

# 경사면을 갖는 월파형 구조물 주위의 비선형성 자유표면류의 수치 시뮬레이션

박 종천\*, 박 동인\*, 이 상범\*, 홍 기용\*\*

\*부산대학교 조선해양공학과

\*\* 한국해양연구원

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

JONG-CHUN PARK\*, DONG-IN PARK\*, SANG-BEOM LEE\*, GI-YONG HONG\*\*

\*Dept. of NAOE, Pusan National University

30 Jangjeon-dong, Geumjeong-gu, Busan, Korea

\*\*\*Ocean Development System Research, KORDI, Daejeon, Korea

KEY WORDS : overtopping, breaking wave, run-up, Navier-Stokes equation, Marker-Density Function, SOLA-VOF

ABSTRACT : During the past 50 years methods for predicting wave overtopping of coastal structures have continuously been developed. 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. The Numerical model is based on Navier-Stokes equation and Marker-Density Function of method for nonlinear free-surface flow by Miyata & Park(1995). The influence of how the slopes of seawalls, wave type and crest freeboard affect overtopping discharges has been investigated. The research of study using the new development nonlinear free-surface flow numerical model SOLA-VOF are presented.

### 1. 서 론

세계의 에너지 소비량은 물질문명의 발달과 산업화, 공업화의 진전에 따라 급격히 증가하였다. 세계의 에너지 소비량 중 가장 많은 비중을 차지하고 있는 화석에너지는 이미 선진국들의 많은 소비로 인한 고갈문제와 환경오염이라는 심각한 문제를 야기 시키고 있다. 특히, 전 세계적으로 기후변화협약에 따라 지구온난화를 유발하는 온실가스(CO<sub>2</sub>)의 방출규제가 강화됨에 따라 대체에너지의 개발이 중요시 되고 있다.

지구표면의 71%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 염분차발전 등 해양에너지는 무한히 재생 가능한 미래의 차세대 에너지 자원이다.

특히, 반도국가로서 풍부한 파랑에너지 자원을 보유한 우리나라에서 이를 개발시 실질적으로 현장이용 가능성이 좋은 파

력발전은 진동수주형, 가동물체형, 파랑변형 이용형등의 형식이 있다. 이 중에서 우리는 파랑집중제어 및 해수유동 활용에 의한 효율성 향상과 복합이용에 의한 경제성 향상이 우수한 월파형 파력발전에 대한 연구를 수행하였다.

해상의 기상현상이 제공하는 파랑의 위치에너지, 운동에너지는 다음과 같다.

$$W = 0.44H_{1/3}^2 T_{1/3}$$

파랑에너지 자원은 아주 많지만 단위폭당 밀도로 환산하면 그다지 높은 편이 아니므로, 저수하거나 파랑에너지를 집중시켜 에너지밀도를 높인다. 이를 이용한 저수형 월파형 발전원리는 해상의 불규칙한 파랑의 월파랑에 가장 큰 영향을 받는다. 파랑의 월파랑( $m^2 \cdot s$ )은 해상구조물의 경사면 기울기와 건현, 파랑(wave)의 형태에 많은 영향을 받는다. 따라서 해상구조물의 형상설계가 가장 중요하다. 실제 해상에서의 실험시에 제약조건이 가져오는 한계를 극복하여 최적의 월파형 해상구조물을 설계하기 위해서는 시뮬레이션 공학에 기초하여 가상공간의 컴퓨터를 이용한 수치파랑수조기법의 적용이 불가피하다.

월파에 대한 수치해석 기술은 크게 천수파(shallow water)이론에 의한 접근방법과 Navier-Stokes방정식을 푸는 점성이론에 의한 접근방법으로 구분된다. 하지만, 월파 유동장은 격심한 파

랑운동을 포함하며 동시에 유체입자들의 대규모 회전운동에 의한 에너지 소산을 동반하므로 점성이론에 기초한 전산유체역학(CFD)적 접근법이 더 유용하다고 할 수 있다. 후자의 경우, 기본적으로 Hirt & 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 연안개발기술연구센터에서 개발 및 공개된 S/W인 CADMAS-SURF를 번역/보급 중에 있다 (2003). 이 S/W는 2차원 월파랑 추정에 관한 옵션도 포함하고 있지만, 아직 3차원에의 확장은 이루어지고 있지 않은 실정이다.

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

## 2. 수치해석법

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

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

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\tau_{ij} + 2\nu_e \bar{S}_{ij}) \quad (2)$$

여기서,  $\bar{S}_{ij}$ 는 변형속도 텐서의 GS 성분이며

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

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

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (4)$$

를 주어줄 필요가 있다. 일반적으로,  $\tau_{ij}$ 는 LES에 대해서는 sub-grid scale(SGS) 응력 텐서, RANS에서는 레이놀즈 응력 텐서로써 표현하기도 하며, 적당한 모델을 필요로 한다. LES에 대하여 공간 filter를 가정하고  $\tau_{ij}$ 를 다음과 같이 분리한다.

$$\begin{aligned} \tau_{ij} &= (\bar{u}_i + u'_i)(\bar{u}_j + u'_j) - \bar{u}_i \bar{u}_j \\ &= \bar{u}_i \bar{u}_j - \bar{u}_i \bar{u}_j + (\bar{u}_i u'_j + u'_i \bar{u}_j) + u'_i u'_j \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,  $(\cdot)$ 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 filter를 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 와점성 계수  $\nu_e$ 만을 택하여 난류에 의한 운동량 수송을 평가한다. SGS 모델에서는 SGS 응력  $\tau_{ij}$ 를 다음과 같이 모델화한다.

$$-\tau_{ij} = 2\nu_e \bar{S}_{ij} \quad (6)$$

여기서,  $\nu_e$ 는 SGS 응력의 와점성 계수이고,  $\bar{S}_{ij}$ 는 GS성분의 변형텐서이며 Smagorinsky의 모델(1963)을 이용하여 각각 다음과 같이 정의한다.

$$\nu_e = L_s^2 \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}} = L_s^2 |w| \quad (7)$$

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

$$L_s = C_s \min(\Delta x, \Delta y, \Delta z) \quad (8)$$

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. 수치구조의 계산 알고리즘은 Park 등 (1999), 박 종천(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

급준한 파도나 쇄파 등의 비선형성이 강한 자유표면의 거동을 표현하기 위하여, 자유표면의 운동학적 조건을 식(9)과 같이 밀도함수의 수송방정식을 풀어내는 밀도함수법(Miyata & Park, 1995)에 의해 만족시킨다.

$$\frac{\partial M_\rho}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{u} M_\rho = 0 \quad (9)$$

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

본 연구에서는, 자유표면의 보다 정확한 위치결정을 위해 식(9)를 직접 푸는 대신에 변환함수  $\phi$ 를 매개변수로 한 식(10)을 풀기로 한다.

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

여기서,  $\phi$ 는 자유표면으로부터의 거리함수를 적용한다.

식(10)에서 얻어낸  $\phi$ 의 공간상의 분포는 수치오차를 포함하고 있으며 이를 보완하기 위해 다음과 같은 Level-set 법의 재배치 알고리즘(Sussman 등, 1994)을 도입하기로 한다.

$$M_\nu = \begin{cases} M_\nu^1 & (\text{if } \phi > \epsilon_0) \\ M_\nu^2 & (\text{if } \phi < \epsilon_0) \\ \bar{M}_\nu + \bar{M}_\nu(\phi/\epsilon_0) & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (11)$$

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

한편, 자유표면의 동역학적 조건은 자유표면상의 속도 외삽과 Irregular Stars법을 이용해 만족시킨다.

### 2.3 수치수조의 벽면경계조건

수치수조의 각각의 벽면은 실험목적에 따라 크기와 형태, 성격 등이 유동적으로 변화시킬 수 있다. 기본적으로, 해저 지형 및 물체표면을 포함한 모든 벽면은 no-slip 조건을 적용하는 마찰벽면이나 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 등, 1999)이나 약한 개경계 조건(Kim 등, 2002)을 적용할 수 있도록 옵션이 설정되어 있다.

율파 시뮬레이션의 경우, 국부파고의 시간변화에 따라 구조물이 물속에 잠기거나(submerged) 물 밖으로 노출되는(dried) 격자가 나타나기도 하는데, 이때 구조물의 내부 격자에 정의되는 파고는 기본적으로, Fig. 1에서 보여주듯이, 유체영역으로부터 해안선의 법선방향 구배가 제로가 되도록 외삽한다. 또한, 자유표면 상방의 속도분포는 Fig. 2과 같은 방법으로 외삽한다.

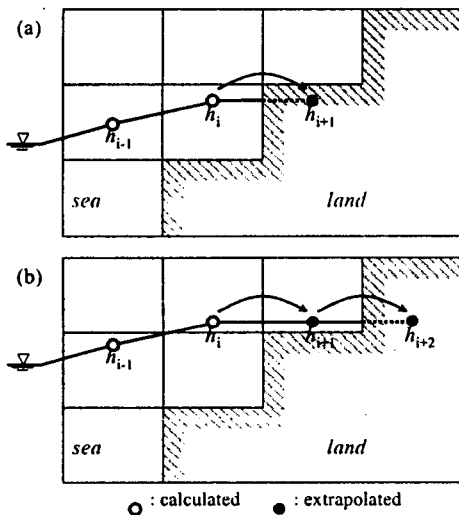


Fig. 1 Extrapolation of wave height; (a) case of a dried cell and (b) case of a submerged cell.

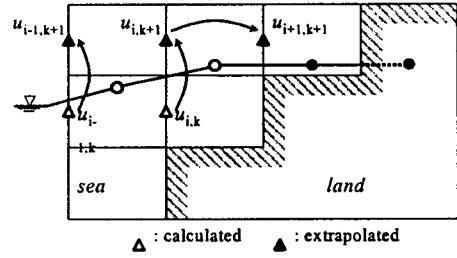


Fig. 2 Extrapolation of velocity onto free-surface.

### 2.4 수치조파기의 경계조건

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

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \sum_{n=1}^N A_n \omega_n \frac{\cosh[k_n(z+h)]}{\sinh(k_n h)} \begin{pmatrix} \cos \theta_n \\ \sin \theta_n \end{pmatrix} \cos(k_{xn} + k_{yn} - \omega_n t - \epsilon_n) \quad (12)$$

$$w = \sum_{n=1}^N A_n \omega_n \frac{\sinh[k_n(z+h)]}{\sinh(k_n h)} \sin(k_{xn} + k_{yn} - \omega_n t - \epsilon_n) \quad (13)$$

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.  $A$ ,  $k$ ,  $\omega$ ,  $\theta$ ,  $\epsilon_n$ , 파의 진폭, 파수, 각주파수, 방향, 위상차를 각각 나타낸다. 또한  $N$ 은 파의 성분수를 나타낸다.

## 3. 수치 시뮬레이션

### 3.1 연직독상의 초월유동(overflow) 시뮬레이션

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

$$q_{weir} = 1.705 \times C_d |R_c|^{3/2} \quad (14)$$

여기서,  $R_c$ 는 천단고,  $C_d$ 는 충전계수이며 다음으로 주어진다.

$$C_d = 0.848 C_F. \quad (15)$$

$$C_F \approx 0.91 + 0.21 \frac{R_c}{B_L} + 0.24 \left( \frac{R_c}{R_c + d_s} - 0.35 \right) \quad (16)$$

단,  $B_L$ 는 독의 폭이다.

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

Fig.4에는 10초와 15초에서의 초월파 유동을 나타낸다. 연직둑 위로 흘러넘친 유동에 의해 오른쪽에 보이는 저장고에는 격심한 파동을 일으키며 저장되고 있다. Fig.5에는 저장고에 저장되는 유량의 시간변화를 나타낸다. 이 변화로부터 10초와 15초사이의 유량의 총전량(overflow discharge)을 계산하여 Fig.6에 Chadwick & Morfett의 실험식(1998)과 Soliman et al.의 계산치(2003)와 비교하였다. 본 연구에서 추정한 값 실험식 사이에 좋은 일치치를 보이고 있다.

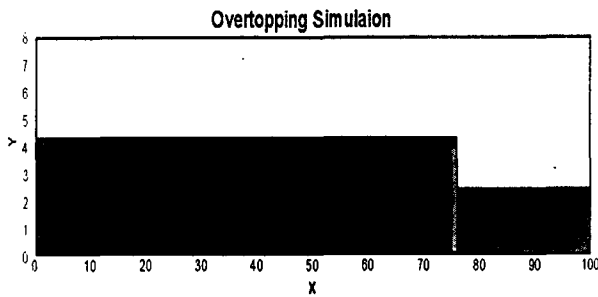


Fig. 3 Initial condition of the free surface profile for the overflow without wave.

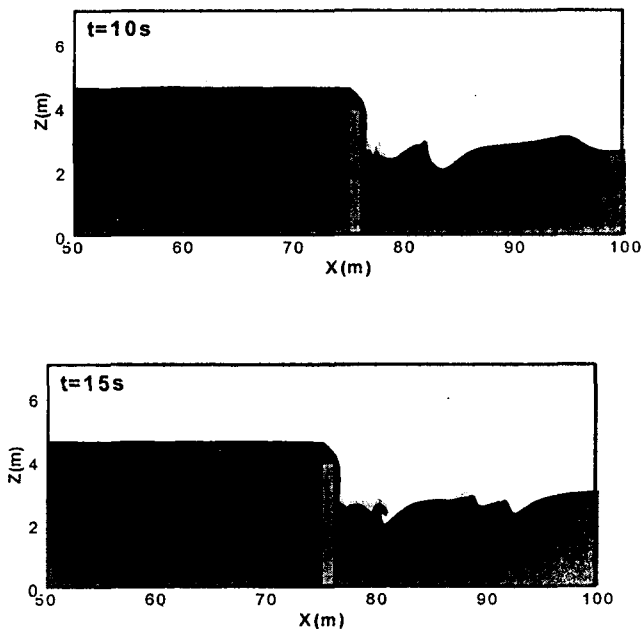


Fig. 4 Free surface profile for the overflow without wave ( $R_c=0.8$ ).

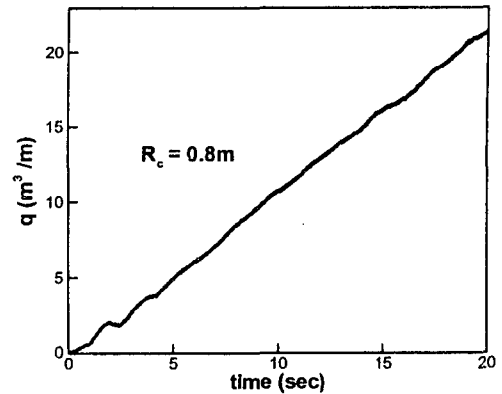


Fig. 5 Time history of overflow discharge.

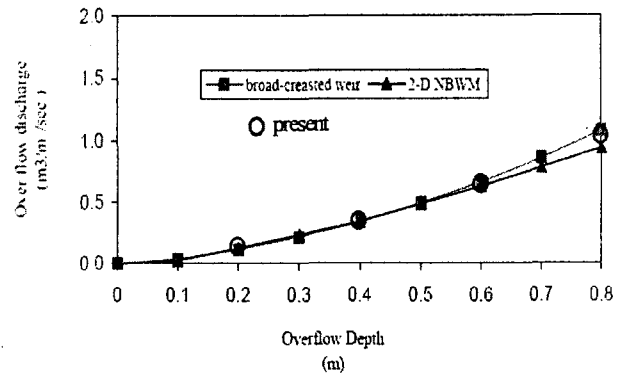


Fig. 6 Comparison of overflow discharge with the weir equation & CFDs.

### 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. 구조물은 Table. 1에서 보는 바와 같이 월파형 구조물의 경사면기울기는 1:3이며, 정수면(SWL)으로부터 해저까지의 수심  $d_s$ , 정수면(SWL)로부터 1:3의 경사면 구조물 바닥까지의 수심  $d_f$ , 정수면(SWL) 위로부터 구조물 최고높이까지의 천정고  $R_c$ 를 가지고 있다. 구조물에는 입사파  $H_s=0.95$ ,  $T=4.73$ 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 총전량에 대한 결과와 Hu et al.(2000)의 Amazon, Soliman et al. (2003)의 2-D BWNM 수치모델결과 및 Saville et al(1995)에 의한 시험결과를 비교하였다.

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

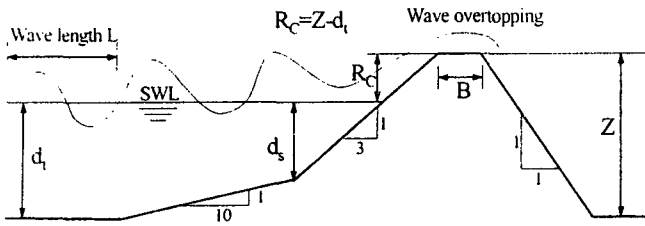


Fig. 7 Sketch explains the case study of regular waves overtopping at sloping seawalls.

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

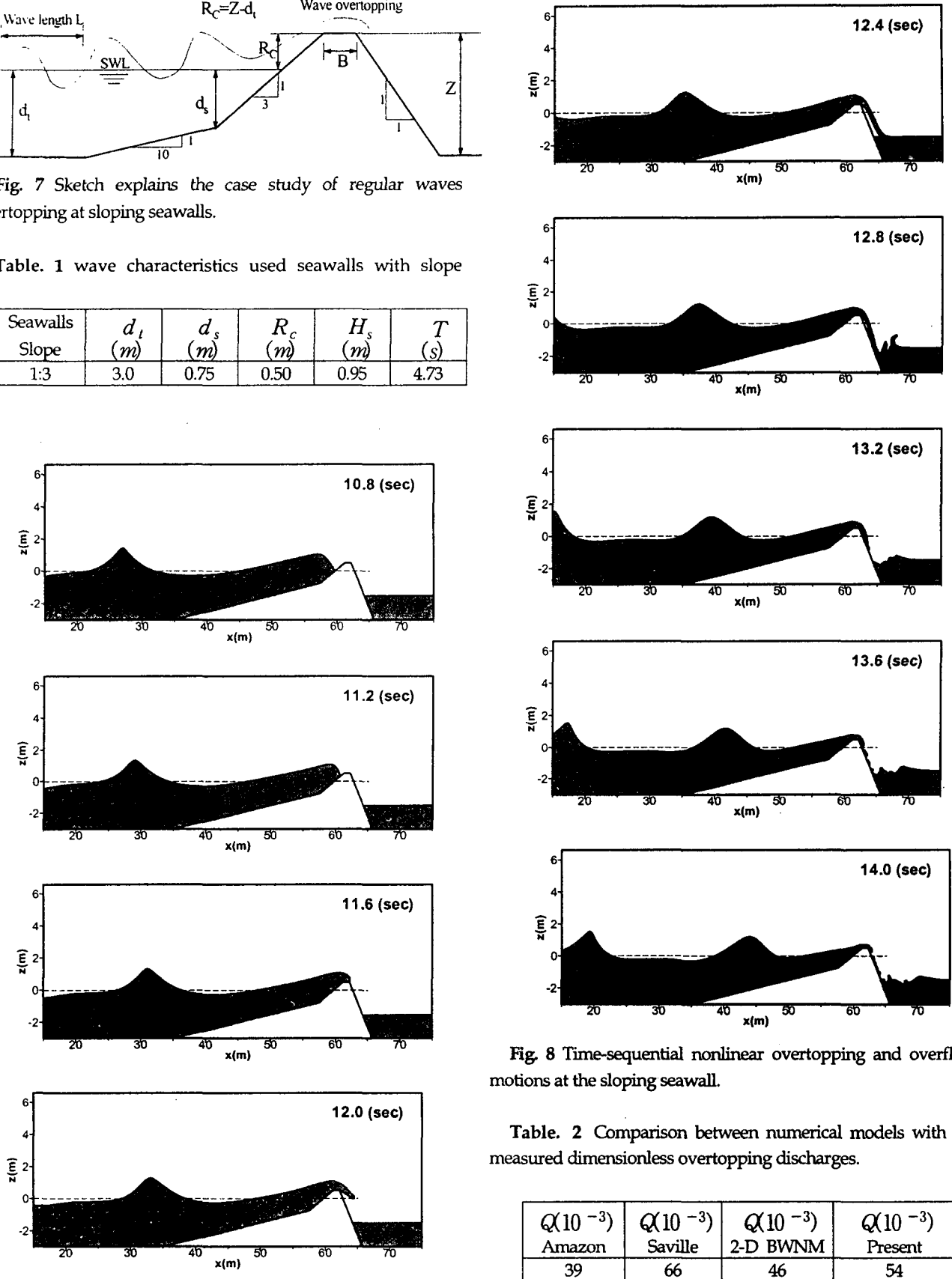


Fig. 8 Time-sequential nonlinear overtopping and overflow motions at the sloping seawall.

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

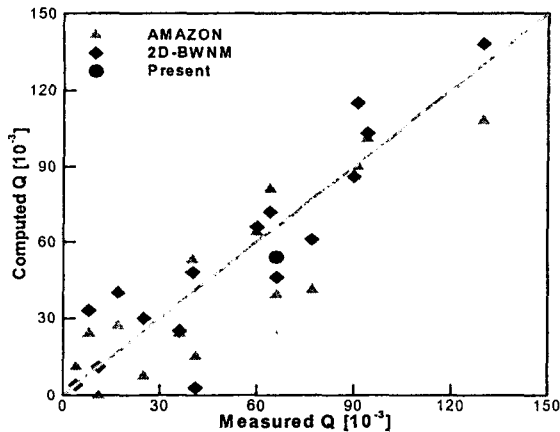


Fig. 9 Comparison between numerical models with the measured dimensionless overtopping discharges.

#### 4. 결 론

파랑 에너지 집중에 따른 월파량의 수치적 추정에 관한 기술을 확보할 수 있었다. 앞으로 향후 개발된 시뮬레이션 기술을 활용하여 해안역에서 월파 제어를 위한 방파제 설계에 직접적으로 활용하며, 월파량의 효율적인 제어를 위하여 다양한 형상의 구조물에 대한 case study를 수치적으로 수행할 것이다.

#### 후 기

본 연구는 전력산업 연구개발사업으로 수행중인 "월파형 파력발전 기반 기술연구"과제의 지원으로 수행하였습니다.

#### 참 고 문 헌

박 종천 (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 & FN SPON.

Dean, R.G. & Dalrymple, R.A. (1991), "Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists", World Scientific Publ.

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.

Kim, M.H., Niedzwecki, J.M., Roesset, J.M., Park, J.C. & Tavassoli, A., & 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.

Leonard, A. (1974). "Energy cascade in large-eddy simulation

of turbulent fluid flow", Adv. Geophys., Vol 18, A, pp 237-248.

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(4), pp.207-215.

Miyata, H. & Park, J.C. (1995), "Ch.5 Wave Breaking Simulation", Potential Flow of Fluids, ed. M. Rahman, Computational Mechanics Publications, UK., pp 149-176.

Park, J.C., Kim, M.H. & 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.

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.

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.

Soliman, A. and Reeve, D.E. (2003), "Numerical study for wave overtopping and overflow of sloping sea wall", To appear in Proceeding of Coastal Structures 2003, Portland, Oregon

Sussman, M. Smereka, P. & Osher, S. (1994), "A Level Set Approach for Computing Solutions to Incompressible Two-Phase Flow", J. of Comp. Physics, Vol.114 , pp 272-280.

Takakura, Y., Ogawa, S. and Ishiguro, T. (1989) "Turbulence Models for Transonic Viscous Flow", AIAA paper, No 89-1952CP.