

〈기술노트〉

# 쓰나미-식생 비선형 상호작용의 동적해석을 위한 3차원 수치파동수조의 적용

이우동\* · 허동수\*\*

Lee, Woo-Dong\*, Hur, Dong-Soo\*\*

## Application of 3-D Numerical Wave Tank for Dynamic Analysis of Nonlinear Interaction between Tsunami and Vegetation

### ABSTRACT

The disaster preventing system using vegetation has been growing in the field of coastal engineering in recent years. To analyze wave and flow fields under nonlinear interactions between tsunami and vegetation, the purpose of this study is to evaluate newly-developed 3-D numerical wave tank including energy dissipation by tsunami-vegetation interaction based on existing N-S solver with porous body model. Comparing numerical results using mean drag coefficient and dynamic drag coefficient due to Reynolds number to existing experimental results it is revealed that computed results considering the dynamic drag coefficient are in good agreement with the laboratory test results for time-domain waveform. In addition, the calculated transmission coefficients of solitary waves in various vegetation densities and incident wave heights are also in good agreement with the experimental values. This confirms the validity and effectiveness of the developed 3-D numerical wave tank with the fluid resistance by vegetation.

**Key words** : Tsunami-vegetation interaction, Fluid resistance, Vegetative drag, Solitary wave, 3-D numerical wave tank

### 초록

최근 해안공학분야에서 식생을 활용하는 연안방재시스템에 관한 관심이 증가하고 있다. 이에 본 연구에서는 쓰나미-식생 비선형 상호작용에 의한 파동장과 유동장을 해석하기 위하여 식생항력에 따른 에너지소산을 직접 해석할 수 있는 3차원 수치파동수조를 기존의 3-D N-S solver (LES-WASS-3D ver. 2.0, HYMO-WASS-3D)를 토대로 개발하였다. 그리고 기존의 실험결과와 비교 및 검토를 통한 수치파동수조의 적용성을 평가하였다. 그 결과 레이놀즈수에 따라 능동적으로 추정되는 항력계수를 고려한 경우가 평균 항력계수를 적용한 경우보다 실험에서 얻어진 각 지점의 시간파형을 잘 재현하였다. 또한 식생밀도 및 입사파고에 따라 계산된 고립파의 전달률이 실험의 측정값과 높은 일치도를 나타내었다. 이로써 본 연구에서 식생에 의한 항력으로서 동적항력계수를 적용한 3차원 수치파동수조의 타당성 및 유효성을 확인하였다.

**검색어** : 쓰나미-식생 상호작용, 유체저항, 식생항력, 항력계수, 고립파, 3차원 수치파동수조

## 1. 서론

현재 우리나라의 연안방재시스템은 중력식 구조물에 대한 의존도가 매우 높다. 특히 동계의 너울성 파랑에 의해 해안의 침식피해가 심각한 동해안을 중심으로 많은 해안구조물들이 설치되고 있으나, 막대한 비용이 소요됨으로 예산부족 등의 이유로 적재적소에 시공되는

\* 종신회원 · 국립경상대학교 해양산업연구소 선임연구원 (Gyeongsang National University · leewoodong@gnu.ac.kr)

\*\* 종신회원 · 교신저자 · 국립경상대학교 해양토목공학과 교수 (Corresponding Author · Gyeongsang National University · dshur@gnu.ac.kr)

Received May 18, 2016/ revised July 22, 2016/ accepted August 8, 2016

경우가 많지 않다. 그리고 중력식 구조물이 설치된 여러 지역에서 눈에 띄는 긍정적인 효과가 나타나고 있지만, 다른 일부에서는 인공구조물에 의한 예기치 않은 문제가 심심치 않게 언론에 보도되고 있는 것 또한 현실이다. 이와 같은 문제는 구조물의 계획, 설계, 시공 상의 오류일 수도 있으나, 이것을 모든 문제의 원인으로 규정하기에는 납득이 되지 않는 부분이 있다. 그러므로 중력식 구조물의 역기능을 조금씩 인지하고, 조금 유연한 방식의 접근이 필요한 시기라고 판단된다. 이에 기존의 중력식 구조물에 의존하는 연안방재시스템에서 탈피하여 친환경/친자연적인 식생을 활용한 연안방재기술 개발이 요구되고 있다. 식생은 중력식 구조물에 비해 매우 저렴할 뿐만 아니라, 다른 곳에서 식생을 증식하여 단기간에 연안피해 발생지역으로의 이식이 가능하여 빠른 시일에 성능을 발휘할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이러한 이유에서 미국을 비롯한 일부 연안선진국에서는 파랑 및 표사제어의 목적으로 실 해역에 식생을 이식하는 단계까지 접어들고 있다. 하지만 넓지 않은 국토에 3면이 바다인 우리나라에서는 극히 일부의 연구자들이 식생에 관심을 가지고 연구를 수행하고 있으나, 아직 미흡한 점이 많다.

식생을 활용한 파랑제어에 대한 연구는 크게 두 분류로 구분될 수 있다. 첫째는 실험을 통하여 식생특성에 따른 식생저항을 조사하는 것이며, 둘째는 실험을 통해 제안된 식생항력특성을 적용한 수치모의가 있다. 대표적인 연구로서는 연성식생(Kobayashi et al., 1993; Blackmar et al., 2014) 그리고 강성식생(Broome et al., 1992; Sugahara and Nagai, 1994; Wu and Cox, 2015a) 그리고 실제와 유사한 식생(Maza et al., 2015b; Lara et al., 2016)을 고려한 수리모형실험들이 수행되었다. 그리고 실험결과를 토대로 식생의 항력계수가 제안되었다(Dubi and Torum, 1994; Anderson et al., 2011). 또한 많은 연구자들이 이상의 식생항력특성을 적용한 수치모의를 통하여 식생에 의한 파동장 및 유동장 변화를 수치적으로 분석하였다(Asano et al., 1992; Asano et al., 2005; Augustin et al., 2009; Iimura and Tanaka, 2012; Ma et al., 2013). 여기에서 주목할 만한 수치모형은 2008년 Deltares에서 Mendez and Losada (2004)을 토대로 식생에 의한 에너지감쇠항을 적용하여 개발된 SWAN-VEG와 Suzuki (2011)가 새롭게 식생에 관한 항력계수를 적용한 3차원 VOF법 기반의 CADMAS-SURF/3D이다. 그리고 이와 같은 수치모형들이 채택하고 있는 식생항력에 의한 에너지감쇠 메커니즘은 반복적으로 작용하는 파랑에 특화되어 있다.

Huang et al. (2011)는 수리모형실험 그리고 Maza et al. (2015a)은 수치모의를 통하여 식생에 의한 쓰나미(고립파)의 파고 감쇠효과를 확인하였다. 쓰나미는 장주기파일 뿐만 아니라, 단파이기 때문에 식생에 의한 에너지소산의 메커니즘이 전술한 일반적인 풍파와 큰 차이를 보이며, 흐름-식생 상호작용에 의한 에너지소산 메커니즘

과 유사하다. 이에 Huang et al. (2011)는 Tanino and Nepf (2008)이 원주구조물을 대상으로 제안한 평균항력계수를 Boussinesq모델에 적용하여 높은 정확도로 쓰나미-식생 상호작용에 의한 파랑변형특성을 재현하기도 하였다. 또한 Maza et al. (2015a)는 OpenFOAM® 모델에서 Huang et al. (2011)의 실험조건을 고려하여 각각의 식생을 직접 모델링하여 우수한 검증결과를 나타내었다. 하지만 개개의 식생을 직접 모델링하기에는 계산부하가 매우 클 뿐만 아니라, 실험실 스케일을 벗어날 경우에는 엄청난 계산격자 수가 요구된다. 그러므로 사실상 현재의 계산능력으로는 실험을 대상으로 시뮬레이션하는 것은 불가능하다. 이 밖에 거의 대부분의 수치모델들은 식생을 하나의 덩어리로 보고, 식생대 내부에서 유체 저항에 의한 에너지 손실을 추정하는 방식을 채택하고 있다. 따라서 계산시간이 상대적으로 짧고, 넓은 영역을 고려한 수치모의가 가능해진다. 그러나 이 수치해석들에서 무엇보다 중요한 것은 식생항력을 정량적으로 평가하는 것이며, 그렇기 위해서는 정확한 항력계수를 적용해야 한다.

국내에서는 소수의 연구자들에 의해 식생에 관한 연구가 수행되고 있는 실정이다. Kim (2008)은 섬유 재질 식생의 횡밀도 변화에 따른 파랑감쇠효과, Lee et al. (2009)은 연성 식생의 해빈 침식방지 효과 그리고 Lee et al. (2012)은 인공식생의 항로매물 저감효과에 관한 2차원 수리모형실험을 수행하였다. 수치적인 연구로서 평면 2차원 수치모형을 이용하여 수변식생에 의한 파랑변형특성(Yang, 2008), 식생항력을 고려한 표사이동(Lee, 2008)에 관한 수치적인 분석을 수행하였다. 최근에는 단면 2차원 CADMAS-SURF모형을 활용한 해안림의 파랑감쇠에 관한 수치해석이 수행되었다(Lee and Kim, 2014). 그런데 이상의 연구들에서는 적용하는 수치모델들의 검증을 대부분 수행하지 않고, 수치모의를 진행하였다. 이에 국내에서도 식생에 관한 다양한 실험결과와 비교·검토를 통해 검증된 고정도의 수치모델 개발이 요구된다.

본 연구에서는 투과성 구조물에 의한 에너지소산을 직접 해석할 수 있으며, 다양한 검증을 통하여 타당성 및 유효성이 충분히 입증된 LES-WASS-3D ver. 2.0 (Lee and Hur, 2014a)과 HYMO-WASS-3D (Lee et al., 2014b)을 기반으로 쓰나미-식생 비선형 상호작용을 직접 해석할 수 있는 새로운 수치파동수조를 제안한다. 먼저 대표적인 두 가지 항력계수 산정식을 수치파동수조에 도입한다. 첫 번째는 쓰나미-식생 상호작용 해석에서 Huang et al. (2011)이 Boussinesq모델에 적용하여 검증한 Tanino and Nepf (2008)의 평균항력계수 산정식이다. 두 번째는 흐름-식생 상호작용에 관한 여러 실험결과들을 종합적으로 분석하여 레이놀즈수에 따른 식생 항력 특성을 나타내는 Chen and Nguyen (2011)의 동적 항력계수 산정식이다. 본 연구에서는 쓰나미-식생 상호작용에 관한 Huang et al. (2011)의 실험결과와 비교·분석하여 N-S solver에 적합한

항력계수의 산정방법에 대해 논의한다. 또한 다양한 식생밀도 및 고립과의 입사조건을 고려한 검증을 수행하여 새롭게 제안하는 3차원 수치과동수조의 타당성 및 유효성을 확인한다.

## 2. 수치과동수조

본 연구에서는 쓰나미생생 비선형 상호작용을 수치적으로 해석하기 위하여 기존 3차원 수치모델(LES-WASS-3D ver. 2.0, HYMO-WASS-3D)을 토대로 식생항력에 의한 에너지소산을 직접 고려할 수 있는 새로운 수치모델을 개발한다. LES-WASS-3D는 PBM (Porous Body Model)과 VOF법을 기반의 강비선형 3차원 N-S solver로서 주로 해안구조물 주변의 파랑장 및 유동장 해석에 활용되고 있으며, 다양한 검증을 통하여 타당성 및 유효성이 입증되었다.

### 2.1 지배방정식

지배방정식은 3차원 비압축성·점성유체에서 무반사로 파랑과 흐름을 생성할 수 있는 항이 포함된 연속방정식 Eq. (1)과 식생항력에 의한 에너지소산을 고려하여 수정된 Navier-Stokes 운동량 방정식 Eq. (2)로 구성된다.

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

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\gamma_i v_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma_i v_i v_j)}{\partial x_j} \\ &= -\frac{\gamma_v}{\rho_m} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial(\gamma_i \nu_T D_{ij})}{\partial x_j} + S_i - Q_i - R_i - \gamma_v g_i - E_i \quad (2) \end{aligned}$$

여기서,  $v_i$ 는  $x, y, z$ 방향의 유속,  $\dot{q}^*$ 는 조파소스의 유량밀도,  $\gamma_v$ 는 체적 공극률,  $\gamma_i$ 는  $x, y, z$ 방향의 면적 공극률,  $t$ 는 시간,  $\rho_m$ 는 수온과 염분에 따른 밀도,  $p$ 는 압력,  $\nu_T$ 는 등점성계수( $\nu$ )와 와동점성계수( $\nu_t$ )의 합이다.  $D_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)$ 는 변형률속도텐서,  $S_i$ 는 CSF (Continuum Surface Force) 모델(Brackbill et al., 1992)을 기반의 표면장력항,  $Q_i$ 는 파랑 및 흐름의 원천항,  $R_i$ 는 식생에 의한 유체저항항,  $g_i$ 는 중력가속도항,  $E_i$ 는 에너지감쇠항을 나타낸다.

VOF함수  $F$ 는 각 격자에서 유체가 차지하고 있는 체적비를 나타내며, 연속방정식 Eq. (1)에 고려하고 있는 비압축성 유체 및 식생체적을 적용하여 유체의 보존형식으로 나타내면 Eq. (3)과 같다.

$$\gamma_v \frac{\partial F}{\partial t} + \gamma_i v_i \frac{\partial F}{\partial x_i} = F \dot{q}^* \quad (3)$$

상세한 수치해석방법에 대해서는 Hur et al. (2012) 그리고 난류, 표면장력 모델 등에 대해서는 Lee and Hur (2014a)을 참조하기 바란다.

### 2.2 식생에 의한 유체저항

식생에 의한 유체저항( $R_i$ )은 Eq. (4)와 같으며, Eq. (5a)는 항력 저항 그리고 Eq. (5b)는 관성력저항을 각각 나타낸다.

$$R_i = a v_i |v_i| + b \frac{\partial v_i}{\partial t} \quad (4)$$

$$a = \frac{C_D(1-\gamma_i)}{2} \quad (5a)$$

$$b = \frac{1}{\gamma_v} \left\{ 1 + C_M \frac{(1-\gamma_i)}{\gamma_i} \right\} \quad (5b)$$

여기서,  $C_D$ 는 식생의 항력계수로서 Table 1과 같이 두 가지 조건을 고려한다. 그리고  $C_M$ 은 관성력계수로서 Sakakiyama and Kajima (1992)이 투과성 구조물에 대해 제안한 1.5를 적용한다.

Table 1은 식생에 의한 항력저항 Eq. (5a)에 대입되는 항력계수의 산정식들이며, 대표적으로 고정값을 사용하는 경우와 레이놀즈수에 따라 변동하는 경우를 각각 나타낸다. Cal. 1은 Tanino and Nepf (2008)이 원주구조물을 대상으로 한 실험에서 제안한 평균항력계수로서 식생밀도와 공극률에 따라 일정한 값이 산정되는 방식이다. 이 평균항력계수는 Huang et al. (2011)의 실험에서 측정된 항력계수와 유사한 경향을 나타내었을 뿐만 아니라, Boussinesq 모델에 적용한 계산결과가 실험결과를 잘 재현하였다. 그리고 Cal. 2는 Chen and Nguyen (2011)이 흐름-식생 상호간섭에 관한 여러 실험결과를 종합적으로 분석하여 제안한 것이며, 일정한 값을 가지는 Cal. 1과 달리 레이놀즈수에 따라 능동적으로 대응이 가능한 동적 항력계수이다.

Table 1. Drag Coefficients Used in Fluid Resistance Terms

Cal.	Drag coefficient
1	$C_D = 1.245 + 4.587 \frac{\phi}{\gamma_v}$ (Tanino and Nepf, 2008)
2	$C_D = \frac{50}{Re^{0.43}} + 0.7 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{Re}{15000}\right) \right\}$ (Chen and Nguyen, 2011)

여기서,  $\phi$ 는 식생밀도로서 식생의 체적비율을 의미한다.  $Re$  ( $= \frac{v_i d}{\nu}$ ;  $d$ 는 식생의 특성길이이고, 여기서는 식생의 지름을 적용한다.)는 레이놀즈수이다.

### 2.3 무반사 조파시스템

Brorsen and Larsen (1987)가 제안한 무반사로 파랑/흐름생성이 가능한 원천은 계산영역의 양쪽방향( $x$ 의 ±방향)으로 파랑과 흐름이 전달되기 때문에 Eq. (6)과 같은 생성강도  $q$ 를 가진다. 또한 입사파와 반사파가 중첩될 경우에 목표 파형을 정확하게 생성할 수 없기 때문에 Ohyama and Nadaoka (1991)가 제안한 강도,  $(\eta+h)/(\eta_s+h)$ 을 적용한다.

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

여기서,  $V$ 는 근사된 수평유속성분, 파랑 및 흐름의 생성지점에서 ±양쪽으로 전달되기 때문에 상수 2가 적용된다.  $\eta$ 와  $\eta_s$ 는 생성지점에서의 근사된 수면변위 그리고 실제 수면변위를 각각 나타낸다.

이 수치파동수조는 엇갈림 격자체계를 채택하고 있기 때문에 Eq. (7)과 같이 생성지점의 격자크기( $\Delta x_s$ )에 따른 생성강도( $q$ )의 영향을 배제하기 위하여 유량밀도  $q^*$ 를 적용한다. 그리고  $q^*$ 는 생성지점( $x_s$ )을 제외한 나머지 셀에서 0이 주어진다. 따라서 목표한 외력(파랑 또는 흐름)을 정확하게 생성할 수 있다.

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

#### 2.3.1 고립파 근사이론

본 연구에서는 쓰나미와 유사한 파형의 고립파를 적용하며, 시간파형은 Fenton (1972)이 제안한 3차 근사이론식 Eq. (8)을 이용한다.

$$\eta = h \left\{ \epsilon s^2 \hat{t} + \epsilon^3 \left( \frac{5}{8} s^2 \hat{t}^2 - \frac{101}{80} s^4 \hat{t}^2 \right) \right\} \quad (8)$$

여기서,  $\epsilon$ 는 입사파고( $H_i$ )와 수심( $h$ )과의 비( $= H_i/h$ ),  $s$ 와  $\hat{t}$ 는 위상항으로 다음의 Eqs. (9a)~(9d)로 정의된다. 그리고 파속  $C$ 는 Eq. (10)과 같다.

$$s = \operatorname{sech} \kappa \hat{x} \quad (9a)$$

$$\kappa = \sqrt{\frac{3}{4} \epsilon} \left( 1 - \frac{5}{8} \epsilon + \frac{71}{128} \epsilon^2 \right) \quad (9b)$$

$$\hat{x} = \frac{x_s - Ct}{h} \quad (9c)$$

$$\hat{t} = \tanh \kappa \hat{x} \quad (9d)$$

$$C = \sqrt{gh} \left( 1 + \frac{1}{2} \epsilon - \frac{3}{20} \epsilon^2 + \frac{3}{56} \epsilon^3 \right) \quad (10)$$

수치파동수조에서 고립파를 생성하기 위해서는 Eq. (8)의 시간 파형뿐만 아니라, 무반사 조파시스템의 강도식 Eq. (6)에 수평유속을 대입하여야 한다. 본 연구에서는 Grimshaw (1971)에 의해 유도된 3차 근사식 Eq. (11)을 적용한다.

$$V = C_0 \left[ \epsilon s^2 - \epsilon^2 K_1 + \epsilon^3 (K_2 + K_3) \right] \quad (11)$$

$$K_1 = -\frac{1}{4} s^2 + s^4 + z_h^2 \left( \frac{3}{2} s^2 - \frac{9}{4} s^4 \right) \quad (12a)$$

$$K_2 = \frac{19}{40} s^2 + \frac{1}{5} s^4 - \frac{6}{5} s^6 + z_h^2 \left( -\frac{3}{2} s^2 - \frac{15}{4} s^4 + \frac{15}{2} s^6 \right) \quad (12b)$$

$$K_3 = z_h^2 \left( -\frac{3}{8} s^2 + \frac{45}{16} s^4 - \frac{45}{16} s^6 \right) \quad (12c)$$

여기서,  $C_0$ 는 장파의 파속( $=\sqrt{gh}$ ) 그리고  $z_h$ 는 수립자의 연직거리와 수심과의 비( $=\bar{z}/h$ ;  $\bar{z}$ 는 수립자가 바닥으로부터 떨어진 연직거리)이다.

## 3. 수치파동수조의 검증

본 연구에서 개발한 수치파동수조의 적용성 검증 및 적용하는 항력계수 산정식의 타당성 및 유효성을 확인하기 위하여 두 가지 항력계수 산정방법을 고려한 검증을 수행한다. 그리고 둘 중에서 정확도가 높은 것을 적용하여 식생밀도, 입사파고에 따른 고립파의 전달률을 비교·검토한다.

### 3.1 수치파동수조의 개요

Fig. 1은 Huang et al. (2011)의 수리모형실험에 기초하여 구성된 길이 32 m, 폭 55 cm, 높이 30 cm의 수치파동수조이다. 그리고 수심 15 cm의 해석영역에는 식생대가 포함되어 있으며, 식생대의 상세한 제원은 Table 2와 같다. 또한 수치파동수조의 양쪽 경계에서의 반사를 배제시키기 위하여 에너지 흡수층과 방사조건을 적용한다. 여기서 검증을 위한 모든 수치시물레이션들에서는 계산격자크기  $\Delta x=1.5$  cm,  $\Delta y=2.5$  cm,  $\Delta z=0.5$  cm 그리고  $\Delta t=1/1000$  s의 계산시간간격을 고려한다.

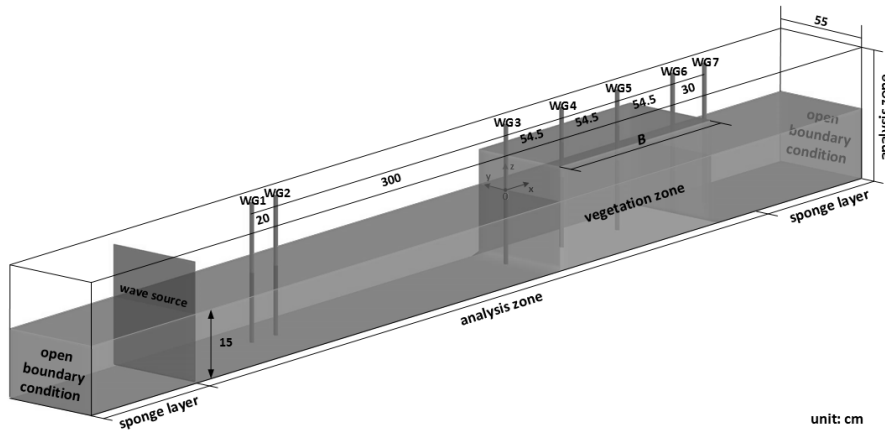


Fig. 1. Schematic Diagram of Numerical Wave Tank Based on Huang et al. (2011)'s Experimental One

Table 2. Vegetation Types Used in Huang et al. (2011)'s Experiment

CASE	Vegetation	
	density, $\phi$	width, $B$ [cm]
A1	0.175	54.5
B1	0.087	54.5
C1	0.044	54.5
C3	0.044	163.5

### 3.2 시간파형

Fig. 2는 식생대를 전파하는 고립파의 시간파형을 각각의 지점에서 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 식생조건은 CASE C3으로 밀도( $\phi$ )는 0.044, 폭( $B$ ) 163.5 cm이고, 입사파고( $H$ )는 5 cm이다. 또한 시간파형의 측정지점은 Fig. 1과 같으며, WG1과 WG2는 식생대 전면, WG3를 식생대 바로 앞, WG4와 WG5는 식생대 내부, WG6은 식생대 바로 뒤 그리고 WG7은 식생대 배후이다.

여기서 동그라미는 Huang et al. (2011)의 실험결과, 점선은 Tanino and Nepf (2008)의 평균항력계수를 적용한 Cal. 1의 계산 결과 그리고 실선은 레이놀즈수에 따른 동적 항력계수를 적용한 Cal. 2의 계산결과를 각각 나타낸다.

Fig. 2로부터 식생대 전면의 WG1과 WG2에서는 Cal. 1과 Cal. 2가 입사파고 및 파형을 잘 재현하고 있으나, 8초 부근에서 나타는 식생에 의한 반사가 Cal. 2가 조금 더 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 이것은 Cal. 2의 경우가 Cal. 1보다 식생에 의한 유체저항이 크기 때문으로 나타나는 현상이다. 그 결과, 식생내부의 WG4와 WG5에서는 Cal. 2의 경우가 Cal. 1보다 낮은 파고를 나타낼 뿐만 아니라, 실험결과와의 일치도가 높은 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 현상은 식생 배후의 WG6과 WG7에서 더욱 뚜렷이 나타남을 알 수 있다. 즉 Cal. 1에서는 수치적으로 추정된 식생항력이 실제보다 약하게 계산된 것이다. 반면에 Cal. 2의 경우에는 높은 정확도로 식생항력이 수치적으로 고려되었기 때문에

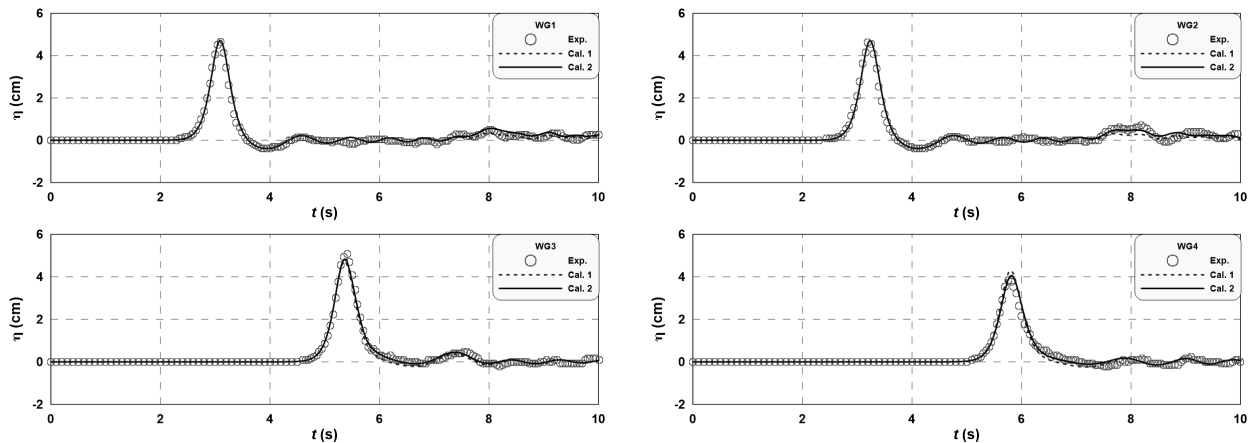


Fig. 2. Comparison Between Measured and Simulated Time-Domain Waveform for CASE C3

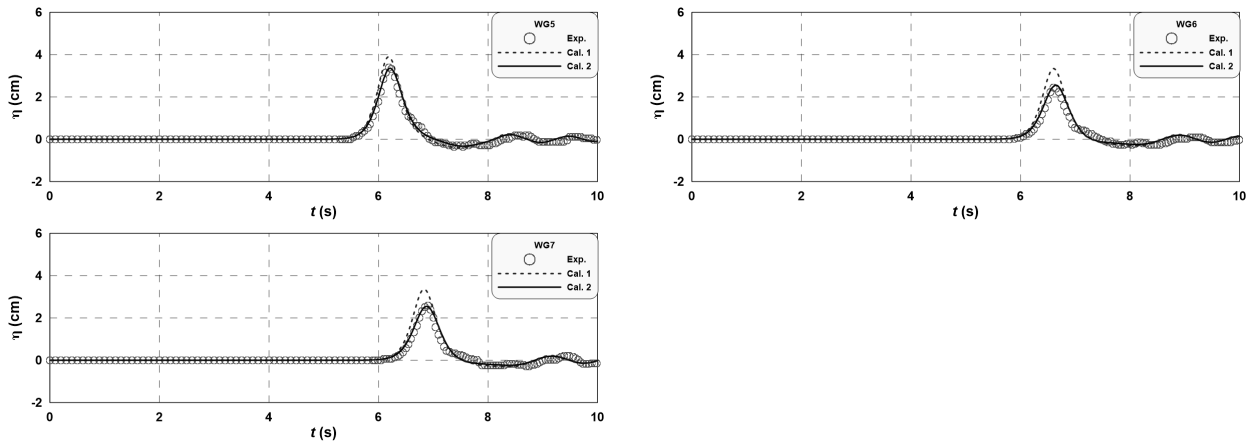


Fig. 2. Comparison Between Measured and Simulated Time-Domain Waveform for CASE C3 (Continue)

실험결과를 잘 재현하는 것으로 판단된다.

이상의 비교결과에 근거하여 Cal. 1에서 적용한 Tanino and Nepf (2008)의 평균항력계수는 Huang et al. (2011)의 연직적분모델에는 적합할지 몰라도, 본 연구와 같이 N-S방정식 기반의 수치파동수조에서는 타당하지 않은 것으로 보인다. 이와 반대로 레이놀즈수에 따라 능동적으로 항력계수가 변화하는 Chen and Nguyen (2011)의 산정식이 수치파동수조에서 쓰나미-식생 상호작용을 해석하는 것에 적합한 것으로 판단된다.

### 3.3 전달률

Fig. 3은 각각의 고립파가 식생폭( $B$ ) 54.5 cm를 통과한 전달률( $K_T$ )을 나타내며, 사각형은 실험값 그리고 실선은 계산값이다. 여기서 쓰나미-식생 상호작용 계산에 적용한 항력계수는 앞서 타당성을 확인한 Cal. 2를 적용한다. 그리고 수치모의에서 고려한 입사파고와 수심과의 비( $H_i/h$ )는 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5이며, 수심( $h$ )이 15 cm인 것을 감안하여 입사파고( $H_i$ )를 1.5, 3, 4.5, 6, 7.5 cm를 각각 적용한다.

Fig. 3으로부터 식생밀도가 클수록(공극률이 작을수록) 전체적인 고립파의 전달률( $K_T$ )이 크게 감소하는 것을 알 수 있다. 그리고 각각의 식생밀도 조건에서는  $H_i/h$ 가 증가할수록(파랑에너지가 클수록)  $K_T$ 가 작아지는 현상을 나타낸다. 이와 같은 수리모형실험의 결과를 본 연구의 계산결과가 고정도로 재현하고 있는 것을 알 수 있다.

본 연구결과들을 종합하면, N-S방정식 기반의 수치파동수조에서 쓰나미-식생 상호간섭에 의한 에너지소산을 직접모의하기 위해서는 수리특성에 따라 능동적으로 식생항력을 추정할 수 있는 Chen and Nguyen (2011)의 산정식이 적합하다. 또한 Chen and Nguyen (2011)의 산정식을 적용한 수치시물레이션에서는 식생밀도, 고립파의 입사조건에 따른 식생대를 통과하는 전달률을 실험결

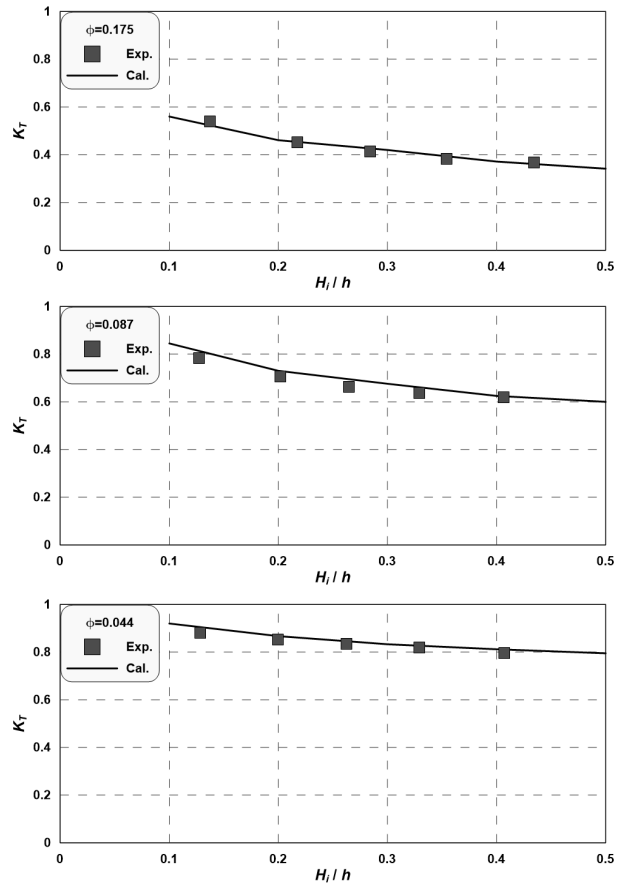


Fig. 3. Comparison Between Measured and Simulated Transmission Coefficients for  $B=54.5$  cm

과와 비교하여 고정도로 재현하고 있다. 이로써 본 연구에서 쓰나미-식생 비선형 상호간섭에 의한 동적해석을 위해 레이놀즈수에 따라 능동적으로 변화하는 항력계수를 적용한 3차원 수치파동수조의 타당성 및 유효성이 확인된다.

## 5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 쓰나미-식생 비선형 상호작용을 직접해석하기 위하여 기존의 3차원 N-S solver (Lee and Hur, 2014a, 2014b)를 기반으로 식생에 의한 유체저항을 새롭게 도입하였다. 먼저 식생에 의한 유체저항식에 대입되는 항력계수를 추정하기 위하여 대표적인 두 가지 산정식을 고려하였다. 첫번째는 연직적분모델에서 적용성이 확인된 Tanino and Nepf (2008)의 평균항력계수 그리고 둘째는 레이놀즈수에 따라 능동적으로 대응 가능한 Chen and Nguyen (2011)의 동적항력계수이다. 그리고 각각의 항력계수를 적용하여 Huang et al. (2011)의 실험과 비교·분석하였으며, 얻어진 주요한 결과들을 아래와 같다.

- (1) N-S방정식 기반의 수치파동수조에서 쓰나미-식생 상호작용에 의한 에너지소산을 해석하는 것에 있어서 연직적분모델에서 적용성이 확인된 Tanino and Nepf (2008)의 평균항력계수보다는 레이놀즈수에 따른 Chen and Nguyen (2011)의 동적항력계수가 더욱 적합한 것으로 나타났다.
- (2) 본 연구의 계산결과가 Huang et al. (2011)의 실험에서 나타난 식생대 전후의 시간파형을 매우 잘 재현하였다. 이것은 고립파-식생 상호간섭에 의한 에너지소산 모의의 타당성 및 유효성을 보여주는 하나의 결과이다.
- (3) Chen and Nguyen (2011)의 동적 항력계수를 적용한 수치계산결과에서는 식생밀도 및 고립파의 입사조건에 따라 식생대를 통과하는 전달률이 Huang et al. (2011)의 수리모형실험에서 측정된 값과 높은 일치도를 나타내었다.
- (4) 본 연구에서 새롭게 식생에 의한 유체저항을 동적 항력계수로 도입한 3차원 수치파동수조가 쓰나미-식생 상호작용에 관한 수치모의에 있어서 그 타당성 및 유효성을 확인하였다.

이상의 배경에 근거하여 본 연구에서 새롭게 제안한 3차원 수치파동수조는 쓰나미-식생 상호작용에 의한 수리특성을 해석하는 것에 활용가치가 매우 높다고 할 수 있다. 향후 식생을 활용한 연안방재시스템을 구축하는 데 다양한 측면에서의 수치적인 검토가 가능해질 것으로 판단되며, 다양한 해양외력조건에 대한 식생항력에 대해서도 수치적으로 고려할 수 있게 다양한 검토를 수행해 나갈 예정이다.

## 감사의 글

이 논문은 2016년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(연안침식대응기술개발).

## References

- Anderson, M. E., Smith, J. M. and McKay, S. K. (2011). "Wave dissipation by vegetation." U.S. Army Engineer Research and Development Center. ERDC/CHL CHETN-I-82, p. 22.
- Asano, T., Deguchi, H. and Kobayashi, N. (1992). "Interactions between water waves and vegetation." *Proc. 23rd Int. Conf. on Coastal Eng.*, ASCE, pp. 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.*, Vol. 56, pp. 332-340.
- Blackmar, P., Cox, D. and Wu, W. (2014). "Laboratory observations and numerical simulations of wave height attenuation in heterogeneous vegetation." *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, Vol. 140, pp. 56-65.
- Brackbill, J. U., Kothe, D. B. and Zemach, C. (1992). "A continuum model for modeling surface tension." *J. Comp. Phys.*, Vol. 100, pp. 335-354.
- Brorsen, M. and Larsen, J. (1987). "Source generation of nonlinear gravity waves with the boundary integral equation method." *Coastal Eng.*, Vol. 11, pp. 93-113.
- Cheng, N. and Nguyen, H. (2011). "Hydraulic radius for evaluating resistance induced by simulated emergent vegetation in open-channel flows." *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 137, pp. 995-1004.
- Dubi, A. and Torum, A. (1994). "Wave damping by kelp vegetation." *Proc. 24th Int. Conf. on Coastal Eng.*, ASCE, pp. 142-156.
- Fenton, J. (1972). "A ninth-order solution for the solitary wave: Part2." *J. Fluid Mech.*, Vol. 53, pp. 257-271.
- Grimshaw, R. (1971). "The solitary wave in water of variable depth: Part 2." *J. Fluid Mech.*, Vol. 46, pp. 611-622.
- Huang, Z., Yao, Y. Sim, S. Y. and Yao, Y. (2011). "Interaction of solitary waves with emergent, rigid vegetation." *Ocean Eng.*, Vol. 38, pp. 1080-1088.
- Hur, D. S., Lee, W. D. and Cho, W. C. (2012). "Three-dimensional flow characteristics around permeable submerged breakwaters with open inlet." *Ocean Eng.*, Vol. 44, pp. 100-116.
- Iimura, K. and Tanaka, N. (2012). "Numerical simulation estimating the effects of tree density distribution in coastal forest on tsunami mitigation," *Ocean Eng.*, Vol. 54, pp. 223-232.
- Kim, W. G. (2008). "An experimental study for wave energy attenuation by vegetation density." Master's thesis, Gyeongsang Nat'l Univ., 40p (in Korean).
- Kobayashi, N., Raichle, A. W. and Asano, T. (1993). "Wave attenuation by vegetation." *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, Vol. 119, pp. 30-48.
- 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.*, Vol. 107, pp. 70-83.
- Lee, S. D. (2007). "Numerical analysis for wave propagation and sediment transport with coastal vegetation." *J. Ocean Eng. and*

- tech.*, Vol. 21, pp. 18-24 (in Korean).
- Lee, S. D. and Kim, M. J. (2014). "Effects of disaster prevention of a coastal forest considering wave attenuation ability." *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 14, pp. 381-388 (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.*, Vol. 36, pp. 659-664 (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.*, Vol. 23, pp. 31-37 (in Korean).
- Lee, W. D. and Hur, D. S. (2014a). "Development of 3-d hydrodynamical model for understanding numerical analysis of density current due to salinity and temperature and its verification." *J. Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 34, No. 3, pp. 859-871 (in Korean).
- Lee, W. D. and Hur, D. S. (2014b). "Development of a 3-d coupled hydro-morphodynamic model between numerical wave tank and morphodynamic model under wave-current interaction." *J. Korean Society of Civil Eng.*, KSCE, Vol. 34, pp. 1463-1476 (in Korean).
- Ma, G., Kirby, J. T., Su, S. F., Figlus, J. and Shi, F. (2013). "Numerical study of turbulence and wave damping induced by vegetation canopies." *Coastal Eng.*, Vol. 80, pp. 68-78.
- Maza, M., Lara, J. L. and Losada, I. J. (2015a). "Tsunami wave interaction with mangrove forests: A 3-D numerical approach." *Coastal Eng.*, Vol. 98, pp. 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 Eng.*, Vol. 106, pp. 73-86.
- Mendez, F. M. and Losada, I. J. (2004). "An empirical model to estimate the propagation of random breaking and nonbreaking waves over vegetation fields." *Coastal Eng.*, Vol. 51, pp. 103-118.
- Ohyama, T. and Nadaoka, K. (1991). "Development of a numerical wave tank for analysis of non-linear and irregular wave field." *Fluid Dynamics Res.*, Vol. 8, pp. 231-251.
- Sakakiyama, T. and Kajima, R. (1992). "Numerical simulation of nonlinear wave interacting with permeable breakwater." *Proc. 23rd Int. Conf. Coastal Eng.*, ICCE, ASCE, pp. 1517-1530.
- Sugahara, K. and 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), No. 771, p. 39 (in Japanese).
- Suzuki, T. (2011). "Wave dissipation over vegetation fields." Ph.D. thesis, Univ. of Technology Delft, p. 175.
- Tanino, Y. and Nepf, H. M. (2008). "Laboratory investigation of mean drag in a random array of rigid, emergent cylinders." *J. Hydraulic Eng.*, Vol. 134, pp. 34-41.
- 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.*, Vol. 164, pp. 443-450.
- Yang, J. Y. (2008). "Wave propagation with vegetated coastal area." Master's thesis, Univ. of Ulsan, p. 45 (in Korean).