

경사면을 갖는 월파형 구조물 주위의 비선형성 자유표면류의 수치 시뮬레이션

박종천* · 박동인* · 이상범* · 홍기용** · 서성부***

*부산대학교 조선해양공학과

**한국해양연구원

***중소조선연구원

Numerical Simulation of Fully Nonlinear Free-Surface Flow around Seawall with Slope

JONG-CHUN PARK*, DONG-IN PARK*, SANG-BEOM LEE* GI-YONG HONG** AND SUNG-BU SUN***

*Department of Naval architecture and ocean engineering, Pusan National University Busan, Korea

**Ocean Development System division, KORDI, Daejeon, Korea

***Research institute of medium and small slipbuilding, Busan Korea

KEY WORDS : Wave Overtopping 월파, Breaking Wave 쇄파, Navier-Stokes Equation 나비에-스톡스 방정식, Marker-Density Function 밀도함수, Wave Energy Conversion 파력발전

ABSTRACT : Wave overtopping is one of the most important processes for the design of seawalls. The term "wave overtopping" is used here to refer to the processes where waves hit a sloping structure run up the slope and, if the crest level of the slope is lower than the highest run up level, overtop the structure. Wave overtopping is dependent on the processes associated with breaking wave. A numerical model based on Navier-Stokes equation and the Marker-density function for predicting wave overtopping of coastal structures is developed in this paper. In order to evaluate the present model, two simulations are tested. One is overflow without waves at vertical seawall, and the other is wave overtopping at sloping seawalls.

1. 서 론

세계 에너지 소비량은 물질문명의 발달과 산업화, 공업화의 진전에 따라 급격히 증가하였다. 세계 에너지 소비량 중 가장 많은 비중을 차지하고 있는 화석에너지는 이미 선진국들의 많은 소비로 인해 고갈문제와 환경오염이라는 심각한 문제를 야기시키고 있다. 특히, 전 세계적으로 기후변화협약 (Global Forum '92)에 따라 지구온난화를 유발하는 온실가스(CO₂)의 방출규제가 강화되어짐에 따라 대체에너지의 개발이 중요시되고 있다.

지구표면의 약 70%를 차지하고 있는 해양은 태양에너지 자원의 보고이다. 해양에 흡수된 태양에너지는 풍력, 해류, 파력, 염분농도차, 온도차와 같은 무공해 에너지 형태로 변환된다. 해면의 수위차에 따른 위치에너지를 이용한 조력발전, 해수의 유동에 의한 운동에너지를 이용한 해류발전, 파랑 위치 운동에너지를 이용한 파력발전, 해수온도의 연직방향의 온도차를 이용한 온도차발전, 수심에 따른 염분의 농도차를 이용한 염도차발전 등 해양에너지는 무한히 재생 가능한 미래의 차세대 에너지 자원이다.

특히, 우리나라는 반도국가로서 풍부한 파랑에너지 자원을

보유하고 있다. 이 파랑에너지를 개발시 실질적으로 현장이용 가능한 파력발전은 진동수주형, 가동물체형, 파랑변형 이용형 등의 형식이 있다. 이 중에서 파랑집중제어 및 해수유동 활용에 의한 효율성 향상과 복합이용에 의한 우수한 경제성을 가진 월파(越波)형 파력발전이 있다.

해상의 기상현상이 제공하는 파랑의 위치에너지, 운동에너지는 다음과 같다.

$$W = 0.44 H_{1/3}^2 T_{1/3} \quad (1)$$

파랑에너지 자원은 아주 많지만 단위폭 당 밀도로 환산하면 그다지 높은 편이 아니므로, 저수하거나 파랑에너지를 집중시켜 에너지밀도를 높인다. 이를 이용한 저수형태의 월파형 발전은 해상의 불규칙한 파랑에 의한 월파(wave overtopping)량에 크게 기인한다. 일반적으로 파랑의 월파량($m^2 \cdot s$)은 해상구조물의 경사면 기울기와 건현, 파랑(wave)의 형태에 많은 영향을 받는다. 따라서 해상구조물의 형상설계가 무엇보다 중요하다고 할 수 있다. 해상구조물의 최적설계를 위해 모형실험이 선행되어지는데, 이러한 모형실험은 실제 해상에서의 제약조건에 의해 많은 한계가 따른다. 이를 극복하여 최적의 월파형 해상구조물을 설계하기 위해서는 시뮬레이션 공학에 기초하여 가상공간의 컴퓨터를 이용한 수치파랑수조기법의 적용이 불가피하다.

제1저자 박종천 연락처: 부산광역시 금정구 장전동 산30

051-510-2480 jcpark@pusan.ac.kr

월파 시뮬레이션에는 쇄파 (breaking wave) 라고 하는 복잡한 자유표면 운동과 난류의 유동을 포함하기 때문에 수치적으로 모델링하는데 현실적으로 많은 어려움이 따른다. 컴퓨터 속도의 한계 때문에 초기의 쇄파 수치시뮬레이션은 천수와 이론과 Peregrine(1967)의 Boussinesq eq. 근사를 포함한 depth-averaged 방정식에 기초를 두었다. 쇄파의 진행으로 인한 에너지 분산은 단순한 분산항을 통하여 정식화되어졌다. 예를 들면, Schaffer et al.(1993)과 Johnson et al.(1996)에 의해 사용 되어진 운동량(momentum) 수정법은 쇄파에 의해 야기 되어진 분산을 재현하였다. 와류(eddy)점성모델은 Zelt(1991), Karambas and Koutitas(1992)에 의해 쇄파 시뮬레이션에 사용 되어졌다. Dodd(1988)은 벽면 전단응력 효과를 포함한 경사진 바닥에서의 천수와 방정식에 기초를 둔 상류 유한체적법으로 수치시뮬레이션을 재현하였다. Hu et al.(2000)은 AMAZON이라는 유한체적법으로 수치 재현하였으며, AMAZON 수치모델은 비선형 천수와 방정식을 지배방정식으로 하는 방법이다.

Riemann solver를 사용하는 Godunov-type의 상류차분은 초임계와 transcritical 흐름에서의 bore wave를 재현하는데 사용되어졌다. 강한 HLL-type은 좀 더 수치적으로 정확한 Riemann solver 대신 사용되었다. 이 방법은 쇄파가 진행되는 동안 난류의 세부적인 특징을 예측할 수 없으며, 법선방향의 속도성분변화는 depth-averaging의 정식화로 인해 감소한다. 난류와 와류 이동에 관한 법선방향의 속도성분변화를 고려한 좀 더 정교한 수치모델이 필요하다. 비압축성 유체의 난류처럼 쇄파 역시 비압축성의 Navier-stokes(N-S) 방정식에 기초하여 묘사 할 수 있다.

N-S 방정식에 대한 수치 시뮬레이션은 pseudo-spectral방법을 사용한 Orszag and Patterson(1972)와 Rogallo(1981)에 의해 개발되었고, 쇄파연구에도 사용되었다. 그러나 이러한 수치모델은 많은 시간이 요구되기 때문에, 대부분 수치 시뮬레이션에서 낮은 Reynolds 수 (Re 수)적용을 필요로 한다. 높은 Re 수와 비선형성이 강한 자유표면의 복잡성을 완벽하게 재현할 수 있는 수치시뮬레이션은 현재의 컴퓨터 능력 부족으로 실행이 거의 불가능하다.

또 다른 대안방법은 Reynolds-Averaged N-S (RANS) 방정식에 기초를 두고 있다. RANS 방정식에서는 단지 유동장을 시간평균에 관한 유체운동으로 묘사하며, 평균유동에서의 난류 효과는 Reynolds 응력에 의해 재현되어진다. Lin(1998)와 Lin and Liu(1998)는 평균유동의 RANS 방정식에 의해 푸는 새로운 쇄파 수치모델을 연구하였다. Lin and Liu(1997)의 모델링은 $k-\epsilon$ 난류모델과 Kothe et al.(1991)의 Los Alamos National Lab에서 개발되어진 개량된 RIPPLE과의 조합이다. 평균유동 영역에 대한 비압축성 Reynolds 방정식과 난류영역에 대한 $k-\epsilon$ 방정식의 비정규격자 유한차분법으로 얻어진다. Nichols et al.(1980)과 Hirt and Nichols(1981)의 VOF 알고리즘은 자유표면의 움직임을 추적해 나가는 방법이다.

Lin(1998)은 자유표면 수위 및 평균 속도성분과 난류강도에 따른 spilling 과 plunging 쇄파들을 실험치와 수치해석모델 값들을 비교하여 전반적으로 만족스러운 결과를 얻어냈다.

위에서 언급한 바와 같이, 월파에 대한 수치해석 기술은 크게 천수와(shallow water)이론에 의한 접근방법과 Navier-Stokes 방정식을 푸는 점성이론에 의한 접근방법으로 구분된다. 하지만, 월파 유동장은 격심한 파랑운동을 포함하며 동시에 유체입자들의 대규모 회전운동에 의한 에너지 소산을 동반하므로 점성이론에 기초한 전산유체역학(CFD)적 접근법이 더 유용하다고 할 수 있다. 후자의 경우, 기본적으로 Hirt and Nichols(1981)에 의해 개발된 SOLA-VOF법을 중심으로 다양한 수치적 기술들이 제안되고 있다 (Lin and Liu, 1998, 1999; Soliman et al., 2003). 특히, 국내에서는 수치파동수로 연구회가 중심이 되어 일본 연안개발기술연구소에서 개발 및 공개된 S/W인 CADMAS-SURF를 번역/보급 중에 있다. 이 S/W는 2차원 월파랑 추정에 관한 옵션도 포함하고 있지만, 아직 3차원에의 확장은 이루어지고 있지 않은 실정이다.

본 연구는 디지털 수치수조기법을 이용하여 2차원 경사면 구조물에 미치는 비선형성 자유표면류의 파랑력 예측과 월파형 파력발전 실용화 기술개발에서 요구되는 구조물과 파랑과의 상호간섭에 관한 수치해석 모델을 개발하고, 월파형 제어구조물의 최적설계를 지원하는 것을 목적으로 한다.

2. 수치해석법

2.1 월파 유동장 해석을 위한 LES (Large Eddy Simulation) 기법

수치수조 내의 비압축성 유동장을 풀기위한 지배방정식은 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식이다. 필터 조작에 의한 grid scale(GS)의 비압축성 유동의 지배방정식은 각각 다음과 같이 표현된다.

$$\overline{\frac{\partial u_i}{\partial x_i}} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \overline{u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\tau_{ij} + 2\nu \overline{S_{ij}}) \quad (3)$$

여기서, $\overline{S_{ij}}$ 는 변형속도 텐서의 GS 성분이며

$$\overline{S_{ij}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

를 나타낸다. 위 식을 이용하면 GS 이하의 와동을 풀지 않아도 되는 대신에 그 효과를 나타내는

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \overline{u_i} \overline{u_j} \quad (5)$$

를 주어줄 필요가 있다. 일반적으로, τ_{ij} 는 LES에 대해서는 sub-grid scale(SGS) 응력 텐서, RANS에서는 레이놀즈 응

력 텐서로써 표현하기도 하며, 적당한 모델을 필요로 한다. LES에 대하여 공간 필터를 가정하고 τ_{ij} 를 다음과 같이 분리한다.

$$\begin{aligned}\tau_{ij} &= (\overline{u_i + u'_i})(\overline{u_j + u'_j}) - \overline{u_i u_j} \\ &= \overline{u_i u_j} - \overline{u_i u_j} + (\overline{u_i u'_j + u'_i u_j}) + \overline{u'_i u'_j}\end{aligned}\quad (6)$$

여기서, (')은 필터된 값에 대한 변동량을 정의한다. 위 식의 우변 첫 번째와 두 번째 항은 Leonard 응력항(L_{ij}), 세 번째 항은 cross 응력항(C_{ij}), 그리고 마지막 항은 SGS Reynolds 응력 항(R_{ij})을 각각 나타낸다(Leonard, 1974). Leonard 응력 L_{ij} 은 GS 속도에 필터를 걸어 구할 수 있지만, C_{ij} 과 R_{ij} 는 모델이 필요하다.

LES 해법에서 널리 채택되고 있는 SGS 난류모델로서 S-model을 들 수 있다. 이 모델에서는 SGS 난류모델의 와점성계수 ν_e 만을 택하여 난류에 의한 운동량 수송을 평가한다. SGS 모델에서는 SGS 응력 τ_{ij} 를 다음과 같이 모델화한다.

$$-\tau_{ij} = 2\nu_e \overline{S_{ij}} \quad (7)$$

여기서, ν_e 는 SGS 응력의 와점성 계수이고, $\overline{S_{ij}}$ 는 GS성분의 변형텐서이며 Smagorinsky의 모델(1963)을 이용하여 각각 다음과 같이 정의한다.

$$\nu_e = L_s^2 \sqrt{2 \overline{S_{ij} S_{ij}}} = L_s^2 |w| \quad (8)$$

단, w 는 와도를 나타내며, length scale L_s 는 Takakura et al.(1989)에 의해 다음 식으로 산출한다.

$$L_s = C_s \min(\Delta x, \Delta y, \Delta z) \quad (9)$$

여기서, C_s 는 Smagorinsky 정수이며 본 연구에서는 평판간 난류유동에 적합한 0.1을 사용한다. 그리고, $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 는 각각 x, y, z 방향의 격자간격이다.

지배방정식은 유한차분법에 의해 이산화되며, 개량된 MAC법의 알고리즘을 이용하여 매시간 스텝의 경계조건을 이용하여 풀린다. 수치수조의 계산 알고리즘은 Park et al.(1999), 박종천(2003)과 유사하다.

대류항의 차분에는 3차의 MUSCL형 상류스킴을 적용하며, 그 밖의 공간차분에는 2차의 중심차분을 사용한다. 시간에 관한 차분에는 2차의 Adams-Bashforth 법을 적용한다. 압력장을 풀기 위한 Pisson방정식의 해법에는 SOR법을 이용한다.

2.2 비선형 자유표면 운동의 취급방법

경사가 가파른 파도나 쇄파 등의 비선형성이 강한 자유표면의 거동을 표현하기 위하여, 자유표면의 운동학적 조건을 식(10)과 같이 밀도함수의 수송방정식을 풀어내는 밀도 함수법(Miyata and Park, 1995)에 의해 만족시킨다.

$$\frac{\partial M_\rho}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{u} M_\rho = 0 \quad (10)$$

여기서, M_ρ 는 전 계산영역에 정의되는 밀도함수이며 0과 1사이의 값을 취하게 된다. 즉, 자유표면을 경계로 하는 두 유체의 밀도함수 값을 각각 0과 1로 정의할 때, 자유표면은 $\overline{M_\rho} = \frac{M_\rho^1 + M_\rho^2}{2} = 0.5$ 의 등치면으로 가정할 수 있게 된다.

본 연구에서는, 자유표면의 보다 정확한 위치결정을 위해 식(10)를 직접 푸는 대신에 변환함수 ϕ 를 매개변수로 한 식(11)을 풀기로 한다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{u} \phi = 0 \quad (11)$$

여기서, ϕ 는 자유표면으로부터의 거리함수를 적용한다.

식(11)에서 얻어낸 ϕ 의 공간상의 분포는 수치오차를 포함하고 있으며 이를 보완하기 위해 다음과 같은 Level-set 법의 재배치 알고리즘(Sussman et al. 1994)을 도입하기로 한다.

$$M_\rho = \begin{cases} M_\rho^1 & (\text{if } \phi > \epsilon_0) \\ M_\rho^2 & (\text{if } \phi < -\epsilon_0) \\ \overline{M_\rho} + \widetilde{M}_\rho(\phi/\epsilon_0) & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (12)$$

여기서, $\overline{M_\rho} = \frac{M_\rho^1 - M_\rho^2}{2}$ 이며, $\epsilon_0 = 2(\Delta x)_{\min}$ 이다.

한편, 자유표면의 동역학적 조건은 자유표면상에서의 속도 외삼과 Irregular Stars법을 이용해 만족시킨다.

2.3 수치수조의 벽면 경계조건

수치수조의 각 벽면은 실험목적에 따라 크기와 형태, 성격 등을 유동적으로 변화시킬 수 있다. 기본적으로, 해저 지형 및 물체표면을 포함한 모든 벽면은 no-slip 조건을 적용하는 마찰 벽면이나 free-slip 조건을 적용하는 미끄럼벽면으로 가정하며 문제의 성격에 맞추어 선택할 수 있다. 또한, 반사파가 문제가 되는 실험 등에서는 이를 막기 위하여 수치소파영역이 설치된 완전 개경계 조건(Park et al., 1999)이나 약한 개경계 조건(Kim et al., 2000)을 적용할 수 있도록 옵션이 설정되어 있다.

율과 시뮬레이션의 경우, 국부파고의 시간변화에 따라 구조물이 물속에 잠기거나(submerged) 물 밖으로 노출되는(dried) 격자가 나타나기도 하는데, 이때 구조물의 내부 격자에 정의되는 파고는 기본적으로, Fig. 1과 같이, 유체영역으로부터 해안

선의 법선방향 구배가 제로가 되도록 외삽한다. 또한, 자유표면 상방의 속도분포는 Fig. 2와 같은 방법으로 외삽한다.

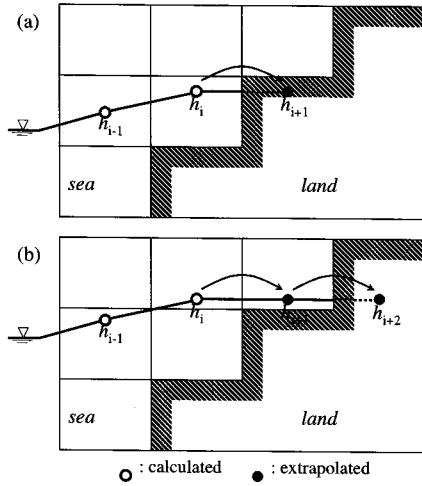


Fig. 1 Extrapolation of wave height; (a) case of a dried cell and (b) case of a submerged cell

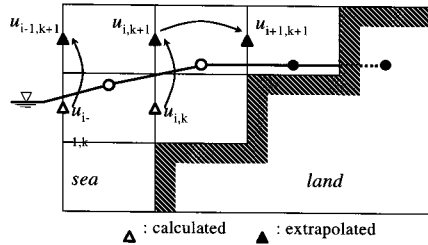


Fig. 2 Extrapolation of velocity onto free-surface

2.4 수치조파기의 경계조건

수치조파기는 플랩형이나 피스톤형의 조파기로서, 심수중력파 이론이나 천수파 이론에 의하여 각 조파판에 적절한 속도분포를 주게 된다. 방향파의 조파에 대하여서는, 선형중첩이론 (Dean and Darlymple, 1991)에 의해 surpent형의 조파장치에 대한 속도조건을 주게 된다. 즉, 수치조파기의 각 조파판에는 다음과 같은 속도분포가 주어진다.

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \sum_{n=1}^N A_n \omega_n \frac{\cosh[k_n(z+h)]}{\sinh(k_n h)} \begin{pmatrix} \cos \theta_n \\ \sin \theta_n \end{pmatrix} \cos(k_{xn} + k_{yn} - \omega_n t - \varepsilon_n) \quad (13)$$

$$w = \sum_{n=1}^N A_n \omega_n \frac{\sinh[k_n(z+h)]}{\sinh(k_n h)} \sin(k_{xn} + k_{yn} - \omega_n - \varepsilon_n) \quad (14)$$

여기서, x 와 y 방향의 파수 k_x 와 k_y 는 파수에 대해 $k_x = k \cos \theta$ 와 $k_y = k \sin \theta$ 가 된다. A , k , ω , θ , ε_n 은, 파

의 진폭, 파수, 각주파수, 방향, 위상차를 각각 나타낸다. 또한 N 은 파의 성분수를 나타낸다.

3. 수치 시뮬레이션

3.1 연직 독상의 초월유동(overflow) 시뮬레이션

연직독(vertical weir) 주위의 파랑을 고려하지 않은 초월유동으로 인한 유량의 충전식은 Chadwick and Morfett (1998)에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$q_{weir} = 1.705 \times C_d |R_c|^{3/2} \quad (15)$$

여기서, R_c 는 천단고, C_d 는 충전계수이며 다음과 같다.

$$C_d = 0.848 C_F \quad (16)$$

$$C_F \approx 0.91 + 0.21 \frac{R_c}{B_L} + 0.24 \left(\frac{R_c}{R_c + d_s} - 0.35 \right) \quad (17)$$

단, B_L 는 독의 폭이다.

Fig. 3는 연직독과 수면의 초기상태를 나타낸다. 수심은 4.0m, 연직독의 폭은 1.0m이며, 천정고는 0.0m에서부터 0.8m까지 변하는 것으로 한다. 계산에는 총 40,000개의 격자가 사용되었으며, 계산시간은 20초까지 40,000step을 계산하였다.

Fig. 4에는 10초와 15초에서의 초월파 유동을 나타낸다. 연직독 위로 흘러넘친 유동에 의해 오른쪽에 보이는 저장고에는 격심한 파동을 일으키며 저장되고 있다. Fig. 5에는 저장고에 저장되는 유량의 시간변화를 나타낸다. 이 변화로부터 10초와 15초사이의 유량의 충전량(overflow discharge)을 계산하여 Fig. 6에 Chadwick and Morfett(1998)의 실험식과 Soliman et al.(2003)의 계산치와 비교하였다. 본 연구에서 추정된 값과 실험식 사이에 좋은 일치를 보이고 있다.

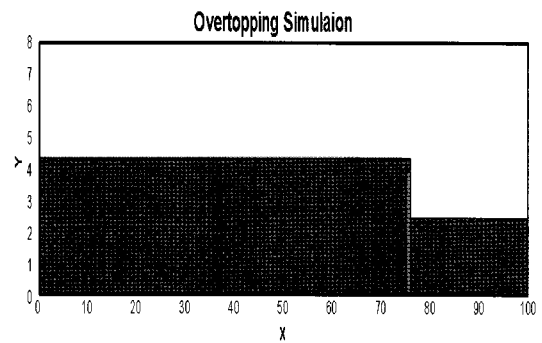


Fig. 3 Initial condition of the free surface profile for the overflow without wave

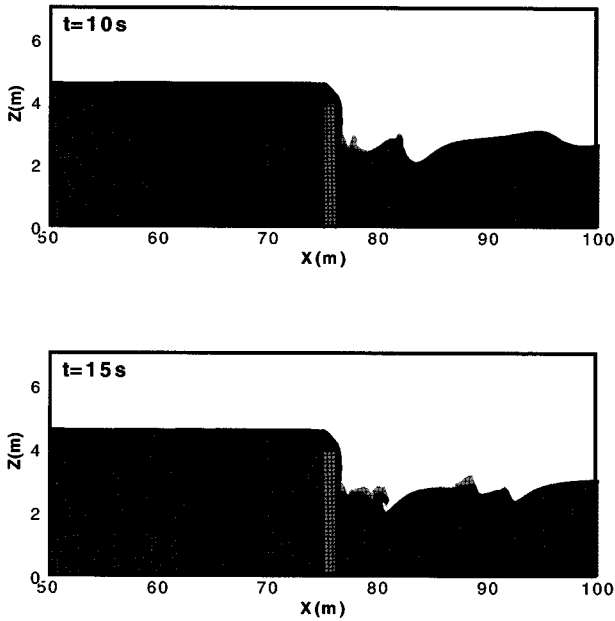


Fig. 4 Free surface profile for the overflow without wave ($R_c=0.8$)

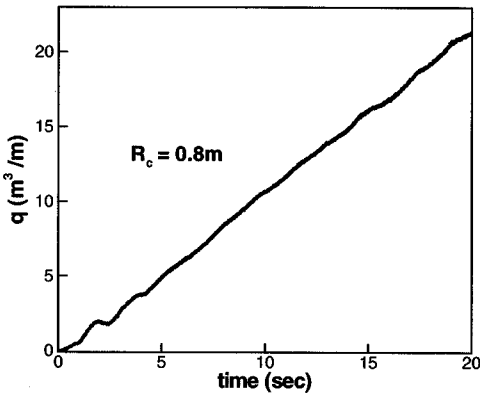


Fig. 5 Time history of overflow discharge

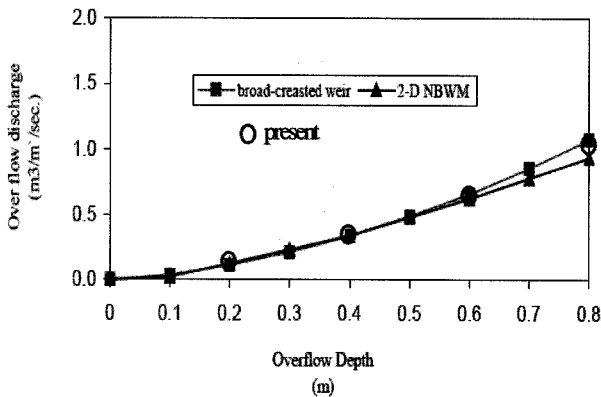


Fig. 6 Comparison of overflow discharge with the weir equation & CFDs

3.2 경사면 구조물에서의 월파 시뮬레이션

본 연구에서는 slope 1:3을 가진 경사면 구조물에서의 월파 시뮬레이션을 재현해 보았다.

Fig. 7에는 경사면 구조물의 모습과 기울기를 나타낸다. 구조물의 제원은 Table. 1에서 보는 바와 같이 구조물의 경사면기울기는 1:3이며, 정수면(SWL)으로부터 해저까지의 수심 d_v , 정수면으로부터 1:3의 경사면 구조물 바닥까지의 수심 d_s , 정수면 위로부터 구조물 최고높이까지의 천정고 R_c 를 가지고 있다. 입사파로는 $H_s=0.95$, $T=4.73$ 의 규칙파가 작용한다.

이와 같은 경사면 구조물 주위의 $2.28T \sim 2.96T$ 시간동안의 파형변화를 다음 Fig. 8에 표시한다. 월파형 구조물의 정면에서는 파형의 비선형적인 특이현상이 나타나며 월파 이후에는 저장고(reservoir)에서의 파형의 다이내믹한 거동이 수치적으로 잘 표현되고 있음을 알 수 있다.

Table 2, Fig. 9에는 본 연구에서 수행한 기울기 1:3을 가진 경사면 구조물에서의 월파 충전량에 대한 결과와 Hu et al.(2000)의 AMAZON, Soliman et al.(2003)의 2-D BWNM 수치모델결과 및 Saville(1995)에 의한 시험결과를 비교하였다.

그림에서 같이 본 시뮬레이션 결과가 실험 및 타 계산결과와 비교하여 정량적으로 양호하다는 사실을 알 수 있었다.

Table 1 wave characteristics used seawalls with slope 1:3

Seawalls Slope	d_t (m)	d_s (m)	R_c (m)	H_s (m)	T (s)
1:3	3.0	0.75	0.50	0.95	4.73

Table 2 Comparison between numerical models with the measured dimensionless overtopping discharges

$Q(10^{-3})$ Amazon	$Q(10^{-3})$ Saville	$Q(10^{-3})$ 2-D BWNM	$Q(10^{-3})$ Present
39	66	46	54

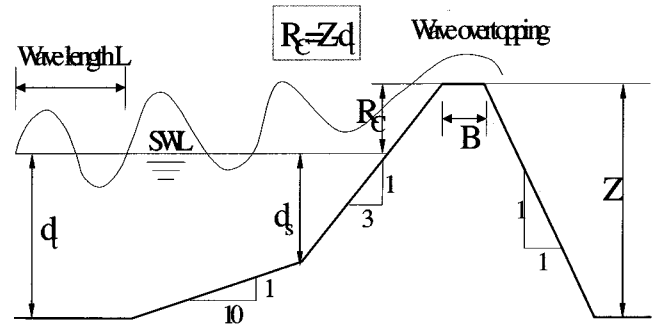


Fig. 7 Sketch explains the case study of regular waves overtopping at sloping seawalls

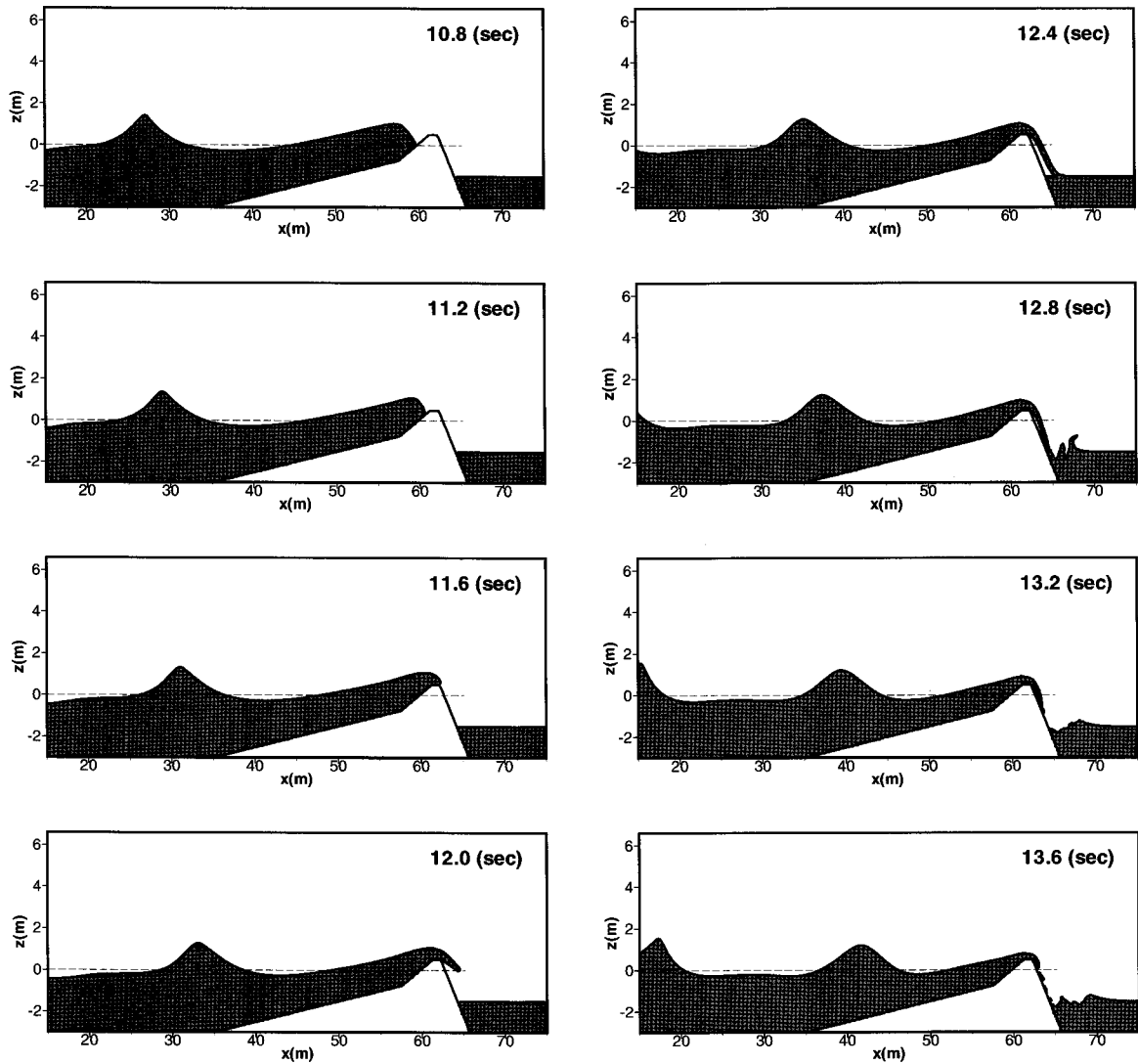


Fig. 8 Time-sequential nonlinear overturning and overflow motions at the sloping seawall

4. 결 론

본 연구에서는 디지털 수치수조기법을 이용하여 2차원 경사면 구조물에 미치는 비선형성 자유표면류(free-surface flow)의 파랑력 예측과 월파형 파력발전 실용화 기술개발에서 요구되는 구조물과 파랑과의 상호간섭에 관한 수치해석 모델을 개발하였다. 또한 파랑 에너지 집중에 따른 월파랑의 수치적 추정에 관한 기술을 확보할 수 있었다.

향후 개발된 시뮬레이션 기술을 활용하여 해안역에서 월파형 제어구조물 설계에 직접적으로 활용하며, 월파랑의 효율적인 제어기를 위하여 다양한 형상의 구조물에 대한 사례연구를 수치적으로 수행할 것이다.

후 기

본 연구는 전력산업 연구개발 사업으로 수행중인 "월파형 파

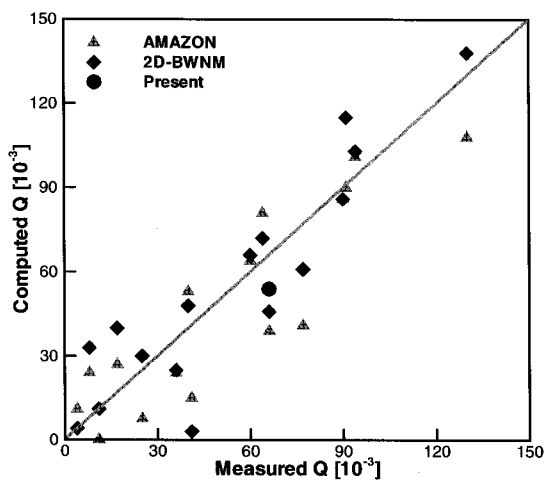


Fig. 9 Comparison between numerical models with the measured dimensionless overturning discharges

력발전 기반 기술연구" 과제의 지원으로 수행하였습니다.

참 고 문 헌

- 박종천 (2003), "해양환경공학의 다목적 시뮬레이션을 위한 수치파랑수조 기술", 한국해양공학회지, 제17권, 제4호, pp 174-180.
- Chadwick, A. and Morfett, J. (1998), *Hydraulics in Civil and Environmental Engineering*, London and New York, E and FN SPON.
- Dean, R.G. and Dalrymple, R.A. (1991), *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*, World Scientific Publ.
- Dodd, N. (1998). "Numerical Model of Wave Run-up, Overtopping, and Regeneration", *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol 124, No 2, pp 73-81.
- Hirt, C.W. and Nichols, B.D. (1981), "Volume of Fluid (VOF) Method for Dynamics of Free Boundaries", *Journal of Comp. Phys.*, Vol 39, pp 201-225.
- Hu, K.C., Mingham, G. and Causon, D.M. (2000), "Numerical Simulation of Wave Overtopping of Coastal Structure Using the Non-linear Shallow Water Equation", *Coastal Engineering*, Vol 41, pp 433-465.
- Johnson, B.D., Kobayashi, N. and Cot, D.T (1996), "Formulation and Validation of Vertically 2-D Shallow-water Model", *Proc. 25th International Conference in Coastal Engineering*, ASCE, pp 551-564.
- Karambas, T.V. and Koutitas, C. (1992), "A Breaking Wave Propagation Model Based on The Boussinesq Equations", *Coastal Engineering*, Vol 18, pp 1-19.
- Kim, M.H., Niedzwecki, J.M., Roesset, J.M., Park, J.C. Tavassoli, A. and Hong, S.Y. (2000), "Fully Nonlinear Multi-Directional Wave Simulations By 3D Numerical Wave Tanks", *J. of OMAE, ASME Transaction*, Vol 123, pp 124-133.
- Kothe, D.B., Mjolsness, R.C. and Torrey, M.D. (1991), *RIPPLE, A Computer Program For Incompressible Flows With Free Surfaces*, Los Alamos, NM, USA, Los Alamos Scientific Report, Report LA-12007-MS.
- Leonard, A. (1974), "Energy Cascade in Large-Eddy Simulation of Turbulent Fluid Flow", *Adv. Geophys.*, Vol 18 A, pp 237-248.
- Lin, P. (1998), *Numerical Modelling of Breaking Waves*, Cornell University.
- Lin, P.L.-F. and Lui, P. (1997), *A Numerical Model of Breaking Waves, The Volume of Fluid Method*, Newark, Delaware, Centre for Applied Coastal Research, Ocean Engineering Laboratory, University of Delaware.
- Lin, P.L.-F. and Lui, P. (1999), "Numerical Modelling of Wave Interaction With Porous Structures", *Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol 125, No 6, pp 322-330.
- Lin, P. and Lui, P.L.-F. (1998), "A Numerical Study of Breaking Waves in The Surf Zone", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol 359, pp 239-264.
- Lin, P. and Lui, P.L.-F. (1999), "Internal Wave-Maker for Navier-Stokes Equations Models", *Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol 125, No 4, pp 207-215.
- Miyata, H. and Park, J.C. (1995), *Ch.5 Wave Breaking Simulation, Potential Flow of Fluids*, ed. M. Rahman, Computational Mechanics Publications, UK, pp 149-176.
- Nichols, B.D., Hirt, C.W. and Hotchkiss, R.S. (1980), *SOLA-VOF: A Solution Algorithm for Transient Fluid Flow with Multiple Free Boundaries*, Los Alamos, CA, USA, Los Alamos Scientific Report, Report LA-8355.
- Orszang, S.A. and Patterson, G.S. (1972), "Numerical Simulation of Three-Dimensional Homogeneous Isotropic Turbulence." *Phys. Rev. Lett.*, Vol 28, pp 76-69.
- Park, J.C., Kim, M.H. and Miyata, H. (1999), "Fully Nonlinear Free-Surface Simulations By A 3D Viscous Numerical Wave Tank", *Int. J. for Numerical Methods in Fluids*, Vol 29, pp 685-703.
- Peregrine, D.H. (1967), "Long Waves on a Beach", *J. Fluid Mech.* Vol 27, No 4, pp 815-827.
- Rogallo, R.S. (1981), *Numerical Experiments in Homogeneous Turbulence*, NASA, Technical Rep. TM81315.
- Saville, T. (1995), *Laboratory Data on Wave Run-up and Overtopping on Shore Structures*, Dayton, Ohio, U.S. Army, Beach Erosion Board, Document Service Centre, No 64.
- Schaffer, H.A., Madsen, P.A. and Deigaard, R. (1993), "A Boussinesq Model for Waves Breaking in Shallow Water", *Coastal Engineering*, Vol 20, pp 185-202.
- Smagorinsky, J. (1963), *General Circulation Experiments with the Primitive Equations. I. The Basic Experiment*, *Monthly Weather Review* 91, pp 99-164.
- Soliman, A. Raslan, M.S., and Reeve, D.E. (2003), "Numerical Simulation of Wave Overtopping Using Two Dimensional Breaking Wave Model", *Coastal Engineering VI*, Cadiz, Spain, pp 439-447.
- Sussman, M. Smereka, P. and Osher, S. (1994), "A Level Set Approach for Computing Solutions to Incompressible Two-Phase Flow", *J. of Comp. Physics*, Vol 114, pp 272-280.
- Zelt, J.A. (1991). "The Run-up of Non Breaking and Breaking Solitary Waves", *Coastal Engineering* Vol 15, pp 205-246.

2005년 2월 2일 원고 접수

2005년 5월 17일 수정본 채택