

## 해저투수층을 통과하는 불규칙파의 파랑감쇠에 관한 연구

허동수\* · 최동석\*\* · 이우동\*\* · 배기성\*

\*경상대학교 토목환경공학부 해양산업연구소

\*\*경상대학교 토목환경공학부

## On Damping of Irregular Waves Passing over a Permeable Seabeds

DONG-SOO HUR\*, DONG-SEOK CHOI\*\*, WOO-DONG LEE\*\* AND KI-SEONG BAE\*

\*Institute of Marine Industry, Department of Civil and Environmental Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea

\*\*Department of Civil and Environmental Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea

**KEY WORDS:** Two-dimensional numerical model 2차원 수치모델, Permeable seabeds 투과성 해저지반, Irregular waves 불규칙파, Wave damping 파랑감쇠, Porosity 공극률, Mean grain size 평균입경

**ABSTRACT:** The present study investigates numerically damping characteristics of irregular waves passing over a permeable seabeds. At first, the numerical model, which is able to consider the flow through a porous medium with inertial, laminar and turbulent resistance terms and determine the eddy viscosity with LES turbulent model, is validated by comparing with existing experimental data. And then, the numerical test on irregular wave damping over a permeable seabeds is performed in case that wave and flume conditions are changed. It is revealed from the numerical results that the more porosity and mean grain are increased, the more wave damping is increased. Also, the effect of wave period on damping of irregular waves over a permeable seabed is discussed.

### 1. 서 론

천연의 해저는 일반적으로 투수성을 가지는 저질로 이루어져 있는 경우가 많으며, 이러한 해저투수층상을 파랑이 전파할 때에는 파고감쇠의 영향을 받는다. 이는 먼저 파봉 하에서는 해저경계면에서 정의 동압이 작용하고 파곡 하에서는 부의 동압이 작용함으로 인한 압력경사가 해저투수층 내에 흐름을 야기한다. 이에 따른 투수층 내로의 침투와 파동장으로서의 용출시 유체점성 및 유체와 투수층간의 상호작용이 파랑감쇠에까지 이어지게 된다. 이것은 Ting et al.(2004)의 연구에서 보듯이 투수층의 공극률에 따른 Energy loss가 달라짐에 따라 파랑감쇠가 다르게 나타나는 것과 같다고 할 수 있다.

이러한 투수층상의 파랑감쇠에 대하여서는 많은 연구자들에 의해 실험적 또는 이론적으로 연구가 수행되어 왔으며, 최근에는 많지는 않지만 수치모델을 이용한 연구도 행해지고 있다. Savage(1953)는 모래 지반에 의한 파랑감쇠에 대한 수리실험을 수행하여 바다마찰과 침투에 의한 파랑에너지 소산과 파고감쇠에 대하여 검토하였다. Sawaragi and Deguchi (1992)는 자갈로 이루어진 투수층 지반에 대한 수리실험을 실시하여 파랑감쇠에 미치는 투수성의 영향에 대하여 경계면의 전단력 효과를 무시하고 검토하였다. 또한 Gu and Wang (1991)은 투수성지반을 통과하는 중폭파의 수리실험을 수행하여 파랑감쇠의 예측은 경계층 내부의 경계면이 중요하다는

것을 보고하였으며, 투수성 흐름에 비선형 전단저항을 포함하여 해석하였지만, 파랑에너지 소산에 관한 비선형 조건의 영향을 완벽하게 포함하지는 못하였다. Liu and Dalrymple (1984)은 투수성매체를 통과하는 흐름을 묘사하기 위해 Dagan(1979)의 투수성 흐름모델을 적용하여 성분파의 소산관계를 구하였으며, 여기서 파랑감쇠는 대상 지반의 투수성의 최대치에 따른다는 것을 발견하였다. Chang(2004)은 2차원 NS방정식을 이용하여 투수성 해저지반을 통과하는 규칙파와 고립파의 전파를 해석하였으며, 여기서 투수성 해저지반 밖의 흐름은 층류로 가정하였다. 이러한 층류 흐름의 가정은 난류 전단응력을 무시하는 것으로 결국, 강비선형 진행파의 경우 매우 중요한 결점을 야기할 수 있다. 또한, Karunarathna and Lin(2006)은 투수성매체 위를 진행하는 파랑의 감쇠에 대해 수치시뮬레이션을 실시하였으며, 투수성매체 외부의 흐름은 k-ε 난류모델이 적용된 RANS방정식을 사용하였고, 투수성매체 내부의 흐름은 관성과 항력저항이 추가된 공간적분 N-S방정식을 이용하였다. 이 연구에서는 규칙파를 입사파로 하여 파장, 해저지반의 두께 및 Reynolds 수 등의 변화가 파랑감쇠에 미치는 효과에 대해 검토가 수행되었다.

이상과 같이 투수성 해저지반에 의한 파랑감쇠에 관하여 수많은 연구가 이루어져 왔지만, 실험역의 파랑인 불규칙파에 대한 연구가 부족한 실정임을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서는 투수성 해저지반을 통과하는 불규칙파의 파랑감쇠 특성을 명확히 하기 위하여, 먼저 파 · 투수성 지반의 상호 간섭을 직접 해석할 수 있는 수치해석 수법을 도입하여 기존 수리모형실험과의 비교를 통하여 검증한 후,

투수성지반의 조건과 파랑조건을 변화시켜가면서 수치모의를 수행한다. 이러한 수치계산결과를 바탕으로 먼저 규칙파와 불규칙파의 파랑감쇠를 비교한다. 또한 Sand와 Gravel로 구성된 투수층지반의 평균입경, 공극률, 및 주기에 변화를 주어 불규칙파의 파랑감쇠에 대해 검토한다.

## 2. 수치해석기법

### 2.1 기초방정식

본 연구에서는 무반사조파를 위한 조파소스항이 포함된 연속방정식 (1)과 투수성구조물 내에서의 유체저항을 도입한 수정된 Navier-Stokes 운동방정식 (2), (3) 및 자유표면을 모의하기 위한 Hirt and Nichols(1981)이 제안한 VOF함수의 이류방정식 (4)로 구성된다. 그리고 식 (5)의  $q^*$ 는 조파소스의 유량 밀도이다.

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

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

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

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

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

여기서,  $u$ ,  $w$ 는  $x$ ,  $z$ 방향의 속도성분,  $\gamma_v$ 는 체적공극률 (Volume porosity),  $\gamma_x$ ,  $\gamma_z$ 는  $x$ ,  $z$ 방향에 대한 면적투과율 (Surface permeability)을 나타내며,  $\beta$ 는 부가감쇠영역을 제외하고는 0으로 주어지는 파랑감쇠계수이다. 또한,  $\nu_t$ 는 후술(식 (12))하는 동점성계수와 와동점성계수의 합을 의미한다.

또한, 식 (2), (3)에서  $M_x$ ,  $M_z$ 는 관성저항(Sakakiyama and Kajima, 1992),  $E_x$ ,  $E_z$ 는 층류저항(Ergun, 1952),  $D_x$ ,  $D_z$ 는 난류저항(Liu and Jacob, 1999)을 의미하며, 다음의 식 (6)~(11)과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

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

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

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

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

여기서,  $C_M$ ,  $C_E$ ,  $C_D$ 는 각각 관성력계수, 층류저항계수, 난류저항계수이며, 각각 1.5, 0.25, 120.0을 이용하였다. 또한,  $D_p$ 는 투과체의 평균입경이다.

일반적으로 난류(와류)를 완전하게 재현하기 위해서는 계산영역이 흐름장의 대표스케일보다 커야하며 격자크기는 최소 난류(와류)스케일보다 작게 설정해야 한다. 그렇게 되면 계산 격자 수가 증가한다. 이렇게 증가된 격자수를 설정하여 수치해석을 수행하는 것은 현실적으로 불가능한 면이 없지 않다. 따라서 본 연구에서는 앞의 기초방정식이 적용된 수치해석기법(허승수 등, 2005)에 난류모델로서 Large eddy simulation (LES) 기법을 도입한 새로운 기법을 제안하였다. 난류의 비교적 큰 구조를 직접계산의 대상으로 하고, 격자크기보다 작은 난류에 대해서는 Sub-grid scale 모델을 이용하는 Large eddy simulation(이하 LES)기법은, 식 (12)~(15)로 표현되는 Smagorinsky sub-grid model (Smagorinsky, 1963)을 이용하였다.

$$\nu_t = \nu + \nu_l \quad (12)$$

$$\nu_l = (C_s \Delta)^2 |S| \quad (13)$$

$$|S| = (2S_{ij}S_{ij})^{1/2} \quad (14)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (15)$$

여기서,  $\nu$ 는 동점성계수를 나타내며,  $\nu_l$ 은 Sub-grid scale의 와동점성계수를 나타낸다. 또한, Schumann(1987)은  $C_s$ 의 값으로 0.07~0.21의 값을 제안하였으나, 본 연구에서는 유사한 연구(Christensen and Deigaard, 2001; Okayasu et al., 2005)에서 이용된  $C_s=0.1$ 을 적용하였다.  $\Delta$ 는 식 (16)로 표현되는 필터의 대표길이(Filter length scale),  $S_{ij}$ 는 격자크기에서의 변형 Tensor이다.

$$\Delta = (\Delta x \cdot \Delta z)^{1/2} \quad (16)$$

$\Delta x, \Delta z$ 는  $x, z$ 방향의 격자크기를 나타낸다.

## 2.2 경계조건 및 안정조건

구조물표면 및 바닥에서의 경계조건은 법선방향으로 불투과조건을 이용하였으며 접선방향으로 Slip조건을 이용하였다. 계산의 안정성을 확보하기 위하여 식 (17)의 CFL (Courant-Friedrichs-Lewy)조건과 식 (18)의 확산불안정조건(Diffusive time limit condition)을 이용하였다.

$$\Delta t < \kappa \cdot \min \left\{ \frac{\Delta x}{|u|_{\max}}, \frac{\Delta z}{|w|_{\max}} \right\} \quad (17)$$

$$\Delta t < \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{\nu \left( \frac{1}{\Delta x^2 + \Delta z^2} \right)} \right] \quad (18)$$

여기서,  $|u|_{\max}, |w|_{\max}$ 는 각각  $x, z$ 방향에 있어서 최대유속을 나타내며,  $\kappa$ 는 가중계수를 나타낸다. 또한, 초기의 시간 간격은 0.001sec로 하고, 그 이후는 Courant조건식 (17) 및 Diffusion 조건식 (18)이 만족되도록 시간 간격  $\Delta t$ 를 매 시간 단계마다 조정하였다.

## 2.3 수치해석방법

운동방정식 (2), (3)에 대해서는 시간함에 전진차분근사를, 이류항에는 수치확산 및 불안정성을 제어하기 위해 1차정도의 상류차분과 2차정도의 중앙차분을 혼합한 Donor차분근사를 하였으며, 본 연구에서는  $\alpha=0.5$ (수치계산상에서  $\alpha$ 는 상류차분을 이용할 것인지 중앙차분을 이용할 것인지를 결정하는 상수로써  $\alpha=1$ 일 경우는 정도는 비교적 낮지만 안정성을 확보할 수 있는 1차정도의 상류차분이 되고  $\alpha=0$ 일 경우는 정도는 높지만 불안정성이 증가하는 2차정도의 중앙차분이 된다)를 적용하였다.

또한, 시간  $n\Delta t$ 에서 얻어지는 유속과 압력 등의 값으로부터 시간  $(n+1)\Delta t$ 에서의 유속  $u^{n+1}, w^{n+1}$ 을 계산할 수 있지만 운동방정식 (2), (3)만으로 산정된 유속이 반드시 연속방정식 (1)을 만족한다고 할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 다시 압력  $p^{n+1}$ 을 적절히 조정하면서 유속  $u^{n+1}, w^{n+1}$ 이 연속방정식을 만족하도록 반복계산을 수행하는 SOLA(Numerical SOLUTION Algorithm for transient fluid flow) scheme을 이용하였다.

## 2.4 불규칙파의 조파

본 연구에서 적용하는 수치파동수로에서의 조파는 Brorsen and Larsen(1987)이 제안한 식 (19)의 조파소스강도를 이용한다. 식 (19)에서  $t$ 는 조파를 시작한 시각으로부터의 경과시간,  $T_{1/\beta}$ 은 입사파의 유의주기이다.  $U_b$ 는 각 성분파에 대한 수평 유속성분으로 미소진폭파 이론에 의한 유속을 사용하였으며, 갑작스러운 조파로 계산이 불안정해지는 것을 방지하기 위해

$3t/T_{1/\beta}$ 까지는 서서히 조파소스의 강도를 증가하는 것으로 하였다.

$$S = \begin{cases} \{-2t/T_b\} \cdot 2 \sum_{i=1}^N U_i \left( \sum_{j=1}^N U_j + h \right) / (r_b + h) : t/T_{1/\beta} \leq 3 \\ 2 \sum_{i=1}^N U_i \left( \sum_{j=1}^N U_j + h \right) / (r_b + h) : t/T_{1/\beta} > 3 \end{cases} \quad (19)$$

불규칙파를 수치모의하기 위한 스펙트럼으로는 널리 사용되고 있는 식 (20)의 Bretschneider - Mitsuyasu(Mitsuyasu, 1970)의 스펙트럼을 적용하였다.

$$S(f) = 0.257 H_{1/\beta}^2 T_{1/\beta}^4 f^{-5} \exp[-1.03 (T_{1/\beta} f)^4] \quad (20)$$

여기서,  $S(f)$ 는 파랑에너지 밀도,  $f$ 는 주파수,  $H_{1/\beta}$ 은 유의파고를 나타낸다. 불규칙파를 모의하기 위한 주파수  $f$ 의 선택 방법에는 주파수 스펙트럼을 등구간으로 분할하는 방법이나 각각의 성분파의 진폭이 거의 같도록 하는 등에너지로 분할하는 방법 등이 이용된다. 본 연구에서는 Bretschneider - Mitsuyasu의 스펙트럼에 대해 등에너지로 스펙트럼을 분할할 수 있는 Goda(1977)에 의해 제안된 다음의 식 (21)을 이용하여 주파수를 선택하였다.

$$f_i = \frac{1.007}{T_{1/\beta}} \{ \ln [2N / (2i - 1)] \}^{-1/4}, i = 1, N \quad (21)$$

여기서,  $N$ 은 성분파의 수를 나타낸다. 또한, 위상각은  $[0, 2\pi]$ 의 범위의 일양난수(Uniform random numbers)를 이용하였다.

이 때, 어떠한 일양난수를 이용하는가에 따라 생성되는 불규칙파의 시계열도 변화하므로 시계열의 변화에 따른 영향도 검토하기 위하여 세 종류의 일양난수에 의한 불규칙파의 파형을 검토하였다. Fig. 1은 세 종류의 일양난수에 의해 생성되어 조파된 불규칙파의 시계열을 나타내고 있다. 그림으로부터 알 수 있듯이 동일한 주기와 파고를 가지는 성분파들에 의한 불규칙파의 생성일지라도 위상각에 이용되는 일양난수의 차이로 인해 불규칙파의 생성 시계열이 달라지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 2와 같이 일양난수의 차이에 의해 각각 다른 시계열로 구성된 불규칙파의 해저투수층 상 파랑감쇠 특성을 비교해 본 결과, 큰 차이는 확인할 수 없었으므로 본 연구에서는 세 경우 중 Case 1에 이용된 일양난수를 적용하여 수치 시뮬레이션을 수행하였다.

## 3. 수치해석수법의 검증

본 연구에서 제안하는 수치계산수법의 타당성을 검증하기 위하여 Sand seabed는 Savage(1953)에 의한 수리모형실험 결과를, Gravel seabed는 Sawaragi and Deguchi(1992)를 참조

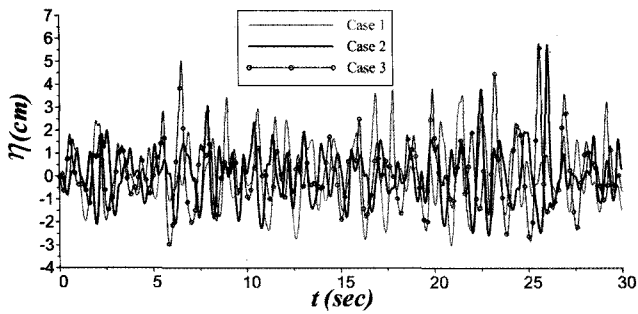


Fig. 1 Irregular water surface profiles generated by different uniform random numbers

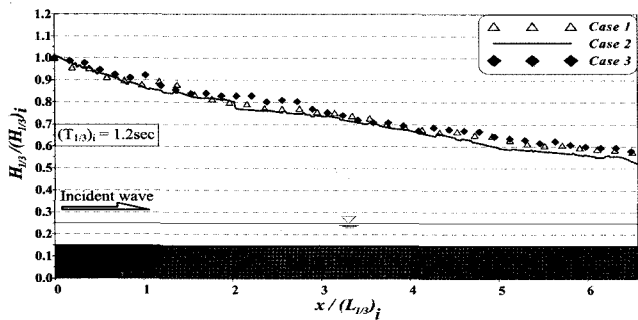


Fig. 2 Comparison of wave damping for irregular waves with different uniform random numbers over a sand seabed

Table 1 Numerical setup condition used for verification

	Permeable seabeds	Sand	Gravel	
incident wave period (sec)	$T_i$	1.27	1.00	1.50
incident wave height (cm)	$H_i$	5.40	3.58	3.58
water depth (cm)	$h$	22.9	15.0	15.0
mean grain size (cm)	$D$	0.382	3.070	3.070
porosity	$n$	0.3	0.4	0.4
seabeds width (cm)	$W$	1830	350	350
seabeds height (cm)	$d$	30	15	15

하였다. 또한, 수치파동수조(Fig. 3 참조)의 양단에는 부가감쇠 영역을 두어 반사파의 영향이 없게 하였으며, 검증용 위해 이용된 입사파 조건 및 수조의 제원은 Table 1에 나타내었다.

Fig. 4(a), (b) 및 (c)는 각각 Sand seabed, Gravel seabed( $T_i=1.0s$ ) 및 Gravel seabed( $T_i=1.5s$ )의 본 수치해석수법에 의한 파고의 공간분포 계산치와 수리실험 결과의 비교를 나타내고 있다. Savage(1953)와 Sawaragi and Deguchi(1992)의 실험에는 공극률( $n$ )이 없는 관계로 이 두 가지 실험을 수치모의한 Karunathna and Lin(2006)에서 이용한 공극률을 사용하여 수치모의 하였고 Karunathna and Lin(2006)의 계산결과와도 비교하였다.

먼저 Fig. 4(a)는 Sand seabed로서 횡축은 Sand seabed 길이 입사파장( $L_i$ )으로, 종축은 파고를 입사파고( $H_i$ )로 무차원

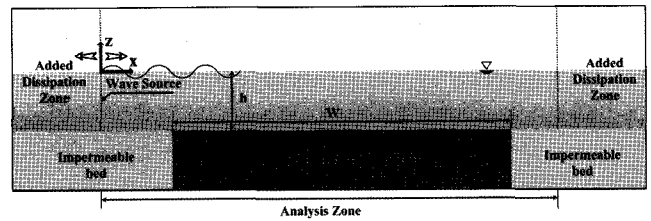


Fig. 3 Schematic diagram of numerical wave tank for verification

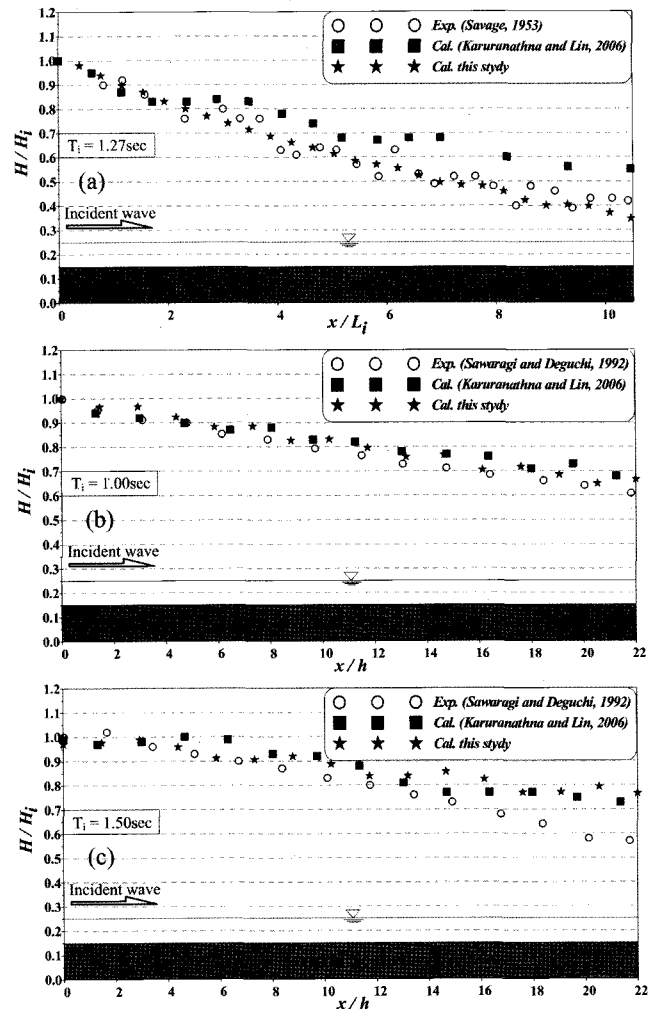


Fig. 4 Comparison between numerical and experimental results for wave damping of regular waves over a permeable seabed (a) sand seabed ( $T_i = 1.27$  sec); (b) gravel seabed ( $T_i = 1.0$  sec); (c) gravel seabed ( $T_i = 1.5$  sec)

하여 파고의 공간분포를 나타내었고 입사파고( $H_i$ )는 투수층이 시작되는 지점의 파고를 사용하였다. 여기서, 원(O)은 Savage (1953)의 실험치, 사각형(■)은 Karunathna and Lin(2006)의 계산치를, 별(★)은 본 연구의 계산치를 각각 나타내고 있다. 다음으로 Fig. 4(b)와 Fig. 4(c)는 Gravel seabed로서 횡축은 Gravel seabed 길이를 수심( $h$ )으로, 종축은 파고를 입사파고( $H_i$ )로 무차원하여 파고의 공간분포를 나타내었다. Fig. 4(a)

Table 2 Condition of incident wave and wave tank

Case	$h$ (cm)	$d$ (cm)	$W$ (cm)	$T_i$ ( $T_{1/3}$ ) <sub><math>i</math></sub> (sec)	$H_i$ ( $H_{1/3}$ ) <sub><math>i</math></sub> (cm)	$D$ (cm)	$n$	Seabed	Wave
1	20	25	1000	1.0	5	0.25	0.3	Sand	Regular
2	20	25	1000	1.2	5	0.25	0.3	Sand	Regular
3	20	25	1000	1.4	5	0.25	0.3	Sand	Regular
4	20	25	1000	1.0	5	2.50	0.4	Gravel	Regular
5	20	25	1000	1.2	5	2.50	0.4	Gravel	Regular
6	20	25	1000	1.4	5	2.50	0.4	Gravel	Regular
7	20	25	1000	1.0	5	0.25	0.3	Sand	Irregular
8	20	25	1000	1.2	5	0.25	0.3	Sand	Irregular
9	20	25	1000	1.4	5	0.25	0.3	Sand	Irregular
10	20	25	1000	1.2	3	0.25	0.3	Sand	Irregular
11	20	25	1000	1.2	7	0.25	0.3	Sand	Irregular
12	20	25	1000	1.2	5	0.10	0.3	Sand	Irregular
13	20	25	1000	1.2	5	0.40	0.3	Sand	Irregular
14	20	25	1000	1.2	5	0.25	0.2	Sand	Irregular
15	20	25	1000	1.2	5	0.25	0.4	Sand	Irregular
16	20	25	1000	1.0	5	2.50	0.4	Gravel	Irregular
17	20	25	1000	1.2	5	2.50	0.4	Gravel	Irregular
18	20	25	1000	1.4	5	2.50	0.4	Gravel	Irregular
19	20	25	1000	1.2	3	2.50	0.4	Gravel	Irregular
20	20	25	1000	1.2	7	2.50	0.4	Gravel	Irregular
21	20	25	1000	1.2	5	1.00	0.4	Gravel	Irregular
22	20	25	1000	1.2	5	4.00	0.4	Gravel	Irregular
23	20	25	1000	1.2	5	2.50	0.3	Gravel	Irregular
24	20	25	1000	1.2	5	2.50	0.5	Gravel	Irregular

의 Sand seabed의 결과를 확인하면 별(★)인 본 연구의 계산치가 원(O)인 Savage(1953)의 실험치를 아주 잘 재현함을 나타내었고, Karunarathna and Lin(2006)의 계산치보다 파랑감쇠를 잘 재현하고 있다. 다음으로 Fig. 4(b)와 Fig. 3(c)는 Gravel seabed로 Fig. 4(c)인  $T_i=1.5s$ 의 결과는 본 연구의 계산치와 Karunarathna and Lin(2006)의 계산치 모두 투수층 상을 진행함에 따라서 실험치를 약간 과대평가 하고 있지만 Fig. 4(b)의  $T_i=1.0s$ 인 경우에는 본연구의 계산치가 Sawaragi and Deguchi(1992)의 실험결과를 아주 잘 재현하고 있다.

이상으로 본 연구에서 이용한 수치해석수법의 타당성과 유효성이 검증되었다고 판단된다.

#### 4. 수치계산 및 고찰

##### 4.1 수치파동수조 및 입사파조건

해저투수층을 지나가는 불규칙파의 파랑감쇠에 대해 검토하기 위해 Fig. 3과 같은 수치파동수조를 고려하였으며, 수치

계산에 이용된 조건은, 투수층의 길이( $W$ )를 1000cm로, 투수층 두께( $d$ )는 25cm 그리고 수심( $h$ )은 20cm로 하여 수치계산하였다. 나머지 입사조건 및 수조형상에 대한 자세한 사항은 Table 2에 나타낸다.

##### 4.2 규칙파와 불규칙파의 해저투수층 상 파랑감쇠

Fig. 5는 규칙파와 불규칙파가 해저투수층 상을 진행하는 경우에 대한 파고의 공간분포를 나타내고 있으며 Fig. 5(a)는 Sand seabed, Fig. 5(b)는 Gravel seabed가 설치된 경우에 대한 파랑감쇠를 나타내고 있다. 그림에서 종축은 규칙파의 경우, 투수층이 시작되는 지점의 파고를 입사파고( $H_i$ )로, 불규칙파의 경우는 투수층이 시작되는 지점의 유의파고( $H_{1/3}$ )를 입사파의 유의파고( $(H_{1/3})_i$ )로 하여 각각 무차원하여 나타내었고 횡축은 거리를 입사파장( $L_i$ )과 입사파의 유의파장( $(L_{1/3})_i$ )으로 무차원하였으며, 그림에서 원(O)은 규칙파를, 사각형(■)은 불규칙파를 각각 나타내고 있다. 그림과 같이 sand와 gravel 모두 규칙파보다 불규칙파에서 파랑감쇠가 더 발생함을 나타내고 있으며, 이러한 경향은 Fig. 6의 주파수의 에너지의 공간분포로부터 설명이 가능하다. 먼저 Fig. 6(b)는 입사파의 유의주기( $(T_{1/3})_i=1.4sec$ 인 불규칙파의 지점별 에너지 분포를 나타내고 있으며, 주파수 스펙트럼을 각 피크에 대응하는 구간으로 분할하여, 즉 장주기성분은  $f < 0.5f_p$ , 기본주파수성분은  $0.5f_p \leq f < 1.5f_p$ , 2배주파수성분은  $1.5f_p \leq f < 2.5f_p$ , 3배 이상의 주파수성분을  $f \geq 2.5f_p$ 로 하여 각각에 포함되는 에너지를 산정하여 나타내고 있다. 또한 총에너지는 그 지점의 모든 주파수에너지의 합을 의미한다. 여기서 각 지점의 에너지는 투과층이 시작되는 지점에서의 에너지로 무차원하였다. 또한, Fig. 6(a)는 규칙파의 경우이나, 비교를 위하여 편의상 불규칙파의 경우와 유사하게 각 주파수 성분에 대응하는 스펙트럼으로 나타내었다.

그림으로부터, Fig. 6(a)의 규칙파에 대한 파랑감쇠는 대부분 기본주파수의 에너지 감쇠가 주원인이 되어 파랑감쇠가 나타나는데 반해, Fig. 6(b)의 불규칙파의 경우는 기본주파수 성분의 주된 파랑감쇠의 요인과 더불어 2배주파수성분 및 3배 이상의 주파수성분의 에너지 감쇠로 인한 파랑에너지 감쇠가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이것이 규칙파에 비해 불규칙파의 경우가 해저투수층 상에서 더욱 큰 파랑감쇠가 발생하는 원인이라고 판단된다. 이러한 규칙파와 불규칙파의 파랑감쇠 차이는 여기에 나타내지는 않았지만 입사주기가 길어질수록 해저투수층 상을 통과하는 규칙파와 불규칙파의 파랑감쇠 차이가 커지는 현상을 확인할 수 있었다.

##### 4.3 입사파 유의주기의 변화에 따른 해저투수층 상 파랑감쇠

Fig. 7은 불규칙파의 유의주기변화에 따른 해저투수층 상 파고의 공간분포를 나타내고 있다. Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)는 각각 Sand와 Gravel seabed에 대한 해석결과를 나타내고 있으며, 종축은 대상지점의 유의파고를 입사파의 유의파고( $(H_{1/3})_i$ )로 무차원하였고, 횡축은 거리를 수심( $h$ )으로 무차원하였다. 또한, 삼각형( $\Delta$ )은 입사파 유의주기가  $(T_{1/3})_i=1.0sec$ , 실선(-)은  $(T_{1/3})_i=1.2sec$  및 마름모( $\blacklozenge$ )는  $(T_{1/3})_i=1.4sec$ 를 각각 나타낸

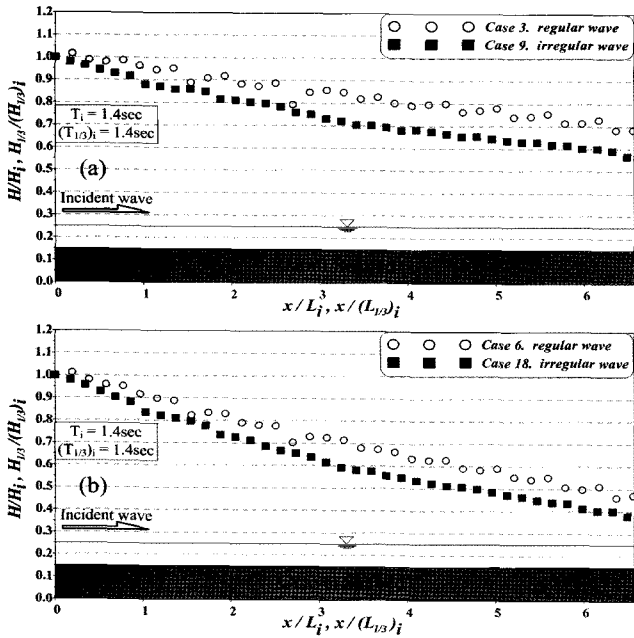


Fig. 5 Comparison of wave damping between regular and irregular waves over a permeable seabed (a) in case of sand seabed; (b) in case of gravel seabed

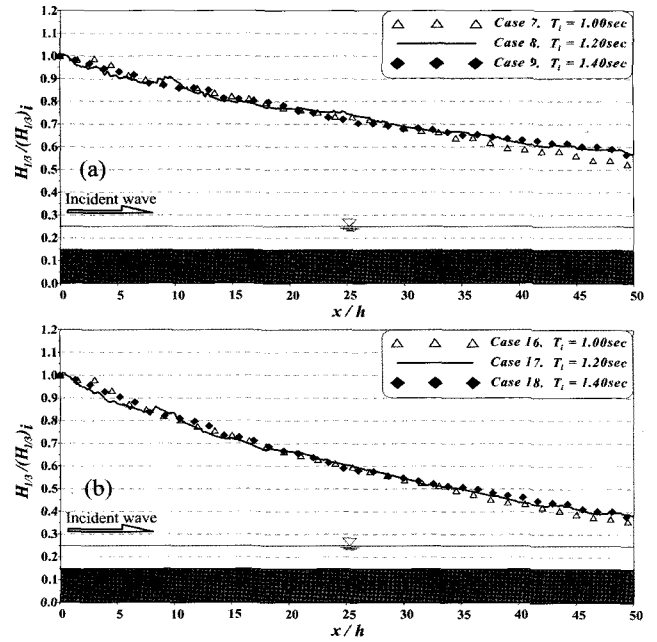


Fig. 7 Comparison of wave damping for change of incident wave period over a permeable seabed (a) in case of sand seabed; (b) in case of gravel seabed

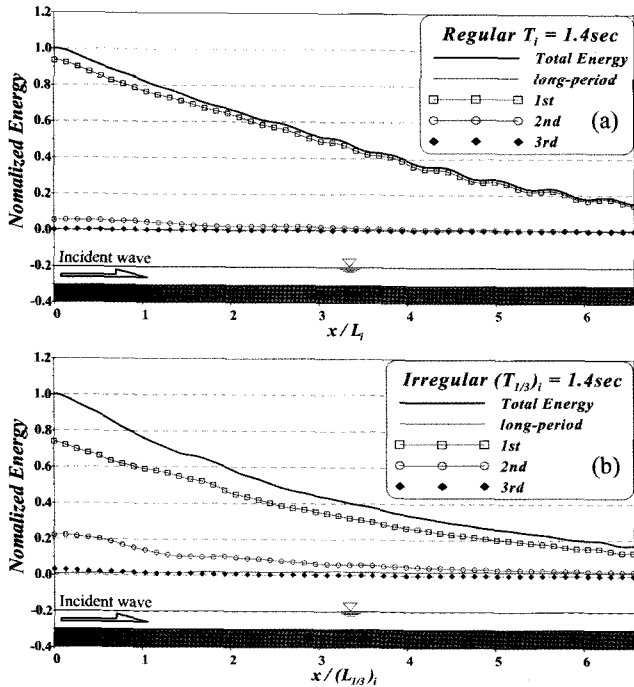


Fig. 6 Comparison of frequency spectrum energy over a gravel seabed (a) in case of regular waves; (b) in case of irregular waves

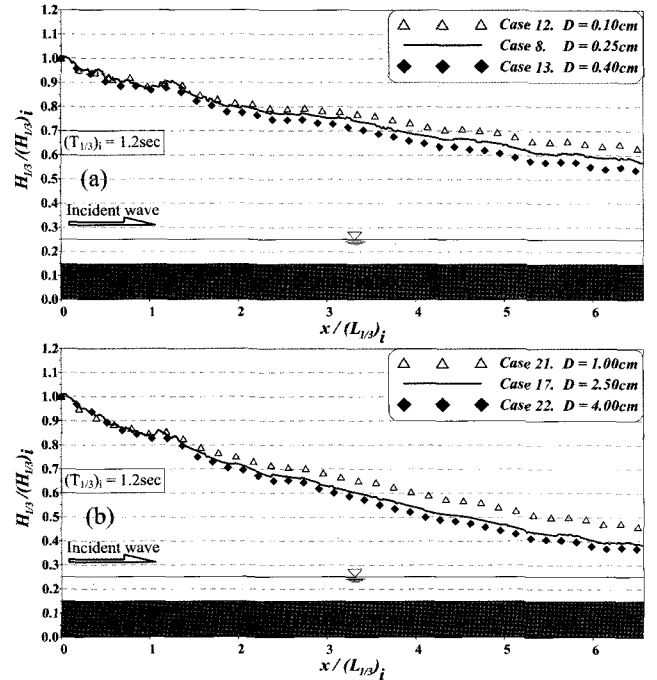


Fig. 8 Comparison of wave damping for change of mean diameter over a permeable seabed (a) in case of sand seabed; (b) in case of gravel seabed

다. 그림에서 나타낸 것과 같이 Sand seabed와 Gravel seabed 상에서  $(T_{1/3})_i = 1.2\text{sec}$ 와  $(T_{1/3})_i = 1.4\text{sec}$ 의 경우에 대한 파랑감쇠가 거의 유사하게 나타나고 있고,  $(T_{1/3})_i = 1.0\text{sec}$ 의 입사 주기가 짧은 경우가 더욱 큰 파랑감쇠가 나타나는 것을 확인

할 수 있다. 이것은 잘 알려져 있는 것과 마찬가지로, 파랑이 투수층을 진행할 경우, 단주기의 파가 장주기의 파에 비해 더욱 파랑감쇠가 발생한다는 것을 잘 반영하고 있는 결과라고 판단된다.

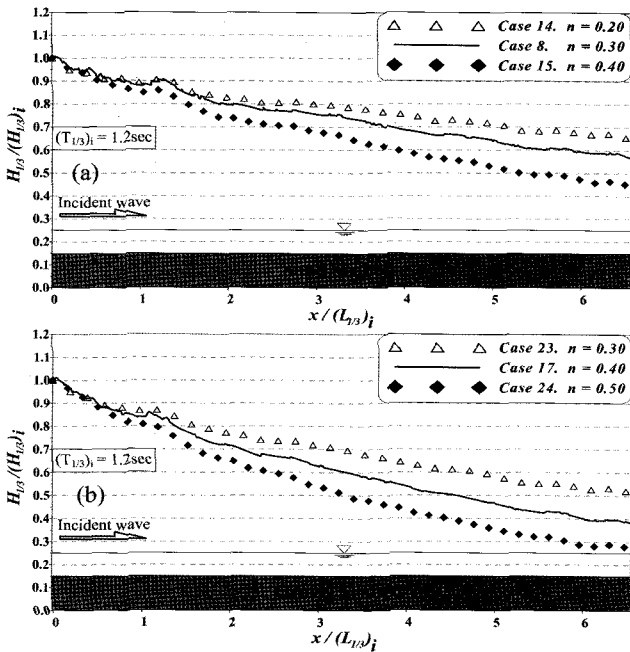


Fig. 9 Comparison of wave damping for change of porosity over a permeable seabed (a) in case of sand seabed; (b) in case of gravel seabed

4.4 투수층 평균입경의 변화에 따른 해저투수층 상 파랑감쇠

Fig. 8은 평균입경 변화에 따른 파고의 공간분포를 나타내고 있다. 또한, Fig. 8(a)와 Fig. 8(b)는 각각 Sand seabed와 Gravel seabed의 해석결과를 나타내고 있으며, Fig. 8(a)에서 삼각형(△)은  $D=0.10\text{cm}$ , 실선(-)은  $D=0.25\text{cm}$  및 마름모(◆)는  $D=0.40\text{cm}$ 인 평균입경을 각각 나타낸다. 그리고 Fig. 8(b)는 삼각형(△)은  $D=1.0\text{cm}$ , 실선(-)은  $D=2.5\text{cm}$  및 마름모(◆)는  $D=4.0\text{cm}$ 인 평균입경을 각각 나타낸다. Fig. 8(a)와 Fig. 8(b)의 Sand seabed와 Gravel seabed에 대한 해석결과를 보면 두 경우에서 모두 평균입경이 클수록 파랑감쇠가 더 발생함을 확인할 수 있다. 이것은 투수성 지반의 평균입경이 커지면 침투유속이 증가하게 되고 이에 따라 유속에 비례하는 투수층 내부의 항력저항(충류 및 난류저항), 즉 해저지반 내부의 마찰저항이 증가하게 되어 평균입경이 작은 경우에 비해 더욱 큰 파랑감쇠가 나타난다고 판단된다.

4.5 투수층 공극률의 변화에 따른 해저투수층 상 파랑감쇠

Fig. 9는 공극률 변화에 따른 파고의 공간분포를 나타내고 있다. Fig. 9(a)와 Fig. 9(b)는 각각 Sand와 Gravel seabed의 경우에 대한 해석결과를 나타내고 있으며, Fig. 9(a)에서 삼각형(△)은  $n=0.2$ , 실선(-)은  $n=0.3$  및 마름모(◆)는  $n=0.4$ 인 공극률을 각각 나타낸다. 그리고 Fig. 9(b)는 삼각형(△)은  $n=0.3$ , 실선(-)은  $n=0.4$  및 마름모(◆)는  $n=0.5$ 인 공극률을 각각 나타낸다. Fig. 9(a)와 Fig. 9(b)인 Sand와 Gravel seabed의 해석결과를 보면 두 경우 모두 공극률이 클수록 파랑감쇠가 더 발생함을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 다음과 같이 설명될 수 있다. 투수성 지반의 공극률이 커지면 그에 따라 가속도에

비례하는 관성저항은 줄어드는데 반해, 단위시간당 투수층 내부를 통과하는 유량이 증가함으로써 항력저항(충류 및 난류저항)은 증가하게 되며, 이 경우 관성저항의 감소분보다 항력저항의 증가분이 더욱 크게 되어 공극률이 작은 경우보다 파랑감쇠가 더욱 크게 발생한다.

5. 결 론

본 연구에서는 해저투수층을 통과하는 불규칙파의 파랑감쇠에 대해 검토하기 위해 투과성지반에 의한 유체저항(관성저항, 충류저항 및 난류저항)을 고려할 수 있는 수치해석기법을 적용하였고 난류모델로서 LES 모델을 도입하여 기존의 수리모형실험과 비교, 검토를 수행하였다. 그 결과 본 연구에서의 수치해석결과가 수리모형 실험치를 잘 재현하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

이상과 같이 검증된 수치해석기법을 이용하여 해저투수층을 통과하는 불규칙파의 파랑감쇠에 따른 수치모의를 통해 얻어진 중요한 사항을 본 논문의 결론으로 하여 아래에 기술한다.

- (1) 해저투수층 상을 진행하는 규칙파와 불규칙파의 파랑감쇠에 대해 비교한 결과, 불규칙파의 경우가 더욱 큰 파랑감쇠가 발생하였으며 주기가 길어질수록 이러한 경향이 더욱 증가하는 것을 확인할 수 있었다.
- (2) 불규칙파의 경우, 입사파의 유의주기가 짧아질수록 Sand seabed 및 Gravel seabed 모두에서 파랑감쇠가 더욱 크게 발생하였다.
- (3) 투수층 평균입경 변화가 파랑감쇠에 미치는 영향을 검토한 결과, 투수성 지반의 평균입경이 커지면 침투유속이 증가하게 되고, 이에 따라 투수층 내부의 마찰저항이 증가하게 되므로, Sand seabed 및 Gravel seabed 모두에서 평균입경이 클수록 파랑감쇠가 더욱 커짐을 확인할 수 있었다.
- (4) 투수층 공극률의 변화가 파랑감쇠에 미치는 영향에 대하여 파고의 공간분포를 살펴 본 결과, Sand seabed 및 Gravel seabed 모두에서 공극률이 클수록 파랑감쇠가 더 발생함을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

허동수, 김창훈, 염경선, 김도삼 (2005). "파·수중방파제·지반의 비선형 동적응답해석에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제19권, 6호, pp 35-43.

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.

Chang, H.H. (2004). Interaction of Water Waves and Submerged Permeable Offshore Structures, Ph. D. thesis, The National Cheng Kung University, Taiwan.

Christensen, E.D. and Deigaard, R. (2001). "Large Eddy Simulation of Breaking Waves", Coastal Eng., Vol 42, pp 53-86.

- Dagan, G. (1979). "The Generalization of Darcy's Law for Nonuniform Flows", *Water Resour. Res.*, Vol 15(1), pp 1-7.
- Ergun, S. (1952). "Fluid Flow through Packed Columns", *Chemical Eng., Japan* Vol 48(2), pp 89-94.
- Goda, Y. (1977). "Numerical Experiments on Statistical Variability of Ocean Waves", *Rept, Port and Harbour Res. Int.*, Japan Vol 16(2), pp 3-26.
- Gu, Z. and Wang, H. (1991). "Gravity Waves over Porous Bottoms", *Coastal Eng.*, Vol 15(5), pp 497-524.
- Hirt, C.W. and Nichols, B.D. (1981). "Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries", *Journal of Computational Physics*, Vol 39, pp 201-255.
- Karunaratna, S.A.S.A. and Lin, P. (2006). "Numerical Simulation of Wave Damping over Porous Seabeds", *Coastal Eng.*, Vol 53, pp 845-855.
- Liu, P.L.F. and Dalrymple, R.A. (1984). "The Damping of Gravity Waves due to Percolation", *Coastal Eng.*, Vol 8(1), pp 33-49.
- Liu, S and Jacob, H.M. (1999). "Non-linear Flows in Porous Media", *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, Vol 86, pp 229-252.
- Mitsuyasu, H. (1970). "On the Growth of Spectrum of Wind-generated Waves(2)-Spectral Shape of Wind Waves at Finite Fetch", *Proc. Japanese Conf. Coastal Eng., JSCE*, pp 1-7.
- Sakakiyama, T. and Kajima, R. (1992). "Numerical Simulation of Nonlinear Wave Interacting with Permeable Breakwater", *Proc. 23rd Coastal Eng., Conf., ASCE, Venice*, pp 1517-1530.
- Savage, R.P. (1953). *Laboratory Study of Energy Losses by Bottom Friction and Percolation*, Beach Erosion Board, Corps of Engineers, Technical Memorandum, No 31.
- Sawaragi, T. and Deguchi, I. (1992). "Waves on Permeable Layers", *Proc. 23rd Coastal Eng., Conf., ASCE, Venice*, pp 1531-1544.
- Schumann, U. (1987). *Direct and Large Eddy Simulation of Turbulence-summary of the State of the Art 1987*, Lecture Series 1987-2006, Introduction to the Modeling of Turbulence, Von Karman Institute for Fluid Dynamics CRhode Saint Genes, Belgium, pp 1-36.
- Smagorinsky, J. (1963). "General Circulation Experiments with the Primitive Equation", *Mon. Weath. Rev.*, Vol 91(3), pp 99-164.
- Ting, C.L., Lin, M.C. and Cheng, C.Y. (2004). "Porosity Effects on Non-breaking Surface Waves over Permeable Submerged Breakwaters", *Coastal Eng.*, Vol 50, pp 213-224.

---

2007년 10월 11일 원고 접수

2007년 11월 27일 최종 수정본 채택