

## Shelf 지형에서 불규칙파의 쇄파실험 및 수치해석

### Experimental and Numerical Analyses for Irregular Wave Breaking over a Shelf Region

이 종 인\* / 김 영 태\*\*

Lee, Jong-In / Kim, Young-Taek

#### Abstract

In this study, wave breakings over a shelf region are investigated under irregular wave conditions through laboratory experiments in a wave flume. Numerical simulations based on the Boussinesq-type equations are also conducted. The characteristics of breaking waves such as significant wave height, crest and trough heights, the mean water level and the stable wave height are obtained by analyzing laboratory measurements in detail. Obtained results are compared with those of the Boussinesq-type equations model. A very reasonable agreements is observed. The broken waves over a horizontal bottom asymptotically approach a stable wave height( $H_{stable}$ ). In this study, the relative stable wave height is found as  $H_{stable}/h \approx 0.56$  for irregular wave.

**Keywords** : laboratory experiment, irregular wave, wave breaking, Boussinesq equation, stable wave height

#### 요 지

본 연구에서는 shelf 지형을 대상으로 불규칙파를 적용한 2차원 쇄파변형 수치실험과 Boussinesq형 방정식을 이용한 수치해석을 수행하였다. 유의파고, 유의파봉고, 유의파곡고, 평균수위 및 안정파고와 같은 쇄파특성을 수치실험자료로부터 분석하였고, 실험결과와 Boussinesq형 방정식의 해석결과를 비교하였으며, 두 결과는 비교적 잘 일치하였다. 일정수심상에서의 불규칙파의 쇄파후 안정파고는 수심의 약 0.56배로 분석되었다.

**핵심용어** : 수치실험, 불규칙파, 쇄파, Boussinesq 방정식, 안정파고

#### 1. 서 론

심해역에서 발달된 파랑이 천해역으로 전파하면서 수심변화 등으로 인해 여러 가지 전파변형을 겪게 되며, 지배적인 현상인 쇄파에 의해 파랑에너지의 대부분이 감쇠하게 된다. 쇄파가 발생하는 연안역은 항만건설, 매립, 호안건설 등을 통한 새로운 공간의 창출이 활발하게 이루어지고 있으며, 이와 관련된 주요 설계인자인 파랑의 정도

높은 예측은 구조물의 안정성 확보뿐만 아니라 경제성 확보 측면에서도 중요하다 할 수 있다. 또한 연안류, 지형변동, 해안선의 변화 등을 예측하는데 있어 쇄파대내에서의 파랑변형 해석은 주요한 인자이다. 연안역의 활용이 대부분 쇄파대내의 영역을 대상으로 함을 감안할 때 쇄파변형을 정도 높게 해석할 필요가 있으며, 이를 위해 여러 연구자들에 의해 이론적 및 경험적인 다양한 에너지감쇠식이 제안되었고, 또한 제안식의 검증을 위해 쇄파변형에

\* 전남대학교 공학대학 해양토목공학과 부교수 (e-mail: jilee@chonnam.ac.kr)  
Associate Professor, Dept. of Marine and Civil Engrg., Chonnam National University, Yeosu 550-749, Korea

\*\* 교신저자, 한국건설기술연구원 하천해안연구실 연구위원 (e-mail: ytkim@kict.re.kr, Tel: 031-910-0654)

Corresponding Author, Research Fellow, River and Coastal Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Gyeonggi 411-712, Korea

대한 수리실험이 수행되어 왔다. 기존에 수행된 쇄파실험은 개발된 수치모형의 검증 등을 위해 제한적으로 수행된 것이 대부분이고, 실험결과는 파고와 수위상승 관점에서 검토되었다. 최근 불규칙파의 적용성 확대 및 보다 정도 높은 파랑의 전파변형해석 등을 위해 Boussinesq모형과 같은 파랑의 비선형을 고려할 수 있는 수치모형의 활용이 일반화되어 가고 있는 실정이다. 이러한 비선형 수치모형의 정확도를 검증하기 위해서는 보다 다양한 실험자료의 구축을 통한 검토가 요구된다.

그동안 파랑의 전파변형을 해석하기 위해 많은 Boussinesq 방정식이 유도되고, 적용되어 왔다. Peregrine (1967)의 Boussinesq 방정식은 약비선형, 약분산성이라는 기본적인 가정에서 유도됨에 따라 적용수심의 제약이 있었다. Madsen and Sorensen (1992)은 분산항의 수정을 통해, Nwogu (1993)는 임의수심에서의 유속을 이용함으로써 기존 Boussinesq 방정식의 주기분산특성을 개선하였으며, 중간수심역까지 적용범위를 확장하였다. 또한, Liu (1994)와 Wei et al. (1995)은 Nwogu (1993)의 방정식을 확장하여 중간수심역에도 적용이 가능하고, 강비선형의 파랑의 전파를 해석할 수 있는 방정식을 유도하였다. 그리고 기존 방정식들이 2차 다항식근사를 적용한데 반해, 연직방향 유속장에 4차 또는 그 이상 차수의 다항식근사를 적용함으로써 심해역까지 적용이 가능한 여러 고차(high-order) Boussinesq 방정식들이 유도되었으며, 대표적인 연구로는 Agnon et al. (1999), Gobbi et al. (2000) 및 Madsen et al. (2002)의 연구를 들 수 있다. 또한 Lynett and Liu (2004a,b)는 다른 접근방법을 통해 Boussinesq 방정식을 유도하였다. Lynett and Liu (2004a,b)는 연직방향 유속장에 고차 다항식근사를 적용하는 대신 연직방향의 수피를 N개의 층(N layers)으로 분할한 후, 각각의 층에 2차 다항식근사를 적용하고, 각각의 층을 접합시키는 방법을 적용하였다. 이러한 접근을 통해 고차 다항식근사의 적용으로 인한 고차 공간미분항이 없으면서 적용수심을 확장한 방정식을 유도하였다. 국내 연구로서 Chun et al. (2006)은 와점성계수 쇄파조건식을 적용하여 Boussinesq 모형을 수립한 후, 천퇴부 쇄파조건에서 파랑변형 및 쇄파유도류를 해석하였고, 해석결과는 수리실험결과와 비교하여 수립된 수치모형의 민감도를 분석하였다. Lee et al. (2006)은 규칙파를 적용한 2차원 쇄파실험을 수행하고, 실험결과를 이용하여 2층 Boussinesq 모형의 적용성을 평가하였으며 기존 Boussinesq 모형보다 적용성이 우수함을 보였다. 그리고 Choi et al. (2009)은 FUNWAVE 모형(Wei et al., 1995) 등을 이용하여 타원형 수중 천퇴상에서의 전파변형을 모의하여 쇄파유도류가

파랑의 굴절에 미치는 영향을 분석하였다.

본 연구에서는 shelf 지형을 대상으로 불규칙파를 적용한 쇄파에 대한 체계적인 수리실험을 수행하여 입사파 조건 및 수심변화에 따른 쇄파변형을 검토하고, 그 결과를 유의파고(significant wave height), 유의파봉고(significant crest height), 유의파곡고(significant trough height) 및 평균수위(mean water level)로 분석하였다. 이는 규칙파를 대상으로 한 Lee et al. (2006)의 연구를 확장한 것이다. 그리고 shelf 지형상에서 쇄파후 안정파고(stable wave height)를 수리실험자료를 이용하여 분석한 후 기존 연구결과와 비교하였다. 또한 Lynett and Liu (2004a,b)에 의해 유도된 2층 Boussinesq모형과 기존 강비선형 Boussinesq 모형(1층 Boussinesq모형)을 이용하여 동일조건에 대해 수치해석을 수행하고, 수치모형의 해석정도를 실험결과와 비교하였다.

## 2. 수치모형

### 2.1 2층 Boussinesq모형의 지배방정식

$N$ 층 Boussinesq 모형의 자세한 유도과정은 Lynett and Liu (2004a,b)에 기술되어 있고, 본 연구에서는  $N=1$ 인 경우(1층 Boussinesq 모형, 기존 강비선형 모형)와  $N=2$ 인 경우(2층 Boussinesq 모형, two-layer Boussinesq model)의 지배방정식을 적용하여 shelf 지형상에서의 불규칙파 쇄파변형을 모의하였다. 2층 Boussinesq모형은 연직방향의 수피를 두 개의 층으로 분리한 후 유속 및 압력을 층간 경계면에서 접합시킨 모형으로서 Eqs. (1) and (2)는 각각 연속방정식과 상부층의 운동방정식이고, Eq. (3)은 접합방정식(matching equation)이다.

Eqs. (1)~(3)에서  $S$  및  $T$ 는 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \nabla \cdot [(\zeta - \eta) \mathbf{u}_1 + (\eta + h) \mathbf{u}_2] \\ & - \nabla \cdot \left\{ \left[ \frac{\eta^3 + h^3}{6} - \frac{(\eta + h)\kappa_2^2}{2} \right] \nabla S_2 + \left[ \frac{\eta^2 - h^2}{2} (\eta + h)\kappa_2 \right] \nabla T_2 \right\} \\ & - \nabla \cdot \left\{ \left[ \frac{\zeta^3 - \eta^3}{6} - \frac{(\zeta - \eta)\kappa_1^2}{2} \right] \nabla S_1 + \left[ \frac{\zeta^2 - \eta^2}{2} - (\zeta - \eta)\kappa_1 \right] \nabla T_1 \right\} = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \mathbf{u}_1}{\partial t} + \frac{1}{2} \nabla (\mathbf{u}_1 \cdot \mathbf{u}_1) + g \nabla \zeta \\ & + \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \frac{\kappa_1^2}{2} \nabla S_1 + \kappa_1 \nabla T_1 - \nabla \left( \frac{\zeta^2}{2} S_1 \right) - \nabla (\zeta T_1) \right\} \\ & + \nabla \cdot \left\{ \frac{\partial \zeta}{\partial t} (T_1 + \zeta S_1) + (\kappa_1 - \zeta) (\mathbf{u}_1 \cdot \nabla) T_1 \right. \\ & \left. + \frac{1}{2} (\kappa_1^2 - \zeta^2) (\mathbf{u}_1 \cdot \nabla) S_1 + \frac{1}{2} [(T_1 + \zeta S_1)^2] \right\} - \mathbf{R}_b + \mathbf{R}_f \quad (2) \\ & + \nu_T \left\{ \nabla S_1 - \nabla^2 \mathbf{u}_1 - \nabla^2 \left[ \frac{\kappa_1^2}{2} \nabla S_1 + \kappa_1 \nabla T_1 \right] + \nabla \left[ \frac{\zeta^2}{2} \nabla^2 S_1 + \zeta \nabla^2 T_1 \right] \right\} = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_2 + \frac{\kappa_2^2 - \eta^2}{2} \nabla S_2 + (\kappa_2 - \eta) \nabla T_2 = \\ \mathbf{u}_1 + \frac{\kappa_1^2 - \eta^2}{2} \nabla S_1 + (\kappa_1 - \eta) \nabla T_1 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} S_2 = \nabla \cdot \mathbf{u}_2, \quad T_2 = \nabla \cdot (h\mathbf{u}_2), \\ S_1 = \nabla \cdot \mathbf{u}_1, \quad T_1 = \eta(S_2 - S_1) + T_2 \end{aligned} \quad (4)$$

또한 Eqs. (1)~(4)에서  $\zeta$ ,  $h$  및  $g$ 는 각각 자유수면, 수심 및 중력가속도이고,  $u_1$ 과  $u_2$ 는 각각 상층부 및 하층부의  $x$ ,  $y$  방향의 유속벡터이다(Fig. 1). Fig. 1에서  $d_1$ 과  $d_2$ 는 각 층의 특성두께,  $h_0$ 는 특성수심,  $a_0$ 는 특성진폭,  $l_0$ 는 특성길이이다. 그리고 Eq. (2)에서  $R_b$ 와  $R_f$ 는 각각 쇄파 및 바닥마찰에 의한 에너지감쇠항,  $\nu_T$ 는 와점성계수(eddy viscosity)이다. Eqs. (1)~(3)에서  $\kappa_1$ 과  $\kappa_2$ 는 각각  $u_1$ 과  $u_2$ 가 정의되는 수심으로서  $\kappa_1 = -0.127h$ 와  $\kappa_2 = -0.618h$ 이며,  $\eta$ 는 층의 높이로서  $\eta = -0.266h$ 이다. Eqs. (1) and (2)에  $\kappa_1 = -0.531h$ 와  $\kappa_2 = \eta = -h$ 를 대입하면, Liu (1994) 및 Wei et al. (1995)에 의해 유도된 강비선형 Boussinesq형 방정식(highly nonlinear Boussinesq type equation)이 되며, 본 연구에서는 이를 1층 Boussinesq모형(one-layer Boussinesq model)이라 하였다.

## 2.2 에너지감쇠항

Eq. (2)에 알 수 있는 바와 같이 수치모형에는 쇄파, 바닥마찰 및 와점성에 의한 에너지감쇠가 고려된다. 먼저 바닥마찰에 의한 에너지감쇠는 다음과 같은 식이 적용된다.

$$R_f = \frac{f}{h + \zeta} u_b |u_b| \quad (5)$$

Eq. (5)에서  $u_b$ 는 해저면에서의 유속이고,  $f$ 는 바닥마찰계수로서 일반적으로  $f = 10^{-3} \sim 10^{-2}$ 의 값을 가지며, 수치해석시  $f = 10^{-3}$ 을 적용하였다.

쇄파에 의한 에너지감쇠는 Kennedy et al. (2000)이 제안한 식이 고려되었으며, 운동방정식 (2)에 포함된  $R_b = R_{bx}\mathbf{i} + R_{by}\mathbf{j}$ 는 Eq. (6)과 같다.

$$\begin{aligned} R_{bx} &= \frac{1}{H} \left\{ [\nu_T(Hu_1)_x]_x + \frac{1}{2} [\nu_T(Hu_1)_y + \nu_T(Hv_1)_x]_y \right\} \\ R_{by} &= \frac{1}{H} \left\{ [\nu_T(Hv_1)_y]_y + \frac{1}{2} [\nu_T(Hu_1)_y + \nu_T(Hv_1)_x]_x \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

Eq. (6)에서  $H(=h + \zeta)$ 는 전수심(total water depth)이며, 와점성계수는 Eq. (7)과 같다.

$$\nu_T = BH\zeta_t \quad (7)$$

Eq. (7)에서  $B$ 는 쇄파와 비쇄파 상태를 매끄럽게 연결시켜주는 변수로서 다음과 같이 정의된다.

$$B = \begin{cases} \delta, & \zeta_t \geq 2\zeta_t^b \\ \delta(\zeta_t/\zeta_t^b - 1), & \zeta_t^b < \zeta_t < 2\zeta_t^b \\ 0, & \zeta_t \leq \zeta_t^b \end{cases} \quad (8)$$

여기서,  $\delta$ 는 증폭계수(amplification factor)이고,  $\zeta_t^b$ 는 쇄파의 진행 및 정지를 판단하는 변수로서 다음과 같이 정의된다.

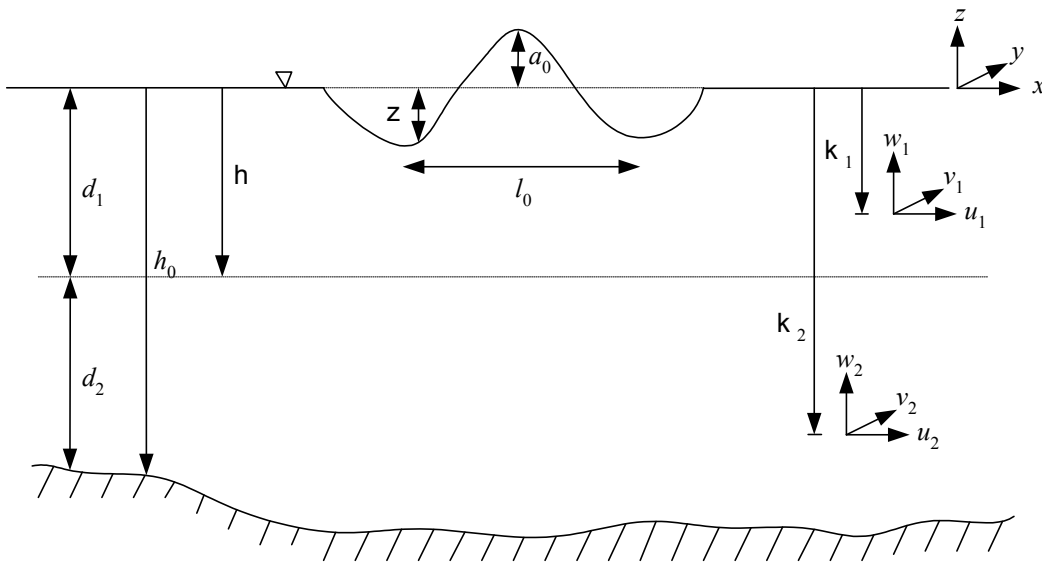


Fig. 1. Definition Sketch of Two-layer Model

$$\zeta_t^b = \begin{cases} \zeta_t^{(F)}, & t - t_0 \geq T^b \\ \zeta_t^{(I)} + \frac{t - t_0}{T^b} (\zeta_t^{(F)} - \zeta_t^{(I)}), & 0 \leq t - t_0 < T^b \end{cases} \quad (9)$$

Eq. (9)에서  $t_0$ 는 쇄파가 시작되는 시간이다. 그리고 Eqs. (8) and (9)에서 사용된 변수 중  $\delta = 6.5$ ,  $\zeta_t^{(I)} = 0.65\sqrt{gH}$ ,  $\zeta_t^{(F)} = 0.08\sqrt{gH}$ ,  $T^b = 8.0\sqrt{H/g}$  이다(Lynett, 2002).

### 3. 수리실험

불규칙파를 대상으로 한 쇄파실험은 한국건설기술연구원의 길이 56m, 폭 1m, 높이 2m의 수로에서 수행되었으며, 사용된 조파기는 피스톤형(piston type)이다. Fig. 2는 본 실험의 개념도로서  $x = -11.5$ m 위치에 조파기가 위치하며, 수로의 양단에는 소파시설이 설치되어 있다. 그리고 실험에 적용된 shelf 지형의 사면경사는 1/40, shelf의 높이( $h_s$ )는 0.4m로 일정하며, 계측구간은  $x = 6 \sim 26$ m이다. 자유수면자료의 계측을 위해 쇄파가 발생하지 않는 구간에는 1m 또는 0.5m 간격, 쇄파가 발생하는 주변 구간에는 0.25m 간격으로 용광식파고계를 배치하였으며, 본 실험에 사용된 파고계의 독취율은 20 Hz이다. Fig. 2에서  $h_0$ 는 조파기 전면 수심이며,  $h_1 (= h_0 - h_s)$ 은 shelf 상단의 일정 수심이다. 본 실험에서는  $h_0 = 0.4$ m, 0.45m 및 0.5m를 적용하였기 때문에 이에 해당하는  $h_1$ 은 각각 0.0m, 0.05m 및 0.1m이다.

본 실험은 수심, 입사파의 유의주기 및 유의파고를 달리 하며 수행되었으며, 실험에 적용된 입사파 조건을 요약한 것이 Table 1이다. Table 1에서  $(T_{1/3})_0$ 와  $(H_{1/3})_0$ 는 각각  $x = 0$ m 위치에서 설정된 입사파의 유의주기와 유의파고이며,  $k$ 는 유의주기에 해당하는 파수이다. 적용된 실험파의 목표 유의주기는  $(T_{1/3})_0 \approx 1.3$  sec ~ 2.2 sec 범위에서 약 0.3 sec 간격으로 설정하였으며, 목표 유의파고는

$(H_{1/3})_0 \approx 0.04$  m, 0.08 m 및 0.12 m를 대상으로 하였다. 실험파는 300 sec 동안 조파하여 계측된 자유수면자료를 대상으로 60.05 sec부터 204.8 sec 동안의 자유수면자료를 이용하여 분석하였다. 실험과 설정에 적용된 주파수 스펙트럼은 Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼이며,  $x = 0$ m 위치에서 목표 스펙트럼을 재현하기 위해 조파신호를 수정하며 실험파를 설정하였다. 그리고 쇄파변형에 대한 실험은 실험과 설정시의 조파시간과 동일하게 수행하였으며, 결과분석은 스펙트럼 분석시간과 같다.

수치해석에서는 격자간격  $\Delta x = \lambda/50$ 을 적용하였고, 계산시간 및 분석시간 등은 수리실험과 동일한 조건에서 해석한 후, 그 결과를 수리실험결과와 비교하였다. 여기서,  $\lambda$ 는 수심  $h_0$ 에 대응하는 입사파 유의주기의 파장이다.

### 4. 결과분석 및 검토

본 연구에서는 shelf 지형을 대상으로 불규칙파를 적용하여 쇄파변형에 대한 수리실험을 수행하고, 그 결과를 Boussinesq모형의 해석결과와 비교 검토하였다. 수리실험은 수심 3개 조건, 입사파고 3개 조건과 입사파 주기 4개 조건을 조합하여 총 36개 경우에 대해 수행하였으나, 본 논문에서는 그 중 일부조건에 대한 수리실험결과와 수치해석결과를 수록하였다. 1층 및 2층 Boussinesq 모형을 해석하여 비교함으로써 2층 Boussinesq모형의 적용성을 평가하고자 하였으나, 입사파의 비선형성이 상대적으로 큰 경우에 1층 Boussinesq모형 해석시 발산하는 경우가 발생하여 이러한 조건은 제외하였고, 또한 지면상 모든 자료를 수록하기는 어렵기 때문이다.

수리실험 및 수치해석에 적용된 입사파조건은  $(kH_{1/3})_0 = 0.058 \sim 0.357$ ,  $k_0 h_0 = 0.611 \sim 1.360$ 이며, 실험과 설정위치 ( $x = 0$ m)에서는 쇄파가 발생하지 않는 조건이다. 수리실험 및 수치해석으로부터 도출된 자유수면자료를 이용하

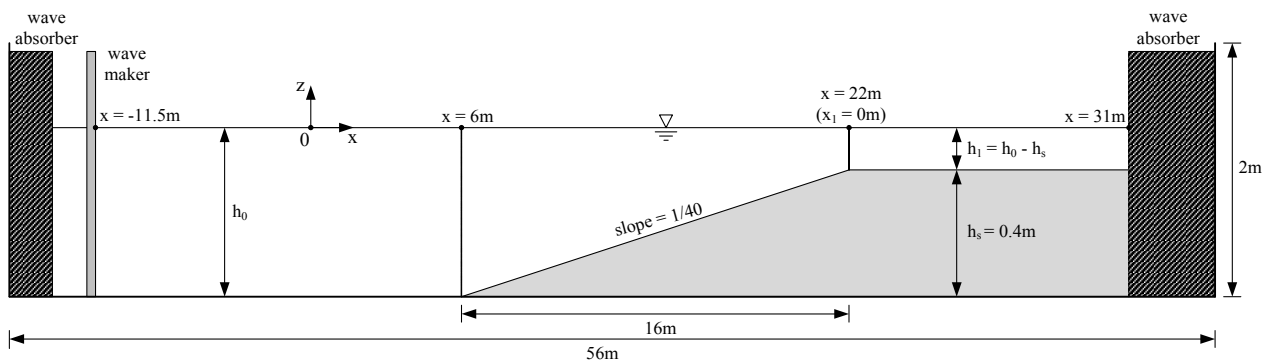


Fig. 2. Experimental Setup for Wave Breaking Test

Table 1. Incident Wave Conditions for Breaking Test of Irregular Wave

Case	$(T_{1/3})_0$ (sec)	$(H_{1/3}/h)_0$	$(kH_{1/3})_0$	$(kh)_0$	$h_0$ (m)	$h_1$ (m)		
R401304	1.294	0.101	0.118	1.160	0.40	0.00		
R401604	1.616	0.100	0.088	0.886				
R401904	1.925	0.102	0.074	0.722				
R402204	2.211	0.103	0.063	0.611				
R401308	1.287	0.216	0.250	1.160				
R401608	1.628	0.215	0.190	0.886				
R401908	1.945	0.216	0.156	0.722				
R402208	2.238	0.222	0.132	0.611				
R401312	1.375	0.308	0.357	1.160				
R401612	1.645	0.324	0.287	0.886				
R401912	2.050	0.346	0.250	0.722				
R402212	2.406	0.366	0.224	0.611				
R451304	1.301	0.090	0.114	1.260			0.45	0.05
R451604	1.604	0.091	0.087	0.954				
R451904	1.933	0.092	0.071	0.774				
R452204	2.178	0.093	0.061	0.653				
R451308	1.285	0.191	0.240	1.260				
R451608	1.619	0.187	0.178	0.954				
R451908	1.942	0.190	0.147	0.774				
R452208	2.236	0.194	0.126	0.653				
R451312	1.326	0.278	0.350	1.260				
R451612	1.613	0.292	0.279	0.954				
R451912	1.957	0.298	0.231	0.774				
R452212	2.281	0.309	0.202	0.653				
R501304	1.312	0.082	0.111	1.360	0.50	0.10		
R501604	1.595	0.080	0.082	1.021				
R501904	1.928	0.082	0.068	0.824				
R502204	2.191	0.083	0.058	0.693				
R501308	1.302	0.191	0.240	1.260				
R501608	1.616	0.170	0.173	1.021				
R501908	1.938	0.170	0.140	0.824				
R502208	2.231	0.175	0.121	0.693				
R501312	1.319	0.243	0.330	1.360				
R501612	1.561	0.248	0.254	1.021				
R501912	1.926	0.263	0.216	0.824				
R502212	2.235	0.267	0.185	0.693				

여 유의파고, 유의파봉고, 유의파곡고 및 평균수위를 산정하여 각각 비교하였다. 규칙파의 경우에는 동일 계측지점에서 파봉고(crest height)와 파곡고(trough height)의 합은 파고(wave height)이지만, 불규칙파의 경우에는 유의파봉고와 유의파곡고의 합이 유의파고(significant wave

height)가 되지 않을 수 있다. 즉, 유의파봉고와 유의파곡고는 자유수면자료로부터 평균수면을 기준으로 개별파의 파봉고와 개별파의 파곡고를 산정한 후, 각각에 해당되는 유의파봉고와 유의파곡고를 산정하였기 때문이다. 그리고 유의파봉고와 유의파곡고를 분리하여 분석한 후, 수리

실험결과와 수치해석결과를 비교한 것은 수치모형이 파랑의 비선형성을 적절히 재현하는가를 평가하기 위함이다. 본 연구에서 수행한 수리실험 및 수치해석 결과로부터 유의파고는 영점상향교차법(zero-upcrossing method)을 이용하여 개별 파고를 산정한 후 계산하였다.

Figs. 3~5는  $h_0=0.40\text{ m}$  ( $h_1=0.0\text{ m}$ )인 경우에 대한 결과를 입사파의 유의파고별로 각각 도시한 것이다. Fig. 3은  $(H_{1/3})_0 \approx 0.04\text{ m}$ 인 조건에 대한 결과이며, 파형경사 $(kH_{1/3})_0$ 가 상대적으로 작은  $(kH_{1/3})_0=0.063\sim 0.118$ 이다. 수심이 깊은  $x=6\text{ m}$  위치에서는 유의파봉고와 유의파곡고의 차이가 크지 않지만, 수심이 낮아져 파랑의 비선형성이 증가

되는 영역에서는 유의파봉고가 유의파곡고에 비해 크게 나타남을 알 수 있으며, 동일 유의파고 조건에서 입사파의 유의주기가 증가할수록 천수효과가 일찍 발생함을 볼 수 있다. 수치해석과의 비교에서 Boussinesq 모형의 해석결과와 수리실험결과는 비교적 잘 일치함을 볼 수 있으나, 2층 모형의 결과가 1층 모형에 비해 실험결과에 보다 근접하는 것으로 나타났다. 1층 모형의 경우, 유의파봉고를 2층 모형에 비해 약간 크게 산정하는 것으로 나타났다. 그리고 전반적으로 쇄파대를 중심으로 수치해석에 의한 유의파고가 수리실험의 유의파고보다 약간 크게 나타났으며, 유의파봉고는 약간 크게, 유의파곡고는 약간 작게 해

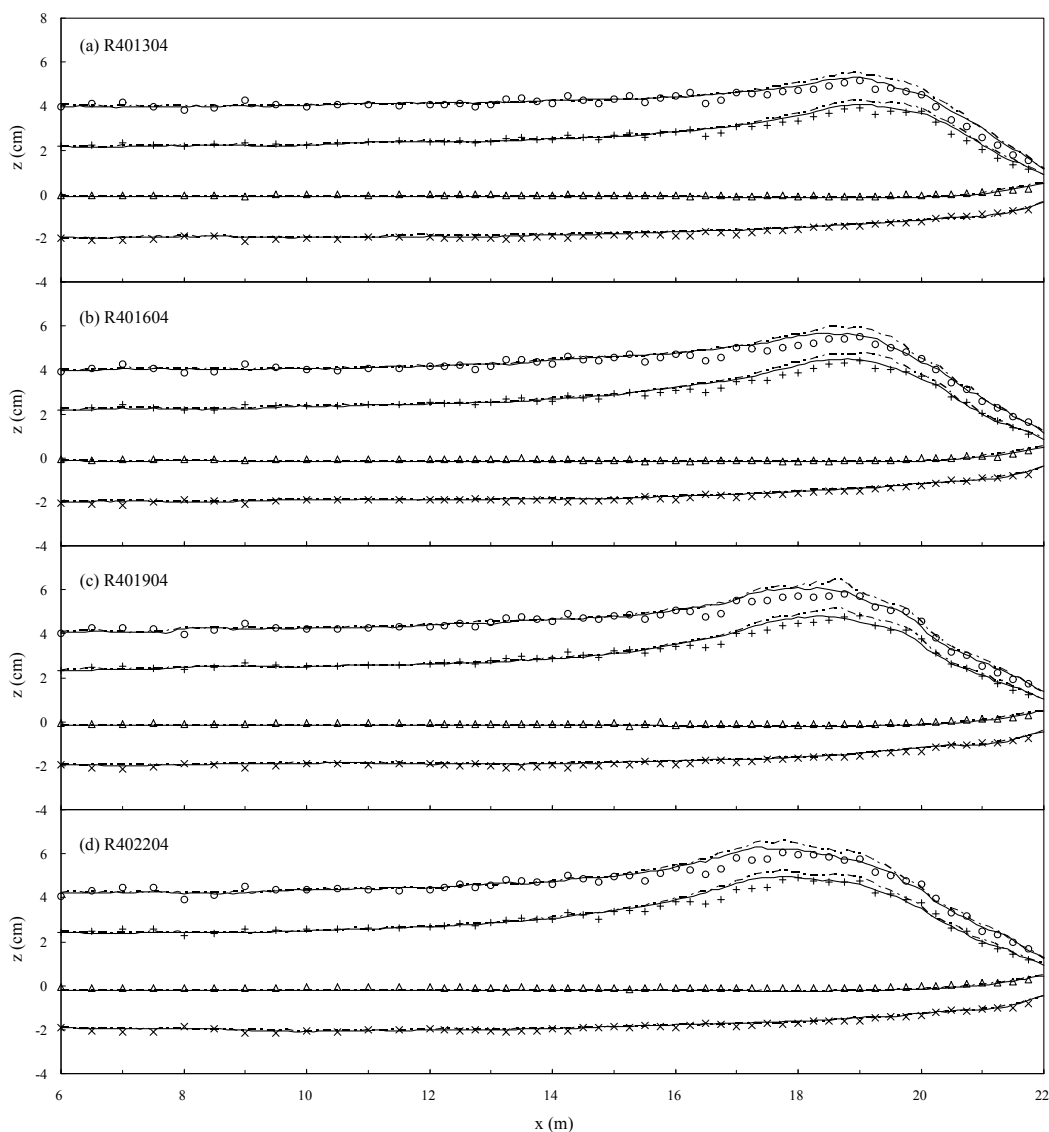


Fig. 3. Comparison of Experimental and Numerical Results for Irregular Wave Breaking (Case R401304, R401604, R401904, and R402204). The Symbols are the Experimental Data ( $\circ$ : significant wave height,  $+$ : significant crest height,  $\times$ : significant trough height,  $\triangle$ : mean water level), the Dashed Line is the One-layer Model, and the Solid Line is the Two-layer Model Results

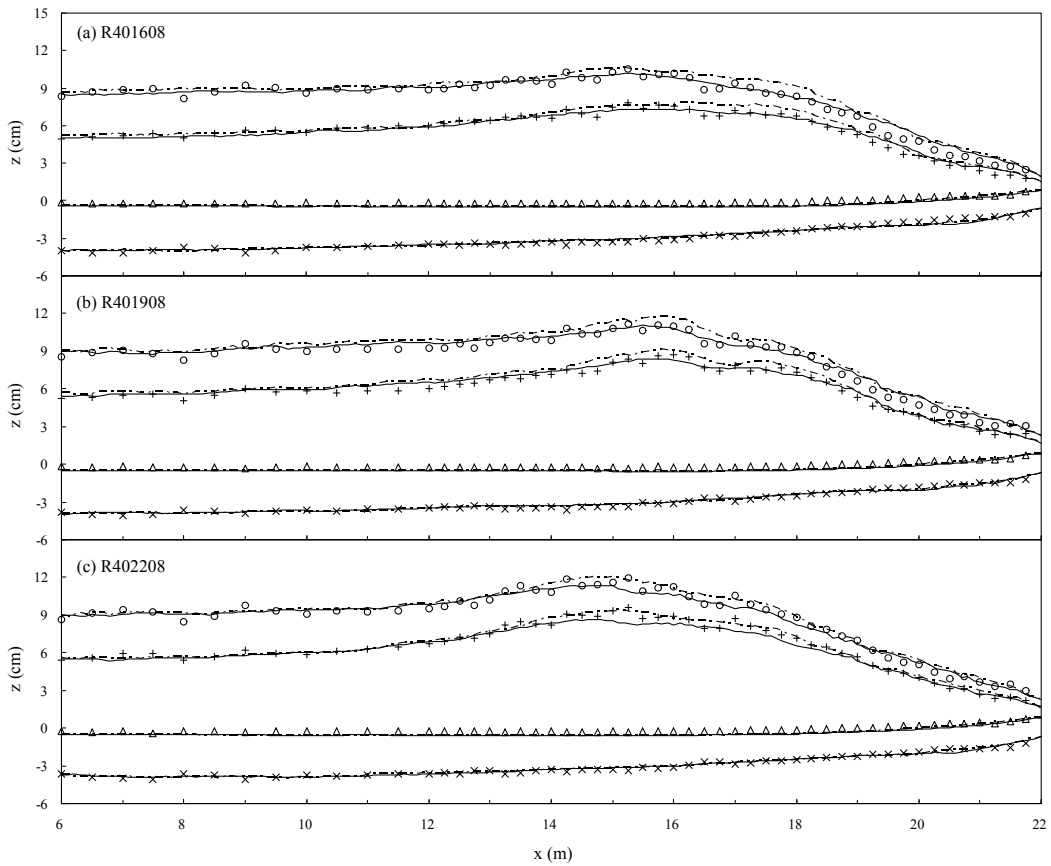


Fig. 4. Comparison of Experimental and Numerical Results for Irregular Wave Breaking (Case R401608, R401908, and R402208). Figure Setup Same as in Fig. 3

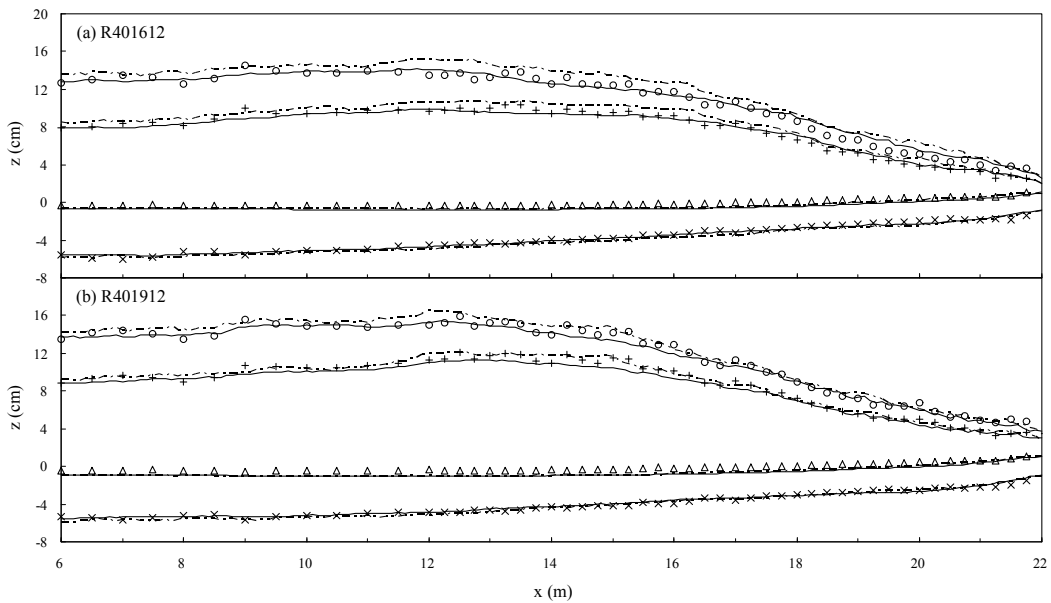


Fig. 5. Comparison of Experimental and Numerical Results for Irregular Wave Breaking (Case R401612 and R401912). Figure Setup Same as in Fig. 3

석되었다. 이는 수치모형에 의한 파랑의 비선형성이 수리 실험시보다 약간 더 강하게 작용했기 때문으로 생각된다. Figs. 4 and 5는 Fig. 3의 조건에 비해 입사파고가 증가하여 비선형성이 상대적으로 큰 경우의 수리실험 및 수치해석결과를 도시한 것으로서 전체적인 경향은 Fig. 3과 유사하게 나타났다.  $(H_{1/3})_0 \approx 0.08\text{m}$  조건인 Fig. 4의 결과를 살펴보면 수심이 감소함으로 인해 천수효과는 발생하지 않으나 Fig. 3에 비해 뚜렷하지는 않으며,  $(H_{1/3})_0 \approx 0.12\text{m}$  조건인 Fig. 5에서는 상대적으로 파고가 크기 때문에 보다

일찍 쇄파가 시작되어 천수효과는 거의 발생하지 않음을 알 수 있다. 그리고 Fig. 3의 경우와는 달리 Fig. 5에서는 파랑의 비선형성이 증가됨으로 인해  $x=6\text{m}$  위치에서 유의파봉고와 유의파곡고의 차이가 크게 나타났다. 그리고 Fig. 6은  $h_0=0.4\text{m}$ 에서 수행된 R40 cases의 상대평균수위  $(=MWL/(H_{1/3})_0)$ 를 도시한 것으로서 동일 유의파고 조건에서 입사파의 주기에 따른 차이는 거의 나타나지 않았으나, 입사파의 파고가 증가할수록 쇄파가 보다 일찍 발생함에 따라 보다 깊은 수심에서 set-up이 발생함을 알 수

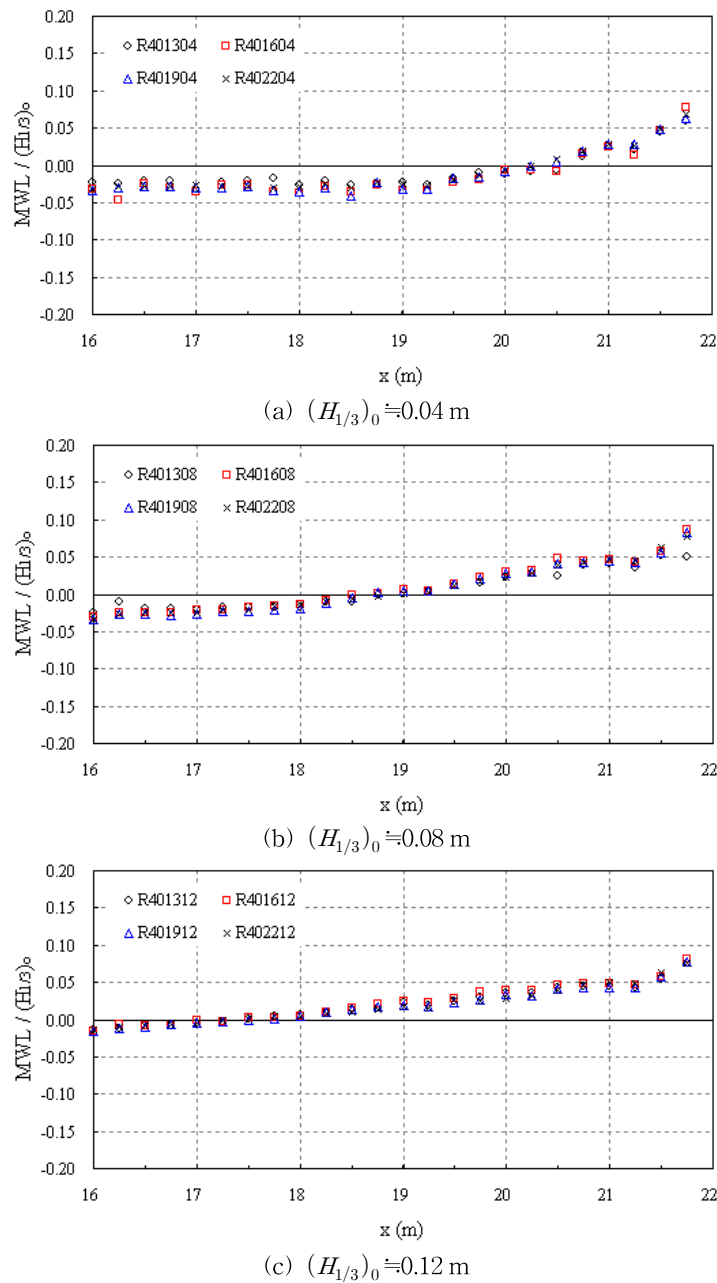


Fig. 6. Experimental Results of Mean Water Level for  $h_0=0.4\text{ m}$



있다. 수리실험결과로부터 최대 수위상승량은 입사파 유의 파고의 약 8%로 나타났으며, 파랑의 비선형성과 쇄파에 의한 wave set-down과 wave set-up이 잘 재현됨을 알 수 있다.

Figs. 7~9는  $h_0=0.45$  m인 조건에 대한 결과로서 전반적인 경향은  $h_0=0.4$  m인 경우와 유사하게 나타났다.  $h_0=0.45$  m인 경우는  $h_0=0.4$  m인 경우와는 달리 1/40의 일정 경사 후면( $x=22$  m 및  $x_1=0$  m 후면)에 일정수심  $h_1=0.05$  m가 있는 경우이다(Fig. 2).  $h_1=0.0$  m인 경우와는 달리  $h_1=0.05$  m인 경우는 쇄파 후 파고감쇠가 발생하다가 일정 수심으로 인해 쇄파의 강도가 약해지며, 일정거리 전파 후 거의 일정한 파고에 도달하는 것으로 나타났다. 또한 입사파의 파고가 증가할수록 보다 강한 쇄파로 인해 일정

수심상에서의 유의파봉고와 유의파곡고의 차이는 감소하는 것을 알 수 있다.  $h_0=0.45$  m인 실험조건에서  $(H_{1/3})_0 \approx 0.12$  m인 경우의 최대 수위상승량은 입사파 유의파고의 약 6%로 나타났다.

Figs. 10~12는  $h_0=0.5$  m인 조건에 대한 결과로서  $h_1=0.1$  m인 경우이다.  $h_0=0.45$  m인 조건에 비해 수심이 증가함으로 인해 쇄파강도는 감소하며, 일정수심구간에서도 쇄파가 강하게 발생되지 않음을 알 수 있다.  $h_0=0.5$  m인 실험조건에서  $(H_{1/3})_0 \approx 0.12$  m인 경우의 최대 수위상승량은 입사파 유의파고의 약 4~5%로 나타났다.  $h_0=0.45$  m 및  $h_0=0.5$  m인 조건, 즉 일정 경사면 후 일정수심이 존재하는 경우에도 Boussinesq 모형의 해석결과는 수리실험

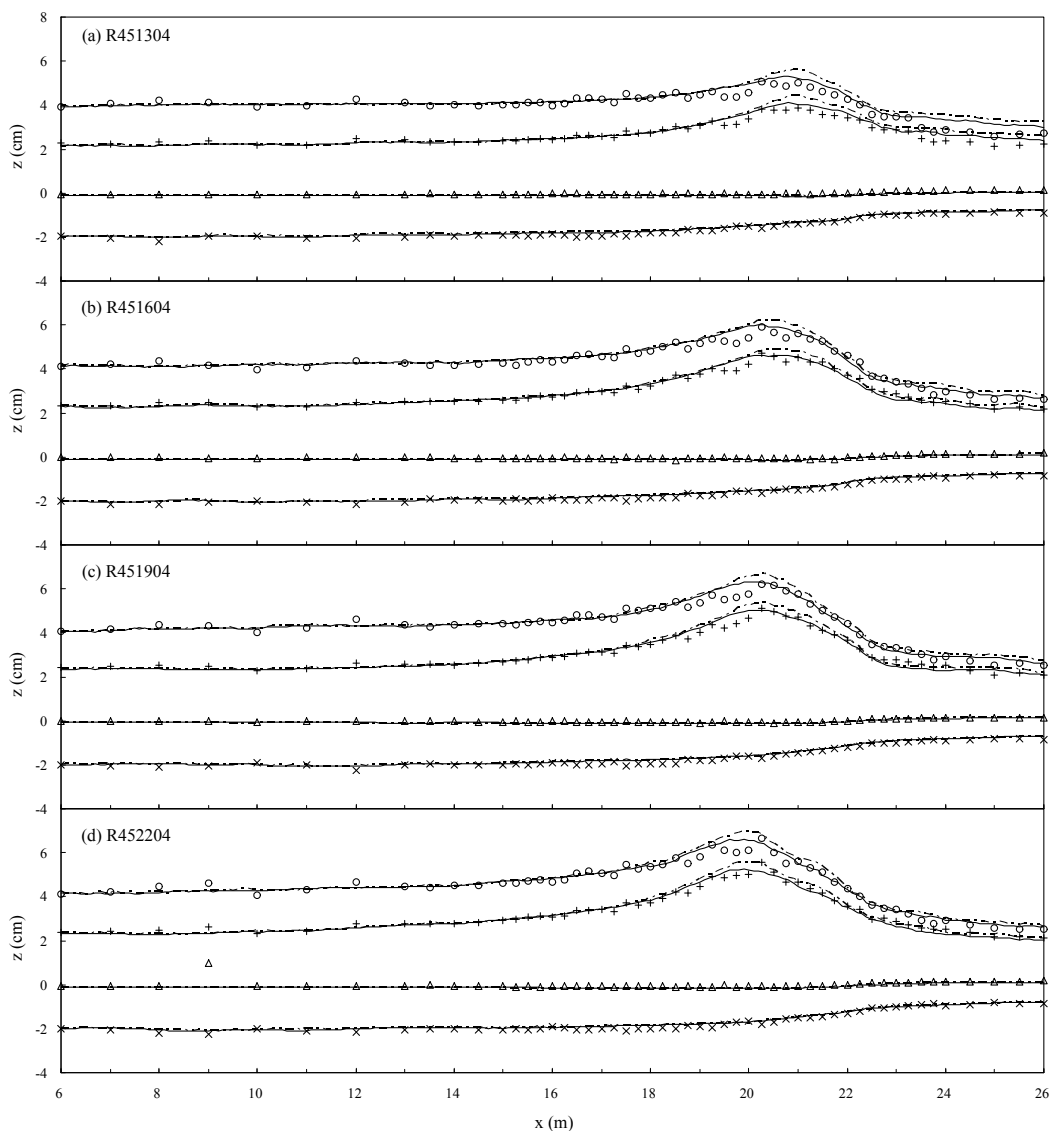


Fig. 7. Comparison of Experimental and Numerical Results for Irregular Wave Breaking (Case R451304, R451604, R451904, and R452204). Figure Setup Same as in Fig. 3

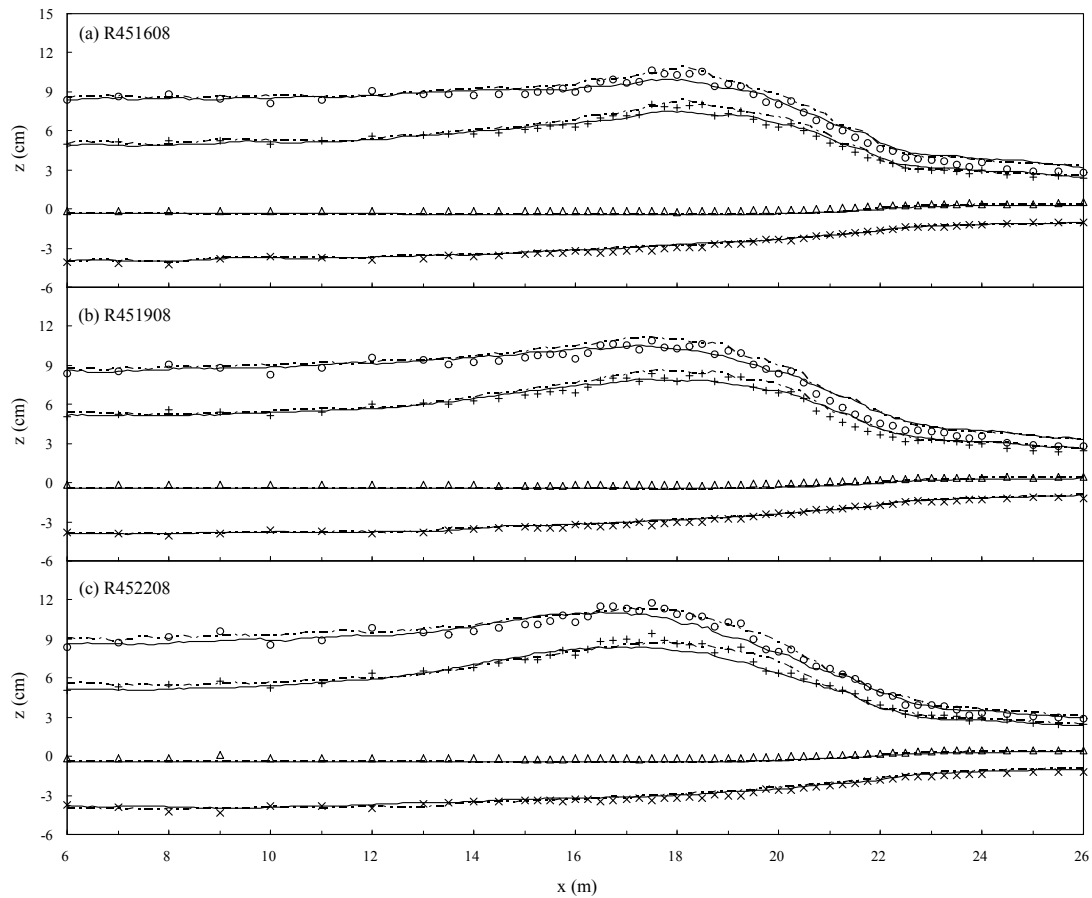


Fig. 8. Comparison of Experimental and Numerical Results for Irregular Wave Breaking (Case R451608, R451908, and R452208). Figure Setup Same as in Fig. 3

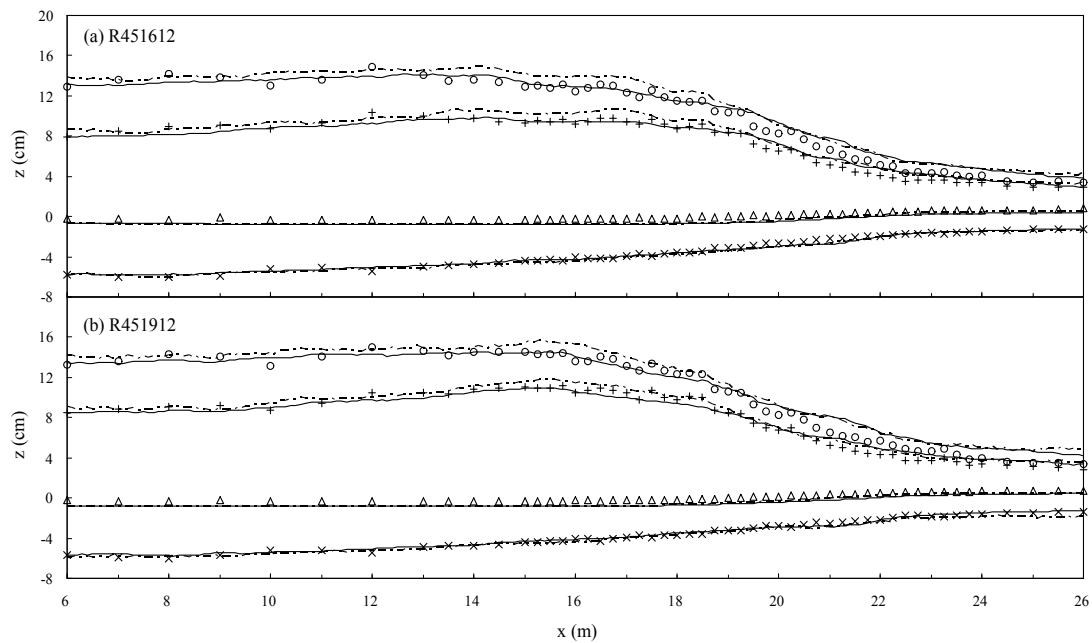


Fig. 9. Comparison of Experimental and Numerical Results for Irregular Wave Breaking (Case R451612 and R451912). Figure setup same as in Fig. 3

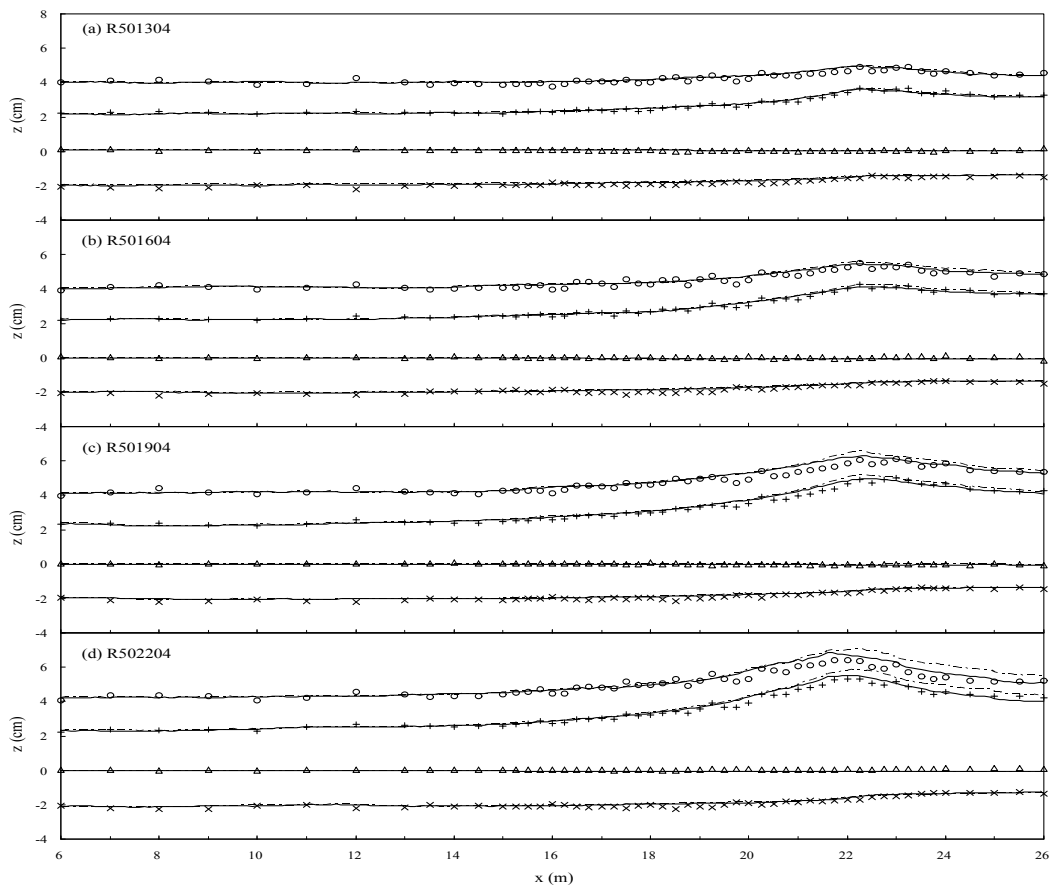


Fig. 10. Comparison of Experimental and Numerical Results for Irregular Wave Breaking (Case R501304, R501604, R501904, and R502204). Figure Setup Same as in Fig. 3

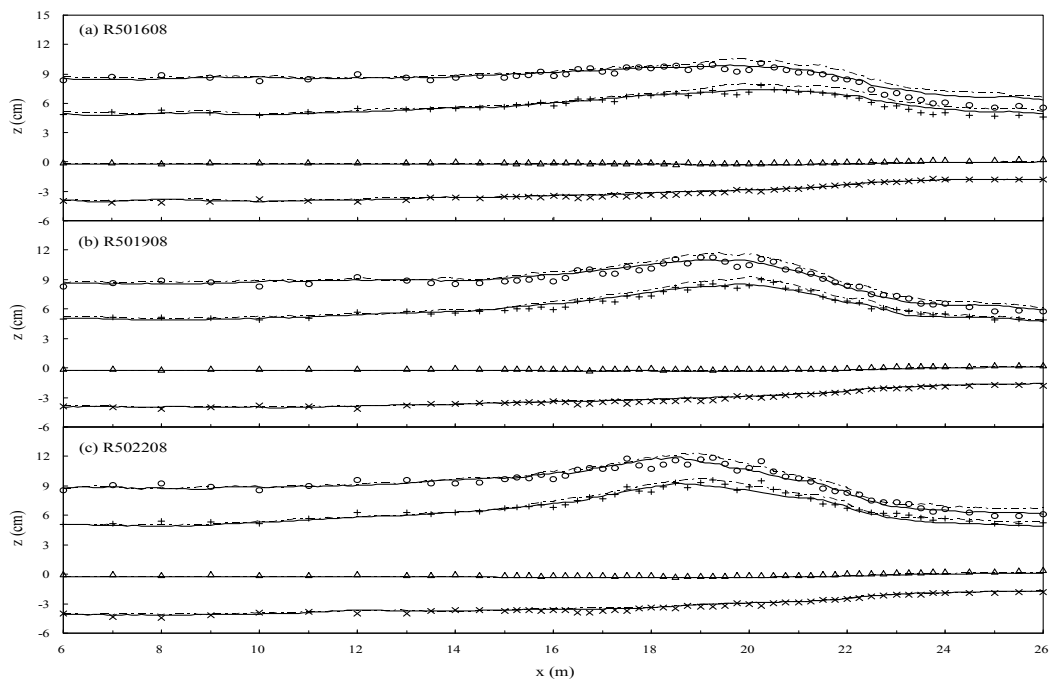


Fig. 11. Comparison of Experimental and Numerical Results for Irregular Wave Breaking (Case R501608, R501908, and R502208). Figure Setup Same as in Fig. 3

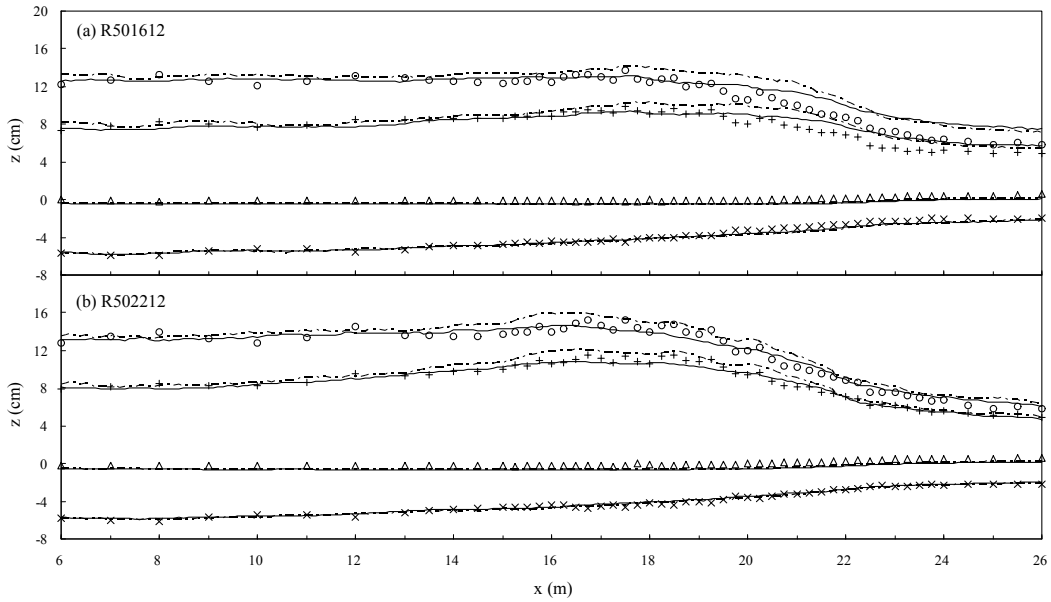


Fig. 12. Comparison of Experimental and Numerical Results for Irregular Wave Breaking (Case R501612 and R501912). Figure Setup Same as in Fig. 3

결과와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 1층 모형이 2층 모형에 비해 파고를 다소 크게 예측하지만 그 차이는 크지 않았다. 따라서 본 연구에서 사용된 Kennedy et al. (2000)의 쇄파에 의한 에너지감쇠식은 2차원 해석에 있어서는 타당하다고 할 수 있으며, 추후 3차원 조건에서의 에너지감쇠식에 대한 적용성 평가가 요구된다.

Horikawa and Kuo (1966)는 Fig. 2와 같은 shelf 지형을 대상으로  $x_1/h_1 \approx 20$ 까지 실험영역을 설정하고 규칙파를 적용한 수리실험을 통해 일정수심상에서의 쇄파 후 안정파고(stable wave height)를  $H/h_1 \approx 0.35$ 로 제안하였다. 본 연구의 선행 실험인 Lee et al. (2006)이 수행한 규칙파 실험결과로부터 안정파고를 산정해보면  $x_1/h_1 = 20$  위치에서  $H/h_1 \approx 0.35$ 로 분석되어 Horikawa and Kuo (1966)의 결과와 유사하게 나타났다. 그러나  $x_1/h_1 = 40$ 까지 실험영역을 설정한 Lee et al. (2006)의 실험결과로부터  $x_1/h_1 = 30$  이후에서 안정파고가  $H/h_1 \approx 0.3$ 에 수렴하는 것으로 분석되었다. Fig. 13은 일정수심상에서 불규칙파의 쇄파 후 안정파고를 분석한 결과이다. 안정파고는 계측된 유의파고( $H_{1/3}$ )와 일정수심상에서의 수심( $h_1$ )의 비로 도시하였으며,  $x_1$ 은 경사면이 끝나는 지점부터 전 파파방향으로의 거리이다(Fig. 2). Fig. 13(a)는 쇄파 후 안정파고 산정시 평균해면 상승량이 포함된 결과이고, Fig. 13(b)는 평균해면 상승량을 제외한 결과이다. 평균해면 상승량의 포함여부에 관계없이 안정파고에 도달하는 시점은  $x_1/h_1 \approx 30$ 로 나타났으며, 이는 규칙파의 경우와 동일한 위치이다.

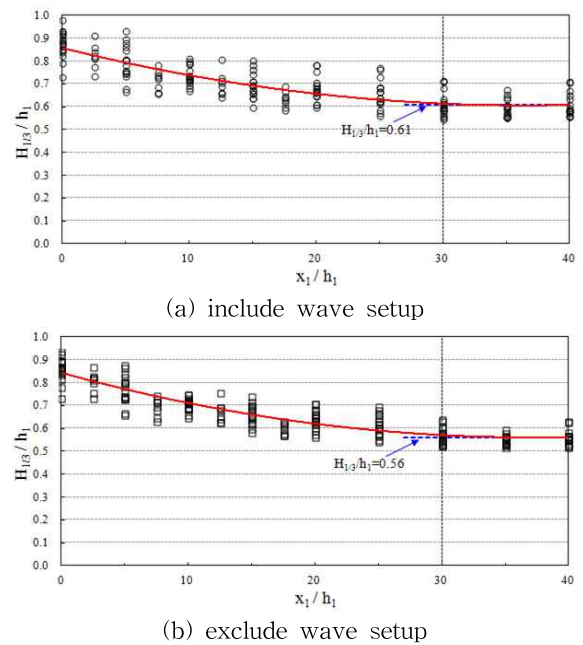


Fig. 13. Stable Wave Height over a Horizontal Bottom after Wave Breaking

쇄파 후 안정파고는 평균해면 상승량이 포함된 경우에  $H_{1/3}/h_1 \approx 0.61$ , 평균해면 상승량을 제외한 경우는  $H_{1/3}/h_1 \approx 0.56$ 에 수렴하는 것으로 나타남으로서 안정파고 도달위치에서의 평균해면 상승량은 수심의 약 5%로 분석되었다. 그리고 불규칙파의 안정파고는 규칙파에 비해 약 2배 정도 크게 나타나는 것을 확인하였다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 shelf 지형을 대상으로 주파수 스펙트럼을 고려한 불규칙파를 적용하여 쇄파변형에 대한 수리실험을 수행하고, 각각의 조건에 해당하는 실험결과를 이용하여 유의파고, 유의파봉고, 유의파곡고, 평균수위 및 안정파고를 분석하였다. 그리고 Boussinesq 모델을 적용하여 수치해석을 수행한 후 수리실험결과와 비교하여 수치모형의 적용성을 검토하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 불규칙파의 경우, 쇄파로 인해 파고가 급격히 감소하는 규칙파 조건과는 달리 파고감쇠가 상대적으로 매끄럽게 발생함을 알 수 있다. 이는 기존 쇄파조건식들에서 언급된 바와 같이 불규칙파의 경우에 부분쇄파가 발생하기 때문이며, Kennedy et al. (2000)의 에너지감쇠식은 2차원 쇄파변형을 적절히 모의함을 보였다.
- 2) Wei et al. (1995)이 제안한 Boussinesq 모형(1층 Boussinesq 모형) 및 2층 Boussinesq모형은 shelf 지형에서의 쇄파변형을 적절히 모의하였고, 파랑의 비선형성에 따른 현상도 잘 재현하는 것으로 나타났다. 본 실험조건 내에서 적용 모형에 따른 해석결과의 차이는 크지 않았으나, 수치해석 시 파랑의 비선형성이 클수록 2층 Boussinesq 모형이 1층 Boussinesq 모형에 비해 보다 안정적인 것으로 검토되었다.
- 3) 쇄파후 안정파고를 분석한 결과에 의하면, 규칙파의 경우에는  $H/h_1 \approx 0.3$ , 불규칙파의 경우에는  $H_{1/3}/h_1 \approx 0.56$ 으로 검토되었다. 여기서,  $h_1$ 은 수심이 일정한 구간의 수심이다.

본 연구에서 수행한 쇄파변형 실험자료는 여러 연구자에 의해 새로운 파랑전파모형이 개발될 때 쇄파현상 모의 및 파랑의 비선형성 재현정도 등에 대한 검증자료로 유용하게 활용되기를 기대한다.

## 감사의 글

본 논문은 2010년도 전남대학교 학술연구비(2010-1648)와 2011년도 한국연구재단의 지원(2011-0030844)을 받아 수행된 연구이며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

Agnon, Y., Madsen, P.A., and Schaffer, H. (1999). A new approach to high order Boussinesq models. *J. of Fluid*

*Mechanics*, Vol. 399, pp. 319-333.

Choi, J., Lim, C.H., Lee, J.I., and Yoon, S.B. (2009). Evolution of waves and currents over a submerged laboratory shoal. *Coastal Engineering*, Vol. 56, pp. 297-312.

Chun, I., Kim, G., and Sim, J., (2006). Application of Boussinesq model for the breaking wave behavior around underwater shoals. *J. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 18, No. 2, pp. 154-165. (in Korean).

Gobbi, M.F., Kirby, J.T., and Wei, G. (2000). A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. Part II. Extension to  $O(kh)^4$ . *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 405, pp. 182-210.

Horikawa, K., and Kuo, C.T. (1966). A study of wave transformation inside the surf zone. Proceedings of the 10th Coastal Engineering Conference, pp. 217-233.

Kennedy, A.B., Chen, Q., Kirby, J.T., and Dalrymple, R.A. (2000). Boussinesq modeling of wave transformation, breaking and runup. I: 1D. *J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, Vol. 126, No. 1, pp. 39-47.

Lee, J.I., Lynett, P., and Kim, Y.T. (2006). Hydraulic experiments and numerical analysis for wave breaking of regular waves over a shelf region. *J. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 18, No. 2, pp. 166-177. (in Korean).

Liu, P.L.-F. (1994) Model equations for wave propagation from deep to shallow water. *Advances in Coastal and Ocean Engineering*. P.L.-F. Liu ed., Vol. 1, World Scientific, pp. 125-157.

Lynett, P. (2002). *A multi-layer approach to modeling generation, propagation, and interaction of water waves*. Ph.D. Thesis, Cornell University, USA.

Lynett, P., and Liu, P.L.-F. (2004a) *A two-layer approach to water wave modeling*. *Proc. Royal Society of London A*, Vol. 460, pp. 2637-2669.

Lynett, P., and Liu, P.L.-F. (2004b) Linear analysis of the multi-Layer model. *Coastal Engineering*, Vol. 51, No. 6, pp. 439-454.

Madsen, P.A., Bingham, H.B., and Liu, H. (2002). A new Boussinesq model for fully nonlinear waves from shallow to deep water. *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 462,

pp. 1-30.

Madsen, P.A., and Sorensen, O.R. (1992). A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part II: A slowly varying bathymetry. *Coastal Engineering*, Vol. 18, pp. 183-204.

Nwogu, O. (1993). Alternative form of Boussinesq equations for nearshore wave propagation. *J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 119, No. 6, pp. 618-638.

Peregrine, D.H. (1967). Long waves on a beach. *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 27, pp. 815-827.

Wei, G., Kirby, J.T., Grilli, S.T., and Subramanya, R. (1995) A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves: Part I. Highly nonlinear unsteady waves. *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 294, pp. 71-92.

논문번호: 13-002	접수: 2013.01.07
수정일자: 2013.02.07/02.08	심사완료: 2013.02.08