한국해양공학회지 제31권 제2호, pp 121-129, 2017년 4월 / ISSN(print) 1225-0767 / ISSN(online) 2287-6715

Original Research Article

Journal of Ocean Engineering and Technology 31(2), 121-129 April, 2017
https://doi.org/10.5574/KSOE.2017.31.2.121

Effects of Tsunami Waveform on Energy Dissipation of Aquatic Vegetation

Woo-Dong Lee[*], Jong-Ryul Park[**], Ho-Seong Jeon[***] and Dong-Soo Hur[*****]

[*]*Institute of Marine Industry, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea*
[**]*Earthquake Hazard Research Division, National Disaster Management Research Institute, Ulsan, Korea*
[***]*Hydro Science and Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, Korea*
[****]*Department of Ocean Civil Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea*

쓰나미 파형이 수중식생의 에너지소산에 미치는 영향

이우동[*] · 박종률[**] · 전호성[***] · 허동수[****]

[*]국립경상대학교 해양산업연구소
[**]국립재난안전연구원 지진대책연구실
[***]한국건설기술연구원 수자원 하천연구소
[****]국립경상대학교 해양토목공학과

KEY WORDS: Tsunami-vegetation interaction 쓰나미-식생 상호작용, Vegetation drag 식생항력, Tsunami waveform 쓰나미 파형, Wave energy dissipation 파랑에너지감쇠, Navier-Stoeks solver 나비어-스톡스 방정식 모델

ABSTRACT: *The present study numerically investigated the influence of the waveform distribution on the tsunami-vegetation interaction using a non-reflected wave generation system for various tsunami waveforms in a two-dimensional numerical wave tank. First, it was possible to determine the wave attenuation mechanism due to the tsunami-vegetation interaction from the spatial waveform, flow field, vorticity field, and wave height distribution. The combination of fluid resistance in the vegetation and a large gap and creates a vortex according to the flow velocity difference in and out of the vegetation zone. Thus, the energy of a tsunami was increasingly reduced, resulting in a gradual reduction in wave height. Compared to existing approximation theories, the double volumetric ratio of the waveform increased the reflection coefficient of the tsunami-vegetation interaction by 34%, while decreasing the transfer coefficient and energy attenuation coefficient by 25% and 13%, respectively. Therefore, the hydraulic characteristics of a tsunami is highly likely to be underestimated if the solitary wave of the approximation theory is applied for the tsunami.*

1. 서 론

쓰나미는 주로 해저지진에 의해 발생하지만, 해저경사면 붕괴, 해저화산 분출, 운석 충돌, 빙하 붕괴, 해안절벽 붕괴 등에 의해서도 발생한다. 일반적인 쓰나미는 급작스러운 해저면의 융기 또는 침강에 기인한 위치에너지가 중력에 의해 운동에너지로 전환되면서 매우 빠른 속도로 전파된다. 따라서 예측이 어려울 뿐만 아니라, 발생을 인지하더라도 전파속도가 엄청남으로 대피하기 매우 어렵다. 이에 쓰나미의 피해경험이 있는 일본에서는 중량과 부피가 어마한 방파제와 호안이 건설되었다. Arikawa et al.(2012)에 따르면, 이와테현 카마이시만 지역에 설치된 대형 방파제로 인하여 2011년 동일본 대지진 때의 쓰나미 피해가 경감되었다. 그러나 쓰나미를 대비한 중력식 구조물들은 건설비용이 막대할 뿐만 아니라, 자연경관을 해치는 경우가 많다. 또한 설치되는 중력식 구조물의 규모가 커기 때문에 침식과 같은 예기치 못한 문제들을 야기 시킬 우려가 높다.

최근 해안공학분야에서는 연안방재의 목적으로 연안식생에 대한 관심이 고조되고 있으며, 중력식 구조물에 비해 친환경/친자연적인 공법으로 평가받고 있다. 그리고 식생은 중력식 구조물에 비해 저렴할 뿐만 아니라, 별도의 장소에서 증식하여 이식할 수도 있다. 이런 이유에서 미국을 비롯한 일부 연안선진국에서는 연안방재의 목적으로 식생을 이식하는 단계까지 접어들었다. 그러나 우리나라에서는 일부의 연구자들이 식생에 관심을 가지고 있을 뿐, 심도 깊은 연구가 진행되고 있지 않다.

국외에서는 수리실험을 통하여 파랑-식생 상호작용에서 의한 식생항력을 조사하고, 이것을 모델링하여 수치모의에 이용하고

Received 25 January 2017, revised 10 March 2017, accepted 20 April 2017
Corresponding author Dong-Soo Hur: +82-55-641-3150, dshur@gnu.ac.kr

ⓒ 2017, 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/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

있다. 실험적 연구로서는 연성식생(Kobayashi et al., 1993; Blackmar et al., 2014) 그리고 강성식생(Sugahara and Nagai, 1994; Wu and Cox, 2015) 그리고 실제와 유사한 식생(Maza et al., 2015b; Lara et al., 2016)을 적용한 수조에서 파랑감쇠, 식생항력, 유속분포 등을 측정하였다. 그리고 실험결과에 기초하여 식생항력계수가 제안되었다(Dubi and Torum, 1994; Anderson et al., 2011). 나아가 수치모델에 식생항력특성을 도입하여 식생에 의한 파동장 및 유동장 변화를 분석하였다(Asano et al., 1992; Augustin et al., 2009; Iimura and Tanaka, 2012; Ma et al., 2013). 대표적인 수치모델로서는 2008년 Deltares에서 Mendez and Losada(2004)의 식생에 의한 에너지감쇠항을 적용하여 SWAN-VEG를 개발하였다. Suzuki(2011)는 식생항력계수를 VOF(Volume of fluid)법 기반의 CADMAS-SURF/3D에 도입하여 수치모델을 개량하였다.

쓰나미-식생 상호간섭에 관한 연구들로서는 Huang et al.(2011)은 수리실험을 진행함과 동시에 Boussinesq모델에 Tanino and Nepf(2008)이 원주구조물을 대상으로 제안한 항력계수를 적용하여 식생에 의한 쓰나미 감쇠현상을 잘 재현하였다. 그리고 Maza et al.(2015a)은 OpenFOAM®을 활용하여 Huang et al.(2011)의 수리실험에서 배치한 개개의 식생줄기를 직접 모델링하여 높은 정확도로 실험결과를 모의하였다. 한편 개개의 식생을 직접 모델링하기에는 계산부하가 매우 크고, 실험실 규모를 벗어날 경우에는 요구되는 계산격자수가 엄청나다. 이것을 극복하기 위하여 Park et al.(2017)은 식생대를 하나의 매체로 가정한 2차원 N-S(Navier-Stokes)방정식에 기초한 수치파동수조를 개발하였다. 또한 Lee et al.(2017)은 식생매체의 3차원적 배치에 따른 파랑 및 흐름제어를 수치적으로 고찰하였다.

아직 식생에 관한 국내연구는 활발하게 진행되고 있지 않지만, 일부에서 꾸준히 연구결과가 보고되고 있다. 실험적 연구들은 Kim(2008)이 식생의 횡밀도에 따른 파랑감쇠, Lee et al.(2009)이 식생의 침식방지효과, Lee et al.(2012)이 인공식생의 항로매몰 저감효과에 관한 2차원 수리실험을 수행하였다. 그리고 수치적인 연구들은 연직적분모델을 이용하여 Yang(2008)이 수변식생에 의한 파랑변형, Lee(2007)가 식생대의 표사이동을 모의하였다. 단면 2차원 CADMAS-SURF모형을 활용하여 해안림의 파랑감쇠특성을 분석하였다(Lee and Kim, 2014). Lee(2016)는 식생대의 파랑감쇠에 관한 수리실험을 진행함과 더불어 Asano (2006)의 평면모델을 이용하여 파고감쇠현상을 모사하였다. Lee and Hur(2016)은 Huang et al.(2011)의 수리실험결과와의 비교・분석을 토대로 쓰나미-식생 상호작용에 의한 에너지소산을 직접 모의할 수 있는 3차원 수치파동수조를 개발하였다.

한편 수리/수치실험들에서는 쓰나미를 조파하기 위하여 고립파 근사이론들이 주로 이용되고 있다. 그러나 고립파의 근사파형은 실제 내습한 쓰나미에 비해 매우 좁다(Qu et al., 2017). 그러므로 수리실험에서 쓰나미를 재현하기 위하여 조파기의 스트로크와 이동속도를 조절(Park et al., 2013), 붕괴파(Nouri et al., 2010; Liu et al., 2014) 그리고 압축공기에 의한 조파방법(Rossetto et al., 2011)을 이용하기도 한다. 그런데 반해 수치모의에서 근사이론이 뒷받침 되지 않으면, 안정적인 고립파형의 쓰나미를 생성하는 것이 매우 힘들다. 이에 Lee et al.(2016)은 기존 고립파 근사이론(Grimshaw, 1971; Fenton, 1972; Goring, 1978; Dean and Dalrymple, 1984)에 기초하여 다양한 고립파형 쓰나미를 수리/수치파동수조에서 안정적으로 조파할 수 있는 방법을 제안하였다.

본 연구에서는 쓰나미 파형에 따른 식생의 에너지소산을 수치적으로 검토하기 위하여 Lee et al.(2016)이 제안한 조파방법을 Park et al.(2017)의 2차원 수치파동수조에 적용하여 쓰나미 파형에 따른 식생의 에너지소산을 모의한다. 쓰나미-식생 상호작용에 의한 파고감쇠 현상을 이해하기 위해 파형분포, 유동장, 와동장, 파고분포를 우선적으로 고찰한다. 그리고 파형분포에 따른 쓰나미의 반사, 투과, 에너지감쇠특성을 정량적으로 분석하여 파형이 에너지소산에 미치는 영향에 대해 논의한다.

2. 수치모델

본 연구에서는 쓰나미-색생 비선형 상호작용에 의한 에너지소산을 직접 고려할 수 있는 Park et al.(2017)이 제안한 2-D NWT (Numerical wave tank)를 이용한다. 이 수치모델은 PBM(Porous body model)과 VOF을 토대로 한 강비선형 N-S solver이며, 식생에 의한 고립파의 반사, 전달, 에너지감쇠를 추정에 활용되었다. 그리고 Huang et al.(2011)의 실험과의 비교・검증을 통하여 타당성과 유효성이 확인되었다. 또한 그리고 다양한 고립파형의 쓰나미를 조파하기 위하여 Lee et al.(2016)이 제안한 조파방법을 Park et al.(2017)의 NWT에 적용한다.

2.1 지배방정식

비압축성・점성유체에서 파랑과 흐름을 무반사로 생성할 수 있는 시스템이 포함된 연속방정식 (1)과 식생에 의한 유체저항을 도입한 수정된 N-S 운동량 방정식 (2)로 구성되어 있다.

$$\frac{\partial(\gamma_i v_i)}{\partial x_i} = q^* \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\gamma_v v_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma_i v_i v_j)}{\partial x_j} = -\frac{\gamma_v}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial(\gamma_i \nu_T D_{ij})}{\partial x_j} + S_i - Q_i - R_i - \gamma_v g_i - E_i \tag{2}$$

여기서 v_i는 x, z방향의 유속, q^*는 소스의 유량밀도, γ_v는 체적공극률, γ_i는 x, z방향의 면적 공극률, t는 시간, ρ는 유체 밀도, p는 압력, ν_T는 유체의 동점성계수(ν)와 와동점성계수(ν_t)의 합, D_{ij}는 변형률속도텐서, S_i는 CSF(Continuum surface force)모델에 기초한 표면장력항(Brackbill et al., 1992), Q_i는 파랑 또는 흐름의 소스항, R_i는 식생에 의한 유체저항항, g_i는 중력가속도항, E_i는 부가감쇠영역의 에너지 감쇠항이다.

연속방정식 (1)에 비압축성 유체에 대한 가정과 PBM에 기초한 VOF함수를 적용하면, 식 (3)과 같이 유체 보존형식으로 나타낼 수 있다.

$$\gamma_v \frac{\partial F}{\partial t} + \gamma_i \frac{\partial v_i F}{\partial x_i} = F q^* \tag{3}$$

여기서 F는 각 계산격자에서 유체가 차지하고 있는 체적비이다.

2.2 식생항력

식생에 의한 유체저항(R_i)은 식 (4)와 같고, 항력저항과 관성력저항으로 구분된다.

$$R_i = \frac{1}{2} C_D \phi v_i \sqrt{v_i + v_j} + C_M (1-\gamma_v)\left(\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_i \frac{\partial v_i}{\partial x_i} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j}\right) \quad (4)$$

여기서 ϕ는 식생밀도이다. C_D는 항력계수이며, Chen and Nguyen (2011)의 제안식 (5)로부터 산정된다. 관성력계수 C_M은 Sakakiyama and Kajima(1992)가 제안한 1.5를 적용한다.

$$C_D = \frac{50}{Re^{0.43}} + 0.7\left\{1 - \exp\left(\frac{Re}{15000}\right)\right\} \quad (5)$$

여기서 Re는 Reynolds수($= \frac{v_i d}{\nu}$; d는 식생의 특성길이)이다.

2.3 쓰나미 조파

Brorsen and Larsen(1987)이 제안한 무반사 소스는 계산영역의 양쪽방향(x의 ±방향)으로 파랑이 전달됨으로 식 (6)과 같이 생성강도 q를 가진다. 그리고 입사파랑과 반사파랑이 중첩될 경우, 목표파형을 정밀하게 생성하기가 어렵다. 그러므로 Ohyama and Nadaoka(1991)가 제안한 강도($(\eta+h)/(\eta_s+h)$)을 적용하여 안정적인 파랑 및 흐름을 생성한다.

$$q = 2U\frac{\eta + h}{\eta_s + h} \quad (6)$$

여기서 U는 파랑근사이론에 의한 수평유속성분, 파랑과 흐름의 생성지점에서 ±양쪽으로 전달되기 때문에 상수 2가 적용된다. η와 η_s는 생성지점의 근사 수면변위 그리고 실제 수면변위를 각각 나타낸다.

NWT는 엇갈림 격자체계 시스템으로 구축되어 있기 때문에 식 (7)과 같이 조파지점의 격자크기(Δx_s)에 따른 강도(q)의 영향을 없애기 위하여 유량밀도 q^*를 적용한다.

$$q^* = \begin{cases} q(y,z,t)/\Delta x_s & : \ x = x_s \\ 0 & : \ x \neq x_s \end{cases} \quad (7)$$

Lee et al.(2016)는 기존 근사이론들을 토대로 다양한 고립파형의 쓰나미를 조파하기 위하여 분포계수와 가상수심계수를 제안하였다. 본 연구의 NWT에서는 쓰나미를 생성하기 위하여 Dean and Dalrymple(1984)의 고립파 근사이론을 토대로 개량한 다음의 파형 근사식 (8)과 유속 근사식 (9)를 이용한다.

$$\eta = H_i \mathrm{sech}^2\left[\sqrt{\frac{3}{4}\frac{H_i}{(\beta h)^3}}(x_s - Ct)\right] \quad (8)$$

$$U = \left[\lambda\left\{\epsilon + 3\epsilon^2\left(\frac{1}{6} - \frac{\bar{z}_h^2}{2}\right)\right\} - \lambda^2\epsilon^2\left(\frac{7}{4} - \frac{9\bar{z}_h^2}{4}\right)\right] \quad (9)$$

여기서 β는 가상수심계수, H_i는 입사파고, h는 수심, C는 Dean and Dalrymple(1984)가 제안한 파속($= \sqrt{gh}(1 + H_i/2h)$), λ는 식 (8)로부터 근사된 수면변위와 입사파고와의 비($= \eta/H_i$), ϵ는 입사파고와 수심과의 비($= H_i/h$), z_h는 수립자의 연직거리와 수심과의 비($= \bar{z}/h$; $\bar{z}$는 바닥으로부터 수립자의 연직거리)이다.

3. 수치시뮬레이션

3.1 수치파동수조 및 입사조건

쓰나미 파형분포에 따른 에너지감쇠특성을 분석하기 위하여 Fig. 1과 같은 2차원 수치파동수조를 구성한다. 해석영역의 파동장 교란을 방지하기 위하여 해석영역의 양쪽에 에너지 흡수층(Sponge layer)을 배치하고, 수치수조의 양쪽 경계에는 방사조건(Open boundary)을 고려한다. 수심(h) 25cm의 해석영역에는 폭(B) $1L_{eff}$, 높이 25cm의 식생대를 배치한다. 여기서 L_{eff}는 Dean and Dalrymple(1984)가 제안한 유효파장으로서 식 (11)과 같고, 파형체적의 95%에 해당한다.

Table 1 Incident tsunami conditions used in this study

Vegetation zone			Tsunami	
Width (B)	Hight (F_b/h)	Density (ϕ)	Hight (H_i/h)	Volume (V/V_0)
1	0	0.1	0.1, 0.2, 0.3	0.63-2

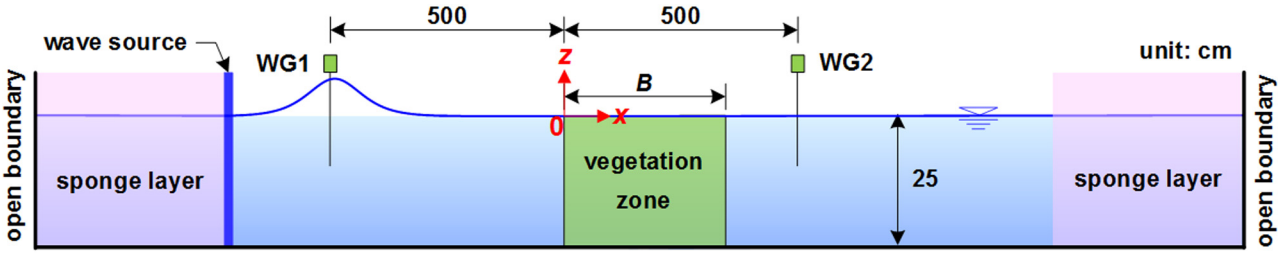


Fig. 1 Definition sketch of a numerical water tank including vegetation zone

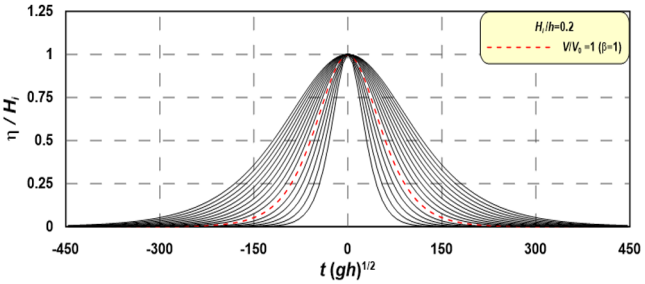


Fig. 2 Waveform characteristics of incident tsunami due to the virtual depth factor(β)

$$L_{eff} = \frac{4.24h}{\sqrt{H_i/h}} \tag{11}$$

쓰나미의 입사조건과 식생조건을 Table 1에 나타낸다. 여기서 F_b/h=0은 F_b=0cm로서 식생마루와 정수면이 같다. H_i/h는 입사파고와 수심과의 비이다. V/V_0는 기준파형에 대한 체적비를 나타내고, 가상수심계수(β)에 따른 파형분포는 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서 붉은색 점선은 β=1로서 Dean and Dalrymple(1984)의 근사파형과 같고, 쓰나미 파형의 체적변화에 대한 기준(V_0)이 된다. 여기서 기준파형(V_0) 대비 β>1은 넓은 파형, β<1은 좁은 파형을 각각 의미한다.

2차원 수치파동수조의 계산영역은 Fig. 1과 같고, 해석영역의 계산격자는 Δx=1cm, Δz=0.5cm로 등분할 한다. 초기 계산시간간격(Δt)은 1×10^{-3}초이고, 계산중에는 안정조건을 만족할 수 있도록 자동적으로 Δt가 조절된다.

3.2 식생에 의한 파고감쇠특성

식생에 의한 쓰나미 감쇠현상을 이해하기 위하여 Fig. 4에는 식생대 주변의 시·공간파형, Fig. 5에는 파봉이 식생대 중앙에 위치할 때의 유동장과 와동장을 각각 나타낸다. Fig. 4에서 각각의 공간파형은 0.25s 간격이다. Fig. 5에서 와도(ω_{xz})는 Raffel et al.(1998)와 Raffel et al.(2007)이 제안한 식 (12)-(16)를 이용하며, 와도계산의 개념은 Fig. 3과 같다. 여기서 빨간색 계열 와도는 양(+)의 값으로 반시계 방향, 파란색 계열 와도는 음(-)의 값으로 시계방향의 와도를 각각 표현한다.

$$\omega_{xz} = \frac{(\Omega_A + \Omega_B - \Omega_C - \Omega_D)}{4\Delta x \Delta z} \tag{12}$$

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

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

$$\Omega_C = \frac{1}{2}\Delta x(u_{i+1,k+1} + 2u_{i,k+1} + u_{i-1,k+1}) \tag{15}$$

$$\Omega_D = \frac{1}{2}\Delta z(w_{i-1,k+1} + 2w_{i-1,k} + w_{i-1,k-1}) \tag{16}$$

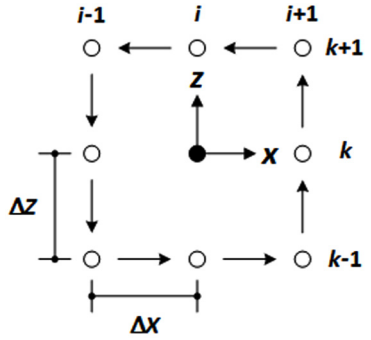


Fig. 3 Conceptual diagram of the circulation calculation for estimating vorticity at a point

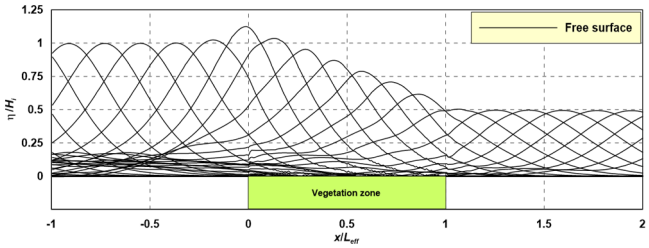


Fig. 4 Temporal and spatial distribution of free surface elevations by a tsunami around the vegetation zone for H_i/h = 0.2

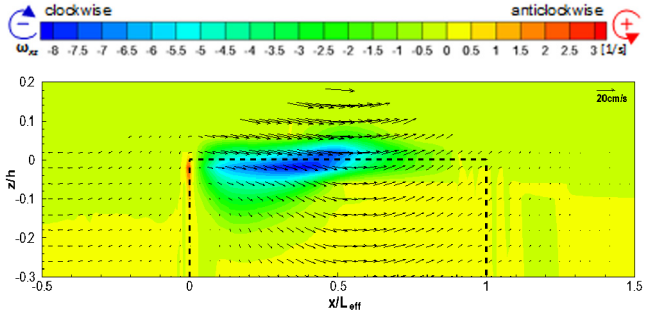


Fig. 5 Flow and vortex fields in the upper section of the vegetation zone for H_i/h = 0.2

Fig. 4로부터 식생항력으로 인하여 식생대 전면에서 파고 상승현상이 발생하나, 일반적인 투과성 구조물에 비해 매우 작다. 그리고 식생대 마루에는 쇄파와 같은 급작스러운 수면형 변화가 발생하지 않다. 이것은 잠제와 같은 투과성 구조물에 비해 공극률이 클 뿐만 아니라, 유체저항 강도가 약하기 때문으로 이해된다. 그 결과, 식생대를 통과하는 쓰나미의 파고가 서서히 감소하고, 식생대에 의한 파형변화가 크지 않음을 알 수 있다.

Fig. 4에서 논의한 파고감소현상은 식생의 유체저항과 함께 Fig. 5에 도시된 와동에 의한 에너지소산이 주요한 원인으로 판단된다. Fig. 5로부터 유체저항에 의해 식생대 내부의 유속이 감소함에 따라 마루 위와의 유속차이가 커지게 된다. 이 같은 수리현상은 식생대 마루 안팎의 시계방향 (-)와도를 발달시킨다. 이 와동과 식생항력은 식생대를 통과하는 쓰나미의 에너지를 소산시켜, 파고감쇠현상으로 나타나게 된다.

Fig. 6에서는 쓰나미의 입사파고와 수심과의 비(H_i/h)에 따른

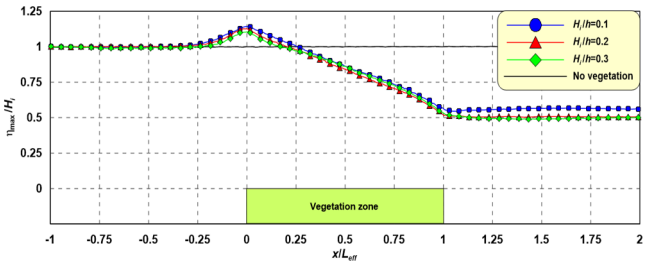


Fig. 6 Distribution of the tsunami heights around the vegetation zone due to H_i/h

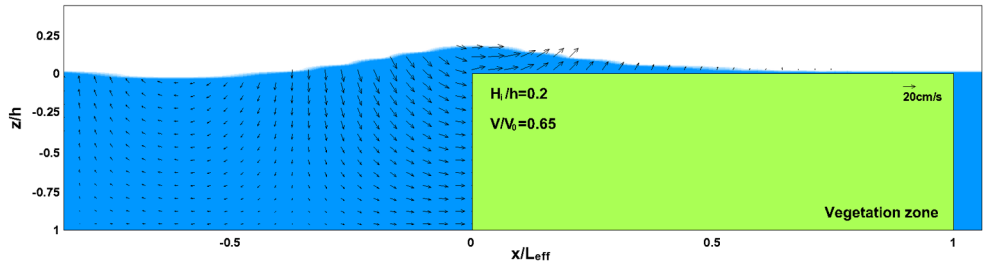
식생대 주변의 파고분포를 나타낸다. 여기서 파란색 원(●)은 H_i/h=0.1, 빨간색 삼각형(▲)은 H_i/h=0.2, 연두색 마름모(◆)는 H_i/h=0.2, 검정색 실선(—)은 식생이 존재하지 않는 H_i/h=0.2의 경우를 각각 나타낸다.

Fig. 4와 5에서 설명한 것과 같이 식생대 전면에서는 쓰나미의 파고가 조금 상승하고, 식생대를 통과하면서 파고가 서서히 줄어드는 현상을 재확인할 수 있다. 식생대 배후에서는 전달된 파고가 그대로 유지되면서 전파되는 것을 알 수 있다. 식생대 전면에서의 파고 증가현상은 H_i/h가 작을수록 크다. 이것은 H_i/h가 작을수록 상대적으로 유속이 작기 때문에 항력저항의 영향이 증가하여 발생하는 현상으로 판단된다. 수중 식생대의 배후로 전달되는 파고는 H_i/h가 클수록 작아지는 경향을 보이나, F_b/h=0의 식생조건에서는 H_i/h=0.2와 H_i/h=0.3의 차이는 크지 않다. 수면 밖으로 식생이 돌출된 Huang et al.(2011)의 실험결과에서는 H_i/h에 따른 파고전달이 뚜렷한 경향을 보이기도 한다.

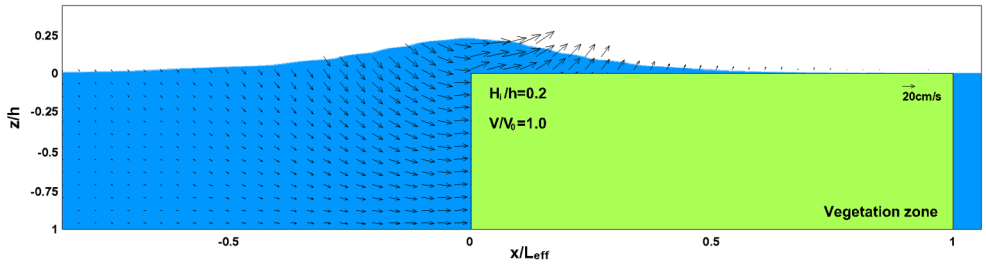
3.3 쓰나미 파형에 따른 파동장과 유동장

Fig. 7은 동일한 입사파고조건(H_i/h=0.2)에서 쓰나미 파형에 따른 식생대 주변의 파동장 및 유동장이며, (b)는 Dean and Dalrymple(1984)의 근사이론에 의한 고립파(V/V_0=1)가 내습하는 경우, (a)는 근사이론보다 좁은 파형(V/V_0=0.65), (b)는 넓은 파형(V/V_0=2)의 경우를 각각 나타낸다. 여기서 파동장과 유동장은 식생대의 외해측 지점($x/L_{eff}=0$)에서 가장 높은 수위가 나타나는 순간이다.

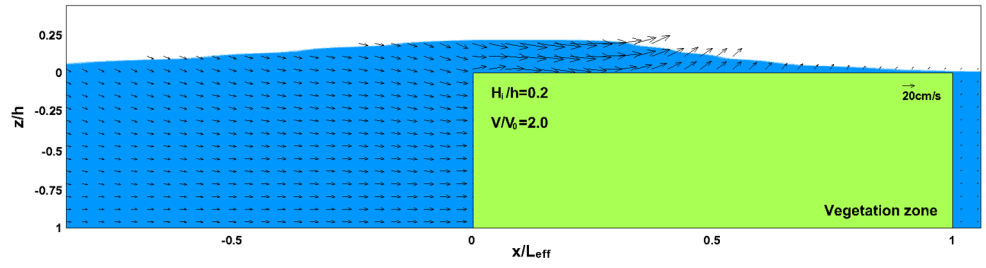
Fig. 7에서 V/V_0가 클수록 공간파형과 유속분포가 넓을 뿐만 아니라, 전체적인 유속이 크다. 전술한 것과 같이 유속이 클수록 식생항력의 영향이 줄어들게 된다. 또한 유속의 공간분포가 넓다는 것은 일방향 흐름의 지속시간이 길어지기 때문에 가속도가 작아진다. 그러므로 가속도가 지배적인 관성저항의 영향 역시 작아지게 된다. 따라서 V/V_0가 클수록 식생항력의 영향이 줄어들기 때문에 쓰나미의 에너지감쇠율이 작아질 것으로 판단되며, 이것에 대해 다음 단락에서 상세한 논의를 이어간다.



(a) V/V_0 = 0.65



(b) V/V_0 = 1

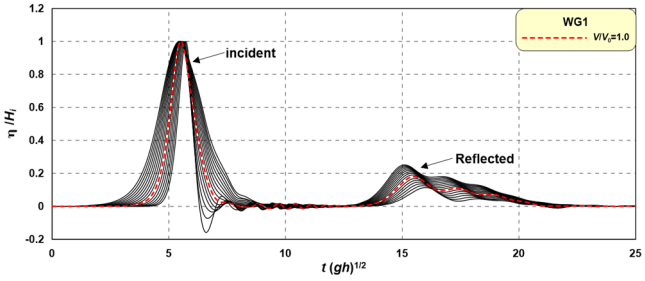


(c) V/V_0 = 2

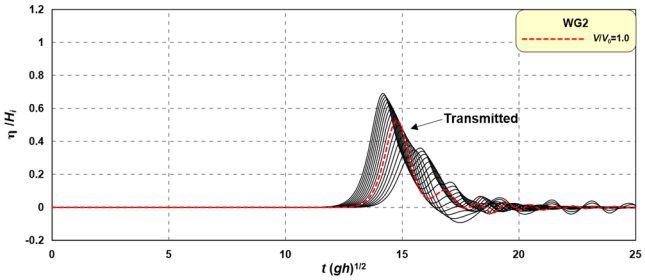
Fig. 7 Spatial distributions of wave and flow fields by a tsunami for H_i/h = 0.2

3.4 식생대 전후의 시간파형

Fig. 8은 대표적으로 H_i/h=0.3의 입사파고조건에서 쓰나미 파형에 따른 식생대 전후의 시간파형을 나타낸 그래프이다. Fig. 8에서 (a)는 x=-5m 지점(WG1)의 시간파형, (b)는 x=5m 지점(WG2)의 시간파형을 각각 나타낸다(Fig. 1 참조). 여기서 빨강색 점선은 Dean and Dalrymple(1984)의 근사이론(V/V_0=1)의 고립파형이다.



(a) WG1



(b) WG2

Fig. 8 Time-series of free surface elevation by a tsunami in the front and rear of vegetation zone for H_i/h = 0.3

Fig. 8(a)로부터 약 6초 부근에서 다양한 쓰나미의 입사파형을 확인할 수 있고, 약 15초 부근에서 식생에 의한 반사파형이 나타난다. 여기서 V/V_0가 클수록 반사파고가 증가하는 경향을 보이고, 주목되는 현상은 V/V_0가 클수록 반사파의 위상이 빨라지고, 파고가 높아진다. 이 현상은 V/V_0가 클수록 파장이 길어서 쓰나미-식생 상호간섭의 시점이 빨라지고, 간섭시간은 길어지기 때문이다. Fig. 8(b)로부터 V/V_0가 증가할수록 식생대 배후로 전달되는 쓰나미의 파고가 크고, 위상이 빠르다. 이것은 전술한 바와 같이 V/V_0가 클수록 식생에 의한 에너지소산이 작아서 전달파고가 커지고, 식생에 의한 유속감소가 작아서 위상이 빨라지는 것으로 이해된다. 이에 파형분포가 식생대를 통과하는 쓰나미의 반사, 전달, 에너지감쇠에 관한 정량적 분석을 다음 단락에서 진행하기로 한다.

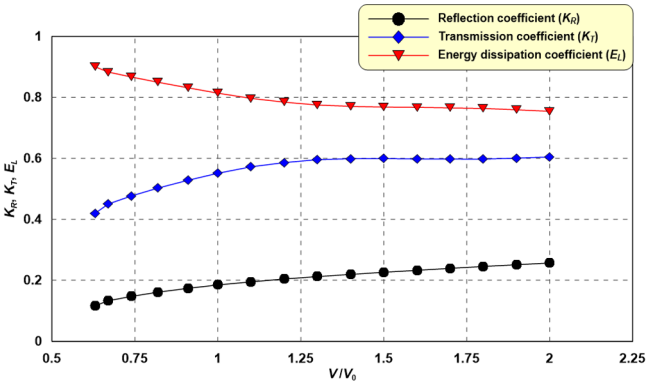
3.5 쓰나미의 반사, 전달, 에너지감쇠

Fig. 9는 Fig. 8에서 확인한 식생대 전후의 시간파형으로부터 입사파고(H_i), 반사파고(H_R), 전달파고(H_T)를 식 (17)-(19)에 대입하여 구해진 반사계수(K_R), 전달계수(K_T), 에너지감쇠계수(E_L)를 체적비(V/V_0)에 따라 나타낸 그래프이다. Fig. 9에서 (a)는 H_i/h=0.1, (b)는 H_i/h=0.2, (c)는 H_i/h=0.3의 경우를 각각 보여준다. 여기서 검정색 원(●)은 반사계수, 파란색 마름모(◆)는 투과계수, 빨간색 역삼각형(▼)은 에너지감쇠계수를 각각 의미한다.

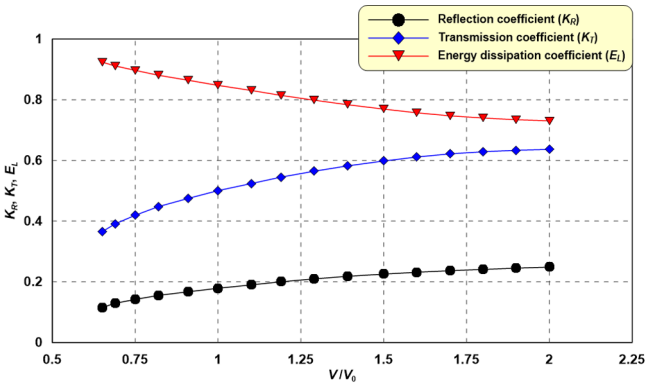
$$K_R = \frac{H_R}{H_i} \tag{17}$$

$$K_T = \frac{H_T}{H_i} \tag{18}$$

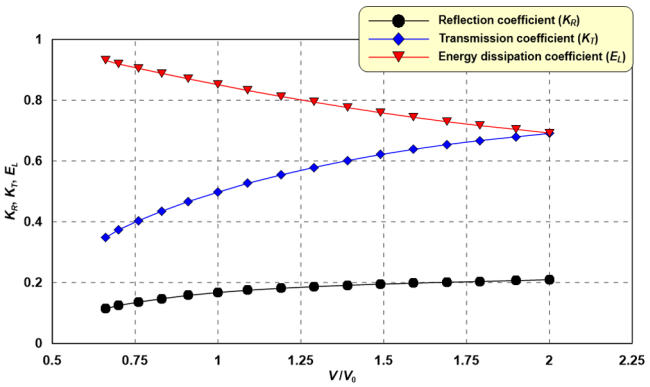
$$E_L = \sqrt{1 - K_R^2 - K_T^2} \tag{19}$$



(a) H_i/h = 0.1

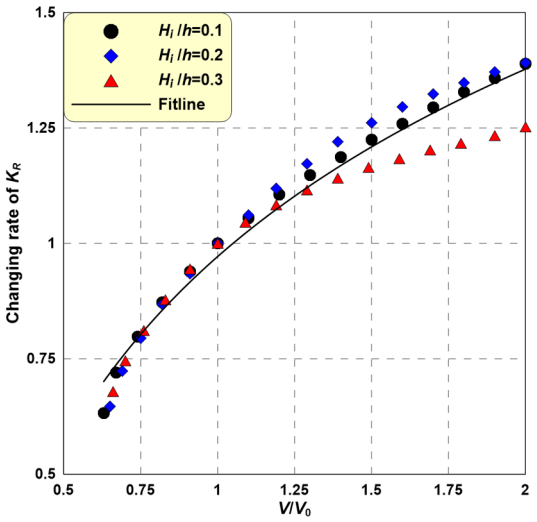


(b) H_i/h = 0.2

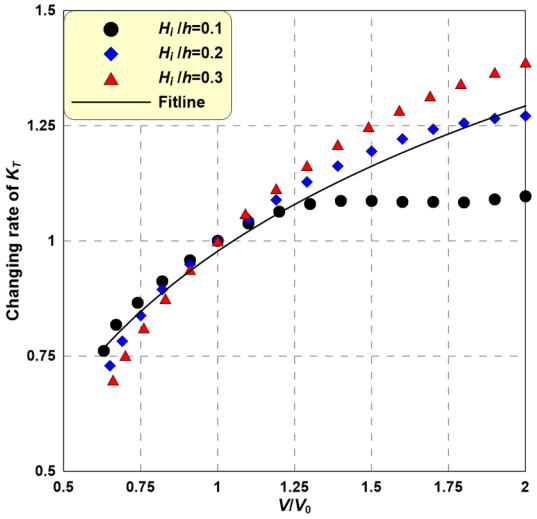


(c) H_i/h = 0.3

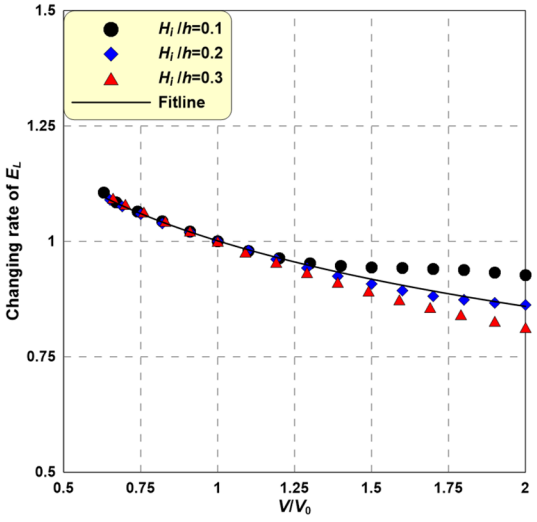
Fig. 9 Characteristics of the reflection, transmission, and energy dissipation coefficients due to the tsunami waveform



(a) Reflection coefficient



(b) Transmission coefficients



(c) Energy dissipation coefficient

Fig. 10 Changing rates of the reflection, transmission, and energy dissipation coefficients due to the tsunami waveform

Fig. 9로부터 V/V_0가 커질수록 식생항력의 영향이 줄어들기 때문에 쓰나미의 K_T는 크게 증가하고, E_L는 크게 감소한다. 그리고 쓰나미-식생 상호간섭 시간이 길어지짐으로 인하여 K_R은 소폭 증가함을 알 수 있다. 이 현상은 H_i/h가 증가할수록 V/V_0 변화에 따른 실질적인 쓰나미 체적변화가 크기 때문에 더욱 뚜렷한 경향을 나타낸다. Fig. 9(a) H_i/h=0.1에서는 V/V_0>1.25 경우에 K_T가 증가, E_L의 감소하는 경향이 크게 둔화된다. 이것은 전술한 H_i/h변화에 따른 실질적인 쓰나미의 체적변화와 관련이 있으며, H_i/h가 작을수록 V/V_0변화에 따른 체적변화량이 작기 때문이다. 분석결과를 종합하면, 쓰나미의 파형이 넓어질수록 (V/V_0가 커질수록) 이동하는 유체량이 증가함과 더불어 유속분포가 넓어짐으로 식생에 의한 유체저항의 영향이 줄어든다. 그 결과, V/V_0가 클수록 쓰나미의 K_T가 증가하고, E_L는 감소하는 경향을 나타낸다. 그리고 K_T는 V/V_0가 클수록 쓰나미-식생 상호간섭 지속시간이 길어짐으로 증가하는 경향을 나타낸다.

Fig. 10은 Fig. 9에서 논의되었던 V/V_0에 따른 쓰나미의 K_T, K_T, E_L의 변화율을 Dean and Dalrymple(1984)의 근사파형을 기준(V/V_0=1)으로 나타낸다. Fig. 10에서 (a)는 K_T의 변화율, (b)는 K_T의 변화율, (c)는 E_L의 변화율을 각각 나타낸다. 여기서 검정색 원(●)은 H_i/h=0.1, 파란색 마름모(◆)는 H_i/h=0.2, 빨간색 삼각형(▲)은 H_i/h=0.3의 결과를 각각 보여준다.

Fig. 10으로부터 파형분포(V/V_0)에 따른 식생대를 통과하는 쓰나미의 반사, 전달, 에너지감쇠특성을 이해할 수 있다. V/V_0가 증가할수록 K_T와 K_T는 증가, E_L은 감소하는 경향을 나타내며, 파형이 가장 넓은 V/V_0=2의 경우에는 V/V_0=1보다 평균 K_T는 0.06 증가, K_T는 0.13 증가, E_L는 0.11 감소한다. 그리고 근사이론 고립파형 대비 변화율을 살펴보면, 체적비가 2배인 경우(V/V_0=2)에는 K_T는 34% 증가, K_T는 25%, E_L는 13% 감소하는 것으로 나타났다.

이상의 수치결과에 근거하여 근사이론 고립파형보다 파형이 넓을 경우에는 식생에 의한 에너지감쇠효과가 작아짐으로 K_T가 증가하는 것으로 나타났다. 실제 피해가 발생한 쓰나미들은 고립파 근사파형보다 넓은 분포를 가지고 있기 때문에 수치모의에서 근사이론을 적용하여 쓰나미를 생성할 경우에 과소평가될 우려가 있다.

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 쓰나미 파형이 쓰나미-식생 상호작용에 의한 수리특성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Park et al.(2017)이 제안한 2차원 수치파동수조를 이용하였다. 쓰나미-식생 상호간섭에 따른 파형분포, 유동장, 와동장, 파고분포를 고찰하였고, 쓰나미의 반사, 투과, 에너지감쇠특성을 정량적으로 분석하였다. 이 수치해석과정에서 얻어진 주요한 사항들은 이하와 같다

(1) Lee et al.(2016)이 제안한 다양한 고립파형의 쓰나미 조파방법을 Park et al.(2017)의 2차원 수치파동수조에 도입하였다.

(2) 쓰나미-식생 상호작용에 의한 파고감쇠메커니즘을 이해할 수 있었으며, 급격한 수면변동이 발생하는 투과성 구조물과 달리 공극이 큰 식생대에서는 식생항력과 마루의 와동현상에 의

해 점진적인 파고감쇠가 발생하였다. 그로 인하여 식생대 배후의 쓰나미 파형은 크게 변화하지 않는 것을 확인할 수 있었다.

(3) V/V_0가 클수록 식생항력의 영향이 줄어들고, 쓰나미-식생 상호간섭의 지속시간이 길어짐으로 투과계수와 반사계수는 증가하였다. 그로인해 쓰나미의 에너지감쇠계수는 감소하는 것을 알 수 있었다.

(4) 근사이론 고립파형(V/V_0=1) 대비 V/V_0=2의 경우에서는 반사계수가 34% 증가, 전달계수가 25% 증가, 에너지감쇠계수가 13% 감소하였다.

이상의 수치결과에 근거하여 실제 발생한 쓰나미는 근사이론 고립파형보다 넓기 때문에 근사이론을 적용한 쓰나미 모의는 피해예측에 있어서 과소평가될 우려가 있다. 그러므로 쓰나미의 수리특성 분석에 고립파 근사이론을 적용하여 수치모의를 수행할 경우, Lee et al.(2016)과 같이 넓은 고립파형 쓰나미를 안정적으로 생성할 수 있는 조파방법을 적용하거나, 실제 발생한 쓰나미의 파형과 비교하여 체적비에 따른 가중치를 고려하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

후 기

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

References

Anderson, M.E., Smith, J.M., McKay, S.K., 2011. Wave Dissipation by Vegetation. U.S. Army Engineer Research and Development Center. ERDC/CHL CHETN-I-82, 22.

Arikawa, T., Sato, M., Shimosako, K.I., Tomita, T., Tatsumi, D., Yeom, G.S., Takahashi, K., 2012. Investigation of the Failure Mechanism of Kamaishi Breakwaters due to Tsunami; Initial Report Focusing on Hydraulic Characteristics. Technical Note of the Port and Airport Research Institute, Japan, 1251, 52.

Asano, T., Deguchi, H., Kobayashi, N., 1992. Interactions between Water Waves and Vegetation." Proceeding of the 23rd International Conference on Coastal Engineering, ASCE, 2710-2723.

Asano, T. 2006. Wave Attenuation and Sediment Deposition due to Coastal Vegetation, Journal of Global Environment Engineering, 11, 29-44.

Augustin, L.N., Irish, J.L., Lynett. P., 2009. Laboratory and Numerical Studies of Wave Damping by Emergent and Near-Emergent Wetland Vegetation. Coastal Engineering, 56, 332-340.

Blackmar, P., Cox, D., Wu, W. 2014. Laboratory Observations and Numerical Simulations of Wave Height Attenuation in Heterogeneous Vegetation. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, 140, 56-65.

Brackbill, J.U., Kothe, D.B., Zemach, C., 1992. A Continuum Model for Modeling Surface Tension. Journal of Computational Physics, 100, 335-354.

Brorsen, M., Larsen, J., 1987. Source Generation of Nonlinear Gravity Waves with the Boundary Integral Equation Method. Coastal Engineering, 11, 93-113.

Cheng, N., Nguyen, H., 2011. Hydraulic Radius for Evaluating Resistance Induced by Simulated Emergent Vegetation in Open-Channel Flows. Journal of Hydraulic Engineering, 137, 995-1004.

Dean, R.G., Dalrymple, R.A., 1984. Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 353.

Dubi, A., Torum, A., 1994. Wave Damping by Kelp Vegetation. Proceeding of th 24th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, 142-156.

Fenton, J., 1972. A Ninth-Order Solution for the Solitary Wave: Part2. Journal of Fluid Mechanics, 53, 257-271.

Goring, D.G., 1978. Tsunamis-The Propagation of Long Waves onto a Shelf. Report KH-R-38, California Institute of Technology, 314.

Grimshaw, R., 1971. The Solitary Wave in Water of Variable Depth: Part 2. Journal of Fluid Mechanics, 46, 611-622.

Huang, Z., Yao, Y. Sim, S.Y., Yao, Y., 2011. Interaction of Solitary Waves with Emergent, Rigid Vegetation. Ocean Engineering. 38, 1080-1088.

Iimura, K., Tanaka, N., 2012. Numerical Simulation Estimating the Effects of Tree Density Distribution in Coastal Forest on Tsunami Mitigation. Ocean Engineering, 54, 223-232.

Kim, W.G., 2008. An Experimental Study for Wave Energy Attenuation by Vegetation Density" Master's Thesis, Gyeongsang National University, 40.

Kobayashi, N., Raichle, A.W., Asano, T., 1993. Wave Attenuation by Vegetation. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, 119, 30-48.

Lara, J.L., Maza, M., Ondiviela, B., Trinogga, J., Losada, I.J., Bouma, T.J., Gordejuela, N., 2016. Large-Scale 3-D Experiments of Wave and Current Interaction with Real Vegetation. Part 1: Guidelines for Physical Modeling. Coastal Engineering, 107, 70-83.

Lee, S.D., 2007. Numerical Analysis for Wave Propagation and Sediment Transport with Coastal Vegetation. Journal of Ocean Engineering and Technology, 21, 18-24.

Lee, S.D., Kim, M.J., 2014. Effects of Disaster Prevention of a Coastal Forest Considering Wave Attenuation Ability. Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, 14, 381-388.

Lee, S.D., Kim, S.D., Kim, I.H., 2012. Reduction Effect for Deposition in Navigation Channel with Vegetation Model. Journal of Navigation and Port Research, 36, 659-664.

Lee, S.D., Park, J.C., Hong, C.B., 2009. Hydraulic experiment on the effects of beach erosion prevention with flexible coastal vegetation. Journal of Ocean Engineering and Technology, 23, 31-37.

Lee, S.D., 2016. Characteristics of Wave Attenuation with Coastal Wetland Vegetation. Journal of Wetlands Research, 18(1), 84-93.

Lee, W.D., Cox, D.T., Hur, D.S., 2017. A Numerical Model Study on the Wave and Current Control by Coastal Vegetation. Journal of Coastal Research, Special Issue, 79, 219-223.

Lee, W.D., Hur, D.S., 2016. Application of 3-D Numerical Wave Tank for Dynamic Analysis of Nonlinear Interaction between Tsunami and Vegetation. Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 36(5), 831-838.

Lee, W.D., Park, J,R., Jeon, H.S., Hur, D.S., 2016. A Study on Stable Generation of Tsunami in Hydraulic/Numerical Wave Tank. Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 36(5), 805-817(in Korean).

Liu, H., Sakashita, T., Sato, S., 2014. An Experimental Study on the Tsunami Boulder Movement. Proceedings of the 34th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, Seoul, Korea.

Ma, G., Kirby, J.T., Su, S.F., Figlus, J., Shi, F., 2013. Numerical Study of Turbulence and Wave Damping Induced by Vegetation Canopies. Coastal Engineering, 80, 68-78.

Maza, M., Lara, J.L., Losada, I.J., 2015a. Tsunami Wave Interaction with Mangrove Forests: A 3-D Numerical Approach. Coastal Engineering, 98, 33-54.

Maza, M., Lara, J.L., Losada, I.J., Ondiviela, B., Trinogga, J., Bouma, T.J., 2015b. Large-Scale 3-D Experiments of Wave and Current Interaction with Real Vegetation. Part 2: Experimental Analysis. Coastal Engineering, 106, 73-86.

Mendez, F.M., Losada, I.J., 2004. An Empirical Model to Estimate the Propagation of Random Breaking and Nonbreaking Waves over Vegetation Fields. Coastal Engineering, 51, 103-118.

Nouri, Y., Nistor, I., Palermo, D., 2010. Experimental Investigation of Tsunami Impact on Free Standing Structures. Coastal Engineering Journal, JSCE, 52(1), 43-70.

Ohyama, T., Nadaoka, K., 1991. Development of a Numerical Wave Tank for Analysis of Non-linear and Irregular Wave Field. Fluid Dynamics Research, 8, 231-251.

Park, H.S., Cox, T.D., Lynett, P.J., Wiebe, D.M., Shin, S.W., 2013. Tsunami Inundation Modeling in Constructed Environments: A Physical and Numerical Comparison of Free-Surface Elevation, Velocity, and Momentum Flux. Coastal Engineering, 79, 9-21.

Park, J.R., Jeon, H.S., Jeong, Y.M., Hur, D.S., 2017. Numerical Analysis on Energy Dissipation of Tsunami through Vegetation Zone. Journal of Coastal Research, Special Issue, 79, 194-198.

Qu, K., Ren, X.Y., Kraatz, S., 2017. Numerical Investigation of Tsunami-Like Wave Hydrodynamic Characteristics and Its Comparison with Solitary Wave. Applied Ocean Research, 63, 36-48.

Raffel, M., Willert, C.E., Kompenhans, J., 1998. Particle Image Velocimetry: A Practical Guide. Springer Verlag, Berlin, 253.

Raffel, M., Willert, C.E., Wereley, S.T., Kompenhans, J., 2007. Particle Image Velocimetry. Springer Verlag, Berlin, 448.

Rossetto, T., Allsop, W., Charvet, I., Robinson, D., 2011. Physical Modelling of Tsunami using a New Pneumatic Wave Generator." Coastal Engineering, 58, 517-527.

Sakakiyama, T., Kajima, R., 1992. Numerical Simulation of Nonlinear Wave Interacting with Permeable Breakwater. Proceeding of the 23rd International Conference Coastal Engineering, ASCE, 1517-1530.

Sugahara, K., Nagai, T., 1994. Hydraulic Model Experiment on the Artificial Seaweed against Scouring and Beach Erosion. Technical Note of the Port and Airport Research Institute(PARI), 771, 39(in Japanese).

Suzuki, T., 2011. Wave Dissipation over Vegetation Fields. Ph.D. Thesis, University of Technology Delft, the Nederlands, 175.

Tanino, Y., Nepf, H.M., 2008. Laboratory Investigation of Mean Drag in a Random Array of Rigid, Emergent Cylinders. Journal of Hydraulic Engineering, 134, 34-41.

Yang, J.Y., 2008. Wave Propagation with Vegetated Coastal Area. Master's Thesis, University of Ulsan, 45.

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.