Article

조도계수를 이용한 거머리말 해초지의 조석류에 대한 수치실험

오택건¹ · 김창길¹ · 김정배¹ · 이상용^{2*}¹국립수산과학원 남해수산연구소
(556-823) 전라남도 여수시 화양면 안포리 347²국립수산과학원 해조류연구센터
(530-831) 전라남도 목포시 옥암동 1101Water Flow Estimation using Roughness Coefficient
in a Seagrass (*Zostera marina* L.) BedTae Gun Oh¹, Chang Gil Kim¹, Jeong Bae Kim¹, and Sang Yong Lee^{2*}¹South Sea Fisheries Research Institute, NFRDI
Yeosu 556-823, Korea²Seaweed Research Center, NFRDI
Mokpo 530-831, Korea

Abstract : Spatial distribution of water flow generated by tidal current was investigated within a *Zostera marina* (seagrass) bed in Wonpo Bay. Water flow and elevation were observed during the seagrass growing season. The spatial distribution of water flow was numerically estimated using roughness coefficient. Water flow inside the seagrass meadow was compared with the observed values. Velocity in *Zostera marina* vegetated areas was approximately 25~84% lower than that of unvegetated areas. However, flow direction was the same. Intensity of the flood tide diminished appreciably within the seagrass bed, while its pattern was also affected. It is therefore concluded that water flow is influenced by *Zostera marina* meadows.

Key words : *Zostera marina* L., seagrass bed, roughness coefficient, tidal current, numerical experiment

1. 서 론

연안의 내만이나 하구에 출현하는 해초지는 해수의 흐름이나 파랑의 물리적 충격을 흡수하거나 완화시켜 부유 현탁물을 침전 시키는 등 수질정화와 저질 안정에 중요한 역할을 담당한다(Fonseca and Cahalan 1992). 또한 해초지는 가장 생산성이 높은 식물군집의 하나로서 해양생물들의 서식처 및 산란처로 이용되고 있다(Short and Short 1984). 이러한 해초지의 중요성에도 불구하고 한국을 포함한 세계의 해초지는 인구의 증가와 연안 산업의 발달에 의해 급격히 감소되고 있다(Orth and Moore 1983; Aioi 1998).

최근 우리나라에서는 연안 생태계에 해초지가 미치는 역할과 기능을 회복하고, 생산성을 증대시키기 위해 해초지 복원 연구가 활발히 수행되고 있다(Lee *et al.* 2002). 해초 중에서 우리나라 전 연안에 가장 우점적으로 분포하는 거머리말(*Zostera marina* L.)에 대한 인공 종묘 생산 기술 개발과 성체 이식을 통한 해초지 조성사업이 활발히 진행되고 있다(Lee *et al.* 2005). 해초지 복원을 효과적이고 성공적으로 수행하기 위해서는 해초가 분포하는 지역들의 물리·화학적 환경 특성을 명확히 규명한 후 이식지역과 대상 종을 선정하여야 한다(Short and Coles 2001). 특히, 해초지의 물리적인 특성은 해초 자체로서 유동의 흐름에 저항할 뿐만 아니라 해초지의 생육밀도에 따라 유동의 방향과 강도에 영향을 미치는 것으로 나타났다(Fonseca

*Corresponding author. E-mail : seagrass1@nfrdi.go.kr

et al. 1982, 1983; Koch 1994; Vidono et al. 1997). 유동의 변화에 해초를 포함한 수중 식생을 고려하는 방법으로 식물체를 하나의 조도로 취급하여 마찰계수로 고려하는 방법이 있다(Koch et al. 2006).

유체의 흐름은 미소규모의 해초 생리에서부터 해초의 생태와 분포뿐만 아니라 대규모의 연안 생태까지 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 해초를 둘러싸고 있는 수괴의 섭동, 파랑과 해류로부터 영향을 받기도 하지만 해초는 유체의 흐름에 영향을 주기도 한다(Fonseca et al. 1982, 1983; Koch 1994; Koch and Gust 1999; Koch and Huettel 2000; Koch 2001; Cornelisen and Thomas 2002; Koch et al. 2006).

현재 유동의 변화에 대한 유속 분포식은 인공식생과 자연식생을 이용하여 다양한 조건에서 수리 실험을 통해 제시되고 있다(Kouwen et al. 1969; El-Hakim and Salama 1992; Tsujimoto et al. 1992; Stephan and Gutknecht 2002; Song and Park 2004). 식생의 조도에 대한 계산은 해석적 방법(Klopstra et al. 2002)과 맨닝 계수를 이용한 수리실험으로 식생주위의 흐름을 파악하였다(Wu et al. 1999). 또한 파랑에 대한 식생의 영향이 최근 보고되기도 하였다(Schutten et al. 2004).

국내에서는 식생된 개수로의 흐름을 k-ε 난류모델로서 해석 하였으며(권과 최 2000), 수초 영역의 흐름 변화를 수리실험으로 규명하였다(윤 등 2002, 2004; 최 등 2003). 또한 식생수로와 비식생수로의 조도의 특성과 유속의 분포를 비교하여 파악하였다(Song and Park 2004). 식생의 유체 흐름에 대한 연구는 일양류인 개수로에 한정되었으며, 수심 변화와 왕복성 흐름의 특성을 가진 연안의 해초 식생에 대한 연구는 미진하였다(Fonseca et al. 1982, 1983).

본 연구는 조간대를 포함하는 연안에서 거머리말 해초지의 식생에 대한 유체 흐름의 변화를 수치 실험으로 해석하고, 거머리말 해초지의 존재 여부에 따른 유체 유동을 비교 파악하고자 하였다.

2. 이론적 배경

이 연구에서 사용된 수치실험은 식생에 대한 유속 분포와 조도를 근거로 조사해역에 적용하였다. 수치실험에 적용된 모형은 Navier-Stokes 방정식의 해에 근거한 수심적분 모형으로 평균유속으로 조사 해역의 흐름을 고찰하였다.

해초가 존재하는 해역에서 유체의 흐름 상태는 유체의 관성력에 대한 점성력과 중력의 상대적인 영향에 따라 지배된다. 관성력에 대한 점성력의 비는 층류역, 천이역과 난류역으로 구분되며, 레이놀즈수(R_e)로 나타낸다.

$$R_e = \frac{VR_h}{\nu} \quad (1)$$

여기서 V 는 평균유속이며, R_h 동수반경, 그리고 ν 는 동점성 계수이다.

유체가 지니고 있는 점성력과 경계층에 존재하는 마찰계수는 전단응력을 유발시켜 마찰손실수두가 발생하게 된다. 수로길이(L)에 대한 마찰손실수두는 마찰손실계수(f)와 레이놀즈수(R_e)의 관계로 표현될 수 있다.

$$h_L = f \frac{L}{4R_h} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (2)$$

여기서 h_L 은 수로길이 L 에 걸친 마찰손실수두, L 은 수로길이, V 는 평균유속, f 는 마찰손실계수, 그리고 g 는 중력가속도이다. 따라서 마찰계수는

$$f = \frac{2gR_hS}{V^2} \quad (3)$$

여기서 $S(h_L/L)$ 는 에너지 경사이다. 식 (2)와 (3)을 이용한 평균유속은

$$V = \sqrt{\frac{8g}{f}} \sqrt{R_h S_0} = C \sqrt{R_h S_0} \quad (4)$$

여기서 C 는 Chezy계수이며, 마찰계수와와의 관계식은

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}} \quad (5)$$

마찰손실계수 f 로부터 평균 유속공식의 조도계수 n 과의 관계식은

$$C = \frac{R_h^{1/6}}{n} \quad (6)$$

따라서, 현장에서 거머리말 해초지의 적절한 조도계수를 산출하기 위해 다른 연구자들의 수리실험결과 값과 비교하여 수치실험의 실효성을 검증하였다. 이 연구실험에 사용된 수치모형은 M2D모델로서 운동방정식과 연속방정식에 대해 수심적분된 2차원 모델이다. 지배방정식은 유한차분법으로 근사되며, 각각의 격자는 교호격자체계를 사용하였다. 연속방정식과 각각의 x , y 에 대한 운동방정식은 식 (7), (8), (9)와 같다.

$$\frac{\partial(h+\eta)}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial u q_y}{\partial x} + \frac{\partial v q_y}{\partial y} + \frac{1}{8g} \frac{\partial(h+\eta)^2}{\partial x} \\ & = \frac{\partial}{\partial x} D_x \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} D_y \frac{\partial q_x}{\partial y} + f q_y - \tau_{bx} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial u q_y}{\partial x} + \frac{\partial v q_y}{\partial y} + \frac{1}{2} g \frac{\partial (h + \eta)^2}{\partial y} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} D_x \frac{\partial q_y}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} D_y \frac{\partial q_y}{\partial y} + F_c q_y - \tau_{by} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 h 는 정지수면일 때의 수심, η 는 수면승강에 따른 수위 값, t 는 시간, q_x 는 x 축에 평행한 단위 폭당 유량, q_y 는 y 축에 평행한 단위 폭당 유량, u 는 x 축에 평행한 수심 적분된 유속, v 는 y 축에 평행한 수심 적분된 유속, g 는 중력가속도, D_x 는 x 방향의 확산계수, D_y 는 y 방향의 확산계수, F_c 는 코리올리력, τ_{bx} , τ_{by} 는 각각의 축에 평행한 바닥 전단응력을 나타내며, τ_{bx} , τ_{by} 를 다시 쓰면 식 (10), (11)과 같다.

$$\tau_{bx} = C_b u |U| \quad (10)$$

$$\tau_{by} = C_b v |U| \quad (11)$$

여기서 C_b 는 경험적으로 구해진 바닥전단응력계수이며 g/C^2 로 나타낸다. x 방향 평균유속 $u = q_x/h + \eta$ 이며, y 방향 평균유속 $v = q_y/h + \eta$, $|U| = \sqrt{u^2 + v^2}$ 이다.

따라서, 식(6)에서 구한 C 값을 C_b 로 치환하여 식(10) 및 식(11)에 대입하여 바닥전단응력값을 구하게 된다.

양해법에서 계산시간 간격 Δt 는 식(12)과 같이 Courant 수로 주어진다.

$$\xi = u_c \frac{\Delta t}{\Delta s} \quad (12)$$

여기서 u_c 는 장파전달속도($\sqrt{gh}$), Δt 는 단일격자로 상정할 수 있는 미소거리, Δs 는 유체가 단일격자 끝에서 끝으로 이동하는데 걸리는 미소시간이다.

3. 재료 및 방법

연구지역

본 연구지역은 남해안 중앙에 위치한 가막만의 만 입구에 위치한 원포 내만으로 동서방향 길이는 약 1.2 km, 남북방향 길이는 약 1.3 km 정도로 만 입구에는 목도가 위치하고 있다. 원포 내만의 안쪽에는 조간대가 넓게 분포하고, 만 입구 주변 수심은 약 5~6 m 정도로 조하대는 대체적으로 편평하다. 가막만의 조류는 창조류 보다 낙조류가 다소 우세하며, 반일주조가 탁월한 왕복 조류 형태로 나타난다. 원포 내만의 조치는 대조기에 약 3.7 m 정도이며, 전형적인 반일주조의 특성을 지닌 해역이다(이와 조 1990; 이 등 2005). 연구지역에는 조간대 하부에서 수심 약 3.0 m 까지 거머리말(*Zostera marina* L.)의 해초지가 약 21 ha 정도로 넓게 분포하고 있다(Fig. 1).

Fig. 1. Study site in Wonpo Bay on the southern coast of Korea.

연구지역의 물리적 환경 특성을 조사하기 위하여 2007년 1월 19일부터 2월 13일까지 조위를 조사하였다(Fig. 1의 B 정점). 대조기인 2007년 1월 20일에는 25시간에 걸쳐 유속을 측정하였으며(Fig. 1의 A 정점), 측정된 값들은 수치실험 후 검증 값으로 이용하였다.

4. 결과 및 토의

조도계수의 입력조건

수치모형에 거머리말 해초지를 상정하기 위해서는 조도계수(n)가 필요하며, 거머리말 식물체의 높이가 일정하다고 가정한다면, 수심에 따른 마찰유속이 다르기 때문에 조도계수도 변하게 된다. 따라서, 거머리말 식생의 밀도, 수심에 따른 유속과 조도의 상관관계는 송과 박(2004)의 실내 유수조실험의 결과를 인용하여 수치실험을 수행하였다. 해양에서는 조석에 따라 수위가 끊임 없이 변하므로 수심의 변화에 따라 적용될 조도계수도 달라지게 된다. 조도계수의 대상이 되는 원포만 내의 거머리말 식물체 군락지 내부 및 주변은 경사가 거의 없는 평탄한 지형으로서 군락지 주변의 수심은 수위변화에만 의존한다. 수위 변화에 대한 각각의 조도계수를 산출하기 위해 만 내의 해수 유동에 가장 큰 영향을 미치는 최대 창조류와 최대 낙조류 시점의 수위에 대해 고찰하였다. 수치 실험 결과를 중력작용에 의해 발생하는 흐름이 지배적인 연구지역에 적용하기 위하여 Froude 상사법칙을 적용하였다.

$$\frac{V_m}{\sqrt{g l_m}} = \frac{V_p}{\sqrt{g l_p}} \quad (13)$$

여기서 V_m 과 V_p 는 모형과 원형의 유속, g 는 모형과 원형에 작용하는 중력가속도, l_m 과 l_p 는 원형과 모형의 대표적인 수심이다.

연구지역의 수심은 해수유동에서 최강 창조류와 최강 낙조류가 생성되는 시기의 수심을 상정하였다. 관측 결과 원포만의 조류는 조류타원도의 장축이 일주조류는 0.012 m/s이며, 반일주조류는 0.12 m/s로서 10배 차이가 나므로 원포만의 흐름은 반일주조류의 지배를 받는 것을 알 수 있다.

반일주조류의 경우를 분석해보면 최강 낙조류는 고조후 3.4시간 후에 나타났으며, 최강 창조류는 저조후 3.0시간 후에 나타났다. 따라서 연구해역에서 조석의 1주기를 12시간 25분으로 하였을 때 최강 낙조류는 약 최저 저조면을 기준으로 조석곡선의 45%지점, 최강 창조류는 약 50% 지점으로 하였다(Table 1). 대조기의 원포 내만에서는 조차는 3.7 m이므로 낙조류와 창조류는 각각 약 최저 저조면으로부터 수위 약 1.7 m와 1.8 m 부근에서 가장 빠른 유속을 보일 것이다. 따라서, Froude 상사에서의 원형 수

Table 1. A comparison on various items of tidal currents ellipse between simulated and observed current in the station A of Fig. 1

(A) Diurnal current

Items	Simulated	Observed
Length of major axis (m/s)	0.009	0.012
Length of minor axis (m/s)	0.003	0.004
Minor axis/Major axis	0.33	0.33
Angle of major axis (deg.)	314	300
Rotation	Counter clockwise	Counter clockwise
Phase lag (hr)	Major axis	10.3
	Minor axis	16.3

(B) Semi-diurnal current

Items	Simulated	Observed
Length of major axis (m/s)	0.10	0.12
Length of minor axis (m/s)	0.009	0.007
Minor axis/Major axis	0.09	0.06
Angle of major axis (deg.)	294	303
Rotation	Counter clockwise	Ccounter clockwise
Phase lag (hr)	Major axis	3.4
	Minor axis	6.4

Fig. 2. Realationship between water depth(h) and roughness coefficient(n) in the vegetated open-channel (Song and Park 2004).

심은 연구해역의 약 최저 저조면의 수심에 각각 1.7 m와 1.8 m를 더하여 원형수심을 산출하였다. 조사시기 동안 거머리말의 평균 생육밀도는 220 주/m²이었으며, 식물체의 길이는 100 cm 내외였다. 원형 유속은 최대 창조류의 관측결과인 0.12 m/s를 이용하였다(Table 1). 식(13)을 사용하여 수위 1.7 m와 1.8 m에 대하여 모형유속을 산출하였는데 계산결과 모형의 유속은 두 수위에 대해 거의 같은 값인 0.065 m/s 및 0.063 m/s이므로 최대낙조류와 최대 창조류에 대해 단일 조도계수를 적용하였다. 따라서 송과 박(2004)의 실험밀도 중 현장의 식생밀도와 비슷한 187.5 주/m²를 사용하였으며(Fig. 2), 최강 낙조일 때와 최강 창조일 때 모두 연구해역의 거머리말 식물체의 길이보다 수심이 깊으므로 유속과 수심의 상사성이 비슷한 Q: 45//sec-h: 50 cm(식생높이: 30 cm) 조건의 조도계수를 사용하였다. 따라서 만 내의 해수유동을 재현하기 위해 해초지 부분의 조도 계수는 최강 낙조류와 최강 창조류 일 때 모두 0.105를 채택하였고, 해초지 이외의 부분은 일반적으로 활용으로 된 수로에 적용하는 조도계수인 0.025를 입력하였다.

모형의 격자 및 수치실험의 계산조건

수치실험에 사용될 격자는 해역의 전반적인 흐름패턴을 적절히 구현할 수 있도록 50×50으로 격자도를 구성하였다. 남쪽 개방경계는 조위계로부터 취득된 원포만의 수위값을 시계열로써 경계에 입력하였으며, 북쪽 개방경계는 남쪽경계에서 취득된 수위값을 근거로 수심과 중력가속도의 비인 장파의 전달속도를 사용하여 흐름이 북쪽의 개방 경계까지 도달하는 시간을 추정하여 수위시계열을 재구성

Fig. 3. A comparison between simulated and observed values of tidal elevation at B point.

하여 입력하였다. 따라서 남쪽과 북쪽의 개방경계에 대한 수위는 약간의 위상차이가 나도록 개방경계를 구성하였다. 동쪽의 개방경계에서의 흐름은 남쪽과 북쪽을 오가는 흐름에 평행하도록 처리하였다. 또한, 개방경계에서의 조석은 해초지의 유무에 따라 변할 수 있으나, 실제로 해초지가 개방경계에서 상당히 떨어져 있으므로 그 영향이 크지 않을 것으로 사료되어, 해초지가 있는 경우와 없는 경우의 수치실험 모두 동일한 개방경계조건을 취하였다. 폐경계는 흐름을 0으로 하여 육지로 처리하였다. 계산간격은 2초로 하였으며, 시뮬레이션시간은 두 주기 이상의 창조와 낙조를 재현할 수 있도록 100시간으로 하였다. 바람에 대한 응력은 무시하였으며, 조간대를 고려하여 계산을 수행하였다. 또한 거머리말 해초지가 있는 경우와 없는 경우를 나누어 흐름의 양상을 비교하였다.

수치실험결과의 검증

거머리말 해초지가 위치한 B 지점에서 수치실험의 조건에 의해 계산된 수위 값과 관측된 조위곡선은 유사한 형태와 경향을 보였다(Fig. 3). 원포만의 입구인 A 지점에서 유향과 유속에 대한 수치실험 결과와 현장 관측자료를 비교하였다(Fig. 4). 수치실험에서 유향과 유속은 수십 적분된 값을 사용하여 산출하였으며(Fig. 4A), 현장 관측에서 유향과 유속은 중층에서 측정하였다(Fig. 4B). 일주조류 및 반일주조류의 조류타원에 대한 관측 값과 수치실험에 의한 계산 값을 Table 1에 비교하였다. 흐름에 주된 영향을 미치는 반일주조류의 경우를 살펴보면, 관측값은 장축 성분이 0.12 m/s이었으며, 단축성분이 0.007 m/s로서 단축에 대한 장축의 세장비는 0.06으로 매우 세장한 타원형 형태로 나타났다. 현장 관측 결과에서 원포만의 입구인 A 지점은 왕복성 조류로 만내에 흐름이 진입되는 것으로 판단되었다. 수치실험에서 원포만 입구인 A 지점의 반일주조류에 대한 조류타원의 장축 값은 0.10 m/s으로써 관측 값의 83%이며, 단축 값은 0.009 m/s로써 관측값의 78%이었다. 수치실험으로 재현된 조류타원의 세장비는 0.09로 매우 세장한 형태의 타원형을 보였으며, 관측값에

Fig. 4. A comparison of tidal current ellipse between the simulated (A) and the observed (B) current at A point.

대한 장축에 대한 방향각의 차이는 9°이었다. 이러한 결과에서 수치실험으로 재현된 값들은 현장 관측 값들을 잘 묘사하고 있어 원포만의 전체적인 해수유동을 수치실험으로 파악하고자 하였다.

수치실험 분석 결과

유속은 유향이 전향되기 직전인 최고수위와 최저수위일 때 가장 느리게 나타났다(Fig. 5). 원포만의 상부에 분포하는 조간대는 수치 실험 결과에 큰 영향을 미치는 요인이기 때문에 조간대 지역을 고려하여 실험을 수행하였다. 대

Fig. 5. Current patterns and velocity of high water (A) and low water elevation (B) at the spring tide.

조기의 최고수위와 최저수위에서 유속과 유향은 연구해역의 공간대의 노출여부를 명확하게 나타내었다(Fig. 5B).

원포만내의 창조류의 일부는 원포만 입구의 해초지를 중심으로 두 갈래로 나뉘어져 원포만으로 진입하였으며, 일부의 흐름은 목도의 북쪽에서 유입되었다(Fig. 6A). 거머리말 해초지에서 최강 창조류의 흐름은 목도 남쪽의 큰 입구에서 거머리말식물로 인해 흐름이 느려져 목도 북쪽에서 유입된 수괴와 목도 중앙에서 합류되는 것으로 나타났다(Fig. 6A). 거머리말 해초지가 분포하지 않은 경우 수괴의 흐름은 원포만 안으로 바로 유입되었으며, 일부 수괴는 목도의 북쪽 수로까지 빠르게 유입되어 북쪽에서 유입되는 수괴의 흐름을 지지하는 것으로 나타났다(Fig. 6B). 원포만에서 창조류의 흐름은 거머리말 해초지가 분포하기 때문에 목도의 북쪽과 남쪽입구에서 수괴가 유입되는 현

Fig. 6. Current patterns and velocity of flood flow in the vegetated (A) and unvegetated area (B) at the spring tide.

상이 발생하는 것으로 나타났다.

원포만내의 낙조류는 목도의 북쪽에서 유입된 흐름과 원포만 내로부터 목도의 남쪽으로 빠져나가는 흐름과 합류하여 원포만 입구의 거머리말 해초지를 통과하여 빠져나갔다(Fig. 7A). 낙조류의 경우 원포만 내의 유동을 지배하는 흐름은 목도 북쪽에 위치해 있는 입구로부터 유입되는 흐름인데, 해초지가 목도의 남쪽 입구 부근에 분포하기 때문에 목도의 북쪽 입구 수로로부터 유입된 수괴는 해초지의 저항을 받지 않고 원포만내로 진입한 후, 해초지를 거쳐 목도 남쪽 입구로 빠져나가는 것으로 나타났다(Fig. 7A). 거머리말 해초지가 분포하지 않은 경우에도 낙조류 유향은 목도 북쪽 입구 수로로부터 유입하여 남쪽 입구로 빠져나가는 것으로 나타났다(Fig. 7B).

수치실험으로 재현된 원포만의 해황은 낙조류가 창조류

Fig. 7. Current patterns and velocity of ebb flow in the vegetated (A) and unvegetated area (B) at the spring tide.

보다 약간 우세하게 나타났다. 원포만의 낙조류 최강유속은 0.23 m/s였으며, 창조류의 최강유속은 0.18 m/s로 분석되었다.

원포만에서의 거머리말 해초지는 목도의 남쪽 입구에 분포하고 있어 창조류의 유입이 해초지에 의해 저항을 받기 때문에 해초지가 없는 경우보다 창조류의 유향이 명확한 차이를 보였다(Fig. 6). 반면에 낙조류는 목도의 북쪽 입구로부터 유출되기 때문에 낙조류의 유향에는 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다(Fig. 7).

원포만에서 거머리말 해초지의 존재에 따른 유속의 차이는 조류 타원도에서 명확하게 나타났다(Fig. 8). 거머리말 해초지의 존재 여부에 따른 창조류와 낙조류의 유속은 정점의 위치에 따라 25~84%의 차이를 보였다(Table 2). 거머리말 해초지가 있는 경우 원포만의 입구인 C 정점에

Fig. 8. Difference of tidal currents ellipse between vegetated and unvegetated area at the C point (A), D point (B) and E point (C) in the Fig. 5A.

Table 2. A comparison on various items of tidal current ellipse between vegetated and unvegetated in the point C, D, and E of the Fig. 5A

Point	Items	Vegetated area	Unvegetated area
C	Length of major axis (m/s)	0.10	0.13
	Length of minor axis (m/s)	0.02	0.01
	Minor axis/Major axis	0.2	0.08
	Angle of major axis (deg.)	270	267
	Rotation	Clockwise	Clockwise
D	Length of major axis (m/s)	0.08	0.13
	Length of minor axis (m/s)	0.02	0.03
	Minor axis/Major axis	0.25	0.23
	Angle of major axis (deg.)	274	274
	Rotation	Clockwise	Clockwise
E	Length of major axis (m/s)	0.04	0.06
	Length of minor axis (m/s)	0.005	0.03
	Minor axis/Major axis	0.13	0.5
	Angle of major axis (deg.)	295	291
	Rotation	Clockwise	Clockwise

서 조류타원도의 유속은 장축 방향이 약 23% 정도 낮게 나타났으며, 장축의 방향각은 동일하게 나타났다(Fig. 8A). 유속에 대한 장축과 단축의 세장 비는 비해초지에서 0.08로 매우 세장하게 나타났으나, 해초지에서는 0.2로서 보다 원형에 가깝게 나타났다. 원포만의 중앙에 위치한 정점 D에서 거머리말 해초지는 비해초지 보다 장축 방향 유속이 약 40% 정도 감소되었으며, 장축의 방향각은 동일하게 나타났다(Fig. 8B). 세장비는 해초지와 비해초지에서 각각 0.25, 0.23으로 유사하게 나타났다. 원포만의 내만인 정점 E에서 거머리말 해초지의 장축 유속은 비해초지 보다 약 34%정도 감소하는 것으로 나타났으며, 방향각은 거의 동일하게 나타났다. 유속에 따른 비해초지의 세장비가 0.5로서 원형에 가까운 형태를 보였으나, 해초지의 세장비는 0.13으로서 매우 세장한 타원형의 형태를 보였다. 따라서 거머리말 해초지의 단축 유속이 비해초지에 비해 약 84% 정도 감소되는 것으로 나타났다(Fig. 8C). 수심이 얕은 정점 E에서는 간조시 거머리말의 식물체가 노출되기 때문에 창·낙조시 다른 정점보다 조도의 영향이 큰 것으로 판단된다. 거머리말 해초지의 존재 유무에 따른 조류 타원도의 분석결과 유향은 차이를 보이지 않았으나, 해초지 내에서는 유속 만이 감소하는 것으로 나타났다.

5. 결 론

원포만에 분포하는 거머리말 해초지에 대한 해수 유동

의 특징을 파악하기 위하여 수치 실험을 하였다. 수치실험에서 거머리말을 가정하기 위해 수리학에서 이용하는 조도계수를 이용하여 계산하였으며, 모형을 현장에 적용하기 전에 실내유수조실험을 통해 얻어진 조도계수를 Froude 상사법칙을 이용하여 현장에 가장 적합한 조도계수를 산출하였다. 대조기에 산출된 거머리말 해초지의 조도계수는 0.105가 채택되었으며, 거머리말 해초지가 존재하지 않은 지역에서 조도계수는 0.025가 채택되었다.

원포만에서 모형을 적용하여 실험한 결과 해수 유동은 유향과 유속의 변화를 보였다. 낙조류의 경우 거머리말 해초지가 해초지가 없을 때 보다 유속만이 감소하였다. 창조류의 경우 거머리말 해초지에서는 해초지가 없을 때 보다 유속과 유향에서 차이를 보였다. 조류타원도를 통해 해초지와 비해초지의 흐름을 비교하여 보면 해초지의 전체에 걸쳐 유향의 변화없이 유속의 감소 만이 두드러졌다. 또한, 창조류의 경우에서, 해초지가 없을 때는 목도 남쪽입구로부터 유입된 수위가 목도의 북쪽으로 빠져나가는 흐름의 양상을 보이지만, 해초지가 있는 경우는 목도 남쪽에서 흐름이 약화되어 목도 북쪽으로 밀고 가는 흐름이 약화되어 목도 북쪽에 있는 입구에서 원포 만 내로 흐름이 유도된다. 따라서 원포만에서 거머리말 해초지는 일방향 유속을 약화시킴과 동시에 원포만의 다른 출입구의 수위 유입도 유도하는 것으로 나타났다. 그리고, 해초지에 대한 해수유동은 2차원 수심 적분된 모형으로 수치 실험을 하였으나, 원포만의 해수 유동은 2차원적 거동뿐만 아니라 거머리말의 높이에 따른 연직방향의 3차원적인 모형에 대해 수치 실험하는 것이 해초지의 실질적인 흐름을 보다 명확하게 파악할 수 있을 것으로 판단되었다.

사 사

본 연구에 많은 도움을 주신 남해수산연구소 연구원분께 감사드립니다. 또한, 본 논문을 심사해주신 익명의 심사자께도 감사드립니다. 이 연구는 국립수산물품질관리원 남해수산연구소의 시험연구사업인 “남해안 갈피장 조성 연구(RP-2008-ME-038)”의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- 권기원, 최성욱. 2000. 식생된 개수로 흐름의 k-ε 난류해석. 대한토목학회논문집, **20**, 11-21.
- 이문옥, 김병국, 박성진, 김종규. 2005. 2004년 10월 및 11월에 관측된 가막만의 물리환경. 한국해양환경공학회지, **8**, 185-173.
- 이규형, 조규대. 1990. 가막만의 수온과 염분의 분포. 한국수산학회지, **23**, 25-39.

- 윤태훈, 신용진, 이지송. 2002. 수초영역으로 인한 개수로 흐름변화. 대한토목학회논문집, **22**, 143-149.
- 윤태훈, 김용득, 김성탁. 2004. 수초대가 하류흐름 및 교각 주변 세굴에 미치는 영향. 대한토목학회논문집, **24**, 103-109.
- 최성욱, 양원준, 박문형. 2003. 수심의 영향을 받는 침수 식생 개수로 흐름의 난류구조 및 고유구조. 대한토목학회논문집, **23**, 165-174.
- Cornelisen, C.D. and F.I.M. Thomas. 2002. Ammonium uptake by seagrass epiphytes: Isolation of the effects of water velocity using an isotope label. *Limnol. Oceanogr.*, **47**, 1223-1229.
- El-Hakim, O. and M.M. Salama. 1992. Velocity distribution inside and above branched flexible roughness. *J. Irrig. Drain. Eng.*, **118**, 914-927.
- Fonseca, M.S. and J.A. Cahalan. 1992. A preliminary elevation of wave attenuation by four species of seagrass. *Estuar. Cont. Shelf Sci.*, **35**, 65-576.
- Fonseca, M.S., J.S. Fisher, J.C. Zieman, and G.W. Thayer. 1982. Influence of the seagrass *Zostera marina* L. on current flow. *Estuar. Cont. Shelf Sci.*, **15**, 351-364.
- Fonseca, M.S., J.C. Zieman, G.W. Thayer, and J.S. Fisher. 1983. Role of current velocity in structuring eelgrass *Zostera marina* meadows. *Estuar. Cont. Shelf Sci.*, **17**, 367-380.
- Klopstra, D., H.J. Barneveld, J.M. van Noortwijk, and E.H. van Velzen. 2002. Analytical model for hydraulic roughness of submerged vegetation. p. 775-780. In: *27th Cong. Int. Assoc. for Hydraulic Research*, San Francisco, 1997. American Society of Civil Engineers.
- Koch, E.W. 1994. Hydrodynamics, diffusion-boundary layers and photosynthesis of the seagrasses *Thalassia testudinum* and *Cymodocea nodosa*. *Mar. Biol.*, **118**, 767-776.
- Koch, E.W., J.D. Ackerman, J. Verduin, and M. van Keulen. 2006. Fluid dynamics in seagrass ecology - from molecules to ecosystems. p. 193-225. In: *Seagrasses: Biology, ecology and conservation*, ed. by A.W.D. Larkum, R.J. Orth, and C.M. Duarte. Springer, Netherlands.
- Koch, E.W. and G. Gust. 1999. Water flow in tide- and wave dominated beds of the seagrass *Thalassia testudinum*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **184**, 63-72.
- Koch, E.W. and M. Huettel. 2000. The impact of single seagrass shoots on solute fluxes between the water column and permeable sediments. *Biol. Marina Mediterr.*, **7**, 235-239.
- Koch, E.W. 2001. Beyond light: Physical, geological and geochemical parameters as possible submerged aquatic vegetation habitat requirements. *Estuaries*, **24**, 1-17.
- Kouwen, N., T.E. Unny, and H.M. Hill. 1969. Flow retardance in vegetated channels. *J. Irrig. Drain. Div.*, **95**, 329-340.
- Lee, S.Y., C.J. Kwon, K.S. Lee, and C.I. Choi. 2002. Distribution of eelgrass, *Zostera marina* L. on coasts of the Korean peninsular: Preliminary study for eelgrass restoration. *Ocean and Polar Res.*, **24**, 55-61.
- Lee, S.Y., S.M. Lee, and C.I. Choi. 2005. Phenology and reproductive effort of two *Zostera marina* L. populations on the southern coast of Korea. *Ocean and Polar Res.*, **27**, 67-74.
- Orth, R.J. and K.A. Moore. 1983. Chesapeake Bay: An unprecedented decline in submerged aquatic vegetation. *Science*, **22**, 51-53.
- Schutten, J., J. Daint, and A.J. Davy. 2004. Wave-induced hydraulic forces on submerged aquatic plants in shallow lakes. *Ann. Bot.*, **93**, 333-341.
- Short, F.T. and C.A. Short. 1984. Purification of estuarine and coastal waters. Academic Press, New York. 709 p.
- Short, F.T. and R.C. Coles. 2001. Global seagrass research methods. Elsevier, Amsterdam. 473 p.
- Song, J.W. and S.K. Park. 2004. Roughness characteristics and velocity profile in vegetated and nonvegetated channels. *J. Korean Soc. Civil Eng.*, **24**, 545-552.
- Stephan, U. and D. Gutknecht. 2002. Hydraulic resistance of submerged flexible vegetation. *J. Hydrol.*, **269**, 27-43.
- Tsujimoto, T., Y. Shimizu, T. Kitamura, and T. Okada. 1992. Turbulent open-channel flow over a bed covered by rigid vegetation. *J. Hydrosoci. Hydraul. Eng.*, **10**, 13-25.
- Vidono, B., C.M. Duarte, A.L. Middelboe, K. Stefansen, T. Lutzen, and S.L. Nielsen. 1997. Dynamics of a landscape mosaic: Size and age distributions, growth and demography of seagrass *Cymodocea nodosa* patches. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **158**, 131-138.
- Wu, F.C., W.S. Hsieh, and Y.J. Chou. 1999. Variation of roughness coefficient for unsubmerged and submerged vegetation. *J. Hydraul. Eng.*, **125**, 934-942.

Received May 20, 2008

Revised Jul. 29, 2008

Accepted Aug. 25, 2008