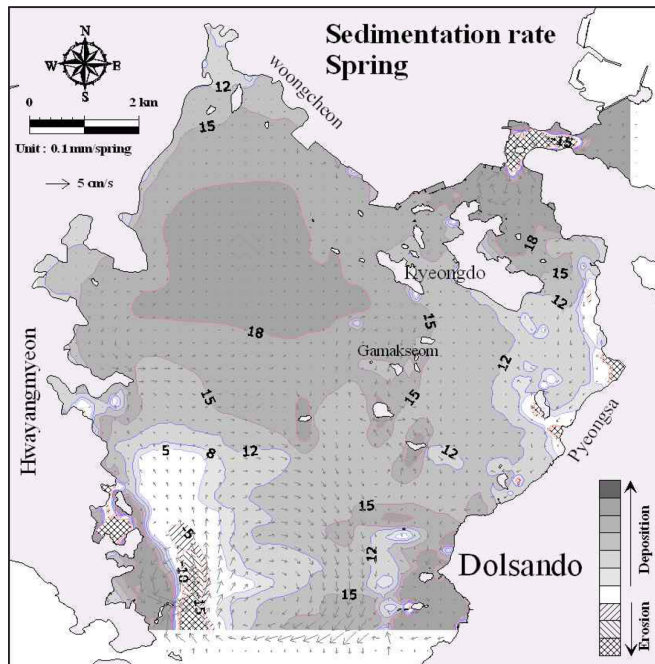


Fig. 13. Distributions of deposition rates/erosion rates in spring and summer.

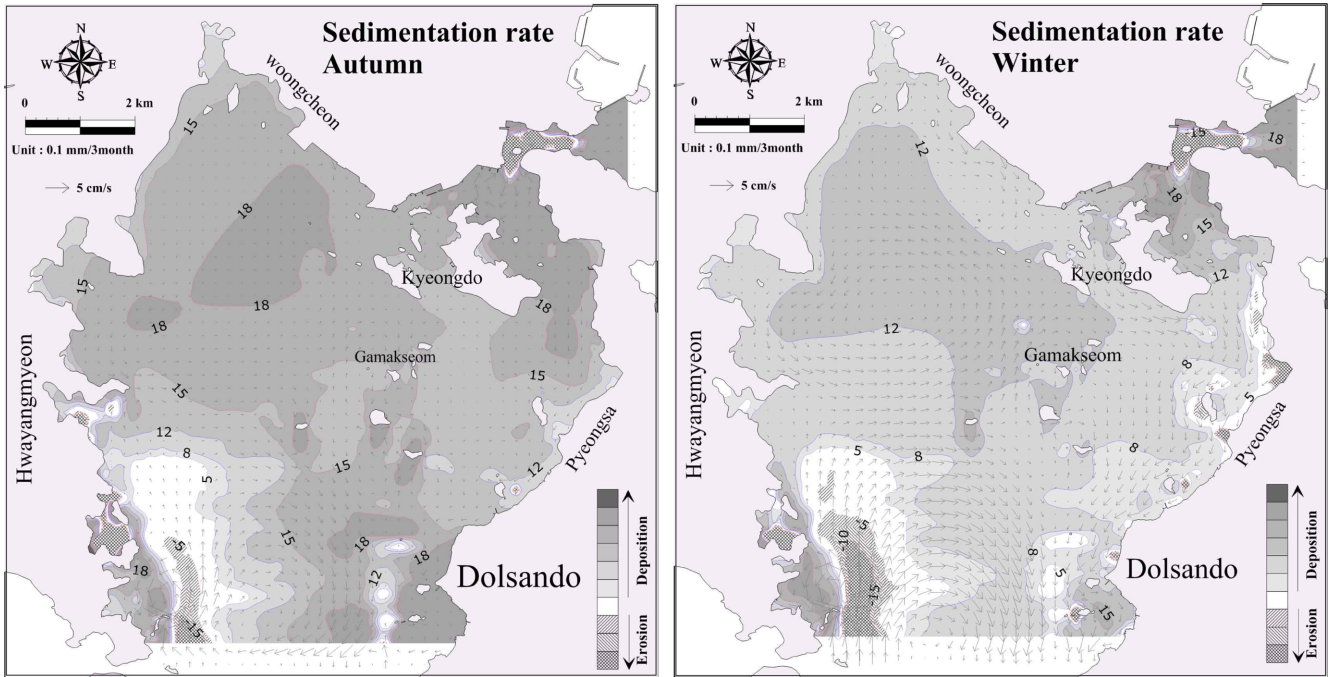


Fig. 14. Distributions of deposition rates/erosion rates in autumn and winter.

현 범위는 하계보다 감소하였다. 또한, 평사리 전면에서 퇴적율은 0.8 mm/3 month로, 퇴적 범위가 하계보다 감소한 반면, 침식구역은 다소 증가하였다. 한편, 만의 남동부에서는 침식 범위가 다른 계절에 비하여 크게 증가한 반면, 돌산도 서부 연안에서는 침식 범위가 국부적으로 증가하였다.

전술한 연간 및 각 계절별 퇴적 작용의 결과를 종합해 보면, 가막만의 중앙부는 북부에 비해 상대적으로 해수의 흐름이 활발하여 퇴적율은 상대적으로 작았다. 또한, 현지조사결과에 따르면, 침식이 우세한 만의 서부에서는 굴양식 시설물이 거의 설치되어 있지 않았고, 굴양식 시설물의 대부분은 연간 퇴적율이 4-6 mm/year인 수역에 위치하고 있는 것으로 나타났다. 따라서, 현재 가막만 중앙부의 저질 오염은 그다지 심각한 상황은 아니나, 굴양식장 기원의 유기 고형물이 이곳에 계속 집적되면, 후후 저질오염은 보다 심각해질 수 있을 것으로 판단된다.

한편, 가막만에서의 각 계절별 퇴적율은 추계 또는 춘계가 가장 컸고, 다음이 하계, 그리고 동계가 가장 작았다. 즉, 탁월풍이 북동풍인 경우의 퇴적율이 가장 컸고, 다음이 남남서풍, 그리고 북서풍인 경우의 퇴적율이 가장 작았다. 이러한 퇴적 작용 분포의 계절적 변화는 Cho *et al.*[1994], Cho *et al.*[2001], Choi *et al.*[2002]이 조사한 가막만의 표층퇴적물에 있어서의 강열감량(IL)의 계절적 변화와 잘 일치하였다. 강열감량(IL)은 퇴적물내에서의 유기물 양을 추정하는 기준의 하나로서, 화학적 산소요구량(COD) 및 산화발성황화물(AVS) 과 같이 저질오염의 기준으로 알려져 있다. 이들 연구자에 의하면, 가막만 표층 퇴적물의 강열감량은 추계와 춘계에는 높았고, 하계와 동계에는 낮았는데, 이는 본 수치실험에서 나타난 퇴적 실험결과와 정성적으로 일치한다. 또한, Je *et al.*[2008]이 2007년부

터 2008년까지 가막만의 전역에서 실시한 표층 퇴적물에 대한 강열감량도 추계와 춘계에는 각각 7.4%와 7.2%로, 동계의 6.1%에 비해 높았다. 한편, Choi *et al.*[2002]은 가막만내 패류양식장의 저질을 분석한 결과, 강열감량은 4월에 6.0~11.5%, 11월에 7.6~15.7%로, 7월의 3.8~11.0%에 비해 상대적으로 높았다. 따라서, 가막만내 표층퇴적물의 퇴적 작용의 변화는 강열감량의 변화와 양의 상관관계가 있음을 알 수 있다. 이것은 가막만내 표층퇴적물에 기여하는 부유 물질이 대부분 유기물로 구성되어 있음을 시사한다. 또한, 퇴적물 이동에 관한 계산결과, 가막만의 북부는 침식보다는 퇴적이 우세한 것으로 나타났는데, 이곳은 하천으로부터 유입되는 육수뿐만 아니라, 수하식의 진주담치 양식장이 위치하여 해저로 침강되는 고형물질들은 대부분 유기물로 판단된다. 따라서, 준설과 같은 특별한 정화노력이 없는 한 이 해역의 저질오염은 계속될 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 가막만의 바람에 의한 흐름의 변화가 퇴적 환경에 어떻게 영향을 미치는가를 정량적으로 파악하기 위하여 해수유동 및 퇴적물 이동에 관한 수치실험을 실시하였다. 가막만에서는 추계와 춘계에 퇴적량이 증가하고 하계와 동계에 퇴적량이 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 퇴적 작용의 분포와 계절 변화는 표층퇴적물에 대한 강열감량의 분포 및 계절변화와 일치하였으며, 이는 만내의 부유물질이 대부분 유기물로 구성되어 있음을 시사 하였다. 또한, 두 개의 만구에서 관측된 잔차류가 모두 만내로 향하고 있고, 만내 대부분의 해역에서 침식보다 퇴적이 우세하여, 특히 북부 해역에서의 유기물에 의한 저질오염이 우려된다. 반면, 만의 중앙부는 해수

의 흐름이 대체로 원활하고 수질도 비교적 양호하지만 이곳에 산재한 굴양식장으로부터 배출되는 유기체설물에 의한 저질오염에 대한 대책이 마련되어야 할 것으로 판단된다.

## References

- [1] Ariathurai, R. and Krone, R.B., 1976, "Finite element model for cohesive sediment transport", Journal of Hydraulic Division, ASCE, Vol.102, No.3, 323-338.
- [2] Bijker, E.W., 1986. "Coastal Engineering, Vol. ?", Lecture Notes, Delft Univ. Technology, Delft, The Netherlands.
- [3] Cho, H.S., Pang, W.H., Park, S.H. and Shin, H.C., 2001, "Water quality and sedimentary environment around the farming areas in Gamak Bay", Proc. Kor. Soc. Mar. Envir. Eng., 67-70.
- [4] Cho, H.S., Yu, Y.S. and Lee, K.H., 1994, "Characteristics of Seasonal Fluctuation of Water Quality and Sediment Environment in Kamak Bay", Bull Mar. Sci., Yeosu Nat'l Fish. Univ., Vol.3, 21-33.
- [5] Choi, C.W., Moon, S.Y., Yoon, H.S., Rha, S.J., Han, J.S., Choi, S.D. and Lee, W.B., 2002, "Study on Water Quality and Bottom Condition of Shellfish Farms in Gamak Bay of Korea", J. of Environmental Research Institute Yeosu Nat'l Univ., Vol.5, 21-32.
- [6] DiToro, D.M. and J.F. Fitzpatrick, 1993, "Chesapeake Bay sediment flux model. Contract Report EL-93-2", Prepared by HydroQual, Inc. for U. S. EPA Chesapeake Bay Program, U. S. Army Engineer District, Baltimore, MD, and U.S. Army Engineer Waterways Exp. Station.
- [7] Je, I.H., Yu, Y.S., Kim, H.J., Kim, Y.O., Baek, K.J. and Cho, H.S., 2008, "Studies on seasonal variations of marine water quality and sedimentary environments", Proc. Kor. Soc. Mar. Envir. and Safe, 123-126.
- [8] Jeong, J.H., 2006, "Simulation study on the temporal and spatial variations of hydrodynamics and environmental conditions in Gyeonggi Bay using a three-dimensional numerical model", PhD Thesis, Kwangwon Univ., 1-127.
- [9] Jung, E.H., 2011, "The study of relationship between foraminifera assemblage and eutrophication", MSc Thesis, Chonnam Nat'l. Univ., 1-51.
- [10] Kim, K.Y., 2002, "A study on physico-chemical environmental characteristics and behavior of materials in sediment in Kamak Bay", PhD Thesis, Yeungnam Univ., 1-140.
- [11] Kwon, S.J. and Kang, T.S., 2007, "Numerical Simulation for Behavior of Tidal Elevation and Tidal Current in the South Sea", Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, Vol.19, No.3, 253-265.
- [12] Lee, G.H., 1992, "The Pattern of Sea Water Circulation in Kamak Bay", Bull. Korean Fish. Tech. Soc., Vol.28, No.2, 117-131.
- [13] Lee, G.H., KIM, M.N. and Woo, C.Y., 1992, "On Yield Conditions and Growth Characteristics of Oyster, *Crassostrea gigas* in Kamak Bay, Korea", Bull. Mar. Sic. Inst., Yosu Nat'l. Fish. Univ., Vol.1, 13-27.
- [14] Lee, M.C. and Chang, S.D., 1982, "Tidal Exchange of Sea Water in Gamak Bay", J. of the Oceanological Society of Korea, Vol.17, No.1, 12-18.
- [15] Lee, M.O. and Park, S.J., 2004, "Wind Effects on the Oyster Farm Environment in Gamak Bay", J. Kor. Fish. Soc., Vol.7, No.4, 204-214.
- [16] Lee, M.O. and Kim, B.K., 2009, "Wind Effects on Tidal currents in Gamak Bay", J. Kor. Soc. Ocean Eng., Vol.23, No.2, 18-27.
- [17] Lee, Y.G, Hwang, J.Y. and Jung, K.K., 1995, "Surface Sediment Characteristics and Clay Minerals in Kamag Bay", Jour. Korean Earth Science Society, Vol.16, No.6, 477-488.
- [18] Mehta, A.J., 1986, "Characterization of cohesive sediment properties and transport processes in estuaries", Estuarine Cohesive Sediment Dynamics, A.J. Mehta ed., Springer-Verlag, Berlin, 290-325.
- [19] Mellor, G.L. and T. Yamada, 1982, "Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems", Rev. Geophys. Space Phys., 20, 851-875.
- [20] Ministry of Maritime and Fisheries Affairs (MOMAF), 2001, "Studies on the establishment of enforcement plans for environmental management of example sea regions", 1-496.
- [21] National Fisheries Research and Development Institute (NFRDI), 2009, "The 2<sup>nd</sup> Technical Report for real situations of fishing ground environments", 107-192.
- [22] Noh, I.H., Yoon, Y.H., Kim, D.I. and Park, J.S., 2006, "The Spatio-temporal Distribution of Organic Matter on the Surface Sediment and Its Origin in Gamak Bay, Korea", J. of the Korean Society for Marine Environmental Engineering, Vol.9, No.1, 204-214.
- [23] Park, S.E., Cho, K.D., Hong, C.H., Kim, D.S. and Cho, K.W., 1999, "An Effect of Wind on Circulation in Kamak Bay", J. Korean Fish. Soc., Vol.32, No.5, 674-679.
- [24] Park, S.J., 2003, "Wind effects on the oyster farms and marine environments of Gamak Bay", MSc Thesis, Yeosu Nat'l. Univ., 1-80.
- [25] Soulsby, R.L., 1983, "The bottom boundary Layer in shelf seas", In: Johns, B. (Eds.): Physical Oceanography of Coastal and Shelf Seas. Elsevier Oceanography Series, Amsterdam, 189-266.
- [26] Villaret, C. and M. Paulic, 1986, "Experiments on the erosion of deposited and placed cohesive sediments in an annular flume and a rocking flume", Coastal and Oceanographic Engineering Dept. University of Florida, Report UFL/COEL-86/007, Gainesville, FL.

2013년 8월 23일 원고접수

2013년 10월 22일(1차), 2014년 3월 31일(2차) 심사수정일자

2014년 5월 13일 게재확정일자