한국마린엔지니어링학회지 제34권 제6호, pp. 922~934, 2010. 9 (ISSN 1226-9549)
Journal of the Korean Society of Marine Engineering

입자추적기법을 이용한 바다숲 조성지의 확장에 관한 수치예측

조재권[1] · 김대권[1] · 이문옥[2] · 오태건†

(원고접수일 : 2010년 7월 27일, 원고수정일 : 2010년 8월 13일, 심사완료일 : 2010년 9월 17일)

A Numerical Estimation on Extension of Marine Afforestation Area using Particle Tracking Method

Jae-Kweon Cho[1] · Dae-Kweon Kim[1] · Moon-Ock Lee[2] · Tae-Geon Oh†

요 약 : 바다숲 조성용 시설물의 효율적인 배치를 위하여 수치실험을 통하여 바다숲 조성 예정지의 조석류에 의한 해수흐름을 분석하였으며, 분석된 해수흐름을 바탕으로 하여 해조포자의 거동을 파악하기 위하여 입자추적실험을 수행하였다. 수치실험에 사용된 수치모형은 EFDC(Environmental Fluids Dynamics Code)를 사용하였으며, 연직방향으로 총 5개 층으로 나누어 실험을 수행하였다. 실험결과, 바다숲 조성대상해역의 해수흐름패턴은 대상해역 바깥쪽의 주류에 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있었고, 잔차류를 분석한 결과 크게 두 개의 순환 고리가 형성되어 있음을 확인하였다. 해수흐름의 패턴을 고려하여 3곳의 바다숲 시설물의 설치장소를 선정하고 저층에 입자를 투입하여 15일간 추적을 실시한 결과, 1번과 3번 정점은 해안선에 연하여 띠형태로 시설하며, 2번 정점은 연안에서 약 300 ~ 500m정도 떨어진 곳에 타원의 형태로 시설하는 것이 보다 효율적일 것으로 판단되었다.
주제어 : 바다숲, 수치실험, 해수흐름, 입자추적, 해조포자

Abstract: To arrange artificial reefs for marine afforestation effectively, tidal currents were analyzed by numerical experiments, and particle tracking based on tidal currents was carried out to clarify the path of algae spores. The experiments were conducted by the Environmental Fluid Dynamics Code (EFDC), and water column was vertically divided into five layers. Tidal current patterns were showed to be affected by main currents outside of the study area, and two circle currents were observed during the analysis of residual currents. Particle tracking lasted 15 days at three installation places where artificial reefs for marine afforestation could be deployed. According to the results of the particle tracking experiment, particle movements at the No.1 and No. 3 stations were belt types along the coastal line. The No. 2 station documented an ellipse type movement 300~500m from coast line. These results suggest that artificial reefs for marine afforestation should be installed in the belt zones at of the No. 1 and No. 3 stations, and in the ellipse zone at the No. 2 station.
Key words: Marine afforestation, Numerical experiment, Tidal current, Particle tracking, Algae spore

1. 서 론

천해역에 있어서의 특징적인 생태계의 하나로서, 대형 해조류 및 해초류가 농밀하게 번성된 장소를 해조장이라고 하고, 이들 해조장은 다양한 생물의

† 교신저자(국립수산과학원 자원조성사업단, E-mail: dharta@nfrdi.go.kr, Tel: 051-720-2361)
1 국립수산과학원 남서해수산연구소
2 전남대학교 해양기술학부

서식과 높은 생물 생산력을 지니고 있으며, CO_2의 저감과 수질을 정화시키는 등 환경보전의 관점에서도 매우 중요한 연안생태의 한 요소이다[1]. 뿐만 아니라, 연안 생태계에서 해조장은 계의 주요한 일차 생산자로서 물질순환의 중심을 이루며, 치어들의 성육장으로 이용이 되고 있고, 여기서 자란 치어들은 다시 산란을 하는 산란장의 역할도 하고 있어, 수생 생태계에 있어 매우 중요한 역할을 하고 있다[2].

최근 우리나라에서는 해조군락이 소멸되고 무절석회조류가 번무하는 갯녹음현상이 확산되고 있으며, 갯녹음현상의 확산은 수생동물의 먹이원의 감소, 서식장 및 산란장의 소멸에 의해 기존 생태계의 균형을 유지할 수 없게 한다[3]. 현재, 일본에서는 대형 해조군락의 복원 및 수산자원증강을 위하여 바다숲의 보전과 회복에 관심이 집중되고 있으며, 소멸된 해조군락 회복의 일환으로서 해조류 서식 적지를 선정하고 제공하는 바다숲 조성사업이 활발히 전개되고 있다[4, 5]. 또한, 현재 바다숲이 잘 조성되어 있는 해역도 해중림초의 투하 등을 통하여 보다 넓은 영역으로의 확장을 도모할 수 있다.

갯녹음의 복원 및 기존의 바다숲에 대한 확장재생산의 효율을 극대화 하기위해서는, 해조류가 정착할 수 있는 해중림초와 같은 부착기질이 있어야 하고, 바다숲 조성은 해조장의 역할을 수행함으로서 바다숲 시설을 중심으로 하여 포자나 유배를 먼 곳까지 방출시켜 바다숲 시설로 인하여 주변에 바다숲이 건강하게 유지될 수 있어야만 성공적으로 바다숲을 조성하였다고 할 수 있다. 포자나 유배의 이동은 해수의 흐름과 매우 밀접한 관계를 지니고 있으며, 해수흐름을 면밀히 분석하여야만 포자나 유배의 이동을 제대로 파악할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 해중림 조성해역의 해수흐름을 수치실험을 통하여 파악하고, 입자추적의 기법을 이용, 바다숲이 시설되었을 경우를 가정하여 포자나 유배(입자)의 이동경로를 추적하여 향후, 거점 해조장을 중심으로 주변의 바다숲을 확장함에 있어 합리적이고 효율적으로 시설할 수 있는 방법 및 근거 자료를 마련하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구해역의 개관 및 지형분포

연구대상이 되는 거제도 남부 해역(Figure 1)은 대조차가 2 m내외의 반일주조가 우세한 해역이며 평균 유속은 대조기시에 창·낙조 공히 0.2~0.8 m/s정도로 비교적 완만한 유속을 지니고 있으며 해류의 영향도 비교적 많이 받는 곳이다[6]. 연구해역의 지형적 특징을 살펴보면, 동서 및 남동방향

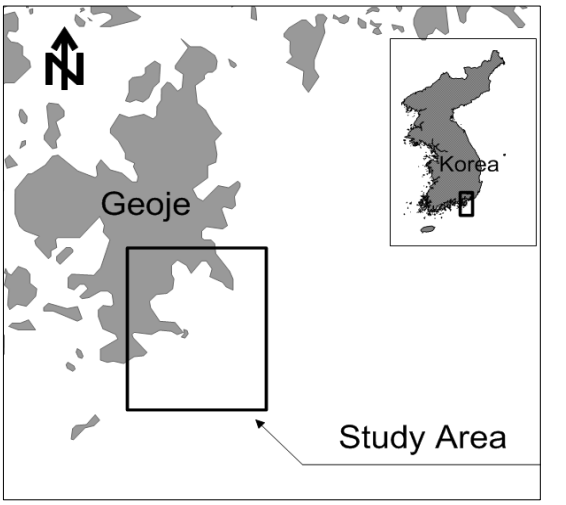


Figure 1: Map of study area.

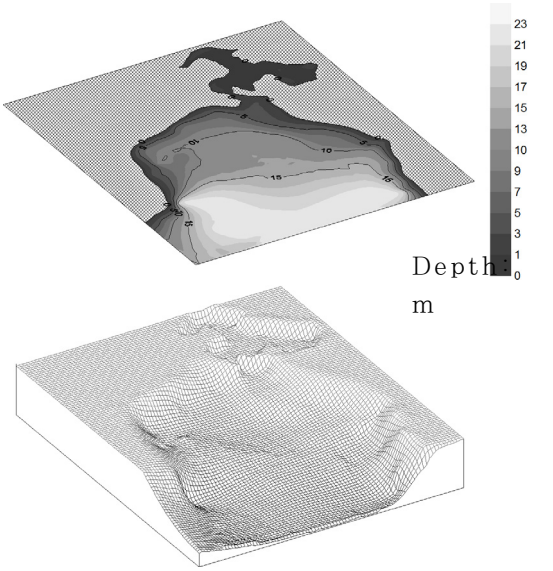


Figure 2: Depth distributions and 3D topography of the study area.

으로 길이 약 3 km정도의 개방형 내만이며, 만 주위의 수심이 5~25 m정도로 분포하고, 평균경사도가 약 0.0102정도의 비교적 평탄한 해저지형의 양상을 보이는 곳이다(Figure 2).

2.2 실험에 사용된 수치모형의 개요

2.2.1 수치모형의 개요

EFDC(Environmental Fluids Dynamics Code)는 크게 유동, 퇴적물이동, 수질의 세 요소로 구성되어 있으며, 유동모델 부분은 수온과 염분이 함께 고려된 3차원 천해방정식을 기본으로 한다. 기본적인 물리적 구조는 Blumberg and Mellor(1987)가 개발한 POM(Princeton Ocean Model)[7], 미국 육군공병단(US Army Corps of Engineers)의 CH3D-WES 모델 및 TRIM 모델과 유사하나, EFDC는 습지에서의 유동현상을 고려하기 위하여 잘피 군락 등과 같은 식물 군락에 의한 저항[8]과, 천해 연안역에서 파랑에 의한 단주기 표면중력파의 외력 등도 고려할 수 있다[9]. 퇴적물이동 부분은 DiToro and Fitzpatrick (1993)에 의하여 개발된 CE-QUAL-ICM의 퇴적물 부분을 기본으로 하고 있으며, 실트나 점토와 같은 점착성(cohesive)과 모래와 같은 비점착성(non-cohesive)의 다양한 크기를 가진 입자를 고려할 수 있다[10]. EFDC 모델은 현재까지 수많은 수역의 연구에 적용되어 왔으며, 대표적인 수력학(hydrodynamics)적인 연구들로는 미국 버지니아의 James and York Rivers에서 담수유입으로 인한 희석효과(dilution effect), 해안선변화, 치패(shellfish larvae)의 이동에 관한 연구[11-14], 미국 플로리다 Indian Lagoon and Sebastian River에서 염수 침입에 대한 연구, 미국 Everglades에서의 대규모 습지 모의에 관한 연구[15], 미국 플로리다 Okeechobee 호에서 수온 모의에 관한 연구 등에 적용된 바 있다[16].

2.2.2 입자추적 알고리즘

입자는 최저층에서 방출되며, 재부유는 극히 적을 것으로 판단되어 층간의 교환이 없이 2차원으로 거동하는 것으로 가정하였다.

흐름장에 놓여진 입자가 passive contaminant인 경우 시간 $t+\Delta t$에서 입자의 새로운 위치 $\vec{X}(t+\Delta t)$는 표류속도벡터 $\vec{U}$와 분산속도성분 $\vec{u'}$에 의하여 다음과 같이 구해진다(식 1).

$$\vec{X}(t+\Delta t) = \vec{X}(t)+\vec{U}\cdot\Delta t+\vec{u'}\cdot\Delta t \tag{1}$$

식 (1)에서 우변 제 3항은 분산에 의하여 입자가 이동하는 것을 나타내는 것으로서 확률과정론적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{u'}\cdot\Delta t = R\cdot\sigma \tag{2}$$

여기서, R은 평균치 0, 표준편차 1인 정규분포를 갖는 난수이고, $\sigma = \sqrt{2\alpha_L|\vec{u'}(x(t),t)|\cdot\Delta t}$ 이며, α_L은 혼합거리이다. 식 (2)는 이류항을 무시한 확산방정식의 기본해와 일치한다.

한편, 식 (1)에 따르는 확률과정에서는 개개 입자의 집합에 관한 시공간적 농도분포 $C(x.y.t)$는 다음과 같은 Fokker-Plank 방정식을 만족한다.

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{\partial(UC)}{\partial x}+\frac{\partial(VC)}{\partial y} = \\
&\qquad \frac{\partial^2(D_{xx}C)}{\partial x^2}+\frac{\partial^2(D_{xy}C)}{\partial x\partial y}+\frac{\partial^2(D_{yy}C)}{\partial y^2} \\
&U = u+\frac{\partial D_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial D_{xy}}{\partial y}+\frac{D_{xx}}{h}\frac{\partial h}{\partial x}+\frac{D_{xy}}{h}\frac{\partial h}{\partial y} \\
&V = v+\frac{\partial D_{yy}}{\partial y}+\frac{\partial D_{xy}}{\partial x}+\frac{D_{yy}}{h}\frac{\partial h}{\partial y}+\frac{D_{xy}}{h}\frac{\partial h}{\partial x} \\
&D_{xx} = D_L\cos^2\theta+D_T\sin^2\theta \\
&D_{yy} = D_L\sin^2\theta+D_T\cos^2\theta \\
&D_{xy} = (D_L-D_T)\sin\theta\cdot\cos\theta
\end{aligned} \tag{3}$$

여기서, $\theta = \tan^{-1}(\frac{v}{u})$, D_L 및 D_T는 각각 흐름방향의 종분산계수 및 흐름과 직각방향의 횡분산계수로서 식 (4)와 같다.

$$D_L = \alpha_L|\vec{u'}(x(t),t)| \tag{4}$$

2.2.3 분산항의 평가방법

분산은 난류확산에 있어서 연직방향의 속도분포로 인한 겉보기 확산을 고려한 것으로, Elder (1959)는 2차원 개수로에서 식 (5)와 같이 구하였다.

$$D_L = 5.93 h U_* \quad (5)$$

여기서, h는 수심, U_*는 마찰속도로서 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$U_* = \frac{\sqrt{g}}{C}\sqrt{u^2+v^2} \quad (6)$$

여기서, g는 중력가속도, C는 chezy의 저항계수로써 $C = -18.0\log(k/12h)$로 표현되며, k는 조도 높이이다. 일반적으로 횡분산계수 D_T는 종분산계수 D_L의 약 1/4정도의 값을 취한다. 식 (2)에서 분산에 의한 속도성분 $\overrightarrow{u'}$는 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$\overrightarrow{u_L'} = R_1(2D_L/\Delta t)^{1/2} \quad (7)$$

$$\overrightarrow{u_T'} = R_2(2D_T/\Delta t)^{1/2} \quad (8)$$

여기서, R_1과 R_2는 평균치 0, 표준편차 1의 정규분포를 갖는 난수이고, 분산속도의 x 및 y방향의 성분은 식 (9) 및 식 (10)과 같이 된다.

$$u' = u_L'\cos\theta - u_T'\sin\theta \quad (9)$$

$$v' = u_L'\cos\theta + u_T'\sin\theta \quad (10)$$

2.3 수치실험의 조건

연구지역의 해수유동을 재현하기 위해 수평방향으로는 직교격자체계를 이용하였으며, 수직방향으로는 저층의 바닥면을 따라 층을 형성하는 σ-좌표체계를 5개의 층으로 구성하여 표층과 저층의 해수흐름을 동시에 파악하였다. 계산 영역을 동서방향 24.6 km, 남북방향 37.7 km로 영역을 구성하였고, 219 × 275개의 유효격자(47,770 개)를 배치하였으며, 해중림이 시설될 다포 내만의 흐름을 상세하게 재현하기 위하여 격자 1개당의 크기를 최대 320m, 최소 20m의 간격인 가변격자를 사용하여 구성하였다. 해중림초는 해저 면에 시설되므로, 포자로 가정되는 입자를 저층에서 방출하도록 하였으며, 층간의 입자 교환은 없는 것으로 가정하였다 (Figure 3).

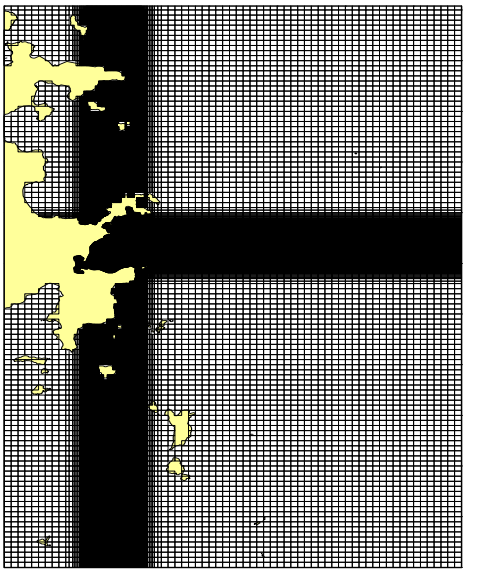


Figure 3: Computational grid system.

계산 초기에는 전 계산영역의 조위가 EL(+)0.0 m이고, 유속을 0으로 가정하는 cold start 조건을 부여하였다. 외해경계 조석조건은 인공위성 TOPEX/POSEIDON의 조석 보정용 모델로 개발된 National Astronomical Observation (NAO)의 K. Matsumoto에 의해 개발된 NAO 모델 결과를 이용하여 분조값을 구한후, 수차례 반복실험을 통해 결정하였다. 계산시간은 대조기에서 소조기를 걸쳐 다시 대조기에 이르는 약 15일간의 수치 실험을 수행하였으며, 계산시간 간격은 CFL 조건을 만족하는 1.0초로 설정하였다(Table 1).

Table 1: Conditions of numerical experiments for current and particle tracking

Items	Experiment condition
Computational domain	Geoje coastal waters
Numerical model	EFDC
The number of grid	219 × 275, and 5 layers
Making depth	Using hydrographic chart (No. 224)
Time step	1.0 sec
Simulated period	15 days
Boundary condition	Input tidal elevation (M_2, S_2, K_1, O_1)
Initial condition	Cold start*

*Cold strat means that the initial value of tidal elevation and current start to calculate from 0.

3. 결과 및 고찰

3.1 수치실험결과의 검증

본 수치계산 결과의 신뢰성 및 재현성을 검증하기 위하여 국립해양조사원에서 운용하는 거제도 구조라항 검조소 자료(Figure 4에서 ▲표시) 및 조류관측 자료(Figure 4에서 +표시)를 이용하여 보정 및 검증을 수행하였다. 보정 및 검증에 사용된 조석 관측 위치와 조류측정에 의한 검증 위치를 Figure 4에 제시하였다.

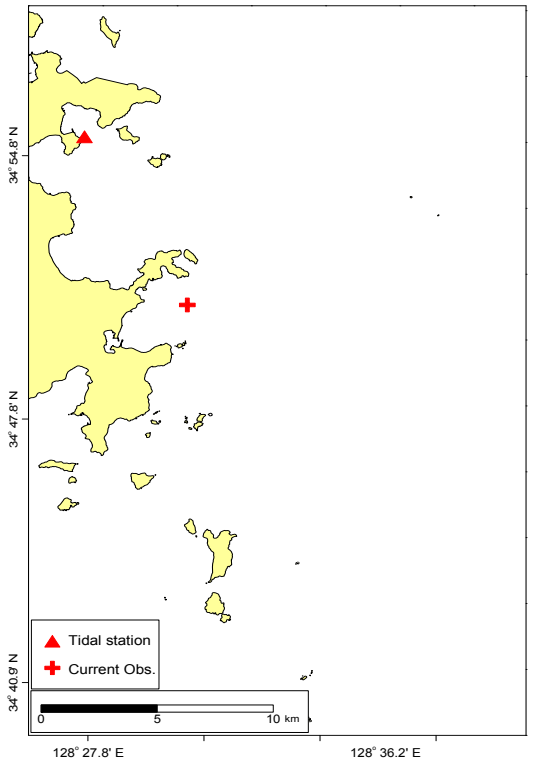


Figure 4: Location of observations of tidal currents and elevations in the study area.

3.1.1 조위검증

Table 2는 관측 조석과 모델 계산치의 오차와 절대상대오차를 나타낸 것이다. 절대상대오차(ARE)와 오차(Error)는 식 (11)와 같이 정의하며, 결과에서 알 수 있듯이 조위 및 위상에 있어 관측된 값과 수치실험에 의해 예측된 값이 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있으며, 이는 TASK 2000(Tidal Analysis Software Kit, 2000)으로 구성된 관측값과 실험값의 4대분조(M_2, S_2, K_1, O_1)에 대한 시계열분포도 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다(Table 2 및 Figure 5).

Table 2: Absolute and relative errors of tidal elevation between the model and the observations

Items		TR/2 (cm)	Phase (°)	ARE	Error	
				TR/2(%)	TR/2 (cm)	Phase (°)
M2	Mod.	57.5	257.0	0.2	0.1	-0.7
	Obs.	57.4	257.7			
S2	Mod.	26.1	296.1	-0.8	-0.2	-0.2
	Obs.	26.3	296.3			
K1	Mod.	10.0	174.7	1.0	0.1	1.8
	Obs.	9.9	172.9			
O1	Mod.	6.2	144.4	2.4	0.1	0.7
	Obs.	6.1	143.7			

- The criterion of phase is 135°.
- TR/2 means Tidal Range/2.
- Mod. and Obs. are the values of models and observations.

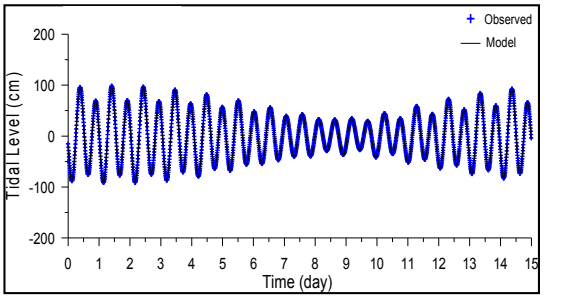


Figure 5: Comparison of the simulated values and the observed ones of tidal elevations at the observation stations in the study area.

$$\text{ARE(Absolute relative error)} = \left| \frac{\text{Model} - \text{Observed}}{\text{Observed}} \right| \times 100 \quad (11)$$

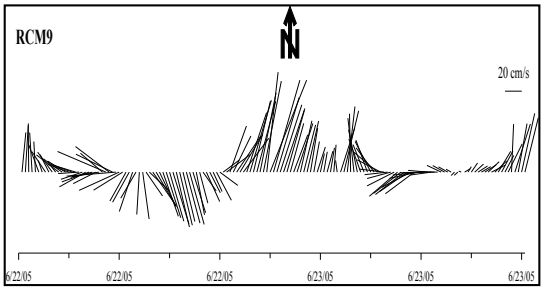
$$\text{Error} = \text{Model} - \text{Observed}$$

3.1.2 조류검증

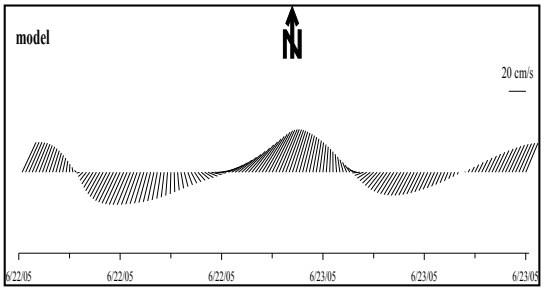
Figure 6은 현장관측과 수치실험으로 인한 흐름

계산 결과를 Stick diagram으로 비교한 것이며, 대조기 25시간에 대하여 검증을 실시하였다.

검증결과, 창·낙조의 전류양상을 잘 재현하고 있으며, 낙조류가 창조류에 비해 근소하게 우세한 경향을 보이고 있으며, 이는 국립해양조사원(2002)의 관측결과와도 유사하게 나타났다[17]. 관측치에 비해 수치실험의 흐름 강도가 약 10~20%정도 낮게 나타났으나, 전반적으로 흐름 양상을 잘 재현하고 있으며, 현장에 적용하기에 무리가 없을 것으로 판단된다.



(A) Observed velocity values



(B) Simulated velocity values

Figure 6: Comparison of the simulated values for tidal currents with the observed currents using a stick diagram.

3.2 수치실험의 결과

3.2.1 광역 및 상세역의 해수흐름의 재현결과

검증결과를 토대로 거제 동부해역의 광역적인 해수 흐름 특징을 파악하였다. 표층과 저층 창·낙조류 벡터도를 Figure 7(a~d)에 제시하였다.

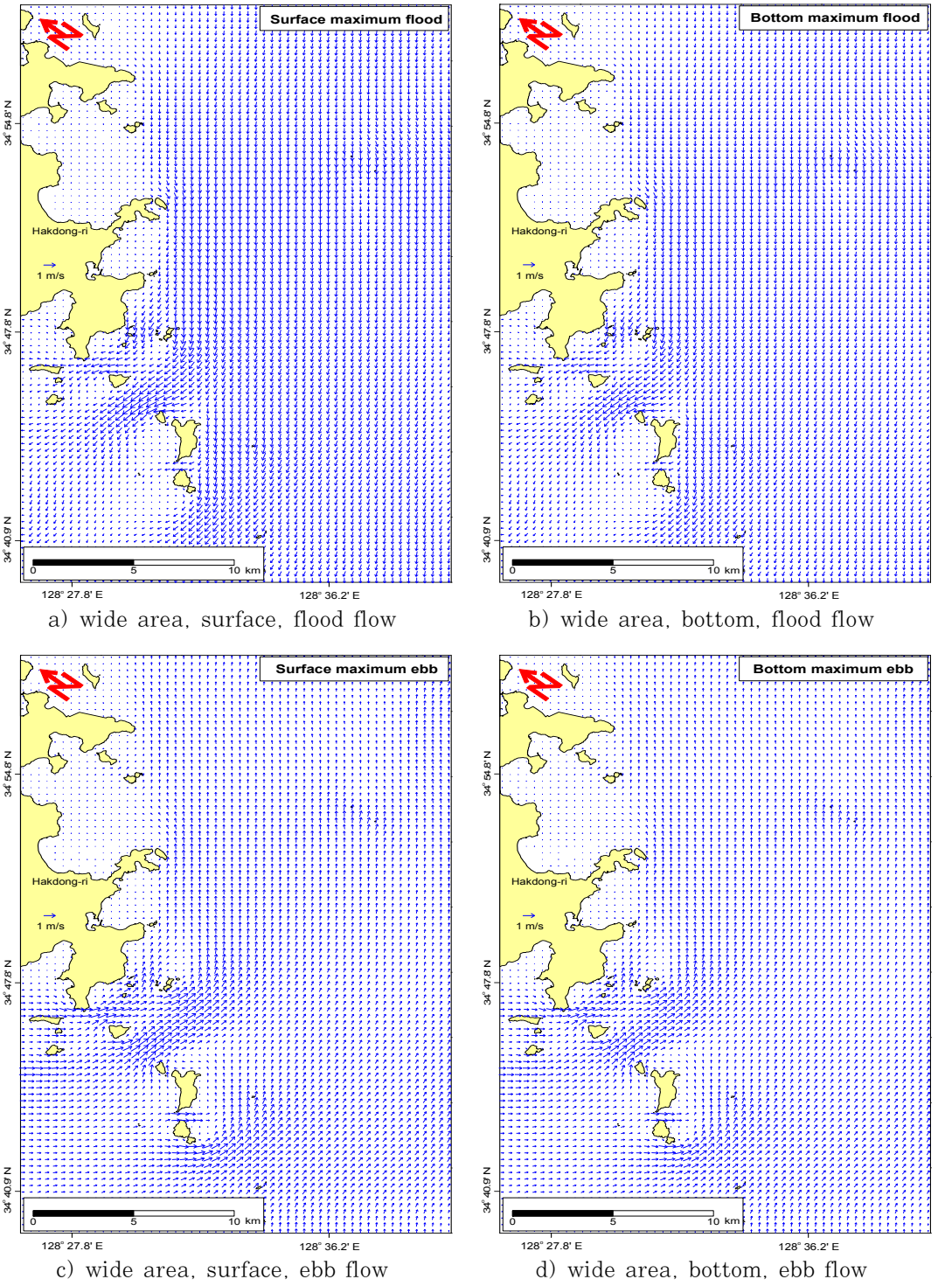
흐름계산 결과 대조기의 창조류시 주류의 유속이 가장 빠른 곳은 바다숲 조성해역의 남동쪽에 위치하고 있는 매물도 부근이 0.98 m/s 였으며, 낙조류시는 1.05 m/s로 나타나 낙조류시가 흐름의 강도에 있어서는 근소하게 높게 나타났다. 해중림초가 시설될 해역은 양쪽으로 길게 뻗은 반도로 인하여 창·낙조시 모두 흐름에 대하여 영향을 거의 받지 않는 0.1 m/s이하로 매우 미약하였다.

바다숲 조성해역의 광역 해수흐름에서도 언급하였듯이 거제 동부는 창조류시는 남서향, 낙조류시는 북동향의 유향 및 유속에 지배를 받는다. 따라서 해중림이 시설될 해역의 다포내만도 남서-북서향의 유속에 강한 영향을 받는 것으로 실험 결과 나타났다(Figure 8, a~f). 창조류시는 남서향 흐름이 주류를 이루며 진행하고 있으나, 내만으로 직접 유입되지는 않았다. 만 우측의 강한 주류로 인하여 만내에서는 시계방향의 순환류가 형성되고 있었으며, 유속은 매우 미약하여 0.05 m/s이하였다.

낙조류시는 북동향하며 창조류와 마찬가지로 지형적 특성으로 인해 만내로 흐름이 진입하지 못하고 있으며, 반 시계방향의 순환류가 형성되어 있는 것을 확인하였다. 창·낙조시 공히 표층과 저층에 흐름양상에 있어서 유향에는 차이가 없었으나 유속의 강도에 있어서는 10%정도 저층이 작은 값을 나타내었다.

대조기시의 잔차류를 확인한 결과, 만의 중앙을 기준으로 두 개의 순환류가 형성되어 있는 것을 확인하였다. 바다숲 조성해역의 해조포자나 유배 등은 결과적으로 잔차류의 패턴을 따를 것으로 예상되므로 포자 등의 이동은 만의 중앙을 기준으로 상하로 구분하였을 때, 상부에서는 시계방향으로, 하부에서는 반 시계방향으로 포자나 유배가 이동될 것으로 판단된다. 잔차류에 있어서도 표층과 저층의 유향의 차이는 발견되지 않았으나, 유속에 있어 10%정도 저층 유속값이 작게 나타났다.

흐름에 대한 수치실험 결과를 종합하여 바다숲 조성시설의 요건을 판정하여 보았다. 우선, 만내가 유속에 대하여 매우 정온하여, 시설물이 강한 유속으로 인하여 세굴되거나 활동 및 전도에 대하여 안정할 것으로 판단되며, 동쪽으로는 완전히 개방되어 있어 수질이 악화될 우려도 없을 것으로 사료된다. 또한 창·낙조시와 잔차류에서도 순환류가 형



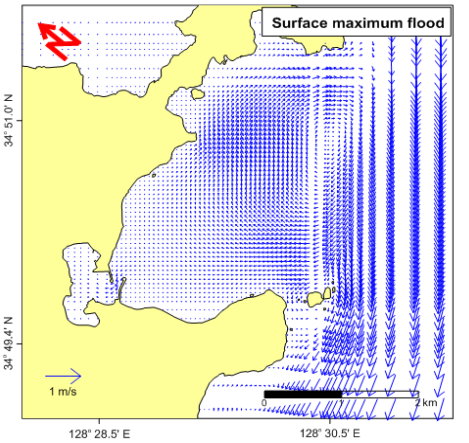
a) wide area, surface, flood flow

b) wide area, bottom, flood flow

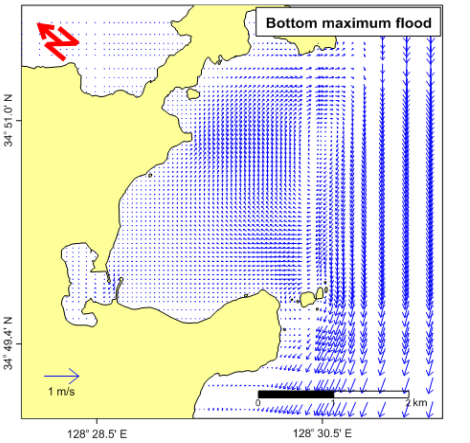
c) wide area, surface, ebb flow

d) wide area, bottom, ebb flow

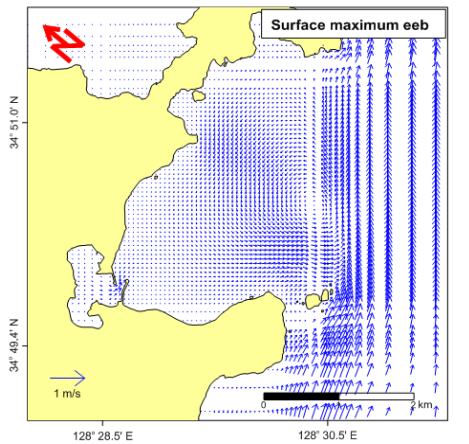
Figure 7: Current patterns and velocities at the spring tide in the study area(wide area).



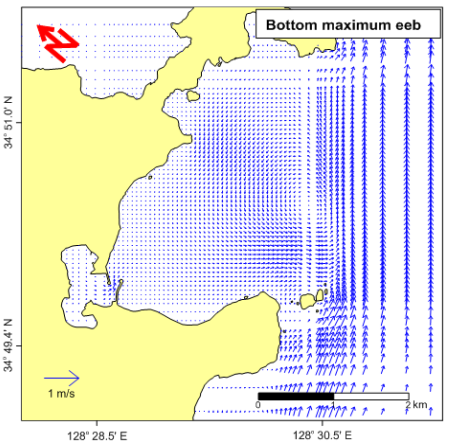
a) particular area, surface, flood flow



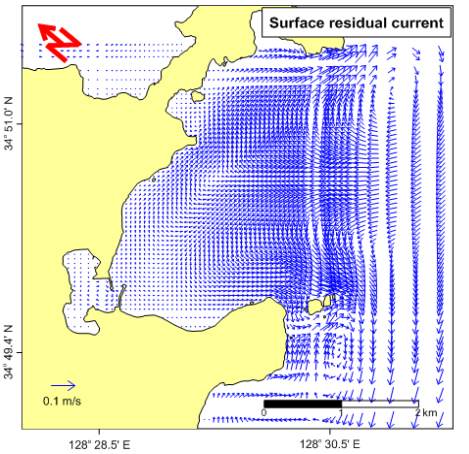
b) particular area, bottom, flood flow



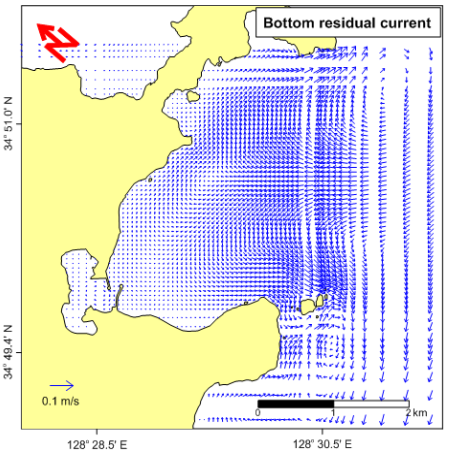
c) particular area, surface, flood flow



d) particular area, bottom, flood flow



e) particular area, surface, residual current



f) particular area, bottom, residual current

Figure 8: Current patterns and velocity at the spring tide in the study area(particular area).

성되어 있어 포자나 유배 등이 만내에 체류 할 가능성이 높다고 할 수 있다. 해조류의 포자 및 유배는 종에 따라 틀리기는 하나, 포자방출시기의 유속이 15 cm/s 이상이 되면 부착율이 거의 0에 가까워 지는 것으로 보고되고 있다[18]. 본 연구해역의 경우, 대조기의 평균유속이 창·낙조 공히 0.05 m/s 이하로서 흐름환경에 있어서는 해조류의 포자가 부착하기에 매우 좋은 조건인 것으로 판단된다.

3.2.2 입자추적 결과

거점 해조장이 시설되었을 경우를 가정하여, 바다숲에서 방출된 포자 및 유배 등의 이동경로를파악하고, 향후 바다숲 시설을 증설 할 때 참고 자료로 활용하기 위하여, 입자추적실험을 수행하였다. 현재 바다숲 시설을 계획하고 있는 곳은 Figure 9에 나타내었으며, 시설계획지를 입자의 초기위치로 설정을 하였다. 입자의 추적은 한 조석주기(15일)에 걸쳐 수행되었다.

1번 정점의 경우, 입자는 초기에 서편으로 잠시 이동하였다가, 이후 연안을 따라 동쪽으로 계속 이동하는 양상을 보이고 있다. 이는 1번 정점이 잔차류의 분기점 부근으로서 흐름이 반대방향으로 전류되는 지점이기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 1번 정점을 약간 더 서편으로 이동시키면 해조의 포자는 완전히 서쪽으로 이동 될 가능성이 있음을 시사하고 있다. 1번 정점의 입자는 6일까지는 서편으로 약 500 m정도 이동한 후, 이후 15일 까지 동편으로 약 2.5 km정도 이동하였다(Figure 10).

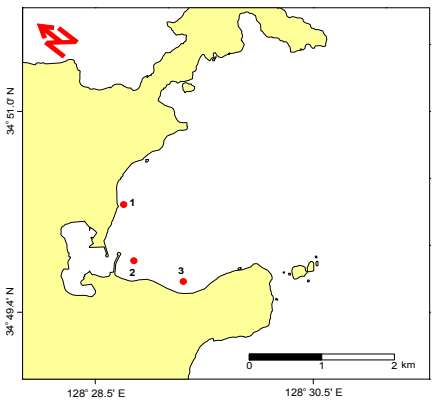


Figure 9: Initial position of particles in the study area(bottom layer).

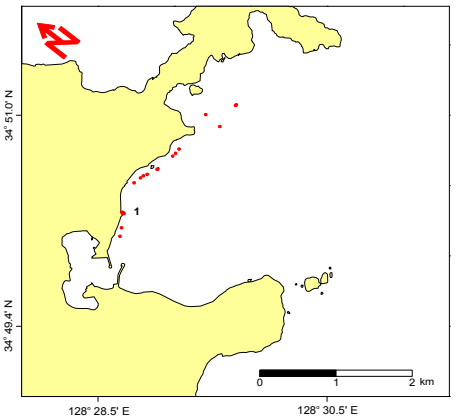


Figure 10: Particle position after 15 days from station 1 in the study area(bottom layer).

2번 정점의 경우, 입자 방출 후 4일까지 연안에서 법선방향으로 약 300 m정도 멀어지다가, 5일 이후부터 남동쪽으로 이동하는 양상을 보였다. 이후 매우 느리게 이동하다가 13일째 연안으로 접근하여 최종적으로는 연안에서 100 m정도 떨어진 곳까지 접근하였다. 2번 정점의 경우, 만의 가장 안쪽으로서 해수 흐름 실험결과 유속이 0.05 m/s 정도로 바다숲 조성해역 중 가장 느린 흐름을 보이는 곳으로 나타나, 입자의 경로도 1 번 정점에 비해 매우 짧은 것으로 판단된다. 2번 정점의 입자는 15일간 남동 방향으로 약 500 m정도 이동하였다(Figure 11).

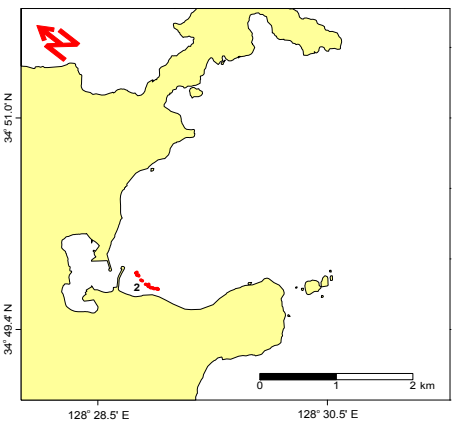


Figure 11: Particle position after 15 days from station 2 in the study area(bottom layer).

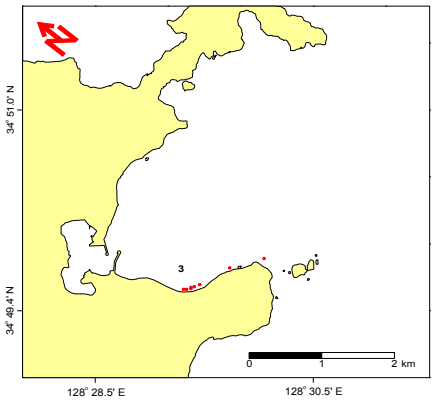


Figure 12: Particle position after 15 days from station 3 in the study area(bottom layer).

3번 정점의 경우는 입자 방출 즉시 남동쪽으로 이동하였다. 3일 후에 약 1 km를 이동하였으며, 5일 후에는 만내를 완전히 벗어났고, 7일 이후에는 방출 지점으로부터 약 2 km 떨어진 인근의 섬까지 확산되는 양상을 보였다. 11일 이후에는 약 4 km이상 이동하였으며, 14일 이후에는 계산 영역을 벗어나 계산을 중지하였다. 3번 정점의 입자 이동 속도가 급격히 빨라지는 이유는 만내에서도 비교적 강한 흐름을 지니고 있고, 주류가 흐르는 곳과도 지리적으로 가까워 초기에는 비교적 느린 이동 양상을 보이다가 입자가 주류에 포함이 되면서 급격히 빠르게 이동되기 때문인 것으로 사료된다 (Figure 12).

각 정점에서의 15일 간의 입자이동경로를 한 눈에 파악하기 위해 전 정점에서의 입자 이동경로를 Figure 13에 표현하였다. 바다숲 시설지로 선정된 3 곳의 정점에 거점 해조장을 시설하였을 경우, 만내에 전체적으로 해조의 포자나 유배 등을 골고루 이송시킬 것으로 판단된다. 향후, 바다숲 시설을 증설 할 경우, 1번과 3번 정점은 입자경로를 참고로 하여 해안선에 연하여 띠형태로 시설하는 것이 바람직 할 것으로 사료되고, 2번 정점은 연안에서 약 300 ~ 500 m정도 떨어진 곳에 타원의 형태로 시설한다면 보다 효율적일 것으로 보인다. 또한, 해조의 포자나 유배 등의 확산을 고려하여 바다숲을 조성 할 경우, 먼저 해수의 흐름을 파악하여 잔차류의 패턴을 분석한 다음, 최종적으로 입자추적실험을 실행하여 포자나 유배를 만내에 전체적으로 확산 시킬 수 있는 정점을 선별하여 해중림초를 시설하면 최적의 효과를 거둘 수 있을 것으로 판단된다.

실제의 포자확산의 양상을 살펴보면, 柳瀬등(1983)이 감태의 모조주머니를 이용하여 새로운 개체의 출현수와 거리의 상관관계를 현장실험한 결과, 거리에 따른 착생율은 $y = 5.08e^{-0.1489x}$ 형태의 지수함수적인 감소패턴을 나타내는 것을 보고하였으며〔19〕, 川崎(1995)는 감태와 대황의 포자를 대상으로 거리와 착생의 관계를 고찰한 결과, 최대착생거리는 400 m정도로 나타났으나, 대부분 100m 이내에서 착생이 이루어진다는 사실을 밝혔다〔20〕. 비교적 무거운 비중을 지닌 모자반류는 감태나 다시마류보다도 착생거리가 더 짧은 경향을 나타내었는데, 安藤등(2002)의 결과에 따르면, 모자반의 종에 따라 차이는 있으나, 대체로 8.3~26.3 m의 착생분포를 보이고 있음을 보고하였다〔21〕. 그러나 수치실험으로부터 밝혀진 입자의 이동거리는 수백 미터에서 길게는 수 킬로미터까지 분산되었지만 앞서 언급한 〔19~21〕의 연구결과 와는 많은 차이를 보이고 있었다. 이는 해조류 포자의 경우, 시간이 지체됨에 따라 착생율이 현저히 저하되는 것에 기인하고 있는 것으로 판단된다. 감태포자의 경우, 착생률은 포자방출후, 5분이 지나면 최초의 착생률로부터 약 50%정도 착생률이 감소하는 사실이 보고된 바 있다〔22〕. 따라서 수치실험으로 밝힌 입자의 거동을 따라 해조포자가 멀리까지 이동할 수 있어도 포자의 생존시간내에 기반시설물에 착저하여야 성체로 성장할 수 있다는 사실을 시사하고 있다. 이러한 점에 착안하여 바다숲조성용 시설물을 조성할 경우, 바다숲시설은 수치실험결과에서 도출된 입자분산방향을 참고하여 시설하되, 시설의 범위는 대상해조종에 따라 한정할 필요성이 있다. 감태나 대황, 다시마류는 포자의 비중이 가벼워 비교적 멀리까지 이동하므로, 거점 해조장을 시설할 경우, 100 m내외의 시설범위가 권장되고, 모자반류는 20 m 내외의 시설범위가 바다숲 조성에 있어 보다 효율적일 것으로 판단된다.

4. 결 론

바다숲 조성 시설에 있어 주변해역으로까지 바다숲을 확장시키기 위해, 포자 등의 방출은 매우 중요한 요소 중에 하나이며, 바다숲 조성 시설의 거점 해조장에서 방출되는 해조의 포자 등의 이동을 파악하기 위하여 수치모형(EFDC)을 통하여 입자추적실험을 수행하였다.

해수흐름을 분석한 결과, 바다숲 조성 예정지의 흐름양상은 만 바깥쪽의 빠른 흐름에 의한 와류현상에 주로 지배를 받는 것으로 나타났다. 대조기의 창•낙조에 대한 잔차류는 만을 중심으로 하여 각각 시계방향과 반시계방향으로 순환되는 흐름이 발생하여 이를 고려하여 해중림초의 시설위치를 선정하였다.

해중림초의 시설위치 선정 후, 바다숲 조성후에 바다숲의 확장성을 파악하기위하여 입자추적실험을 수행하였다. 해조포자로 가정된 입자는 잔차류의 흐름방향에 크게 좌우되고 있음을 확인하였고, 1번과 3번 정점에서는 해안선을 따라 길게 확장될 것이 예상되었고, 2번 정점에서는 해안선에서 300~500 m 가량 떨어진 곳을 중심으로 하여 확장될 것이 예상되었다.

본 연구에서는 포자의 이동양상을 취급하기 위하여 난수발생을 이용한 입자추적기법을 이용하였다. 그러나 난수를 발생시켜 입자를 추적하는 방법은 확률론적 해석방법으로서 많은 반복적인 계산과정이 요구된다. 본 연구는 바다숲의 확장성을 방법적으로 접근하기 위하여 입자추적을 이용하였으나, 실험이 일회성에 한정되어 있기 때문에 향후, 해조포자의 이동을 보다 정확하게 추정하기 위해서는 통계적 유의성을 가지는 범위까지 실험을 반복 수행 할 필요가 있을 것으로 판단된다. 또한, 개개의 입자는 층간의 교환이 없는 2차원적인 거동을 가정하여 수행하였으나, 앞으로는 대상 해조류에 대한 포자나 유배 등의 비중을 이용하여 침강 속도 및 수괴 내에서의 생존체류시간 등을 고려한 입자추적실험을 수행하여 현상을 보다 정밀하게 재현할 필요성이 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

[1] 海の自然再生ワーキンググループ, 海の自然再生ハンドブック (藻場編), ぎょうせい, pp. 1-10, 2003.

[2] 한국해양연구원, 전남다도해형 바다목장 기반조성사업 연구용역보고서(1단계 2차년도), pp. 257-287, 2005.

[3] 국립수산과학원 남해수산연구소, 연안해역 갯녹음 발생해역 조사보고서, pp. 3-4, 2009.

[4] 寺脇利信, 新井章吾, 川崎保夫, "藻場の分布の制限要因を考慮した造成方法", 水産工學, vol. 32, no. 2, pp. 145-154, 1995.

[5] Terawaki, H. Hasegawa, S. Arai and M. Ohno, "Management-free techniques for restoration of Eisenia and Ecklonia bed along the central Pacific coast of Japan", Appl. Phycol., 13, pp. 13-17, 2001.

[6] 김평주, 진해만의 해양환경이 적조발생에 미치는 영향, 전남대학교 석사학위논문, pp. 14~17, 2007.

[7] Blumberg A., and G. L. Mellor, "A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In Three-Dimensional Coastal Ocean Models", N. S. Heaps (Ed.), pp. 1-16, 1987.

[8] Hamrick, J. M., Moustafa, M. Z., Development of the Everglades wetlands hydrodynamic model: 1. Model formulation and physical processes representation, In review, 1996.

[9] Hamrick, J. M., Zarillo, G., Modeling near shore circulation and sediment transport, 4th International Conference on Estuarine and Coastal Modeling, San Diego, CA., 1995.

[10] Di Toro, D. M., Fitzpatrick, J. J.,

Chesapeake Bay Sediment Flux Model. US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Tech. Report EL-93-2, 1993.

[11] Hamrick, J. M., Preliminary analysis of mixing and dilution of discharges into the York River, a Report to the Amoco Oil Co. The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science, p. 40, 1992.

[12] Hamrick, J. M., Linking hydrodynamic and biogeochemical transport models for estuarine and coastal waters, Estuarine and Coastal Modeling, Proceedings of the 3rd International Conference, M. L. Spaulding et al, Eds., American Society of Civil Engineers, New York, pp. 591-608, 1994.

[13] Hamrick, J. M., Zarillo, G., Modeling near shore circulation and sediment transport, 4th International Conference on Estuarine and Coastal Modeling, San Diego, CA., 1995.

[14] Shen, J., J. D. Boon, and A. Y. Kuo, A modeling study of a tidal intrusion front and its impact on larval dispersion in the James River estuary, Virginia Estuaries, 22, pp. 681-692, 1999.

[15] Hamrick, J. M., Evaluation of island creation alternatives in the Hampton Flats of the James River, Report to the U. S. Army Corps of Engineers, Norfolk District, 1994.

[16] Hamrick, J. M., Application of the EFDC hydrodynamic model to Lake Okeechobee, a report to South Florida Water Management District, JMH-SFWMD-96-2, John M. Hamrick, Consulting Engineer, Williamsburg, VA, 63p., 1996.

[17] 국립해양조사원, 조류도(부산에서 여수), p. 20, 2002.

[18] 佐々木正 柳瀬良介 渥美敏 青山雅俊, カジメ群落擴大に關する硏究(昭和57～58年度指定調査硏究總合造成事業報告), 靜岡水產試驗場伊豆分場資料第153号, p. 19, 1984.

[19] 柳瀬良介·佐々木正·青山雅俊, カジメ群落擴大に關する硏究(昭和57年度指定調査硏究總合助成事業報告書), 靜岡水試伊豆分場資料第143, pp. 1-14, 1983.

[20] 川崎保夫, メンテナンスフリーのアラメ·カジメ場造成技術, 工業技術會 生物の豊かな環境創造のための藻場造成技術, pp. 4-1-4-23, 1995.

[21] 安藤亘 金山進 中村憲司 村本信夫, "ホンダワラ類の幼胚の到達範囲と藻場マウンドの位置關係について", 海洋開發論文集, 第18卷, pp. 179～183, 2002.

저 자 소 개

조재권 (趙宰滸)

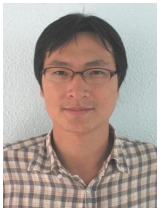
여수대학교 졸업, 여수대학교 대학원 졸업(이학박사), 2000년～현재 국립수산과학원 남서해수산연구소 해역산업과 재직, 관심분야 : 수산자원조성, 양식기술개발.

김대권 (金大權)

제주대학교 졸업, 제주대학교 대학원 졸업(이학박사), 1976년~현재 국립수산과학원 남서해수산연구소 해역산업과 재직, 관심분야 : 인공어초에 의한 자원조성.

이문옥 (李文沃)

부산수산대학교 졸업, 오사카대학교 대학원 졸업(공학박사), 1983년～현재 전남대학교 해양기술학부 (교수)재직, 관심분야 : 환경수리학 및 해양생태환경복원기술



오태건 (吳兌建)

여수대학교 해양토목공학과졸업, 전남대학교 해양공학과(공학박사), 2004년~현재 국립수산과학원 자원조성사업단, 관심분야 : 수산토목기술에 의한 수산자원조성