

투수성해안구조물과 불규칙파의 상호작용에 관한 수치모델 연구

김종욱* · 남인식 · 윤한삼 · 류청로

* 현대중공업(주) 선박해양연구소
부경대학교 해양공학부

A Study of the Numerical Model on the Interaction between Irregular Waves and Permeable Coastal Structures

JONG-WOOK KIM*, IN-SIK NAM, HAN-SAM YOON AND CHEONG-RO RYU

* Hyundai Maritime Research Institute, Hyundai Heavy Industry Co. Ltd., Ulsan 682-792, Korea

School of Ocean Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

KEY WORDS: Numerical model 수치모델, Permeable coastal structure 투수성해안구조물, Irregular wave 불규칙파, Incident wave train 입사파열, Reflected wave train 반사파열, Wave run-up 파치오름, Waterline elevation 수선고,

ABSTRACT: The purpose of this study is to develop the time-dependent, one-dimensional numerical model on the interaction between irregular waves and two-layer permeable coastal structures, by extending and modifying the numerical model PBREAK(Wurjanto and Kobayashi, 1992) which is applicable only to one-layer permeable coastal structures. The two-layer permeable coastal structure consists of two permeable underlayers with different permeable media resting on an impermeable slope and an armor layer covering the permeable underlayer. The numerical model of this study simulates the wave over rough permeable underlayer of arbitrary geometry as well as the waves inside two-permeable underlayers of arbitrary thickness for specified normally-incident irregular waves. The utility of this numerical model is founded from comparing with PBREAK and the four hydraulic model tests under irregular waves. The sensitivities of computed results according to typical parameters(porosity, stone diameter, horizontal width of the permeable underlayer) and major factors(friction factor of primary armor layer etc.) discussed.

1. 서 론

방파제 또는 호안과 같은 해안구조물의 계획 및 설계에서는 일반적으로 피복석의 수리학적 안정성 및 거동, run-up, 월파(overlapping), 반사(reflection), 전달(transmission) 등의 예측이 필요하다(Shore Protection Manual 1984 ; Bruun 1985). 또한, 해안 매립을 통한 대규모 공업단지 조성과 중요시설의 건설 등에 있어서 시설보호를 위한 해안구조물의 사면상에서 파랑변형 및 run-up에 대한 정량적인 이해는 폭풍에 의한 범람과 해빈침식에 대한 해안 보호대책 차원에서 필수적이라 할 수 있다. 이와 같이 해안구조물과 파랑의 상호작용에 관한 특성을 파악하는 것은 보다 합리적인 해안구조물 설계를 위해서 반드시 선행되어야 할 과정이라 할 수 있다.

투수성해안구조물과 파랑의 상호작용에 관한 수치모델 연구는 Wurjanto and Kobayashi(1992, 1993)와 Van Gent(1994) 등을 비롯한 많은 연구자들에 의해서 수행되어 왔다. 그러나, 종래의 연구결과들은 구조물 사면상에서의 불규칙파 특성과 각종 유체역학적 물리량의 정량적인 해석이 가능하지만, 대부분 1층의 투수성해안구조물에만 적용이 가능하다. 실제로, 방파제 또는 호안과 같은 대부분의 해안구조물은 1층 이상의 투수층으로 구성되어 있다. 특히, 각 투수층의 재질특성(돌의 크기, 공

극을 등)이 다른 경우, 투수층 내의 흐름저항 등으로 인해 구조물 전면에서의 반사파, 구조물 사면상 및 투수층 내부의 파랑 등에 영향을 미치므로 종래의 수치모델을 그대로 적용하기에는 문제가 있을 뿐만 아니라 그 적용성에 한계가 있다고 판단된다. 따라서, 각 투수층의 재질특성을 고려하여 투수성해안구조물과 불규칙파의 상호작용을 재현할 수 있는 보다 현실적인 수치모델의 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 1층으로 구성된 투수성해안구조물에만 적용 가능했던 종래의 수치모델인 PBREAK(Wurjanto and Kobayashi, 1992)를 확장·수정함으로써 2층투수성해안구조물과 불규칙파의 상호작용을 규명할 수 있는 수치모델을 개발하고, PBREAK의 계산결과 및 수리모형실험 결과와 비교·검토함으로써 그 성능을 평가한다. 또한, 대표적인 영향인자 및 주요 계수의 변화에 따른 수치모델의 민감도를 분석한다.

2. 수치모델

2.1 투수성해안구조물과 파랑의 상호작용에 관한 지배방정식

본 연구에서 대상으로 하는 투수성해안구조물은 Fig. 1에서와 같이 불투수성 사면 위에 2개의 투수층으로 구성된 사석방파제로 제한한다. 투수성해안구조물에 대한 파랑작용은 입사파

가 구조물에 직각으로 입사하는 것으로 가정한다. 해석영역은 외해경계에서 육지경계까지로 한다. 외해경계는 구조물의 끝단으로서 정수면 아래 수심이 d_i 이다. 육지경계는 시간에 따라 변동하는 불투수성 사면에서의 수선(waterline)으로 한다.

구조물 사면상의 파랑과 투수층 내부의 파랑에 대한 각각의 1차원 지배방정식은 비 압축성 유체에 대한 연속방정식과 운동량방정식으로부터 천해장과 및 완경사의 가정하에 각 영역의 경계조건에 따라 해석영역별로 유도하였다. 여기서는 무차원화된 지형 및 변수들로 나타내었다.

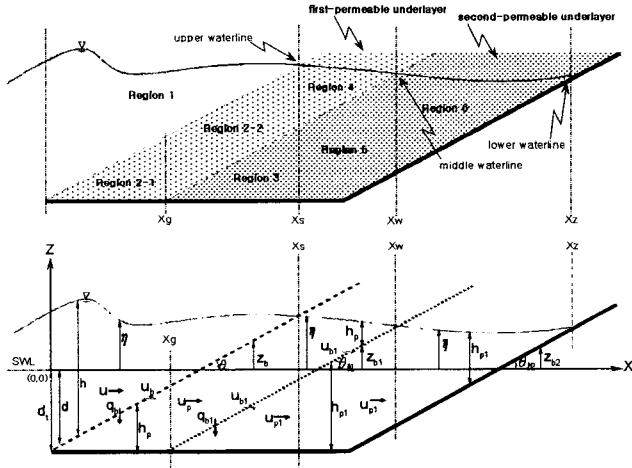


Fig. 1 One dimensional model for flow over rough slope and inside two-layer permeable underlayer

Fig. 1에 나타낸 무차원변수들을 설명하면 다음과 같다.

- x : 외해경계에서 육지쪽을 정(正)으로 취하는 수평축
- z : 정수면에서 연직상방을 정(正)으로 취하는 연직축
- z_b : 투수1층 상부사면의 연직높이
- z_{b1} : 투수2층 상부사면 또는 투수1층 하부사면의 연직높이
- z_{b2} : 투수2층 하부경계인 불투수성 사면의 연직높이
- x_g : 투수2층 사면이 시작되는 수평거리
- x_s : 투수1층 상부사면에서 이동수선의 수평거리
- x_w : 투수2층 상부사면에서 이동수선의 수평거리
- x_z : 투수2층 하부사면에서 이동수선의 수평거리
- d_i : 외해경계(사면끝단)의 수심
- d : 투수1층 상부사면의 수심
- θ : 투수1층 상부사면의 경사각
- θ_{b1} : 투수2층 상부사면의 경사각
- θ_{b2} : 투수2층 하부사면(불투수성 사면)의 경사각
- η : 자유수면 또는 내부수면의 높이
- h : 투수1층 사면상의 수심 (= $d + \eta$)
- u : 투수1층 사면상의 수심평균된 수평속도
- q_b : 투수1층 내부로의 단위수평면적당 유입유량
- q_{b1} : 투수2층 내부로의 단위수평면적당 유입유량

- u_b : 투수1층 내부의 연직평균된 수평 유량속도
- u_{p1} : 투수2층 내부의 연직평균된 수평 유량속도
- h_p : 투수1층 내부의 연직깊이
- h_{p1} : 투수2층 내부의 연직깊이

사면의 끝단은 투수1층의 외해쪽 끝단으로서 정수면하의 무차원수심이 d_i 인 $x=0$ 에 위치하며, 각 피복층의 경계는 x 의 함수로서 각각 $z=z_b, z_{b1}, z_{b2}$ 에 위치한다. 투수1층 사면상의 수심 $h=0$ 인 $x=x_s$, 투수1층 내부의 수심 $h_p=0$ 인 $x=x_w$, 투수2층 내부의 수심 $h_{p1}=0$ 인 $x=x_z$ 에 위치하는 이동수선(moving waterline)에서 자유수면과 투수1층 및 투수2층의 내부수면이 연속이라고 가정하였다.

각 영역의 질량 및 운동방정식의 유도에 사용된 무차원변수 및 파라미터는 다음과 같다.

$$t = \frac{t'}{T} \quad ; \quad \eta = \frac{\eta'}{H} \quad ; \quad z = \frac{z'}{H}$$

$$x = \frac{x'}{T\sqrt{gH}} \quad ; \quad x_s = \frac{x'_s}{T\sqrt{gH}} \quad ; \quad x_w = \frac{x'_w}{T\sqrt{gH}}$$

$$z_b = \frac{z'_b}{H} \quad ; \quad z_{b1} = \frac{z'_{b1}}{H} \quad ; \quad z_{b2} = \frac{z'_{b2}}{H}$$

$$d = \frac{d'}{H} \quad ; \quad d_i = \frac{d'_i}{H} \quad ; \quad f = \frac{1}{2} \sigma f'$$

$$u = \frac{u'}{\sqrt{gH}} \quad ; \quad u_b = \frac{u'_b}{\sqrt{gH}} \quad ; \quad u_{b1} = \frac{u'_{b1}}{\sqrt{gH}}$$

$$u_p = \frac{u'_p}{\sqrt{gH}} \quad ; \quad u_{p1} = \frac{u'_{p1}}{\sqrt{gH}} \quad ; \quad h = \frac{h'}{H}$$

$$q_b = \frac{q'_b}{p_q H/T} \quad ; \quad q_{b1} = \frac{q'_{b1}}{p_{q1} H/T} \quad ; \quad \sigma = T\sqrt{\frac{g}{H}}$$

$$\theta = \sigma \tan \theta' \quad ; \quad \theta_{b1} = \sigma \tan \theta'_{b1} \quad ; \quad \theta_{b2} = \sigma \tan \theta'_{b2}$$

$$h_p = \frac{h'_p}{H} = \begin{cases} z_b - z_{b1} & \text{for } 0 \leq x \leq x_s \\ \eta - z_{b1} & \text{for } x_s \leq x \leq x_w \end{cases}$$

$$h_{p1} = \frac{h'_{p1}}{H} = \begin{cases} z_{b1} - z_{b2} & \text{for } x_g \leq x \leq x_w \\ \eta - z_{b2} & \text{for } x_w \leq x \leq x_z \end{cases}$$

각 영역별 1차원 연속방정식 및 수평운동량방정식을 요약하면 다음과 같다.

Region 1

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

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

Region 2

(1) 불투수성 저면

$$\frac{\partial m_p}{\partial x} - p_u q_b = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial m_p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{m_p^2}{h_p} \right) - p_u u_b a_b + h_p \frac{\partial h}{\partial x} + \theta h_p + \frac{m_p}{p_u} \left(\mu + \frac{|m_{pl}|}{p_u h_p} \right) = 0 \quad (4)$$

(2) 투수성 저면

$$\frac{\partial m_p}{\partial x} - p_u \left[a_b - a_{bl} \left(\frac{p_{ql}}{p_a} \right) \right] = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial m_p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{m_p^2}{h_p} \right) - p_u u_b a_b + p_u u_{bl} a_{bl} \left(\frac{p_{ql}}{p_a} \right) + h_p \frac{\partial h}{\partial x} + \theta h_p + \frac{m_p}{p_u} \left(\mu + \frac{|m_{pl}|}{p_u h_p} \right) = 0 \quad (6)$$

Region 3

$$\frac{\partial m_{pl}}{\partial x} - p_{ul} a_{bl} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial m_{pl}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{m_{pl}^2}{h_{pl}} \right) - p_{ul} u_{bl} a_{bl} + h_{pl} \frac{\partial h}{\partial x} + \theta h_{pl} + \frac{m_{pl}}{p_{ul}} \left(\mu_1 + \frac{|m_{pl}|}{p_{ul} h_{pl}} \right) = 0 \quad (8)$$

Region 4

$$\frac{\partial h_p}{\partial t} + \frac{\partial m_p}{\partial x} + p_u a_{bl} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial m_p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{m_p^2}{h_p} + \frac{h_p^2}{2} \right) + p_u u_{bl} a_{bl} + \theta_{bl} h_p + \frac{m_p}{p_u} \left(\mu + \frac{|m_{pl}|}{p_u h_p} \right) = 0 \quad (10)$$

Region 5

$$\frac{\partial m_{pl}}{\partial x} - p_{ul} a_{bl} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial m_{pl}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{m_{pl}^2}{h_{pl}} \right) - p_{ul} u_{bl} a_{bl} + h_{pl} \frac{\partial h}{\partial x} + \theta_{bl} h_{pl} + \frac{m_{pl}}{p_{ul}} \left(\mu_1 + \frac{|m_{pl}|}{p_{ul} h_{pl}} \right) = 0 \quad (12)$$

Region 6

$$\frac{\partial h_{pl}}{\partial t} + \frac{\partial m_{pl}}{\partial x} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial m_{pl}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{m_{pl}^2}{h_{pl}} + \frac{h_{pl}^2}{2} \right) + \theta_{bl} h_{pl} + \frac{m_{pl}}{p_{ul}} \left(\mu_1 + \frac{|m_{pl}|}{p_{ul} h_{pl}} \right) = 0 \quad (14)$$

여기서,

$$m = hu, \quad m_p = p_u h_p u_p, \quad m_{pl} = p_{ul} h_{pl} u_{pl} \quad (15)$$

$$u_b = \begin{cases} u & \text{for } q_b \geq 0 \\ p_u u_p & \text{for } q_b < 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$u_{bl} = \begin{cases} p_u u_p & \text{for } q_{bl} \geq 0 \\ p_{ul} u_{pl} & \text{for } q_{bl} < 0 \end{cases} \quad (17)$$

$$p_a = n_p p_u, \quad p_{ql} = n_{pl} p_{ul} \quad (18)$$

$$p_u = \sqrt{\frac{n_p d_p'}{\beta_o(1-n_p)T\sqrt{gH}}} \quad (19)$$

$$p_{ul} = \sqrt{\frac{n_{pl} d_{pl}'}{\beta_o(1-n_{pl})T\sqrt{gH}}} \quad (20)$$

$$\mu = \frac{\alpha_o(1-n_p)^{2\nu}}{\beta_o p_u d_p' (gH)^{1/2}} \quad (21)$$

$$\mu_1 = \frac{\alpha_o(1-n_{pl})^{2\nu}}{\beta_o p_{ul} d_{pl}' (gH)^{1/2}} \quad (22)$$

$$f = \frac{1}{2} \sigma f \quad (23)$$

2.2 수치계산법

본 연구에서 자유수면을 가진 영역1의 파랑에 대해서 dissipative Lax and Wendroff method (Lax and Wendroff, 1960)를 사용하였고, 투수층 내부의 영역2~6의 파랑에 대해서는 MacCormack method (MacCormack, 1969)를 사용하였다.

일정한 공간크기 Δx 와 변동시간간격 Δt 의 유한차분격자를 사용하며, Δt 는 $x = x_s, x_w, x_z$ 에 위치한 수선(waterline) 부근에서 수치적 문제가 발생할 때마다 자동적으로 감소되도록 하였다. 외해경계($x=0$)에서의 무차원입사파열 $\eta_i = \eta_i'/H$ 를 시간 t 의 함수로 표현하고, 무차원반사파열 $\eta_r = \eta_r'/H$ 은 외향의 특성(characteristic)으로부터 시간 t 의 함수로서 계산하였다.

외해경계($x=0$)에서는 $z_b = z_{bl}$ 로 가정하여, $h_p = 0, m_p = 0$ 가 되도록 하였다. 각 사면에서의 이동수선인 x_s, x_w, x_z 의 위치는 predictor-corrector-smoothing procedure (Kobayashi and Wurjanto, 1990)를 이용하여 추적하였다. 현재시간 t 에서 $h, m, a_b, m_p, m_{pl}, h_p, h_{pl}, x_s, x_w, x_z$ 의 기지값에 대한 다음시간 $t^* = (t + \Delta t)$ 에서 이들 변수값들은 Fig. 2와 같은 순서로 계산하였다.

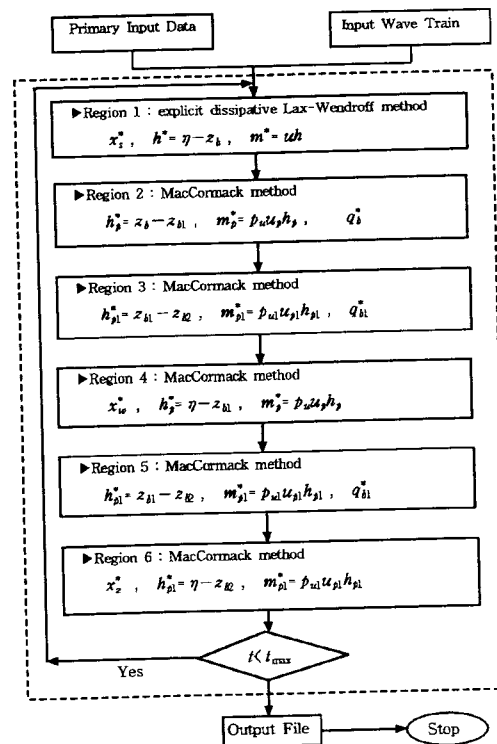


Fig. 2 Flow-chart for the numerical procedure

3. 수치모델의 검증

2층투수성해안구조물과 불규칙파의 상호작용에 관한 수치모델과 1층의 투수성해안구조물에만 적용이 가능했던 기존의 수치모델인 PBREAK(Wurjanto and Kobayashi, 1992)의 결과와 비교·검증하였다. 또한, 수리모형실험을 통해서 수치모델의 적용성 및 한계를 평가하였다. 이하에서는, 편의상 본 연구의 수치모델을 'KBREAK'로 표기한다

3.1 기존 수치모델과의 비교·검증

(1) 수치모델의 입력조건

Fig. 3은 PBREAK의 성능평가를 위해 Kobayashi(1992)가 수행한 실험조건의 구조물형상으로서 기존의 수치모델(PBREAK)과의 비교·검증을 위해 동일하게 적용하였다. 특히, 본 연구의 수치모델(KBREAK)은 투수1층과 투수2층의 재질특성(돌의 직경, 공극율)을 각각 다르게 적용할 수 있지만, PBREAK와의 비교를 위해서 투수1층과 투수2층의 재질특성을 동일하게 하였다.

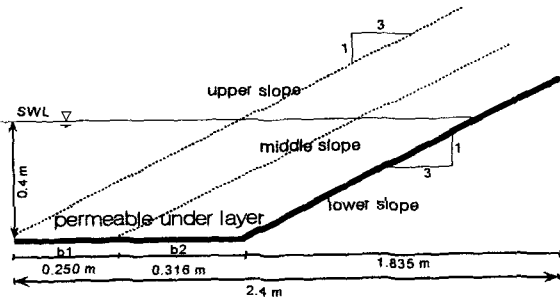


Fig. 3 Permeable slope geometry specified as input to numerical model (Wurjanto and Kobayashi, 1992)

구조물의 형상과 투수층(투수1층 및 투수2층)과 관련된 입력 자료는 다음과 같다.

- 구조물 사면 끝단에서의 수심 : $d_s' = 0.40 \text{ m}$
- 상부사면(투수1층의 상부사면)의 경사 : $\cot \theta' = 3$
- 중간사면(투수2층의 상부사면)의 경사 : $\cot \theta_{b1}' = 3$
- 하부사면(불투수성 사면)의 경사 : $\cot \theta_{b2}' = 3$
- 저면바닥의 경사 : $\cot \theta_s' = 0$
- 투수1층 및 투수2층의 공극율 : $n_p = n_{p1} = 0.48$
- 투수1층 및 투수2층 자갈의 평균직경 : $d_p' = d_{p1}' = 0.021 \text{ m}$
- $\alpha_o = 1140, \beta_o = 2.7$

한편, 수치모델에 적용된 3개 Run의 입사파 조건들과 파라미터 값들을 Table 1에 열거하였다. Table 1에서 지배방정식의 무차원화에 사용한 특성파고 H' , 특성주기 T' 는 각 Run에서 측정된 입사파열의 유의파고 H_s' 및 평균주기 T_m' 이다. σ 는 수평길이이척도와 연직길이이척도간의 비이며, ξ 는 쇄파대상사파

라메티(surf similarity parameter)이다. t_{max} 는 무차원 계산지속 시간이며, 저면조도계수 f 는 Kobayashi and Greenwald (1988)의 추정값을 사용하였다.

Table 1 Three test runs compared with numerical model (Wurjanto and Kobayashi, 1992)

Run No.	H' (m)	T' (sec)	σ	ξ	t_{max}	f	T_p	β_u	μ
P1	0.0685	1.082	12.9	1.72	170.98	0.05	1.09	0.090	0.074
P2	0.0535	1.357	18.4	2.44	268.98	0.05	1.56	0.085	0.088
P3	0.0457	1.738	25.5	3.39	210.01	0.10	1.58	0.079	0.104

(2) PBREAK와 KBREAK의 계산결과 비교·검증

본 연구의 2층 투수성해안구조물에 대한 불규칙파 수치모델인 KBREAK와 기존의 수치모델인 PBREAK의 계산결과를 서로 비교하였다. 여기서는, 대표적으로 반사파열 $\eta_r(x, t)$, 투수1층 상부사면에서의 수선고(waterline elevation) $Z_w^u(t)$, 자유수면과 내부수면의 공간변동 $\eta(x, t)$ 의 계산치를 Fig. 4~6에 나타내었다. 두 수치모델의 계산결과는 아주 좋은 일치치를 보였다. 따라서, 본 연구에서의 2층의 투수성해안구조물에 대한 불규칙파 수치모델인 KBREAK의 1차적인 타당성을 검증할 수 있었다.

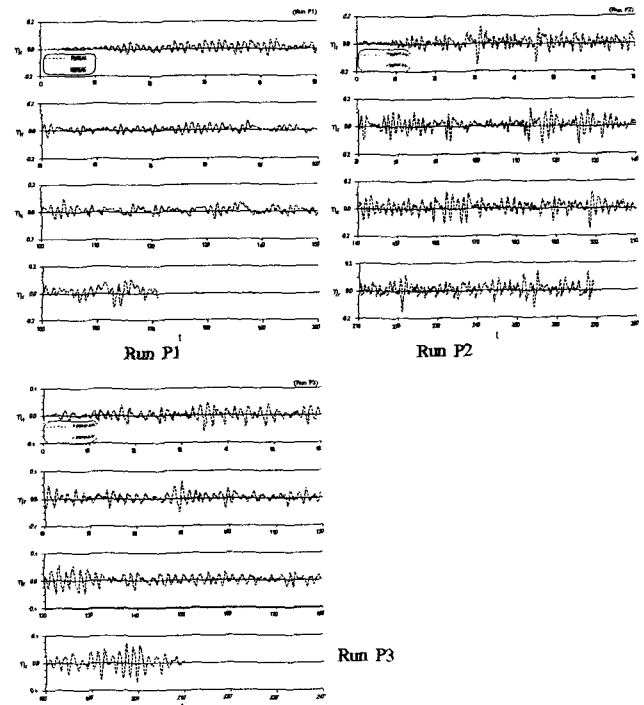


Fig. 4 Computed reflected wave trains at $x=0$ for Run P1, P2 P3

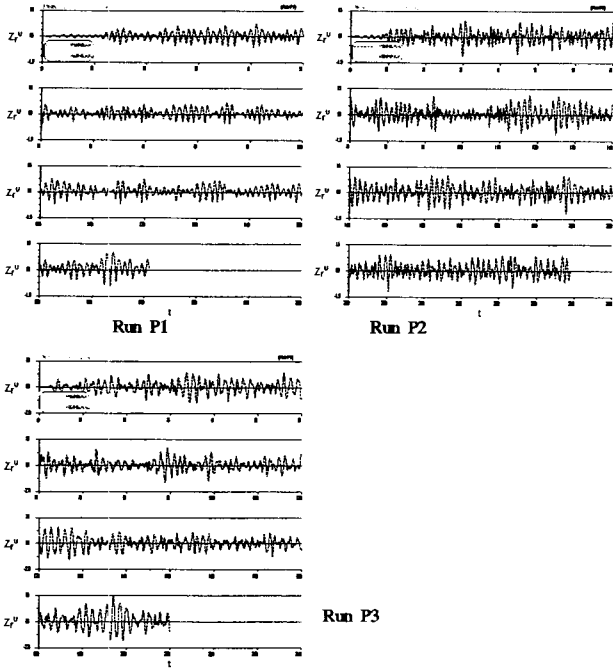


Fig. 5 Computed waterline elevation at upper slope for Run P1, P2, P3

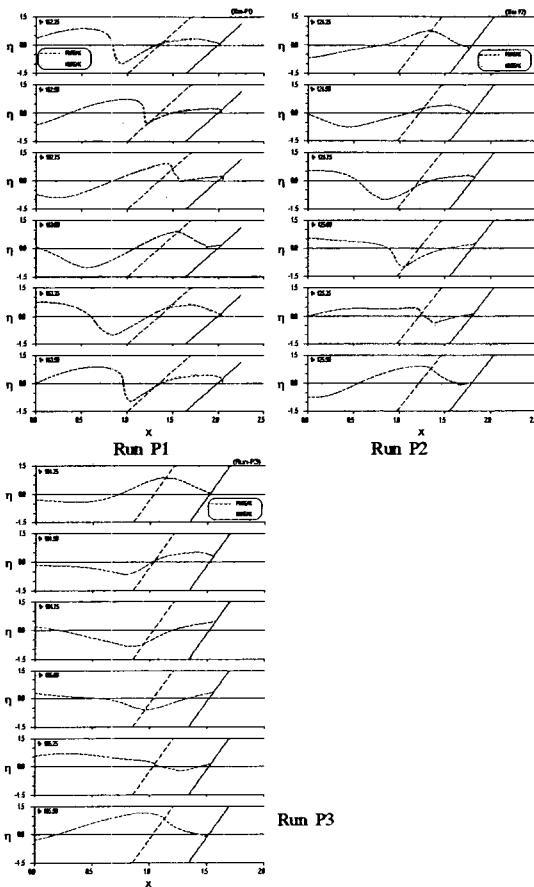


Fig. 6 Instantaneous spatial variation of free surface elevation η for Run P1, P2, P3

3.2 수리모형실험과의 비교·검증

수리모형실험을 통해서 본 연구의 투수성해안구조물에 대한 불규칙파 수치모델(KBREAK)의 적용성을 평가하였다. 실험은 부경대학교의 2차원불규칙조파수조에서 수행하였으며, 1:3의 경사를 갖는 투수층사면으로 구성된 모형구조물에 대해서 불규칙파를 대상으로 하였다. 여기서, 투수1층과 투수2층의 자갈의 크기를 동일하게 하였다.

(1) 실험장치 및 방법

실험에 사용된 2차원불규칙조파수조의 제원은 길이 35 m, 폭 1 m, 깊이 1 m이며, 불규칙파의 발생은 조파수조의 끝단에 설치되어 있는 조파시스템과 컴퓨터에 의해 제어된다. Fig. 7은 수리모형실험에 사용된 구조물의 단면을 나타낸다. 구조물 전면에서의 자유수면고를 측정하기 위해서 5개의 용량식 파고계를 설치하였다. 모형구조물의 상부사면에서의 수선고(waterline elevation)를 측정하기 위하여 수선고계(waterline meter) 1개를 설치하였으며, 내부수위를 측정하기 위하여 투수층 내부에 3개의 내부수위계를 각각 $x = 1.28, 1.5, 1.8 \text{ m}$ 위치에 설치하였다. 입사파와 반사파의 분리는 Kobayashi(1989)가 제시한 방법을 사용하였다. 실험에 사용된 파의 제원은 Table 2와 같다. 각 실험에 대한 조파지속시간은 $t_{\max} = 204.8 \text{ sec}$ 이며, 데이터의 기록시간간격은 0.05 sec이다.

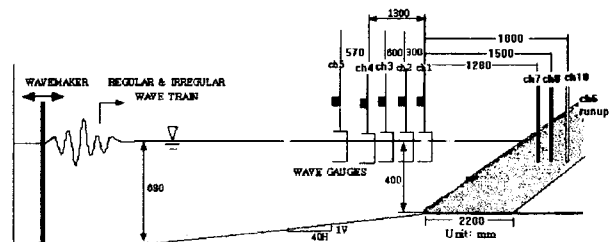


Fig. 7 Schematic of experimental setup.

Table 2 Wave conditions of test runs

Run No.	d=0.40 m					Remark
	H' (m)	T (sec)	σ	ξ	t_{\max}	
P1-1	0.047778	1.0264	14.700	1.955	199.532	Plunging
P1-2	0.058526	1.4133	18.288	2.432	144.909	Collapsing
P1-3	0.065188	1.7661	22.622	3.008	115.961	Surging
P1-4	0.070401	2.1574	25.454	3.385	94.929	Surging

2차원조파수조내의 조파기로부터 파를 발생시켜 구조물의 전면에서 위치한 5개의 파고계에서의 자유수면변동($\eta_{w1}' \sim \eta_{w5}'$), 투수1층 상부사면에서의 수선변동(η_{w6}'), 투수층 내부의 수위변동($\eta_{w7}', \eta_{w8}', \eta_{w9}'$)을 각각 측정하였으며, Fig. 8에 대표적인 한 예로서 Table 2의 Run P1-4에 대한 측정치를 나타내었다.

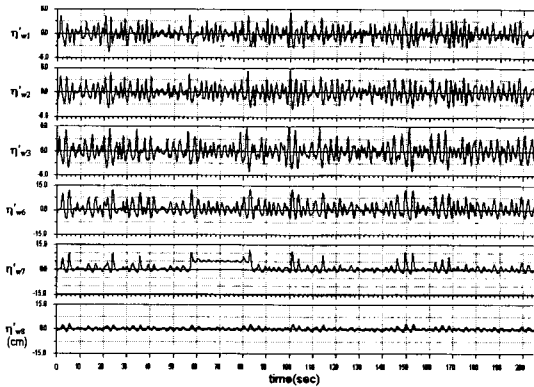


Fig. 8 Measured wave and waterline with time for run P1-4

(2) 반사파(reflected wave)의 측정치와 계산치 비교

4개의 Run에 대한 무차원반사파열 $\eta_r(t)$ 의 측정치와 계산치에 대한 $0 \sim t_{max}$ 까지의 시계열을 Fig. 9에 나타내었다. 수치모델의 계산치는 반사파의 전반적인 경향을 예측하지만 파정높이(crest height)와 파곡깊이(trough depth)를 약간 과소평가하는 경향이 있었다. 그러나, ξ 의 증가에 따라 보다 좋은 일치성을 보이면서 투수성사면으로부터의 반사가 증가함을 알 수 있었다.

Fig. 10은 Run P1-1~4에 대한 반사파스펙트럼 $S_r(f_s)$ 의 측정치와 계산치를 보여준다. 또한, 입의주파수에서의 입사파에너지를 보여주기 위해서 입사파스펙트럼 $S_i(f_s)$ 도 함께 나타내었다. 수치모델은 투수성사면으로부터 반사된 파들의 전반적인 특성은 잘 예측하지만, 고주파수 범위에서는 잘 예측하지 못한다. 이것은 Fig. 9에 나타낸 반사파 시계열의 파정높이(wave crest) 및 파곡깊이(wave trough)에서와 마찬가지로, 수치모델의 장파 가정이 $x=0$ 에서의 고주파수성분들에 대해서는 적절하지 않기 때문으로 생각된다.

(3) 수선고(waterline elevation)의 측정치와 계산치 비교

Fig. 11은 4개 Run에 대한 무차원수선고 $Z_r^U(t)$ 의 측정치와 계산치를 보여준다. 본 수치모델은 $x=0$ 에서의 반사파열보다는 수선고를 더 잘 예측하였다. 이것은 수선 부근에서는 장파의 가정이 보다 적절하게 적용되기 때문인 것으로 생각된다.

투수1층 상부사면에서의 run-up과 swash의 통계를 조사하기 위해서, $0 < t < t_{max}$ 의 시계열 $Z_r^U(t)$ 를 영점상향교차법(zero-up crossing method)을 사용하여 개별 swash들로 분리하였다. Table 4에 투수1층 상부사면에서의 set-up(\bar{Z}_r^U), 유의소상고(h_s^U), 유의run-up(R_s^U), 최대run-up(R_{max}^U)의 측정치와 계산치를 나타내었다. Table 4와 Fig. 11에서도 알 수 있듯이, ξ 가 증가할수록 run-up이 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한, 수치모델의 계산치는 측정치에 비해 run-up 및 소상고(swash height)를 약간 과소평가하는 경향이 있다. 이것은 주파복층의 조도계수 f 의 적용에서 Kobayashi(1992)의 불투수성해안구조물에 적용했던 값을 그대로 사용했기 때문으로 생각된다.

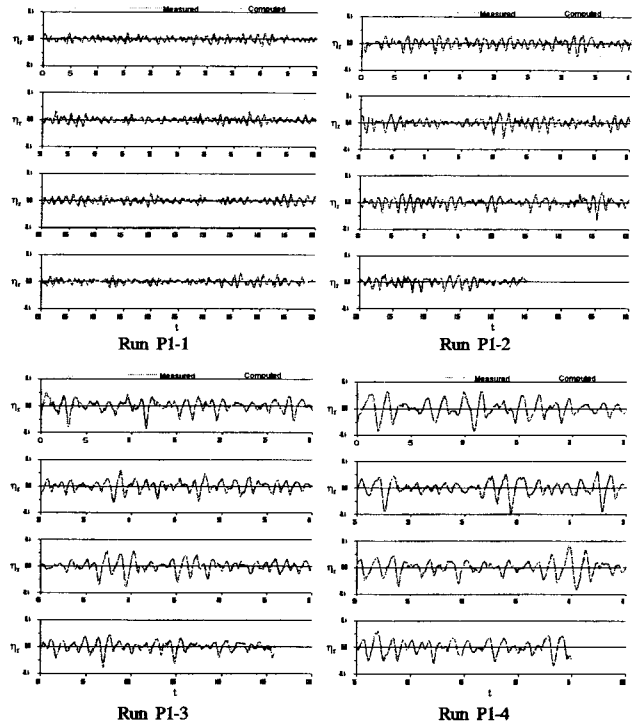


Fig. 9 Measured and computed reflected wave trains at $x=0$ for Run P1-1~P1-4

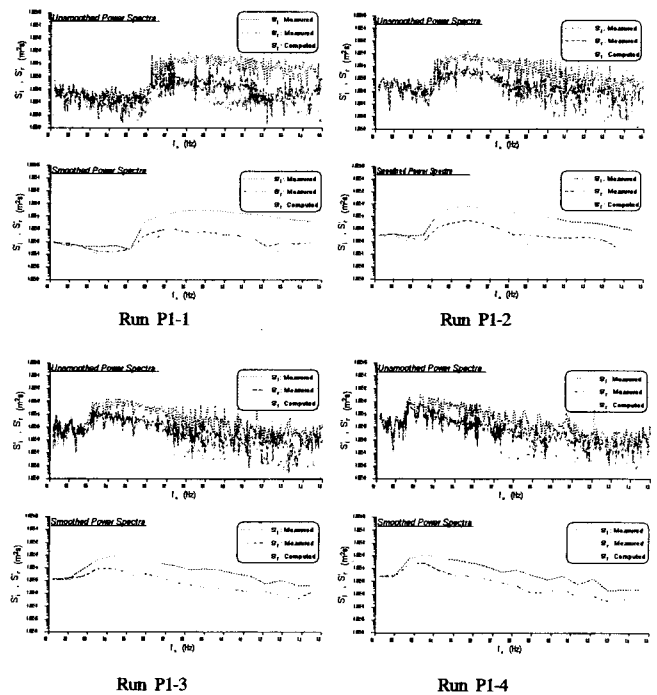


Fig. 10 Measured and computed reflected wave spectra shown relative to incident wave spectrum at $x=0$ for Run P1-1~P1-4

Table 4 Measured and computed values of average reflection coefficient $\bar{\gamma}$, wave set-up \bar{Z}_r^U , significant swash height h_s^U , significant run-up R_s^U , and maximum run-up R_{max}^U at upper slope

Run No.	ξ	Measured					Computed				
		$\bar{\gamma}$	\bar{Z}_r^U	h_s^U	R_s^U	R_{max}^U	$\bar{\gamma}$	\bar{Z}_r^U	h_s^U	R_s^U	R_{max}^U
I-P1	1.96	0.16	0.046	1.432	0.894	1.518	0.09	0.027	0.868	0.430	0.801
I-P2	2.43	0.25	0.064	1.669	0.967	1.976	0.18	0.046	1.233	0.603	1.163
I-P3	3.01	0.32	0.079	1.904	1.144	1.774	0.27	0.059	1.477	0.775	1.302
I-P4	3.39	0.43	0.092	1.989	1.195	1.679	0.40	0.075	1.667	0.904	1.336

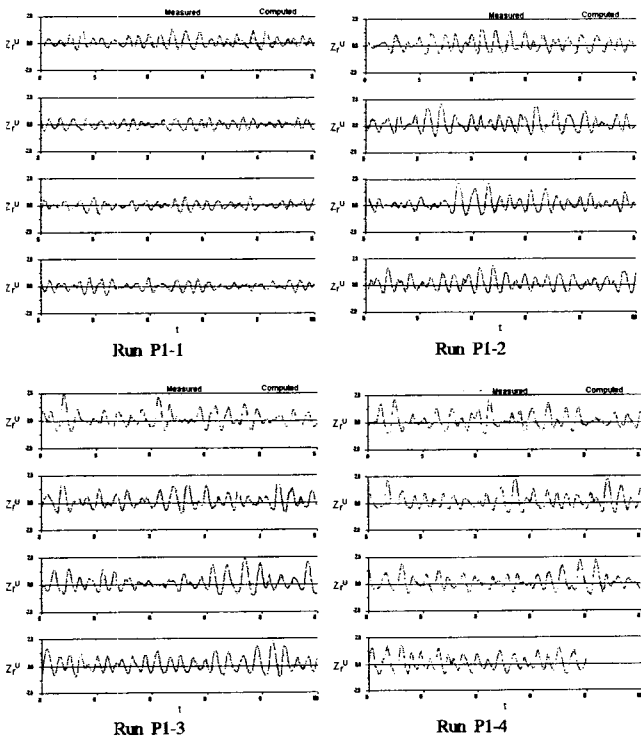


Fig. 11 Measured and computed waterline elevations at upper slope for Run P1-1~4

4. 대표적인 영향인자 및 주요 계수의 민감도 분석

본 연구의 2층투수성해안구조물과 불규칙파의 상호작용에 관한 수치모델에서 유체역학적 물리량의 변화에 영향을 미칠 수 있는 대표적인 영향인자 및 주요 계수로서는 구조물을 구성하는 각 투수층 재질의 특성(돌의 직경과 공극율), 투수층의 수평폭(두께), 사면의 경사, 주피복층의 조도계수 f , 층류저항계수와 관련된 상수 α_0 , 난류저항계수와 관련된 상수 β_0 등을 들 수 있다. 여기서는, 돌의 직경 및 공극율, 사면의 경사, 주 피복층의 조도계수의 변화에 따른 민감도를 분석하였다.

4.1 투수층 재질의 특성(돌의 직경 및 공극율)

Fig. 12와 같은 구조물형상에 대해서, Table 5에서 Run P1-40을 기준으로 Run P1-41~42와 같이 공극율을 각각 0.40, 0.44, 0.48로 변화시켰을 경우와 Run P1-40을 기준으로 Run P1-43~44와 같이 투수1층과 투수2층을 구성하는 돌의 직경을 0.012, 0.024, 0.036 m로 변화시켰을 경우에 대한 계산결과를 비교하였다.

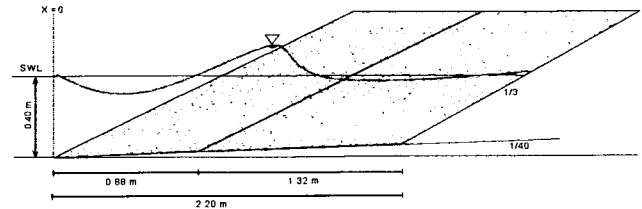


Fig. 12 Permeable slope geometry specified for Runs P1-40~44

Fig. 13과 Fig. 14는 각각 투수재질의 공극율과 돌의 직경의 변화에 따른 수위의 공간변동에 대한 최대, 최소, 평균값을 나타낸다. 각 그림에서와 같이, 투수재질의 공극율 및 돌의 직경이 증가함에 따라 유의소상고 h_s^U 가 작아지고, 내부수위의 평균치는 낮아짐을 확인할 수 있었다. Fig. 15는 공극율과 돌의 직경에 따른 반사율의 변화와 함께 반사파 및 상부사면에서의 수선고(waterline elevation)에 대한 스펙트럼을 나타내었다. 또한, 각 Run들에 대한 평균반사율 $\bar{\gamma}$, 상부사면에서의 set-up \bar{Z}_r^U , 유의소상고 h_s^U , 유의run-up R_s^U , 최대run-up R_{max}^U 의 계산치를 Table 5에 함께 나타내었다. 전반적으로 돌의 직경과 공극율이 증가함에 따라 반사율이 감소함을 쉽게 알 수 있으며, 돌의 직경과 공극율에 민감하게 변화함을 확인하였다. 이는 투수재질의 특성(돌의 직경과 공극율)의 차이는 투수층내의 난류점성에 영향을 주기 때문인 것으로 생각된다.

Table 5 Computed values of five runs used for hydrodynamic characteristics according to permeability and stone diameter

Run No.	$H = 0.0704 \text{ m}, T = 2.1574 \text{ sec}$						Computed				
	n_p	n_{p1}	d_p' (m)	d_{p1}' (m)	b_1 (m)	b_2 (m)	$\bar{\gamma}$	\bar{Z}_r^U	h_s^U	R_s^U	R_{max}^U
P1-40	0.40	0.40	0.012	0.012	0.88	1.32	0.395	0.075	1.667	0.904	1.336
P1-41	0.44	0.44	0.012	0.012	0.88	1.32	0.361	0.071	1.571	0.856	1.261
P1-42	0.48	0.48	0.012	0.012	0.88	1.32	0.330	0.065	1.468	0.804	1.170
P1-43	0.40	0.40	0.024	0.024	0.88	1.32	0.339	0.066	1.523	0.837	1.259
P1-44	0.40	0.40	0.036	0.036	0.88	1.32	0.311	0.063	1.462	0.816	1.237

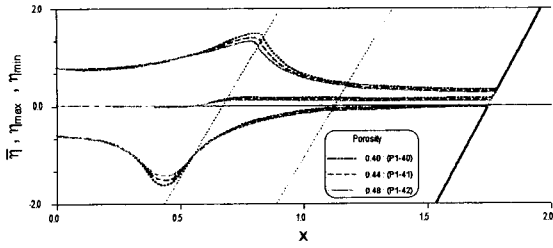


Fig. 13 Mean, maximum, and minimum values of free and internal surface elevation η for Runs P1-40, P1-41, P1-42

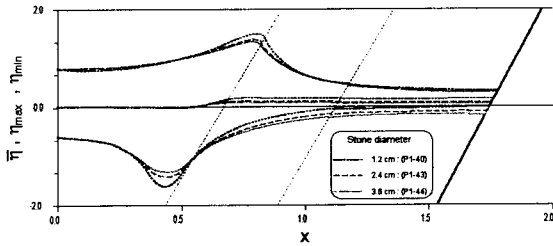


Fig. 14 Mean, maximum, and minimum values of free and internal surface elevation η for Runs P1-40, P1-43, P1-44

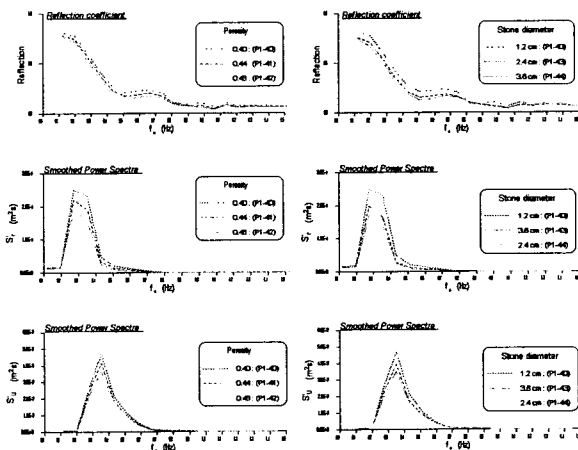


Fig. 15 Computed values of reflection coefficient, spectra of reflected wave and waterline elevations at upper slope for Runs P1-40~44

4.2 투수층의 수평폭(두께)

Run P1-40을 기준으로 2층의 투수성해안구조물에 대해서 Fig. 17과 Table 6과 같이 투수1층 및 투수2층의 재질특성이 다른 경우 각 투수층의 수평폭을 변화시켰을 때의 계산결과를 비교하였다.

Table 6에 각각 Run P1-40를 기준으로 Run P2-41~42에 대한 평균반사율 $\bar{\gamma}$, 투수1층의 상부사면에서의 set-up \bar{Z}_r^U , 유의소 상고 h_s^U , 유의run-up R_s^U , 최대run-up R_{max}^U 의 계산치를 나타내었다. Fig. 18은 투수1층과 2층의 재질이 다른 경우, 투수층의 수평폭 변화에 따른 구조물 사면상의 자유수면과 투수층 내부수위의 공간변동에 대한 최대, 최소, 평균치를 나타내고, Fig. 19는 각 투수층의 수평폭의 변화에 따른 반사율, 반사파

및 투수1층의 상부사면에서의 수선고(waterline elevation)에 대한 스펙트럼을 나타낸다. Table 6과 Fig. 19에서와 같이, 구조물의 전체 투수층에 대한 수평폭이 동일하더라도 투수1층과 투수2층의 재질특성이 다를 경우에는 투수층 재질의 특성에 따라 run-up, run-down, 반사율, 내부수위 등에 상당히 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Table 6 Computed values of three runs used for hydrodynamic characteristics according to the horizontal widths of permeable layers and stone diameter

Run No.	$H = 0.0704 \text{ m}, T = 2.1574 \text{ sec}$						Computed				
	n_p	n_{p1}	d_p' (m)	d_{p1}' (m)	b_1 (m)	b_2 (m)	$\bar{\gamma}$	\bar{Z}_r^U	h_s^U	R_s^U	R_{max}^U
P1-40	0.40	0.40	0.012	0.012	0.88	1.32	0.395	0.075	1.667	0.904	1.336
P2-41	0.48	0.40	0.030	0.012	0.44	1.76	0.358	0.070	1.597	0.898	1.315
P2-42	0.48	0.40	0.030	0.012	0.88	1.32	0.294	0.062	1.413	0.808	1.217

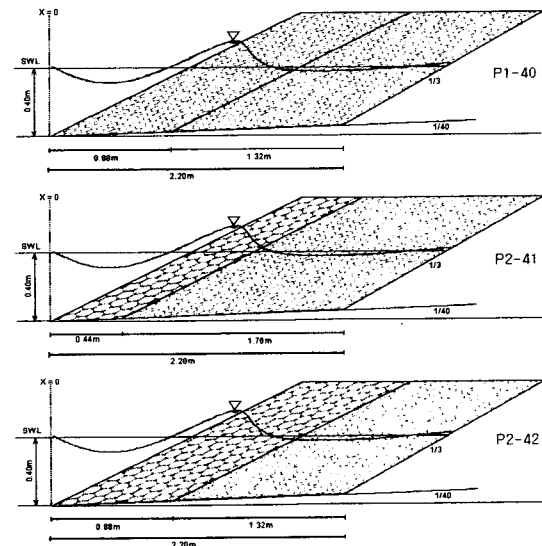


Fig. 17 Permeable slope geometry specified for Runs P1-40, P2-41~42

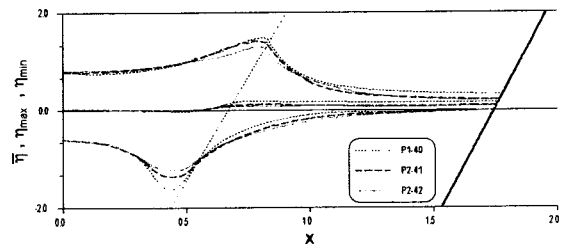


Fig. 18 Mean, maximum, and minimum values of free and internal surface elevation η for Runs P1-40, P2-41, P2-42

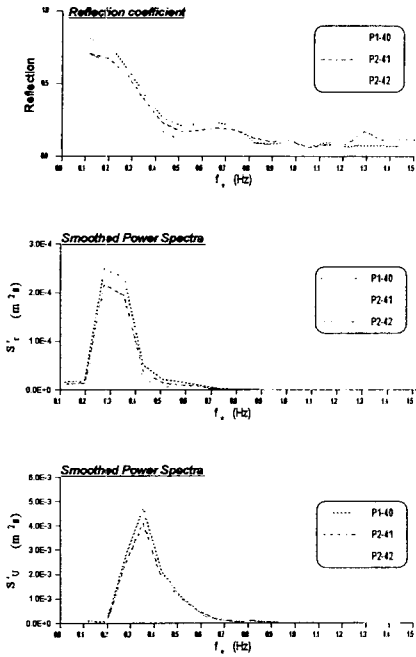


Fig. 19 Computed values of reflection coefficient, spectra of reflected wave and waterline elevations at upper slope for Runs P1-40, P2-41, P2-42

4.3 주피복층의 조도계수

구조물 상부사면상에 위치하는 주피복층의 조도계수 f 의 변화에 따른 수치모델 계산치의 민감도를 분석하였다. 여기서는, Fig. 20과 같은 구조물형상을 대상으로 Table 7에서와 같이 투수1층과 투수2층의 재질특성(돌의 직경, 공극률), 수평폭 및 각 사면경사를 동일하게 하고, 주피복층의 조도계수 f 를 0.0 1~0.1까지 변화시킨 Runs P1-71~75에 대해서 계산하였다.

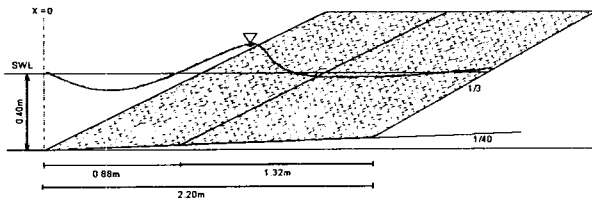


Fig. 20 Permeable slope geometry specified for Runs P1-71~75

Fig. 21은 Runs P1-71~75에 대한 수위 공간변동의 최대, 최소, 평균값을 나타낸 것이며, Fig. 22는 반사율과 함께 반사파 및 상부사면에서의 수선고에 대한 스펙트럼을 나타낸다. 또한, 각 계산 Run들에 대한 $\bar{\gamma}$, $\overline{Z_r^U}$, h_s^U , R_s^U , R_{max}^U 의 계산치를 Table 7에 함께 나타내었다. f 를 증가시키기에 따라 구조물 전면에서의 반사율이 감소하고, 소상고도 감소하는 경향을 보였다. 주피복층의 조도계수는 주피복층이 위치하는 투수1층 사면상의 파랑에 주로 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 주피복층의 조도가 클수록 사면을 따라 오르내리는 파의 에너지 분산효과가 큼을 알 수 있었다. $f = 0.01 \sim 0.1$ 의 범위에서 계산한 결과치

의 차이는 반사율의 경우 최대 8%의 차이를 보였고, 유의소상고, 유의run-up, 최대run-up의 계산치는 최대 8~10% 정도의 차이를 보였다. 따라서, 효과적인 수치모델의 적용을 위해서는 보다 다양한 수리모형실험을 통해서 이러한 주피복층의 조도계수에 대한 적절한 경험치를 산정할 필요가 있는 것으로 생각된다.

Table 7 Computed values of six runs used for hydrodynamic characteristics according to friction factor f of primary armor stone

Run No.	$H^U = 0.0704 \text{ m}, T^U = 2.1574 \text{ sec}$				Computed				
	$n_p = n_{pl}$	$d_p' = d_{pl}'$ (m)	b (m)	f	$\bar{\gamma}$	$\overline{Z_r^U}$	h_s^U	R_s^U	R_{max}^U
P1-71	0.40	0.012	2.20	0.01	0.411	0.0787	1.731	0.933	1.386
P1-72	0.40	0.012	2.20	0.03	0.403	0.0774	1.695	0.916	1.341
P1-73	0.40	0.012	2.20	0.05	0.395	0.0754	1.667	0.904	1.336
P1-74	0.40	0.012	2.20	0.07	0.389	0.0750	1.641	0.893	1.308
P1-75	0.40	0.012	2.20	0.10	0.380	0.0720	1.585	0.861	1.257

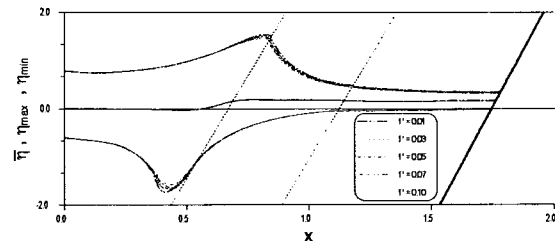


Fig. 21 Mean, maximum, and minimum values of free and internal surface elevation η for Runs P1-71~75.

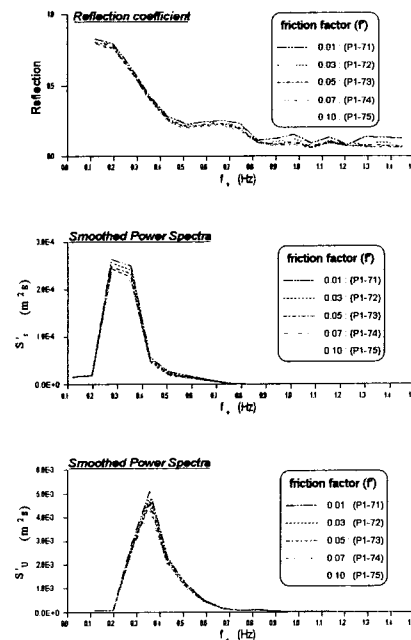


Fig. 22 Computed values of reflection coefficient, spectra of reflected wave and waterline elevations at upper slope for Runs P1-71~75

5. 결론

본 연구에서는 2층투수성해안구조물과 불규칙파의 상호작용을 규명할 수 있는 수치모델을 개발하고, 종래의 수치모델의 계산결과 및 수리모형실험 결과와 비교·검토함으로써 그 성능을 평가하였다. 또한, 대표적인 영향인자 및 주요 계수의 변화에 따른 수치모델의 민감도를 분석하였다.

(1) 수치모델의 1차적인 검증으로서, 동일한 구조물 사면형상에 대해서 투수1층과 투수2층의 재질특성을 동일하게 적용하여 본 연구의 수치모델과 기존의 수치모델인 PBREAK의 계산결과를 서로 비교·검토한 결과, 반사파 및 소상고를 포함하여 서로 비교 가능한 유체역학적 물리량들은 잘 일치하였다.

(2) 수치모델의 2차적인 검증으로서, 2차원불규칙파조파수조에서 수리모형실험을 수행하여 측정치와 수치모델의 계산치를 비교·검토하였다. 수치모델은 반사파의 전반적인 경향은 잘 예측하지만 파정높이와 파곡깊이를 약간 과소평가하는 경향이 있었다. 그러나 ξ 가 증가함에 따라 투수성 사면으로부터의 반사가 증가하는 경향을 보이면서 실험치와 잘 일치함을 볼 수 있었다. run-up에 대해서는 측정치에 비해 대체로 작게 나타나는 경향이 있으나 ξ 의 증가에 따라 일치하는 경향을 보였고, run-down은 전반적으로 좋은 일치성을 보여 주었다. 이것은 구조물 사면의 수선 부근에서는 수치모델의 천해장파 가정이 보다 적절하게 적용되기 때문인 것으로 생각된다.

(3) 투수층의 재질특성, 투수층의 수평폭(두께), 주피복층의 조도계수의 변화에 따른 수치모델의 민감도를 분석하였다.

첫째, 투수층의 재질특성인 돌의 직경과 공극율이 증가함에 따라 반사율과 run-up은 감소하는 경향을 보였으며, 소상고와 내부수위의 평균치도 낮아짐을 확인할 수 있었다.

둘째, 전형적인 해안구조물의 방파제 및 호안의 형태로서 2층의 투수층으로 구성된 경우, 돌의 직경과 공극을 뿐만 아니라 투수1층의 두께가 커짐에 따라 반사율은 감소하였고 소상고와 내부수위의 평균치가 낮아지는 경향을 보였다.

셋째, 주피복층의 조도계수 $f = 0.01 \sim 0.1$ 의 범위에서 f 가 증가함에 따라 반사율 및 소상고가 감소하는 경향을 보였다. 반사율의 경우 최대 8%의 차이를 보였고, 유의소상고, 유의 run-up, 최대run-up의 계산치는 최대 8~10% 정도의 차이를 보였다. 따라서, 효과적인 수치모델의 적용을 위해서는 보다 다양한 수리모형실험을 통해서 이러한 주피복층의 조도계수에 대한 적절한 경험치를 산정할 필요가 있는 것으로 생각된다.

(4) 본 연구의 수치모델은 높은 시·공간적 해상도를 가진 정량적인 데이터의 제공이 가능하고, 영향인자들의 변화에 따라 쉽게 그 민감도를 조사할 수 있으며, 1층 또는 2층으로 구성된 투수성해안구조물과 불규칙파의 상호작용에 관한 문제에 종래의 수치모델에 비해서 보다 합리적인 적용가능성을 내포하고 있다고 판단된다.

참고문헌

- Abbott, M.B., McCowan, A. and Warren, I.R.(1981) : Numerical modelling of free-surface flows that are two-dimensional in plan. In *Transport Models for Inland Coastal Water* edited by H.B. Fischer. Academic Press, New York.
- Ahrens, J.P. and Ward, D.L.(1991) : Performance of bermed revetments. *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, 117 (5) , pp. 534- 540.
- Bruun, P.(1992) : Trends in phreatic surface motion in rubble-mound breakwaters. Discussion. *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, 118 (3), pp. 326~327.
- Cox, D.T., Kobayashi, N. and Wurjanto, A.(1992) : Irregular wave transformation processes in surf and swash zones. Proc. 23rd Coastal Engineering Conference, ASCE.
- Engelund, F.(1953) : On the laminar and turbulent flows of groundwater through homogeneous sand. *Trans. Danish Academy of Technical Sciences*, 3 (4).
- Goda, Y.(1985) : *Random Seas and Design of Maritime Structures*, University of Tokyo Press, Tokyo, Japan.
- Johnson, J.W., Kondo, H. and Wallihan, R.(1966) : Scale effects in wave action through porous structures. Proc. 10th Coastal Engineering Conference, ASCE, 2, pp. 1022~1024..
- Kobayashi, N., Cox, D.T. and Wurjanto, A.(1991) : Permeability effects on irregular wave run-up and reflection. *J. Coastal Research*, 7 (1), pp. 127~136.
- Kobayashi, N., Ota, A.K. and Roy, I.(1987) : Wave reflection and run-up on rough slopes. *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, 113 (3), pp. 282~298.
- Lax, P. and Wendroff, B.(1960) : *Systems of Conservation Laws. Communications on Pure and Applied Mathematics*, XIII, pp. 217~237.
- Madsen, O.S. and White, S.M.(1976) : Reflection and transmission characteristics of porous rubble mound breakwaters. *Miscellaneous Report 76-5. U.S. Army Corps of Engineers Coastal Engineering Research Center.*
- U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center(1984) : *Shore Protection Manual*, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Sollitt, C.K. and Cross, R.H.(1976) : Wave reflection and transmission at permeable breakwaters. Technical Paper 76-8. U.S. Army Corps of Engineers Coastal Engineering Research Center.
- Wurjanto, A. and Kobayashi, N.(1992) : Numerical model for random waves on permeable coastal structures. Research Report No. CACR-92-02, Center for Applied Coastal Research, University of Delaware, Newark, Delaware.