

해안구조물과 파랑상호작용에 관한 수치모델 및 실험 Measurement and Numerical Model on Wave Interaction with Coastal Structure

김 인 철*
In Chul Kim*

요 지 : 최근에 해안구조물의 시공에 있어 친수성 및 방재 기능을 동시에 갖는 구조물이 검토되는 사례가 증가하고 있다. 본 연구의 목적은 비교적 급한 1:5 사면을 가진 해안구조물 위로 전파하는 파랑변형 및 파의 처오름을 예측하는 것이다. 사면 위의 파랑변형 및 처오름을 해석하기 위하여 비선형 친수방정식을 사용하였으며, 투수층 내의 유체운동에는 확장형 Forchheimer의 저항법칙에 근거한 비선형, 비정상 Darcy법칙을 적용하여 규칙파 및 불규칙파를 대상으로 수행되었고, 계산결과는 PBREAK 수치모델의 적용성 및 한계성을 검토하기 위하여 수리모형실험 결과와 비교검토 되었다. PBREAK 수치모델은 사면 위의 파형의 변화를 잘 예측하였으나 질량 및 운동량의 교환이 많이 발생하는 쇄파대 내에서 수리모형실험 결과와 약간의 차이를 보여주었다. 또한 수심평균된 수립자 유속은 파봉 부근을 제외하고 파곡 아래에서 측정한 실험치와 잘 일치하였다.

핵심용어 : 비선형 친수방정식, 확장형 Forchheimer의 저항법칙, 수립자 유속, 투수층, PBREAK 수치모델

Abstract : In recent years, there's been strong demand for coastal structures that have a permeability that serves water affinity and disaster prevention from wave attack. The aim of this study is to examine the wave transformation, including wave run-up that propagates over the coastal structures with a steep slope. A numerical model based on the nonlinear shallow water equation, together with the unsteady nonlinear Darcy law for fluid motion in permeable underlayer and laboratory measurements was carried out in terms of the free surface elevations and fluid particle velocities for the cases of regular and irregular waves over 1:5 impermeable and permeable slopes. The numerical results were used to evaluate the application and limitations of the PBREAK numerical model. The numerical model could predict the cross-shore variation of the wave profile reasonably, but showed less accurate results in the breaking zone that the mass and momentum influx is exchanged the most. Except near the wave crest, the computed depth averaged velocities could represent the measured profile below the trough level fairly well.

Keywords : nonlinear shallow water equation, free surface elevation, fluid particle velocity, permeable underlayer, PBREAK numerical model

1. 서 론

최근에 들어 친수성을 가지면서 경관도 우수한 waterfront공간의 창출을 바라는 도시민들의 사회적 여론 속에서, 해안구조물의 시공에 있어서 방재 및 친수성을 동시에 갖는 구조물이 검토되는 사례가 차츰 증가하고 있다. 이러한 관점에서 투수성 구조물은 친수성을 가질 뿐만 아니라 공학적으로 반사율, 쇄파파고 및 처오름 높이를 감소시키면서 해수의 교환이 자유로우므로 수질정화 효과도 기대할 수 있는 장점이 있다. 앞으로 사회적으로나 공학적으로

유리한 측면을 갖는 투수성 구조물 시공이 많이 검토될 것으로 예상되며 설계에 당면하여서는 수리실험 및 수치모델에 의존할 수 밖에 없다.

그러나 수리모형실험은 비용과 시간 등이 과다하게 소요되는 단점을 가지고 있으므로 이러한 문제점을 해결하기 위하여 처오름 현상을 재현할 수 있는 수치모델이 다수의 연구자들에 의해 꾸준히 연구·개발되어져 왔으나, 투수성을 가진 사면에서 쇄파조건 및 쇄파 후의 운동량 감소에 대한 이론이 아직까지 명확하게 규명되지 않아 투수성 사면에서 파랑변형, 처오름 그리고 반사특성을 정확하

*동서대학교 건축·토목공학부(Division of Architecture and Civil Engineering, Dongseo University, Busan 617-716, Korea, cvkic@dongseo.ac.kr)

게 재현할 수 없는 것이 현실이다.

거친 불투수성 경사면의 쇄파 및 포말대에서 파랑의 상호작용을 해석하기 위하여 Wurjanto and Kobayashi(1991)는 수심평균화된 비선형 천수방정식에 기초한 수치모델인 RBREAK 수치모델을 제안하였다. Raubenheimer and Guza (1995)는 Scripps 해변에서 관측한 처오름의 변동을 RBREAK 수치모델로 정확히 예측할 수 있음을 보여주었으며, 특히 최근에는 Scripps 해변의 쇄파 및 포말대에서 관측한 수위 변동과 해안선 종단방향의 유속 변화와 RBREAK 수치모델로 예측한 계산치로 유속 및 수면변위의 비선형의 특징을 검토하였다(Raubenheimer, 2002).

투수성 사면에서의 파랑변형에 대한 최근 수치모델의 연구결과를 보면 出口와 森脇(1996)은 투수층 사면 위에서는 비선형 천수 방정식, 투수층 내의 유체운동에 대해서는 비선형, 비정상 Darcy법칙을 적용하여 수치해를 구했으나 투수층 내외의 연직방향의 질량 및 운동량 교환을 무시하여 해석하였다. 한편 김인철과 정중수(2000)는 비교적 깊은 수심까지 적용 가능한 Nwogu(1993)의 확장형 Boussinesq 방정식에 쇄파에 의한 운동량 감쇠항이 고려된 식을 기본식으로 하고, 투수층 내외를 가상의 공극률을 가진 사면으로 간주하여 투수층 내부의 유체운동을 사면 위의 파랑변형에 포함시켜 연속적으로 계산하였으나 상대적으로 급한 경사의 사면에서 발생하는 비선형성이 강한 파랑변형을 제대로 재현시키지 못하는 단점이 있다. 따라서 투수성을 갖는 구조물에서 발생하는 비선형 파랑변형 및 처오름 현상의 재현성을 높이고 투수층 내외의 질량 및 운동량 교환을 고려하여 보다 상세히 해석하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 투수층 위에서는 비선형 천수방정식을 기본으로 하여 투수층 내의 유체운동에는 확장형 Forchheimer의 저항법칙에 근거한 비정상, 비선형 Darcy법칙을 적용하고 투수층 사면의 경계층에서 연직방향의 질량 및 운동량 교환을 고려하여 투수성 구조물 사면 위의 파랑변형 및 처오름 해석할 수 있는 PBREAK 수치모델을 사용한다. 또한 수치모델을 비교적 급한 불투수성 및 투수성 사면에 적용하여 수면변위, 처오름높이, 파고 및 수립자의 유속성분을 예측하고 수리모형실험의 예측결과와 동수역학적 관점에서 비교분석한다.

2. 실험

2.1 실험장치

실험은 동서대학교 수리실험실에 있는 길이 35 m, 폭 0.8 m, 그리고 높이 1.2 m인 조파수조에서 수행되었다. 조

파관은 피스톤 형태로 규칙파 및 불규칙파를 조파시킬 수 있으며 PC로 조파기를 제어시킨다.

조파수조 내에 제작된 해저경사면의 형태는 조파관으로부터 13 m까지는 60 cm의 일정수심이며 그 후에는 1:25로 구성되어 있으며, 20 m 떨어진 지점에서 1:5의 불투수성 및 투수성 경사면이 시작된다. 불투수성 경사면은 불투수층 베니어판으로 제작하고, 경사면의 표면은 대표직경 4.0 cm의 자갈로 피복하여 경사면의 조도 및 안정성을 확보하였다. 그리고 투수성 경사면의 하부 투수층은 대표직경 2.7 cm의 사석으로 제작하고, 피복층은 비교적 큰 파랑에 안정성이 확보되도록 대표직경 4.0 cm의 자갈을 피복하였다.

2.2 계측기기 및 자료 분석

Fig. 1과 같이 6개의 지점에서 용량식 파고계를 사용하여 각각의 파고계에서 20 Hz로 6400개의 수면변위자료를 독취하였다.

조파관으로부터 한 파장 떨어진 지점부근에 위치한 두 개의 파고계는 입반사파를 분리하여 입사파 조건을 계측하는 용도로 사용하였으며, 1:5 경사면을 따라 P1에 위치한 파고계는 쇄파대 외의 수면변위를 계측하며, P2는 쇄파가 시작되는 지점, P3은 난류 bore형태로 옮겨가는 천이영역에 속하며 그리고 P4는 툽니 형태의 파형이 잘 발달된 난류 bore상태인 쇄파영역에 해당된다. 또한 그곳에 위치한 파고계는 쇄파의 시작점, 천이영역 및 쇄파대 내의 수면변위를 계측하기 위하여 각각 사용되었다.

Fig. 1에 있는 두 개의 경사면을 따라 비쇄파대의 한 지점에서 electro-magnetic current meter(EMCM)를 사용하여 각각 20 Hz로 6400개의 수립자 유속성분을 독취하였다. 본 실험에서 사용한 EMCM 유속계는 주파수 응답(frequency response)이 15Hz로 난류 성분이 탁월한 쇄파영역의 수립자 유속을 정확히 계측하기는 불가능하며 또한 센서 검지부(probe) 아래에 일정 수심 이상을 확보하여야 만족스러운 계측결과를 얻을 수 있는 단점이 있다.

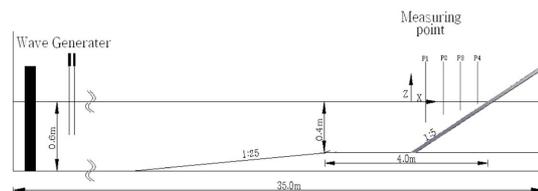


Fig. 1. Sketch of experimental setup.

연속적으로 독취한 수면변위 및 유속성분의 시계열 중에서 50주기의 자료를 추출하여 위상평균법(phase-averaging method)을 통하여 규칙적으로 반복되는 방대한 실험자료를 한 주기의 값으로 대표시켰고, 계측한 실험치에 내포되어 있는 작은 불규칙성분을 제거시켰다(Cox et al., 1995).

2.3 규칙파 및 불규칙파의 조파

규칙파의 입사파는 식 (1)과 같이 Stokes 2nd order wave로 한다.

$$\eta(t) = \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T}\right) + \left(\frac{\pi H^2}{8L}\right) \frac{\cosh(2\pi d/L)}{\sinh^3(2\pi d/L)} \quad (1)$$

여기서 H 는 입사파고, T 는 입사주기, L 는 파장, d 는 입사지점에서의 수심이다.

그리고 불규칙파는 식 (2)와 같이 Goda(1985)에 의해 수정된 Bretschneider-Mitsutatsu spectrum을 사용하였다.

$$S(f) = 0.205 H_{1/3}^2 T_{1/3}^4 f^{-5} \exp[-0.75(T_{1/3} f)^4] \quad (2)$$

여기서 $S(f)$ 는 파랑에너지 밀도함수, f 는 주파수를 나타내며, $H_{1/3}$ 및 $T_{1/3}$ 은 각각 유의파고 및 유의주기를 나타낸다.

3.0 이 론

3.1 수치모델

3.1.1 투수층 내의 흐름에 관한 기본방정식

Fig. 2(a)에 도시한 투수계수가 비교적 큰 투수층 내의 비정상, 비선형 흐름의 동수경사는 확장형 Forchheimer의 저항법칙에서 이류가속도항을 추가하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$I = \alpha u_p + \beta u_p |u_p| + S \frac{\partial u_p}{\partial t} + \frac{u_p \partial u_p}{n_p^2 \partial x} \quad (3)$$

여기서, u_p 는 투수층 내의 수심평균된 유량유속, n_p 는 공극률, α 은 층류 저항계수, β 은 난류 저항계수, S 는 부가질량의 현상을 포함하는 관성 저항계수이다.

식 (3)에 나타난 α , β 및 S 를 Madsen and White(1976)에 의해 경험적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \alpha_0 \frac{(1-n_p)^2 \nu}{n_p^2 d_p^2} \quad (4)$$

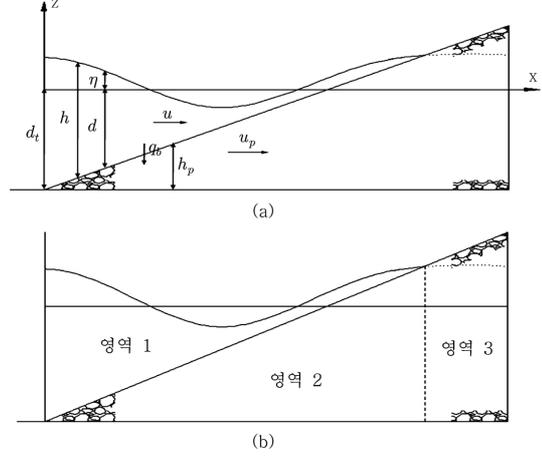


Fig. 2. Definition sketch for numerical model for permeable coastal structure.

$$\beta = \beta_0 \frac{1-n_p}{n_p^3} \frac{1}{d_p} \quad (5)$$

$$S = \frac{1 + C_m \frac{1-n_p}{n_p}}{n_p} \quad (6)$$

여기서, α_0 와 β_0 는 투수성 재료의 형태에 의존하는 무차원 상수이며, d_p 는 투수성 재료의 대표입경, ν 는 동점성계수, C_m 는 부가 질량계수이다.

식 (3)의 수평방향의 압력경사를 투수층 내의 흐름이 연직방향으로 정수압 분포로 가정하여 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$I = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (7)$$

여기서, p 는 투수층 내의 압력강도, η 는 수면변위이다.

식 (3)에 식 (7)과 투수층에 관한 연속방정식 식 (8)을 적용하면 식 (9)과 같은 투수층 내의 흐름에 관한 운동량 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial h_p}{\partial t} + \frac{1}{n_p} \frac{\partial (h_p u_p)}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

$$\left[1 + \frac{(n-n_p)}{n_p} C_m \right] \frac{\partial (h_p u_p)}{\partial t} - \frac{(1-n_p)}{n_p} C_m u_p \frac{\partial h_p}{\partial t} + \frac{1}{n_p} \frac{\partial (h_p u_p^2)}{\partial x} + g n_p h_p \frac{\partial \eta}{\partial x} = -n_p h_p (\alpha + \beta |u_p|) u_p \quad (9)$$

3.1.2 PBREAK의 기본방정식

Fig. 2(b)에서 도시한 것과 같이 유체영역(영역 1), 유체 영역과 투수층영역의 흐름이 서로 상호작용하는 영역(영역 2) 그리고 투수층 내의 흐름만 존재하는 영역(영역 3)으로 분리하여 해석한다.

투수성 사면 위의 유체영역에서는 사면에 입사하는 파랑에 대하여 비선형 파랑변형 및 처오름을 재현시켜야 하므로 파랑의 강한 비선형성을 고려할 수 있는 비선형 천수방정식을 적용한다. 그리고 유체영역과 투수층영역이 서로 중첩되어 흐름이 서로 상호작용하는 영역에서는 연직 방향의 질량 및 운동량 교환을 고려한 운동량방정식을 적용하며, 투수층 내의 흐름만 존재하는 영역에서는 앞서 기술한 식 (9)에서 아직 정확히 이론적으로 확립되지 않는 부가질량계수를 무시하고 사용한다.

$$\text{영역 1 : } \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu) = -q_b \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hu) + \frac{\partial}{\partial x}(hu^2) = -gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{2} f |u|u - u_b q_b \quad (11)$$

$$\text{영역 2 : } \frac{\partial}{\partial x}(h_p u_p) = q_b \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(h_p u_p) + \frac{1}{n_p} \frac{\partial}{\partial x}(h_p u_p^2) - u_b q_b \\ = -gn_p h_p \frac{\partial \eta}{\partial x} - n_p h_p (\alpha + \beta |u_p|) u_p \end{aligned} \quad (13)$$

$$\text{영역 3 : } \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{n_p} \frac{\partial}{\partial x}(h_p u_p) = 0 \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(h_p u_p) + \frac{1}{n_p} \frac{\partial}{\partial x}(h_p u_p^2) - u_b q_b \\ = -gn_p h_p \frac{\partial \eta}{\partial x} - n_p h_p (\alpha + \beta |u_p|) u_p \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 h 는 유체영역의 수심, u 는 유체영역의 수심평균된 유량유속, q_b 는 투수층 내로 침투하는 단위면적당 유량, 그리고 f 는 피복층의 마찰계수이다. 또한 u_b 는 투수층 경계에서의 수평방향 유속성분이며 다음 식으로 주어진다.

$$u_b = \begin{cases} u & (q_b \geq 0) \\ \frac{u}{n_p} & (q_b < 0) \end{cases} \quad (16)$$

식 (10)~(15)을 정규화(normalizing) 시키기 위하여 대표파고 및 대표주기를 사용하여 아래와 같이 매개변수와 무차원량을 정의한다.

$$t' = \frac{t}{T} \quad (17)$$

$$x' = \frac{x}{T\sqrt{gH}}, \quad \eta' = \frac{\eta}{H} \quad (18)$$

$$h' = \frac{h}{H}, \quad h'_p = \frac{h_p}{H} \quad (19)$$

$$d' = \frac{d}{H}, \quad d'_t = \frac{d_t}{H} \quad (20)$$

$$u' = \frac{u}{\sqrt{gH}}, \quad u'_b = \frac{u_b}{\sqrt{gH}} \quad (21)$$

$$u'_p = \frac{x}{T\sqrt{gH}}, \quad q'_b = \frac{q_b}{p_u H/T} \quad (22)$$

$$\sigma' = T \sqrt{\frac{g}{H}}, \quad f' = \frac{1}{2} \sigma f \quad (23)$$

식 (10)~(15)에 있는 물리량을 그들에 대응하는 식 (17)~(23)을 사용하여 다음과 같은 정규화된 무차원량의 기본방정식으로 나타낼 수 있으며 여기서 부터 정규화된 무차원량을 나타내는 '는 편의상 생략하여 표시한다.

$$\text{영역 1 : } \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial m}{\partial x} + p_q q_b = 0 \quad (24)$$

$$\frac{\partial m}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(mu + \frac{1}{2} h^2 \right) + \theta h + f |u|u + p_q u_b q_b = 0 \quad (25)$$

$$\text{영역 2 : } \frac{\partial}{\partial x}(h_p u_p) = q_b \quad (26)$$

$$\begin{aligned} p_u \left[\frac{\partial}{\partial t}(h_p u_p) + p_u \frac{\partial}{\partial x}(u_p u_p^2) - u_b q_b \right] \\ = -h_p \frac{\partial \eta}{\partial x} - h_p u_p (\mu + |u_p|) \end{aligned} \quad (27)$$

$$\text{영역 3 : } \frac{\partial \eta}{\partial t} + p_u \frac{\partial}{\partial x}(h_p u_p) = 0 \quad (28)$$

$$\begin{aligned} p_u \left[\frac{\partial}{\partial t}(h_p u_p) + p_u \frac{\partial}{\partial x}(u_p u_p^2) \right] + h_p \frac{\partial \eta}{\partial x} + h_p u_p (\mu + |u_p|) = 0 \end{aligned} \quad (29)$$

$$\text{여기서, } m = uh \text{이고,} \quad (30)$$

$$u_b = \begin{cases} u & (q_b \geq 0) \\ p_u u_p & (q_b < 0) \end{cases} \quad (31)$$

$$p_q = n_p p_u \quad (32)$$

$$p_u = \sqrt{\frac{n_p d_p}{\beta_0 (1 - n_p) T \sqrt{gH}}} \quad (33)$$

$$\mu = \frac{\alpha_0(1-n_p)^2 v}{\beta_0 \rho_u d_p \sqrt{gH}} \quad (34)$$

으로 표현되어진다.

3.2 수치해석

영역 1의 흐름은 explicit dissipative Lax-Wendroff 방법으로 해석하며, 영역 2와 영역 3의 흐름은 two-step Lax-Wendroff 방법의 일종인 MacCormack 방법으로 수치 적분한다. 유한차분법에 관한 보다 상세한 내용은 Wurjanto and Kobayashi(1992)의 PBREAK 보고서에 기술되어 있으므로 여기서는 생략하기로 한다.

3.2.1 외해경계

계산영역의 적절한 외해경계를 유도하기 위하여 식(24)와 (25)를 다음과 같이 characteristic 형태로 표현할 수 있다(Kobayash et al., 1984).

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{\partial\alpha}{\partial t} + (u+c)\frac{\partial\alpha}{\partial x} = -\theta - \frac{f|u|u}{h}; \frac{dx}{dt} = u+c \quad (35)$$

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{\partial\beta}{\partial t} + (u-c)\frac{\partial\beta}{\partial x} = \theta + \frac{f|u|u}{h}; \frac{dx}{dt} = u-c \quad (36)$$

여기서 θ 는 사면의 기울기, $c = \sqrt{h}$ 이고, $\alpha = u+2c$, $\beta = -u+2c$ 이다.

외해경계에서 $t^* = t + \Delta t$ 일때 총 수심 h_1^* 및 수심평균

유속성분 u^* 를 다음과 같이 근사적으로 해석할 수 있다.

$$h_1^* = d_t + \eta_i^* + \eta_r^* \quad (37)$$

$$u_1^* = 2\sqrt{h_1^*} - \beta_1^* \quad (38)$$

여기서 d_t 는 외해경계에서 정수면 아래의 수심이고, $\eta_r^* = \frac{1}{2}\sqrt{d_t}\beta_1^* - d_t$ 로 계산한다. β_1^* 는 식 (36)에서 $f=0$ 으로 하고 유한차분하여 구하면 된다.

3.2.2 사면전단의 이동경계

파의 처오름 및 처내림의 현상은 사면 위의 해안선의 이동경계로 처리한다. 사면 위에 있는 해안선은 수심이 이론적으로 0이나, 계산적으로 최소수심으로 정의하여 해안선 부근의 마지막 격자점에서 외삽법으로 계산된 수심이 최소수심보다 크면 해안선은 위로 이동하고, 작으면 해안선을 아래로 이동시키는 방법을 사용한다(Wurjanto and Kobayashi, 1991).

4. 결과 및 고찰

Figs. 2(a) 및 (b)에 도시한 투수성 사면 위에 수면변위 및 수립자의 유속변화를 수리실험 결과와 비교하기 위하여 PBREAK 수치모델을 사용하였으며, 한편 불투수성 사면의 계산은 Fig. 2(b)에 도시한 사면의 영역 1에서 $q_b=0$, $u_b=0$ 로 하여 수치모델을 적용시켰다(Kobayashi and Poff,

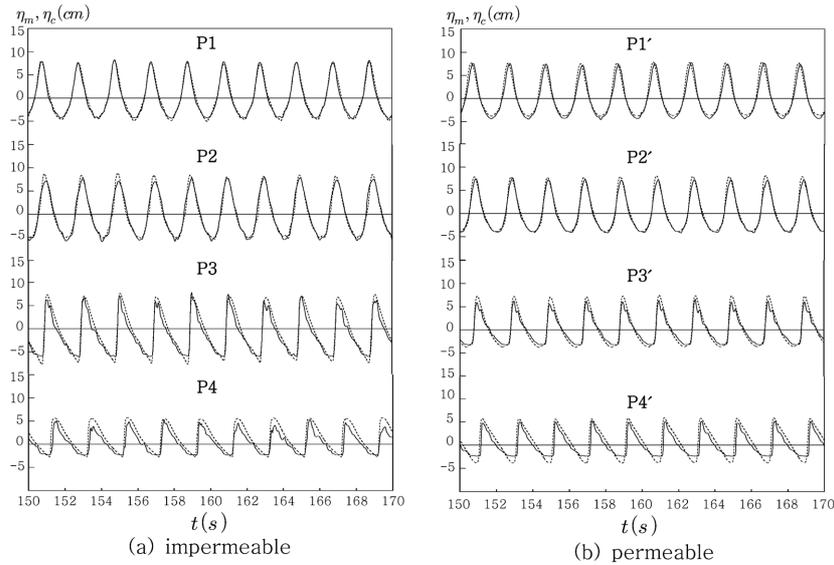


Fig. 3. Temporal variations of free surface elevation for regular waves, measured, η_m (—), computed, η_c (---).

1994).

수치실험 조건으로서 사면 시작점의 수심은 $d = 0.4 \text{ m}$ 그리고 사면경사는 1:5로 하고, 공간 격자 간격 및 시간 격자 간격은 $\Delta x = 0.01 \text{ m}$, $\Delta t = 0.05 \text{ sec}$ 이며 사면의 마찰계수는 0.01, 해안선으로 정의되는 최소수심은 $\delta = 0.003 \text{ cm}$ 로 하였다. 사면의 투수층의 공극률은 0.486으로 하였으며 층류 및 난류 저항계수에서 투수층 재료의 형상과 관련있는 무차원 계수 α_0 , β_0 는 각각 1140 및 2.7로 하여 투수층을 구성하는 입자의 형상으로 대표시켰다(Wurjanto and Kobayashi, 1992).

Figs. 3(a) 및 (b)는 사면경사 1:5의 불투수성 및 투수성 사면에서 수면변위의 마지막 10파에 대한 시계열의 계산치 및 실험치를 각각 보여준다. 쇄파대 외에 해당되는 영역 P1 및 쇄파가 시작되는 지점 P2에서는 계산치 및 실험치가 잘 일치하고, 천이영역인 P3 및 쇄파대 내의 영역 P4에서는 불규칙적인 파형을 정확히 재현하지는 못하나, 툽니형태의 파형 및 위상을 비교적 잘 예측한다. 그리고 투수성 사면의 쇄파대 지점에서는 파형의 진폭에서 많은 차이를 보여주고 있다. 이러한 결과는 투수층 내외의 질량 및 운동량 교환율이 가장 많이 발생하는 쇄파대에서 PBREAK 수치모델이 실제 현상을 정확히 재현시키지 못한 결과이다.

Figs. 4(a) 및 (b)는 불규칙파의 입사파 조건에서 추출한 수면변위의 마지막 10파에 대한 시계열의 계산치 및 실험

치를 나타내며, 계산결과는 투수성 및 불투수성 사면 위의 각 지점별로 전반적으로 규칙파의 결과와 비슷한 경향을 보여준다.

Figs. 5(a) 및 (b)는 불투수성 및 투수성 사면 위에서 위상평균된 수면변위의 시계열 및 표준편차의 포락선을 각각 나타낸다. 쇄파대의 P1에서 파형의 반복성을 나타내는 표준편차의 포락선이 작게 나타나고 쇄파가 시작되는 P2에서 쇄파의 불규칙성 때문에 표준편차의 포락선에 약간의 변동이 있음을 알 수 있다. 정현파형에서 난류 bore형태로 변하는 천이영역인 P3 및 쇄파대 내의 P4에서 bore의 저면 및 파봉에서 표준편차의 포락선이 가장 크게 나타난다. 각 지점별 표준편차 포락선의 전체적인 경향은 불투수성 및 투수성 사면에서 비슷한 결과를 보여주나 정량적으로 투수성 사면에서 표준편차의 포락선이 불투수성 사면보다 훨씬 작게 나타난다.

Table 1과 Table 2는 위상평균된 수면변위의 해안선에 종단방향으로 파고(H), 평균수위($\bar{\eta}_a$), 수면변위의 최소 및 최대값($[\eta_a]_{\min}$, $[\eta_a]_{\max}$), 표준편차의 시간평균($\bar{\sigma}_\eta$) 및 표준편차의 최소 및 최대값($[\sigma_\eta]_{\min}$, $[\sigma_\eta]_{\max}$)을 나타낸다. 많은 연구자들이 관측한 것과 같이 파고와 평균수위의 하강(set-down)은 쇄파 전까지 증가하고, 쇄파 후에 파고는 감소하며 평균수위는 상승하는 결과를 보여준다.

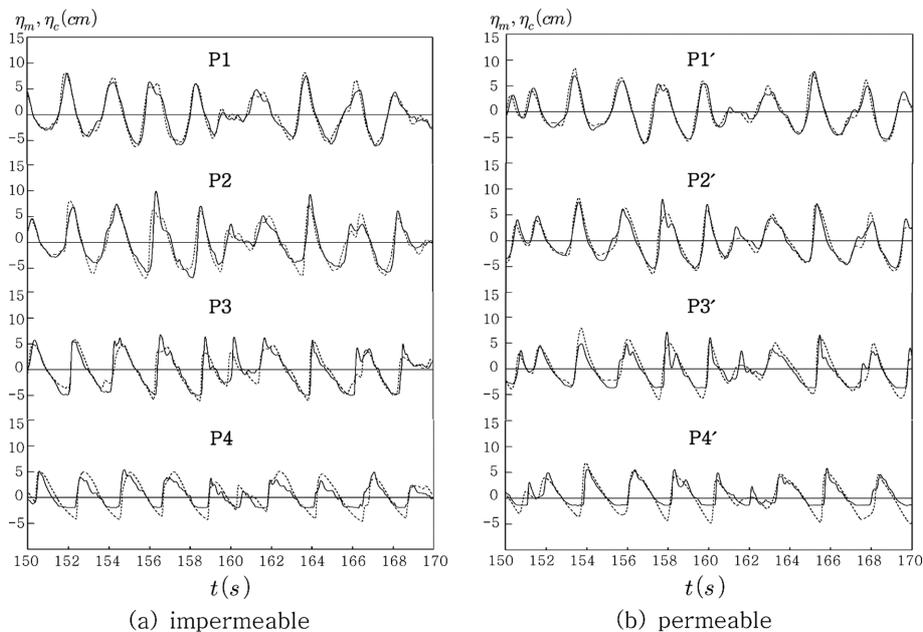


Fig. 4. Temporal variations of free surface elevation for irregular waves, measured, η_m (—), computed, η_c (---).

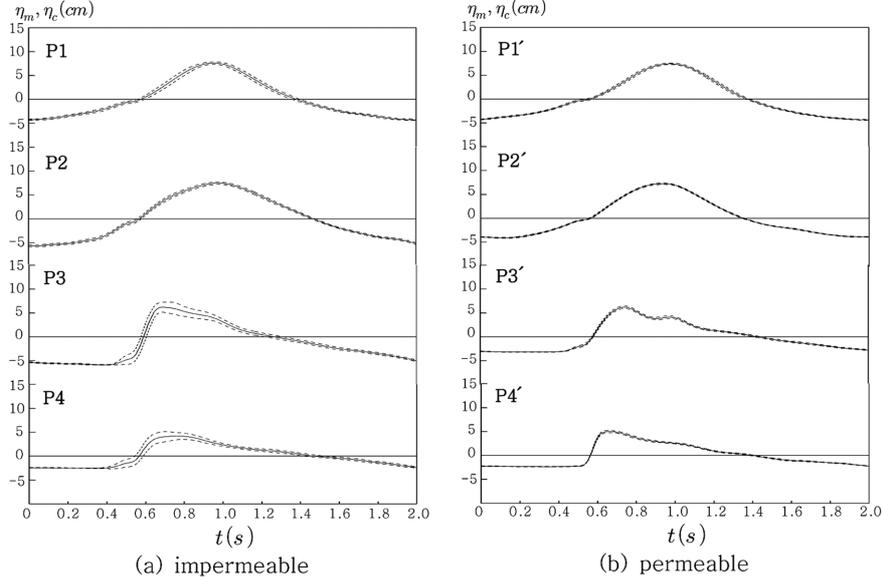


Fig. 5. Temporal variations of phase-averaged free surface elevation for regular waves, measured, η_m (—), computed, η_c (---).

Table 1. Phase-averaged free surface elevation statistics on an impermeable slope

| Measuring pt. | x (cm) | d (cm) | H (cm) | $\bar{\eta}_a$ (cm) | $[\eta_a]_{\min}$ (cm) | $[\eta_a]_{\max}$ (cm) | $\bar{\sigma}_\eta$ (cm) | $[\sigma_\eta]_{\min}$ (cm) | $[\sigma_\eta]_{\max}$ (cm) |
|---------------|----------|----------|----------|---------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| P1 | 50 | 30.0 | 11.99 | -0.01 | -4.30 | 7.70 | 0.30 | 0.13 | 0.61 |
| P2 | 100 | 20.0 | 13.24 | -0.04 | -5.72 | 7.52 | 0.25 | 0.12 | 0.38 |
| P3 | 130 | 14.0 | 12.21 | -1.40 | -5.90 | 6.31 | 0.45 | 0.06 | 1.89 |
| P4 | 170 | 6.0 | 6.77 | 0.07 | -2.53 | 4.23 | 0.35 | 0.04 | 1.37 |

Table 2. Phase-averaged free surface elevation statistics on a permeable slope

| Measuring pt. | x (cm) | d (cm) | H (cm) | $\bar{\eta}_a$ (cm) | $[\eta_a]_{\min}$ (cm) | $[\eta_a]_{\max}$ (cm) | $\bar{\sigma}_\eta$ (cm) | $[\sigma_\eta]_{\min}$ (cm) | $[\sigma_\eta]_{\max}$ (cm) |
|---------------|----------|----------|----------|---------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| P1' | 50 | 30.0 | 11.82 | 0.26 | -4.37 | 7.45 | 0.10 | 0.09 | 0.34 |
| P2' | 100 | 20.0 | 11.41 | 0.01 | -4.09 | 7.32 | 0.12 | 0.06 | 0.18 |
| P3' | 130 | 14.0 | 9.59 | -0.07 | -3.16 | 6.43 | 0.15 | 0.02 | 0.39 |
| P4' | 170 | 6.0 | 7.38 | 0.04 | -2.34 | 5.04 | 0.11 | 0.03 | 0.31 |

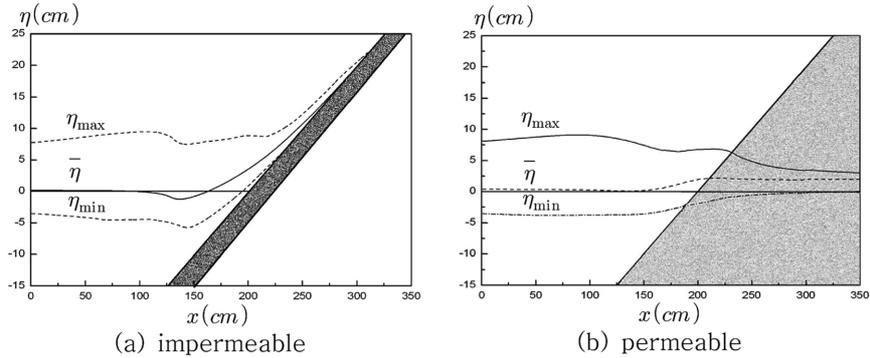


Fig. 6. Computed spatial variations of free surface elevation for regular waves.

Figs. 6(a) 및 (b)는 불투수성 및 투수성 사면에서 해안선의 중단방향으로 평균수위 및 수면변위의 최대, 최소값

을 나타낸다. 쇄파 전의 파고분포는 불투수성 및 투수성 사면에서 유사한 결과를 보였으나, 쇄파 후의 파고 및 최대

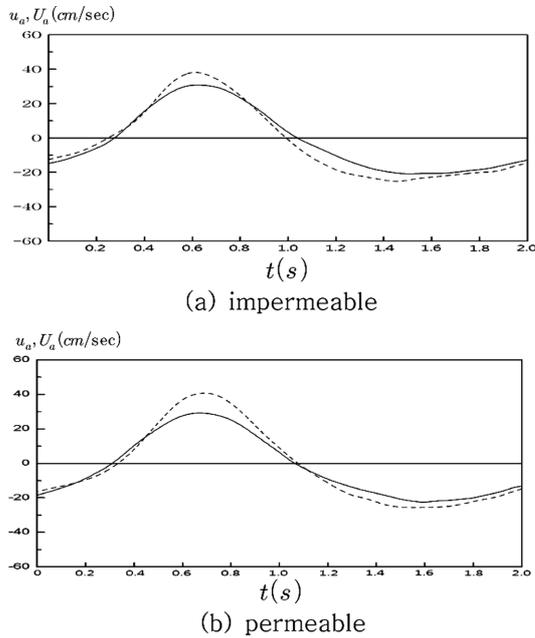


Fig. 7. Temporal variations of phase-averaged horizontal velocity: measured, u_a (—), computed, U_a (---) at $z = -15$ cm.

치오름 높이는 투수성 사면에서 훨씬 감소되어 나타난다.

Figs. 7(a) 및 (b)는 불투수성 및 투수성 사면 위의 비쇄 파대에서 측정한 실험치 및 수치모델로 계산된 수심평균 유속의 위상평균된 시계열이며, Table 3은 위상평균된 실험치와 계산치 유속의 시간평균 및 최대, 최소값을 나타낸다. 실험결과를 비교해 보면, 투수성 사면 위의 유속이 불투수성 사면보다 작게 나타나나 전반적인 경향은 공통적으로 파봉부근의 위상에서 계산된 수심평균된 유속은 파곡이 나타나는 수위의 아래 수심에서 측정한 실험치 보다 크게 나타나며, 파곡부근의 위상에서는 계산치와 실험치가 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 이는 파동 유속의 수평방향 유속크기는 바닥경계층을 제외하고 수심방향으로 파곡까지는 거의 일정하게 나타나며 파곡 위에서 크게 나타나기 때문이다.

Figs. 8(a) 및 (b)는 해안선 종단방향의 수심평균된 유속의 시간평균 및 최대, 최소값을 나타낸다. 불투수성 사면에서 계산된 수심평균 유속의 시간 평균치(undertow)는 사

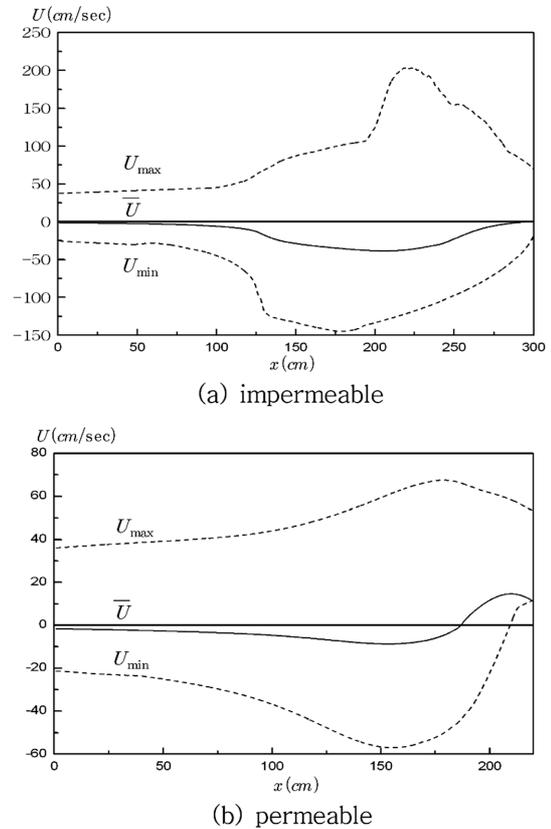


Fig. 8. Computed spatial variations of depth-averaged velocities for regular waves.

면 위의 급한 동수경사 때문에 투수성 사면의 결과보다 크게 나타난다.

5. 결 론

불투성 및 투수성의 비교적 급한 사면을 대상으로 파랑과 구조물의 상호작용을 검토하기 위하여 수리모형실험 및 수치모델을 적용한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 비선형 천수방정식에 기초한 PBREAK 수치모델은 비교적 급한 경사면 위의 규칙파 및 불규칙파에 대하여 수면변위 및 수립자 유속의 시간적 변화를 비교적 정확히 예측할 수 있다.

Table 3. Comparison of phase-averaged measured and computed velocities

| Slope | Measuring pt. (cm) | Measurement | | | PBREAK | | |
|-------------|--------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| | | $[u_a]_{max}$ (cm/sec) | $[u_a]_{mean}$ (cm/sec) | $[u_a]_{min}$ (cm/sec) | $[U_a]_{max}$ (cm/sec) | $[U_a]_{mean}$ (cm/sec) | $[U_a]_{min}$ (cm/sec) |
| impermeable | $x=50, z=-15$ | 31.02 | -1.85 | -21.06 | 38.61 | -2.90 | -25.56 |
| permeable | $x=50, z=-15$ | 22.66 | -4.52 | -20.67 | 32.06 | -4.70 | -23.75 |

2) 위상평균된 수면변위 표준편차는 쇄파대 외에서는 파형의 규칙적인 반복성 때문에 작으나, 천이영역 및 쇄파대 내에서는 파형의 불규칙성으로 크게 나타나며, 특히 난류 bore 형태로 변하는 천이영역에서 가장 크게 나타난다.

3) 투수층 내외의 질량 및 운동량 교환율이 가장 많이 발생하는 쇄파대에서 PBREAK 수치모델은 실제 현상을 정확히 재현시키지는 못한다.

4) 불투수성 사면에서 예측된 수심평균된 undertow는 불투수성 사면 위의 급한 동수경사 때문에 투수성 사면의 수심평균된 undertow보다 크게 나타난다.

참고문헌

- 김인철 (2006). 투수성 흐름을 고려한 투수성 구조물의 파랑변형에 관한 수치적 해석, 한국해양공학회지, 20(6), 35-40.
- 김인철, 정중수 (2000). 투수성 사면에서의 파의 처오름 및 반사에 관한 수치적 해석. 대한토목학회 논문집, 20(5-B), 755-763.
- Cox, D.T., Kobayashi, N. and Okayasu, A. (1995). Experimental and numerical modeling of surf zone hydrodynamics, Research Report, CACR-95-07, Center for Applied Coastal Research Univ. of Delaware, Newark, Delaware.
- Goda, (1985). Random seas and design of maritime structure. University of Tokyo Press, Tokyo, Japan.
- Kobayashi, N., DeSilva G.S. and Watson K.D. (1984). Wave transformation and swash oscillation on gentle and steep slopes, J. Geophys. Research, 94(C1), 951-966.
- Kobayashi, N. and Poff, M. T. (1994). Numerical model RBREAK2 for random wave on impermeable coastal structure and beaches. Research Report, CACR-94-12, Center for Applied Coastal Research, University of Delaware, Newark, Delaware.
- Maden, O. S. and White, S. M. (1976). Energy dissipation on a rough slope. J. Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, ASCE, 102(WWI), 31-48.
- Nwogu, O. (1993). Alternative form of Boussinesq equations for nearshore wave propagation. J. Waterway, Port, Coast and Ocean Engineering, 119, 618-638.
- Raubenheimer, B. (2002). Observation and predictions of fluid velocities in the surfand swash zones, J. Geophys. Research, 107, 11_1-11_4.
- Raubenheimer, B. and Guza, R.T. (1995). Swash on gently sloping beach, J. Geophysical Research, 100(C5), 8751-8760.
- Wurjanto, A. and Kobayashi, N. (1991). Numerical model for random waves on impermeable coastal structures and beaches, Research Reoprt, CACR-91-05, Center for Applied Coastal Research, University of Delaware, Newark, Delaware.
- Wurjanto, A. and Kobayashi, N. (1992). Numerical model for random waves on permeable coastal structures. Research Report, CACR-92-02, Center for Applied Coastal Research, University of Delaware, Newark, Delaware.
- 出口一郎, 森脇清 (1996). 透水斜面上への逆上波の解析. 海岸工学論文集, 일본토목학회, 第43卷, 136-140.

Received January 9, 2009

Accepted January 24, 2009