



Original Article

제주해역에 설치된 해중림초에서의 감태 포자확산 특성

김용관¹ · 이황기¹ · 강운호² · 최옥인³ · 김종규^{4,†}

¹전남대학교 대학원 조선해양공학과 박사과정

²광주과학기술원 지구환경공학부 연구원

³한국수산자원관리공단 인사관리실 실장

⁴전남대학교 조선해양공학과 교수

The Characteristics of Spore Diffusion for *Ecklonia Cava* around Jeju Marine Forest Reefs

YongKwan Kim¹, HangKi Lee¹, YunHo Kang², OckIn Choi³, and JongKyu Kim^{4,†}

¹Ph.D Student, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Graduate School, Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea

²Researcher, School of Earth Sciences and Environmental Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology, Gwangju 61005, Korea

³Head, Human Resources Management Division, Korea Fisheries Resources Agency, Busan 46041, Korea

⁴Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea

요 약

본 연구에서는 바다숲 조성해역에 설치된 해중림초에서 방출되는 포자확산 특성을 조류관측 및 CFD(Computational Fluid Dynamics)를 이용한 수치모형실험을 수행하여 파악하였다. 왕복성 흐름을 재현하기 위하여 조류관측결과를 조화분해하여 경계조건으로 이용하였으며, 해중림초는 대상해역에 설치된 정삼각뿔형어초, 이중돛형어초, 날개부들가진 어초를 대상으로 수치모형실험을 수행하였다. 그 결과, 각각의 해중림초에 대하여 최대 14.64 m, 11.47 m, 10.75 m까지 포자가 이동하였으며, 해중림초에서 방출된 포자는 각각 4.35 m, 3.01 m, 8.45 m 부유하는 것으로 나타났고, 해중림초 높이와 형상에 따라 포자확산 특성은 다르게 나타남을 확인할 수 있었다. 또한, 왕복성 흐름을 재현한 경우 주 흐름 방향의 반대방향으로 포자가 확산되는 현상을 확인할 수 있었다. 이는 흐름이 강하게 나타나는 어초 전면부에서 반대 흐름이 강하게 나타나 포자확산시 주 흐름방향의 반대방향으로 이동시키는 것으로 판단된다.

Abstract – In this study, numerical model experiments were conducted using the observation of tidal current and CFD(Computational Fluid Dynamics) in order to investigate the characteristics of spore diffusion released from marine forest reefs. In order to reproduce the reciprocal flow, observation of tidal current was harmonic analysis into the input values of the numerical model experiment. Numerical model experiments were carried out using triangular pyramid type reef, double-dome type reef, ribbed reef as representative marine reefs. As a result, the spores tended to spread to the opposite direction against the main flow and the spores were shifted up to 14.64 m, 11.47 m, and 10.75 m for each reef. In addition, spores released from the reef beds floated 4.35 m, 3.01 m and 8.45 m respectively. And, the characteristics of spore diffusion think to depend on the height and shape of the reefs. When the reciprocal flow was reproduced, the spore diffused to the opposite direction against the main flow. It is believe that the reverse flow is so strong at the front of the reef that most spores move to the opposite direction against the main flow when the spore is spread.

Keywords: Marine forest reef(해중림초), Seaweed spore(해조류 포자), *Ecklonia cava*(감태), CFD(전산유체역학)

†Corresponding author: kimjk@jnu.ac.kr

1. 서 론

최근 우리나라 주변해역에서는 해조군락이 소멸되고 무절석회조류가 번무하는 갯녹음현상이 확산되고 있으며, 이의 확산은 수생동물의 먹이원의 감소, 서식장 및 산란장의 소멸에 의해 기존 생태계의 균형을 유지할 수 없게 한다. 현재 일본에서는 대형 해조군락의 복원 및 수산자원증강을 위하여 바다숲의 보전과 회복에 관심이 집중되고 있으며, 소멸된 해조군락 회복의 일환으로서 해조류 서식적지를 선정하고 제공하는 바다숲 조성사업이 활발히 전개되고 있다(Terawaki *et al.*[2001]). 한편, 현재 바다숲이 잘 조성되어 있는 해역도 해중림초의 투하 등을 통하여 보다 넓은 영역으로의 확장을 도모할 수 있다.

갯녹음의 복원 및 기존의 바다숲에 대한 확장 재생산의 효율을 극대화하기 위해서는 해조류가 정착할 수 있는 해중림초와 같은 부착기질이 있어야 하고, 바다숲 조성은 해조장의 핵의 역할을 수행함으로써 바다숲 시설을 중심으로 하여 포자를 먼 곳까지 방출시켜 주변에 바다숲이 건강하게 유지될 수 있어야만 성공적으로 바다숲을 조성하였다고 할 수 있다. 한편, 포자의 이동은 해수유동과 매우 밀접한 관계를 지니고 있으며, 면밀히 분석하여야만 포자의 이동을 제대로 파악할 수 있다(Cho *et al.*[2012]).

이런 포자 이동에 대해서는 현장관측 및 수치모형실험을 통해 연

구가 이루어져 왔다. 현장관측의 경우 현장 작업이 어렵기 때문에 조사가 많이 이루어지지 않았으나 일반적으로 침강관을 이용한 방법이 있다. 침강관의 경우 관을 저면에 일정기간 놓아둔 후 포자가 이동하여 관에 부착하면 이를 회수하여 실험실에서 배양하여 수를 센다(Kennelly and Larkum[1983]). 침강관의 주요 문제점은 침강관의 이동과 침강관에 부착후 생존률이 낮아져 해석이 어렵다는 것이다. Kendrick and Walker[1991; 1995]는 현장에서 채취한 조류를 염색한 후 이를 현장에 다시 가져가 24시간 놓아둔 후 주변 바닥의 포자를 공기흡입기를 이용하여 채취하고 현미경을 이용하여 수를 측정하였다. 또한, 포자가 장거리 이동한 경우도 보고되었으며 이들은 대부분 번식이 가능한 식물 조각이 해류에 의해 떠다니는 형태로 장거리를 이동한다고 추론하였다(Thiel and Gutow[2005]; Kendrick *et al.*[2012]). 장거리 이동에 대한 조사는 DNA 비교를 통해 종 유사성을 밝혔으며, 최근에는 해수유동 및 입자추적 수치모형실험을 통해 장거리 이동의 가능성에 대한 근거를 제시한 사례가 보고된 바 있고, 특히 중국과 우리나라 주변에서 해류를 따라 이동되는 모자반에 대해 보고된 바 있다(Hu *et al.*[2013]; Komatsu *et al.* [2008]; Komatsu *et al.*[2014]).

한편, 국내에서는 바다숲에 대한 장기적인 조사가 아직까지 부족하여 입자추적 수치모형실험을 통한 해조류 포자의 이동, 확산에 대한 연구가 수행되고 있으나, 다양한 조건을 고려한 연구는 부족

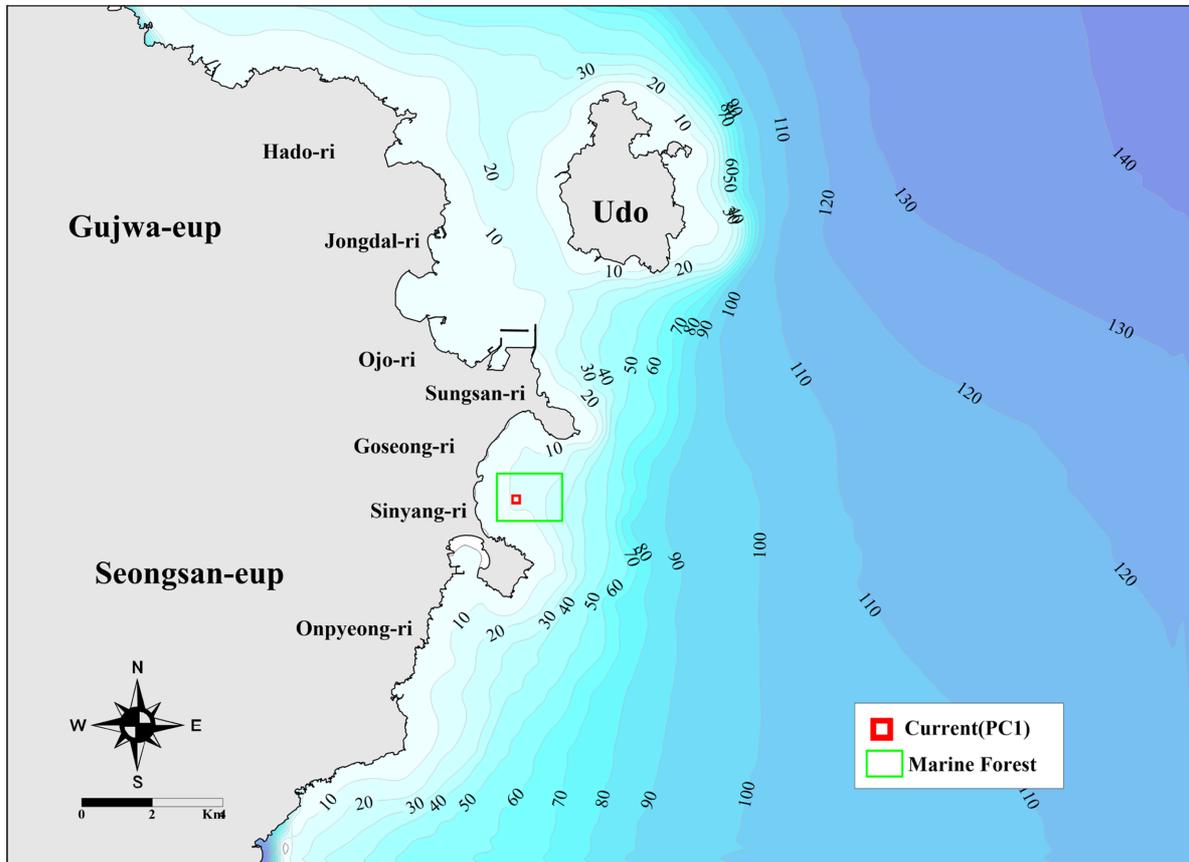


Fig. 1. Observation stations of study area.

Table 1. Description of field observation

	St	Period	Depth	Inst.
Current	PC1	2015. 3. 13 ~ 2015. 3. 28.	15 m	ADCP (RDI, USA)

한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 제주해역에 설치된 해중립초에서 방출된 감태 포자가 해저면에 도달할 때까지의 경로를 모의하여 포자의 거동을 파악하고자 하였으며, 아울러 바다숲 조성용 시설물의 효율적인 배치를 판단하기 위한 기초자료로 제공하고자 하였다.

2. 자료 및 방법

2.1 조류관측

해중립초의 감태 포자확산 수치모형실험의 입력자료로 사용하기 위하여 Fig. 1과 같이 바다숲이 조성된 제주도 서귀포시 성산읍 신양리 해역에서 2015년 3월 13일부터 28일까지 도플러 유속계인 ADCP를 저면에 설치하여 10분간격으로 15일간 조류관측을 실시하였으며, 관측개요는 Table 1에 나타내었다.

2.2 수치모형실험

대상해역의 현장관측자료와 해중립초의 3차원형상 구조물을 입력자료로 하여 해중립초 주변의 포자확산 특성을 파악하기 위하여 전산유체역학(CFD) 모델인 FLOW-3D를 이용하여 수치모형실험을 실시하였다.

2.2.1 지배방정식

직교좌표계(x,y,z)에서 비압축성 유체의 3차원 흐름을 해석하기 위한 지배방정식은 연속방정식, 운동방정식으로 다음과 같다(Flow Science, 2014).

$$V_F = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) R_{DIF} + R_{SOR} \quad (1)$$

여기서, V_F 는 유체에 접하고 있는 체적을 의미하며, ρ 는 유체의 밀도, R_{DIF} 는 난류확산항, R_{SOR} 는 질량생성항을 나타낸다. 속도성분 u , v , w 는 각각 x , y , z 방향으로의 속도를 나타낸다. A_x , A_y , A_z 는 계산 cell의 x , y , z 방향 유체가 접촉된 각각의 면적을 의미한다. 식 (1)의 우변 첫번째 항인 난류확산항은 다음과 같다.

$$R_{DIF} = \frac{\partial}{\partial x}(v_p A_x \frac{\partial \rho}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(v_p A_y \frac{\partial \rho}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(w_p A_z \frac{\partial \rho}{\partial z}) \quad (2)$$

여기서, v_p 는 $c_p \mu / \rho$ 와 같고, μ 는 운동량 확산계수 즉, 점도를 나타내며, c_p 는 상수로 역수는 Turbulent Schmidt Number라 불린다. 난류확산을 표현한 식 (2)는 불균일한 밀도를 갖는 유체 내의 난류혼합 과정에서만 의미를 갖는다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} u \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} v \quad (4)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} w \quad (5)$$

여기서, u , v , w 는 x , y , z 방향별 유체속도, V_F 는 체적비(Volume fraction), A_x , A_y , A_z 는 각 방향별 유체 흐름을 위해 확보된 면적비(Area fraction), ρ 는 유체 밀도, R_{SOR} 은 질량생성/소멸(Mass source/sink)항, p 는 압력, G_x , G_y , G_z 는 방향별 체적력항, f_x , f_y , f_z 는 방향별 점성력항, b_x , b_y , b_z 는 다공질 매체에서 방향별 흐름 손실이다. 모델에서는 물과 공기의 경계인 자유수면을 모델링하기 위하여 지배방정식을 만족하는 VOF (volume of fluid)함수, $F(x, y, z, t)$ 를 정의한다. F 가 1인 경우는 검사체적에 유체가 가득한 상태를, 0인 경우는 검사체적에 유체가 없는 경우를 나타내는 것으로 자유수면에서는 F 가 0과 1사이의 값을 가진다. 단위체적내에 포함하고 있는 유체의 체적은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ \frac{\partial u}{\partial x}(F A_x u) + \frac{\partial v}{\partial y}(F A_y v) + \frac{\partial w}{\partial z}(F A_z w) \right\} = F_{DIF} + F_{SOR} \quad (6)$$

여기서, R_{DIF} 는 난류확산항이며, R_{SOR} 은 연속·운동량방정식에서 유체의 질량생성으로 인해 변화되는 유체의 시간에 따른 체적변화율을 의미하며, F 는 자유표면을 포함하고 있을 때 유체가 차지하고 있는 체적비율을 의미한다. 운동방정식, 에너지, VOF함수의 수송방정식에 사용되는 확산항은 난류확산과 분자확산으로 구분할 수 있다. FLOW-3D에서 난류확산을 산정하기 위하여 제공하는 난류모형은 κ - ϵ , RNG κ - ϵ , LES (Large Eddy Simulation) 등이 있다. 본 연구에서는 실무적인 관점에서 가장 일반적으로 사용되고 있는 RNG κ - ϵ 난류모형을 사용하였다. 난류확산을 산정하기 위한 난류운동에너지와 난류확산의 수송방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial k}{\partial x} + v A_y \frac{\partial k}{\partial y} + w A_z \frac{\partial k}{\partial z} \right\} = P + G + Diff - \epsilon \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + v A_y \frac{\partial \epsilon}{\partial y} + w A_z \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right\} \\ = \frac{CDIS1 \cdot \epsilon}{k} + (P + CDIS3 \cdot G) + DDif - CDIS2 \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, P 는 전단응력항, G 는 부력항, $Diff$, $DDif$ 는 확산항, $CDIS1$, 2, 3은 상수를 나타낸다.

2.2.2 수치해석

지배방정식은 유한차분법을 이용하여 이산화하는데, FLOW-3D는

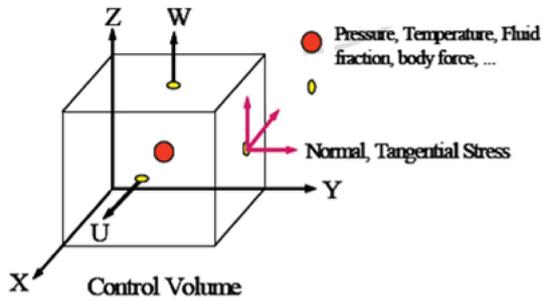


Fig. 2. The grid system in FLOW-3D.

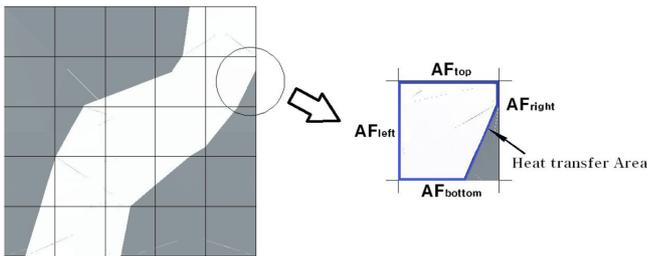


Fig. 3. Schematic diagram of FAVOR scheme.

유한차분법에 FAVOR기법을 도입한 유한체적법의 접근법을 사용한다. 해석 영역을 격자로 나눈 후, 이 격자 단위로 계산이 이루어지는데, 각 격자에 대해서 주어진 압력에 대해 다음 시간에서의 속도를 구하며 이 속도를 이용하여 Poisson 방정식 형태의 압력방정식의 해를 구한 다음 다시 속도를 교정하고 그 후에 자유수면의 해석이 요구될 때는 VOF방정식을 풀어나가는 방법을 이용한다. FLOW-3D에서 사용하는 격자계는 Fig. 2와 같다. 격자계(grid system)의 구성시 격자망(mesh)과 지형(geometry)은 독립적으로 입력된다. 이는 Fig. 3의 FAVOR (Fractional Area and Volume Obstacle Representation)기법을 사용하는 것으로, 육면체 격자망에 구조물, 벽체 등의 지형정보가 포함된다. 제트, 비산, 파랑 등과 같은 자유수면 운동의 기술은 움직이는 격자를 사용하는 라그랑지(Lagrangian)방법보다 고정 오일러(Eulerian)방법을 사용하는 VOF 방법이 일반적이다. FLOW-3D에 사용하는 VOF 방법은 정확한 압력 및 운동학적 경계조건을 적용하고 있으며, 유한차분시 경계면의 Smearing을 방지하기 위해 특별 수치차분법을 사용함으로써 두 유체(유체와 공기일 경우는 보통 자유수면으로 가정함)사이의 운동을 기술할 수 있는 수치해석 방

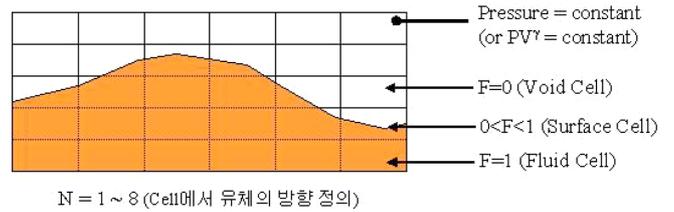


Fig. 4. Schematic diagram of VOF method.

법이다. Fig. 4에 VOF방법의 개념도를 나타내었다.

지배방정식의 차분식은 운동방정식의 압력항과 연속방정식의 유속항을 제외하면 모두 양해법으로 차분된다. 연속방정식을 만족하도록 압력항을 계산하기 위해서는 SOR(successive overrelaxation)법과 SADI(special alternating-direction, line implicit)법을 사용할 수 있다. 계산은 운동방정식을 양해법으로 풀어서 각 방향의 유속을 계산, 연속방정식을 만족하도록 운동방정식의 압력과 유속을 반복 계산, 자유수면, 난류특성, 에너지 수송방정식을 계산하는 순서로 이루어진다. 계산시간 간격은 수치모형의 안정조건을 만족하도록 자동으로 조정된다.

2.2.3 수치모형실험 조건

해중림초에서 포자방출에 따른 확산을 해석하기 위해 수치모형 실험을 실시하였으며, 왕복성 흐름의 조건을 재현하기 위하여 2015년 3월 13일~2015년 3월 28일 대상해역에서 조류관측한 결과를 바탕으로 조화분해한 결과를 경계값으로 입력하였다. 경계값은 해중림초에 직접적으로 영향을 주는 저층의 흐름값을 사용하였다.

수치모형실험에 사용된 해중림초의 형상은 대상해역에 현재 설치되어 있는 해중림초 3종(정삼각뿔형어초, Triangular pyramid type reef; 이중돛형어초, Double-dome type reef; 날개부를가진어초, Ribbed reef)을 대상으로 하였으며, 3차원으로 구조물을 형상화하여 수치모형실험을 실시하였다. 또한, Fig. 5와 같이 해조류를 이식하는 위치에서 포자가 방출되게 설정하였다. 해조류는 대상해역에서 가장 많이 서식하고 있는 감태를 고려하였다. 해조류 포자는 해수중에서 자발적인 유영능력을 갖추고 있지 않으나 부유할 수 있는 형태를 갖추고 있으며, 포자의 침강속도는 해수의 밀도, 점성계수, 그리고 포자의 입자크기와 밀도와 관련이 있다. 평균적으로 해수온도 12°C, 염분 30%의 해수의 밀도는 1,022.7 kg/m³이며, 또한, 해수의

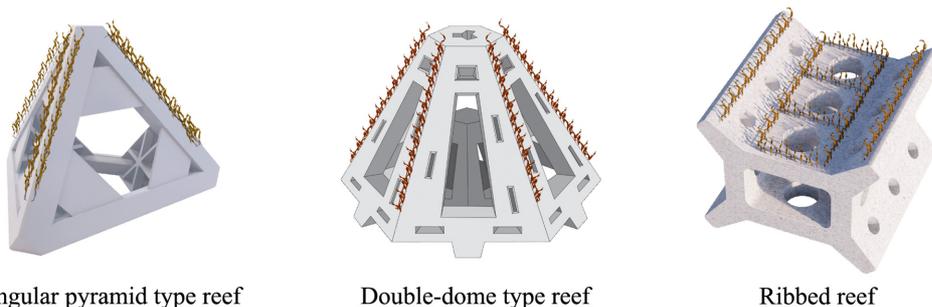
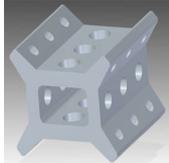


Fig. 5. Seaweed spore germination position of Marine Forest Reefs.

Table 2. Particle size and density, Sedimentation velocity of seaweed

Seaweed	Particle size (d,m)	Density (ps, kg/m ³)	Particle settling velocity (mm/s)
Ecklonia Cava	65×10 ⁻⁶	1350	0.67×10 ⁻⁸

Table 3. Experiment Conditions of Numerical FLOW-3D

Items	Experiment condition		
Numerical model	FLOW-3D		
Structure (3D-Modeling and Size (L×B×H))			
	Triangular pyramid type reef 2.7×3.12×2.9(m)	Double-dome type reef 3.45×3.80×2.40(m)	Ribbed reef 3×3×2.4(m)
Seaweed spore release position	0.8~2.7 m	0.8~2.2 m	1.5~2 m
Calculation area	300×300×15(m)		
Number of grid	150×150×40(900,000 EA)		
Boundary condition	UV velocity from observation of current at bottom		
Time step	10 ⁻¹⁰ ~10 ⁻² sec		

점성계수는 1.12×10⁻⁸ kg/m³로 반영하였다. Table 2에 감태포자에 대한 입자크기와 밀도를 나타내었으며, Stokes법칙에 따른 침강속도를 계산한 결과를 제시하였다. 단, 모든 포자 입자의 형태는 구형으로 가정하여 수행하였다.

Table 3과 같이 수치모형실험 조건은 대상영역의 왕복성 흐름을 재현하기 위하여 전면부(Xmin)과 후면부(Xmax)에서의 유속조건을 고려하였으며, 측면(Ymin-Ymax) 경계조건은 유동에 영향이 미치지 않도록 대칭조건으로 모사하였다. 저면은 불투과성 조건으로 가정하였으며, 1 m 두께의 저질로 가정하였고 상부는 압력조건을 입력하였다. 또한, 수치모형의 좌표계는 X, Y, Z 축의 Cartesian 좌표계를 사용하였으며, X축 방향의 길이(lx)는 300 m, Y축 방향의 폭(ly)은 300 m, Z축 방향의 높이(lz)는 15 m이며, 최소격자는 해중림초의 형상을 구현하기 위하여 20 cm 간격으로 하여 최대 42 cm 크

기로 하였다. 계산된 총 격자수는 각각 x방향 150개, y방향 150개, z방향 40개로 총 900,000개로 격자를 생성하였으며, 감태포자의 방출높이는 각각의 해중림초에 따라 다르게 설정을 하였다. 계산시간은 유체가 안정화 될 때까지 수치모형실험을 실시하였다. Fig. 6에 경계조건을 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 조류관측 결과

조류관측결과, PC1정점 표층의 경우 최강유속은 21.3~28.1 cm/s, 평균유속은 6.3~7.5 cm/s로 나타났으며, 중층의 경우 최강유속은 17.3~24.4 cm/s, 평균유속은 8.1~14.5 cm/s로 나타났고, 저층의 경우 최강유속은 14.5~16.2 cm/s, 평균유속은 창조시에 4.5~5.5 cm/s로 나

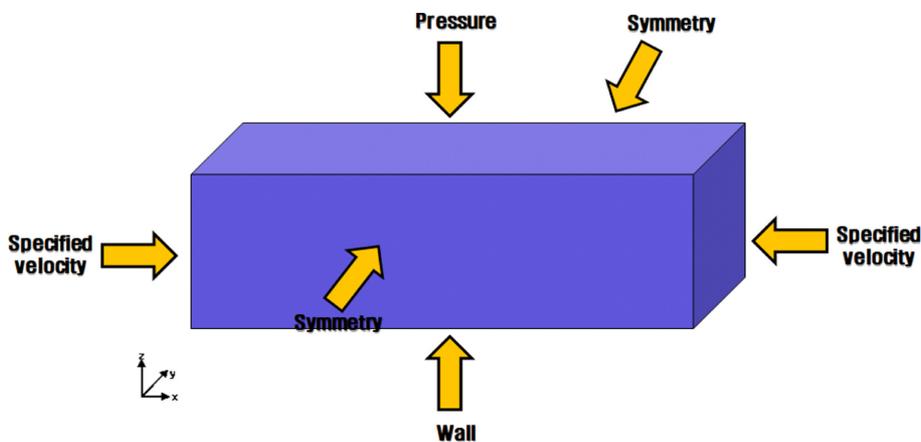


Fig. 6. Boundary conditions.

PC1 Mar. 13 to 28, 2015

Data interval : 10 min

Unit : cm/s

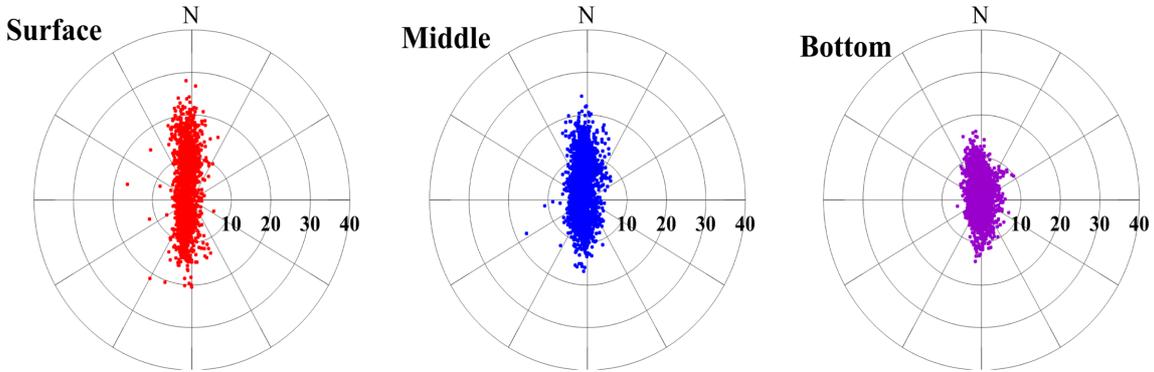


Fig. 7. Scatter of tidal current.

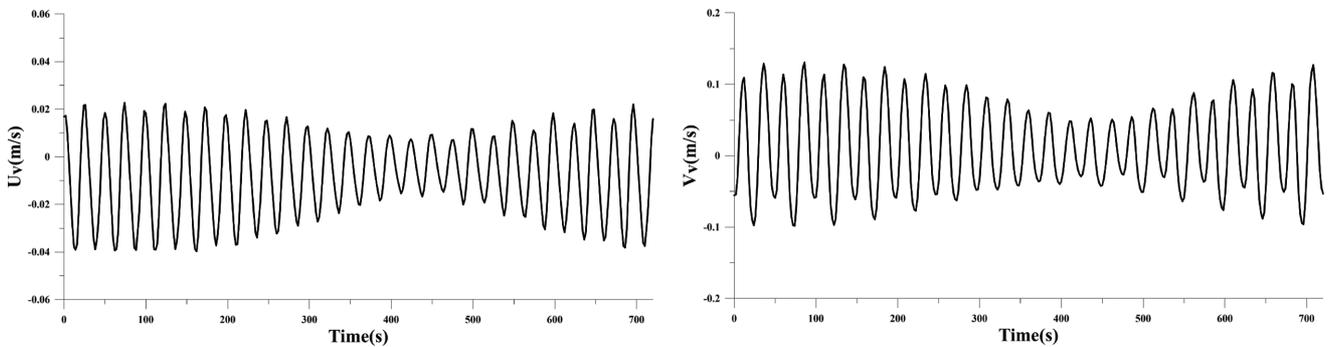


Fig. 8. Time series of U and V components of velocities.

타났다. 한편, PC1정점에서는 낙조시보다 창조시의 흐름이 상대적으로 우세하게 나타났으며(Fig. 7), Fig. 8에 수치모형실험의 경계 조건으로 사용된 UV유속을 시계열로 나타내었다.

3.2 수치모형실험 결과

3.2.1 수치모형실험 검증

FLOW-3D를 이용하여 어초 주변의 흐름이 잘 재현되는 지를 파악하기 위하여 Jeong[2007]은 기존연구인 Kim[2001]이 실시한 수치모형실험 결과와 비교 검증하였다. 수치모형의 축적은 기존연구 결과와 동일하도록 2×2(m) 크기의 사각어초를 3/100배로 축소하였으며, x방향의 길이는 400 cm(-100, 300), X-min과 X-max 경계에는 각각 유입과 유출경계 조건으로 하였다. Y축방향의 폭은 60 cm(-30, 30), Y-min과 Y-max 경계에는 해중림초 주변의 흐름장이 양쪽 경계에서 교란되지 않도록 대칭조건으로 하였으며, Z축방향의 높이는 70 cm(0, 70), Z-min과 Z-max 경계에는 각각 불투과성 조건과 자유수면 조건으로 고려하여 계산하였다. 여기서, 사각형어초 전면은 계산영역의 중앙에 위치하였고, 계산된 총 격자수는 175,560 개(95×24×77)였으며, 사각형어초의 형상이 잘 구현될 수 있도록 사각어초가 설치된 영역에서의 격자간격은 $\Delta x=0.5$ cm, $\Delta y=0.5$ cm, $\Delta z=0.2$ cm로 하였다. 유속조건은 기존 실험과 동일하게 12, 14, 16, 18,

20, 22(cm/sec)로 설정하여 레이놀즈수의 변화에 따른 사각형어초 주변에서의 흐름특성을 파악하였다. Fig. 9에서와 같이 사각형어초에서 발생하는 최대유속의 위치는 전면의 상단중앙에서 나타났으며, 이러한 분포는 각각의 유속조건에서 동일하게 나타났다. 특히, 사각형어초 저면에 대해 전면과 내부 및 배후에서 유속크기가 0에 가까운 부분이 발생하였고, 이를 경계로 주 흐름과 반대방향인 회전류 영역이 발생됨을 확인할 수 있었는데 기존연구에서는 어초 저면부에서 발생하는 흐름에 대하여 주 흐름방향의 역방향으로 수평방향의 유속성분이 발생하는 이 영역을 후류영역으로 정의하였다(Oh *et al.* [2004]). 수치모형실험 검증결과, Jeong[2007]이 수행한 인공어초 주변의 흐름장에 관한 수치모형실험 결과와 동일하게 패턴이 재현됨을 확인할 수 있었다.

한편, Yang *et al.*[2000]의 착저식 침선어초에 대한 연구에서는 Re수가 8,000 이상일 때 배후면의 후류의 길이 및 분포가 일정하게 나타남을 보였는데, 본 연구에서 레이놀즈수의 범위는 7,200~13,200이며, 사각형어초의 배후에서 일정한 후류길이와 분포를 보였고, 후류의 최대길이는 4~5 cm로 기존연구 결과와 잘 일치하는 것으로 확인되었다. Fig. 10은 사각형어초 저면에서 발생하는 회전류의 최대 유속에 대한 결과를 나타낸 것으로 여기서, U는 유입경계의 유속, u_w 는 저면에서 회전류의 최대유속을 나타낸다. 사각형어초 내부

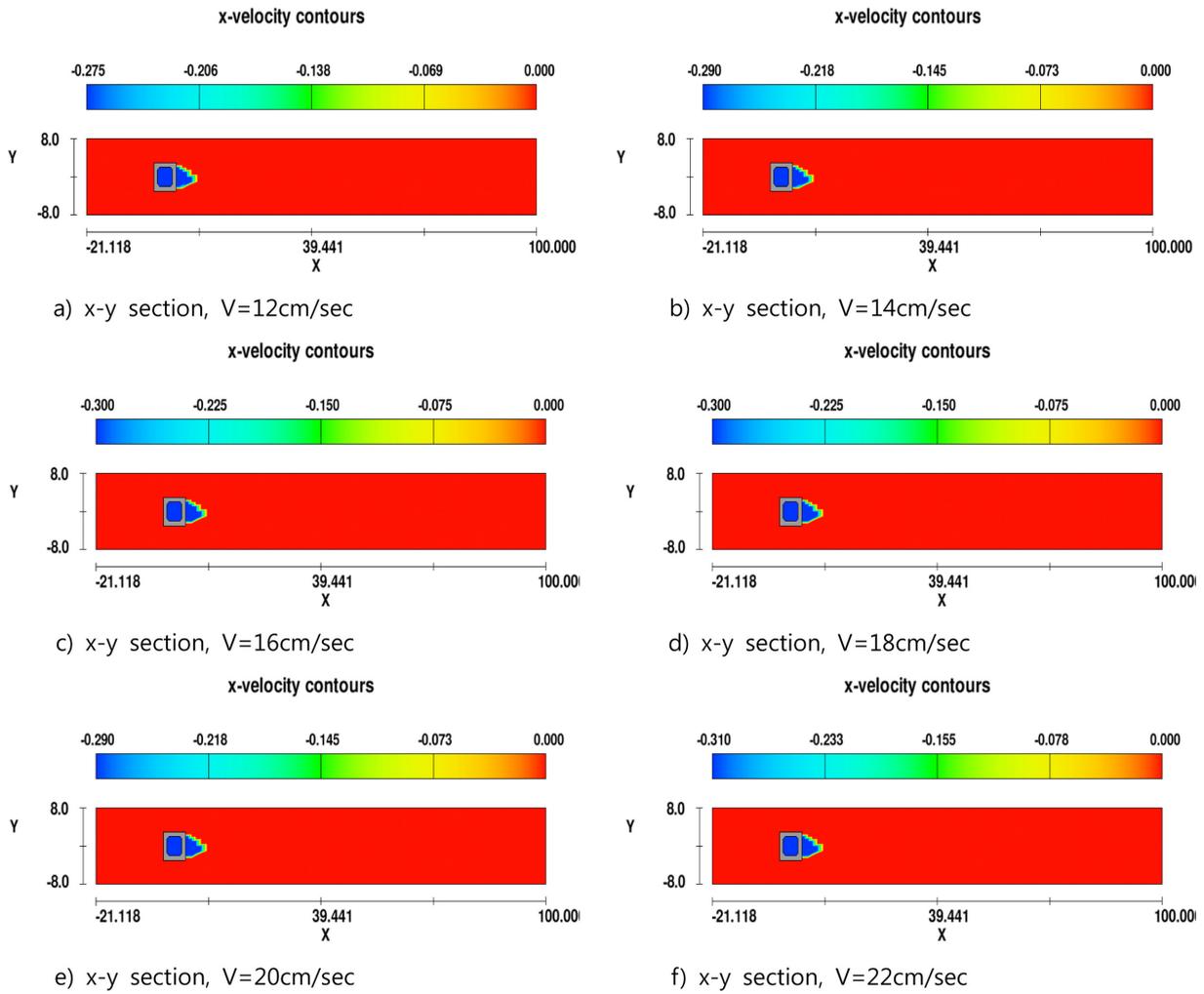


Fig. 9. Velocity distributions around the square reef.

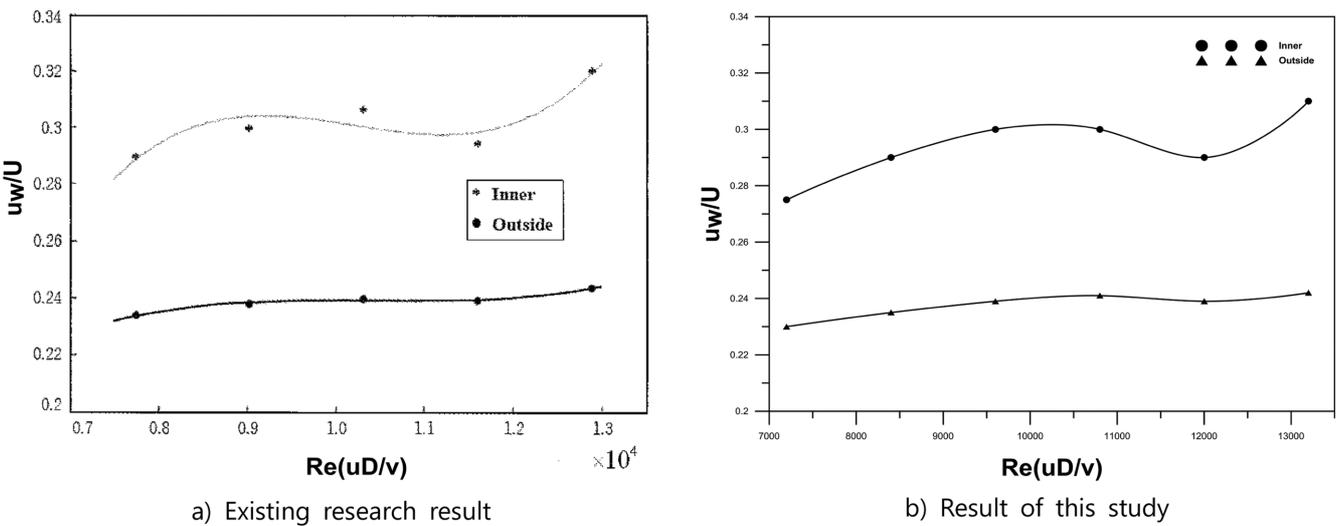


Fig. 10. Characteristics of recirculation velocity versus the Reynolds number.

(Inner)에서 회전류의 최대유속은 배후(Outside)영역에 비해 1.2~1.3 배 더 크게 나타났고, 레이놀즈수가 12,000에서는 회전류의 최대

유속이 작아짐을 보였으며, 이러한 연구 결과는 기존연구 결과와 정성적으로 일치하였다.

Table 4. Results of spore diffusion for *Ecklonia Cava*

Distance direction	X direction		Z direction	
	Xmin	Xmax	Zmin	Zmax
Triangular pyramid type reef	14.64	0.03	0	4.35
Double-dome type reef	11.47	4.03	0	3.02
Ribbed reef	10.75	5.07	0	8.45

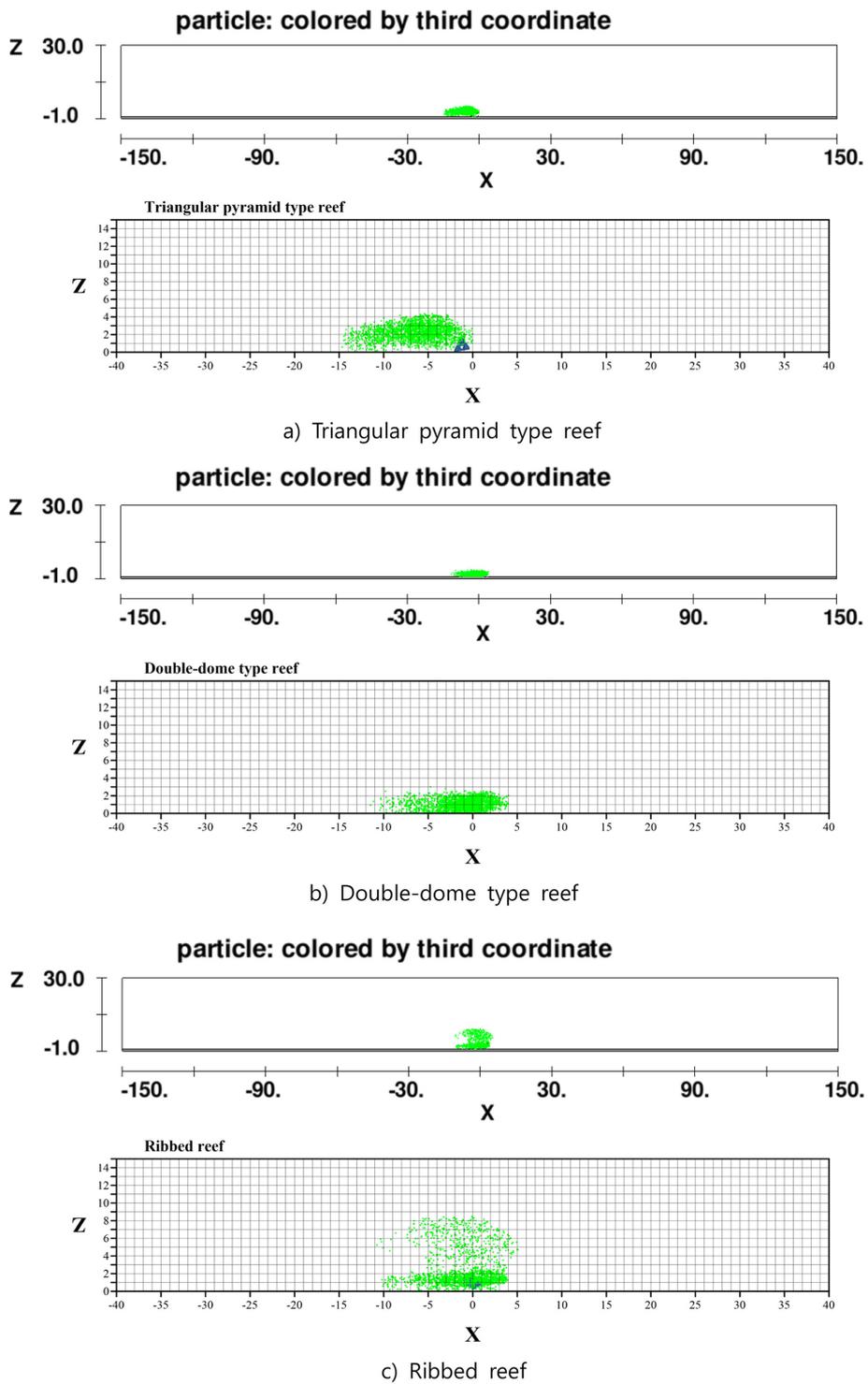


Fig. 11. Spore dispersal of artificial reef having wing portion.

3.2.2 포자확산 수치모형실험

대상해역에 설치된 해중립초의 감태포자 거동에 대한 수치모형 실험 결과를 Table 4 및 Fig. 11에 나타내었다. 정삼각뿔형어초에서는 주 흐름방향의 반대방향으로 최대 14.64 m 이동하였으며, 주로 10~13 m에서 안착되는 결과를 확인할 수 있었다. 또한, 해중립초에서 방출된 포자는 최대 4.35 m까지 부유하는 것으로 나타났다. 이중돛형어초의 경우 주 흐름방향의 반대방향으로 최대 11.47 m 이동하는 것으로 나타났으며, 주 흐름방향으로 4.03 m 이동하는 것을 보였고, 주 흐름 반대방향의 0~5 m내에 포자가 안착되는 결과를 확인할 수 있었다. 그리고 해중립초에서 방출된 포자의 최대 부유는 3.02 m까지 부유하였으며, 설치된 해중립초중 가장 낮게 부유하는 것으로 나타났다. 날개부틀가진어초의 경우 포자는 최대 10.75 m까지 포자가 이동하였으며, 주 흐름방향으로 5.07 m 이동하는 것으로 나타났고, 포자는 해중립초 주변 3 m 이내에서 안착되는 결과를 확인할 수 있었다. 또한, 해중립초에서 방출된 포자의 최대 부유는 8.45 m까지 부유하였다. 이는 해중립초의 날개부분에서의 흐름이 강하게 나타나 방출된 포자를 어초의 상부로 이동시키는 것으로 판단된다.

한편, 왕복성 흐름에서의 포자확산은 해중립초 전면부를 지나는 흐름의 반대방향으로 포자가 이동하는 것으로 나타났다. 해중립초 전면부를 지나는 유속이 증가하는 만큼 해중립초의 전면부에서 반대 흐름도 크게 나타난다. 따라서, 해중립초를 설치할 때 주 흐름 방향의 반대방향으로 해중립초를 설치해야 할 것으로 판단된다.

위 결과를 바탕으로 해중립초의 설치시 배치간격을 설정하면, 정삼각뿔형어초의 경우 감태포자가 주 흐름방향의 반대방향으로 약 15 m 이내에서 안착되는 현상을 나타내는 것으로 보아 어초의 배치간격은 최대 13 m 간격으로 설치하여야 할 것으로 판단되며, 이중돛형어초의 경우 주 흐름 방향으로는 4 m, 흐름반대방향의 5 m에 포자가 안착되는 것으로 보아 해중립초의 간격은 4 m 이내에 설치하여야 할 것으로 판단된다. 또한, 날개부틀가진어초의 경우 포자는 해중립초 주변에서 주 흐름방향과 반대방향으로 3 m 이내에 안착되는 것으로 보아 해중립초는 3 m 이내의 간격으로 설치하여야 할 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 해중립초에서 방출된 포자확산 특성을 파악하기 위하여 해중립초가 설치된 바다숲 조성해역에서 2015년 3월 13일~28일까지 조류관측을 실시하였고, 그 결과를 바탕으로 CFD 모델인 FLOW-3D의 경계값으로 적용하여 수치모형실험을 수행하였다.

조류관측 결과, PC1점점 표층의 경우 평균유속은 63~7.5 cm/s로 나타났으며, 중층의 경우 평균유속은 8.1~14.5 cm/s로 나타났고, 저층의 경우 평균유속은 창조시에 4.5~5.5 cm/s로 나타났다. 대상해역은 낙조시보다 창조시의 흐름이 상대적으로 우세하게 나타났다.

포자확산 수치모형실험 결과, 정삼각뿔형어초의 경우 포자는 주 흐름방향의 반대방향으로 최대 14.64 m 이동하였으며, 주로

10~13 m에서 안착되었고, 해중립초에서 방출된 포자는 최대 4.35 m까지 부유하였다. 이중돛형어초의 경우 포자는 주 흐름방향의 반대방향으로 최대 11.47 m 이동하였으며, 주 흐름방향으로 4.03 m 이동하였고, 주 흐름의 반대방향의 0~5 m내에 포자가 안착되었으며, 해중립초에서 방출된 포자는 최대 3.02 m까지 부유하였고, 설치된 해중립초 중 가장 낮게 부유하였다. 날개부틀가진어초의 경우 포자는 최대 10.75 m까지 이동하였으며, 주 흐름방향으로 5.07 m 이동하였고, 해중립초 주변 3 m 이내에 안착하였으며, 해중립초에서 방출된 포자는 최대 8.45 m까지 부유하였다. 이는 해중립초의 날개부분에서의 흐름이 강하게 나타나 방출된 포자를 어초의 상부로 이동시키는 것으로 판단된다.

본 연구에서 왕복성 흐름을 재현한 경우 주 흐름방향의 반대방향으로 포자가 확산되는 현상을 보였다. 이는 흐름이 강하게 나타나는 어초 전면부에서 반대흐름이 강하게 나타나 포자 확산시 반대방향으로 이동시키는 것으로 판단된다. 향후 해중립초가 설치될 해역의 실험역 흐름을 재현한 해중립초 주변의 포자확산 특성에 관한 연구가 추가로 진행되어야 할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 해양수산부가 지원하는 “1MW 해수온도차발전 실증 플랜트 개발”사업과 관련된 내용이며, 지원에 감사드립니다.

References

- [1] Cho, J.K., Lim, Y.S., Hong, D.U., Kim, J.K., 2012, Modelling Algae Transport in Coastal Areas with Marine Afforestation. J. Korean. Soc. Mar. Environ. Energy, 15(1), 1-8.
- [2] Flow Science 2014., Flow-3D Use's Manual., version 11.
- [3] Hu, Z.M., Zhang, J., Lopez-Bautista, J., Duan, D.L., 2013, Asymmetric genetic exchange in the brown seaweed *Sargassum fusiforme* (Phaeophyceae) driven by oceanic currents. Mar. Biol., 160, 1407-1414.
- [4] Jeong, C.H., 2007, Numerical Analysis of the Flow Field around Artificial Reefs. J. Kor. Fish Soc., 40(1), 31-38.
- [5] Kendrick, G.A., Walker, D.I., 1991, Dispersal distances for propagules of *Sargassum spinuligerum* (Sargassaceae, Phaeophyta) measured directly by vital staining and venturi suction sampling. Mar. Ecol. Prog. Ser., 79, 133-138.
- [6] Kendrick, G.A., Walker, D.I., 1995, Dispersal of propagules of *Sargassum* spp. (Sargassaceae: Phaeophyta): Observations of local patterns of dispersal and consequences for recruitment and population structure. J. Exp. Mar. Biol. Ecol., 192, 273-288.
- [7] Kendrick, G.A., Waycott, M., Carruthers, T.J.B., Cambridge, M.L., Hovey, R., Krauss, S.L., Paul, S., Lavery, Les, D.H., Lowe, R.J., Vidal, O.M., Ooi, J.L.S., Orth, R.J., Rivers, D.O., Ruiz-Montoya, L., Sinclair, E.A., Statton, J., van Dijk, J.K., Verduin, J.J., 2012, The Central Role of Dispersal in the Maintenance and Persistence of Seagrass Populations. BioScience, 62(1), 56-65.

- [8] Kennelly, S.J., Larkum, A.W.D., 1983, A preliminary study of temporal variation in the colonization of subtidal algae in an *Ecklonia radiata* community. *Aquatic Botany*, 17, 275-282
- [9] Kim, H.T., 2001, A Study of Artificial Reef Subsidence in Unstead Flow Field. *J. Oce. Eng. Tec.*, 15(2), 33-38.
- [10] Komatsu, T., Matsunaga, D., Mikami, A., Sagawa, T., Boisnier, E., Tatsukawa, K., Aoki, M., Ajisaka, T., Uwai, S., Tanaka, K., Ishida, K., Tanoue, H., Sugimoto, T., 2008, Abundance of drifting seaweeds in eastern East China Sea. *J. Appl. Phycol.*, 20, 801-809.
- [11] Komatsu, T., Fukuda, M., Mikami, A., Mizuno, S., Kantachumpoo, A., Tanoue, H., Kawamiya, M., 2014, Possible change in distribution of seaweed, *Sargassum horneri*, in northeast Asia under A2 scenario of global warming and consequent effect on some fish. *Mar. Pollut. Bull.*, 85, 317-324.
- [12] Oh, T.G., Lee, M.O., Otake, S., 2004, A Fundamental Study on the Hydrodynamic characteristics and Material Exchange Rate at the Wake Region of Artificial Reefs. *J. Korean. Soc. Mar. Environ. Energy*, 209-217.
- [13] Terawaki, Hasegawa, H., Arai, S., Ohno, M., 2001, Managementfree techniques for restoration of *Eisenia* and *Ecklonia* bed along the central Pacific coast of Japan, *Appl. Phycol.*, 13, 13-17.
- [14] Thiel, M., Gutow, L., 2005, The ecology of rafting in the marine environment. II. the rafting organisms and community, *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, 43, 279-418.
- [15] Yang, C.K., Kim, H.T., 2000, A Study on the Characteristics of the Flow around a Sunken Vessel. *Ocean Engng.*, 14(4), 9-16.

Received 15 October 2018

1st Revised 14 November 2018, 2nd Revised 8 December 2018

Accepted 31 January 2019