

Shelf 지형에서 규칙파의 쇄파실험 및 수치해석 Hydraulic Experiments and Numerical Analysis for Wave Breaking of Regular Waves over a Shelf Region

이종인* · P. Lynett** · 김영택*
Jong In Lee*, Patrick Lynett** and Young Taek Kim*

요 지 : 본 연구에서는 Boussinesq 방정식을 지배방정식으로 한 기존의 강비선형 모형과 고차 모형(다층모형)의 정확도를 각각 검토하였으며, 사용된 다층모형은 Lynett과 Liu(2004a)에 의해 개발된 것이다. 수치모형으로 shelf 지형에서의 쇄파를 모의하였으며, 실험에 적용된 파랑의 비선형성($k_0 A_0$)은 0.029~0.180 범위이다. 전반적으로 2층 모형의 해석결과가 실험결과와 잘 일치하였다. 1층모형의 경우에는 쇄파점 가까운 곳에서부터 파고가 빨리 증폭이 된 반면, 2층모형의 파고증폭 정도는 수리실험결과와 잘 부합하였다.

핵심용어 : 수리모형실험, Boussinesq 방정식, 다층모형, 쇄파

Abstract : The accuracy impact of using high-order Boussinesq-type model as compared to the typical order model is examined in this paper. The multi-layer model developed by Lynett and Liu(2004a) is used for simulating of wave breaking over a shelf region. The nonlinearity of the waves tested, $k_0 A_0$, ranges from 0.029 to 0.180. The overall agreement between the two-layer model and the hydraulic experiments are quite good. The one-layer model overshoots the wave near the breakpoint, while the two-layer model shoals at a rate more consistent with the experimental data.

Keywords : hydraulic experiment, Boussinesq equations, multi-layer model, wave breaking

1. 서 론

현재까지 1차원 또는 2차원의 파랑의 전파변형을 해석하고자 하는 많은 Boussinesq형 방정식이 유도되고, 적용되어 왔다. 수심적분방정식은 연직방향의 유속장에 다항식 근사(polynomial approximation)를 적용하여 3차원 문제를 2차원 문제로 단순화한 것이다. Peregrine(1967)의 Boussinesq 방정식과 Wu(1981)의 일반화된 Boussinesq 방정식(generalized Boussinesq equations)은 연직방향 유속장에 2차 다항식근사를 적용한 것으로서 크게 두가지 문제점을 내포하고 있다. 첫 번째는 중간수심역(intermediate depth)에서 파랑의 전파에 대한 주기분산성(frequency dispersion)이 약하다는 것이고, 두 번째는 약비선형의 가정으로 인해 비선형성이 강한 경우에는 정도 높은 해석이 어렵다는 한계가 있었다. 이

러한 한계는 방정식 유도에 적용된 약비선형, 약분산성이라는 기본적인 가정에 기인한다. 즉, Peregrine(1967)과 Wu(1981)의 Boussinesq 방정식은 $O(\mu_0^2) = O(\epsilon_0) \ll 1$ 이라는 가정에서 유도된 것이다. 여기서, $\mu_0 = kh$, $\epsilon_0 = A/h$ 로서 k 는 파수, h 는 수심, A 는 파의 진폭이다. Madsen과 Sorensen(1992)은 분산항의 수정을 통해, Nwogu(1993)는 임의수심에서의 유속을 이용함으로써 기존 Boussinesq 방정식의 주기분산특성을 개선하였으며, 이들 방정식은 선형 분산식과 비교해 볼 때 중간수심역까지 분산특성이 개선된 것으로 나타났다. 또한, Liu(1994)와 Wei 등(1995)은 Nwogu(1993)의 방정식을 확장하여 중간수심역에도 적용이 가능하고, 강비선형($\epsilon_0 = O(1)$) 파랑의 전파를 해석할 수 있는 방정식으로 유도하였으며, 이 방정식들은 $kh \approx 3$ 까지 선형주기분산특성이 만족된다고 할 수 있다.

*한국건설기술연구원 수자원 연구부(Corresponding author: Jong In Lee, Water Resources Research Department, KICT, 2311 Daewha-Dong, Ilsan-Gu, Gyeonggi-Do 411-712, Korea. jilee@kict.re.kr)

**Department of Civil Engineering, Texas A&M University, USA

그리고 기존 방정식들이 2차 다항식근사를 적용한데 반해, 연직방향 유속장에 4차 또는 그 이상 차수의 다항식 근사를 적용함으로써 심해역까지 적용이 가능한 여러 고차(high-order) Boussinesq방정식들이 유도되었다. Gobbi 등(2000)은 4차 다항식을 사용하여 고차 Boussinesq방정식을 유도하였으며, $kh \approx 6$ 까지 선형주기분산특성이 개선됨을 보였다. 이 이외에도 Agnon 등(1999)과 Madsen 등(2002)의 연구가 있다.

Lynett과 Liu(2004a,b)는 다른 접근방법을 통해 고차 Boussinesq방정식을 유도하였다. Lynett과 Liu는 연직방향 유속장에 고차 다항식근사를 적용하는 대신 연직방향의 수피를 N 개의 층(N layers)으로 분할한 후, 각각의 층에 2차 다항식근사를 적용하고, 각 층을 접합시키는 방법을 적용하였으며, 이를 다층(multi-layer)모형이라 하였다. 이러한 접근을 통해 고차 다항식근사의 적용으로 인한 고차 공간 미분항이 없는 방정식을 유도하였다. Hsiao 등(2005)은 N 층모형을 이용하여 일정수심상의 심해역에서 파랑의 전파변형을 모의하여 수리실험과 비교하였으며, $kA=0.0627\sim 0.1577$ 까지 수리실험결과와 잘 일치함을 보였다.

본 연구에서는 Lynett과 Liu(2004a,b)에 의해 유도된 N 층 Boussinesq방정식의 적용성을 검증하기 위해 shelf 지형에서 규칙파에 대한 쇄파 수리모형실험과 수치해석을 수행하여 그 결과를 비교하였으며, 해석은 수심, 입사파의 주기 및 파고조건을 달리하며 수행하였다. 그리고 본 연구에서 수행한 수리모형실험 자료는 향후 여러 연구자들에 의

해 개발되는 수치모형의 검증자료로 유용하게 활용 될 수 있을 것이다.

2. 수치모형

2.1 N 층모형(다층모형)의 지배방정식

N 층모형의 Boussinesq방정식에 대한 자세한 유도과정은 Lynett과 Liu(2004b)에 기술되어 있으므로 본 논문에서는 N 층모형의 변수정의와 결과식에 대해 간략히 소개하고자 한다.

Fig. 1에서 $\zeta'(x', y', t')$ 은 수심 $h'(x', y')$ 상을 전파하는 파랑의 자유수면변위이고, 층(layer)간 경계는 $\eta'_n(x', y', t')$ 으로 주어지며, N 개의 층에서 최상층과 최하층의 경계는 각각 $\eta'_0 = \zeta'$ 과 $\eta'_N = -h'$ 으로 주어진다. 이 외 층의 경계는 $\eta'_n = \alpha_n h' + \beta_n \zeta'$ 으로 주어지며, 여기서 α_n 과 β_n 은 임의의 상수이다. d_n 은 각 층의 특성두께(characteristic thickness), h_0 는 특성수심, $l_0 = 1/k$ 는 파랑의 특성길이, $l_0/\sqrt{gh_0}$ 는 특성시간이고, a_0 는 특성진폭이다. 지배방정식을 유도하기 위해 다음과 같은 무차원변수를 도입한다.

$$\begin{aligned} (x, y) &= (x', y')/l_0, \quad z_n = z'/d_n, \quad t = \sqrt{gh_0}t'/l_0, \\ p_n &= p_n'/\rho g a_0, \quad h = h'/h_0, \quad \zeta = \zeta'/a_0, \quad \eta_n = \eta'_n/b_n \\ (U_n, V_n) &= (U'_n, V'_n)/(\varepsilon_0 \mu_0 \sqrt{gh_0}), \quad W_n = W'_n/(\varepsilon_0 \mu_0 \sqrt{gh_0}) \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)에서 하첨자 n 은 각각의 층을 나타내는 지표이며,

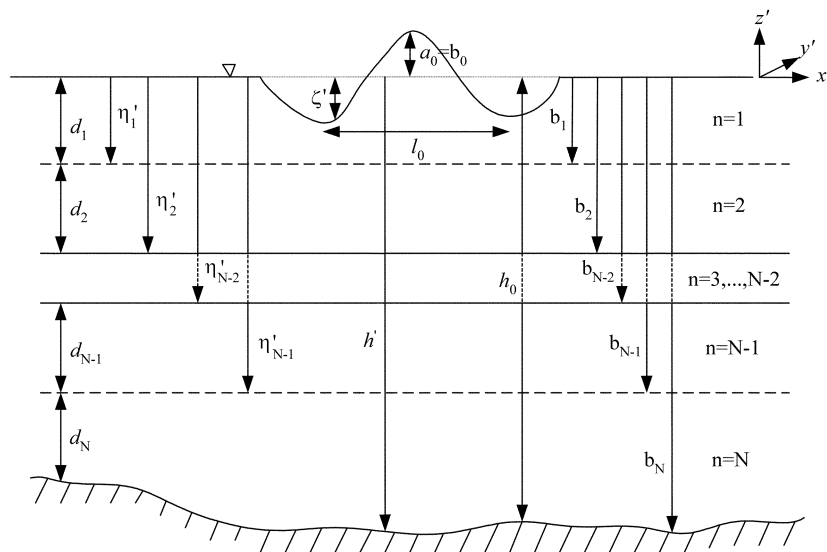


Fig. 1. N -layer problem setup.

$b_0 = a_0$, $b_n = \sum_{m=1}^n d_m$ 이고, $n=1 \sim N$ 이다. 그리고 (U_n, V_n) 은 각각의 층에서의 수평방향 유속성분, W_n 은 연직방향 유속성분이고, p_n 은 압력, ρ 는 유체의 밀도, g 는 중력가속도이다. 식 (1)에서 도입된 무차원변수 ε_0 와 μ_0 는 식 (2)와 같다.

$$\varepsilon_0 = a_0/h_0, \mu_0 = h_0/l_0$$

식 (2)에서 $l_0 = 1/k$ 이므로 $\mu_0 = kh_0$ 이다.

본 연구에서 사용한 N 층모형의 지배방정식은 연속방정식과 Euler방정식을 적분한 후, 적절한 경계조건을 적용하면, 결과식으로서 연속방정식 (3), 운동방정식 (4)와 접합방정식(matching equation) (5)를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \nabla \cdot \sum_{n=1}^N \left(\frac{b_{n-1}}{h_0} \eta_{n-1} - \frac{b_n}{h_0} \eta_n \right) \mathbf{u}_n \\ & - \nabla \cdot \sum_{n=1}^N \mu_n^2 \frac{d_n}{h_0} \\ & \left[\frac{\left(\frac{b_{n-1}}{d_n} \eta_{n-1} \right)^3 - \left(\frac{b_n}{d_n} \eta_n \right)^3}{6} - \frac{\left(\frac{b_{n-1}}{d_n} \eta_{n-1} - \frac{b_n}{d_n} \eta_n \right) z_n^2}{2} \right] \nabla S_n \\ & - \nabla \cdot \sum_{n=1}^N \mu_n^2 \frac{d_n}{h_0} \\ & \left[\frac{\left(\frac{b_{n-1}}{d_n} \eta_{n-1} \right)^2 - \left(\frac{b_n}{d_n} \eta_n \right)^2}{2} - \left(\frac{b_{n-1}}{d_n} \eta_{n-1} - \frac{b_n}{d_n} \eta_n \right) z_n \right] \nabla T_n = O(\mu_n^4) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \mathbf{u}_1}{\partial t} + \varepsilon_0 \mathbf{u}_1 \cdot \nabla \mathbf{u}_1 + \nabla \zeta + \mu_1^2 \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{k_1^2}{2} \nabla S_1 + k_1 \nabla T_1 \right) \\ & + \varepsilon_0 \mu_1^2 \left[(\mathbf{u}_1 \cdot \nabla k_1) \nabla T_1 + k_1 \nabla (\mathbf{u}_1 \cdot \nabla T_1) + k_1 (\mathbf{u}_1 \cdot \nabla k_1) \nabla S_1 \right. \\ & \quad \left. + \frac{k_1}{2} \nabla (\mathbf{u}_1 \cdot \nabla S_1) \right] \\ & + \varepsilon_0 \mu_0^2 \left[T_1 \nabla T_1 - \nabla \left(\zeta \frac{\partial T_1}{\partial t} \right) \right] \\ & + \varepsilon_0^2 \mu_0^2 \nabla \left(\zeta S_1 T_1 - \frac{h_0}{d_1} \frac{\zeta^2}{2} \frac{\partial S_1}{\partial t} - \zeta \mathbf{u}_1 \cdot \nabla T_1 \right) \\ & + \varepsilon_0^2 \varepsilon_1 \mu_0^2 \nabla \left[\frac{\zeta^2}{2} \left(S_1^2 - \frac{h_0}{d_1} \mathbf{u}_1 \cdot \nabla S_1 \right) \right] - \mathbf{R}_b - \mathbf{R}_f = O(\mu_0^2 \mu_1^2) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \mathbf{u}_n + \mu_n^2 \left[\frac{k_n^2 - \left(\frac{b_{n-1}}{d_n} \eta_{n-1} \right)^2}{2} \nabla S_n + \left(k_n - \frac{b_{n-1}}{d_n} \eta_{n-1} \right) \nabla T_n \right] \\ & = \mathbf{u}_{n-1} + \mu_{n-1}^2 \\ & \left[\frac{k_{n-1}^2 - \left(\frac{b_{n-1}}{d_{n-1}} \eta_{n-1} \right)^2}{2} \nabla S_{n-1} + \left(k_{n-1} - \frac{b_{n-1}}{d_{n-1}} \eta_{n-1} \right) \nabla T_{n-1} \right] \\ & + O(\mu_{n-1}^4, \mu_n^4) \end{aligned} \quad (5)$$

식 (3)~식(5)에서 S_n 과 T_n 은 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} S_n &= \frac{d_n}{h_0} \nabla \cdot \mathbf{u}_n \\ T_n &= \sum_{m=n}^N \eta_m \left(\frac{b_m}{d_{m+1}} S_{m+1} - \frac{b_m}{d_m} S_m \right) + \nabla \cdot (h \mathbf{u}_N) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, $\mathbf{u}_n(x, y, k_n(x, y, t), t)$ 은 $z = k_n(x, y, t)$ 에서 정의되는 수평유속이다. 본 지배방정식은 연속방정식, 운동방정식 및 접합방정식으로 구성되며, 연속방정식은 ζ 운동방정식은 \mathbf{u}_1 을 산정하는데 이용되고, $\mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_N$ 은 접합방정식을 이용하여 구하게 된다.

본 연구에서는 규칙파의 쇄파실험결과와 비교하기 위해 1층(one-layer)모형과 2층(two-layer)모형을 이용하였다. 1층모형, 즉 $N=1$ 인 경우에는 Wei와 Kirby(1995) 및 Hsiao와 Liu(2002)에 의해 유도된 강비선형 Boussinesq방정식과 동일하다. $N=2$ 인 경우, 즉 2층모형에 대한 자세한 유도과정 및 지배방정식은 Lynett(2002) 및 Lynett과 Liu(2004a)를 참조할 수 있으며, 1층모형 및 2층모형의 지배방정식은 지면관계상 생략하였으며, 후속 논문에서 기술하고자 한다.

N 층모형의 선형분산특성을 살펴보면 1층모형의 경우에는 Wei와 Kirby(1995)의 방정식과 동일하고, 2층모형의 경우에는 $kh \approx 8$, 3층모형의 경우에는 $kh \approx 15$, 4층모형의 경우에는 $kh \approx 25$ 까지 정확한 것으로 나타났다(Lynett과 Liu, 2004b).

2.2 수치기법 및 영역내조파

지배방정식에서 시간미분항은 음해법의 4차 예측자-수정자법(fourth-order predictor-corrector method)을 적용하였으며, 공간미분항은 4차의 정확도를 갖는 유한차분기법을 이용하였다. 본 연구에서 사용한 수치기법은 Wei와

Kirby(1995)의 모형에 기초하였으며, 수렴성검토 등과 같은 자세한 사항은 Lynett과 Liu(2004a)를 참조할 수 있다. 또한, 개방경계조건의 설정을 위해 해석영역 양단에 흡수층(sponge layer)을 설치하였으며, 흡수층의 두께는 입사파 파장의 1.5배가 되도록 하였다.

해석영역내에서 발생한 반사파를 조파경계에서 재반사시키지 않고, 복잡하고 비선형인 지배방정식을 가지는 수치모형에도 정도 높게 파랑을 재현하는 영역내조파기법을 이용하여 입사파를 재현하였다. Boussinesq방정식을 이용한 기존 수치모형에서 영역내조파기법은 크게 두가지 방법이 적용되어 왔다. 첫 번째는 연속방정식 또는 운동방정식에 질량 또는 에너지 생성항(source term)을 첨가하는 것으로서 이 생성항은 지배방정식의 일부가 된다. 이 방법을 본 지배방정식에 적용할 경우에 생성항을 유도하는데 요구되는 수학적해석이 복잡하며, 특히 층(layer)의 수가 증가할수록 수학적해석이 상당히 어려워지는 문제점이 있다. 두 번째는 영역내에서 매 계산시간마다 계산되는 자유수면 ζ 에 추가질량 ζ^* 를 공간적으로 더해주는 기법으로 보다 자세한 내용은 Lee 등(2001)을 참조할 수 있다. 이 방법은 지배방정식을 수정하지 않고, 쉽게 적용할 수 있는 장점이 있다. Lee 등(2001)은 교호격자(staggered grid)상에서 선조파(line source)개념을 사용하였으나, Wei 등(1999)은 교호격자상에서 선조파개념은 정도가 낮음을 지적하고, 유한한 폭을 가지는 면조파개념을 도입하였다. 면조파개념에서 영역내조파의 조파폭은 1파장 정도가 적절한 것으로 추천되었으며, 본 수치모형에서는 Wei 등(1999)의 개념을 적용하였다.

수치모형의 계산시간을 비교해보면, 동일영역에서 2층모형이 1층모형에 비해 약 1.75배 정도의 계산시간이 요구된다. 이는 2층모형의 경우에 미지수가 더 많고, 하나의 계산단계에서 미지수가 수렴되는데 요구되는 반복회수가 1층모형보다 1~1.25배 더 많기 때문이다.

2.3 바닥마찰 및 쇄파조건식

식 (4)에서 R_f 와 R_b 는 각각 바닥마찰 및 쇄파에 의한 에너지감쇠항이며, 바닥마찰에 의한 에너지감쇠 R_f 는 다음과 같은 식으로 고려하였다.

$$R_f = \frac{f}{h + \zeta} \mathbf{u}_b \cdot \mathbf{u}_b \quad (7)$$

여기서, \mathbf{u}_b 는 해저면에서의 유속이고, f 는 바닥마찰계수로서 일반적으로 10^{-3} 에서 10^{-2} 의 값을 가진다. Lynett 등

(2002)에 의하면 f 는 파의 초오름 등의 해석에 영향을 크게 미치는 것으로 분석되었으며, 본 연구에서는 수치해석시 일률적으로 $f = 10^{-3}$ 을 적용하였다.

쇄파에 의한 에너지감쇠는 Kennedy 등(2000)이 제안한 식으로 고려하였으며, 운동방정식 (4)에 포함된 $R_b = R_{bx}i + R_{by}j$ 는 식 (8)과 같다.

$$R_{bx} = \frac{1}{H} \left\{ [v(Hu_1)_x]_x + \frac{1}{2} [v(Hu_1)_y + v(Hv_1)_x]_y \right\}$$

$$R_{by} = \frac{1}{H} \left\{ [v(Hv_1)_y]_y + \frac{1}{2} [v(Hu_1)_y + v(Hv_1)_x]_x \right\} \quad (8)$$

식 (8)에서 B 는 전수심(total water depth), v 는 와점성계수(eddy viscosity)이며, 와점성계수는 식 (9)와 같다.

$$v = BH\zeta_i \quad (10)$$

식 (9)에서 B 는 쇄파와 비쇄파 상태를 매끄럽게 연결시켜주는 변수로서 다음과 같이 정의된다.

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

여기서, δ 는 증폭계수(amplification factor)이고, ζ_i^b 는 쇄파의 진행 및 정지를 판단하는 변수로서 다음과 같이 정의된다.

$$\zeta_i^b = \begin{cases} \zeta_i^{(f)}, & t - t_0 \geq T^b \\ \zeta_i^{(l)} + \frac{t - t_0}{T^b} (\zeta_i^{(f)} - \zeta_i^{(l)}), & 0 \leq t - t_0 < T^b \end{cases} \quad (11)$$

식 (11)에서 t_0 는 쇄파가 시작되는 시간이다. 그리고 식 (10)과 식 (11)에서 사용된 변수중 $\delta = 6.5$, $\zeta_i^{(l)} = 0.65\sqrt{gH}$, $\zeta_i^{(f)} = 0.08\sqrt{gH}$, $T^b = 8.0\sqrt{H/g}$ 이다(Lynett, 2002).

3. 수리모형실험

쇄파실험은 길이 56 m, 폭 1 m, 높이 2 m의 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 0.4 m로 일정하며, 주요 계측구간은 $x = 6$ m ~ $x = 26$ m

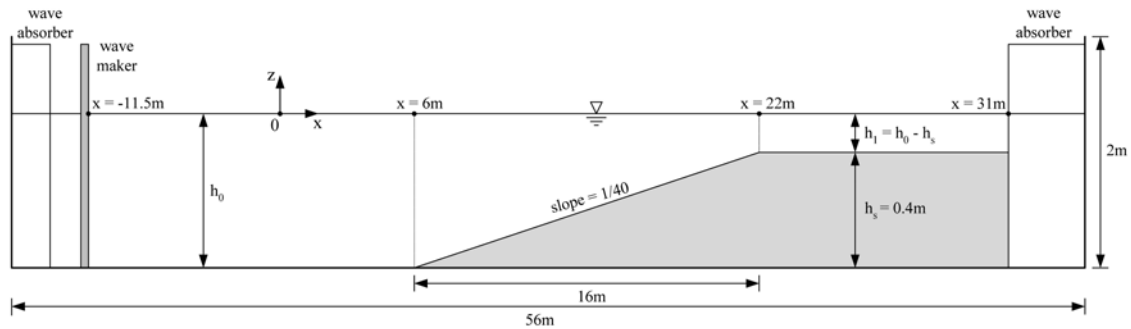


Fig. 2. Definition sketch of wave breaking test.

이다. 수면자료의 계측을 위해 쇄파가 발생하지 않는 구간에는 1 m 또는 0.5 m 간격, 쇄파가 발생하는 주변 구간에는 0.25 m 간격으로 계측점을 배치하였다. Fig. 2에서 h_0 는 조파기 전면 수심이며, $h_1 (= h_0 - h_s)$ 은 shelf 상단의 수심이다. 본 실험에서는 $h_0 = 0.40$ m와 0.45 m를 적용하였기 때문에 이에 해당하는 h_1 은 각각 0.00 m와 0.05 m이다.

본 실험은 규칙파를 대상으로 수심, 입사파의 주기 및 파고를 달리하며 수행되었으며, 실험에 적용된 입사파 조

건을 요약한 것이 Table 1이다. Table 1에서 T_0 는 입사파의 주기, A_0 는 입사파의 진폭, k_0 는 파수이다. 하첨자 0는 조파기 전면 수심에서의 입사파 조건을 의미하며, 입사파는 $x = 0$ m 위치에서 설정하였다. 적용된 실험파의 주기는 1.3 sec~2.2 sec 범위에서 0.3 sec 간격으로 설정하였으며, 입사파고는 약 0.04 m, 0.08 m 및 0.12 m가 되도록 하였다. 각각의 조건에 해당하는 실험파는 175 sec 동안 조파하여 수면자료를 계측하였으며, 파고 등 제반자료는 60.05 sec~

Table 1. Input wave conditions for breaking tests of regular wave

Case	T_0 (sec)	A_0/h_0	$k_0 A_0$	$k_0 h_0$	h_0 (m)	h_1 (m)
M401304	1.30	0.050	0.058	1.160	0.40	0.00
M401604	1.60	0.051	0.046	0.886		
M401904	1.90	0.051	0.037	0.722		
M402204	2.20	0.050	0.031	0.611		
M401308	1.30	0.103	0.120	1.160	0.40	0.00
M401608	1.60	0.098	0.087	0.886		
M401908	1.90	0.095	0.068	0.722		
M402208	2.20	0.095	0.058	0.611		
M401312	1.30	0.155	0.180	1.160	0.40	0.00
M401612	1.60	0.149	0.132	0.886		
M401912	1.90	0.151	0.109	0.722		
M402212	2.20	0.148	0.090	0.611		
M451304	1.30	0.045	0.057	1.260	0.45	0.05
M451604	1.60	0.045	0.043	0.954		
M451904	1.90	0.044	0.034	0.774		
M452204	2.20	0.044	0.029	0.653		
M451308	1.30	0.090	0.113	1.260	0.45	0.05
M451608	1.60	0.084	0.080	0.954		
M451908	1.90	0.086	0.067	0.774		
M452208	2.20	0.083	0.054	0.653		
M451312	1.30	0.133	0.168	1.260	0.45	0.05
M451612	1.60	0.134	0.128	0.954		
M451912	1.90	0.135	0.104	0.774		
M452212	2.20	0.128	0.084	0.653		

162.40 sec 동안의 자료를 이용하여 분석하였다. 또한 실험 결과의 정도를 높이기 위해 동일조건 실험을 3회 이상 반복하여 수행하였다.

그리고 수치해석에서는 격자간격 $\Delta x = \lambda_0/50$ 을 적용하고, 계산시간 및 분석시간 등은 수리모형실험과 동일한 조건에서 해석하여 수리실험결과와 비교하였다. 여기서, λ_0 는 수심 h_0 에 대응하는 입사파의 파장이다.

4. 결과분석 및 검토

본 연구에서는 고차 Boussinesq 방정식을 이용한 수치모형의 정확도를 검증하기 위해 shelf 지형에 대해 규칙파를 입사파로 한 쇄파 수리모형실험을 수행하고, 그 결과를 수치해석결과와 비교하였다. 수리실험은 수심 3개 조건, 입사파고 3개 조건과 입사파 주기 4개 조건을 조합하여 총

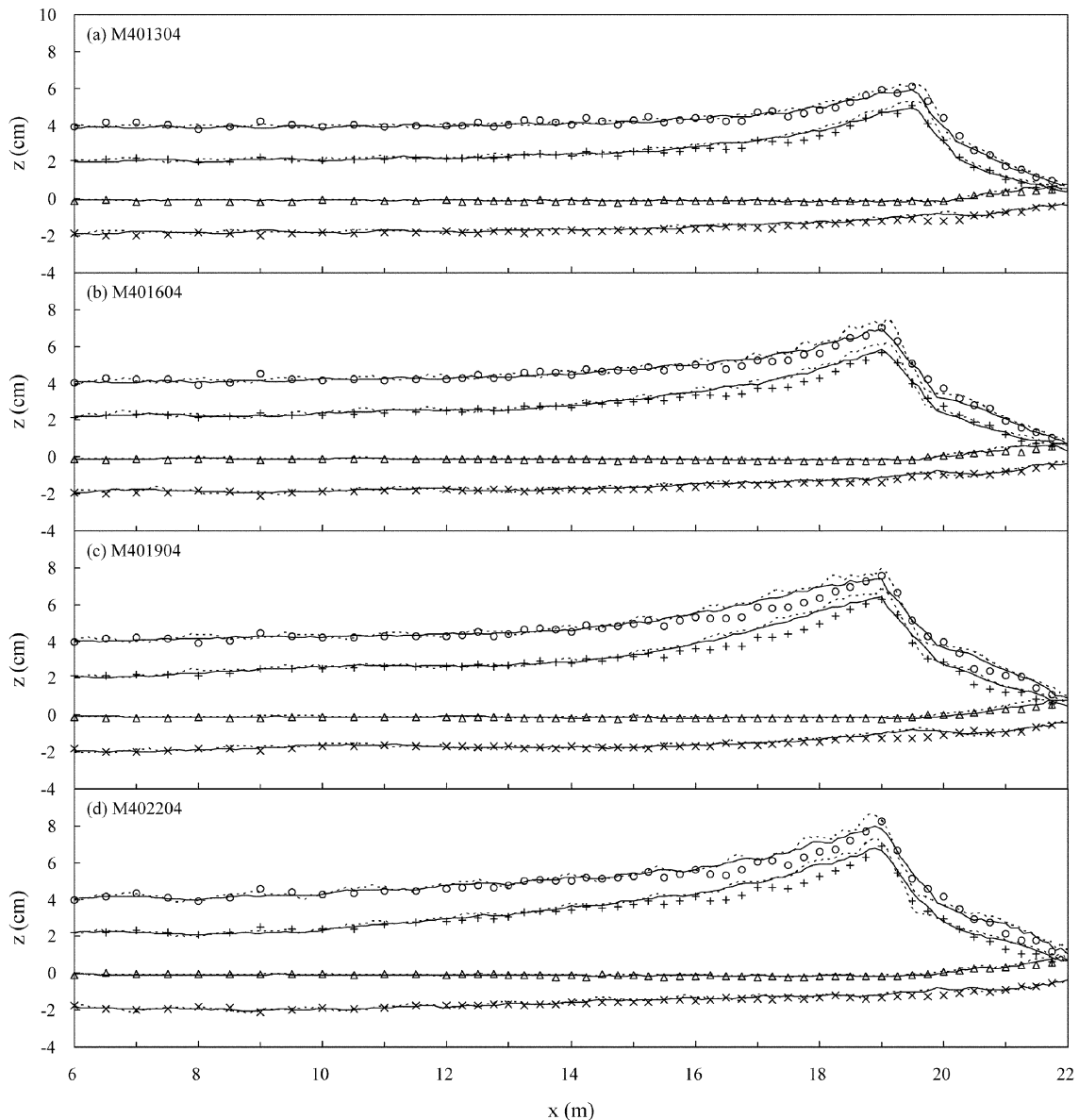


Fig. 3. Comparison of experimental and numerical results for regular wave breaking (Case M401304, M401604, M401904, and M402204). The symbols are the experimental data (○: wave height, +: crest level, ×: trough level, △: mean water level), the dashed line is the one-layer model, and the solid line is the two-layer model results.

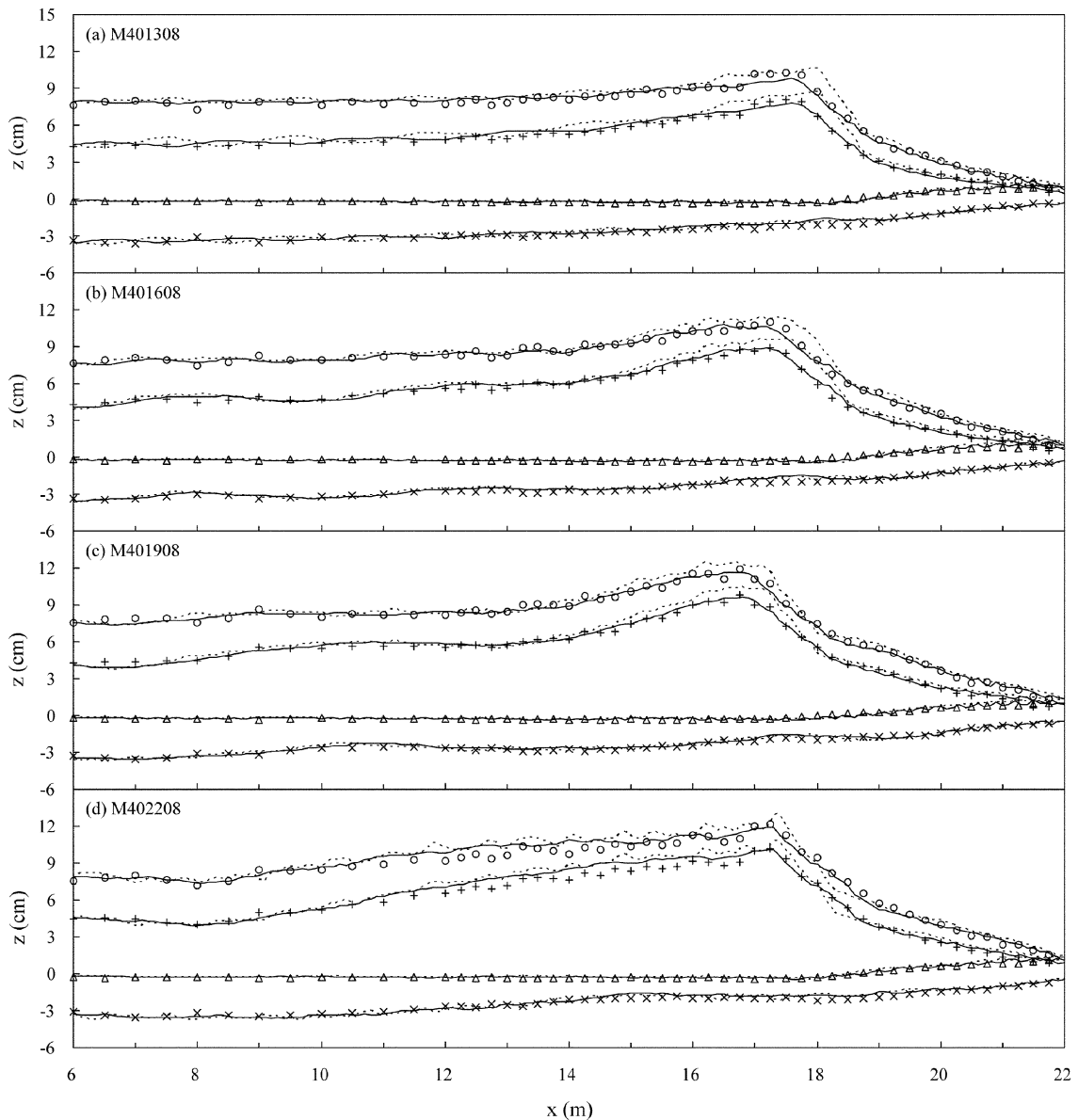


Fig. 4. Comparison of experimental and numerical results for regular wave breaking (Case M401308, M401608, M401908, and M402208). Figure setup same as in Fig. 3.

32개 경우에 대해 수행하였으나, 본 논문에서는 24개 조건에 대한 실험결과와 해석결과를 수록하였다. 수치해석에 적용된 입사파조건은 $k_0 A_0 = 0.029 \sim 0.180$, $k_0 h_0 = 0.611 \sim 1.260$ 이고, 수치해석은 1층모형(기존 강비선형 Boussinesq모형)과 2층모형(다층모형에서 =2인 모형)을 사용하였다. 수치실험 및 수치해석으로부터 도출된 자유수면자료를 이용하여 파고, 파봉높이, 파곡높이 및 평균수위를 산정하여 각각 비

교하였다.

Fig. 3~Fig. 5는 $h_0 = 0.40$ m ($h_1 = 0.0$ m)인 경우에 대한 결과를 입사파 주기별로 각각 도시한 것이다. Fig. 3은 입사파의 비선형성($k_0 A_0$)이 상대적으로 작은 경우로서 각각 $k_0 A_0 = 0.058$, 0.046, 0.037 및 0.031 조건의 수치실험 및 수치해석 결과를 비교한 것이다. 1층모형의 경우가 2층모형에 의한 결과보다 파고가 약간 크게 예측되었으나, 수치

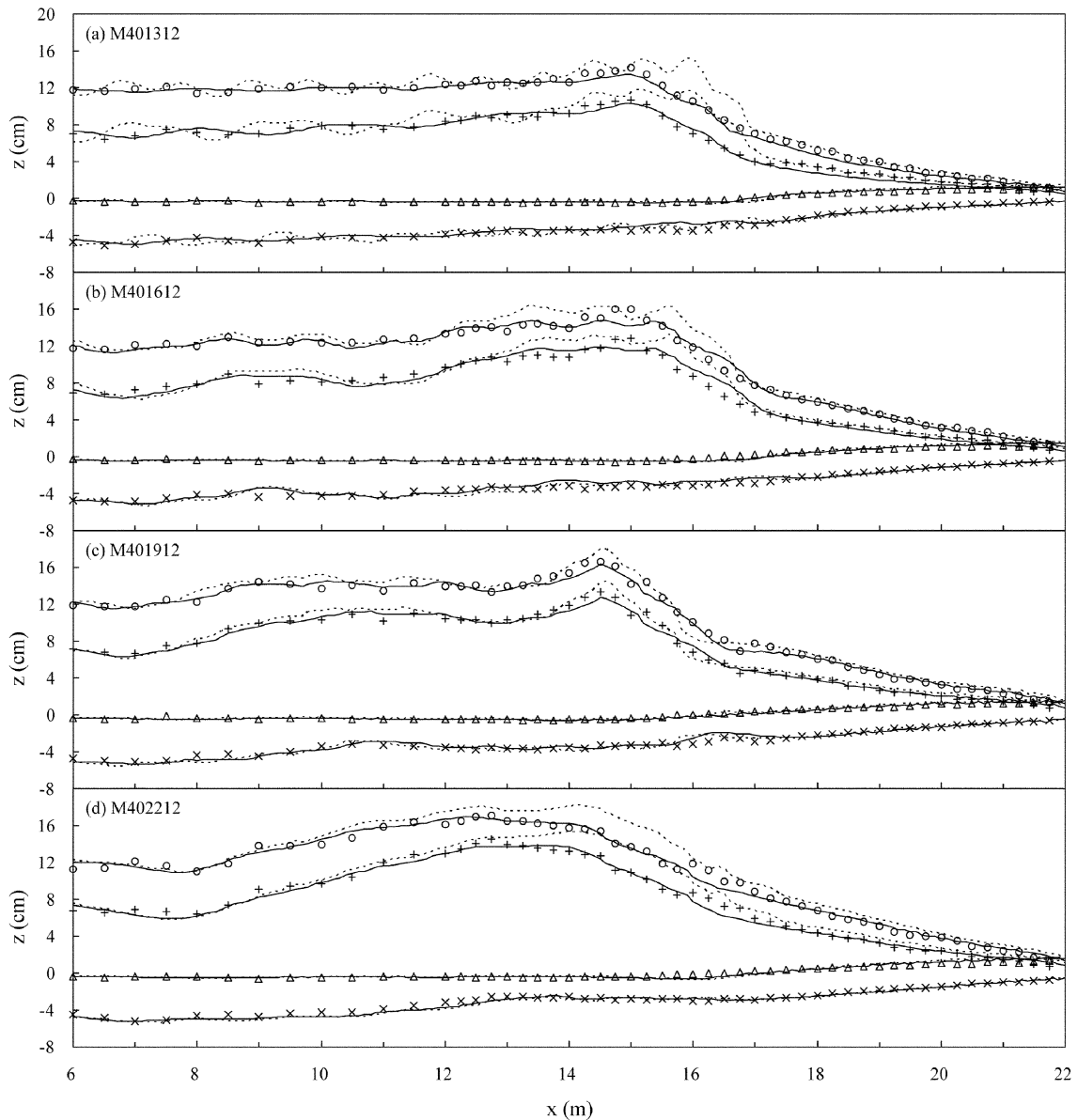


Fig. 5. Comparison of experimental and numerical results for regular wave breaking (Case M401312, M401612, M401912, and M402212). Figure setup same as in Fig. 3.

해석결과와 수리실험결과가 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 또한 파랑의 쇄파로 인한 평균수위 상승도 잘 재현됨을 알 수 있다. 전반적으로 쇄파대를 중심으로 수치해석의 파고가 수리실험의 파고보다 약간 크게 나타났으며, 파봉고(crest level)는 약간 높게, 파곡고(trough level)는 약간 낮게 해석되었다. 이는 수치모형에 의한 파랑의 비선형성이 수리실험시보다 약간 더 강하게 작용했기 때문으로 생

각된다. Fig. 4와 Fig. 5는 Fig. 3의 경우에 비해 입사파의 비선형성이 증가한 경우로서 전반적인 해석결과는 Fig. 3과 유사하게 나타났다. 그리고 동일한 입사파고 조건에서 주기가 길어질수록 쇄파지점에서의 쇄파파고는 크게 나타났다. 1층모형의 경우, 파랑의 비선형성이 증가하게 되면 실험결과보다 파고가 일찍 증폭되는 양상이 나타났으며, 이는 Kennedy 등(2000)의 연구에서 지적한 바와 같다. 전체

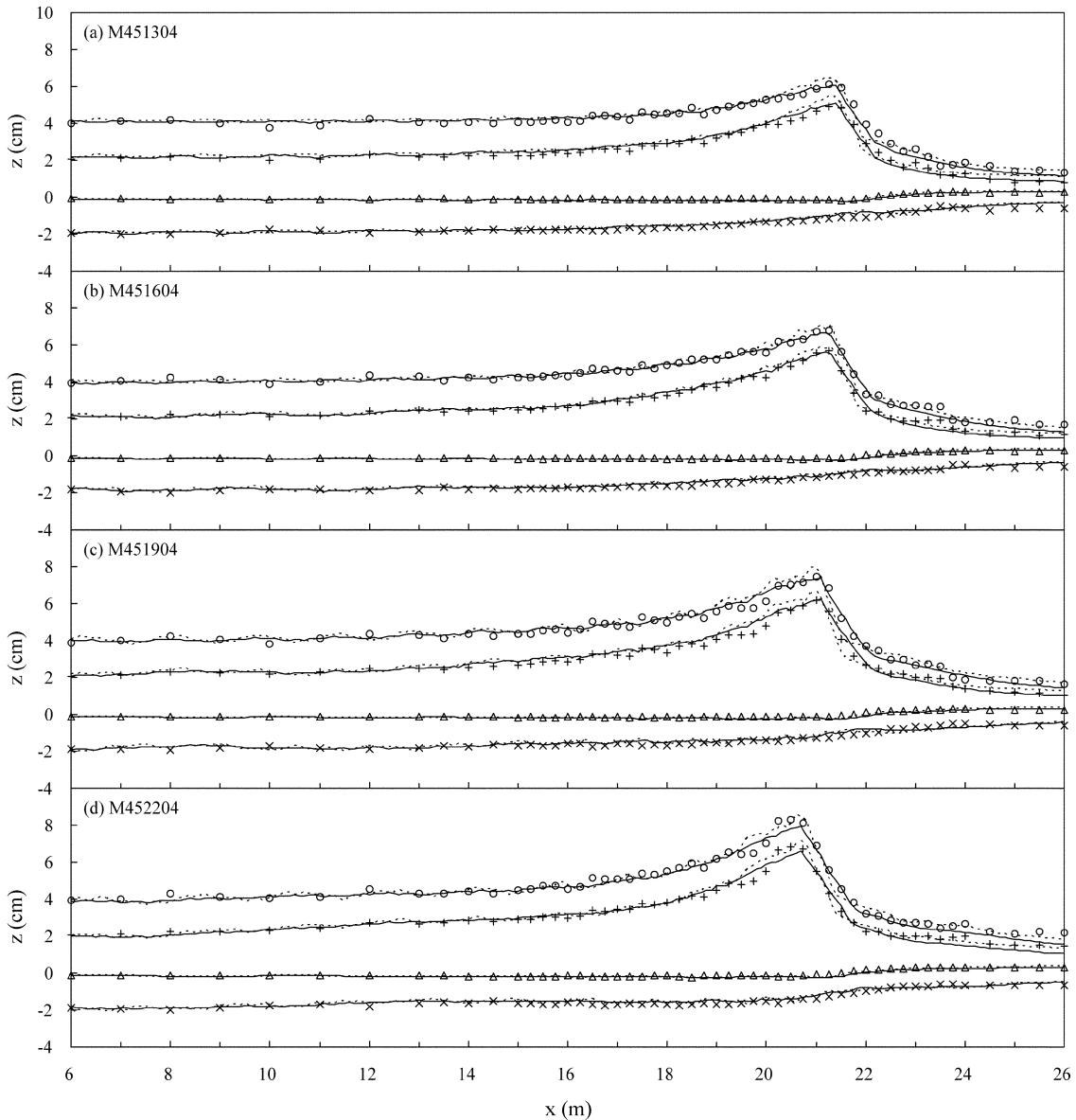


Fig. 6. Comparison of experimental and numerical results for regular wave breaking (Case M451304, M451604, M451904, and M452204). Figure setup same as in Fig. 3.

적으로 2층모형의 해석결과가 1층모형보다 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다. Fig. 5(a)는 본 실험조건에서 입사파의 비선형성이 가장 큰 $k_0 A_0 = 0.180$ 인 경우로서 1층모형의 경우에 해석결과가 다소 불안정한 경향을 보인다.

Fig. 6~Fig. 8은 조파판 전면 수심 $h_0 = 0.45$ m ($h_1 = 0.05$ m)인 경우로서 전반적인 경향은 $h_0 = 0.40$ m인 경우와 유사하다. $h_0 = 0.45$ m인 경우는 $h_0 = 0.40$ m인 경우와 달리 1/40의 일

정경사 후면($x = 22$ m 후방)에 일정수심(h_1)이 존재하는 경우이다(Fig. 2참조). Fig. 6~Fig. 8은 $h_1 = 0.05$ m인 경우로서 $h_1 = 0.0$ m인 경우와는 달리 쇄파후 파고감쇠가 급속히 진행됨을 알 수 있으며, 쇄파후 평균수위의 상승이 명확하게 나타난다. $h_0 = 0.45$ m인 경우에도 파랑의 비선형성이 증가하면 1층모형의 해석결과가 다소 불안정하게 나타나고, 보다 일찍 파고가 증폭되었다.

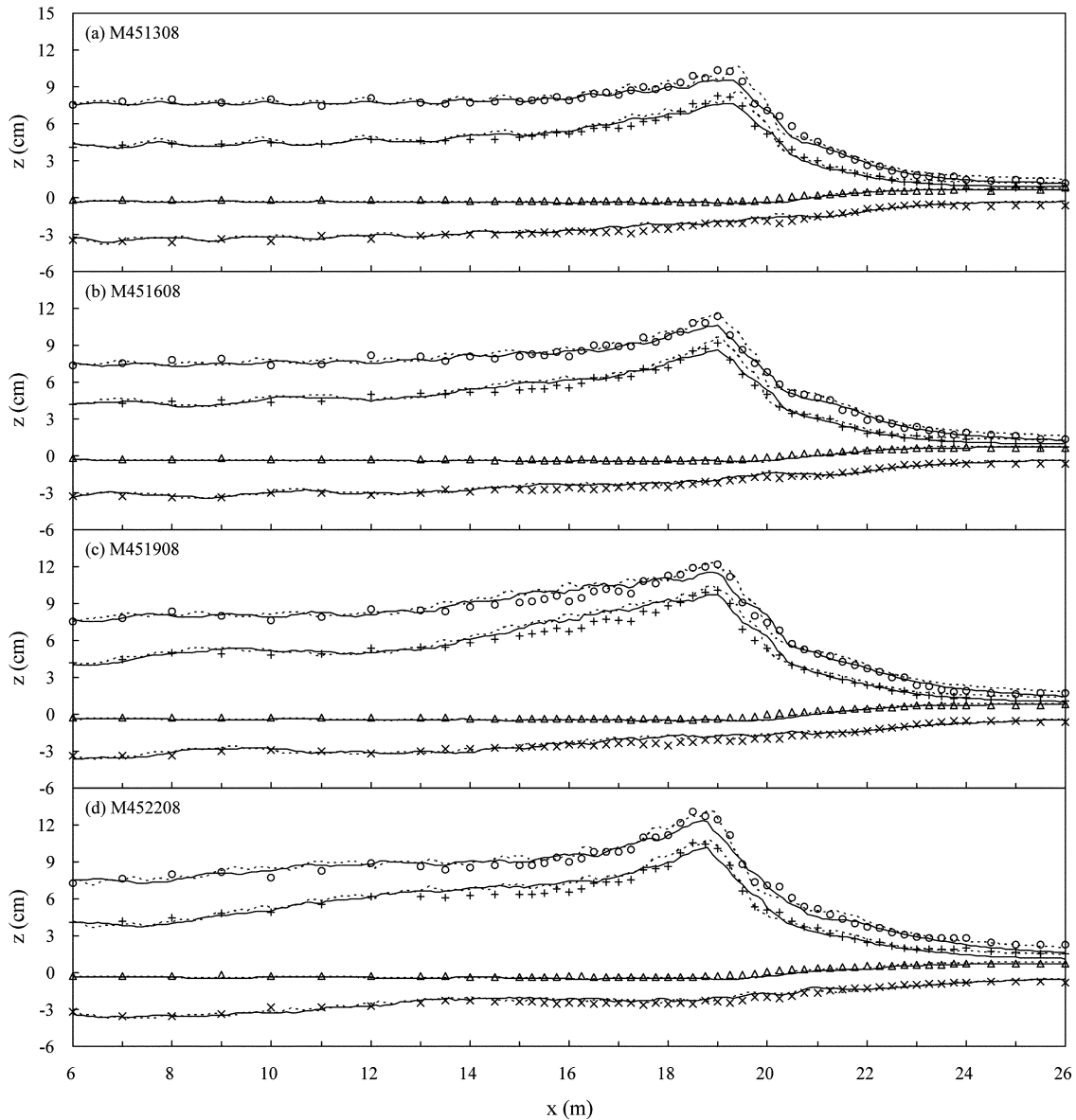


Fig. 7. Comparison of experimental and numerical results for regular wave breaking (Case M451308, M451608, M451908, and M452208). Figure setup same as in Fig. 3.

본 연구에서 수행한 수리실험과 수치해석결과를 종합적으로 살펴볼 때 1층모형의 경우에도 쇄파변형 등을 적절히 모의하는 것으로 나타났지만 파랑의 비선형성이 증가하게 되면 1층모형의 경우에는 해가 다소 불안정해 지는 것으로 나타났다. 그러나 2층모형의 경우에는 실험조건내에서 해가 불안정해지는 경향은 나타나지 않았다. 본 연구에서 적용한 실험조건외에 보다 입사파의 비선형성이 큰 경우에 대한 해석

결과에 의하면, 1층모형의 경우에는 발산하는 반면, 동일조건에서 2층모형의 경우에는 발산하지 않았다.

5. 결 론

본 연구에서는 규칙파를 대상으로 shelf 지형에 대해 체계적인 쇄파실험을 수행하고, 수리실험자료를 구축하였다.

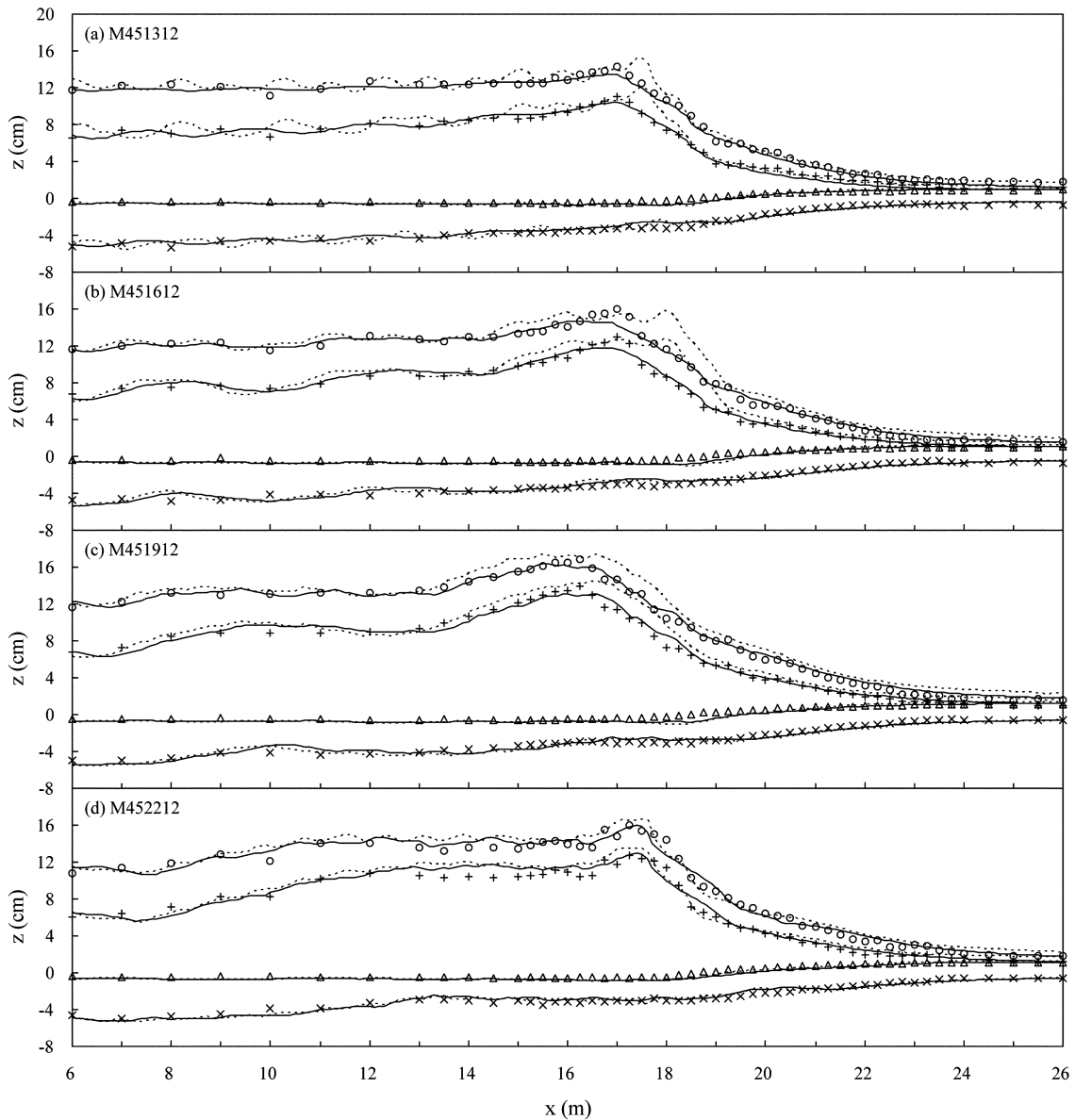


Fig. 8. Comparison of experimental and numerical results for regular wave breaking (Case M451312, M451612, M451912, and M452212). Figure setup same as in Fig. 3.

또한 고차 Boussinesq 방정식을 이용한 수치모형을 이용하여 실험결과와 비교 분석하였으며, 해석에 이용된 수치모형은 1층모형(기본 강비선형 모형)과 2층모형(다층모형)을 이용하였다.

해석결과에 의하면, 파랑의 비선형성이 상대적으로 작은 경우에는 Wei와 Kirby(1995)가 제안한 Boussinesq 방정식 모형, 즉 1층모형도 파랑의 전파변형을 적절히 재현하였지

만, 파랑의 비선형성이 증가하면 해가 불안정해 지고 파고가 보다 빨리 증폭되는 등 실험결과와 다소 차이를 보였다. 그러나 2층모형의 경우에는 실험조건내에서 파랑의 비선형성이 증가하더라도 파랑의 전파변형 및 쇄파변형을 정도 높게 해석하였고, 비교적 안정함을 알 수 있었다. 본 연구에서 기술한 수치모형은 N 층모형이지만 2층모형($N=2$)도 파랑의 전파변형을 정도 높게 해석하는 것으로 나타났다. 그

리고 1층모형 및 2층모형의 경우 모두 평균수위의 증가현상을 잘 재현하였으나, 전반적으로 실험결과보다 파봉고는 높게, 파곡고는 낮게 해석함을 감안할 때 파랑의 비선형성에 대한 해석이 수리실험보다 약간 크게 작용하는 것으로 생각된다.

본 연구의 수리실험자료는 향후 국내 연구진에 의해 새로운 파랑전파모형이 개발될 때 쇄파현상 모의에 대한 정밀도 검사에 유용한 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2004년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2004-214-D00178).

참고문헌

- Agnon, Y., Madsen, P.A. and Schaffer, H. (1999). A new approach to high order Boussinesq models. *J. of Fluid Mechanics*, 399, 319-333.
- 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*, 405, 182-210.
- Hsiao, S.C. and Liu, P.L.-F. (2002). Nonlinear water waves propagating over a permeable bed. *Proc. Royal Society of London A.*, 485, 1291-1322.
- Hsiao, S.C., Lynett, P., Hwung, H.H. and Liu, P.L.-F. (2005). Numerical simulations of nonlinear short waves using the multi-layer model. *J. of Engineering Mechanics*, 131(3), 231-243.
- Kennedy, A.B., Chen, Q., Kirby, J.T. and Dalrymple, R.A. (2000). Boussinesq modeling of wave transformation, breaking and runup: One dimension. *J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 126, 39-47.
- Lee, C.H., Cho, Y.-S. and Yum, K.-D. (2001). Internal generation of waves for extended Boussinesq equations. *Coastal Engineering*, 42, 155-162.
- Liu, P.L.-F. (1994). *Model Equations for Wave Propagation from Deep to Shallow Water*. In *Advanced in Coastal Engineering* (ed. P.L.-F. Liu), 1, 125-157, World Scientific.
- 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.*, 460, 2637-2669.
- Lynett, P. and Liu, P.L.-F. (2004b). Linear analysis of the multi-Layer model. *Coastal Engineering*, 51(6), 439-454.
- Lynett, P., Wu, T.R. and Liu, P.L.-F. (2002). Modeling wave runup with depth integrated equations. *Coastal Engineering*, 46(2), 89-107.
- 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*, 462, 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*, 18, 183-204.
- Nwogu, O. (1993). Alternative form of Boussinesq equations for nearshore wave propagation. *J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 119(6), 618-638.
- Peregrine, D.H. (1967). Long waves on a beach. *J. of Fluid Mechanics*, 27, 815-827.
- Wei, G. and Kirby, J.T. (1995). A time-dependent numerical code for extended Boussinesq equations. *J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 120, 251-261.
- Wei, G., Kirby, J.T., Grilli, S.T. and Sinha, A. (1999). Generation of waves in Boussinesq models using a source function method. *Coastal Engineering*, 36, 271-299.
- 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*, 294, 71-92.
- Wu, T.Y. (1981). Long waves in ocean and coastal waters. *J. of Engineering Mechanics Division, ASCE*, 107, 501-522.

Received February 10, 2006

Accepted June 7, 2006