

투과성 해안구조물의 Wave Run-up에 대한 CADMAS-SURF의 적용

윤한삼*, 차종호**, 강윤구***
*부경대학교 해양산업개발연구소
**부경대학교 해양공학과
***삼성물산(건설부문)

An Application of CADMAS-SURF to the Wave run-up in Permeable Coastal Structures

HAN-SAM YOON*, JONG-HO CHA**, AND YOON-KOO KANG***

*Research Center for Ocean Industrial Development, Pukyong National University, Busan, Korea

**Dept. of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

***Engineering and Construction Group, Samsung Corporation, Seongnam, Korea

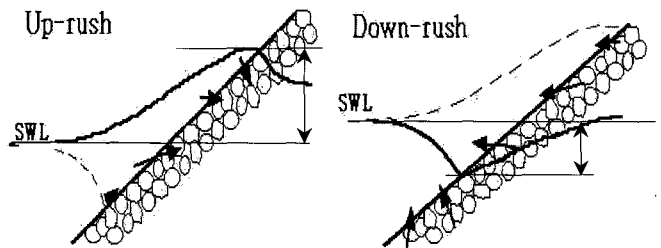
KEY WORDS: Permeable Coastal Structure 투과성 해안구조물, Wave run-up 파 쳐올림, CADMAS-Surf 수치파동수로

ABSTRACT: We constructed and demonstrated a numerical CADMAS-SURF(V4.0) model that reproduces the wave run-up characteristics on the slope of coastal structures and applied it to a permeable coastal structure. We also compared the numerical model with published experimental results on the hydrodynamic phenomena of structures and some numerical results for a modified Pbreak model. In conclusion, the CADMAS-SURF model efficiently simulated wave run-up on the slope of a permeable coastal structure. The inflow/outflow effects from the porous structure boundary were approximately 15% more than with the modified Pbreak model. Nevertheless, the descriptions of the internal hydraulic characteristics still could not be fully exacted from the result(Fig. 1 참조)s obtained in our model experiment.

1. 서 론

연안 및 해안지역은 인간 활동공간과 밀접한 관계가 있으며, 관련 기간산업의 발달과 함께 그 이용 가능성도 증가되는 추세이다. 최근 인간의 활동 무대 또는 생활공간으로서 중요한 연안 및 해안지역의 개발이 진행됨에 따라 그 보전 및 안전이 더욱 중요시 되고 있다. 특히 삼면이 바다로 둘러싸여있어 우리나라 지형학적 특성상 연안 및 해안지역은 태풍, 고파랑, 해일 등 해양성 재해성로 인한 위험에 노출되어 있다. 이러한 측면에서 해양성 재해, 특히 고파랑으로부터 연안 및 해안지역을 안전하게 보호하기 위한 파랑제어구조물의 중요성은 매우 크다.

연안 및 해안지역의 대표적인 파랑제어구조물인 사석방파제는 투과성 구조물로서 일반적으로 가장 많이 시설되는 구조물로서 기존에 이와 같은 외해성 고파랑 에너지를 소산시키기 위한 투과성 구조물과 파랑의 상호작용에 관한 많은 연구가 수행되어져 왔다(전재우 등, 2002). 투과성 해안구조물의 설계문제에 있어서 사면상의 수리학적 특성을 규명하는 것은 구조물 및 피복석의 안정성을 결정하는 것과 함께 필수적이다. 특히 해안구조물 사면상의 구조물의 천단고 결정을 위한 가장 중요한 설계인자이다(남인식 등, 2002).



(a) Wave run-up height (b) Wave run-down height
Fig. 1 Definitions of wave run-up height/run-down height.

기존 연구자들의 wave run-up/run-down 연구결과에 따르면 구조물 내부로부터의 유출과 유입특성을 가지는 보조피복층(Filter layer)에서의 wave run-up 특성은 쇄파지수 ξ (surf similarity parameter : $\tan\theta / \sqrt{H/L_o}$)의 함수로 표현되는 것으로 알려져 있다(Bruun and Gunbak, 1977). 여기서, θ 는 사면의 경사각, H는 파고, L_o 는 심해파장이다. Fig. 1에서와 같이 wave run-up height(R_{uh})/wave run-down height(R_{uh})는 경사식 구조물 사면상의 Up-rush/Down-rush시의 정수면으로부터의 수직 거리로 정의한다(해양수산부, 1999).

이러한 구조물의 설계는 전통적으로 경험공식이나 수리모형

제1저자 윤한삼 연락처: 부산광역시 남구 대연3동 599-1

051-620-6256 yoonhans@pknu.ac.kr

실험을 통해 안정성 및 기능성의 해석에 기초하였다. 그러나 경험공식에 의한 방법은 한정된 파랑제원과 특정한 구조물 형상에는 그 적용이 제한적이다. 또한 수리모형실험에 의한 방법은 측정효과와 발생 및 많은 시간과 비용이 소요되는 문제점이 있다.

따라서 경험공식 및 수리모형실험과 함께 설계과정의 신뢰성과 효율성을 높이기 위해서는 수치해석기법의 이용이 필수적이며, 그 개발 및 적용성에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다(Liu et al., 1999; Hsu et al., 2002).

특히, Hirt and Nichols(1981)가 제안한 VOF(Volume of Fluid) 법은 기계공학의 유체분야 등에서 쇄파를 수반한 수면변동의 추정에도 많이 활용되고 있으며(김도삼 등, 2002), 또한 잠체에 작용하는 파력의 3차원 수치해석(Hur and Mizutani, 2003) 및 투과성 저천단 구조물의 2차원 수치해석(Garcia et al., 2004) 등에 적용되고 있다.

그 대표적인 수치해석기법으로 최근 소개된 것이 유체의 점성 및 난류특성을 포함하고 있는 Navier-Stokes 방정식과 Porous body model(Sakakiyama and Kajima, 1992)을 근거하여 확장한 CADMAS-SURF이다. 이 모델은 VOF(Volume of Fluid)법의 알고리즘을 사용하고 구조물 내·외부에서 발생하는 쇄파를 포함한 완전비선형파랑변형을 직접수치모의(Direct Numerical Simulation)하는 것으로 2차원 수리모형실험을 통해 검증된 수치모형이다(Coastal Development Institute of Technology, 2001).

투과성 구조물과 파랑의 상호작용에 관한 기존 연구 결과중 Kobayashi and Wurjanto(1992)에 의해 개발된 천해방정식을 기초한 Pbreak model은 수리모형실험에 비해 투과성 구조물 사면상의 쇄파를 포함한 비선형적인 wave run-up height를 30~50% 정도 과소평가하는 경향을 나타내었다. 또한 관성항을 고려한 modified Pbreak model은 그 정도를 향상시켰지만 실험결과에 비해 약 10~30%정도 오차를 나타내었다(남인식 등, 2002).

따라서 본 연구에서는 기존의 남인식 등(2002)의 수리모형실험으로부터 얻은 결과 및 천해방정식으로 해석한 modified Pbreak model과 함께 CADMAS-SURF(V.4.0)를 사용하여 투과성 해안 구조물의 사면상의 wave run-up에 대한 수리특성을 비교·분석하였다. 이를 통해 본 연구는 해안구조물 사면상의 수리특성을 파악할 수 있는 CADMAS-SURF의 적용성을 확인하고, 또한 최종적으로는 본 모델을 통해 얻어진 사면상의 수리학적 해석결과와 신뢰성 향상 및 현장설계 적용성을 검토하는데 목적이 있다.

2. CADMAS-SURF의 개요

본 연구에서 적용한 CADMAS-SURF의 기본방정식에는 2차원 비압축성 점성유체를 대상으로 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식을 Porous body model에 근거하여 확장한 다음의 운동방정식 (1)~(3)을 사용한다.

· 연속방정식

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

· 운동방정식

$$\lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u u}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z u w}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \mu_e \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \mu_e \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} - D_x u + S_u - R_x \quad (2)$$

$$\lambda_w \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x w u}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_z w w}{\partial z} = -\frac{\gamma_w}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x \mu_e \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z \mu_e \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} - D_z w + S_w - R_z - \gamma_w g \quad (3)$$

여기서, t 시간, x, z 수평, 연직좌표, u, w 유속의 수평, 연직 성분, ρ 밀도, p 압력, ν_e 동점성계수와 와점성계수의 합, g 중력가속도, D_x, D_z 는 에너지 감쇠대를 위한 계수, γ_v 공극률, γ_x, γ_z 수평, 연직방향의 면적 투과율이다. $\lambda_v, \lambda_x, \lambda_z$ 는 C_M 을 관성력계수로 한다면 다음과 같이 나타낼 수 있고, 우변 제2항이 구조물로부터 받은 관성의 효과를 나타낸다.

$$\lambda_v = \gamma_v + (1 - \gamma_v) C_M \quad (4)$$

$$\lambda_x = \gamma_x + (1 - \gamma_x) C_M \quad (5)$$

$$\lambda_z = \gamma_z + (1 - \gamma_z) C_M \quad (6)$$

또한 다공질체로부터의 저항력 R_x, R_z 는 C_D 를 저항계수로 하여 유속의 제곱에 비례하는 형태로 나타내었다.

$$R_x = \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta x} (1 - \gamma_x) u \sqrt{u^2 + w^2} \quad (7)$$

$$R_z = \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta z} (1 - \gamma_z) w \sqrt{u^2 + w^2} \quad (8)$$

여기서, $\Delta x, \Delta z$ 는 수평 및 연직방향의 격자간격이다.

자유표면을 해석함에 있어서는 복잡한 표면 형상의 해석이 가능한 Hirt and Nichols(1981)가 제안한 VOF(Volume of Fluid) 법을 적용한다. 이는 marker입자법의 장점을 가지면서 marker입자법의 결점인 계산의 번잡성 등의 단점을 갖지 않는 방법으로 범용성이 높다. 특히 여기서 VOF함수 F는 일정 물리량인 유체의 체적율로서 유체영역 뿐만 아니라 기체상태의 영역까지 포함하는 전 영역으로 적용이 가능한 특징을 가진다.

본 연구에서 사용되어진 VOF함수 F는 $0 \leq F \leq 1$ 의 범위를 가지며, F=1일 경우는 유체셀, F=0일 경우는 기체셀, $0 < F < 1$ 일 경우는 표면셀로 각각 판단되어 자유수면을 추적하게 되며, F에 대한 이송방정식은 다음과 같다.

$$\gamma_v \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x u F}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w F}{\partial z} = S_F \quad (9)$$

식 (1)~(3) 및 식 (9)에서 나타낸 S_p, S_u, S_w, S_F 는 조파소스에 관한 항으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_p = q(z, t) \tag{10}$$

$$S_u = uq(z, t) \tag{11}$$

$$S_w = wq(z, t) + \frac{\nu}{3} \frac{\partial q(z, t)}{\partial z} \tag{12}$$

$$S_F = Fq(z, t) \tag{13}$$

여기서, $q(z, t)$ 는 $x = x_s$ 의 위치에서의 격자간격을 Δx_s 로 하여 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$q(z, t) = 2 \frac{U(x, t)}{\Delta x_s} \tag{14}$$

상술한 기본방정식으로부터 수치해를 계산하는 방법은 식 (1)~(3)을 반복 계산하여 매 시간간격마다 미지수인 u, w, p 를 결정하며 이들을 난류모델에 입력하여 와점성계수를 구한다. 그리고 u, w 를 F의 이송방정식 식(9)에 입력하여 수면곡선을 추적한다. 또한 원하는 조파소스를 입력하여 수치파동수로 내에 파동장을 u, w, p, F 로 결정하며 계산종료 시간까지 반복계산을 수행하는 절차를 가진다.

3. 수치해석기법의 검증

본 연구에서는 기존의 남인식 등(2002)에 의해 반사파 흡수형 2차원 조파수조(부경대학교 해양수리실험소)에서 수행되었던 수리모형실험결과를 기초로 하여 수치해석의 검증을 수행하였다. Fig. 2와 같이 수치해석에 적용된 구조물의 형상은 Photo 1과 흡사하게 단순화한 해석단면으로 선정하였다. Photo 1은 수리모형 실험시의 실험수조, wave run-up gauge 및 구조물 배치 후의 전경사진이다.

구조물 toe에서의 수심(d)은 40 cm, 무월파조건으로 사면 경사는 1/3이며, 모형단면은 투수층 폭(Bp)을 각각 100 cm과 220 cm로 하였으나 두 경우 모두 유사한 결과가 도출되었으므로 본 연구에서는 투수층의 폭이 220 cm인 경우를 중심으로 논하고자 한다. Table 1은 본 연구에서 사용한 CADMAS-SURF의 계산조건을 나타내고 있으며, 실험의 입사파 조건은 파고 3~7 cm, 주기 1.0~2.5 sec의 규칙파를 사용하였다. 또한 구조물의 재료 공극률(0.44)은 투수실험에 의해 획득되었던 결과로 수리모형실험과 동일하게 적용하였고, 항력계수 및 관성력 계수는 허용범위 안에서 기존 문헌치를 통해 각각 1.0, 1.2를 적용하였다.

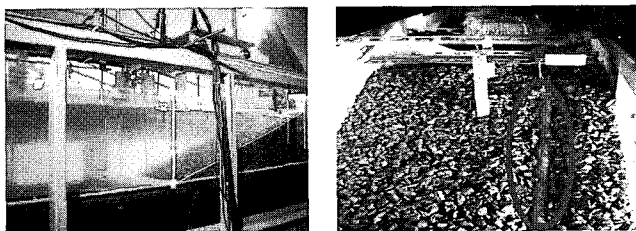


Photo 1 Setting of the permeable structure and wave run-up gauge.

Fig. 3은 CADMAS-SURF를 사용하여 가시화(visualization)한 투과성 해안구조물 사면상의 wave run-up/run-down의 흐름장 및 유속의 크기와 방향을 벡터성분으로 나타낸 결과이다.

3.1. 수리모형실험 결과와의 파형비교

본 연구에서는 수리모형실험과 수치계산 결과의 타당성을 검증하기 위해 투과성 해안구조물 사면상의 wave run-up을 중심으로 구조물 전면부에서의 수면파형을 먼저 비교하였다. Fig. 4는 입사파고 $H_i=4.29$ cm, 입사주기 $T_i=1.0$ sec의 경우이고, Fig. 5는 $H_i=6.72$ cm, $T_i=2.5$ sec의 경우이다.

수리모형실험 및 수치계산시 구조물 전면부의 수면변동(η)을 입사파고(H_i)로 무차원화하여 나타낸 실험결과 Fig. 4로부터 쇄파지수(ξ)가 2.01인 경우, WCH3에서 계산결과는 실험치와 잘

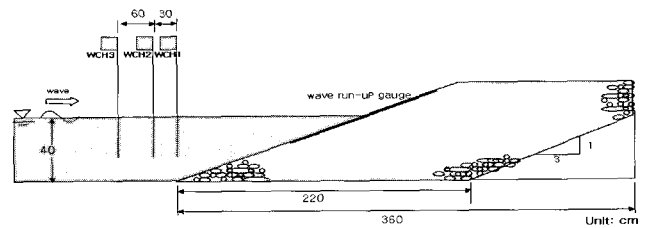


Fig. 2 Sketch of a wave flume.

Table 1 CADMAS-SURF solution conditions.

Version	V4.0
Wave generation	Stokes Wave
Boundary Conditions	Open Boundary, Slip
Scheme	DONOR-0.5
Time Step	0.002 sec
Height	3~7 cm
Period	1.0~2.5 sec
Mound	Porosity(0.44), Inertial coefficient(1.2) Drag coefficient(1.0)

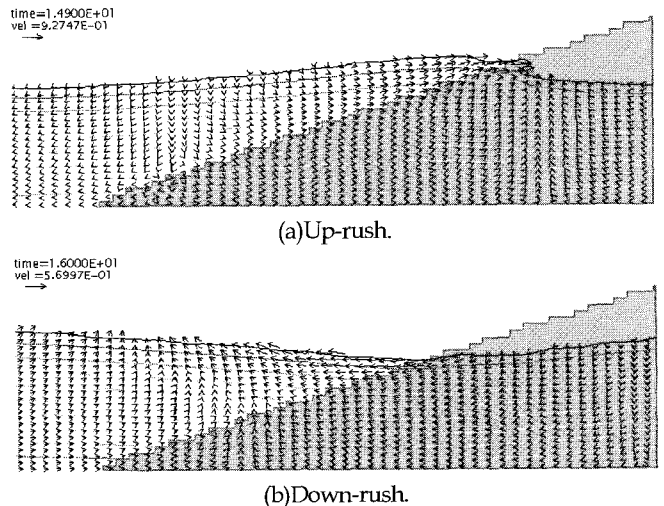


Fig. 3 Snapshots of wave run-up/run-down ($H_i = 6.95$ cm, $T_i = 2.0$ sec).

일치하였고, WCH2에서는 파봉, 파곡부분에서 약간 차이를 나타내었다. 또한 구조물 toe부인 WCH1에서는 거의 일치하였으나 t/T_i 가 0.6보다 큰 시점에서 수치계산치가 수리모형실험치보다 작게 나타났다. 그러나 계산되어진 수치실험의 무차원 수면변동은 구조물 전면부인 WCH3, WCH2, WCH1의 세 지점 모두에서 수리모형실험결과와 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 쇄파지수(ξ)가 상대적으로 큰 수치인 4.02의 경우이며, 2파장 성분의 경과시간을 입사파의 주기 T_i 로 무차원화하였다.

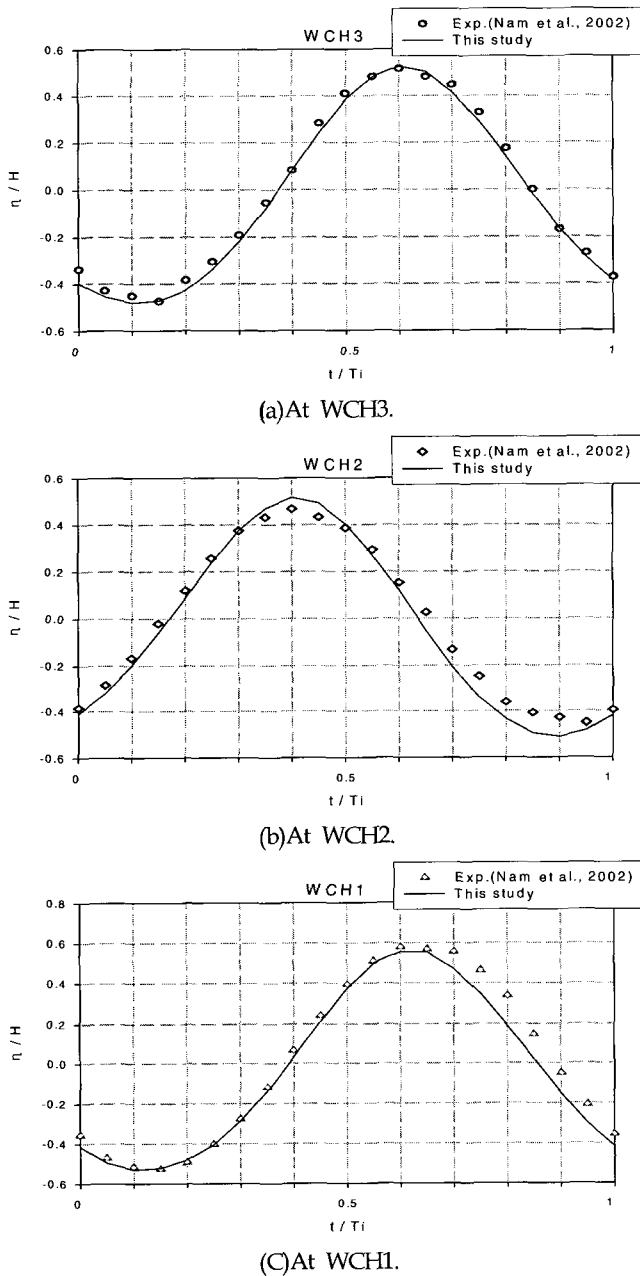


Fig. 4 Comparison of the temporal variation in the water surface profiles ($H_i = 4.29$ cm, $T_i = 1.0$ sec, $\xi = 2.01$).

이상의 실험결과를 통해 부분적으로 수리실험결과와 약간의 차이는 있으나 전반적으로 실험치와의 비교에서 양호한 결과를 나타내었다. 특히 toe부인 WCH1에서는 무차원경과시간이 증가함에 따라 파형이 다소 차이를 나타내었지만, 구조물에 의한 파 변형 특성이 양호하게 재현되었다는 것을 알 수 있다.

3.2. 사면상의 wave run-up 특성

본 연구에서는 시간대별 wave run-up을 획득하기 위해 사면상의 모든 격자점에서 수치파고계(VOF함수 F의 연직 적분)를 설치하였고, 수면변동에 따른 각 파고계별 최대 수면변위값을 wave run-up으로 설정하였다. Fig. 6은 무차원경과시간에

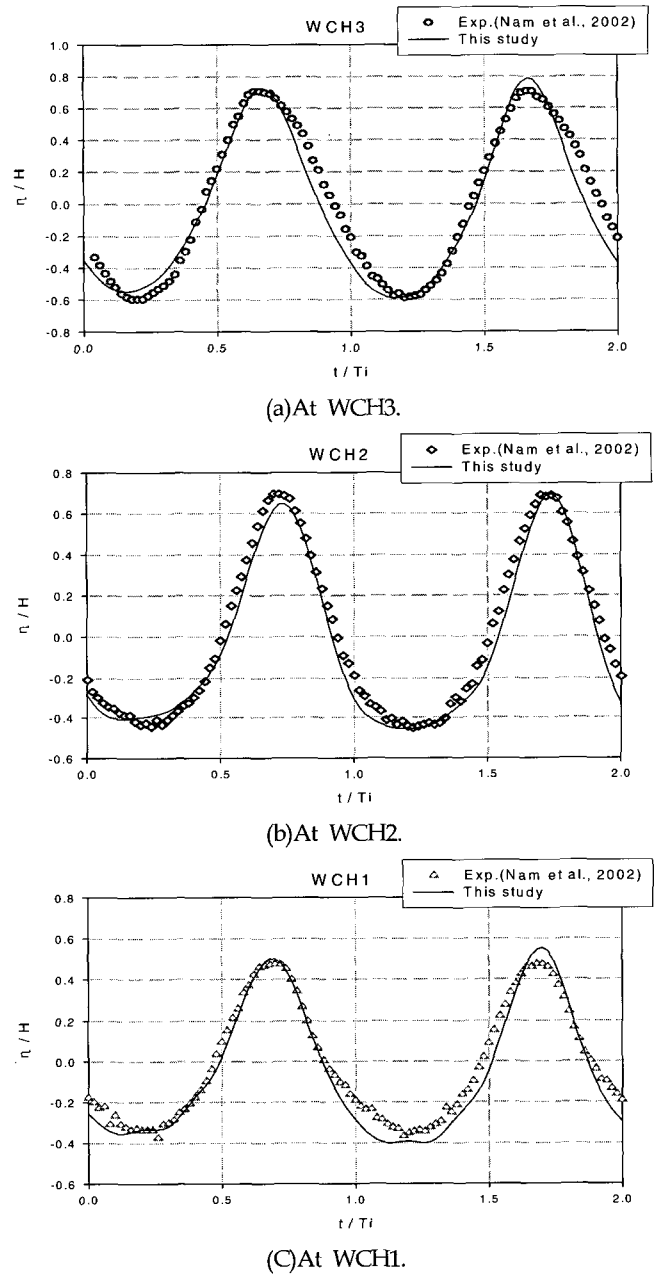
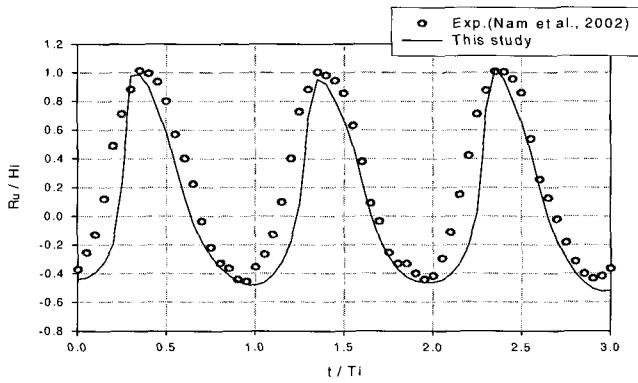


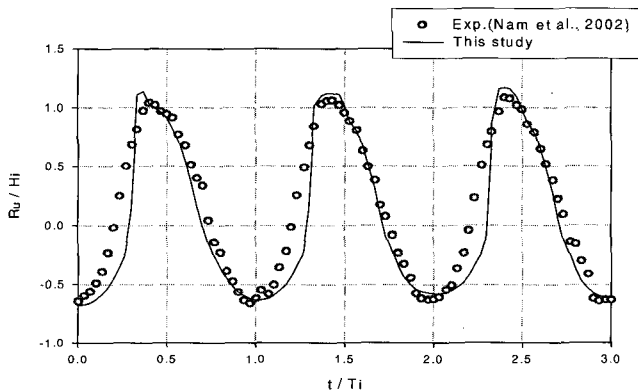
Fig. 5 Comparison of the temporal variation in the water surface profiles ($H_i = 6.72$ cm, $T_i = 2.5$ sec, $\xi = 4.02$).

다른 투과성 구조물 사면에서의 wave run-up(R_u) 특성을 입사파고(H_i)로 무차원화하여 나타낸 것으로 남인식 등(2002)의 수리모형실험결과와 비교한 것이다.

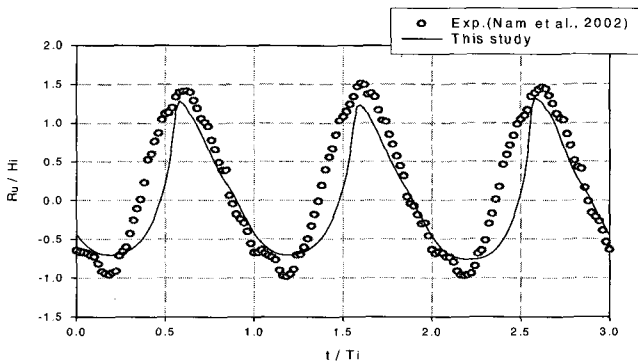
해안구조물 사면상의 wave run-up 특성은 쇄파지수(ξ)로 유용하게 표현되므로(Bruun and Gunbak, 1977) 본 연구에서는 쇄파지수(ξ)에 따른 wave run-up의 특성에 대해서도 검토하였다. 그 결과, Fig. 6에서 쇄파지수(ξ)가 2.01, 2.95일 때는 본 수치해석 결과가 비교적 실험치를 양호하게 재현하고 있음을 알 수 있다. 그러나 쇄파지수(ξ)가 4.79인 경우는 계산치가 전체적으로 실험치에 비해 과소평가되었다는 것을 알 수 있다.



(a) $H_i = 4.29$ cm, $T_i = 1.0$ sec, $\xi = 2.01$.



(b) $H_i = 4.48$ cm, $T_i = 1.5$ sec, $\xi = 2.95$.



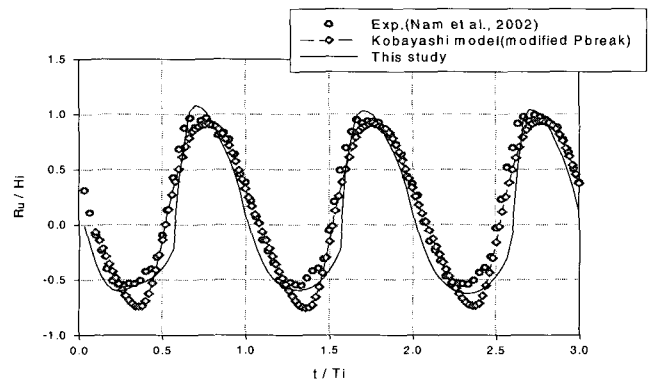
(c) $H_i = 4.72$ cm, $T_i = 2.5$ sec, $\xi = 4.79$.

Fig. 6 Comparison of the temporal variation in the wave un-up.

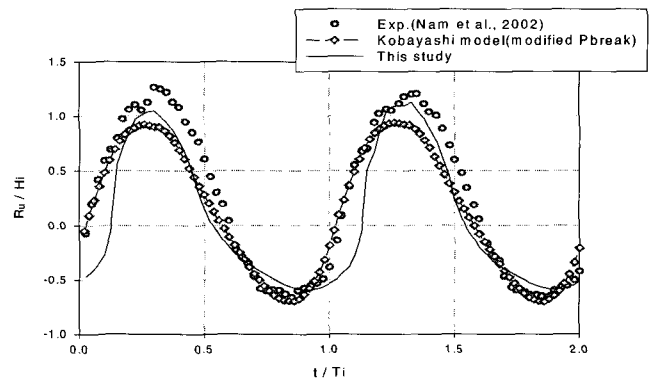
3.3. Modified Pbreak Model과의 비교

Kobayashi and Wurjanto(1992)에 의해 개발된 Pbreak model은 임의 경사를 가지는 투수층 사면에서의 파랑의 거동을 계산하기 위해 정수압 및 수심평균유속을 가정한 1차원 비선형 장파모델이다. 이에 대해 남인식 등(2002)은 전술한 Pbreak model에 주요 parameter들을 민감도 분석하여 보정효과가 가장 클 것으로 판단되는 관성저항항을 투수층내부 지배방정식에 고려하여 modified Pbreak model을 개발하고 이를 수리모형실험을 통해 사면상의 수리특성을 분석한 바 있다.

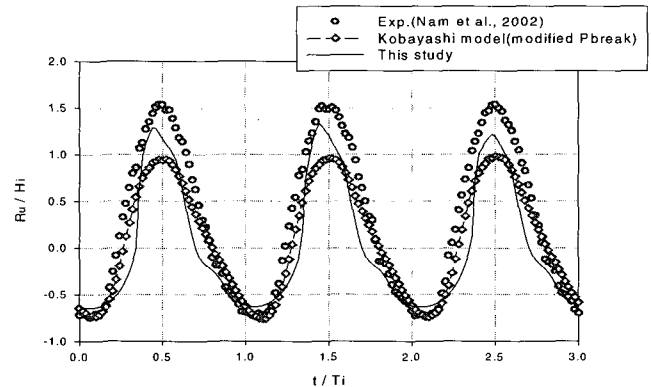
Fig. 7은 기존의 수리모형실험 결과와 modified Pbreak model과 함께 CADMAS-SURF의 결과를 비교한 것이다.



(a) $H_i = 5.46$ cm, $T_i = 1.5$ sec, $\xi = 2.67$.



(b) $H_i = 6.95$ cm, $T_i = 2.0$ sec, $\xi = 3.16$.



(c) $H_i = 6.72$ cm, $T_i = 2.5$ sec, $\xi = 4.02$.

Fig. 7 The temporal variation in R_u/H_i .

쇄파지수(ξ)가 2.67인 경우, wave run-up은 대체로 거의 일치하는 경향을 나타내었고, wave run-down에서는 본 수치기법이 modified Pbreak model보다 실험치를 잘 재현하였다. 그리고 쇄파지수(ξ)가 3.16, 4.02로 커짐에 따라 본 수치기법은 modified Pbreak model보다 wave run-up의 정도를 향상시켰지만 실험치에 비해 약간 과소평가되는 특성을 나타내었다.

3.4. 사면상의 run-up height에 대한 고찰

본 연구에서는 구축된 모델을 이용하여 기존 연구자의 실험결과와 wave run-up의 해석 결과를 비교·분석하였다. 전체적으로(수심조건이 $d/H_i > 5.7$ 인 경우) 쇄파지수(ξ)에 대해서 wave run-up height(R_{uh})를 입사파고(H_i)로 무차원화한 결과를 살펴보면 본 연구의 결과가 기존의 수치계산결과보다 실험치를 잘 재현했음을 알 수 있다(Fig. 8).

그러나 본 실험조건에서 쇄파지수(ξ)가 약 3~5의 범위를 가질 경우 수리실험결과를 약 15%정도 과소평가하는 경향을 나타내었는데, 이는 투과성 구조물 내부로 유입되는 파랑이 실험치보다 더 적은 유체저항을 받게 되어 투과성 구조물 내부로 침투하는 유량이 상대적으로 더 많아졌기 때문이라고 판단된다. 따라서 사면상의 wave run-up과 구조물 내부의 유체저항에 대한 보다 명확한 관련성을 고찰하기 위해서는 차후 투과성 구조물 내부에서의 수리학적 특성을 수리모형실험으로 확인하고 CADMAS-SURF의 내부 저항력(공극률, 항력계수, 관성력계수)들에 대한 민감도 분석이 요구된다고 할 것이다.

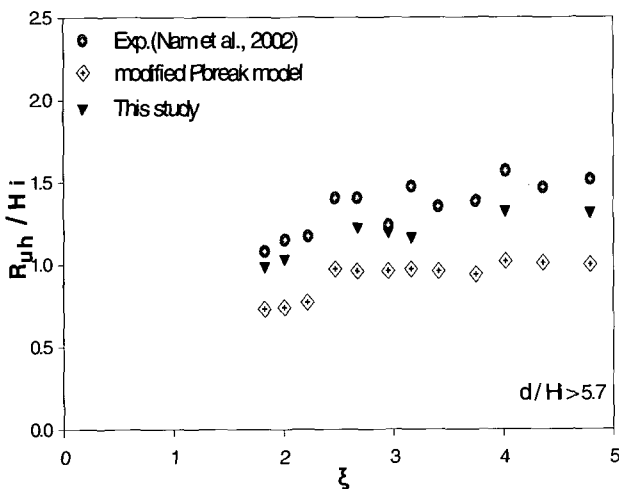


Fig. 8 R_{uh}/H_i versus ξ ($B_p = 220$ cm).

4. 결 론

본 연구에서는 투과성 해안구조물의 사면상의 wave run-up 특성을 파악하기 위하여 CADMAS -SURF를 이용하여 기존 수리모형실험 결과 및 modified Pbreak model과의 결과를 비교하였다. 이러한 연구과정에서 얻어진 주요 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) CADMAS -SURF를 이용한 투과성 구조물 사면상의 wave run-up에 대한 수리특성 계산결과는 기존 modified Pbreak model보다 그 정도를 약 5~15%정도 향상시켰으며 수리모형실험결과와도 잘 일치함을 확인하였다. 이를 통해 본 모델을 이용한 사면상의 수리학적 해석결과는 기존 연구자의 수치해석방법보다 신뢰성이 다소 향상되었다고 볼 수 있다.

2) 본 연구의 실험조건에서 쇄파지수(ξ)가 약 3~5의 범위를 가질 경우 사면상의 wave run-up이 실험치보다 약 15%정도 과소평가되는 경향을 나타내었다. 이는 입사파랑이 장주기 성분인 경우 사면상의 유체저항을 적게 받아 투과성 구조물 내부로의 파랑에너지 침투가 우세하게 되고 구조물 내·외부의 수리학적 특성에 영향을 미친 것으로 판단된다.

3) 따라서 사면상의 wave run-up과 구조물 내부의 유체저항에 대한 보다 명확한 관련성을 고찰하기 위해서는 차후 투과성 구조물 내부에서의 수리학적 특성을 수리모형실험으로 확인하고 CADMAS-SURF의 내부 저항력(공극률, 항력계수, 관성력계수)들에 대한 민감도 분석이 요구된다고 할 것이다.

참 고 문 헌

- 김도삼, 이광호, 김정수. (2002). "수중투과성구조물에 의한 쇄파를 수반한 파랑변형 및 유속장 해석", 한국해양·해양공학회지, 제14권, 제2호, pp 171-181.
- 남인식, 윤한삼, 김종욱, 류청로 (2002). "투과성 해안구조물의 소상파 및 내부수위변동에 변동에 관한 수치모델링", 한국해양공학회지, 제16권, 제5호, pp 34-40.
- 전재우, 윤한삼, 류청로 (2002). "투과성 방파제의 내부수위 변동과 방파제의 수리특성", 한국해양공학회지, 제16권, 제3호, pp 46-53.
- 해양수산부 (1999), 항만 및 어항 설계기준(上).
- Brunn, P. and Gunbak, A.R. (1977). "Stability of Sloping Structures in Relation to $\xi = \tan\alpha / \sqrt{H/L_0}$. Risk Criteria in Design", Coastal Engineering, Vol 1, pp 287-322.
- Coastal Development Institute of Technology (2001). "Investigation and Development of Numerical Wave Flume: CADMAS-SURF", pp 5-16. (in Japanese).
- Garcia, N., Lala, J.L. and Losada, I.J. (2004). "2-D Numerical Analysis of Near-Field Flow at Low-Crested Permeable Breakwaters", Coastal Engineering, Vol 51, pp 991-1020.
- Hirt, C.W. and Nichols, B.D. (1981). "Volume of Fluid (VOF) Method for Dynamics of Free Boundaries", J. of Computational Physics, Vol 39, pp 201-225.
- Hsu, T.J., Sakakiyama, T. and Liu, P.L.F. (2002). "A Numerical Model for Wave Motions and Turbulence Flows in Front of a Composite Breakwater", Coastal Engineering, Vol 46, pp 25-50.
- Hur, D.S. and Mizutani, N. (2003). "Numerical Estimation of

- Wave Forces Acting on a Three-Dimensional Body on Submerged Breakwater", *Coastal Engineering*, Vol 47, pp 329-345.
- Kobayashi, N. and Wurjanto, A. (1992). Numerical Model for Random Waves on Permeable Coastal Structures, Technical Report. CACR-92-02.
- Liu, P. L.F., Lin, P., Chang, K.A. and Sakakiyama, T. (1999). "Numerical modeling of Wave Interaction with Porous Structures", *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, Vol 125, No 6, pp 332-330.
- Sakakiyama, T. and Kajima, R. (1992). "Numerical Simulation of Nonlinear Wave Interacting with Permeable Breakwaters", *Proc. 22nd Int. Conference on Coastal Engineering*, ASCE, Venice, pp 1517-1530.
-
- 2005년 4월 30일 원고 접수
2005년 8월 8일 최종 수정본 채택