

# 투과성해안구조물의 소상과 및 내부수위변동에 관한 수치모델링

남인식 · 윤한삼 · 김종욱\* · 류청로  
부경대학교 해양공학과

## Numerical modeling of wave run-up and internal setup on and in permeable coastal structures

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

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

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

**KEY WORDS:** Wave-structure interaction, Permeable coastal structures, Wave run-up, Internal setup, Internal waterlevel fluctuation, Numerical modeling, Non-linear shallow water wave equation, Inertia resistance.

**ABSTRACT:** A numerical model has been developed for the permeable coastal structures to simulate hydraulic characteristics on the permeable slopes, which interact with internal flow field of the structures. The model includes hydraulics in the porous medium. Numerical model was calibrated using hydraulic model experiments performed in 2-D wave flume in the Institute of Ocean Hydraulics in PKNU. Good agreement were obtained with the model which employed inertia resistance term than with the conventional model, PBREAK.

### 1. 서 론

현재까지 기존의 사석방파제 사면상의 수리학적 특성에 대한 연구는 run-up(사면상에서 파의 처오름 높이를 정수면으로부터 수직거리로 나타낸 극치값) 및 안정성의 평가와 관련하여 비교적 다양한 형태로 수행되었으며(Battjes, 1973; Ahrens, 1981; Ryu, 1984; Bruun, 1985), 수치모델 또한 활발히 개발되어 방파제 피복의 안정성 및 파랑·구조물의 상호작용을 비교적 정확하게 재현하고 있다(Hibberd and Peregrine, 1979; Kobayashi et al., 1987; Van der Meer, 1988; Van Gent et al., 1994).

그러나 사석방파제 내부의 수리학적 거동특성은 몇몇 연구자들에 의해 문제가 지적되어오고 있으나 체계적인 연구는 미흡하다고 할 수 있다. Bruun(1974)은 사석방파제의 내부수위(internal waterlevel)의 변동은 방파제의 천단고를 결정하는 중요한 인자인 run-up/run-down에 의한 방파제 내부의 압력경도력 차이에 의해 발생하며, 방파제의 안정성에 영향을 미친다고 보고하였다. Ryu(1984)는 내부수위의 변동 및 구조물 내부에서 발생하는 평균 내부수위 상승은 투수층내로의 침투류 특성에 의해 발생하며, 이는 사석의 직경, 공극율, 사석의 형상, 사석의 표면조도 및 압력경사에 대한 파라메타인 사석의 투수계수에 직접적인 영향을 받는다고 지적하였다. 또한, 수리학적 거동이 사면상에서 가장 극심하고, 사석방파제의 core부로 들어갈수록 급격히 약해질 수 있기 때문에 투수층 사면의 어느 정도 두께까지가 사면상의 흐름특성에 크게 영향을 주는지 규명할 필요성을 제기하였다. 일반적으로 사석방파제의 내부수위는 소상과 및 제체의 투수성에 의해 영향을 많이 받아서 항상 평

균수위 보다 높게 나타나며, 배후에 뒷채움재가 존재하는 호안에서는 그 효과가 더 크게 나타난다(Van der Meer, 1988). 전(2000)은 파고 및 주기, 파편길이가 커질수록 투과성 방파제의 평균 내부수위상승량이 증가하며, 이러한 내부수위상승은 run-up의 상승을 유발한다고 하였다. 즉, 내부수위의 변동은 해안구조물의 안정성 및 사면상의 run-up 특성에 영향을 주며, 따라서 투과성 구조물의 최적설계를 위해서는 사면상의 run-up과 내부수위변동과의 상호작용에 대한 정량적인 평가가 요구된다. 이를 위하여, 본 연구는 다음과 같이 수행되었다.

먼저, 투수층이 있는 해안구조물을 대상으로 하는 기존의 수치모델에 대해 고찰한다. 대상으로 하는 모델은 일반적으로 적용성이 가장 뛰어나다고 보고된 비선형천해방정식을 바탕으로 한 PBREAK(Kobayashi et al., 1992)이다. 그 후, 2차원 수조에서 수리모형실험을 실시하고, 동일한 실험조건에 대해 기존모델을 적용하여 run-up 및 내부수위 결과를 비교한다. 또한 수치모델에 적용되는 각 파라메타들에 대한 민감도 분석을 실시하여 그 영향을 분석·평가하고, 이를 바탕으로 모델을 보정한다. 최종적으로, 동일한 조건에 대해 수정된 모델을 적용하여 기존 모델의 결과 및 수리모형실험 결과와 비교·고찰하고, 수치모델의 적용성 및 한계를 평가한다.

### 2. 수치모델

#### 2.1 지배방정식

본 연구에서 사용한 수치모델은 임의 경사를 가지는 투수층 사면에서 규칙파 및 불규칙파랑의 거동을 계산하기 위해

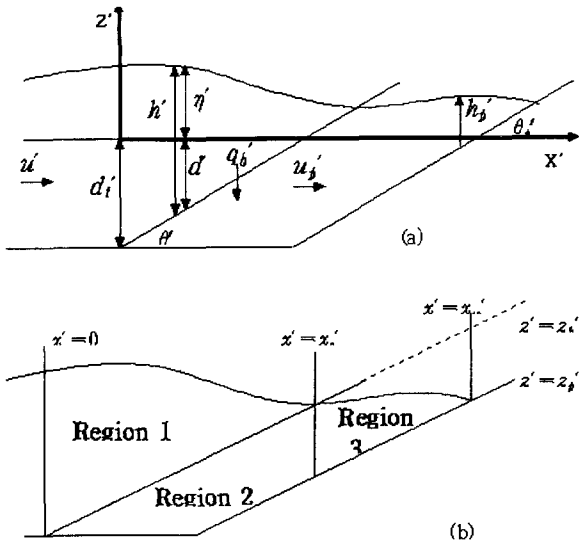


Fig. 1. Definition of coordinate system and dimensional variables.

Kobayashi 등(1992)이 개발한 PBREAK를 기본으로 하였다. 이 모델은 정수압 및 수심평균유속을 가정한 1차원 비선형 천해장파모델이다. 수정된 수치모델은 3장에서 기술되는 민감도분석을 바탕으로 모델의 보정효과가 가장 클 것으로 판단되는 관성저항항을 고려한 것이다. 다음은 Fig. 1에 나타낸 각 영역 별로 적용되는 지배방정식이다.

#### Region 1

$$\frac{\partial h'}{\partial t} + \frac{\partial h' u'}{\partial x'} = -a_b' \quad (1)$$

$$\frac{\partial h' u'}{\partial t} + \frac{\partial (h' u'^2)}{\partial x'} = -gh' \frac{\partial \eta'}{\partial x'} - \frac{1}{2} f' u' |u'| + u_b' q_b' \quad (2)$$

#### Region 2

$$\frac{\partial}{\partial x'} (h_p' u_p') = a_b' \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (h_p' u_p') + \frac{1}{n_p} \frac{\partial}{\partial x'} (h_p' u_p'^2) - u_b' q_b' \\ = -gn_p h_p' \frac{\partial \eta'}{\partial x'} - n_p h_p' (\alpha' + \beta' |u_p'|) u_p' \end{aligned} \quad (4)$$

#### Region 3

$$\frac{\partial \eta'}{\partial t} + \frac{1}{n_p} \frac{\partial}{\partial x'} (h_p' u_p') = 0 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (h_p' u_p') + \frac{1}{n_p} \frac{\partial}{\partial x'} (h_p' u_p'^2) = -gn_p h_p' \frac{\partial \eta'}{\partial x'} \\ - n_p h_p' (\alpha' + \beta' |u_p'|) u_p' \end{aligned} \quad (6)$$

### 2.2 관성항을 고려한 경우의 지배방정식

투과성구조물과 파랑의 상호작용에 관한 연구는 크게 3부분으로 나뉘어 연구 되어왔다. 구조물의 안정성 및 기능성 평가와 관련하여 투수층 내부 흐름거동 및 압력·역확장에 대한 실험적 연구(Hall, 1990; Oumeraci et al., 1990; Muttray et al., 1992; Losada et al., 1995)가 계속 진행되어오고 있으며, 이에

따른 구조물 내부 흐름에 관한 정식화(Le Mehaute, 1957; Sollitt et al., 1972; Madsen et al., 1974; Andersen et al., 1995) 와 이를 응용한 수치적 모델링에 관한 연구(Hanoura et al., 1985; Kobayashi et al., 1993; van Gent, 1994; Lin et al., 1999)가 되어 오고 있다.

파랑과 투과성 구조물의 상호작용 재현을 위한 수치모델링 연구에 있어서의 관건은 주로 투수층 내부에서 부과되는 마찰항을 기술하는 경험공식과 계수의 정확성 여부에 있다(Liu and Lin, 1999). Forchheimer는 Darcy 법칙으로부터 확장하여, 투수층 내부의 동수압력경사에 층류마찰저항 뿐만 아니라 난류마찰저항항을 고려하여 다음과 같은 방정식을 제안하였다.

$$I = \alpha' u + \beta' u |u| \quad (7)$$

최근에는 Forchheimer 방정식이 투수층 내부의 정상상태의 흐름영역에 대한 것임을 지적하고 투수층 내부에서 발생하는 비정상류에 대한 고려를 하기 위해서 관성저항항을 고려한 Extended Forchheimer 방정식(Polubarinova et al., 1952)을 수치모델에 적용하는 시도가 되고 있다(van Gent, 1994). 관성저항항을 고려한 확장된 Forchheimer 방정식은 다음과 같다.

$$I = \alpha' u + \beta' u |u| + c \frac{\partial u}{\partial t} \quad (8)$$

투수층 내부에 적용되는 지배방정식에 확장된 Forchheimer 방정식(식 8)을 적용하면 영역 2의 운동량방정식은 아래와 같다.

#### Region 2

$$\begin{aligned} (n_p g c) \frac{\partial}{\partial t} (h_p' u_p') + \frac{1}{n_p} \frac{\partial}{\partial x'} (h_p' u_p'^2) - u_b' q_b' \\ = -gn_p h_p' \frac{\partial \eta'}{\partial x'} - n_p h_p' (\alpha' + \beta' |u_p'|) u_p' \end{aligned} \quad (4-1)$$

그러나, Andersen(1993)은 실험적 연구결과 불규칙적인 사석에 대한 관성저항계수는 0.25-0.78의 범위로 나타났으나, 일정한 경향이 나타나지 않았으며 여전히 불규칙적인 연구결과들이 얻어지고 있기 때문에, 지속적인 연구가 요구된다고 지적하고 있다. 본 연구에서는, 민감도분석결과를 바탕으로 모델의 결과를 보정하기 위해서 관성항을 고려하였으며, 따라서 식 4-1을 수정모델 영역 2의 지배방정식으로 하였다.

### 3. 민감도분석

수치모델내에는 많은 영향인자들이 포함되어 있으며, 이들은 계산결과에 서로 복합적인 영향을 준다. 수치모델을 사용하여 계산을 실시할 때에는 각각의 인자 및 변수값을 지정해 주어야 하는데, 이들에 대해서 기존연구로부터 제안된 값들이 사용 가능하다. 그러나, 각각의 인자들이 계산 결과에 미치는 영향을 알아보기 위해, 수치모델에 적용되는 여러 가지 parameter들 중 그 영향이 크다고 판단되거나, 또는 그 물리적 의미가 중요하다고 판단되는 인자들에 대해 민감도분석을 하였다. 사석의 특성과 관련하여, 사면상의 조도와 관련된 마찰계수  $f$ , 투수층

을 이루는 사석의 공극률  $n_p$ , 사석의 대표입경  $d_p'$ , 그리고 투수층 내부흐름의 기술에 적용되는 층류저항계수  $\alpha'$ , 난류저항계수  $\beta'$ , 그리고 관성저항항에 포함되어있는 관성저항계수  $c$ 에 대해서 나머지 parameter들을 고정하고 하나의 parameter를 변화해 가면서 민감도분석을 실시하였다. 그 결과는 사면상의 run-up 및 run-down, 그리고 수리모형에 설치된 3 set의 내부수위계가 위치한 곳에서 내부수위변동 및 평균 내부수위 상승량으로 비교하였다. 내부수위상승량의 비교지점은 3 set의 내부수위계 중에서 실험에서 측정한 시계열과 좋은 일치성을 보였던 IWG3의 시계열에서 계산된 내부 평균수위 상승량을 나타내었다. 여기서의 모든 결과는 파랑조건이  $H=5.95$  cm,  $T=2.0$  sec인 경우의 계산결과이다.

### 3.1 사석의 특성에 관한 영향인자

사석의 특성에 관한 인자로서 마찰계수  $f$ , 사석의 공극률  $n_p$ , 사석의 대표입경  $d_p'$ 에 대하여 그 영향정도를 평가하고, Fig. 2 ~ Fig. 4에 나타내었다. 정성적으로 예측할 수 있듯이 사석직경 및 공극률이 커질 때, 투수성이 증대되는 효과가 나타나며 사면상의 run-up 및 run-down 이 감소하고 평균수위상승량도 감소한다. 그리고, 사면상의 마찰계수가 커질 때도 상대적으로 크기는 작으나 동일한 결과가 나타난다. 공극률의 영향을 자세히 고찰해보면, 공극률이 0.25~0.65로 증가할 때 구조물 내부에서 유속의 감소율이 급격히 줄어들며(Fig. 8(b)), 이때 평균내부수위상승량 또한 감소한다(Fig. 8(a)).

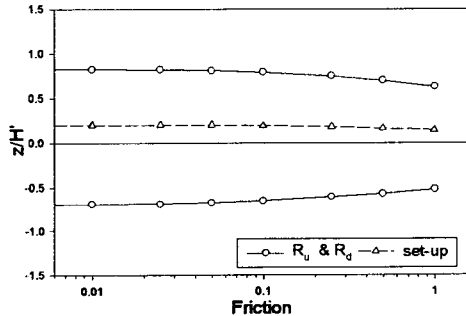


Fig. 2. Sensitivity analysis - friction coefficient.

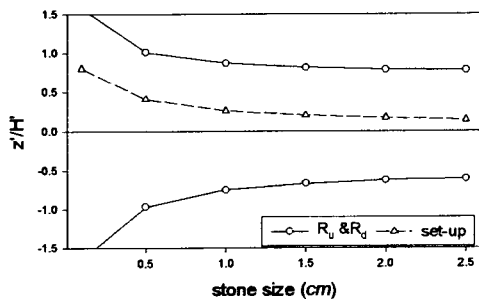


Fig. 3. Sensitivity analysis - stone size.

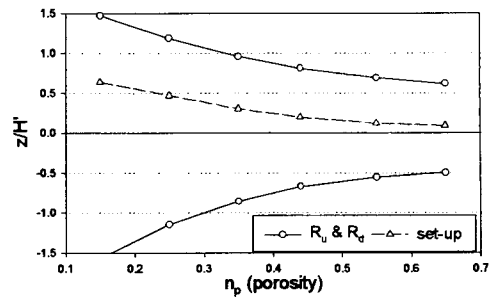


Fig. 4. Sensitivity analysis - porosity.

### 3.2 투수층 내부의 흐름특성에 관한 영향인자

투수층 내부흐름의 특성에 관한 인자로서 층류저항계수  $\alpha'$ , 난류저항계수  $\beta'$ , 그리고 관성저항계수  $c$ 에 대하여 그 영향정도를 평가하고, Fig. 5 ~ Fig. 7에 나타내었다. 투수층 내부흐름의 기술에 적용된 Forchheimer항의 계수  $\alpha'$ ,  $\beta'$ 는

$$\alpha' = \frac{\alpha(1-n_p)^3 \nu}{(n_p d_p')^2}, \quad \beta' = \frac{\beta(1-n_p)}{n_p^3 d_p'}$$

여기서  $\alpha$ ,  $\beta$ 는 투수층 사석의 형상 및 입도분포등 재료의 특성에 영향을 받는 계수로서 모델에서는 Shih(1990)에 의한 관측치로부터 계산된 값을 사용하였다. Fig. 5는  $\alpha'$ 의 영향도를 나타낸 것인데, 사면상의 run-up 및 run-down은 전 범위에서 거의 일정한 값을 나타내었다. 이는 투수층 내부의 흐름에서 난류성분이 지배적이기 때문이다. Fig. 6 ~ 7은 난류저항계수  $\beta'$  및 관성저항계수  $c$ 의 영향을 나타낸 것이다.  $\beta'$ 와  $c$ 의 경우는 계수값이 증가할 때 run-up 및 run-down이 증가하는 동일한 경향을 나타내었다. 그러나, 평균수위상승량은  $\beta'$ 가 증가할 때 증가하는 반면,  $c$ 가 증가할 때는 일정하게 나타났다. 이를 자세히 고찰하면,  $\beta'$ 가 1에서 6으로 증가함에 따라 구조물 내부에서의 유속감소율이 급격히 증가하고, 이때 내부의 평균수위가 상승한다(Fig. 9(a)~(b)). 그러나,  $c$ 가 0에서 1로 증가할 때는 구조물 내부에서의 유속감소율이 거의 일정하였으며 내부의 평균수위상승량 또한 거의 변화가 없었다. 그러나, 이 경우에는 사면상의 소상과 진폭이 증가하였고, 이로 인해 구조물 내부에서 내부수위의 진폭 또한 증가하였다(Fig. 10(a)~(b)).

이상의 결과로부터 기존모델의 보정인자를 관성항으로 판단하였다. 기존모델은 사면상의 run-up을 과소평가하였으며, 구조물 내부 IWG3에서의 평균수위상승량을 잘 재현하였다. 관성항을 고려하였을 때 run-up은 증가하였으며, 내부의 평균수위상승량은 큰 변화가 없었다. 따라서, 관성항을 고려할 수 있도록 기존모델을 수정하였다.

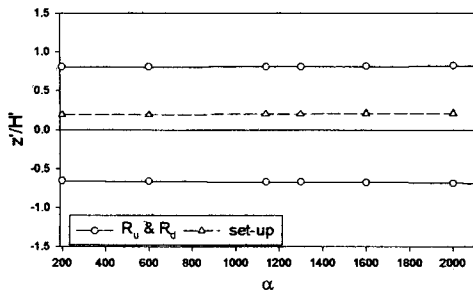


Fig. 5. Sensitivity analysis - laminar resistance coefficient.

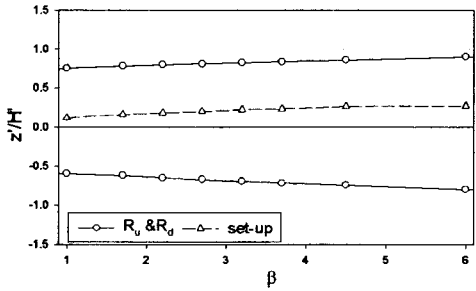


Fig. 6. Sensitivity analysis - turbulent resistance coefficient.

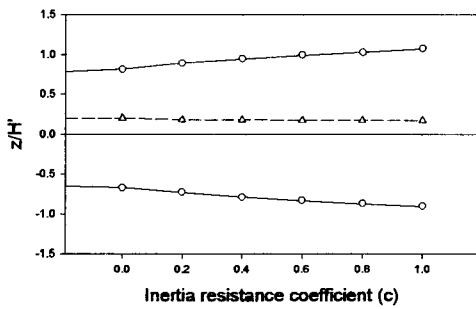


Fig. 7. Sensitivity analysis - inertia resistance coefficient.

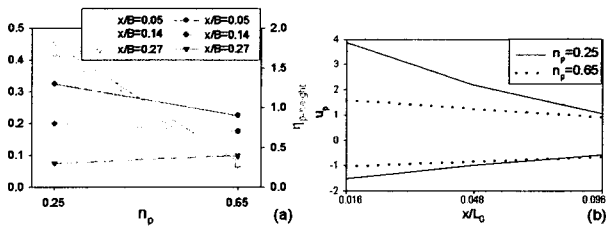


Fig. 8. Sensitivity of internal setup and internal velocity( $n_p$ ).

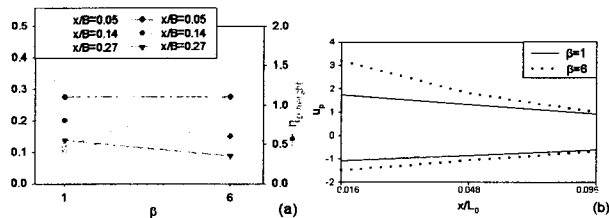


Fig. 9. Sensitivity of internal setup and internal velocity( $\beta$ ).

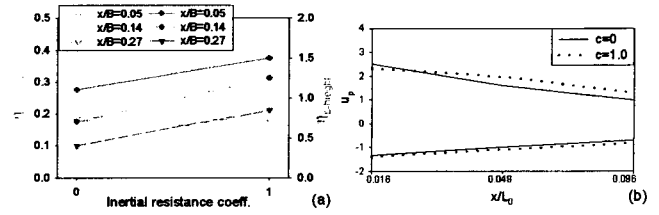


Fig. 10. Sensitivity of internal setup and internal velocity( $c$ ).

#### 4. 수리모형실험

본 연구에서 구축된 수치모델에 의한 투과성 해안구조물 내·외부 파랑장의 재현성을 검증하기 위해 부경대학교 해양 수리실험소내의 2차원 조파수조에서 수리모형실험을 실시하였다. 수리모형은 길이 35 m, 높이 1 m, 폭 1 m인 반사파 흡수형 조파수조에 설치하였다(Fig. 11). 수조내의 한 쪽 끝에는 조파기를, 다른 쪽에는 투과방파제를 설치하였으며, 투과방파제는 사면경사가 1:3인 구조물로서, 투수층의 폭은 각각 1 m와 2.2 m로 하였다. 본 실험에 사용된 파랑은 파고 3~7 cm, 주기 1.0~2.5 sec이며, 입사하는 파랑의 계측은 6개의 용량식 파고계를 방파제 전면에 설치하여 계측하였고, 사면상에 run-up gauge 1개와 internal waterlevel gauge 3개를 설치하여 각각 run-up 및 내부수위변동량을 계측하였다(Fig. 12). 또한 사면상에 수심이 40 cm, 28cm인 위치에 각각 유속계를 설치하여 수립자 속도를 계측하였다. 투수층 사석의 평균직경은 1.5 cm이며, 공극율은 44%, 투수계수는 정수두 실험결과 9.86 cm/sec였다. 구조물 toe에서의 수심은 40 cm, 무월파조건으로 실험을 실시하였다(Table 1).

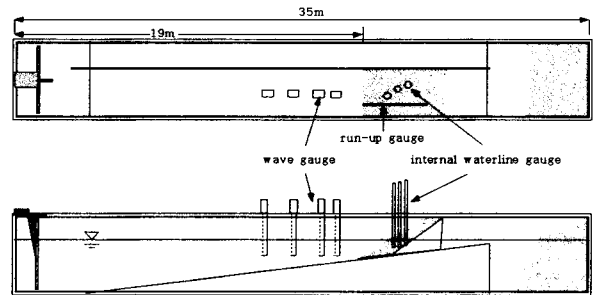


Fig. 11. Layout of test flume.

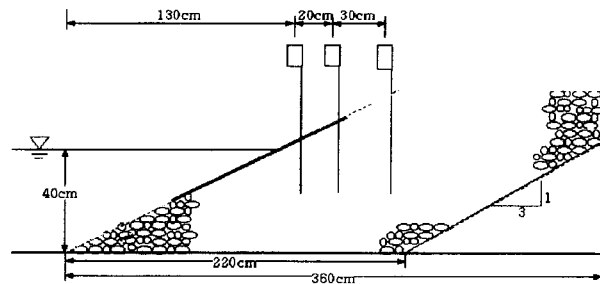


Fig. 12. Detail of model breakwater.

Table 1 Experimental condition and equipments

Experimental condition		Experimental equipments	
Wave condition	H 3~7 cm	Wave gauge	6 set
(Regular wave)	T 1~2.5 sec	(capacity type)	
Slope angle	$\theta'$ 1/3	Run-up gauge	1 set
Water depth	$d_i'$ 40 cm	Internal water	3 set
	$d_p'$ 1.5 cm		
Material property	$n_p$ 0.44	level gauge	
	$W_a$ 2 - 5 g		
	$k$ 9.86 cm/sec	A.D.Velocimeter	2 set

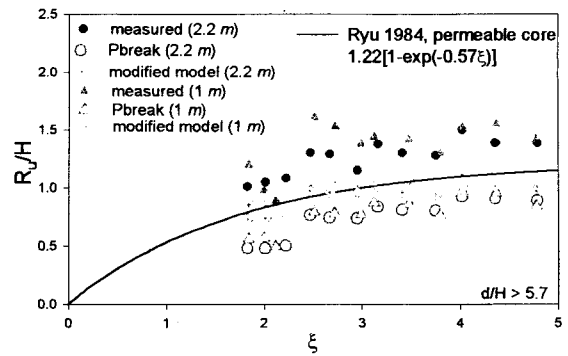


Fig. 13. Run-up versus  $\xi$ .

## 5. 결과고찰

본 실험에서 먼저 예측된 파열에 대하여 입·반사파 분리를 실시하고, 그 합성파형을 예측된 합성파형과 비교함으로써 수치모델에 적용하는 입사파의 적합성을 검증하였다. 그 후 입사파를 구측된 수치모델에 적용하고, 그 결과를 wave run-up 및 내부수위의 시계열에 대해 비교함으로써 모델의 적용성을 살펴보았다.

### 5.1 사면상의 손상파

검증된 입사파를 기존 모델 및 수정모델에 적용하여 계산하였다. 전체적으로 수치모델은 run-up을 과소평가 하였고, run-down을 잘 재현하였다. Run-up 및 run-down은 파고로 무차원한 상대 run-up 및 상대 run-down이다. Fig. 13은 실험시 예측된 run-up과 기존모델 및 수정모델에 의해 계산된 run-up의 관계를 나타낸 것이다. 기존모델의 결과는 모든 범위에서 run-up이 과소평가되었고, 특히 run-up이 0.8~1.2인 영역에서 오차가 가장 크게 나타났다(Fig. 14). 그러나, 수정모델의 결과는 기존 모델에서 30~50%로 나타난 run-up 오차를 10~30%로 낮추어 그 정도를 향상시켰다(Fig. 14). Fig. 15는 기존모델에 의해 계산된 run-up 시계열 및 수정모델에 의한 run-up 시계열, 그리고 수리모형실험시 예측된 run-up 시계열을 비교한 것이다. 투수층의 폭이 1 m인 경우의 run-up 시계열과 투수층의 폭이 2.2 m인 경우의 run-up 시계열이 전반적으로 동일한 경향으로 나타났다. 여기서, 파선은 수리모형실험 결과이고 실선은 기존모델의 결과이며 점선은 수정된 모델의 결과이다.

전체적으로 기존모델 및 수정된 모델은 run-up을 과소평가 하였으며, run-down을 잘 재현하였다. 기존모델의 경우 run-up의 오차가 약 30~50%였으나, 관성항을 고려한 수정모델의 경우 오차가 약 10~30%로 그 정도가 향상되었다. 따라서 수정된 모델은 기존모델의 run-up 정도를 개선한 것으로 판단된다.

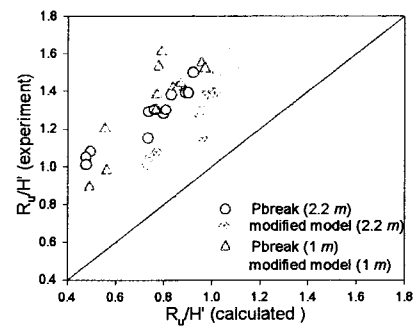


Fig. 14. Computed run-up versus measured run-up.

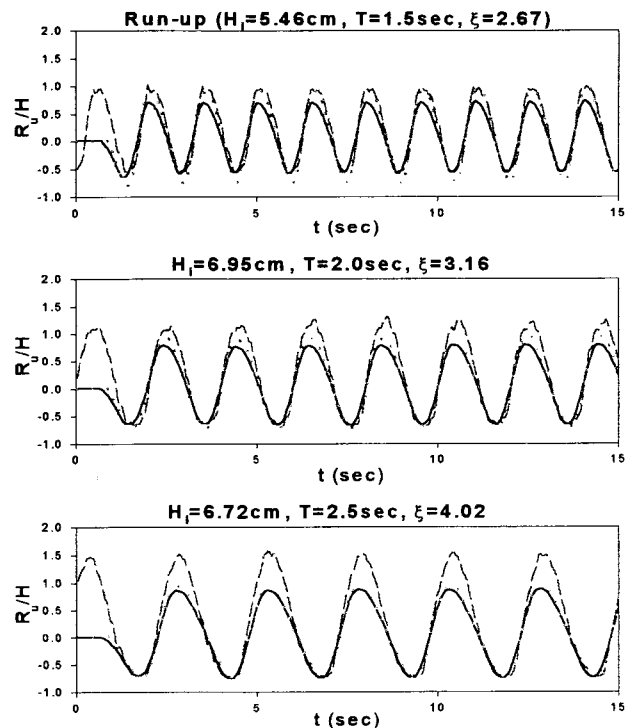


Fig. 15. Comparison of wave run-up time series.

## 5.2 투수층 내부의 수위변동

수리실험시 구조물의 사면끝단(toe)에서 각각 130 cm, 150 cm, 180 cm 위치에 내부수위계를 설치하였으며, 이는 정수면과 사면이 만나는 지점으로부터 구조물 내부로 각각 10 cm, 30 cm, 60 cm인 지점이다(Fig. 12). 이후, 10 cm 위치의 내부수위계를 IWG1, 30 cm 위치의 내부수위계를 IWG2, 60 cm 위치의 내부수위계를 IWG3라고 한다. 무차원된 내부수위는 각각  $\eta_{p1}$ ,  $\eta_{p2}$ ,  $\eta_{p3}$ 이다. Fig. 16은 각각의 내부수위계에서 측정된 시계열과, 동일위치에서 기존모델 및 수정모델에 의해 계산된 시계열을 비교한 것이다. 투수층 폭이 1 m인 경우와 2.2 m인 경우의 경향이 유사하므로 여기서는 투수층의 폭이 2.2 m인 경우에 대해 나타내었다. 파선은 수리모형실험 결과이고 실선은 기존모델의 결과이며 점선은 수정모델의 결과이다.

전체적으로 기존모델 및 수정모델 결과는 IWG1 및 IWG2에서 내부수위의 변동폭을 과대평가하였고, IWG3에서의 내부수위 변동폭은 대체로 일치하였다. 구조물 내부의 평균수위상승량은 대체로 과대평가되었으며, IWG2에서는 그 오차가 매우 크게 나타났다. Fig. 3.17 (a)~(c)는 각각 IWG1, IWG2, IWG3에서 평균수위상승량을 나타낸 것이다. IWG2에서는 그 오차가 크지만, IWG1 및 IWG3에서는 양호한 결과를 나타내었고, 입사파랑의 파고가 작고 주기가 긴 장파조건에서 그 정도가 높게 나타났다.

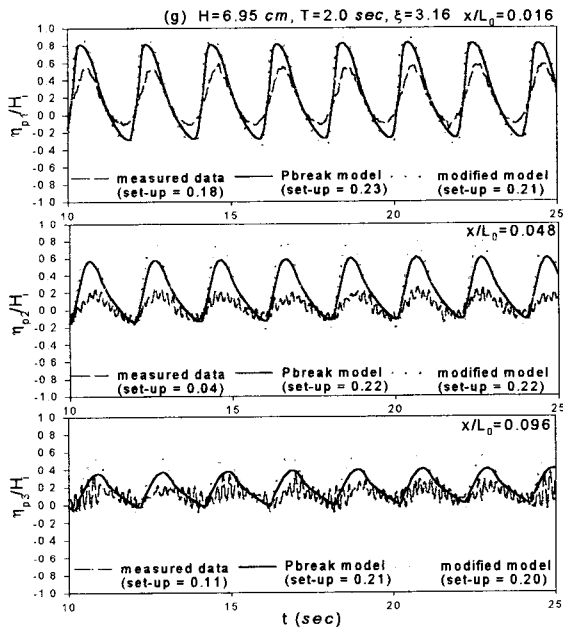


Fig. 16. Comparison of wave run-up time series.

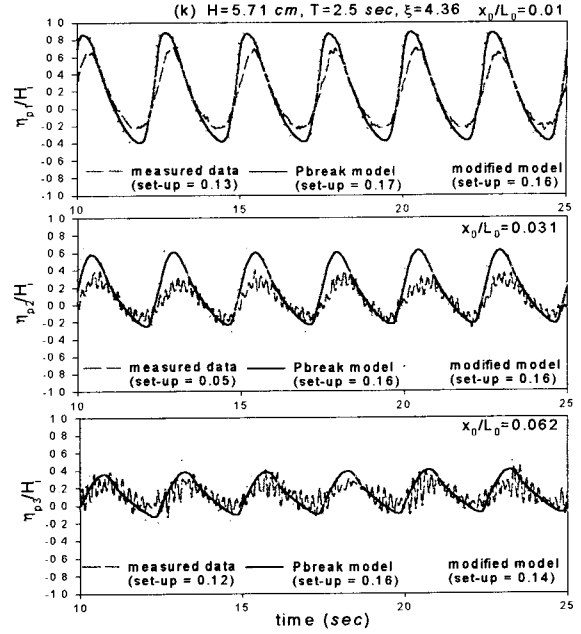


Fig. 16. Continued.

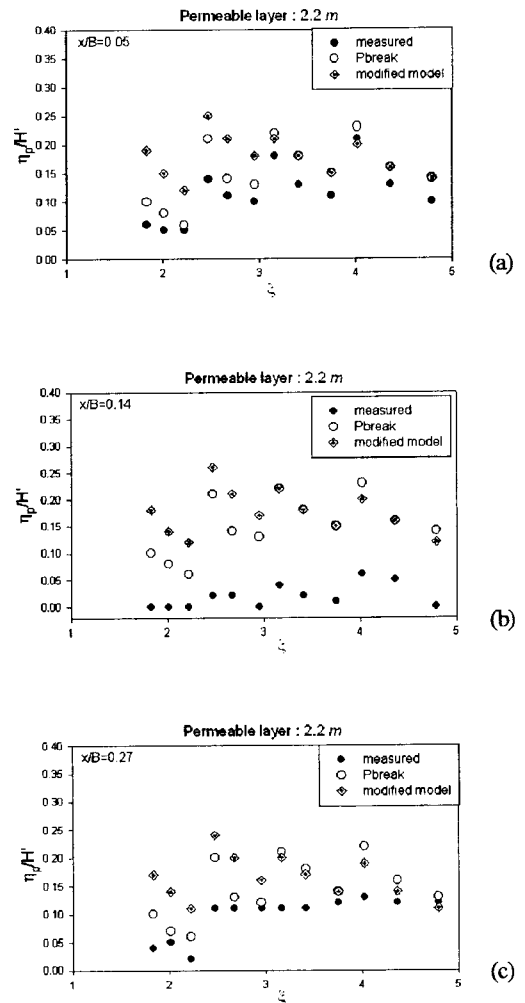


Fig. 17. Internal setup versus  $\xi$ .

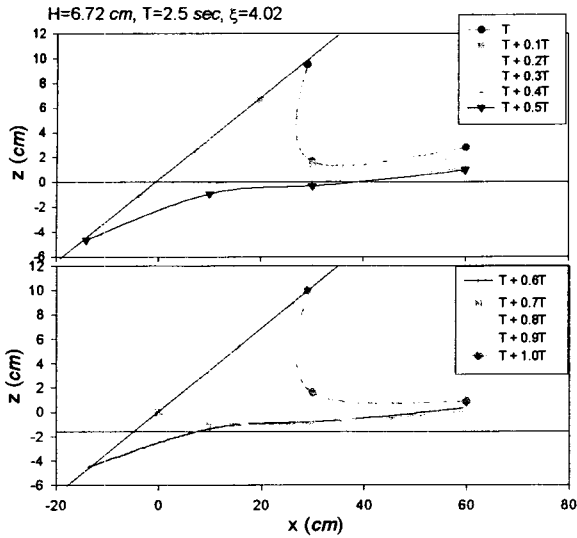


Fig. 18. Comparison of wave run-up time series.

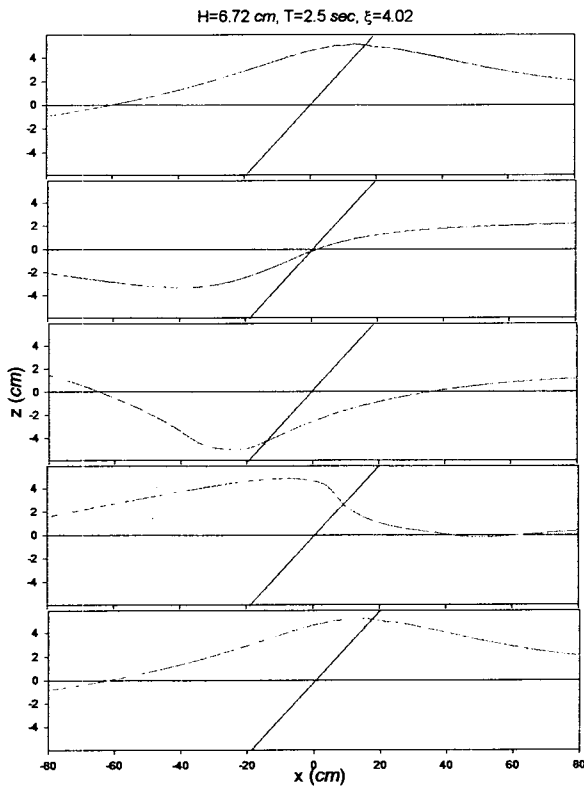


Fig. 19. Computational instantaneous spatial variation of  $\eta$ .

### 5.3 수치모델의 적용한계 고찰

민감도 해석의 결과를 토대로 기존의 모델을 보정해 줄 수 있는 인자로서 관성저항항을 채택하여 적용시킨 후, 동일한 조건에 대하여 계산하여 그 결과를 수리모형실험시 측정된 자료 및 기존의 모델에 의한 계산결과와 비교·검토하였다. 앞 장에서 살펴보았듯이 기존의 모델은 run-up을 과소평가하였다. 그러나 파가 최대로 치오른 부분으로부터 외부의 물이 직접 침투

하는 영역(IWG2)을 벗어난 구조물 내부(IWG3)에서는 대체로 평균수위상승량을 재현하고 있음을 알 수 있었다. 기존의 모델은  $\xi < 2.4$ 인 영역에서 일반적으로 run-up 및 평균 내부수위 상승량의 오차가 크다. 그러나  $\xi$ 가 커질수록 일치하는 경향이 나타난다. 즉, 쇄파형태가 surging breaker인 경우에 그 정도가 높다. 이러한 경향은 수정된 모델의 결과에서도 동일하게 나타난다. 수정된 모델에 의한 결과에서 전체적으로  $\xi > 2.4$ 인 영역에서는 대체로 일치하는 경향이 나타나고 있으며,  $\xi > 3$ 인 영역에서 IWG3의 평균 내부수위상승량은 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 그리고 수정된 모델은 기존 모델에 비해 run-up의 오차를 약 50~30%에서 30~10%로 감소시켰다. 그러나 IWG2의 위치에서는 기존의 모델 및 수정된 모델의 모든 경우에서 그 결과가 큰 오차를 보이고 있다. 실험결과, 천이영역에서 내부수위가 급격히 감소하는 반면 계산결과는 이를 재현하지 못한다. 이를 명확히 규명하기 위해서 실험 및 계산에서 나타난 연속적인 순간수면형을 각각 Fig. 18 및 Fig. 19에 나타내었다. Fig. 18은 0.1주기별로 run-up gauge 및 IWG1~IWG3에서 측정된 수위를 연결한 선이며, Fig. 19는 0.25주기별로 계산되어 얻어진 수면형이다. Fig. 18에서 보면 IWG2가 위치한 천이영역에서 최대 run-up이 관측된 지점으로부터 급격히 수위가 감소하지만, Fig. 19의 계산 결과에서는 동일 영역에서 수위가 완만하게 연속되는 것을 볼 수 있다. 따라서 IWG2가 위치한 천이영역에서 본 수치모델은 실제로 나타나는 물리적 현상을 재현하는데 한계가 있음을 알 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 투과성 해안구조물에서 구조물 내부의 수리학적 거동특성과 사면상의 수리학적 특성이 상호작용한다는 사실을 바탕으로 이를 고려할 수 있는 수치모델의 개발을 목표로 하였다. 먼저, 비선형 천해방정식을 기초로 한 1차원 모델에 대해서 고찰 및 그 영향인자들을 검토하였고, 수리모형실험을 실시하여 소상파고 및 구조물 내부에 설치된 내부수위계에서 내부수위의 변동에 관해 고찰하였다. 기존모델에 적용되는 영향인자들의 민감도 분석을 실시하여 모델의 보정효과가 가장 클 것으로 판단된 관성항을 고려함으로써 모델을 수정하였다. 그리고, 수리모형실험결과를 기존모델에 의한 계산결과 및 수정모델에 의한 계산결과와 비교·분석하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 일반적으로, 기존의 수치모델은 수리모형실험에 비해 run-up 고를 과소평가하며 평균내부수위 상승량을 과대평가한다. 기존 모델의 경우  $\xi > 2.5$ 인 경우 run-up이 대체로 약 30%정도 과소평가되며,  $\xi < 2.5$ 인 경우에 오차가 약 50%정도로 크게 나타났다. 내부수위의 변동시계열 및 평균 내부수위상승량은 대체로 과대평가되지만, run-up이 직접 구조물 내부로 침투하는 영역(IWG2)을 벗어난 구조물 내부에서는 대체로 일치하는 경향을 나타낸다.
- 2) 민감도 분석결과, 사석의 공극률 및 사석의 직경이 커질수록 투수성이 증대되는 효과가 나타나며 사면상의 run-up은 감

소하고 구조물 내부의 평균수위도 감소한다. 이때 구조물 내부로의 유속감소율은 급격하게 감소한다. 반대로, 투수층 내부흐름에 작용하는 난류저항계수  $\beta$ 가 증가할 때는 사면상의 run-up 및 평균수위가 증가하며, 이때 구조물 내부로의 유속감소율은 급격히 증가한다. 관성저항계수를 증가시켰을 때에는 사면상의 run-up이 증가하지만 구조물 내부의 수위상승량은 거의 동일하였으며, 이때 구조물 내부로의 유속의 감소율도 일정하였다.

3) 민감도 분석내용을 고찰하여 모델의 보정인자를 관성항으로 설정하였다. 따라서 관성항을 적용하여 모델을 보정한 후 동일한 조건에 대해 계산을 실시하였다. 그 결과 run-up에 있어서 오차가 실험결과에 비해 약 10~30%정도로 나타남으로써 그 정도가 기존의 모델에 비해 증대되었다.

4) 파가 최대로 치오른 부분으로부터 외부의 물이 직접 침투하는 영역(IWG2)에서는 기존의 모델 및 수정된 모델은 큰 오차를 보이며 적용성이 없는 것으로 판단되었다. 수리실험결과, 이 영역에서는 내부수위가 급격히 감소하였으며, 수치모델을 이 영역에 적용하기 위한 노력이 부가적으로 필요하다고 판단된다.

## 참 고 문 헌

- Burchartch, H. F. and Andersen, O. H.(1995). "On the one-dimensional steady and unsteady porous flow equation", *Coastal Eng.*, 24, pp. 233~257.
- Hannoura, A. A. and McCorquodale, J. A.(1985). "Rubblemounds: Numerical modelling of wave motion", *J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, Vol. 3, No. 5, pp. 800-816.
- Losada, I. J., Losada, M. A. and Martin. F. L.(1995). "Experimental study of wave-induced flow in a porous structure", *Coastal Eng.*, 26, pp. 77~98.
- Kobayashi, N. and Wurjanto, A.(1992). "Numerical model for random waves on permeable coastal structures", Technical report. CACR-92-02.
- Losada, M. A. and Gimenez, L. A.(1981). "Flow characteristic on rough, permeable slopes under wave action", *Coastal Eng.*, Vol. 4, pp. 187-206.
- Muttray, M., Oumeraci, Zimmermann, C. and Partenscky, H. W. (1992). "Wave Energy Dissipation on and in Rubble Mound Structures", *Proc. 23th Conf. on Coastal Eng.*, Chap 110.
- Ryu, C. R. and Kim. H. J.(1993). "Stability analysis of rubble mound structures under the irregular wave", *Proc. of Coastal Eng.*, JSCE, 40(2), pp. 806~810.
- Ryu, C. R. and Sawaragi, T.(1986). "A new design method of rubble mound structures", *Proc. 20th Conf. on Coastal Eng.*
- Sakakiyama, T. and Kajima, R.(1992). "Numerical simulation of nonlinear wave interacting with permeable breakwaters", *Proc. 23th Conf. on Coastal Eng.*, Chap 116.
- Sawaragi, T. and Deguchi, I.(1992). "Waves on permeable layers", *Proc. 23th Conf. on Coastal Eng.*, pp. 1532~1544.
- Shih, R.(1990). "Permeability characteristics of rubble material - New formulae", *Proc. 22th Conf. on Coastal Eng.*, Chap 112.
- Sollitt, C. K. and Cross, R. H.(1972). "Wave reflection and transmission at permeable breakwater", Ralf Parsons Lab., M.I.T., Rept. No.147, 235p.
- Van der Meer, Petit, H. A. H., van der Bosch, P., Klopman, G., and Broekends, R.D.(1992). "Numerical simulation of wave motion on and in coastal structures", *Proc. 23th Conf. on Coastal Eng.*, Chap 122.
- van Gent M.R.A.(1994). "The modelling of wave action on and in coastal structures", *Coastal Eng.*, Vol. 22, pp. 311-339.
- van Gent M.R.A.(1995). "Porous flow through rubble-mound material", *J. of waterway, port, coastal and ocean eng.*, Vol. 121, pp. 176-181.
- Wurjanto, A. and Kobayashi, N.(1993). "Irregular wave reflection and run-up on permeable slopes", *J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng.*, Vol. 119, No. 5, pp. 537~557.
- 전재우(2000). "투과성 방파제의 내부수위 변동과 방파제의 수리특성", 석사학위논문, 부경대학교.
- 柳青魯(1984). "捨石防波堤の水利學的最適設計に關する基礎的研究", 大阪大學工學部 土木工學科 博士學位論文, pp. 1~165.