

Analysis of Hydraulic Characteristics According to the Cross-Section Changes in Submerged Rigid Vegetation

Jeongheum Lee¹, Yeon-Myeong Jeong², Jun-Seok Kim¹, and Dong-Soo Hur³

¹Graduate Student, Department of Ocean Civil Engineering, Gyeongsang national University, Tongyeong, Korea

²Senior Researcher, Engineering Research Institute, Gyeongsang national University, Jinju, Korea

³Professor, Department of Ocean Civil Engineering, Gyeongsang national University, Tongyeong, Korea

수중 강성식생의 단면변화에 따른 수리특성 분석

이정흠¹, 정연명², 김준석¹, 허동수³

¹경상국립대학교 해양토목공학과 대학원생

²경상국립대학교 공학연구원 선임연구원

³경상국립대학교 해양토목공학과 교수

KEY WORDS: Submerged vegetation 수중 식생, Rigid vegetation 강성식생, Laboratory experiment 수리모형실험, Numerical wave tank 수치파동수조, Hydraulic characteristics 수리특성

ABSTRACT: Recently, not only Korea but also the world has been suffering from problems related to coastal erosion. The hard defense method has been primarily used as a countermeasure against erosion. However, this method is expensive and has environmental implications. Hence, interest in other alternative methods, such as the eco-friendly vegetation method, is increasing. In this study, we aim to analyze the hydraulic characteristic of submerged rigid vegetation according to the cross-sectional change through a hydraulic experiment and numerical simulation. From the hydraulic experiment, the reflection coefficient, transmission coefficient, and energy dissipation coefficient were analyzed according to the density, width, and multi-row arrangement of the vegetation zone. From numerical simulations, the flow field, vorticity distribution, turbulence distribution, and wave distribution around the vegetation zone were analyzed according to the crest depth, width, density, and multi-row arrangement distance of the vegetation zone. The hydraulic experiment results suggest that the transmission coefficient decreased as the density and width of the vegetation zone increased, and the multi-row arrangement condition did not affect the hydraulic characteristics significantly. Moreover, the numerical simulations showed that as the crest depth decreased, the width and density of vegetation increased along with vorticity and turbulence intensity, resulting in increased wave height attenuation performance. Additionally, there was no significant difference in vorticity, turbulence intensity, and wave height attenuation performance based on the multi-row arrangement distance. Overall, in the case of submerged rigid vegetation, the wave energy attenuation performance increased as the density and width of the vegetation zone increased and crest depth decreased. However, the multi-row arrangement condition did not affect the wave energy attenuation performance significantly.

1. 서 론

최근 우리나라 뿐만 아니라 세계적으로 연안침식에 관한 문제로 어려움을 겪고 있다. 연안침식은 지구 온난화로 인한 해수면 상승, 이 상기온으로 인한 고파랑 내습, 댐 등과 같은 하천 개발로 인한 토사 공급 감소 및 항만 건설 등의 연안 개발로 인한 연안 환경의 변화 등에 의해 발생한다. 연안에서 침식으로 인하여 모래가 소실될 경우 국토의 면적이 감소하게 되고 침식이 발생하는 지역에 사회적, 경제적 피해를 유발한다.

이러한 연안침식에 대한 대응책으로는 돌제 및 이안제 등의 중력식구조물 또는 양빈 등이 있다. 하지만 중력식 구조물의 경우 많은 비용이 발생하고 친환경적이지 않으며, 양빈의 경우 근본적인 해결책이 되지 않는다는 단점이 있다. 이에 따라 다른 대책공법에 대한 많은

Received 10 August 2022, revised 26 August 2022, accepted 28 August 2022

Corresponding author Dong-Soo Hur: +82-55-772-9122, dshur@gnu.ac.kr

© 2022, The Korean Society of Ocean Engineers

This is an open access article distributed under the terms of the creative commons attribution non-commercial license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

연구들이 진행되고 있으며, 최근에는 친환경적인 식생공법에 관한 관심이 증가하고 있다. 미국 및 유럽 등에서는 이전부터 식생에 관한 연구들이 수행되어왔지만, 이와 비교하면 우리나라의 경우 식생에 관한 연구가 활발하지 않은 상황이다.

식생은 사용된 재료의 형태, 재질 또는 식생의 높이, 식생대의 밀도 및 폭 등 여러 조건에 따라 다른 특성을 가지며, 이와 관련한 많은 연구가 수행되었다(Anderson et al., 2011; Manca et al., 2010; Asano et al., 1988; Abdolahpour et al., 2017; Beudin et al., 2017; Hadadpour et al., 2019). Peruzzo et al. (2018)은 자연에서 실제 식생을 채취하여 이와 유사한 형태를 가진 연성식생(Flexible vegetation)을 제작하여 수리모형실험을 수행하였으며, 식생대의 밀도 및 수심 변화에 따른 식생 항력계수 산정하였다. Wang et al. (2022)은 수리모형실험을 통해 원기둥 형태의 연성식생을 대상으로 수심 및 식생의 밀도 변화에 따른 파랑 전달계수 및 항력계수에 관한 연구를 수행하였으며, 이외에도 연성식생을 대상으로 하는 다양한 수리모형실험이 수행되었다(Blackmar et al., 2014; Maza et al., 2015). 그리고 Hu et al. (2014)은 수리모형실험을 통해 원기둥 막대 형태의 강성식생(Rigid vegetation)을 대상으로 파랑과 흐름이 동시에 작용할 때 식생대의 밀도 및 수심 변화에 따라 나타나는 파고감쇠 및 식생의 항력계수에 관한 연구를 수행하였으며, van Veelen et al. (2020)의 경우 수리모형실험을 통해 모양과 크기는 같고 재질은 서로 다른 연성 및 강성식생에 이용해 식생의 재질 변화가 파고 감쇠 및 유속에 미치는 영향에 관한 수리모형실험을 수행하였다. Jeong and Hur (2016)는 개별요소법과 파동장모델을 결합한 양방향 연성해석기법을 개발하여 식생의 거동 특성에 따른 파랑감쇠 효과에 관하여 수치적으로 검토하였다.

한편 수중방파제의 경우 다열로 배치했을 때 나타나는 Bragg반사로 인한 파랑에너지가 감소 효과에 관하여 많은 연구가 수행되어왔지만(Kirby and Anton, 1990; Cho et al., 2002; Cho, 2006) 식생의 경우 다열 배치에 관한 연구는 많지 않은 상황이다.

본 연구에서는 수중 강성식생을 대상으로 식생대의 단면변화에 따른 수리특성을 분석하기 위해 수리모형실험 및 수치모형실험을 수행하였다. 수리모형실험을 통해 식생대의 밀도, 폭 및 다열 배치의 단면변화에 따른 수리특성을 분석하였으며, 수치모형실험을 통해 식생대의 마루 수심, 밀도, 폭 및 다열 배치의 배치 간격에 따른 유동장, 와도분포, 난류분포 및 파고 분포에 대해 분석하였다.

2. 수리모형실험

2.1 수리모형실험의 개요

수중 강성식생의 단면변화에 따른 수리특성 분석을 위해 수리모형실험을 수행하였다. 실험을 위해 길이 37 m, 높이 1 m, 폭 0.6 m의 단면 조파수조를 이용하였으며, 조파장치는 피스톤식(Piston type)이다. 원활한 실험과 생성을 위해 1:30의 전면 경사를 가지는 30 cm 높이의 불투과성 바닥을 구성하였으며, 파고 계측은 용량식 파고계(Capacitance wave gauge)를 이용하였다.

실험수조의 구성 및 식생의 단면 조건은 Fig. 1 및 Table 1과 같으며, 식생의 단면 조건은 식생대의 밀도, 폭 및 다열 배치를 고려하였다. 실험에 사용된 강성식생은 아크릴(Acrylic)로 제작하였으며, 모양은 Fig. 2(a)와 같다. Fig. 3은 식생을 고정할 틀을 나타내며 (a), (b)는 각각 식생 밀도(ρ_V)가 0.123, 0.032인 경우를 나타낸다.

Table 1 Vegetation cross section condition

Case	V_h (cm)	R (cm)	B (cm)	V_d (cm)	ρ_V	Number of vegetation
R1	14.8	2.2	133	-	0.123	972
R2	14.8	2.2	133	-	0.032	255
R3	14.8	2.2	266	-	0.123	1944
R4	14.8	2.2	133	133	0.123	1944

Note: V_h = vegetation height, R = vegetation zone crest depth, B = vegetation zone width, V_d = distance of each vegetation zone, ρ_V = vegetation zone density

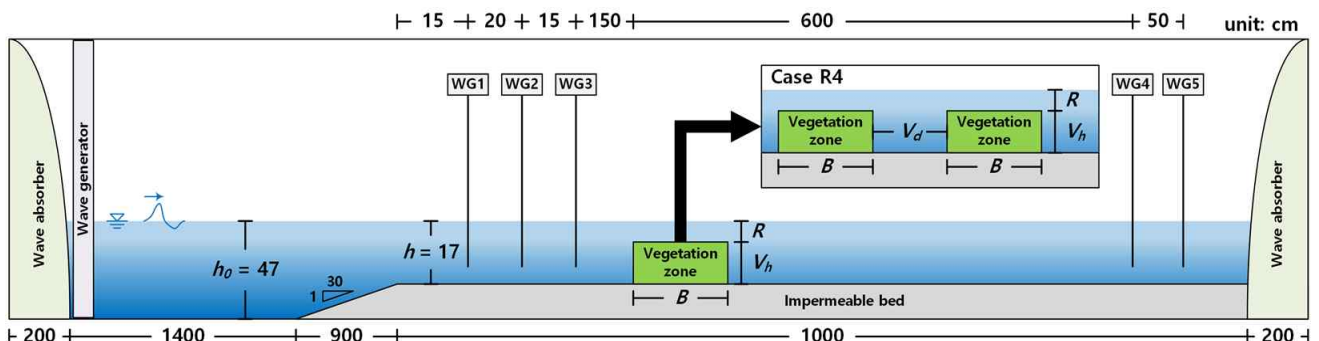


Fig. 1 Sketch of wave flume and experimental setup

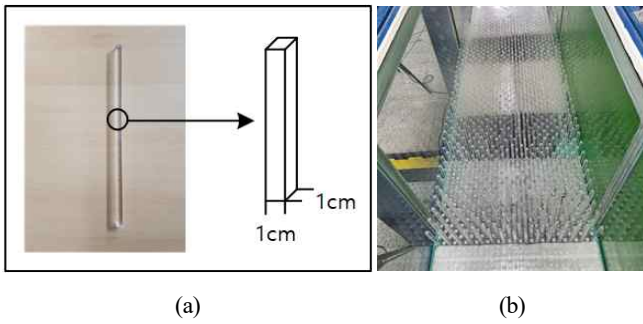


Fig. 2 Vegetation used in the experiment: (a) specification of vegetation; (b) vegetation zone installed in the wave flume

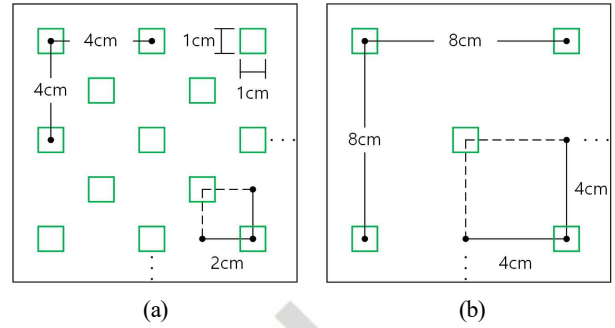


Fig. 3 Sketch of frame fixed vegetation: (a) $\rho_V = 0.123$; (b) $\rho_V = 0.032$

Table 2 Incident wave condition (wave type = irregular, $h = 17$ cm)

Wave case	H_s (cm)	T_s (s)	L_s (cm)
1	2.67	0.64	60.3
2	5.33	0.64	60.3
3	2.67	0.95	107.1
4	5.33	0.95	107.1
5	2.67	1.26	150.9
6	5.33	1.26	150.9
7	9.00	1.26	150.9
8	11.00	1.26	150.9
9	2.67	1.57	193.3
10	5.33	1.57	193.3
11	9.00	1.57	193.3
12	11.00	1.57	193.3
13	2.67	1.88	234.9
14	5.33	1.88	234.9
15	9.00	1.88	234.9
16	11.00	1.88	234.9

Note: H_s = significant wave height, T_s = significant wave period, L_s = significant wave length

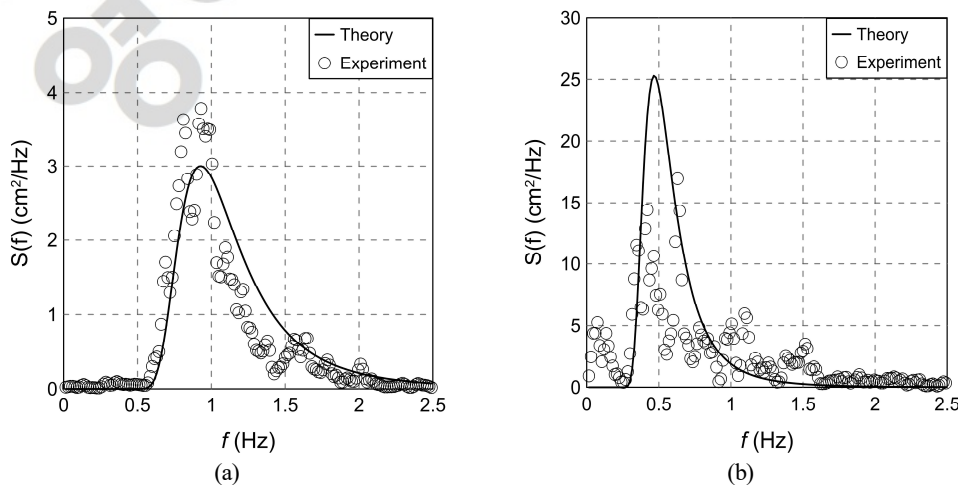


Fig. 4 Comparison between theoretical and experimental spectra: (a) wave case 4; (b) wave case 16

$$S(f) = 0.257H_s^2 T_s^{-4} f^{-5} \exp[-1.03(T_s f)^{-4}] \quad (1)$$

여기서 $S(f)$ 는 파랑에너지 밀도, H_s 는 유의파고, T_s 는 유의주기, f 는 주파수이다.

입사파 조건은 Table 2와 같으며 파고 2.67-11.0 cm, 주기 0.64-1.88 s 범위의 불규칙파이다. 불규칙파 생성을 위한 스펙트럼은 Mitsuyasu (1969)가 제안한 식 (1)의 Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼을 이용하였다. Fig. 4는 Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼의 이론형과 실험에서 계측된 값을 비교하여 나타낸 것이며, (a)는 Wave case 4 ($H_s = 5.33$ cm, $T_s = 0.95$ s), (b)는 Wave case 16 ($H_s = 11.0$ cm, $T_s = 1.88$ s)을 각각 나타낸 것이다.

수중 강성식생의 단면 조건 변화에 따른 수리특성 분석을 위해 반사계수(K_R), 전달계수(K_T), 에너지 감쇠계수(K_D)를 산정하였다. 반사계수(K_R)는 Goda and Suzuki(1976)가 제안한 입 · 반사파 분리법을 이용해 산정하였으며, 전달계수(K_T)와 에너지 감쇠계수(K_D)는 각각 식 (2)와 (3)을 이용하여 산정하였다.

$$K_T = \frac{H_T}{H_0} \quad (2)$$

여기서 H_0 는 입사파고, H_T 는 전달파고이다.

$$K_D = \sqrt{1 - K_R^2 - K_T^2} \quad (3)$$

2.2 수리모형실험의 결과

수중 강성식생의 단면변화에 따른 파랑전파의 수리특성을 검토하기 위한 사전실험으로서 고정상 수리모형실험을 수행하였다. 즉, 수중 강성식생의 밀도, 폭 및 다열 배치 조건의 단면변화에 따른 K_R , K_T 및 K_D 를 산정하였으며, 파형경사의 변화에 따라 계수들의 분포를 Fig. 5에 나타냈다. 그림에서 (a), (b) 및 (c)는 각각 K_R , K_T 및 K_D 의 경우를 나타낸다.

2.2.1 반사계수

반사계수는 밀도가 동일한 Case R1 ($B = 133$ cm, $\rho_V = 0.123$), Case R3 ($B = 266$ cm, $\rho_V = 0.123$) 및 Case R4 ($B = 133, 133$ cm, $\rho_V = 0.123$)의 경우 폭 및 열 배치의 변화에 따른 차이는 크게 나타나지 않았으며, 밀도가 감소하는 Case R2 ($B = 133$ cm, $\rho_V = 0.032$)의 경우 미소하게 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 식생대의 밀도가 동일한 경우 반사파가 유사하게 생성되기 때문인 것으로 판단되며, 식생 밀도가 감소하는 경우 파랑의 투과 면적 증가에 따른 영향으로 판단된다.

2.2.2 전달계수

전달계수는 Case R1 ($B = 133$ cm, $\rho_V = 0.123$)과 비교하여 밀도가 동일하고 식생대의 총 폭이 증가하는 Case R3 ($B = 266$ cm, $\rho_V = 0.123$) 및 Case R4 ($B = 133, 133$ cm, $\rho_V = 0.123$)에서는 감소하는 것으로 나타났으며, 폭이 동일하고 밀도가 감소하는 Case R2 ($B = 133$ cm, $\rho_V = 0.032$)에서는 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 식생대의 밀도 및 폭이 증가하면 식생대의 마루에서 더 많은 쇄파를 유도하기 때문인 것으로 판단된다.

2.2.3 에너지 감쇠계수

에너지 감쇠계수의 경우 식생대의 폭과 밀도가 작은 Case R2 ($B = 133$ cm, $\rho_V = 0.032$)에서 가장 작게 나타났으며, 식생대의 폭과 밀도가 증가할수록 에너지 감쇠계수도 증가하는 경향을 나타냈다. 또 식생대의 밀도와 총 폭이 같은 Case R3 ($B = 266$ cm, $\rho_V = 0.032$), Case R4 ($B = 133, 133$ cm, $\rho_V = 0.032$)의 경우 수리특성에서는 큰 차이를 나타내지 않았는데, 수중 강성식생의 경우 열 배치 조건은 입사파의 파랑 에너지 감쇠에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

3. 수치모형실험의 개요

수중 강성식생의 단면변화에 따른 수리특성 분석을 위한 수치모형실험을 수행하였다. 수치모델은 투수성의 영향을 고려할 수 있는 Porous body model과 Volume of fluid를 기반으로 하여 투과매체의 특성에 따른 유체저항에 의한 에너지소산을 고려할 수 있는 강비선형 2차원 모델인 LES-WASS-2D (Hur and Choi, 2008)를 이용하였다.

3.1 지배방정식

수치모델의 기초방정식은 연속방정식, 수정된 Navier-Stokes 방정식 및 이류방정식으로 구성되어 있으며, 각각 식 (4), 식 (5)-(6) 및 식 (7)과 같다.

$$\frac{\partial(\gamma_x u)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_z w)}{\partial z} = q^* \quad (4)$$

$$\gamma_v \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial(\gamma_x u)}{\partial x} + w \frac{\partial(\gamma_z u)}{\partial z} \quad (5)$$

$$= -\gamma_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_t \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} \right] - M_x - E_x - D_x$$

$$\gamma_v \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial(\gamma_x w)}{\partial x} + w \frac{\partial(\gamma_z w)}{\partial z} \quad (6)$$

$$= -\gamma_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_t \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_t \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} \right] - \frac{2\nu}{3} \frac{\partial q^*}{\partial z} - \gamma_v g - \beta w - M_z - E_z - D_z$$

$$\frac{\partial(\gamma_v F)}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma_x F u)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_z F w)}{\partial z} = F q^* \quad (7)$$

여기서 u, w 는 각각 x, z 방향 유속, q^* 는 조파소스의 유량밀도이고 M_x, M_z 는 관성저항, E_x, E_z 는 층류저항, D_x, D_z 는 난류저항이며, γ_v 는 체적공극률, γ_x, γ_z 는 각각 x, z 방향에 대한 면적투과율, t 는 시간, g 는 중력가속도, ρ 는 유체 밀도, p 는 압력, β 는 파랑 감쇠계수, F 는 격자에서 유체가 차지하는 체적비, ν_t 는 동점성계수와 와동점성계수의 합이다.

3.2 식생 항력

식생에 의한 유체저항(RV_i)은 식 (8)과 같다.

$$RV_i = \frac{1}{2} C_D \phi v_i \sqrt{v_i^2 + v_j^2} + C_M (1 - \gamma_v) \frac{\partial v_i}{\partial t} \quad (8)$$

여기서 ϕ 는 식생 밀도, C_D 는 항력계수, C_M 은 관성저항이다.

C_D 는 Lee et al., (2017a)가 Wu and Cox (2015)의 실험 결과를 분석하여 제시한 식 (9)를 적용하였으며, C_M 은 Sakakiyama and Kajima (1992)가 제안한 1.5를 적용하였다.

$$C_D = 1.4 \left(1 + \frac{15}{KC} \right) \quad (9)$$

여기서 KC 는 Keulegan-Carpenter number 수이다.

3.3 수치파동수조의 검증

수치모델의 타당성을 검토하기 위해 Fig. 6과 같은 2차원 수치파동수조를 구성하였다. x 축, z 축의 길이는 각각 1000 cm, 30 cm, 격자크기 $\Delta x, \Delta z$ 는 1 cm로 설정하였다. 수치파동수조의 양 끝에 파랑의 무반사 조파 및 재반사 방지를 위하여 부가감쇠영역을 구성하였다.

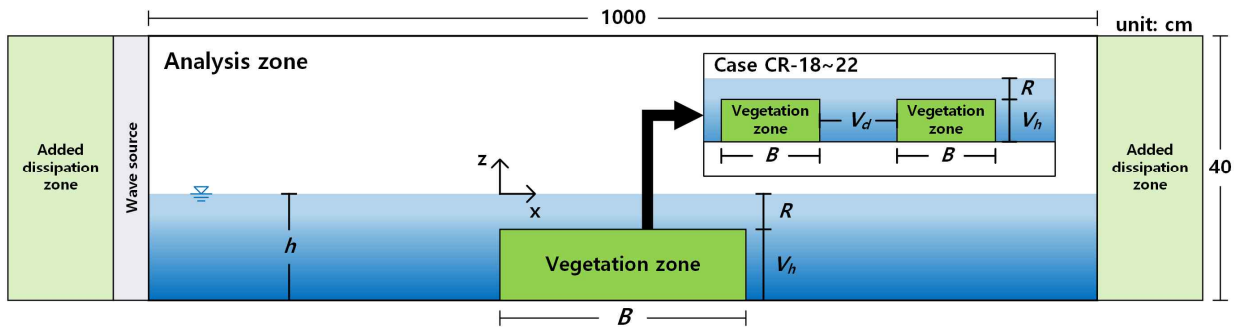


Fig. 6 Sketch of the numerical wave tank based on the hydraulic experiment

수리모형실험에서 적용한 파랑 및 식생의 단면 조건 중 Table 3에 나타난 실험조건들을 대상으로 수치과동수조의 비교·검증을 수행하였으며, 2차원 수치모델의 특성상 강성식생의 평면배치를 재현할 수 없어 식생 밀도를 수치모델 상에서는 공극율로 대체하여 검토를 수행하였다.

Fig. 7은 수리모형실험과 수치모형실험의 결과를 비교하여 나타낸 것으로 (a)는 반사계수, (b)는 전달계수 그리고 (c)는 에너지 감쇠계수를 나타낸 것이다. 반사계수 및 전달계수 모두 파형경사가 작은 경우($H_s/L_s=0.02$ 부근) 계산결과가 실험값에 비해 약간 높은 값을 나타내는 경향을 보이고 있으나 전반적으로는 계산값이 실험값을 적절히 재현하고 있는 것으로 판단된다. Fig. 8에서 점선은 수리모형실험과 수치모형실험 값의 $\pm 10\%$ 범위를 나타내며, 전반적으로 수치모형실험에 의한 결과 값이 수리모형실험의 반사계수, 전달계수 및 에너지 감쇠계수를 잘 재현하는 것을 확인할 수 있다.

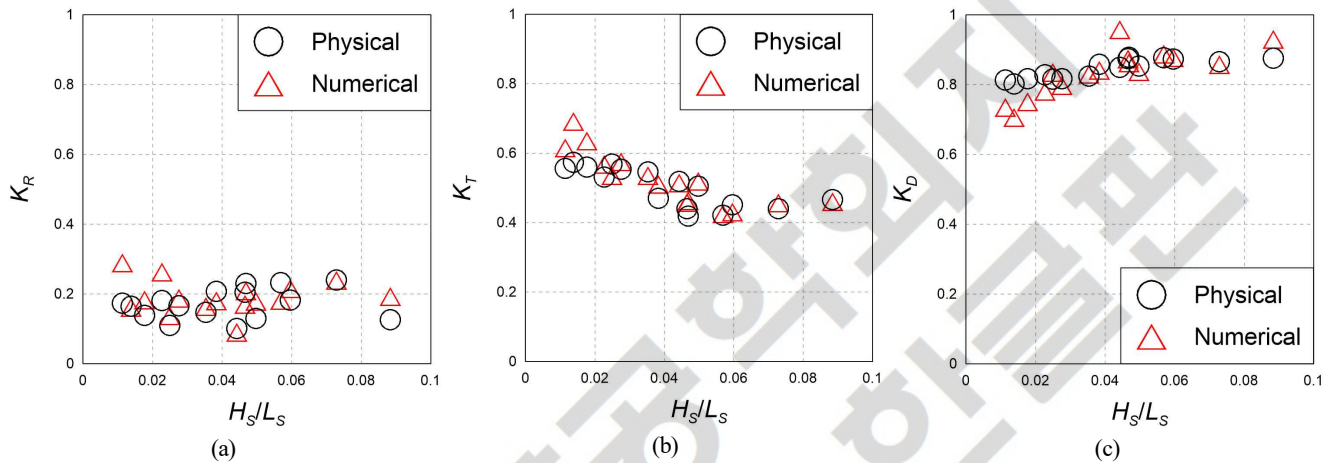


Fig. 7 Comparison of reflection, transmission, and energy dissipation coefficients between the experimental and calculated values

Table 3 Conditions of incident waves and vegetation cross-section used in this study

Case	Wave conditions		Vegetation zone		
	H_s (cm)	T_s (s)	R (cm)	B (cm)	ρ_V
R1-01	2.67	0.64	2.2	133	0.123
R1-02	5.33	0.64	2.2	133	0.123
R1-03	2.67	0.95	2.2	133	0.123
R1-04	5.33	0.95	2.2	133	0.123
R1-05	2.67	1.26	2.2	133	0.123
R1-06	5.33	1.26	2.2	133	0.123
R1-07	9.00	1.26	2.2	133	0.123
R1-08	11.00	1.26	2.2	133	0.123
R1-09	2.67	1.57	2.2	133	0.123
R1-10	5.33	1.57	2.2	133	0.123
R1-11	9.00	1.57	2.2	133	0.123
R1-12	11.00	1.57	2.2	133	0.123
R1-13	2.67	1.88	2.2	133	0.123
R1-14	5.33	1.88	2.2	133	0.123
R1-15	9.00	1.88	2.2	133	0.123
R1-16	11.00	1.88	2.2	133	0.123
R2-06	5.33	1.26	2.2	133	0.032
R3-06	5.33	1.26	2.2	266	0.123
R4-06	5.33	1.26	2.2	133, 133	0.123

Note: H_s = significant wave height, T_s = significant wave period, R = vegetation zone crest depth, B = vegetation zone width, ρ_V = vegetation zone density

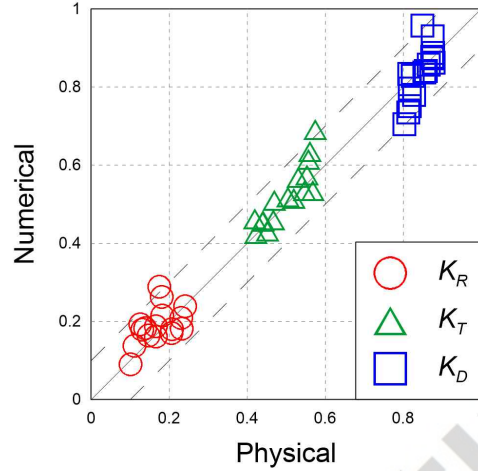


Fig. 8 Comparison of K_R , K_T , and K_D between the experimented and calculated values

4. 수치모형실험의 결과

수리모형실험에서 검토하였던 수중 강성식생의 단면변화에 따른 수리특성 결과에 대하여 좀 더 면밀한 분석을 위하여, 타당성이 확인된 수치과동수조를 이용하여 수중 강성식생 주위의 유동장, 와도분포, 난류분포 및 파고 분포를 검토하였다. 수치과동수조의 구성 및 실험조건은 Fig. 6과 Table 4에 나타난 것과 같이 수리모형실험에 비해 더욱 다양한 조건을 적용하였으며 분석을 용이하게 하기 위하여 입사파는 규칙파를 이용하였다. 또한 식생대의 단면 조건은 마루수심(R), 폭(B), 밀도(ρ_V) 및 배치 거리(V_d)를 고려하였다.

Table 4 Experimental conditions used in this study (wave conditions: $H_i = 5.33$ cm, $T_i = 1.26$ s)

Case	Vegetation zone						
	R (cm)	R/H_i	B (cm)	B/L_i	ρ_V	V_d (cm)	V_d/L_i
CR-00	2.2	0.413	133	0.887	0.123	-	-
CR-01	0.0	0.000	133	0.887	0.123	-	-
CR-02	1.0	0.188	133	0.887	0.123	-	-
CR-03	3.0	0.563	133	0.887	0.123	-	-
CR-04	4.0	0.750	133	0.887	0.123	-	-
CR-05	5.0	0.938	133	0.887	0.123	-	-
CR-06	2.2	0.413	67	0.447	0.123	-	-
CR-07	2.2	0.413	100	0.667	0.123	-	-
CR-08	2.2	0.413	166	1.107	0.123	-	-
CR-09	2.2	0.413	200	1.333	0.123	-	-
CR-10	2.2	0.413	233	1.553	0.123	-	-
CR-11	2.2	0.413	266	1.773	0.123	-	-
CR-12	2.2	0.413	333	2.220	0.123	-	-
CR-13	2.2	0.413	400	2.667	0.123	-	-
CR-14	2.2	0.413	133	0.887	0.093	-	-
CR-15	2.2	0.413	133	0.887	0.153	-	-
CR-16	2.2	0.413	133	0.887	0.183	-	-
CR-17	2.2	0.413	133	0.887	0.213	-	-
CR-18	2.2	0.413	133	0.887	0.123	44	0.293
CR-19	2.2	0.413	133	0.887	0.123	89	0.593
CR-20	2.2	0.413	133	0.887	0.123	133	0.887
CR-21	2.2	0.413	133	0.887	0.123	177	1.180
CR-22	2.2	0.413	133	0.887	0.123	222	1.480

Note: R = vegetation zone crest depth, H_i = incident wave height, B = vegetation zone width, L_i = incident wave length, ρ_V = vegetation zone density, V_d = distance of each vegetation zone

와도의 계산은 Lee et al. (2017b)와 같이 Raffel et al. (1998)과 Raffel et al. (2007)이 제안한 식 (10)–(14)를 이용하였으며, 양(+)값은 반시계 방향으로 빨간 계열로 나타냈으며, 음(-)값은 시계방향으로 파란 계열로 나타내었다.

$$\omega_{xz} = \frac{(\Omega_A + \Omega_B - \Omega_C - \Omega_D)}{4\Delta x \Delta z} \quad (10)$$

$$\Omega_A = \frac{1}{2} \Delta x (u_{i-1, k-1} + 2u_{i, k-1} + u_{i+1, k-1}) \quad (11)$$

$$\Omega_B = \frac{1}{2} \Delta z (w_{i+1, k-1} + 2w_{i+1, k} + w_{i+1, k+1}) \quad (12)$$

$$\Omega_C = \frac{1}{2} \Delta x (u_{i+1, k+1} + 2u_{i, k+1} + u_{i-1, k+1}) \quad (13)$$

$$\Omega_D = \frac{1}{2} \Delta z (w_{i-1, k+1} + 2w_{i-1, k} + w_{i-1, k-1}) \quad (14)$$

난류의 경우 비교적 큰 구조를 가지는 난류는 직접 계산 대상으로 하고, 격자 크기보다 작은 난류에 대해서는 Sub-grid scale (SGS) 모델을 이용하는 Large eddy simulation (LES) 기법을 이용하였으며, 아래 식으로 표현되는 Smagorinsky sub-grid scale model (Smagorinsky, 1963)을 이용하였다.

$$\nu_t = \nu + \nu_t \quad (15)$$

$$\nu_t = (C_s \Delta)^2 |S| \quad (16)$$

$$|S| = (2S_{ij}S_{ij})^{1/2} \quad (17)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (18)$$

$$\Delta = (\Delta x \Delta z)^{1/2} \quad (19)$$

여기서, ν 는 동점성계수, ν_t 는 SGS의 와동점성계수, Δ 는 필터 대표길이(Filter length scale), S_{ij} 는 격자크기에서의 변형 Tensor를 나타낸다. C_s 값의 경우 Schumann (1987)은 0.07–0.21을 제안하였지만, 본 연구의 경우 유사한 연구(Christensen and Deigaard, 2001; Okayasu et al., 2005)에서 적용된 0.1을 사용하였다.

4.1 마루수심 변화에 따른 유동장, 와도분포, 난류분포 및 파괴분포

Fig. 9와 Fig. 10은 식생대의 마루수심 변화에 따른 유동장, 와도분포 및 난류분포를 나타낸 것이며, Fig. 11은 마루수심 변화에 따른 수중 강성식생 주변의 파괴분포도를 나타낸 것이다. Fig. 9와 Fig. 10의 (a)로부터 강성식생 주변의 와도분포에서 시계방향(-)과 반시계방향(+), 와동변화를 확인할 수 있다. 또한 식생 배후에서 시계방향의 강한 와도분포가 형성되고 있으며, 마루수심이 얇은 Fig. 9(a)의 경우가 Fig. 10(a)의 경우보다 더욱 강하고 넓은 와도 분포를 보이는 것을 알 수 있다.

Fig. 9 및 Fig. 10(b)로부터 수중식생 마루와 배후에서 큰 난류분포가 형성되는 것을 확인할 수 있으며, 이는 강성식생 마루상에서 쇄파에 상응할 정도의 강한 유속이 나타나기 때문으로 판단된다. 또한 마루수심이 깊은 Fig. 10(b)의 경우에 비해 마루수심이 얇은 Fig. 9(b)의 경우에 강성식생 마루 위에서 난류강도가 강하고, 배후에서의 난류분포가 넓은 것을 확인할 수 있다.

Fig. 11로부터 전반적으로 수중식생에 의한 반사파의 영향으로 전면에서는 약간의 부분중복파동장이 형성되고 있으며, 수중 강성식생을 지나는 파랑은 식생의 저항에 의한 에너지 감소에 의해 배후에서 파괴가 감소하게 된다. 이러한 파괴감쇠 효과는 일반적인 수중방파제의 특성과 마찬가지로 마루수심이 얇아질수록 증가하는 경향을 보이고 있다.

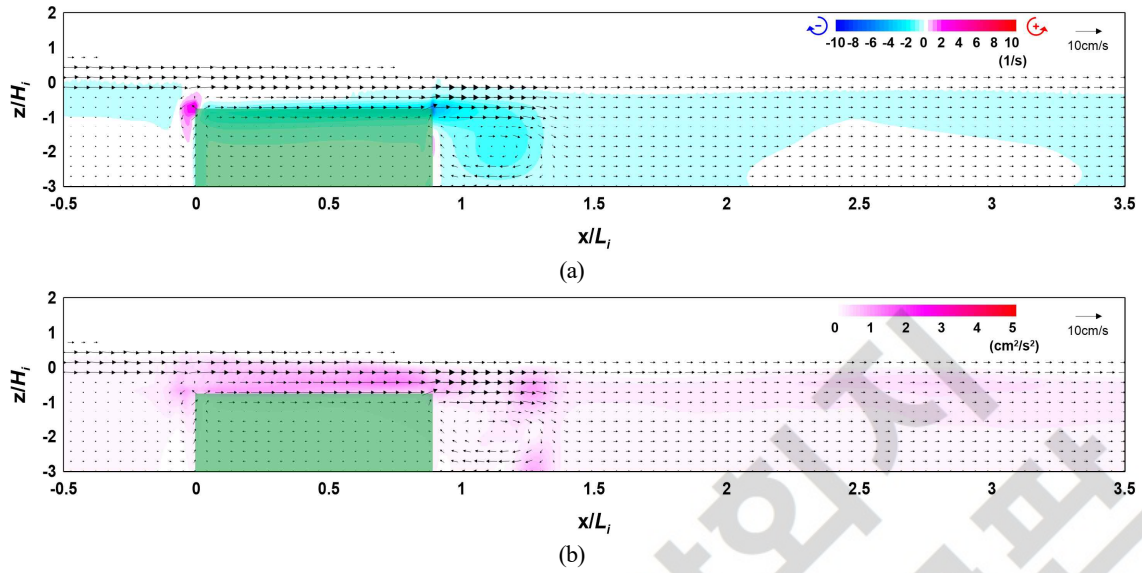


Fig. 9 Flow field, vorticity distribution, and turbulence distribution around the vegetation (Case CR-03, $R/H_i = 0.563$): (a) flow field and vorticity distribution; (b) flow field and turbulence distribution

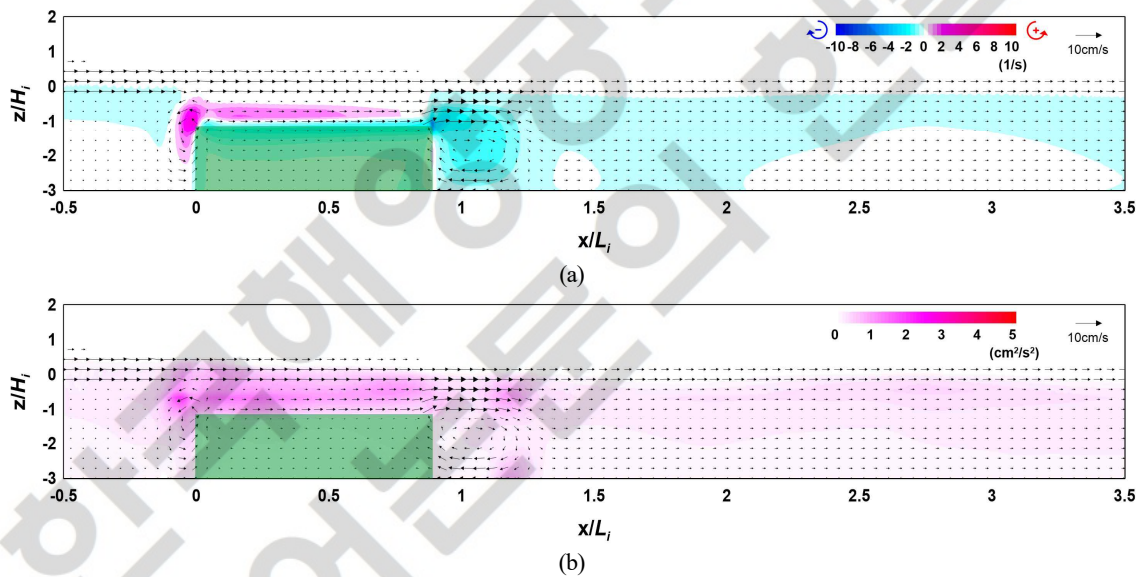


Fig. 10 Flow field, vorticity distribution, and turbulence distribution around the vegetation owing to the ridge (Case CR-05, $R/H_i = 0.938$): (a) flow field and vorticity distribution; (b) flow field and turbulence distribution

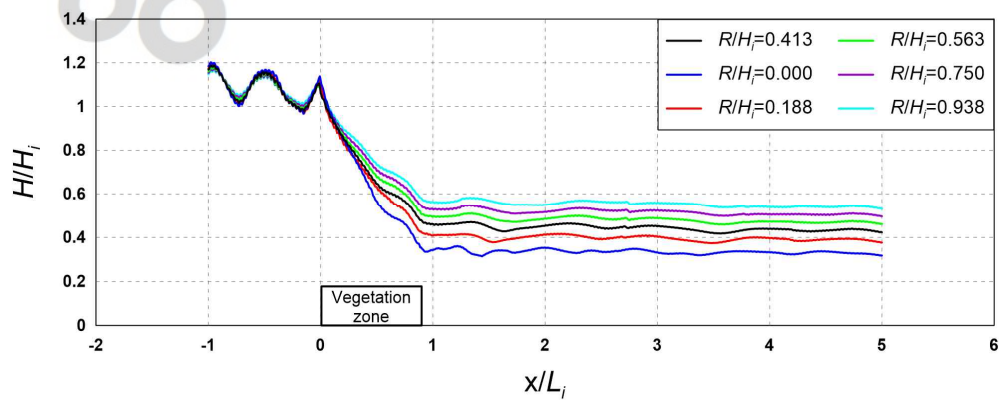


Fig. 11 Wave height distribution according to changes in crest depth of the vegetation zone (R/H_i)

4.2 폭 변화에 따른 유동장, 와도분포, 난류분포 및 파괴분포

Figs. 12-14는 식생대의 폭 변화에 따른 유동장, 와도분포 및 난류분포를 나타낸 것이며, Fig. 15는 폭 변화에 따른 수중식생 주변의 파괴분포도를 나타낸 것이다. Figs. 12-14의 (a)로부터 식생대의 폭이 증가함에 따라 식생 마루상으로 전파하는 파랑이 감소하면서 유속이 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 이로 인해 수중식생 배후에서 시계방향의 강한 와도분포가 형성되는 것을 확인할 수 있다. (b)로부터 수중식생 마루와 배후에서 큰 난류분포가 형성되며, 식생대의 폭이 늘어날수록 식생대 배후에서의 난류강도가 커지는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 수중식생의 폭이 늘어날수록 파괴감쇠 효과는 좋아지는 것을 Fig. 15에서 파괴분포도로 확인할 수 있다. 이상의 결과로부터 수중식생의 폭 변화에 따른 파랑감쇠는 폭이 늘어날수록 증가하는 것으로 판단되며, 유동장과 와도분포 및 난류분포로부터 수중식생의 항력에 의한 수중식생 마루상의 에너지감쇠가 커질수록 파랑감쇠에 효과적인 것으로 판단된다.

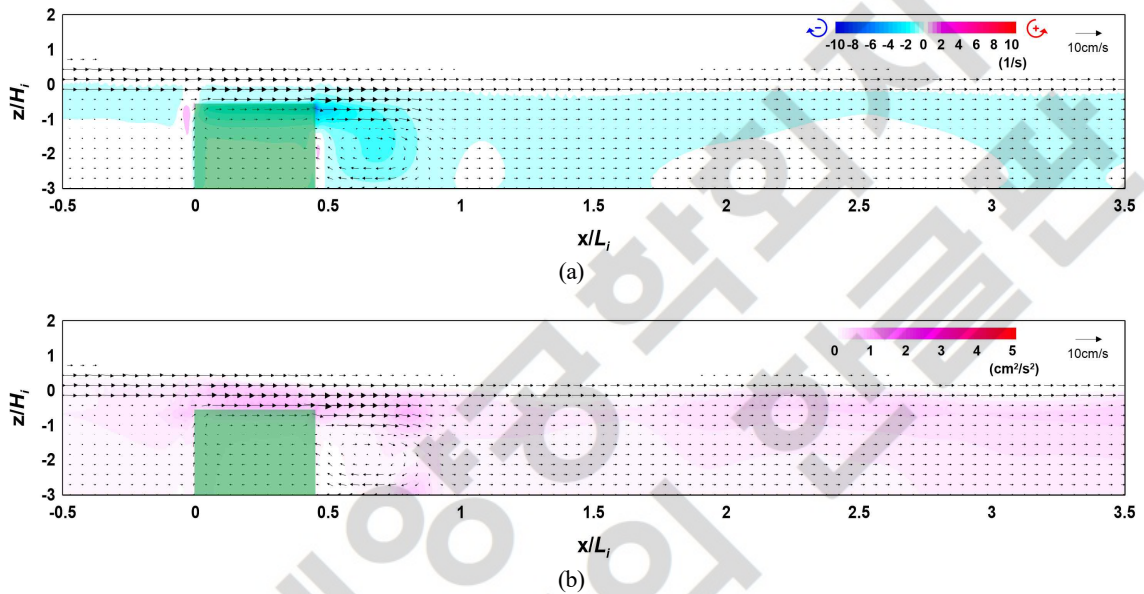


Fig. 12 Flow field, vorticity distribution, and turbulence distribution around the vegetation (Case CR-06, $B/L_v = 0.447$): (a) flow field and vorticity distribution; (b) flow field and turbulence distribution

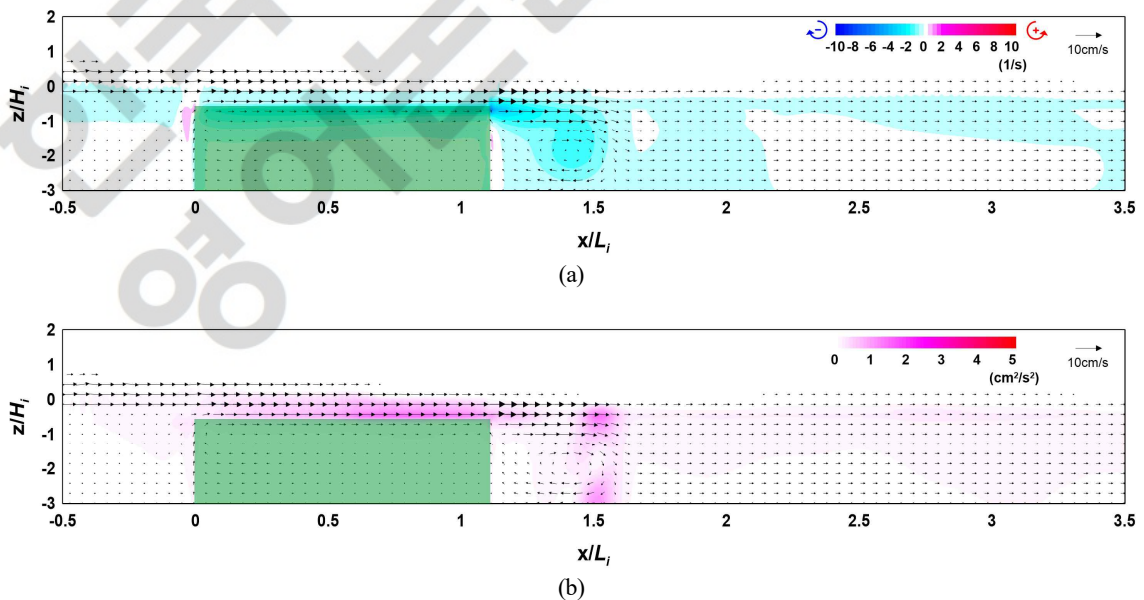


Fig. 13 Flow field, vorticity distribution, and turbulence distribution around the vegetation (Case CR-08, $B/L_v = 1.107$): (a) flow field and vorticity distribution; (b) flow field and turbulence distribution

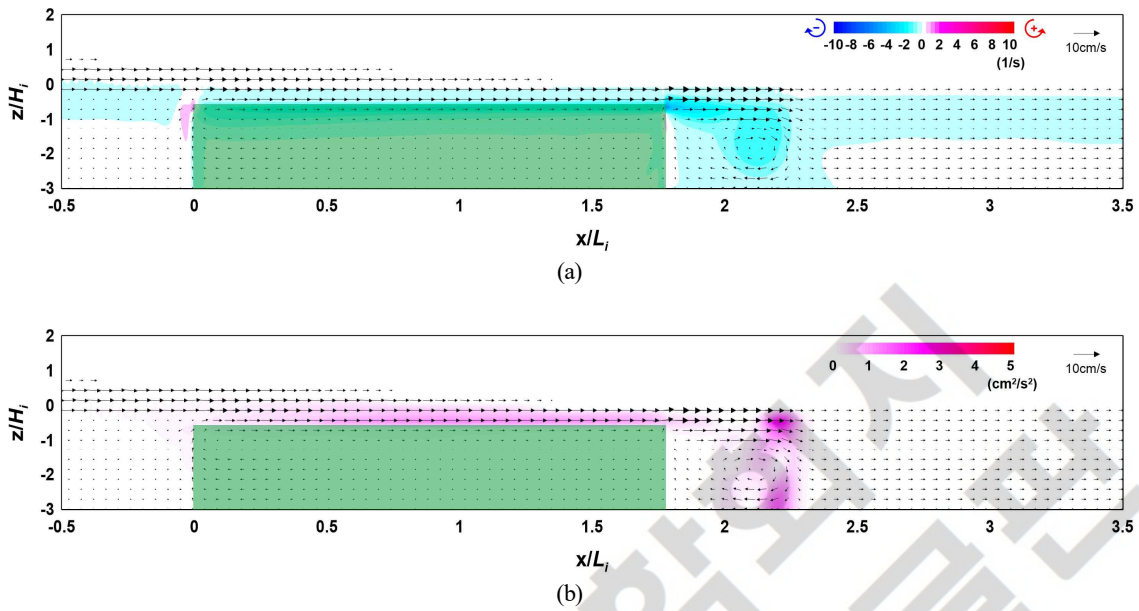


Fig. 14 Flow field, vorticity distribution, and turbulence distribution around the vegetation (Case CR-11, $B/L_i = 1.773$): (a) Flow field and vorticity distribution; (b) Flow field and turbulence distribution

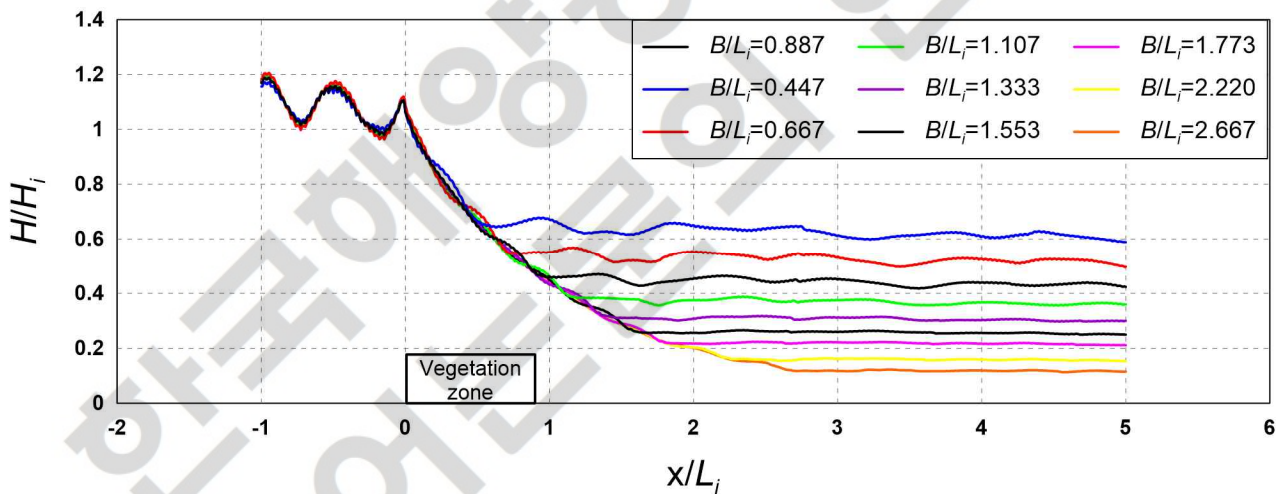


Fig. 15 Wave height distribution according to the change in the width of the vegetation zone (B/L_i)

4.3 밀도 변화에 따른 유동장, 와도분포, 난류분포 및 파고분포

Fig. 16과 Fig. 17은 식생대의 밀도 변화에 따른 유동장, 와도분포 및 난류분포를 나타낸 것이며, Fig. 18은 밀도 변화에 따른 수중식생 주변의 파고분포도를 나타낸 것이다. Fig. 16과 Fig. 17의 (a)로부터 식생대의 밀도가 증가할수록 식생 마루상의 유속이 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 이로 인해 수중식생 배후에서 시계방향의 강한 와도분포가 형성되는 것을 확인할 수 있다. (b)로부터 수중식생 마루와 배후에서 큰 난류분포가 형성되며, 이는 수중식생의 밀도가 커질수록 배후에서 난류강도가 커지는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 수중식생의 밀도가 커질수록 파고감쇠 효과는 좋아지는 것을 Fig. 18에서 파고분포도로 확인할 수 있다. 그리고 Fig. 18로부터 수중식생의 밀도가 커질수록 반사율의 증가와 함께 식생 마루상의 파랑변화에 따른 파랑감쇠를 확인할 수 있다.

이상의 결과로부터 수중식생의 밀도 변화에 따른 파랑감쇠는 밀도가 커질수록 증가하는 것으로 판단되며, 유동장과 와도분포 및 난류분포로부터 수중식생의 밀도가 커질수록 식생 마루와 배후에서 에너지감쇠의 차이로 파랑감쇠에 효과적인 것으로 판단된다.

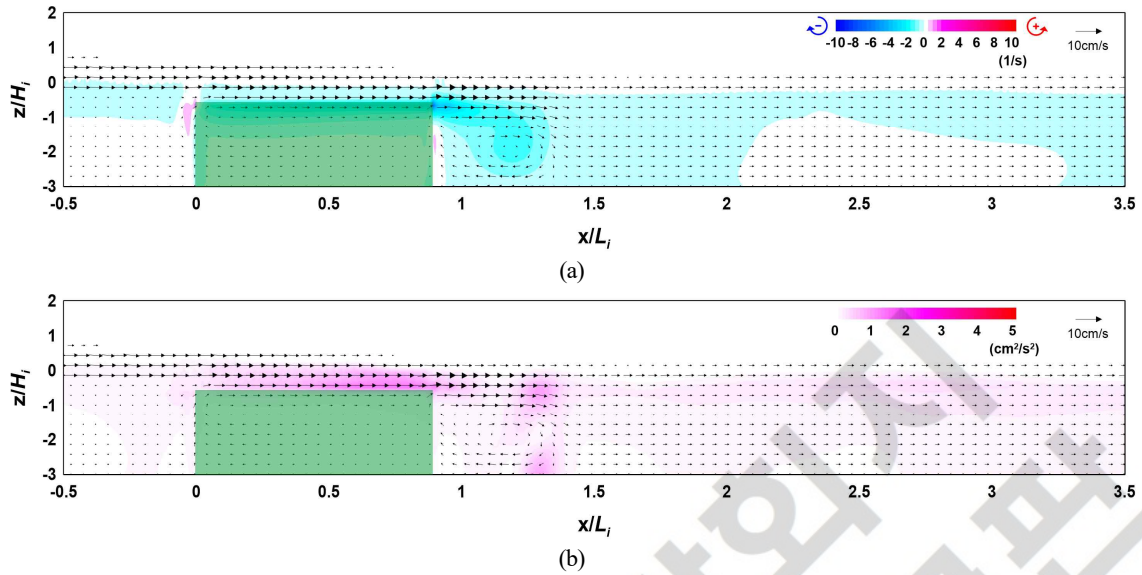


Fig. 16 Flow field, vorticity distribution, and turbulence distribution around the vegetation (Case CR-00, $\rho_V = 0.123$): (a) flow field and vorticity distribution; (b) flow field and turbulence distribution

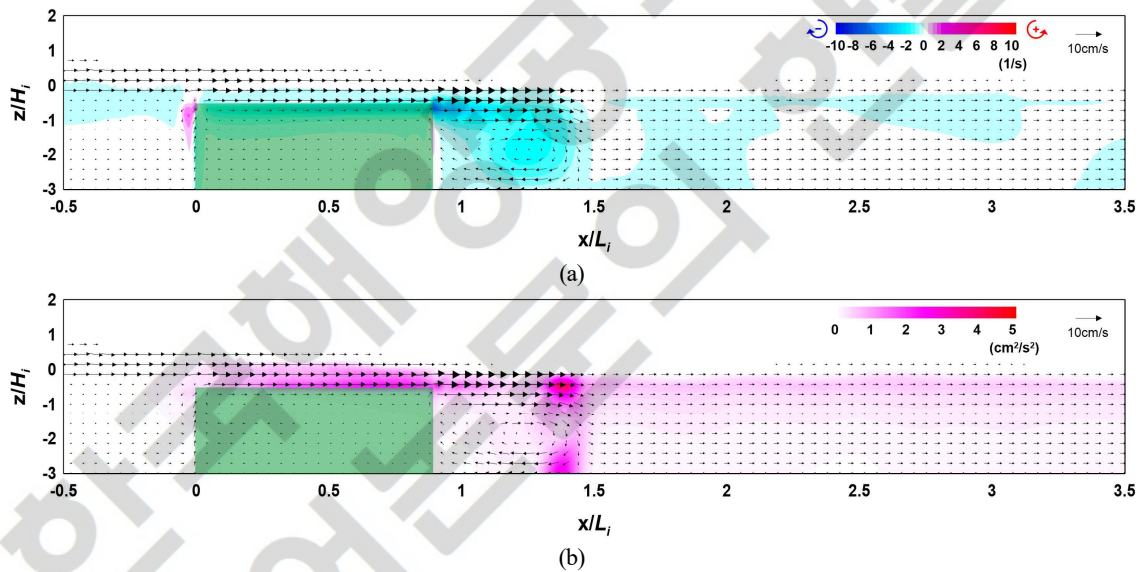


Fig. 17 Flow field, vorticity distribution, and turbulence distribution around the vegetation (Case CR-17, $\rho_V = 0.213$): (a) flow field and vorticity distribution; (b) flow field and turbulence distribution

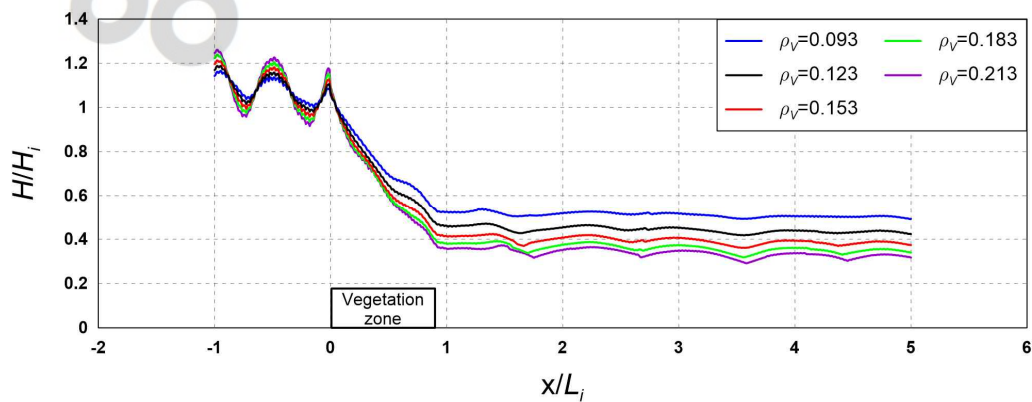


Fig. 18 Wave height distribution according to the changes in vegetation zone density (ρ_V)

4.4 배치 간격 변화에 따른 유동장, 와도분포, 난류분포 및 파고분포

Figs. 19-21은 식생대의 다열 배치간격에 따른 유동장, 와도분포 및 난류분포를 나타낸 것이며, Fig. 22는 배치 간격 변화에 따른 수중식생 주변의 파고분포도를 나타낸 것이다. Figs. 19-21의 (a)로부터 수중식생 다열 배치의 배치간격이 늘어남에 따라 식생 마루상으로 전파하는 파랑이 감소하면서 유속이 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 이로 인해 수중식생 배후에서 시계방향의 강한 와도분포가 형성되는 것을 확인할 수 있다. (b)로부터 수중식생 마루와 배후에서 큰 난류분포가 형성되며, 이는 수중식생 다열 배치의 배치간격이 늘어나도 유사한 난류강도가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 수중식생 다열 배치의 배치간격이 늘어날수록 파고감쇠 효과가 유사한것을 Fig. 22에서 파고분포도로 확인할 수 있다.

이상의 결과로부터 수중식생 다열 배치의 배치간격에 따른 파랑감쇠는 유사하게 나타나는 것으로 판단되며, 유동장과 와도분포 및 난류분포로부터 수중식생의 항력에 의한 수중식생 에너지감쇠가 유사하게 나타나는 것으로부터 판단된다.

이러한 결과는 수중방파제를 다열 배치했을 때 나타나는 Bragg반사에 의한 파랑감쇠 효과와 상반된 결과인데, 이는 수중식생의 경우 수중방파제와 비교하여 낮은 공극률로 인해 반사율이 비교적 낮게 나타나기 때문으로 판단되며, 강성 수중식생의 다열 배치 및 배치 거리에 따른 파랑에너지 감소 효과에 관해서는 좀 더 다양한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

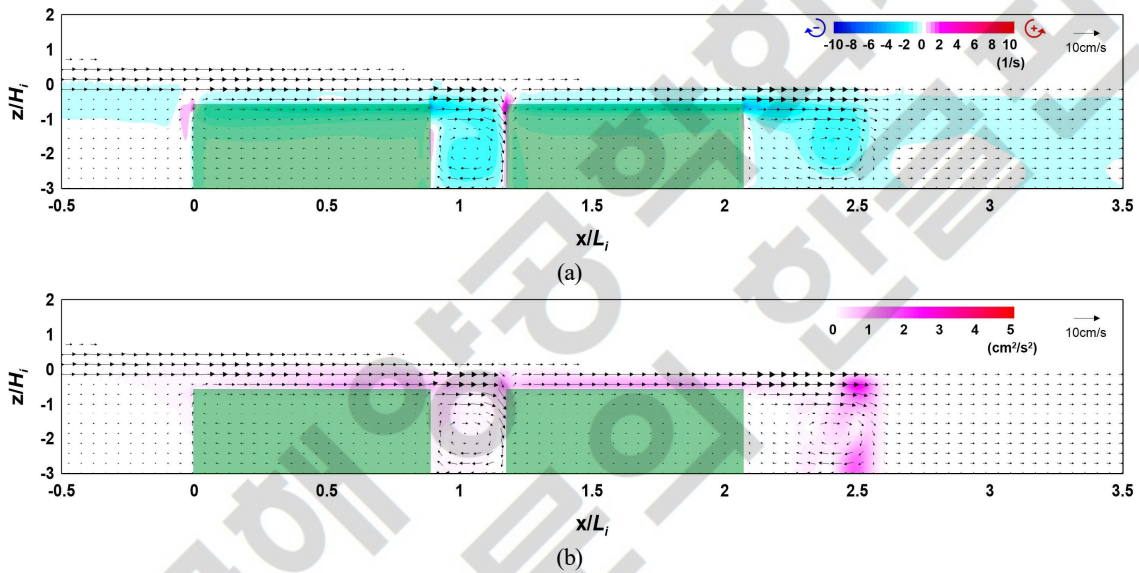


Fig. 19 Flow field, vorticity distribution, and turbulence distribution around the vegetation (Case CR-18, $V_d/L_i = 0.293$): (a) flow field and vorticity distribution; (b) flow field and turbulence distribution

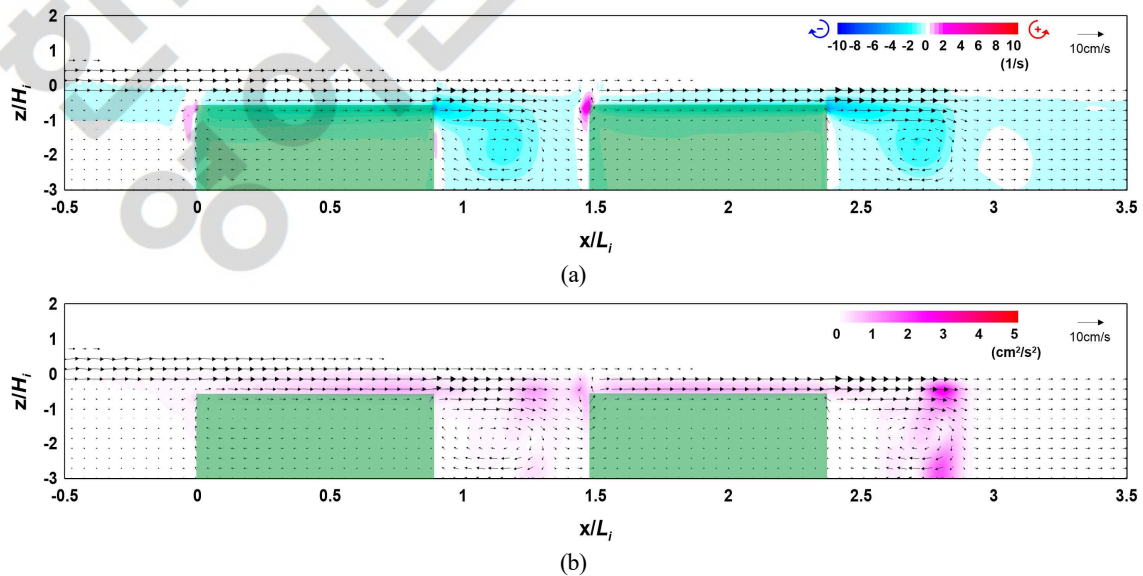


Fig. 20 Flow field, vorticity distribution, and turbulence distribution around the vegetation (Case CR-19, $V_d/L_i = 0.593$): (a) flow field and vorticity distribution; (b) flow field and turbulence distribution

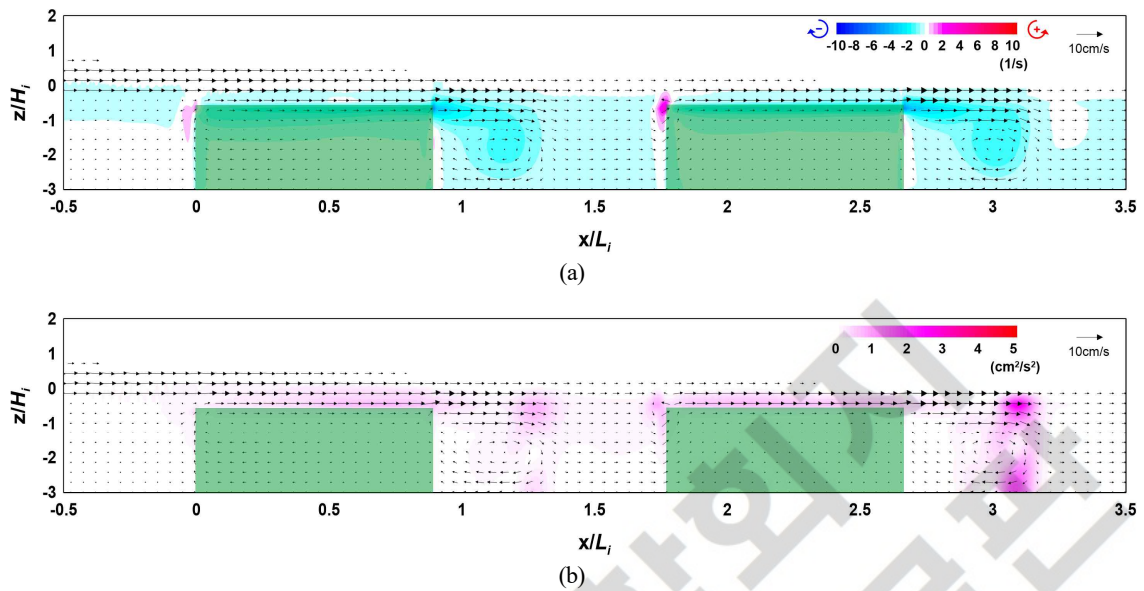


Fig. 21 Flow field, vorticity distribution, and turbulence distribution around the vegetation (Case CR-20, $V_d/L_i = 0.887$); flow field and vorticity distribution; (b) flow field and turbulence distribution

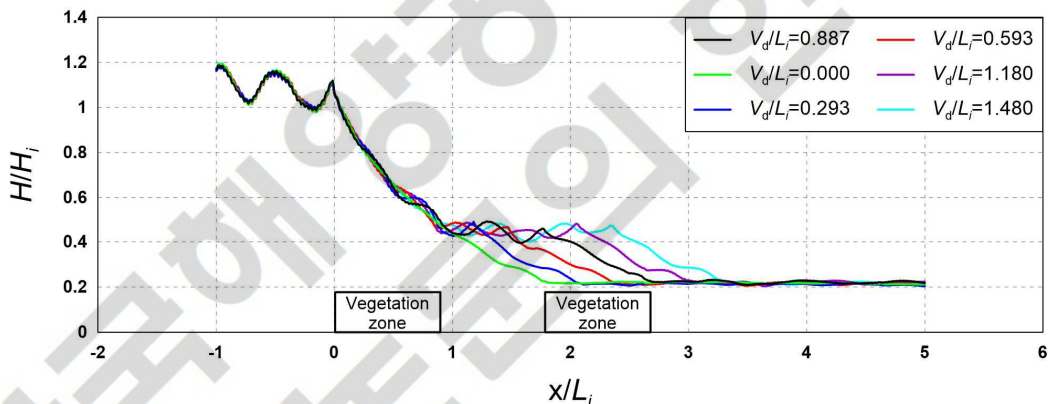


Fig. 22 Wave height distribution according to the arrangement distance of the vegetation zone (V_d/L_i)

5. 결 론

수중 강성식생의 단면변화에 따른 수리특성을 분석하기 위해 수리모형실험 및 수치모형실험을 수행하였다. 수리모형실험을 통해 식생대의 밀도, 폭 및 다열 배치의 단면 변화에 따른 반사계수, 전달계수 및 에너지 감쇠계수를 분석하였으며, 수치모형실험을 이용해 식생대의 마루수심, 밀도, 폭 및 다열 배치의 배치간격 변화에 따른 유동장, 와도분포, 난류분포 및 파고 분포를 분석하였다. 이상의 조건을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 수리모형실험을 통해 식생의 단면변화에 따른 반사계수, 전달계수 및 에너지 감쇠계수를 산정하였으며, 수리모형실험 결과와의 비교·검증을 통해 타당성이 확인된 수치파동수조를 이용하여 식생의 단면변화에 따른 유동장, 와도분포, 난류분포 및 파고분포에 대해 분석하였다.

(2) 수리모형실험 결과 식생대의 밀도가 감소하면 반사계수도 감소하는 것으로 나타났는데 이는 식생대 전면에서 파랑의 투과면적이 증가한 것으로 인한 영향으로 판단된다. 또 식생대의 밀도 및 폭이 커질수록 전달계수는 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 식생대의 밀도 및 폭이 증가함에 따라 식생대의 마루에서 더 많은 쇄파를 유도하기 때문인 것으로 판단된다.

(3) 수치모형실험 결과 식생대의 마루수심이 감소할수록, 폭 및 밀도가 증가할수록 식생대의 마루 및 배후에서 와도 및 난류의 분포와 강도가 증가하는 것으로 나타났으며, 이에 따라 파고감쇠 성능이 증가하는 것으로 나타났다.

(4) 식생대의 총 폭이 같은 경우 다열 배치 및 배치 간격에 따른 와도분포, 난류분포 및 파고분포는 유사한 것으로 나타났는데, 수중 강성식생의 다열 배치 및 배치 거리에 따른 파랑에너지 감쇠 특성에 관해서는 조금 더 다양한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

Funding

This research was a part of the project titled “Practical Technologies for Coastal Erosion Control and Countermeasure”, funded by the Ministry of Oceans and Fisheries, Korea (20180404).

References

- Abdollahpour, M., Hambleton, M., & Ghisalberti, M. (2017). The wave-driven current in coastal canopies. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(5), 3660–3674. <https://doi.org/10.1002/2016JC012446>
- Anderson, M. E., McKee Smith, J., & McKay, S. K. (2011). Wave dissipation by vegetation. ERDC/CHL CHETN-I-82.
- Asano, T., Tsutsui, S., & Sakai, T. (1988). 海藻が繁茂する場の波高減衰の特性 [Wave damping characteristics due to seaweed]. *Proceedings of the Japanese Conference on Coastal Engineering*, 35, 138–142. <https://doi.org/10.2208/proce1970.35.138>
- Beudin, A., Kalra, T. S., Ganju, N. K., & Warner, J. C. (2017). Development of a coupled wave-flow-vegetation interaction model. *Computers & Geosciences*, 100, 76–86. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.12.010>
- Blackmar, P. J., Cox, D. T., & Wu, W. C. (2014). Laboratory observations and numerical simulations of wave height attenuation in heterogeneous vegetation. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 140(1), 56–65.
- Cho, W. C. (2006). Optimum distance between multiple submerged breakwaters for wave screening performance enhancement. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 20(6), 82–87.
- Cho, Y. S., Lee, J. I., & Kim, Y. T. (2002). Hydraulic experiments on reflection of regular waves due to rectangular submerged breakwaters. *Journal of Korea Water Resources Association*, 35(5), 563–573. <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2002.35.5.563>
- Christensen, E. D., & Deigaard, R. (2001). Large eddy simulation of breaking waves. *Coastal Engineering*, 42(1), 53–86. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(00\)00049-1](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(00)00049-1)
- Goda, Y., & Suzuki, T. (1976). Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(15), 47. <https://doi.org/10.9753/icce.v15.47>
- Hadadpour, S., Paul, M., & Oumeraci, H. (2019). Numerical investigation of wave attenuation by rigid vegetation based on a porous media approach. *Journal of Coastal Research*, 92(SI), 92–100. <https://doi.org/10.2112/SI92-011.1>
- Hu, Z., Suzuki, T., Zitman, T., Uittewaal, W., & Stive, M. (2014). Laboratory Study on Wave Dissipation by Vegetation in Combined Current-wave flow. *Coastal Engineering*, 88, 131–142. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2014.02.009>
- Hur, D. S., & Choi, D. S. (2008). Effect of the slope gradient of a permeable submerged breakwater on wave field around it. *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, 28(2B), 249–259.
- Jeong, Y. M., & Hur, D. S. (2016). Numerical experiment of wave attenuation considering behavior of vegetation zone. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 28(4), 232–239. <https://doi.org/10.9765/KSCOE.2016.28.4.232>
- Kirby, J. T., & Anton, J. P. (1990). Bragg reflection of waves by artificial bars. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(22).
- Lee, W. D., Cox, D. T., & Hur, D. S. (2017a). Numerical model study on the wave and current control by coastal vegetation. *Journal of Coastal Research*, 79(10079), 219–223. <https://doi.org/10.2112/SI79-045.1>
- Lee, W. D., Park, J. R., Jeon, H. S., & Hur, D. S. (2017b). Effects of tsunami waveform on energy dissipation of aquatic vegetation. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 31(2), 121–129. <https://doi.org/10.5574/KSOE.2017.31.2.121>
- Manca, E., Stratigaki, V., & Prinos, P. (2010). Large scale experiments on spectral wave propagation over *Posidonia oceanica* seagrass. *Proceedings of 6th International Symposium on Environmental Hydraulics*, 463–469.
- Maza, M., Lara, J. L., Losada, I. J., Ondiviela, B., Trinogga, J., & Bouma, T. J. (2015). Large-scale 3-D experiments of wave and current interaction with real vegetation. Part 2: Experimental analysis. *Coastal Engineering*, 106, 73–86. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.09.010>
- Mitsuyasu, H. (1969). On the growth of wind-generated waves (II). *Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University*, 17(59), 235–248.
- Okayasu, A., Suzuki, T., & Matsubayashi, Y. (2005). Laboratory experiment and three-dimensional large eddy simulation of wave overtopping on gentle slope seawalls. *Coastal Engineering Journal*, 47(2-3), 71–89. <https://doi.org/10.1142/S0578563405001215>
- Peruzzo, P., De Serio, F., Defina, A., & Mossa, M. (2018). Wave height attenuation and flow resistance due to emergent or near-emergent vegetation. *Water*, 10(4), 402. <https://doi.org/10.3390/w10040402>
- Raffel, M., Willert, C. E., & Kompenhans, J. (1998). *Particle image velocimetry: a practical guide* (Vol. 2). Berlin: Springer.

- Raffel, M., Willert, C. E., Wereley, S. T., & Kompenhans, J., (2007). *Particle image velocimetry*. Berlin: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-72308-0>
- Sakakiyama, T., & Kajima, R. (1992). Numerical simulation of nonlinear wave interacting with permeable breakwaters. *Coastal Engineering Proceedings, 1*(23), 1517–1530.
- Schumann, U. (1987). Direct and large eddy simulation of turbulence. Summary of the state of art 1987. *Von Karman Institute for Fluid Dynamics*.
- Smagorinsky, J. (1963). General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment. *Monthly Weather Review, 91*(3), 99–164. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1963\)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1963)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2)
- van Veelen, T. J., Fairchild, T. P., Reeve, D. E., & Karunaratna, H. (2020). Experimental study on vegetation flexibility as control parameter for wave damping and velocity structure. *Coastal Engineering, 157*, 103648. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103648>
- Wang, H., Yin, Z., Luan, Y., Wang, Y., & Liu, D. (2022). Hydrodynamic characteristics of idealized flexible vegetation under regular waves: Experimental investigations and analysis. *Journal of Coastal Research, 38*(3), 673–680. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-21-00089.1>
- Wu, W. C., & Cox, D. T. (2015). Effects of wave steepness and relative water depth on wave attenuation by emergent vegetation. *Estuarine, Coastal and Shelf Science, 164*, 443–450. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.08.009>

Author ORCIDs

Author name	ORCID
Lee, Jeongheum	0000-0003-1827-5478
Jeong, Yeon-Myeong	0000-0003-3349-1427
Kim, Jun-Seok	0000-0002-6522-3585
Hur, Dong-Soo	0000-0003-4627-7593