

식생대의 거동을 고려한 파랑감쇠의 수치실험 Numerical Experiment of Wave Attenuation considering Behavior of Vegetation Zone

정연명* · 허동수*
 Yeon Myeong Jeong* and Dong Soo Hur*

요 지 : 본 연구에서는 아직까지 수치해석에서 적용할 수 없었던 식생대의 거동에 따른 파랑감쇠를 수치적으로 검토하기 위하여 파동장모델(LES-WASS-2D)과 개별요소법(DEM)의 양방향 연성해석기법을 개발하였다. 본 논문에서 적용하는 양방향 연성해석기법의 타당성 및 유효성을 확보하기 위하여 식생을 이용한 파랑감쇠 특성에 관한 수리 모형실험결과와 비교 분석하였다. 식생대의 높이, 분포, 간격 및 입사파랑조건에 따른 거동 및 파랑감쇠특성을 수치적으로 분석하였으며, 식생대의 높이가 길어질수록, 분포가 늘어날수록, 간격이 좁아질수록 3~4%정도 파랑감쇠에 효과적인 것을 확인하였다. 이로써 본 연구에서 개발한 연성 수치모델이 식생대의 거동에 따른 파랑감쇠 예측에 적용 가능한 것을 확인하였다.

핵심용어 : 식생대, 거동, 파랑감쇠, 개별요소법, 양방향 연성해석방법

Abstract : In this study, the two-way coupled analysis method of LES-WASS-2D and DEM has been newly developed to review numerically wave attenuation due to behavior of vegetation zone could not yet applied in numerical analysis. To verify the applicability, two-way coupled analysis method is analyzed comparing to the experimental result about characteristics of wave attenuation using vegetation. Numerically analyzed behavior and characteristics of wave attenuation according to height length, distribution length, spacing of vegetation zone and incident wave conditions. It was confirmed to be effective of 3~4% wave attenuation were increased height length and distribution length, narrowed spacing of vegetation. Finally, this study is applicable to behavior and wave attenuation prediction of vegetation zone.

Keywords : vegetation zone, behavior, wave attenuation, DEM, two-way coupled analysis method

1. 서 론

최근에 연안방재기술 검토를 위하여 친환경 및 친자연적인 식생을 활용한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 식생을 활용한 연안방재기술은 기존의 중력식 구조물에 의존하는 시스템에서 탈피한 유연한 방법으로 주목받아 연구되고 있다(Tang et al., 2015; Maza et al., 2016). 이러한 식생을 활용한 연구로는 식생의 거동특성으로 인하여 수리모형실험의 의존도가 매우 높은 편이나, 컴퓨터 및 수치해석방법의 발달로 수치해석을 통하여 검토되기도 한다.

본 연구에서는 식생대의 거동특성을 고려한 파랑감쇠특성을 수치적으로 검토하는 것을 목적으로 한다. 이에 식생을 이용한 파랑감쇠에 관한 실험적 연구로서 Kim(2008)은 섬유 재질 식생의 횡밀도 변화에 따른 파랑감쇠효과, Lee et al.(2009)은 연성 식생에 의한 해빈의 침식방지효과 그리고 Lee et al.(2012)은 인공식생에 의한 항로매몰의 저감효과에

관한 연구를 수행하였다. 그 외 연구(Kobayashi et al., 1993; Wu and Cox, 2015; Lara et al., 2016)에서도 식생대의 파랑감쇠 특성에 대하여 논의하였다. 수치적인 연구로서 평면 2차원 수치모델(2DH)을 이용한 수변식생에 의한 파랑변형특성, 식생항력에 따른 파랑감쇠, 그리고 파랑감쇠에 따른 지형변동 및 항로매몰에 관한 수치적인 분석 등 다수의 연구들이 진행되었다(Lee, 2006; Lee, 2007; Lee, 2008; Lee et al., 2012; Asano et al., 1992; Augustin et al., 2009). 하지만 기존의 연구들은 식생대의 거동에 따른 파랑감쇠를 식생-파랑의 상호작용에 의한 에너지소산을 직접 해석하기에는 어려운 점이 많으며, 대부분의 연구에서는 식생을 투과성구조물과 같은 방식으로 처리하고 있는 실정이다. 더불어 식생-파랑의 상호작용을 양방향 해석기법을 이용하여 수치적으로 해석하는 연구는 전무한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 아직까지 수치해석에서 적용할 수 없었던 식생의 거동특성에 따른 파랑감쇠를 수치적으로 검토하

*경상대학교 해양토목공학과 (Corresponding author: Dong Soo Hur, Department of Ocean Civil Engineering, Gyeongsang National University, 38 Cheondaegukchi-gil, Tongyeong-si, Gyeongsangnam-do 53064, Korea, Tel : +82-55-641-3150, Fax : +82-55-641-3150, dshur@gnu.ac.kr)

기 위하여 식생대의 식생을 개별요소법(DEM)의 요소를 이용하여 재현하며, 식생-파랑의 상호작용에 따른 에너지감쇠는 파동장모델(LES-WASS-2D)을 이용한다. 이러한 수치해석방법 간에 양방향 연성해석기법을 개발하여 식생대의 거동을 고려한 파랑감쇠특성을 검토한다.

2. 연성해석기법

2.1 2차원 파동장 모델(LES-WASS-2D)

본 연구에서는 식생대의 거동특성에 따른 파랑감쇠 특성을 수치적으로 검토하기 위하여 식생-파랑의 비선형 상호작용을 수치적으로 해석할 수 있는 2차원 수치해석기법(LES-WASS-2D; Hur and Choi, 2008)과 개별요소법(DEM)간의 양방향 연성해석기법을 개발하여 검토한다. 이러한 수치모델은 Hur and Jeon (2011)에 의해 기존에 제안된 일방향 연성해석기법에서 새롭게 양방향 연성해석기법으로 개발되었다. 즉, PBM (Porous Body Model)을 기반으로 식생-파랑 비선형 상호작용을 직접해석 할 수 있는 2차원 수치해석기법(LES-WASS-2D)에 식생대의 동역학적 거동을 수치적으로 재현할 수 있는 개별요소법(DEM)이 도입되어 양방향 연성해석기법으로 새롭게 적용되었다.

2차원 파동장 모델(LES-WASS-2D)은 2차원 비압축성 · 점성유체에서 파랑을 무반사로 발생시킬 수 있는 소스항이 포함된 연속방정식 (1)과 투과성 매체에 의한 에너지소산을 고려할 수 있게 수정된 Navier-Stokes 운동량 방정식 (2), (3)으로 구성되어 있으며, 자유표면의 형상을 모의하기 위한 VOF 함수의 이류방정식 (4)로 구성되어있다.

$$\frac{\partial(\gamma_x u)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_z w)}{\partial z} = q^* \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \gamma_v \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial(\gamma_x u)}{\partial x} + w \frac{\partial(\gamma_z u)}{\partial z} \\ &= -\gamma_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \nu_l \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \nu_l \left(2 \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right) \right\} \right] \quad (2) \\ & -M_x - D_x - E_x \end{aligned}$$

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

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

$$q^* = \begin{cases} q(z, t) / \delta x_s : x = x_s \\ 0 : x \neq x_s \end{cases} \quad (5)$$

여기서 u, w 는 x, z 방향의 유속, 식 (5)에서 q^* 는 조파소스의 유량밀도, δx_s 는 $x = x_s$ 를 포함하는 x 방향의 격자간격이다.

γ_v 는 체적 공극률, γ_l 는 x, z 방향의 면적 공극률, t 는 시간, g 는 중력가속도, ρ 는 유체의 밀도, p 는 압력, ν_l 는 동점성계수(ν)와 와동점성계수(ν_t)의 합을 의미한다. 식 (2), (3)에서 M_x, M_z 는 관성저항(Sakakiyama and kajima, 1992), E_x, E_z 는 층류저항(Liu and Masliyah, 1999), D_x, D_z 는 난류저항(Ergun, 1952, van Gent, 1995)으로서 다음 식으로 결정된다.

$$M_x = (1 - \gamma_v) C_M \frac{Du}{Dt} = (1 - \gamma_v) C_M \left\{ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right\} \quad (6)$$

$$M_z = (1 - \gamma_z) C_M \frac{Dw}{Dt} = (1 - \gamma_z) C_M \left\{ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right\} \quad (7)$$

$$E_x = C_E \frac{\nu (1 - \gamma_x)^2}{D_p^2 \gamma_x^2} u \quad (8)$$

$$E_z = C_E \frac{\nu (1 - \gamma_z)^2}{D_p^2 \gamma_z^2} w \quad (9)$$

$$D_x = C_D \frac{(1 - \gamma_x)}{D_p \gamma_x^2} u \sqrt{(\gamma_x u)^2 + (\gamma_z w)^2} \quad (10)$$

$$D_z = C_D \frac{(1 - \gamma_z)}{D_p \gamma_z^2} w \sqrt{(\gamma_x u)^2 + (\gamma_z w)^2} \quad (11)$$

여기서, C_M, C_E 및 C_D 는 각각 관성저항계수, 층류저항계수, 난류저항계수이며, D_p 는 투과성 매체의 평균입경이다.

그리고 2차원 파동장모델(LES-WASS-2D)의 상세한 사항은 Hur and Choi(2008)를 참조하기 바란다.

2.2 개별요소법(DEM)

개별요소법은 암반과 지반을 암석 블록과 흙 입자의 집합체로 설정하여 경계조건 아래 각각 요소 간 전달되는 접촉력 및 합력을 산정하여 동역학적 거동을 수치적으로 해석하기 위한 기법이다. 이러한 토질분야에 적용되어 오던 개별요소법을 Cundall and Strack(1979)가 해안공학분야에서 대표적인 저질에 대해 적용하는 것을 제안하였다. 개별요소법은 각각의 요소가 운동방정식을 만족하는 조건 하에 요소간의 힘의 전달이 작용·반작용의 법칙을 기본으로 하고 있기에 정적인 문제뿐만 아니라 동적인 문제까지 폭넓게 대응할 수 있다. 그리고 Harada et al.(2007)은 분리되어 있는 요소 간에 인장력을 부여하여 특정 형태를 재현할 수 있는 연구를 검토하였으며, 본 연구에서는 이러한 기법을 적용하여 식생대의 거동특성을 재현한다.

Fig. 1은 경계조건 아래 각각 요소 간 접촉판정 원리를 2차

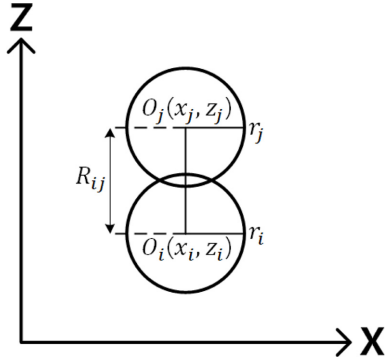


Fig. 1. Coordinates of two dimensional elements.

원 좌표계로서 나타낸 것으로 요소인 $O_i(x_i, z_i)$ 의 반경(r_i)과 $O_j(x_j, z_j)$ 의 반경(r_j) 사이의 접촉판정은 식 (12)와 같으며, $(r_i + r_j)$ 은 인접하는 두 요소의 중심간 거리를 나타낸다. 그리고 임의의 요소인 $O_i(x_i, z_i)$ 의 시각 $t - \Delta t$ 로부터 t 에 이르는 미소 시간증분 Δt 사이의 변위증분은 Δu , Δw 이다. 이러한 접촉판정은 접촉하고 있는 인접 입자 간에 작용하는 힘을 구하고 입자의 운동방정식을 푸는 것에 의하여 개별 입자의 운동을 해석하고 있으므로 다른 입자와 접촉하지 않는 한 다른 입자와의 사이에 접촉력은 작용하지 않는다.

$$r_i + r_j \geq \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \quad (12)$$

접촉점의 지표로서, 공통법선 z 축으로 하는 각 α_{ij} (반사회전을 정)을 이용하면, 식 (13)과 (14)로 나타낼 수 있다.

$$\sin \alpha_{ij} = \frac{x_i - x_j}{R_{ij}} \quad (13)$$

$$\cos \alpha_{ij} = -\frac{z_i - z_j}{R_{ij}} \quad (14)$$

여기서, $R_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (z_i - z_j)^2}$ 이다. 접촉하는 2개의 요소 i, j 에 대하여 미소 시간증분 Δt 동안의 법선방향 및 접선방향의 상대변위증분 $[\xi_n]_{ij}$ (접근을 정) 및 $[\xi_s]_{ij}$ (반시계 회전을 정)은 식 (15)와 (16)에서 계산된다.

$$[\xi_n]_{ij} = (u_i - u_j)\Delta t \sin \alpha_{ij} + (w_i - w_j)\Delta t \cos \alpha_{ij} \quad (15)$$

$$[\xi_s]_{ij} = (u_i - u_j)\Delta t \cos \alpha_{ij} + (w_i - w_j)\Delta t \sin \alpha_{ij} + \left(\frac{r_i}{2}\theta_i + \frac{r_j}{2}\theta_j\right)\Delta t \quad (16)$$

요소와 요소의 접촉판정에 따라 요소 간에 작용·반작용의 힘이 작용한다. 이에 따른 2개의 입자 i, j 의 접촉면에 작용하는 힘을, 법선방향에 작용하는 압축력 f_n 과 접선방향에 작용하는 전단력 f_s 로 나뉜다. 시간 t 에 있어 법선방향에 작용하는 탄성항력 $[e_n]_t$ 과 점성항력 $[d_n]_t$, 접선방향에 작용하는 탄성항력 $[e_s]_t$ 과 점성항력 $[d_s]_t$, 식 (17), (18)과 같이 나타낼 수 있다.

$$[f_n]_t = [e_n]_t + [d_n]_t \quad (17)$$

$$[f_s]_t = [e_s]_t + [d_s]_t \quad (18)$$

본 연구에서 적용하고 있는 개별요소법(DEM) 해석방법의 상세한 사항은 Hur and Jeon(2011)를 참조하기 바란다.

그리고 본 연구에서는 식생대의 거동특성을 재현하기 위해서 Harada et al.(2007)가 제안한 요소간의 인장력을 적용하면 식 (19)로 표현된다. 여기서 FC 는 요소 간에 존재하는 인장력을 나타내며, 재료의 특성에 따라 값을 달리 가진다.

$$[e_n]_t = [d_n]_t = 0 \text{ if } [e_n]_t - FC < 0 \quad (19)$$

2.3 연성해석방법

본 연구에서는 유체-식생 상호작용에 따른 식생대의 거동 및 파랑감쇠특성을 양방향 연성수치모델(LES-WASS-2D and DEM)을 이용하여 검토한다. 먼저, 해석 영역의 식생대 거동 특성에 따른 파랑감쇠특성을 검토하기 위하여 비압축성 유체 운동의 연속방정식과 Porous media에도 적용이 가능하도록 수정된 Navier-Stokes 운동방정식을 기초방정식으로 하여, 식생대의 항력저항을 고려할 수 있는 LES-WASS-2D(Hur and Choi, 2008)를 이용하여 수행한다. 그리고 식생대의 거동을 재현하기 위해 개발한 개별요소법(DEM)을 이용하여 요소의 초기배열 후, 파동장모델(LES-WASS-2D)에서 산정된 유체력을 이용하여 운동방정식 조건하에 거동을 수치적으로 검토한다. 거동된 요소의 위치를 추적하여 파동장모델에서 식생대의 영역을 재산정하게 되는 일련의 과정을 반복적으로 수행하는 양방향 해석방법을 적용하여 수치모델의 해석을 실시한다.

3. 식생-파랑의 상호작용에 따른 파랑감쇠 검토

3.1 식생대의 파랑감쇠 검증

본 연구에서 제안한 연성해석방법을 이용한 식생대의 거동을 수치적으로 검토하면서 파랑감쇠특성을 검증하기 위하여 기존의 수리모델실험(Kim, 2008)에 근거한 수치파동수조를 구성하였다. Fig. 2에 나타내고 있는 것과 같이 수조의 양 끝 단에는 부가감쇠영역을, 외해측에는 조파소스를 설치하여 무반사 조파시스템을 구성하였다. 그리고 해석영역에는 개별요소법(DEM)의 요소를 이용하여 식생대를 배치하였으며, 식생의 밀도(ρ_f)는 0.95, 식생간의 간격(D_v)은 4 cm, 식생의 높이(h_v)는 25 cm, 식생대의 분포(L_v)는 200 cm이다. 그리고 파형경사(H_v/L) 0.022, 0.029, 0.037, 0.045, 0.056의 파형경사가 증가하는 입사조건을 이용하였다. 계산조건 및 식생의 제원은 Table 1에 나타내었다.

Fig. 3은 식생대의 높이(h_v) 25 cm, 길이(L_v) 200 cm 및 분포간격(D_v) 4 cm의 경우에 파형경사(H_v/L) 0.056의 파랑작용에 따른 연성식생의 운동특성을 나타낸 것으로 (a)는 $t/$

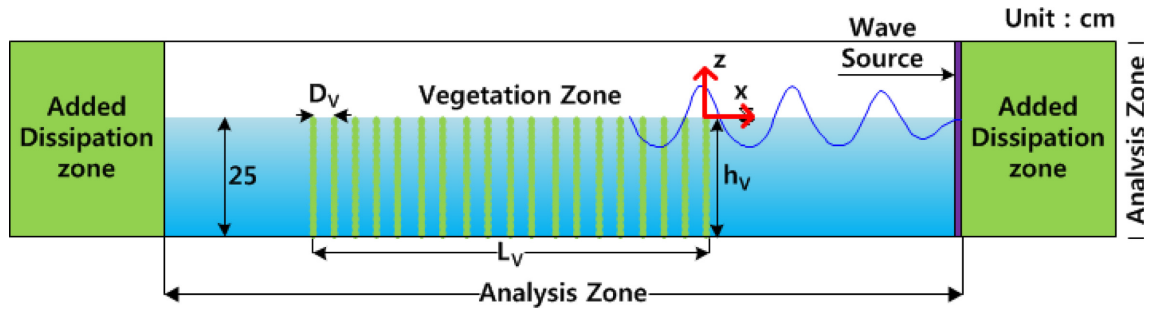


Fig. 2. Definition sketch of numerical wave tank based on the experiment by Kim (2008).

Table 1. Numerical test conditions for verification of a coupled numerical model.

ρ_V	H_i/L_i	D_V	L_V	h_V
0.95	0.022, 0.029, 0.037, 0.045, 0.056	4 cm	200 cm	25 cm

$T_i = 5/30$, (b)는 $t/T_i = 10/30$, (c)는 $t/T_i = 15/30$, (d)는 $t/T_i = 20/30$, (e)는 $t/T_i = 25/30$, (f)는 $t/T_i = 30/30$ 의 계산결과를 나타낸다. 여기서 연두색선(—)은 연성식생, 파란색선(—)은 자유수면, 붉은색 화살표(←)는 유속을 의미한다. 그리고 파동장 계산이 안정된 후에 개별요소법(DEM)을 이용하여 연성식생의 운동특성을 시뮬레이션한 결과이다. 식생대의 거동이 시작되는 시점(개별요소법의 계산을 시작하는 시점)의 의미는 수치파동수조에서 조파개시 후 파동장이 안정된 시점($t = 15\text{sec}$)에서 식생의 운동이 시작되도록 수치모의를 수행하였다는 것을 나타낸다.

Fig. 3으로부터 전파되는 파랑에 의해서 식생대의 식생들이 파랑의 진행방향으로 기울어지는 것을 확인할 수 있다. 또한 일정시간이 경과할 경우 식생의 부력과 장력 그리고 파랑에 의한 유체력의 평형상태가 이루어져 규칙파랑 작용 하에서는 일정한 궤적운동을 하게 되며, 개별요소법을 이용한 연

성식생의 재현이 파랑의 작용에 따른 유체력으로부터 잘 반응하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 식생의 거동특성에 의한 식생항력이 파랑에너지를 감소시켜 식생대를 통과하는 파랑의 에너지가 감소하는 것으로 판단되며, 후술하는 내용에서 다루기로 한다.

Fig. 4는 식생대의 식생항력에 의한 파랑의 반사·투과율을 파형경사(H_i/L_i)에 따라 나타낸 것이다. 여기서 빨간색 동그라미(●)는 수리실험결과, 파란색 마름모(◆)는 본 연구의 수치해석결과를 각각 의미한다.

Fig. 4로부터 파형경사 중 특정영역($H_i/L_i = 0.022, 0.045$,

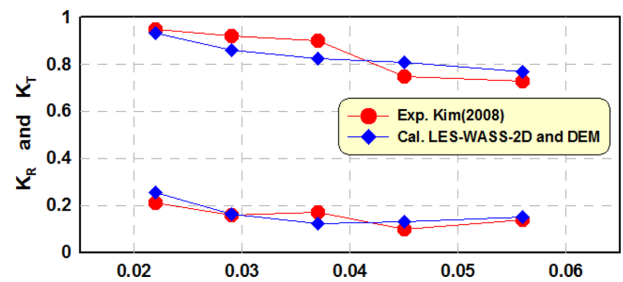


Fig. 4. Comparison between measured (Kim, 2008) and calculated results.

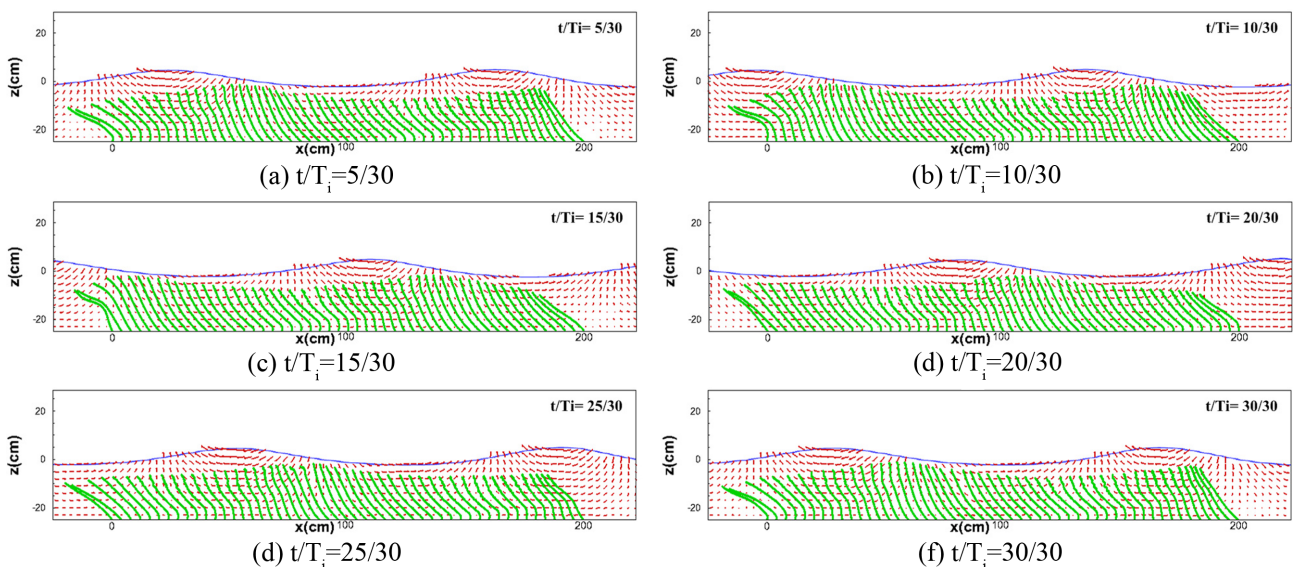


Fig. 3. Spatial distribution for sway motion of vegetations under wave action ($H_i/L_i = 0.056$).

0.056)에서는 반사율(K_r)과 투과율(K_t) 모두 계산값이 실험값과 높은 일치도로 나타나고 있으나, 특정 파형경사($H_i/L_i = 0.029, 0.037$)에서는 계산값이 실험값을 과대·과소평가 하고 있는 경향을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과는 연성해석기법에 따른 수치파동수조에서 식생의 분포밀도, 상대 길이에 의한 식생항력은 잘 재현하는데 반해 개별요소법에서 식생의 거동이 아직 고정도로 재현되지 않고 있기 때문으로 판단된다. 또한 식생대의 운동은 식생의 물성치(식생의 두께에 따른 운동특성)에 지배를 받게 되는데, Kim(2008)에서는 이와 같은 식생의 정보를 찾아볼 수 없어 본 연구에서 임의의 값을 적용하여 연성식생을 재현하여 검토한 것도 하나의 이유로 설명될 수 있다. 따라서 합리적인 식생의 물성치를 개별요소법(DEM)에 적용한다면 보다 우수한 결과를 도출할 수 있을 것으로 생각되며 이에 대해서는 향후 더욱 많은 검토가 필요할 것으로 판단된다.

3.2 식생의 파랑제어 검토

Fig. 2에 나타나고 있는 것과 같이 식생대의 파랑감쇠에 관한 검증은 실시한 수치파동수조를 이용하여 입사파고(H_i)와 주기(T_i)변화, 식생대의 높이(h_v), 분포(L_v), 분포간격(D_v)에 따른 파랑감쇠 특성을 파악하였다. 이용된 수치해석조건에 대한 상세한 사항은 Table 2에 나타내었다.

Fig. 5는 시간에 따른 식생대의 거동특성을 보이는 결과이며, 파동장 계산이 안정된 후에 개별요소법(DEM)을 이용하여 식생의 거동특성을 나타낸 결과이다. 입사파고(H_i) 5 cm, 입사주기(T_i) 1.5 sec, 식생대의 높이(h_v) 25 cm, 분포(L_v) 200 cm 및 간격(D_v) 4 cm의 경우에 대한 결과이며, Fig. 5에서 (a)는 $t/T_i = 5/30$, (b)는 $t/T_i = 10/30$, (c)는 $t/T_i = 15/30$, (d)는 $t/T_i = 20/30$, (e)는 $t/T_i = 25/30$, (f)는 $t/T_i = 30/30$ 의 계산결과를 나타낸다.

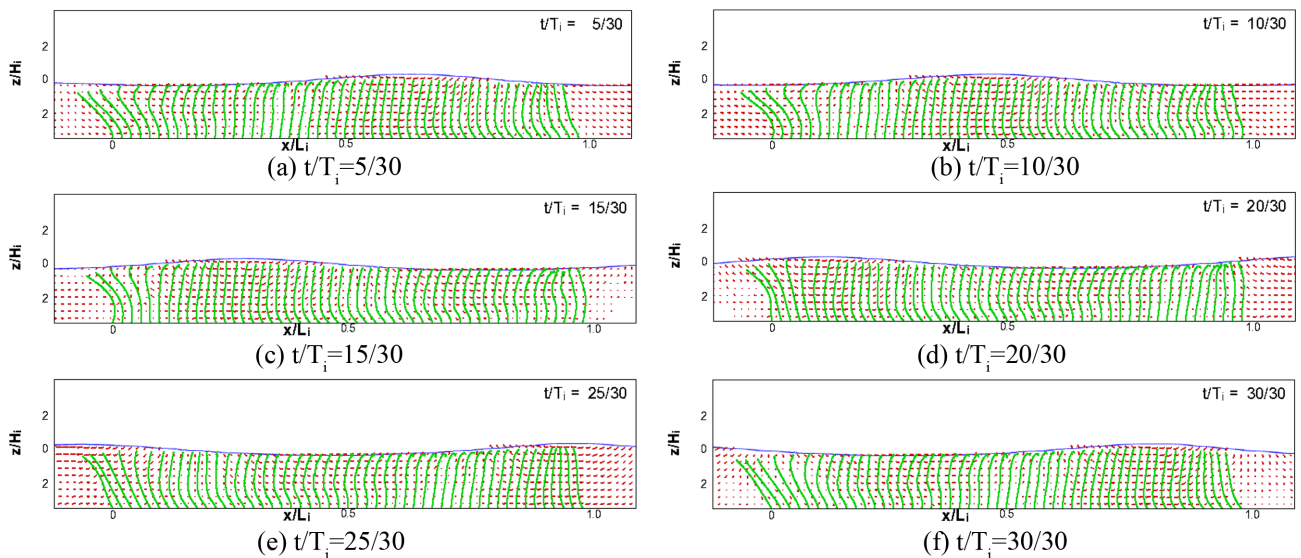


Fig. 5. Spatial distribution for sway motion of vegetations under wave action (CASE2, $H_i = 5$ cm, $T_i = 1.5$ sec, $h_v = 25$ cm, $L_v = 200$ cm, $D_v = 4$ cm).

Fig. 5로부터 연성식생으로 이루어진 식생대를 통하여 파랑이 진행함에 따라 파랑의 위상에 맞추어서 식생대의 거동 특성도 달라지는 것을 확인할 수 있으며, 이로부터 개별요소법을 이용한 식생의 배열이 파랑의 작용에 잘 반응하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 5의 수치시뮬레이션 결과를 이용하여 식생대 중앙부에 있는 식생 상단의 운동궤적 특성을 입사파고(H_i) 및 입사주기(T_i)의 변화(CASE1 ~ CASE5)에 대하여 나타내고 있다. Fig. 6에서 검은색 네모(■)는 $H_i = 3$ cm, 빨간색 마름모(◆)는 $H_i = 5$ cm, 파란색 동그라미(●)는 $H_i = 7$ cm에 대한 식생의 운동궤적을 각각 나타내고 있으며, 입사주기(T_i) 1.5 sec, 식생대의 높이(h_v) 25 cm, 분포(L_v) 200 cm 및 간격(D_v) 4 cm의 경우를 나타낸다. 또한 하늘색 세모(▲)는 $T_i = 1.2$ sec, 검은색 네모(■)는 $T_i = 1.5$ sec, 연두색 별(★)은 $T_i = 1.8$ sec에 대한 식생의 운동궤적을 각각 의미하며, 입사파고(H_i) 5 cm, 식생대의 높이(h_v) 25 cm, 분포(L_v) 200 cm 및 간격(D_v) 4 cm의 경우이다.

Table 2. Numerical setup condition used for verification.

CASE	H_i (cm)	T_i (sec)	h_v (cm)	L_v (cm)	D_v (cm)	ρ_v
1	3					
2	5	1.5				
3	7		25			
4		1.2		200		
5		1.8			4	0.95
6			15			
7	5		20			
8		1.5		100		
9			25	150		
10				200	6	

Fig. 6으로부터 파고가 커질수록 식생의 상·하 운동궤적은 점점 커지며, 주기가 길어질수록 식생의 좌·우 운동궤적이 점점 커지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 식생의 운동특성은 식생대에 의한 파랑에너지 저감에 중요한 인자로서 작용할 뿐만 아니라 입사파랑의 변화와 밀접한 관계가 있으며 이에 대해서는 후술한다.

Fig. 7의 (a)는 입사파고(H_i)변화에 따른 식생대 주변의 파고분포를 입사파로 무차원한 것으로 검은색 네모(■)는 $H_i = 3$ cm, 빨간색 마름모(◆)는 $H_i = 5$ cm, 파란색 동그라미(●)는 $H_i = 7$ cm의 계산결과를 각각 나타내고 있으며, 입사주기(T_i) 1.5 sec, 식생대의 높이(h_v) 25 cm, 분포(L_v) 200 cm 및 간격(D_v) 4 cm의 경우이다. (b)는 입사주기(T_i)변화에 따른 식생대 주변의 파고분포를 입사파로 무차원한 것으로 하늘색 세모(▲)는 $T_i = 1.2$ sec, 빨간색 마름모(◆)는 $T_i = 1.5$ sec, 연두색 별(★)는 $T_i = 1.8$ sec의 계산결과를 각각 나타내고 있으며, 입사파고(H_i) 5 cm, 식생대의 높이(h_v) 25 cm, 분포(L_v) 200 cm 및 분포간격(D_v) 4 cm의 경우를 나타내고 있다.

Fig. 7로부터 식생대를 통과하는 파랑이 식생의 저항에 의

해 파고가 점점 작아지는 것을 확인할 수 있으며, 입사파고(H_i)의 변화에 따른 무차원 파고분포는 거의 비슷한 경향을 보이며, 입사파고(H_i)와 비교하여 약 13~14%로 파고가 감쇠한다. 입사주기(T_i)의 변화에 따른 무차원 파고분포는 주기가 짧을수록 미소하지만 더욱 많은 파랑에너지가 감소하는 경향을 보이며, 입사파고(H_i)와 비교하여 약 13~14%로 파고가 감쇠하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 식생대의 높이(h_v) 변화에 따른 식생대 주변의 파고분포를 입사파로 무차원한 것으로 파란색 삼각형(▲)은 $h_v = 15$ cm, 검은색 역삼각형(▼)은 $h_v = 20$ cm, 빨간색 마름모(◆)는 $h_v = 25$ cm의 계산결과를 각각 나타내고 있으며, 입사파고(H_i) 5 cm, 입사주기(T_i) 1.5 sec, 식생대의 분포(L_v) 200 cm, 간격(D_v) 4 cm의 경우이다. 여기서 수치시뮬레이션을 수행한 수심(h)은 25 cm이다.

Fig. 8로부터 식생대의 높이(h_v)가 정수면에 근접할수록, 즉 식생대 상부의 수심이 작아질수록 파랑에너지의 저감효과로 식생대의 배후에서 파고분포도가 작아지는 것을 확인할 수 있으며, 입사파고(H_i)와 비교하여 CASE6에서는 9%, CASE7에서는 10%, CASE2에서는 12%로 파고가 감쇠하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 식생대의 분포(L_v) 변화에 따른 식생대 주변의 파고분포를 입사파로 무차원한 것으로 검은색 네모(■)는 $L_v = 100$ cm, 파란색 동그라미(●)는 $L_v = 150$ cm, 빨간색 마름모(◆)는 $L_v = 200$ cm, 의 계산결과를 각각 나타내고 있으며, 입사파고(H_i) 5 cm, 입사주기(T_i) 1.5 sec, 식생대의 높이(h_v) 25 cm, 간격(D_v) 4 cm의 경우이다.

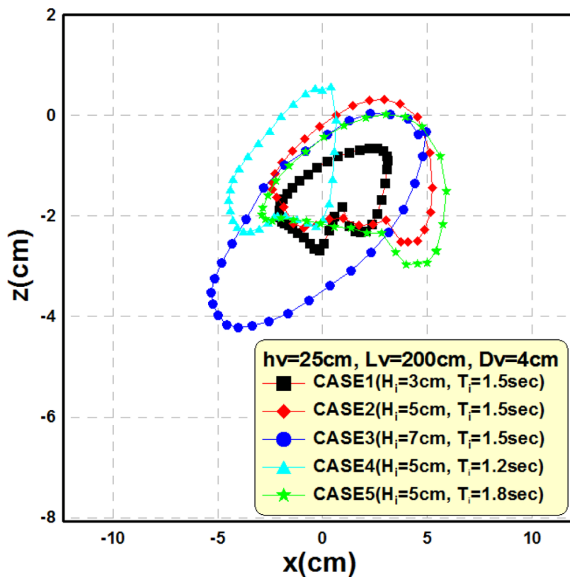


Fig. 6. Behavior of the upper tail end of vegetation(CASE1, CASE2, CASE3, CASE4, CASE5).

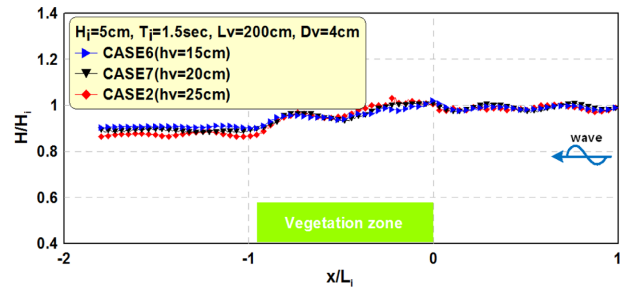
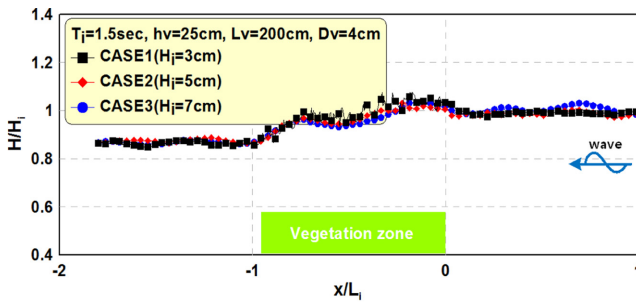
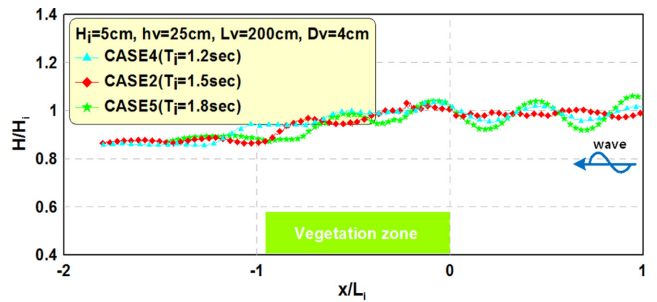


Fig. 8. Spatial distribution of non-dimensional wave heights due to the height of vegetation zone(CASE2, CASE6, CASE7).



(a) Variation of wave height



(b) Variation of wave period

Fig. 7. Spatial distribution of non-dimensional wave heights around vegetation zone(CASE1, CASE2, CASE3, CASE4, CASE5).

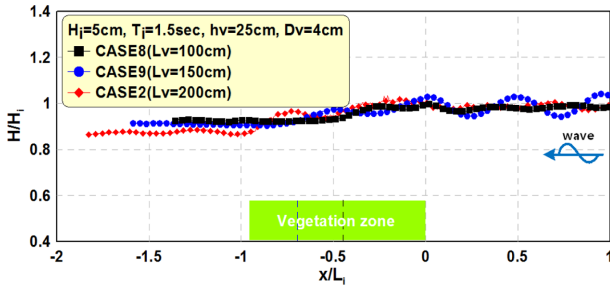


Fig. 9. Spatial distribution of non-dimensional wave heights due to the width of vegetation zone(CASE2, CASE8, CASE9).

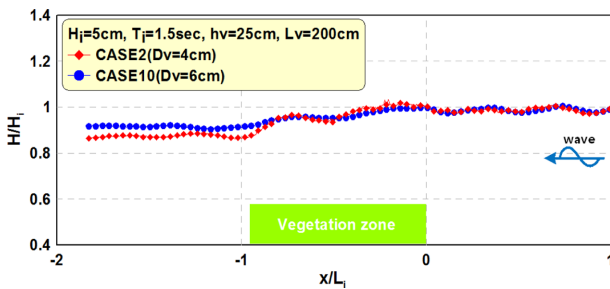


Fig. 10. Spatial distribution of non-dimensional wave heights due to the gap of each vegetation(CASE2, CASE10).

Fig. 9로부터 식생대의 분포(L_v)가 늘어날수록 파랑에너지의 저감효과로 식생대의 배후에서 파고분포도가 작아지는 것을 확인할 수 있으며, 입사파고(H_i)와 비교하여 CASE8에서는 8%, CASE9에서는 9%, CASE2에서는 12%로 파고가 감쇠하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 식생대의 간격(D_v) 변화에 따른 식생대 주변의 파고분포를 입사파로 무차원한 것으로 빨간색 마름모(\blacklozenge)는 $D_v = 4$ cm, 파란색 동그라미(\bullet)는 $D_v = 6$ cm의 계산결과를 각각 나타내고 있으며, 입사파고(H_i) 5 cm, 입사주기(T_i) 1.5 sec, 식생대의 높이(h_v) 25 cm, 분포(L_v) 200 cm의 경우이다.

Fig. 10으로부터 식생대의 간격(D_v)이 좁아질수록 파랑에너지의 저감효과로 식생대의 배후에서 파고분포도가 작아지는 것을 확인할 수 있으며, 입사파고(H_i)와 비교하여 CASE2에서는 12%, CASE10에서는 8%로 파고가 감쇠하는 것을 확인할 수 있다.

이상의 결과로부터 식생대의 파랑에너지 저감효과로는 입사파고(H_i)와 주기(T_i)변화에서는 미미하지만, 식생대의 높이(h_v)가 길어질수록, 식생대의 분포(L_v)가 늘어날수록, 간격(D_v)이 좁아질수록 효과적인 것을 식생의 거동특성을 고려한 양방향 연성해석기법으로 확인할 수 있다.

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 아직까지 수치해석에서 적용할 수 없었던 식생의 거동특성에 따른 파랑감쇠를 수치적으로 검토하기 위하여 식생대의 식생을 개별요소법(DEM)의 요소를 이용하여 재

현하며, 식생-파랑의 상호작용에 따른 에너지감쇠는 파동장모델(LES-WASS-2D)을 이용한다. 이러한 수치해석방법 간에 양방향 연성해석기법을 개발하여 식생대의 거동을 고려한 파랑감쇠특성을 검토하였다. 그리고 기존의 일방향 해석기법에서 새롭게 양방향 해석기법으로 개발한 연성 수치모델의 주요내용은 아래와 같다.

(1) 개발한 양방향 연성해석기법을 검증하기 위하여 식생대의 파랑감쇠특성에 따른 반투과율을 측정된 수리모형실험결과(Kim, 2008)와 비교·검토하여 타당성 및 유효성을 확인하였다.

(2) 검증된 양방향 연성해석기법을 이용하여 식생의 거동특성을 수치적으로 검토하였으며, 기존의 투과성매체로 적용하는 방식에서 탈피한 획기적인 수치해석방법으로 판단된다.

(3) 식생대의 파랑감쇠 특성은 입사파고(H_i)와 주기(T_i)변화에서는 미미하지만, 식생대의 체원에 따라 식생대의 높이(h_v)가 길어질수록 약 3%, 식생대의 분포(L_v)가 늘어날수록 약 4%, 간격(D_v)이 좁아질수록 약 4% 효과적인 것을 확인하였다.

그동안 수치적으로 검토할 수 없었던 식생의 거동특성을 고려한 파랑감쇠특성을 개발한 양방향 연성해석기법을 이용하였으며, 향후 제한된 수리모형실험 조건에서가 아니라 다양한 실제현상을 대상으로 파랑감쇠특성을 검토할 예정이다. 또한 기존의 중력식구조물과의 상호작용 및 지형변동특성을 적용하여 활용성이 우수한 연성 수치모델로 구축해 나갈 생각이다.

감사의 글

이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2016R1A2B4015419).

References

- Asano, T., Deguchi, H. and Kobayashi, N. (1992). Interactions between water waves and vegetation. Proc. 23rd Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE, 2710-2723.
- Augustin, L.N., Irish, J.L. and Lynett, P. (2009). Laboratory and numerical studies of wave damping by emergent and near-emergent wetland vegetation. Coastal Eng., 56, 332-340.
- Cundall, P.A. and Strack O.D.L. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies, Geotechnique, 29(1), 47-65.
- Ergun, S. (1952). Fluid flow through packed columns. Chemical Eng. 48(2), 89-94.
- Harada, E., Gotoh, H., Sakai, T. and Couda, K. (2007). Numerical simulation for subsidence process of wave dissipating blocks using 3D-DEM. Proc. of Coastal Eng., JSCE, 54, 921-925.
- Hur, D.S. and 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, KSCE, 28(2B), 249-259(in Korean).

- Hur, D.S. and Jeon, H.S. (2011). Development of numerical model for scour analysis under wave loads in front of an impermeable submerged breakwater. *Journal of Korean Society of Civil Engineers, KSCE*, 31(5B), 483-489(in Korean).
- Kobayashi, N., Andrew, W.R. and Asano, T. (1993). Wave attenuation by vegetation. *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE*, 119, 30-48.
- Kim, W.K. (2008). An experimental study for wave energy attenuation by vegetation density, Ph.D. Thesis, Gyeongsang National University.
- Lara, J.L., Maza, M., Ondiviela, B., Trinogga, J., Losada, I.J., Bouma, T.J. and Gordejuela, N. (2016). Large-scale 3-D experiments of wave and current interaction with real vegetation. Part 1: Guidelines for physical modeling. *Coastal Eng.*, 107, 70-83.
- Lee, S.D. (2006). Numerical analysis for wave propagation with vegetated coastal area. *J. Ocean Eng. and tech.*, 20, 63-68(in Korean).
- Lee, S.D. (2007). Numerical analysis for wave propagation and sediment transport with coastal vegetation. *J. Ocean Eng. and tech.*, 21, 18-24(in Korean).
- Lee, S.D. (2008). Wave attenuation due to waver-front vegetation. *J. Navi. and Port Res.* 21, 18-24(in Korean).
- Lee, S.D., Park, J.C. and Hong, C.B. (2009). Hydraulic experiment on the effects of beach erosion prevention with flexible coastal vegetation. *J. Ocean Eng. and tech.*, 23, 31-37(in Korean).
- Lee, S.D., Kim, S.D. and Kim, I.H. (2012). Reduction effect for deposition in navigation channel with vegetation model. *J. Navi. and Port Res.*, 36, 659-664 (in Korean).
- Liu, S. and Masliyah, J. H. (1999). Non-linear flows porous media. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 86, 229-252.
- Maza, M., Lara, J.L. and Losada, I.J. (2015). Tsunami wave interaction with mangrove forests: A 3-D numerical approach. *Coastal Eng.*, 98, 33-54.
- Sakakiyama, T. and Kajima, R. (1992). Numerical simulation of nonlinear wave interacting with permeable breakwater. *Proc. 23rd Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE, Venice*, 1517-1530.
- Tang, J., Shen, S. and Wang, H. (2015). Numerical model for coastal wave propagation through mild slope zone in the presence of rigid vegetation, *Coastal Eng.*, 97, 53-59.
- van Gent, M.R.A. (1995). Wave interaction with permeable coastal structures, Ph.D. Thesis, Delft University The Netherlands.
- Wu, W. C., and Cox, D. T. (2015). Effects of wave steepness and relative water depth on wave attenuation by emergent vegetation. *Estuarine Coastal Shelf Sci.*, 164, 443-450.

Received 11 August, 2016

Revised 22 August, 2016

Accepted 24 August, 2016