

## 해역구조물을 통한 월파의 3차원 수치계산기법의 개발 Direct 3-D Numerical Simulation of Overtopping on the Coastal Structures

허동수\* · 김인철\*\*  
Dong-Soo Hur\* and In-Chul Kim\*\*

**요 지** : 소파호안과 같은 해역구조물을 통한 월파량 산정에 수치해석기법을 적용하기 위하여 투과성 구조물의 취급 및 쇄파현상의 재현이 가능한 수치해석기법을 발판으로 하여 쇄파발생으로 인한 기포의 유입과 호안 배후의 월파로 인한 물방울의 자유낙하 및 사면유하 등을 고려할 수 있는 기법을 추가한 새로운 3차원 수치해석기법을 제안하여, 기존의 수리모형실험과 비교함으로써 그 타당성을 검증하였다. 소파호안을 대상으로 Ursell 수( $=L^2H/h^3$ )가 커질수록 3차원 계산에 의해 얻어지는 월파유량은 증가하였으며 실험결과와도 잘 일치하고 있는 것을 확인하였다. 또한, 월파량 산정에 2차원 및 3차원수치해석기법을 이용할 경우의 차이점에 관하여 논의하였다.

**핵심용어** : 소파호안, 월파량, 3차원수치해석기법, Ursell 수, 와도분포

**Abstract** : In three dimensional wave field, a direct numerical simulation model, which is able to handle free-fall and slope-fall of a waterdrop due to overtopping, is proposed to evaluate the overtopping rate on the coastal structures like an absorbing revetment. A comparison between the numerical model and existing experimental results for overtopping rate was made to validate the proposed numerical model's accuracy, and showed fairly good agreement between them. It is confirmed in numerical and hydraulic(existing) model test that the overtopping quantity on a absorbing revetment becomes larger with an increase in Ursell number. Also, the overtopping rate estimated by 3-D numerical model is compared with it obtained by 2-D numerical model.

**Keywords** : absorbing revetment, overtopping rate, 3-D numerical model, Ursell number, vorticity distribution

### 1. 서 론

태풍 내습시 수위상승을 동반한 고파랑의 작용으로, 호안 월파유량이 증가함에 따라 호안 배후지에 막대한 피해를 끼치는 경우가 빈번히 보고되고 있다. 또한, 대수심역에 방파제를 설치할 경우, 단면의 합리화 및 경제성을 고려하여 고파랑 작용시에는 월파를 허용하도록 천단을 낮게 설치하는 경우가 있다. 이러한 저천단 케이슨에 작용하는 파력은 월파의 영향으로 인해 통상 설치되는 케이슨의 경우와는 다른 결과를 나타낼 것이다.

따라서, 이와 같은 해안구조물의 설계에 있어서, 월파를 동반한 고파랑 작용하의 외력을 적절하게 추정하는 것은 필

수적이며, 특히 호안 설계의 경우, 태풍 내습과 같은 극한 상황에서의 월파량을 정확하게 예측하는 것이 재해 예방 측면에서 무엇보다도 중요하다.

이로 인해 과거로부터 호안의 월파량 예측을 위하여 많은 수리모형실험이 수행되었으며, 이로부터 얻어진 경험식을 호안설계의 월파량 산정에 이용하는 경우가 많다. Goda and Kishira(1976)는 원경사호안의 월파량에 대한 수리모형실험을 수행하여 다양한 조건에 대한 월파량 도표를 제안하였다. 또한, Shankar and Jayaratne(2003)은 수리모형실험을 통하여, 경사호안에 대한 월파량과 처음름에 미치는 입사파고와 주기의 결합 효과를 설명함에 있어서 파형경사(Wave steepness)가 중요한 지표가 된다는 것을 보

\*경상대학교 토목환경공학부 해양산업연구소(Institute of marine industry, Department of Civil and Environmental Engineering, Gyeongsang National University, Tongyoung 650-160, Korea. dshur@nongae.gsnu.ac.kr)

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

였으며, 쇠파상사계수(Surf similarity parameter)의 일정한 범위 내에서 투과성 경사호안에 대한 처오름 높이는 불투과성 경사호안의 경우보다 상당히 작은 값을 나타낸다는 것을 밝혔다.

한편, 계산가능성의 비약적인 향상으로 최근까지 곤란하게 여겨져 왔던 월파 현상에 대한 수치시뮬레이션이 가능하게 되었으며, 수치해석을 이용한 월파량 산정의 타당성 및 적용성이 수리모형실험과의 비교를 통해 검토되고 있다 (Sakakiyama and Imai, 1996; Wijayaratra et al., 2000). 하지만, 대부분의 연구들이 2차원 수치해석기법을 이용하고 있기 때문에 월파와 같이 3차원성이 탁월한 현상에 접목시키기엔 약간의 무리가 있는 듯하다.

따라서, 본 연구에서는 우선, 투과성 구조물의 취급 및 쇠파현상의 재현이 가능한 수치해석기법(Hur and Mizutani, 2003; Hur, 2004)을 발판으로 하여 쇠파발생으로 인한 기포의 유입과 호안 배후의 월파로 인한 물방울의 자유낙하 및 사면유하 등을 고려할 수 있는 기법을 추가한 새로운 3차원 수치해석기법을 제안한다. 수리모형실험과의 비교검토를 통하여 개발한 3차원 수치해석기법을 검증함과 동시에 소파호안을 대상으로 월파량 산정에 대한 적용성을 검토한다.

## 2. 수치해석 이론

### 2.1 기초방정식

본 연구에서는 무반사조파를 위한 조파소스항이 포함된 연속방정식 (1)과 투과성구조물 내에서의 유체저항을 도입한 수정된 Navier-Stokes 운동방정식 (2)-(4) 및 자유표면을 모의하기 위한 VOF함수(Hirt and Nichols, 1981),  $F$ 의 이류방정식 (5)로 구성된다.

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

$$\begin{aligned} \gamma_v \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial(\gamma_x u)}{\partial x} + v \frac{\partial(\gamma_y u)}{\partial y} + w \frac{\partial(\gamma_z u)}{\partial z} = -\gamma_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \\ \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_i \left( 2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y v_i \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_i \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} \right] \\ - M_x - R_x \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \gamma_v \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial(\gamma_x v)}{\partial x} + v \frac{\partial(\gamma_y v)}{\partial y} + w \frac{\partial(\gamma_z v)}{\partial z} = -\gamma_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \\ \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_i \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y v_i \left( 2 \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_i \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right\} \right] \\ - M_y - R_y - \frac{2v \partial q^*}{3 \partial y} \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} \gamma_w \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial(\gamma_x w)}{\partial x} + v \frac{\partial(\gamma_y w)}{\partial y} + w \frac{\partial(\gamma_z w)}{\partial z} = -\gamma_w \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \\ \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_i \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y v_i \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_i \left( 2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} \right] \\ - M_z - R_z - \frac{2v \partial q^*}{3 \partial z} - \gamma_v g - \beta w \end{aligned} \tag{4}$$

$$\frac{\partial(\gamma_v F)}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma_x F u)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_y F v)}{\partial y} + \frac{\partial(\gamma_z F w)}{\partial z} = F q^* \tag{5}$$

$$q^* = \begin{cases} q(y, z, t) / \Delta x_s & : x = x_s \\ 0 & : x \neq x_s \end{cases} \tag{6}$$

여기서,  $u, v, w$ 는 방향의 속도성분,  $\gamma_v$ 는 체적공극율(volume porosity),  $\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$ 는  $x, y, z$ 방향에 대한 면적 투과율(surface permeability)을 나타내며,  $\beta$ 는 부가감쇠영역을 제외하고는 0으로 주어지는 파랑감쇠계수이다.  $q^*$ 는 식 (6)으로 표현되는 조파소스의 유량밀도로서  $x \neq x_s$ 의 위치에서는 0으로 주어지며, 안정적인 조파를 위해 계산시작 후 3주기 동안 점차적으로 증가시켜 3주기 이후부터는 일정하게 조파한다. 이러한 조파조건은 식 (7)에 나타낸 바와 같다.

$$q(y, z, t) = \begin{cases} \{ 1 - \exp(-2t/T_i) \} 2U_0(\eta_0 + h) / (\eta_s + h) & : t/T_i \leq 3 \\ 2U_0(\eta_0 + h) / (\eta_s + h) & : t/T_i > 3 \end{cases} \tag{7}$$

식 (7)에서  $t$ 는 계산시간,  $T_i$ 는 입사주기,  $h$ 는 초기수심,  $\eta_s$ 는 조파소스에서의 수위변동을 나타내며,  $U_0$ 와  $\eta_0$ 는 각각 Stokes 3차 파에 의한  $x$ 방향의 속도 및 수위의 시간변화를 의미한다.

또한, 식 (2)-(4)에서  $M_x, M_y, M_z$ 는 관성저항,  $R_x, R_y, R_z$ 는 항력저항을 의미하며, 다음의 식 (8)-(13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_x = (1 - \gamma_v) C_M \frac{Du}{Dt} = (1 - \gamma_v) C_M \left[ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right] \tag{8}$$

$$M_y = (1 - \gamma_v) C_M \frac{Dv}{Dt} = (1 - \gamma_v) C_M \left[ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right] \tag{9}$$

$$M_z = (1 - \gamma_v) C_M \frac{Dw}{Dt} = (1 - \gamma_v) C_M \left[ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right] \tag{10}$$

$$R_x = \frac{1}{2\Delta x} C_D (1 - \gamma_x) u \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \tag{11}$$

$$R_y = \frac{1}{2\Delta y} C_D (1 - \gamma_y) v \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \quad (12)$$

$$R_z = \frac{1}{2\Delta z} C_D (1 - \gamma_z) w \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \quad (13)$$

여기서,  $C_M$  과  $C_D$  는 각각 관성력계수와 항력계수이며,  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  는  $x$ ,  $y$ ,  $z$  방향의 격자크기를 나타낸다.

또한, 본 연구에서는 수치해석을 수행함에 있어서 계산의 정도와 안정성에 크게 영향을 미칠 것으로 예상되는, 소파호안 전면의 쇄파발생으로 인한 기포의 유입과 호안 배후의 월파로 인한 물방울의 낙하 등에 대해서는 TimeDoor 법(CADMAS-SURF, 2001)을 3차원으로 확장·이용하였다.

구조물 표면 및 바닥에서의 경계조건은 법선방향으로 불투과조건을 접선방향으로는 slip조건을 적용하였으며, 계산의 안정성 확보를 위하여 CFL(Courant-Friedrichs-Lewy) 조건과 Diffusion(Diffusive time limit condition)조건을 이용하였다.

### 2.2 수치파동수조

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 3차원 수치파동수조를 이용하였으며, 수치계산을 통한 월파량 산정의 검증을 위하여 이용된 Sakakiyama and Imai(1996)의 수리모형실험수조를 모델화하였다.

수치파동수조는 해석영역 내에 조파를 위한 조파소스와 그 배후에 재반사를 방지하기 위한 부가감쇠영역 및 소파블록과 케이슨으로 구성된 소파호안으로 구성되며, 폭

30 cm, 수심 30 cm, 정수면에서 호안천단까지의 높이 5 cm, 소파블록의 법면경사는 1:4/3로 설정되었다.

## 3. 월파의 수치계산 결과

### 3.1 수치계산의 검증

수치계산결과의 검증을 위하여 Fig. 1에 나타내고 있는 바와 같이 소파호안 전면에서 측정된 월파수위의 실험결과(Sakakiyama and Imai, 1996)와 본 연구의 수치계산 결과의 비교를 Fig. 2에 나타내었으며, 계산결과는 중앙단면에서의 값을 이용하였다. 또한, Fig. 2는 파고  $H=10.0$  cm, 주기  $T=1.4$ s의 입사파조건에 대한 수위 변동을 나타내고 있으며, 그림으로부터 계산파형의 파곡이 실험치보다 약간 빠른 값을 나타내고 있지만, 전체적으로 계산파형은 실험파형을 잘 재현하고 있는 것을 알 수 있다.

### 3.2 월파량 산정 및 검토

수치계산에 의해 호안의 월파유량을 산정할 경우에는 주로 호안 천단상 임의점에서의 수위변동과 수평유속을 이용, 연직 적분하여 산출한 값을 이용하는 경우가 많다. 이러한 경우, 천단상의 경계조건과 자유표면 처리를 위한 경계조건을 어떻게 설정하는가에 따라서 그 결과가 달라질 것이라는 것은 쉽게 예상할 수 있는 문제이며, 천단상에서의 월파량 산정위치와 월파량의 대소에 따라 그 결과는 달라질 것이다.

따라서 본 연구에서는 Fig. 1에 나타내고 있는 바와 같

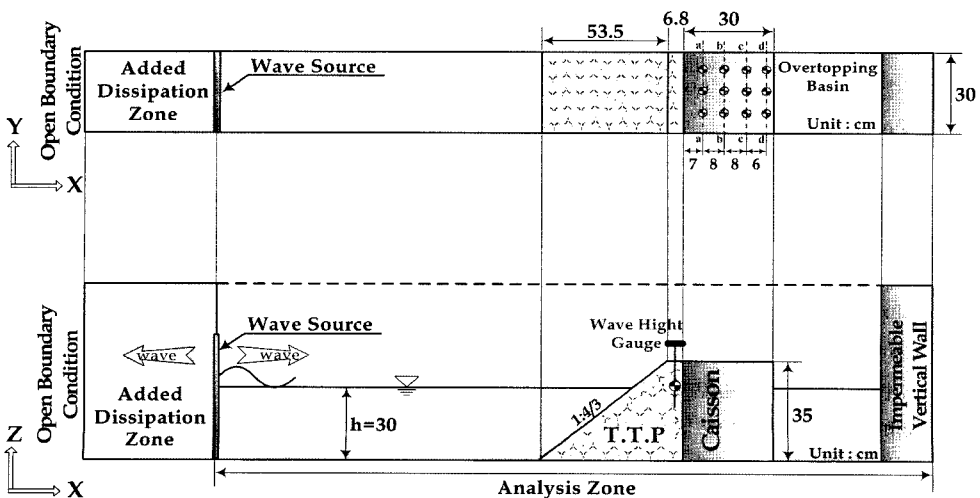


Fig. 1. Concept of numerical wave basin.

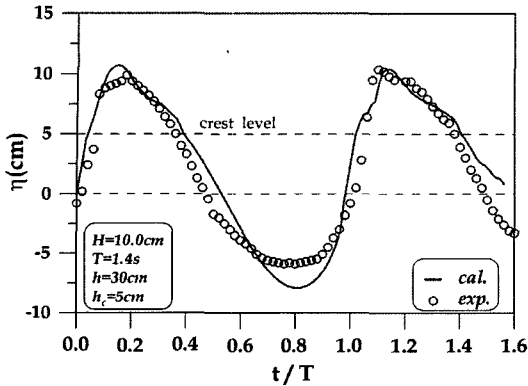


Fig. 2. Comparison between calculated and measured water surface elevation in front of the absorbing revetment.

이 천단상의 다양한 위치에서 수면변위 및 수평유속을 이용한 월파량을 산출하여 검토하였다. 또한, 소파호안의 배후에 수조를 설치하여 일반적인 수리모형실험과 비슷한 방법으로 월파량을 산출하였다(Fig. 1참조). 월파수조(overtopping basin)를 이용한 월파량은, 각 스텝마다 VOF함수  $F$ 의 체적 적분치를 기록한 후, 초기 적분치와의 차를 이용하여 산정하였다. Fig. 3은 월파수조에 의해 얻어진 월파량  $V(t)$ , 순간월파유량  $q_s = dV/dt$  및 평균월파유량  $q$ (여기서, 평균월파유량은 월파발생순간부터 시간의 경과에 따라 증가하는 월파량  $V(t)$ 를 월파량 산정 시까지의 경과시간으로 나눈 값을 의미한다)의 시간변화를 나타내고 있는 하나의 예이다. 그림으로부터 월파량이 계단모양으로 증가하고 있는 것을 알 수 있으며, 순간월파유량의 시간변화로 부터 이 조건하에서의 월파시간은 약 0.5T 정도인 것을 확인할 수 있다. 또한, Fig. 3에서  $t/T = 1.2$ 부근에서 순간월파유량이 부(-)의 값을

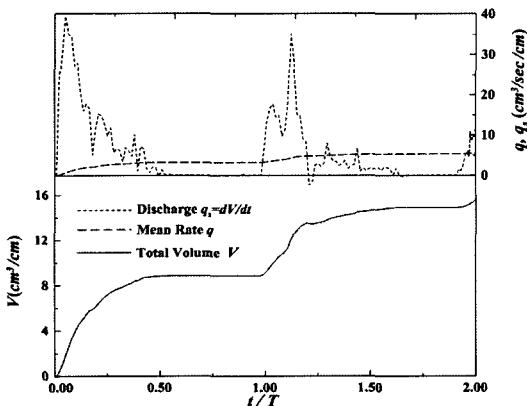


Fig. 3. Time variation of overtopping rate.

나타내고 있는 것은 실제로는 발생할 수 없는 현상이지만, 본 계산에서는 자유표면을 모의하기 위해 VOF 함수  $F$ 를 이용하고 있으며, 이러한  $F$ 를 이용하여 유체셀과 표면셀을 정의할 때 생기는 약간의 수치적인 오차로 인해 발생한 현상을 밝혀 둔다.

Fig. 4는 소파호안 천단을 통한 월파유량의 계산치와 실험치의 비교를 나타내고 있다. 횡축의 Case1은 Sakakiyama and Imai(1996)에 의한 실험치를, Case2 - Case7은 3차원 계산에 의한 월파유량을 각각 나타낸다. 또한, 비교를 위하여 Fig. 4(d)와 (e)에는 Sakakiyama and Imai(1996)의 2차원계산에 의한 계산결과(Case8)도 나타내고 있다. Case2 - Case7의 분류는 Table 1에 나타내고 있으며, Case2는 월파수조에 의한 계산치를, Case3은 호안 천단상 12지점에서의 평균치를, Case4 - Case7은 각각 호안천단 a-a', b-b', c-c' 및 d-d' 단면 3지점(Fig. 1참조)에서의 평균치를 나타낸다.

먼저, Fig. 4에서 Case4 - Case7의 월파유량 즉, 천단상 위치에 따른 월파유량을 비교하면, 모든 경우에 있어서 호안천단의 배후로 갈수록 월파유량이 작아지는 것을 알 수 있다. 이것은 호안 천단을 통해 월파가 진행됨에 따라 쇄파 등으로 인한 와의 발생으로 에너지가 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 각 단면에서의 평균치보다 호안 천단상의 전 지점 평균으로 얻어진 Case3의 경우와 월파수조를 이용한 Case2의 경우가 전체적으로 실험치와 가까운 값을 가지는 것을 확인할 수 있으며, 특히 월파수조를 이용하여 산정한 Case2의 경우가 가장 적절하게 월파유량을 산정하고 있는 것을 알 수 있다.

이와 같이, 호안 설계시, 천단상 임의점에서의 수위변동과 수평유속을 이용, 연직 적분하여 얻어진 값을 예측 월파량으로 이용할 경우에는 각별한 주의가 필요할 것으로 판단된다.

Table 1. Estimation cases of overtopping rate

Estimation of overtopping rate		Case	
Exp. by Sakakiyama and Imai(1996)	Overtopping Basin	1	
	All Point Ave.	2	
	(a-a', b-b', c-c', d-d')	3	
	3-D Cal. by This Study	a-a' Ave.	4
		b-b' Ave.	5
		c-c' Ave.	6
		d-d' Ave.	7
	2-D Cal. by Sakakiyama and Imai(1996)	8	

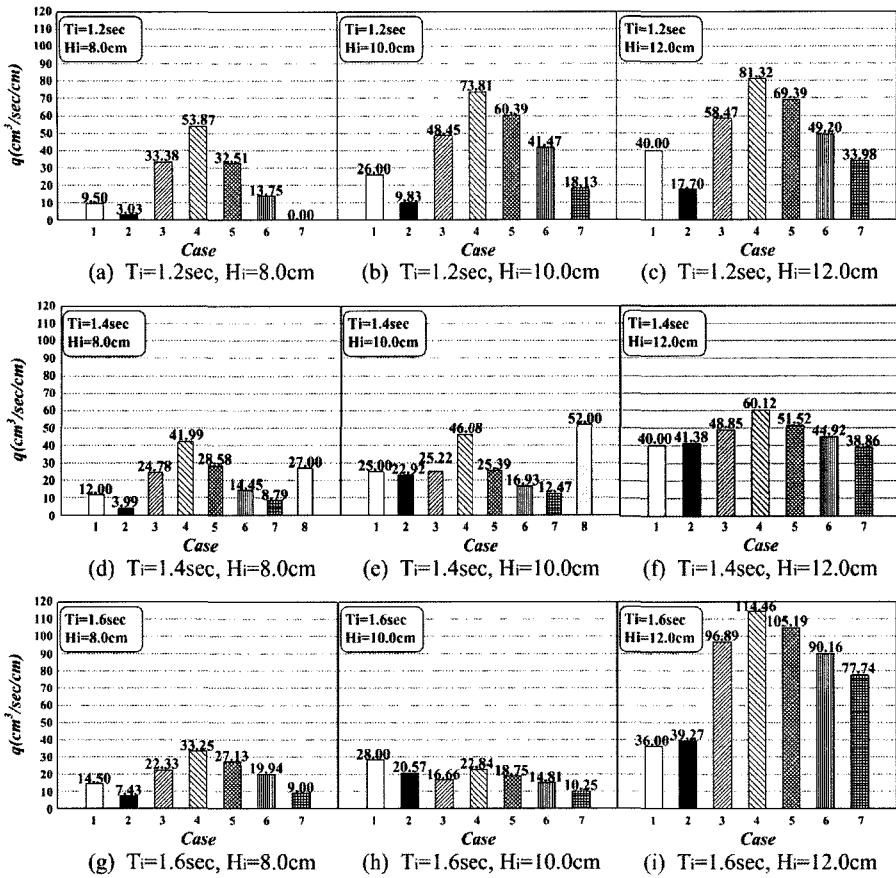


Fig. 4. Comparisons between measured and calculated overtopping rate.

3.3 월파량 산정에 미치는 2차원 및 3차원성의 영향

본 연구의 3차원계산에 의해 산정된 월파유량과 Sakakiyama and Imai(1996)의 2차원계산에 의한 월파유량을 비교해 보면, Fig. 4(d)와 (e)에서 보이는 것과 같이, 2차원계산(Case8)에 의한 월파유량은 실험치보다 2배 이상의 큰 값을 나타내고 있는데 반해, 3차원계산(Case2)에 의한 월파유량은 파고가 높아질수록 계산치를 높은 정도로 재현하고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 영향을 설명하기 위하여 Fig. 5에 본 연구의 3차원 계산에 의해 얻어진 호안 천단 부근에서의 와도분포에 대한 하나의 예를 나타내고 있으며, 파고  $H = 10.0$  cm, 주기  $T = 1.4$ s의 입사조건에 대하여 천단 상에서 최대수위에 도달했을 때의 순간와도분포이다. 또한 Fig. 5(a), (b) 및 (c)는 각각 천단상 1.5 cm 지점의 z축을 기준으로 한  $(\partial u \partial y - \partial v \partial x)$ , 수조 중앙단면의 y축을 기준으로 한  $(\partial u \partial z - \partial w \partial x)$  및 호안전면으로부터 15 cm 지점의 x축을 기준으로 한  $(\partial u \partial z - \partial w \partial y)$ 의 와도분포를 나타내고 있다.

2차원 계산의 경우에는 파 진행방향의 직각방향 유속(연안방향 유속)이 구속되므로 Fig. 5(a)의  $(\partial u \partial y - \partial v \partial x)$ 와 Fig. 5(c)의  $(\partial u \partial z - \partial w \partial y)$ 와 같은 와도를 재현할 수 없다는 것을 고려하면, 쇄파 및 월파 등과 같이 3차원성이 탁월한 현상에 적용할 경우, 에너지 감쇠의 과소평가로 인해 월파유량을 과대평가하는 경향을 보이며, 고정도의 월파량 예측을 위해 수치계산을 이용할 경우에는 본 연구와 같은 3차원 계산에 의한 월파량 산정이 필요할 것으로 판단된다.

3.4 3차원 계산에 의한 월파량 산정의 적용성

Fig. 6은 월파수조를 이용하여 계산된 월파유량과 Sakakiyama and Imai(1996)에 의한 실험치의 비교를 나타내고 있으며, 종축과 횡축은 계산치와 실험치를 각각 나타내고 있다. 그림으로부터 주기가 길어질수록 또한 파고가 커질수록 계산월파유량은 실험치와 높은 정도로 일치하고 있는 것을 알 수 있으며, 이로부터 Ursell 수  $(=L^2/Hh^3)$ 가 커질수록 계산월파유량은 실험값을 잘 재현할 것이라는 것이 예상되므로 Fig. 7

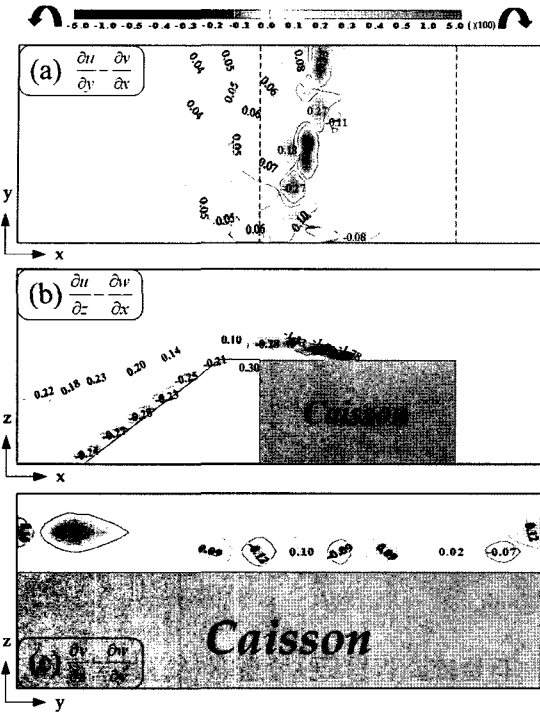


Fig. 5. An example of spatial distribution of vorticity around absorbing revetment ( $T = 1.4s$ ,  $H = 10$  cm).

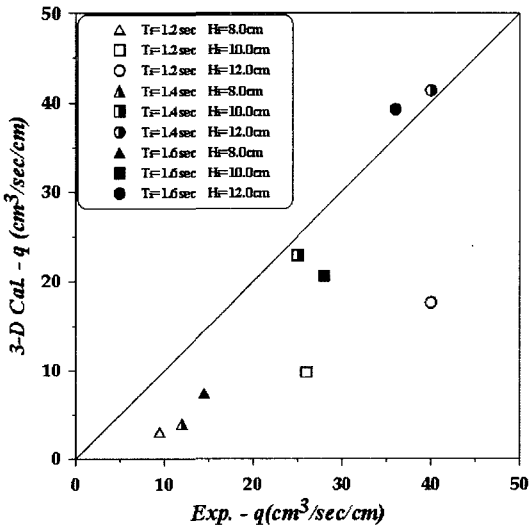


Fig. 6. Comparisons between measured and calculated overtopping rate according to increasing overtopping rate.

에 Ursell 수의 변화에 따른 실험값에 대한 계산월파유량의 비( $q_{cal}/q_{exp}$ )의 변화를 나타내어 검토하였다. 그림으로부터 Ursell 수가 증가함에 따라  $q_{cal}/q_{exp}$ 의 값은 1에 근접

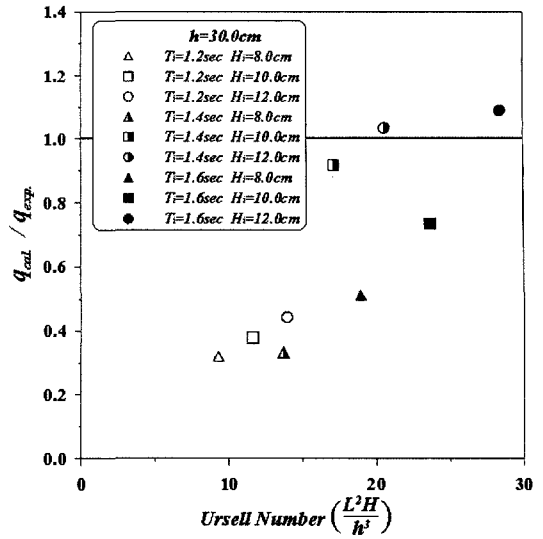


Fig. 7. Variation of dimensionless overtopping rate  $q_{cal}/q_{exp}$  according to increase of Ursell number.

한다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6과 Fig. 7로부터 월파유량이 많을수록 계산정도가 높아진다는 것을 알 수 있으며, 이것은 월파유량이 적을 경우, 계산에서는 천단상의 단 몇 격자를 통해서만 월파가 이루어지기 때문에 경계조건의 적용 등으로 인해 정도가 떨어지기 때문인 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는, 투과성 구조물의 취급 및 쇄파현상의 재현이 가능한 수치해석기법에 근거하여 쇄파발생으로 인한 기포의 유입과 호안 배후의 월파로 인한 물방울의 자유낙하 및 사면낙하 등을 고려할 수 있는 기법을 추가한 새로운 3차원 수치해석기법을 제안하여, 수리모형실험과의 비교를 통해 그 타당성을 검증함과 동시에 소파호안을 대상으로 월파량 산정의 적용성을 검토하였다. 이로부터 얻어진 중요한 사항을 나타내면 다음과 같다.

(1) 호안 설계시, 수치계산을 이용하여 얻어진 천단상 임의점에서의 수위변동과 수평유속을 이용, 연직 적분하여 얻어진 값을 예측 월파량으로 이용할 경우에는 각별한 주의가 필요하며, 월파수조를 이용하여 산정한 월파량이 실험 결과를 가장 잘 재현하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

(2) 2차원 계산을 이용하여 월파량을 산정할 경우, 파 진행방향의 직각방향 유속(연안방향 유속)이 구속되기 때

에 쇄파 및 월파 등과 같이 3차원성이 탁월한 현상에 적용할 경우에는 에너지 감쇠의 과소평가로 인해 월파유량을 과대평가하는 경향을 보인다. 따라서 월파량 예측을 위해 수치계산을 이용할 경우에는 본 연구와 같은 3차원 계산에 의한 월파량 산정이 필요할 것으로 판단된다.

(3) Ursell 수( $=L^2H/h^3$ )가 커질수록 3차원 계산에 의해 얻어진 월파유량은 증가하였으며 실험결과와도 잘 일치하고 있는 것을 확인하였다. 이는 월파유량이 많을수록 계산 정도가 높아진다는 것을 의미하며, 월파유량이 적을 경우, 계산에서는 천단상의 단 몇 격자를 통해서만 월파가 이루어지기 때문에 경계조건의 적용 등으로 인해 정도가 떨어지는 문제점이 있다. 실제, 호안 설계 시 월파유량이 적은 경우는 그다지 큰 문제가 되지 않지만, 본 연구에서 제안한 3차원 계산기법의 정도 향상을 위하여 월파유량이 적을 경우에 대한 정도상의 문제점에 대해서는 향후 연구 및 검토를 통하여 개선해 나갈 방침이다.

## 감사의 글

이 연구는 2006년도 경상대학교 학술진흥지원사업(과제 번호: RPP-2006-064) 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

## 참고문헌

CADMAS-SURF. (2001). Coastal development institute of technology, Tokyo, Japan.

- Goda, Y. and Kishira, Y. (1976). Experiments on irregular wave overtopping characteristics of seawalls of low crest types. Technical Note of PARI, 242, 28p.
- Hirt, C.W. and Nichols, B.D. (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. J. Comp. Phys., 39, 201-225.
- Hur, D.S. (2004). Deformation of multi-directional random waves passing over an impermeable submerged breakwater installed on a sloping bed., Ocean Eng., 31, 1295-1311.
- Hur, D.S. and Mizutani, N. (2003). Numerical estimation of the wave forces acting on a three-dimensional body on submerged breakwater. Coastal Eng., 47, 329-345.
- Sakakiyama, T. and Imai, S. (1996). Numerical simulation of overtopping on the wave absorbing revetment. Proc. Coastal Eng., JSCE, 43, 696-700 (in Japanese).
- Shankar, N. J. and Jayaratne, M.P.R. (2003). Wave run-up and overtopping on smooth and rough slopes coastal structure. Ocean Eng., 30, 221-238.
- Wijayarathna, N., Okayasu, A. and Noma, T. (2000). Numerical simulation of overtopping rate on stepped seawall. Proc. Coastal Eng., JSCE, 47, 711-715 (in Japanese).

---

Received November 9, 2006

Accepted December 18, 2006