

수중 천퇴에서의 쇄파거동 예측을 위한
Boussinesq 방정식 모델의 적용
Application of Boussinesq Equation Model for the Breaking
Wave Behavior around Underwater Shoals

진인식* · 김귀동* · 심재설**
Insik Chun* , Guidong Kim* and Jaeseol Sim**

요 지 : 본 연구에서는 수중 천퇴부에서 쇄파가 발생할 시 주변 파랑과 파랑류의 평형계를 직접 해석할 수 있는 Boussinesq 방정식 모델을 수립하고 이 결과를 수리실험 결과와 비교하였다. 사용된 쇄파모델은 쇄파 감쇠항을 모멘텀 방정식에 포함시키는 일종의 와점성 계수 모델이며, 관련된 쇄파 매개변수의 적정 값들을 Vincent and Briggs (1989)의 규칙과 실험자료를 이용한 민감도 분석을 통하여 결정하였다. 구해진 적정 매개변수 값들을 가지고 수치해석을 수행하여 이 결과를 불규칙파 실험결과와 이이도 천연암초의 수리모형실험 결과와 비교하였다. 그 결과, 천퇴부 하류 쪽에 파 진행방향으로 향하는 강한 쇄파유도류가 발생함에 따라 저파고대가 형성되며 전반적으로 계측파고의 분포와 유사함을 확인하였다.

핵심용어 : Boussinesq 방정식, 완경사방정식, 파랑류, 수중 천퇴, 비선형 파랑전파, 쇄파

Abstract : In the present study, a numerical model using Boussinesq equation is set up to predict the interacted equilibrium between waves and their induced currents in the occurrence of breaking waves over an underwater shoal, and the numerical results are compared with results of existing hydraulic experiments. A sensitivity analysis has been done to find out appropriate values of breaking wave parameters with the result (regular wave case) of Vincent and Briggs (1989)' experiment. Then the numerical model is applied to the irregular wave cases of the experiment and the hydraulic model test of Ieodo which is a natural undersea shoal. The results show that a strong current forms in the wave direction at the downstream side of the shoals, causing the attenuation of wave heights there. The calculated wave heights generally show a similar pattern with the measured data.

Keywords : Boussinesq equation, mild slope equation, wave induced current, underwater shoal, nonlinear wave propagation, breaking wave

1. 서 론

해안 및 항만구조물의 구조역학적 안정성과 수리 성능을 확보하기 위해서는 설계단계에서 우선적으로 천해설계 파 제원을 정확하게 결정할 필요가 있다. 또한, 항만의 기능과 입지조건이 다변화되고 있는 현 시점에서 항내외 파랑변형 및 항만정온도를 정확하게 결정하는 것은 항만 하역효율의 제고측면에서 매우 중요한 의미를 갖는다.

심해역 풍파가 너울 형태로 천해역으로 전파하면서 발생하는 파랑변형 현상은 일반적으로 천수변형, 굴절, 회절, 쇄파, 파랑-파랑 상호작용, 파랑류 발생 등을 포함한다. 완경사 방정식에 기반을 둔 선형파 모델은 심해역과 천해역에서 공히 파의 분산성을 양호하게 재현하며 계산시간이 비교적 짧게 소요되기 때문에 파랑 변형을 계산하기 위한 주요 수단으로 다수 사용되어 왔다. 그러나, 설계 실무에서 파랑변형의 비선형 효과를 고려해야 되는 경우가 종종 발

* 건국대학교 토목공학과 (Corresponding author: Department of Civil Engineering, Konkuk University, 1 Hwayang-dong, Kwangjin-ku, Seoul, 143-701, Korea. ischun@konkuk.ac.kr)

** 한국해양연구원 연안·항만공학본부 (Coastal and Harbor Engineering Division, Korea Ocean Research and Development Institute)

생한다. 예를 들면, 파랑-파랑 상호작용에 의하여 발생하는 구속장주기파는 항만 부진동의 주요 원인으로 지목되고 있으며, 파랑류 발생 및 이에 따른 파고 증폭 및 저감은 수중 천퇴를 포함한 국소적 쇄파대 근방에 단일 구조물을 설치할 경우 설계파력을 결정하는데 매우 중요하게 고려되어야 한다.

전인식 등 (2005)은 수중 천퇴인근에서의 파랑전파를 계산하기 위하여 Nwogu (1993)의 수정 Boussinesq 방정식 모델을 수립하고 이의 결과를 Vincent and Briggs (1989)의 수리실험 결과와 비교한 바 있다. 계산조건은 천퇴에서의 비쇄파 조건에 국한하였으며 본 수치해석이 일방향 규칙파 및 불규칙파, 그리고 다방향 불규칙파 조건에 걸쳐 전반적으로 실험결과를 양호하게 재현함을 확인하였다.

천퇴에서의 쇄파조건에 대한 계산은 쇄파모델 매개변수의 적절한 선택, 쇄파발생 시 미분항들의 급격한 변화에 따른 해의 불안정성 등에 대한 심도 있는 검토가 필요하다. 기존 Boussinesq 방정식 모델에 사용된 쇄파모형은 Kennedy et al.(2000)의 와점성 계수(eddy viscosity) 모델, Schäffer et al.(1993)의 surface roller 모델, 그리고 최근의 Musumeci et al.(2005)의 와도이동(vorticity transport) 모델 등이 있다.

와점성 계수 모델은 Heitner and Housner(1970)와 Zelt (1991)의 연구에서 사용된 혼합거리 개념의 난류에너지 소산항을 모멘텀 방정식에 부가하는 방식이며 쇄파시작 조건으로서 수면변위의 시간적 변화율을 국지적 천해파속과 비교하는 것이다. 이 모델의 장점은 Boussinesq 모델의 중간결과인 수면변위의 시간변화율을 쇄파발생 판별에 바로 이용할 수 있는 것이며, Strybny and Zielke(2000)와 Karambas and Koutitas(1992)의 경사면 쇄파계산에서도 사용된 바 있다. Surface roller 모델(최초 개념은 Svendsen(1984)에 의하여 제시됨)은 수면의 형상을 연속적으로 추적하여 사전 입력된 쇄파 임계형상과 비교하여 쇄파시작을 감지하는 방법이다. 그러나 삼차원적 적용(Sorensen et al., 1998)에서는 roller의 전지부선(roller-toe curve)을 연속적으로 추적하여야 하는 어려움이 있다. 와도이동 모델은 와도 이동방정식(vorticity transport equation)을 이용하는 일종의 폐합(closure) 모델이나 여전히 도수(hydraulic jump) 실험에서 비롯된 실험적 매개변수들을 사용해야 하는 문제점이 있으며 아직은 일차원적 예시단계에 머물러 있다.

본 연구에서는 쇄파모델로서 와점성 계수모델을 사용하여 천퇴부 쇄파조건에서 파랑변형 및 파랑류를 계산하였

다. 먼저, Vincent and Briggs(1989)의 규칙파 실험결과를 이용하여 쇄파 매개변수들의 민감도 분석을 수행한 후 적정 매개변수를 선정하여 불규칙파 실험결과와 그리고 전인식·심재설(2005)이 수행한 이어도 수리모형실험 결과와 비교하였다. 수치해석은 비교 목적 상 Boussinesq 방정식 모델과 더불어 환경사 방정식의 선형파 모델도 병행 적용하였다.

2. 지배방정식 및 와점성 계수 쇄파모델

본 연구에서는 수면변위 η 와 유속성분(u, v)를 구하기 위하여 Nwogu(1993)가 제안한 다음과 같은 약비선형 형태의 Boussinesq 방정식을 사용하였다. 유속성분은 수심에서의 연직위치 $z_{\alpha} = -0.531 h$ 에서의 수평방향 유속을 의미한다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = E(\eta, u, v) + f(x, y, t) \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = F(\eta, u, v) + \frac{\partial F_1(v)}{\partial t} + F_b + F_{br} + F_{sp} \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = G(\eta, u, v) + \frac{\partial G_1(u)}{\partial t} + G_b + G_{br} + G_{sp} \quad (3)$$

식 (1)에서 f 는 조파항이며, 식 (2), (3)에서의 U, V, E, F, G, F_1, G_1 는 고차미분항들의 조합으로 구성된 변수이다 (전인식 등, 2005). 그리고, (F_b, G_b) 는 바닥마찰항, (F_{br}, G_{br}) 는 쇄파감쇠항, (F_{sp}, G_{sp}) 는 스펀지 감쇠항을 의미한다.

Kennedy et al.(2000)은 쇄파발생 시 와점성 계수 v_b 를 이용하여 쇄파감쇠항을 다음과 같이 나타내었다.

$$F_{br} = -\frac{1}{h+\eta} \{ (v_b[(h+\eta)u]_x)_x + (v_b[(h+\eta)u]_y)_y \} \quad (4)$$

$$G_{br} = -\frac{1}{h+\eta} \{ (v_b[(h+\eta)v]_x)_x + (v_b[(h+\eta)v]_y)_y \} \quad (5)$$

여기서,

$$v_b = -B\delta^2(h+\eta)\eta_t \quad (6)$$

$$B = \begin{cases} 1 & ; 2\eta_t^* \\ \eta_t/\eta_t^* - 1 & ; \eta_t^* \leq \eta_t \leq 2\eta_t^* \\ 0 & ; \eta_t < \eta_t^* \end{cases} \quad (7)$$

$$\eta_t^* = \begin{cases} \eta_t^{(U)} + \frac{t-t_0}{T^*}(\eta_t^{(U)} - \eta_t^{(F)}) & ; 0 \leq (t-t_0) \leq T^* \\ \eta_t^{(F)} & ; T^* < (t-t_0) \end{cases} \quad (8)$$

$$\eta_i^{(l)} = P_1 \sqrt{gh} \quad (9)$$

$$\eta_i^{(r)} = P_2 \sqrt{gh} \quad (10)$$

$$T^* = P_3 \sqrt{\frac{h}{g}} \quad (11)$$

식 (8)에서 t_0 는 쇄파시작 시각을 의미한다. 식 (6)~(11)에서 외점성 계수를 결정하기 위한 매개변수는 δ , P_1 , P_2 와 P_3 임을 알 수 있다. 일반적으로 임의 위치에서 쇄파가 한번 발생하면 차후에는 동일 위치에서 쇄파가 보다 용이하게 발생하는 것으로 알려져 있다(Horikawa and Kuo, 1966; Dally et al., 1985). 따라서, 쇄파의 임계조건은 식 (8)에서 보이는 바와 같이 시간 구간 T^* 동안에 $\eta^{(l)}$ 에서 $\eta^{(r)}$ 로 서서히 감소하는 것으로 설정되어 있다. 쇄파 매개변수의 기본값으로서 $\delta=1.2$, $P_1=0.65$, $P_2=0.15$, $P_3=5.0$ 을 권장하고 있으나 정확한 값은 쇄파가 발생하는 각 경우마다 개별적으로 실험 데이터 등을 이용하여 결정할 필요가 있다. 정성적으로는 P_1 , P_2 , P_3 가 증가할수록 쇄파발생이 억제되며, 결과적으로 이들 값들이 증가할수록, 그리고 δ 가 감소할수록 쇄파감쇠가 감소한다.

본 연구에서 상기 Boussinesq 모델과 병렬 적용한 선형파 모델은 확장형 완경사 방정식 모델로서 전인식 등 (2005)에 기술되어 있다. 이 모델에서 사용된 쇄파모델은 근본적으로 식 (4), (5)와 다른 것으로서 도수이론(hydraulic jump theory)의 개념에 근거하여 Le Mehaute (1963)가 제안한 다음 식의 에너지 소멸을 ϵ_b 를 이용하였다.

$$\epsilon_b = \lambda_b \frac{\rho g^{3/2} k H^3}{8\pi h^{1/2} n E} \quad (12)$$

여기서, n =천수변형 매개변수, E =에너지 밀도($=\rho g H^3/8$), k =파수, h =수심이다. 선형 불규칙파 모델은 여러 성분파를 병렬 계산하여 각 격자점에서의 파고를 매 시간 증분마다 선형합성하는 방법으로 구하되 쇄파감쇠는 $H/h \geq 0.78$ 일 때 식 (12)를 적용하는 것으로 하였다. 식 (12)의 비례계수는 $\lambda_b=4$ 로 취하였다.

3. 쇄파 매개변수의 민감도 분석

쇄파 매개변수 δ , P_1 , P_2 와 P_3 의 쇄파발생 및 파고분포에 대한 영향 정도를 고찰하기 위하여 Vincent and Briggs (1989)가 수행한 수리실험의 결과를 이용하여 이들 매개변수의 민감도를 분석하였다. Table 1은 수리실험조건 중 쇄파조건에 해당하는 파랑조건을 보여준다. 매개변수 α , γ 는 TMA 스펙트럼의 매개변수이며, σ_m 은 Borgman (1984)의 방향분산함수 매개변수이다. 본 민감도 분석에는 규칙파 조건인 case M3만을 사용하였으며 타 경우들은 불규칙파 조건들로서 수치모델의 쇄파거동 검증에 사용하였다. case U는 일방향 불규칙파로서 수리실험에는 포함되지 않았으나 모델검증 목적상 본 연구에서 추가적으로 설정한 것이다.

계산영역은 수리실험과 동일하게 Fig. 2에서 보이는 바와 같이 4변이 폭 L (파장)인 스펜지 층으로 둘러싸여진 정사각형으로 설정하였다. 계산은 모든 실험조건 공히 200주기 동안 수행하였으며, 계산격자간격은 $\Delta x = \Delta y = 0.15$ m로 하였다. 시간증분 Δt 는 프로그램 내부에서 Courant 조건을 만족하도록 자동계산되는 식으로 하였으며, 여기에서 Δt 는 0.026초이다. 수치파고계는 Fig. 2가 보이는 바와 같이 수리실험과 동일하게 폭이 10 m이며 하변에서 16.61 m 만큼 이격된 횡선(Transect 4)을 따라 각 격자점마다 설치하였다. 또한, 천퇴이전 좌하부에 참조점 파고계를 설치하였다. 파고자료 분석은 총 200주기 중 마지막 50주기를 대상으로 하였다. 기타 상세한 수치모델 적용 조건은 전인식 등 (2005)에 기술되어 있다.

쇄파 매개변수의 민감도 분석을 위하여 실험조건을 Table 2와 같이 정하였다. 각 경우에서 고정 매개변수들은 P_1 을 제외하고는 기본값을 사용하여 수치해석을 수행하였다.

계측선(Transect 4)에서의 파고를 참조점 파고로 나는 다음 이를 선형파 계산결과와 함께 Fig. 2에 도시하였다. 전체적으로 볼 때, Boussinesq 모델의 결과들은 선형파 결과와 상당히 다른 양상을 보이고 있다. 비쇄파 조건에 대한 전인식 등 (2005)의 연구에서는 Boussinesq 모델 결과 역시 선형파 결과와 동일하게 계측선 중앙에서 파고가 최대로 나타나며 변화양상이 전반적으로 수리실험 결과와 잘

Table 1. Test conditions for Vincent and Briggs' experiment (breaking conditions)

Test number (1)	Case ID (2)	Type (3)	Period (sec) (4)	Height (m) (5)	α (6)	γ (7)	σ_m (8)
1	M3	Mono	1.30	0.1350	-	-	-
2	U	Spec	1.30	0.1350	-	3.3	-
3	B5	Spec	1.30	0.1900	0.08650	2	30
4	N5	Spec	1.30	0.1900	0.02620	20	10

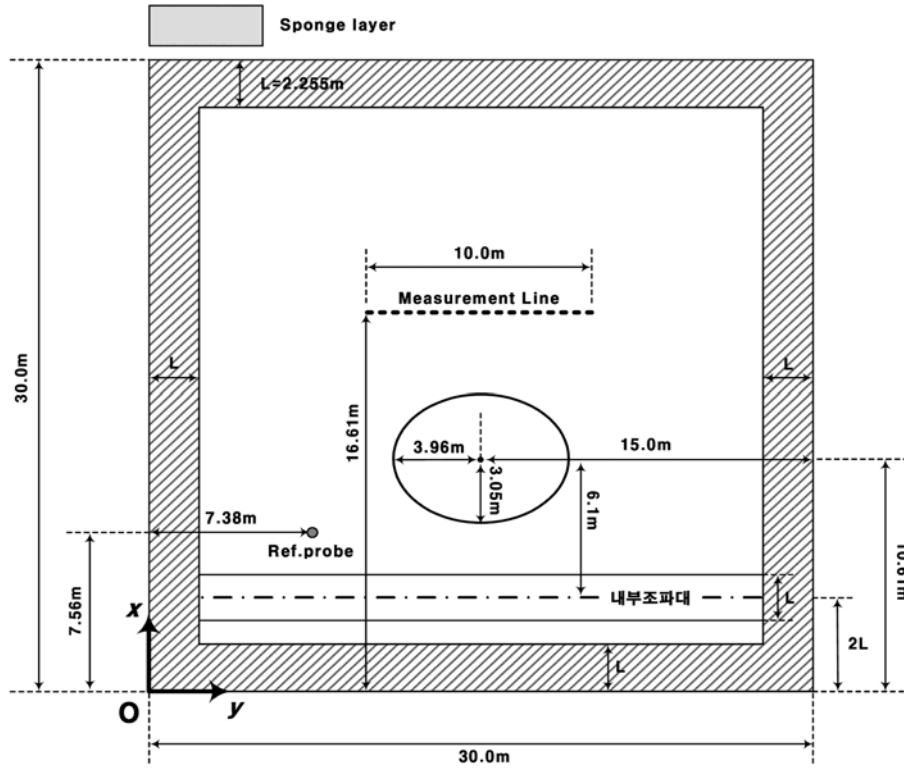


Fig. 1. Calculation domain for Vincent & Briggs' experiment.

Table 2. Breaking wave parameters used in the sensitivity analysis

Case	P_1	P_2	P_3	δ
1	0.2~0.8	0.15	5.0	1.2
2	0.4	0.02~0.46	5.0	1.2
3	0.4	0.15	1.0~10.0	1.2
4	0.4	0.15	5.0	0.2~3.0

일치함을 보인 바 있다. 본 쇄파조건에서도 선형파는 여전히 계측선 중앙에서 최대치를 보이며 비례계수 λ_b 의 여러 값을 시도하였으나 중앙부 돌출 부위는 여전히 존재하는 것으로 나타났다. 그러나, 수리실험 결과는 전반적으로 중앙부위에서 저파고대가 형성되어 있으며 정 중앙에는 약간의 상향 돌출부가 형성되어 있음을 볼 수 있다. Yoon et al.(2001)은 포물형 환경사방정식과 천수방정식을 결합하여 이와 같은 저파고대의 형성을 수치적으로 재현한 바 있다.

Fig. 2(a)를 보면 예상했던 바대로 매개변수 P_1 이 증가하면서 쇄파의 발생이 억제되기 때문에 계측선 중앙에서 파고가 증가하며, $P_1=0.8$ 의 결과에서는 오히려 중앙부 파고가 돌출하여 선형파 결과와 유사한 형상을 보인다.

$P_1=0.4$ 에서는 전반적으로 실험결과와 상당히 일치하는 경향을 보이거나 계측선 중앙에서는 실험결과보다 현저히 작은 파고를 보이며, $P_1=0.2$ 에서는 중앙부 파고가 거의 영에 근접한다. 전반적으로 $P_1 < 0.7$ 의 범위에서 계산결과와 실험결과를 비교하여 볼 때 P_1 이 증가하면 중앙부에서 잘 일치하고, P_1 이 감소하면 양 측에서 잘 일치하는 성향을 볼 수 있다. 이와 같은 양상은 Fig. 2(b)에서 보는 바와 같이 P_2 를 변화시키는 경우에서도 유사하게 나타난다. $P_2=0.08$ 과 $P_2=0.15$ 에서는 거의 동일하며, $P_2=0.25$ 이상으로 증가하면서 중앙부 파고가 증가하나 양측에서 일치정도는 현저히 감소함을 볼 수 있다. 한편, 실험결과 상 중앙점에서의 약간의 파고돌출은 어떠한 매개변수의 조합을 통해서도 재현할 수 없음을 확인하였다. 이 성향은 쇄파 포말에 의한 계측오차일 수도 있으나 전인식 등 (2005)의 비쇄파 조건들의 결과에서 볼 수 있었던 천퇴 매면에서의 파 회절효과일 수도 있기 때문에 향후 수치해석의 개선과정에서 계속적으로 고찰해야 될 문제로 판단된다.

쇄파의 지속시간에 관련된 매개변수 P_3 의 경우에는 Fig. 2(c)에서 보이는 바와 같이 사용된 P_3 값의 범위 내에서 파

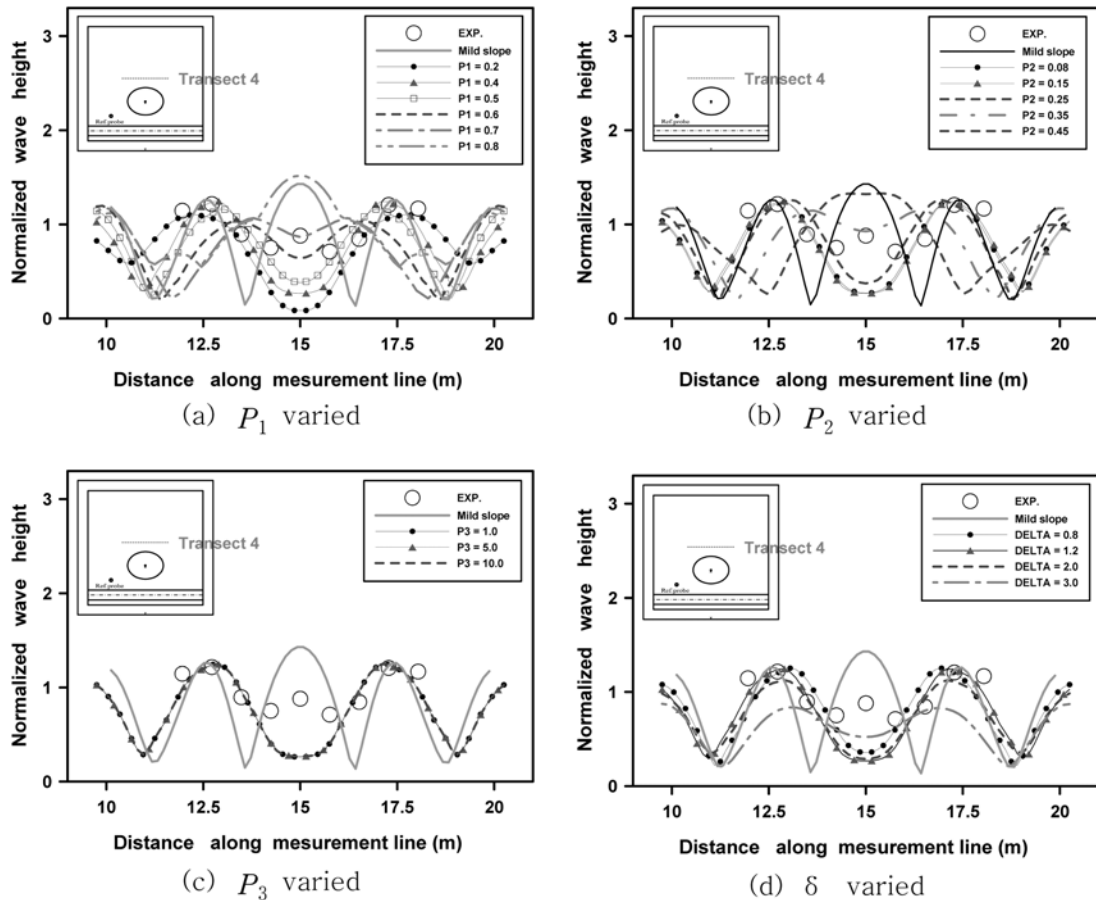


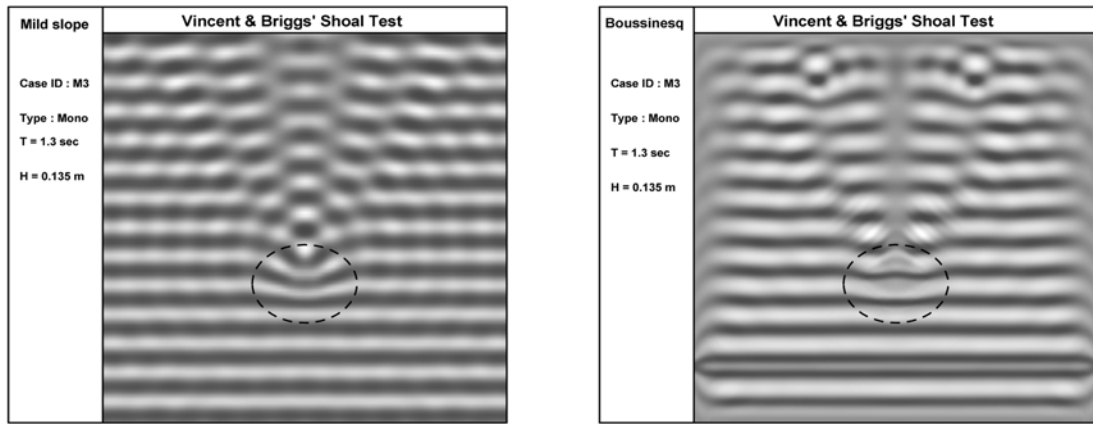
Fig. 2. Variation of normalized wave height along the measurement line.

고의 변화가 거의 나타나지 않음을 볼 수 있다. 이는 쇄파대가 천퇴부 정상부에 거의 고정되어 나타나며 한 격자점에서 쇄파가 한 번 발생하면 동일점에서 쇄파가 계속 존재하기 때문이다. Fig. 2(d)의 δ 변화의 경우에는 $\delta=0.2, 1.2, 2.0$ 에서는 별 차이가 두드러지지 않으나 $\delta=3.0$ 에서는 계측선 중앙부에서 파고가 다소 증가하는 반면 양 측에서의 파고는 현저히 감소하는 것으로 나타났다.

상기 민감도 분석에서는 포함되지 않았으나 Boussinesq 모델의 수치계산 중 일반적으로 발생하는 고주파 잡음(superharmonics)은 쇄파 발생 시 미분항들의 급격한 공간적 시간적 변화로 말미암아 더욱 현저하게 발생하는 성향이 있으며 이는 계산의 급격한 발산 요인을 제공한다. 따라서, 본 수치해석에서는 Shapiro(1970)의 평활필터를 입사파의 3주기마다 한번씩 적용하는 것으로 하였다. 그러나, 3점 필터링 등 적은 격자점을 사용하는 필터링 경우에는

고주파의 필터링 효과 외에도 입사파랑의 에너지를 계속적으로 감쇠하는 부작용이 나타나기 때문에 본 수치해석에서는 9점 필터링(전후 4점씩)을 사용하였다. 단, 경계근방에서는 가용한 격자점의 개수에 따라 7점, 5점 그리고 3점 필터링을 선별 사용하였다.

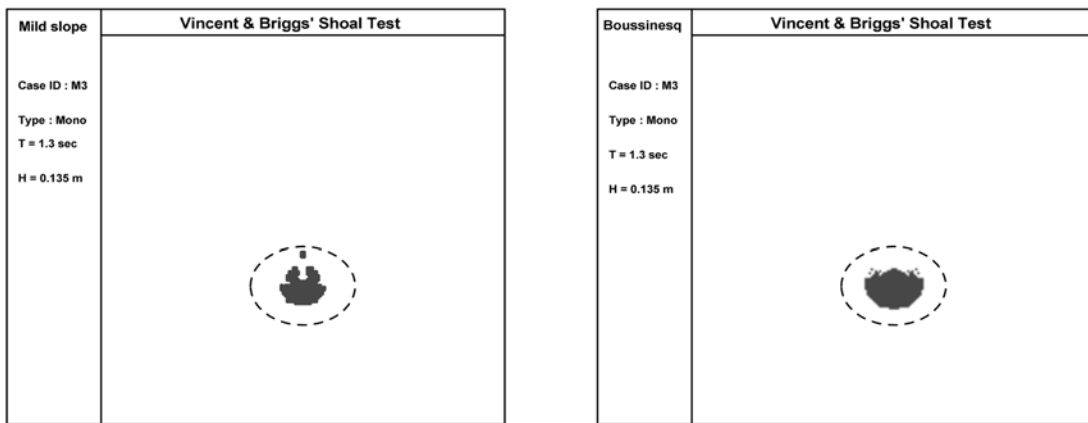
상기 민감도 분석결과에서 $P_1=0.4, P_2=0.15, P_3=5.0$ 그리고 $\delta=1.2$ 를 채택하여 수면변위, 쇄파대 위치 그리고 파랑류에 대한 선형과 결과와 Boussinesq 모델결과를 Fig. 3~Fig. 5에 각각 비교 도시하였다. Fig. 3의 수면변위를 보면 선형과 결과는 천퇴(쇄선으로 표시)를 지나 중앙중선을 따라 고파고대가 형성되어 있는 반면, Boussinesq 모델 결과는 저파고대가 형성되어 있음을 볼 수 있다. 이는 Fig. 5(b)에서 볼 수 있듯이 중앙중선을 따라 강하게 발생하는 이차적 파랑류(최대유속 약 51.2 cm/s)에 의한 파고저감 효과 때문이다. Fig. 5(a)는 전인식 등(2005)에서 보였듯이



(a) Mild slope eq.

(b) Boussinesq eq.

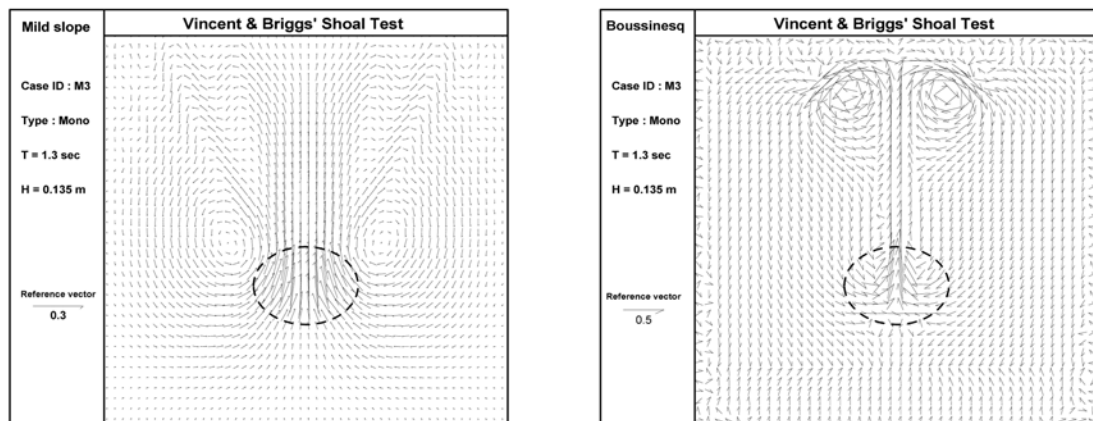
Fig. 3. Water surface displacements in the case M3 (regular wave).



(a) Mild slope eq.

(b) Boussinesq eq.

Fig. 4. Wave breaking zone in the case M3.



(a) Mild slope eq.

(b) Boussinesq eq.

Fig. 5. Wave induced current in the case M3.

선형파 계산결과를 이용하여 잉여응력(radiation stress)을 계산한 다음 이를 다시 천수방정식에 입력하여 계산한 파랑류이다. 선형파 파랑류가 비록 반복계산을 거치지 않은 일차적인 계산결과이긴 하나 Boussinesq 모델결과와 비교할 때 천퇴 하류에서의 파랑류 형성이 넓게 퍼져 형성되어 있으며 최대유속이 30.7 cm/s로 Boussinesq 모델 결과보다 작게 나타나 있다. 한편, Fig. 4에서 볼 수 있듯이 쇄파대 위치는 선형파와 Boussinesq 모델 결과 공히 천퇴부의 정 위치에서 잘 포착되고 있다.

4. 불규칙파 적용

불규칙파 적용에서는 성분파의 주파수와 방향을 각각 50개로 나누어 성분파를 구한 다음, 각각의 원천함수를 선형합성하여 조파형을 입력하였다. 성분파 주파수는 주기 0.5~2.5초에 해당하는 주파수대를 등간격으로 분할하여 설정하였다.

Table 1에서의 실험조건 U, B5, N5에 대하여 쇄파 매개변수 $P_1=0.4$, $P_2=0.15$, $P_3=5.0$ 그리고 $\delta=1.2$ 를 적용하여 계산을 수행하였다. 일방향 불규칙파 조건인 U에 대한 파랑류와 Transect 4에서의 파고변화를 Fig. 6과 Fig 7에 각각 도시하였다. 동일조건인 규칙파 경우(case M3)와 마찬가지로 천퇴하류부에 파 진행방향의 대칭성 쇄파유도류가 형성되어 있음을 볼 수 있다. Fig. 7에서의 파고변화를 보면 규칙파의 경우 M3의 결과와는 판이한 양상이나 선

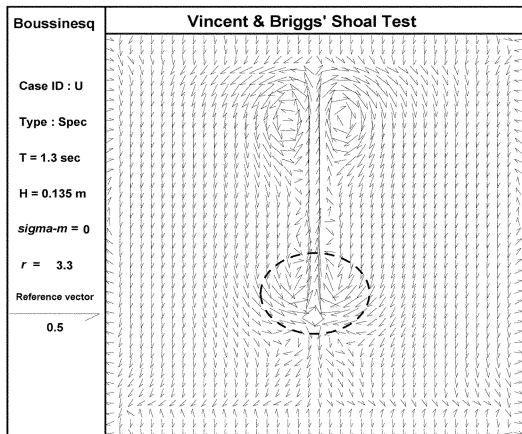


Fig. 6. Wave induced currents in the case U (unidirectional irregular wave).

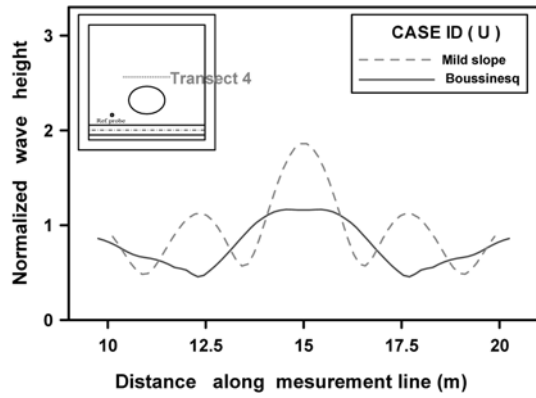


Fig. 7. Normalized wave height along the transect4 in the case U.

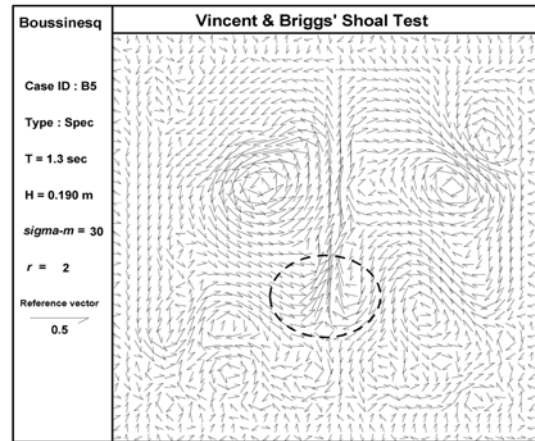


Fig. 8. Wave induced current in the case B5 (multidirectional wave).

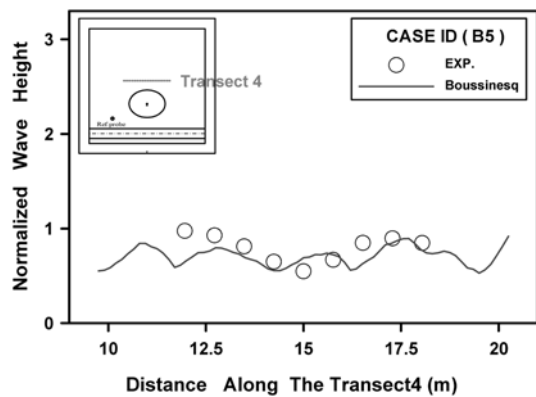


Fig. 9. Normalized wave height along the transect4 in the case B5.

형파 결과 그리고 비쇄파조건에서 고정적으로 나타나던 중앙부에서의 파고돌출은 많이 완화되었음을 알 수 있다.

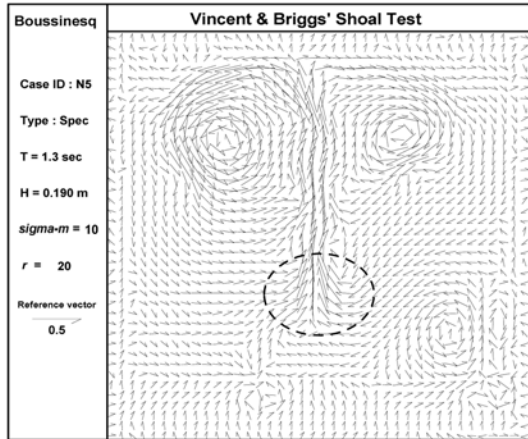


Fig. 10. Wave induced current in the case N5 (multidirectional wave).

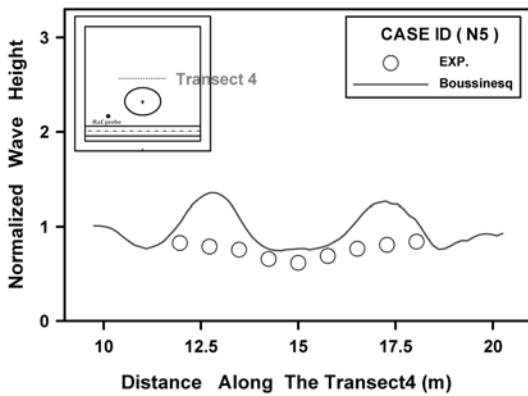


Fig. 11. Normalized wave height along the transect4 in the case N5.

다방향 불규칙파 조건인 B5와 N5에 대한 계산결과를 수리실험결과와 함께 Fig. 8-Fig. 11에 도시하였다. 이들 실험조건 공히 천퇴 하류부에서 파랑류가 잘 형성되어 있으며 방향 분산함수의 폭이 비교적 작은 N5의 경우에서 파랑류가 보다 탁월하게 발생함을 볼 수 있다. 수리실험 데이터는 완곡하게 퍼져 있어 B5의 경우에는 계산결과와 비교적 정량적인 유사성을 보이는 반면, 방향성이 비교적 뚜렷한 N5의 경우(Table 1참조)에서는 계측선 중앙부 좌우측에서 상당정도의 편차가 존재함을 볼 수 있다. 비쇄파 조건들에 대한 계산결과(전인식 등, 2005)에서는 계산결과와 실험결과가 양호한 일치를 보였던 것에 비추어 볼 때 현 N5조건에서 존재하는 편차는 쇄파에 따른 강한 쇄파 유도류에 기인된 것으로 보이나 향후 수치모델의 개선과 정에서 좀 더 고찰해야 될 사항으로 판단된다.

5. 이어도 수리모형실결과와 비교 및 토의

이어도 수리모형실험에서 Vincent and Briggs(1989)와 비교적 실험 스킴이 유사한 S 파향($H=20.5$ cm, $T=1.37$ 초, $h=48.9$ cm)을 선별하여 수치해석을 수행하였다. Fig. 12는 모형실험 및 현 수치해석에 사용된 수중암초의 형상을, Fig. 13은 실험전경을 보여준다. 수리모형실험의 내용과 실험결과는 전인식심재설(2005)에 자세히 기술되어 있으며 여기에서는 생략하기로 한다.

수치해석에서 사용된 쇄파 매개변수는 앞에서와 동일하게 $P_1=0.4$, $P_2=0.15$, $P_3=5.0$ 그리고 $\delta=1.2$ 로 하였으며 계산 증분치는 $\Delta x=0.125$ m, $\Delta t=0.0173$ sec로 취하였다. 수리실험에서 파 진행에 따라 파주기마다 이어도 정상부가 간헐적으로 노출되는 것을 발견하였으며 수치해석에서는 수면변위 η 가 수심 h 를 초과하는 경우에는 수면변위를 $\eta = -0.99 h$ 와 같이 강제 조정하였다.

이어도 수중암초에 대한 수치해석 결과 중 수면변위와 파랑류 결과를 Fig. 14와 Fig. 15에 제시하였다. 수면변위에서는 Vincent and Briggs의 실험에서와 달리 파랑류에

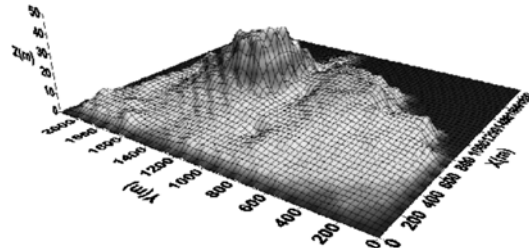


Fig. 12. 3D view of leodo rocks.



Fig. 13. Hydraulic model experiment with leodo underwater rock (S direction).

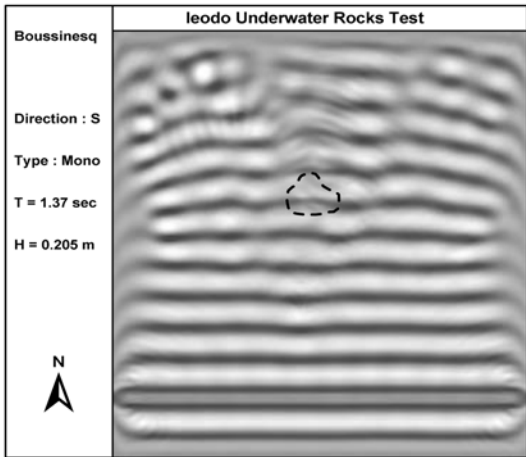


Fig. 14. Water surface displacements formed around the Ieodo underwater rocks.

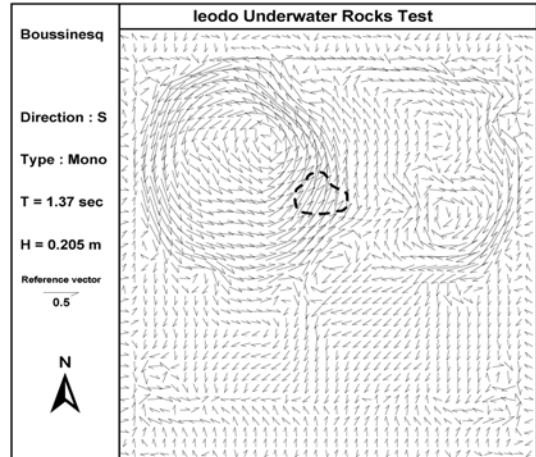


Fig. 15. Wave induced current on the Ieodo rocks.

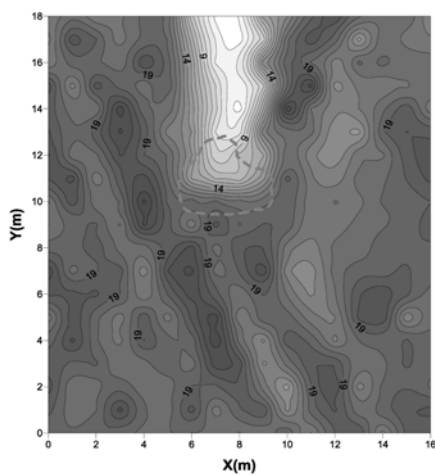
의한 뚜렷한 저파고대가 포착되지 않으나 Fig. 15를 보면 비대칭성 천퇴에 의하여 하류부 좌측에 파랑류에 의한 순환이 형성되어 있음을 볼 수 있다(정상부는 쇄선으로 표시).

파고분포를 도시한 Fig. 16을 보면 계산결과와 실험결과 사이에 다소의 정량적 차이는 존재하나 암초 정상부의 하류부와 우측에 각각 저파고대가 공히 존재하는 등 유사한 양상을 보이고 있다.

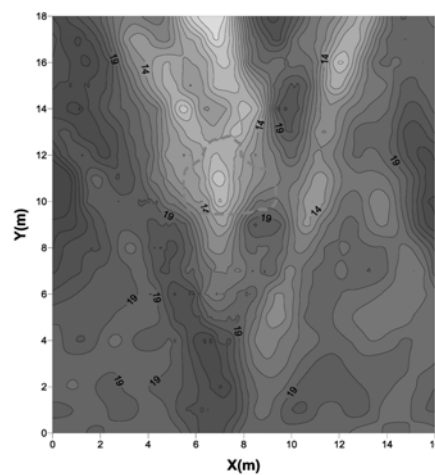
실험결과와 계산결과와의 정량적 일치정도를 고찰하기 위하여 암초 정상부 전후에 4개의 계측선을 설치하여 파고를 구한 후 선형과 계산결과와 함께 Fig. 17에 도시하였

다. 암초 정상부 (b)와 직 전·후(a, c)에서는 이들 두 수치 해석 결과와 실험결과 사이에 대체로 양호한 일치정도를 보인다. 그러나, 하류쪽 (d)에서는 선형과 결과는 특유의 파고돌출을 보이거나 Boussinesq 모델 결과는 수리실험과 유사한 저파고 분포를 보이고 있다.

저파고대에서의 파고분포를 보면 Boussinesq 모델의 계산치가 실험치에 비하여 다소 과소 계산된 것을 볼 수 있다. 이는 앞서 Vincent and Briggs(1989)의 실험을 대상으로 한 계산 결과와 반대이다. 이 차이에 대한 원인은 계산 증분치(Δx 및 Δt)의 과도한 설정, 수중 천퇴에서의 강비선형 파랑변형에 대한 약 비선형 Boussinesq 모델의 적



(a) Hydraulic model experiment



(b) Boussinesq eq.

Fig. 16. Wave height contour on the Ieodo rocks (unit: cm).

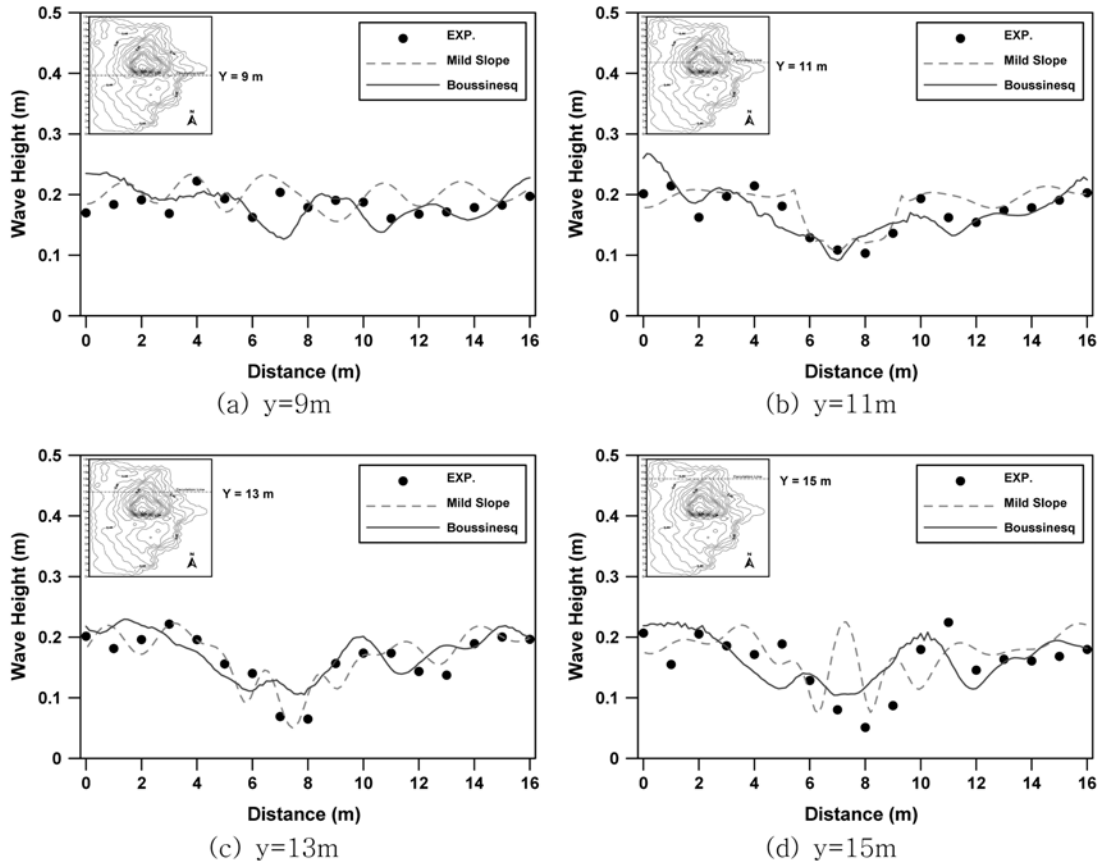


Fig. 17. Wave height along the measurement lines in the experiment with the leodo rocks.

용, 쇄파모델의 불확실성 등에 기인된 것으로 보인다. 계산 증분치(공간, 시간 증분)의 미세한 설정은 수치해석결과의 정확성 제고에 분명한 도움이 될 것으로 판단된다. 기존의 Boussinesq 모델에 관련된 연구들을 살펴보면 수심 0.5 m 정도에서 $\Delta x=0.02$ m, $\Delta t=0.01\sim 0.02$ 초로 하였으나 본 연구에서는 수치실험의 수월성을 위하여 Vincent and Briggs 실험의 경우는 $\Delta x=0.15$ m, $\Delta t=0.026$ 초로, 이어도 실험의 경우는 $\Delta x=0.125$ m, $\Delta t=0.0173$ 초로 하였다. 격자간격이 클수록 미분항들의 유한차분화 과정에서 발생하는 절단오차(truncation error)가 누적되어 전체적인 파고 분포를 왜곡시킬 가능성이 있다. 본 연구에서 취급한 파동장의 파 진행거리는 30 m 이내(15파장 이내)로서 절단오차에 의한 수치감쇠는 크지 않을 것으로 판단되나 쇄파 시 발생하는 첨예성 수면변위를 적절히 포착하기 위해서는 격자간격을 가급적이면 작게 유지하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 단, 프로그램의 병렬화 등 계산시간의 단축

을 위한 노력이 병행되어야 한다.

본 연구에서 취급한 Vincent and Briggs의 천퇴는 정상부 수심이 약 0.15 m, 이어도 수중 암초는 약 0.07 m로서 정상부 근방에서 수심대비 파고의 비가 그다지 작지 않기 때문에 엄격히는 약비선형 모델의 적용범위를 벗어난다. 강 비선형 모델은 Wei et al.(1995)에서 시작하여 최근의 Madsen et al.(2003)에 이르기 까지 분산성과 비선형성을 개선한 모델들이 제시되고 있다. 현재 강비선형 모델의 2차원 적용(특히 실험역 적용)에서 수치해석의 안정성이 쉽게 와해되는 문제점이 자주 발생하나 이를 개선하면 천퇴 정상부에서의 쇄파거동을 보다 정확히 해석할 수 있을 것으로 판단된다.

쇄파모델로서 본 연구에서는 외점성 계수모델을 사용하였으나 조정 가능한 매개변수가 4개가 존재하기 때문에 사용에 불편이 따른다. 더욱이, 본 연구에서의 민감도 분석과 이어도 수리실험 결과와의 비교를 통하여 볼 때 이들

쇄파 매개변수의 값들이 보편적으로 설정될 수 있는 것이 아니고 수중 천퇴의 세부적 제원에 따라 민감하게 변하는 것으로 보인다. 최근, Musumeci et al.(2005)은 비록 1차원적인 예시단계이긴 하나 일종의 폐합모형을 제시하고 있다. 이와 같이 실험적 매개변수의 개수를 최소화하며 쇄파에 의한 난류를 모의할 수 있는 보편적인 폐합모형의 개발이 필요할 것으로 보인다.

상기 실험결과의 분석에서는 포함되지 않았으나 천퇴 정상부에서 쇄파발생에 의한 심한 포말이 발생할 수 있으며 경우에 따라서는 파 주기마다 천퇴 정상부가 공기에 간헐적으로 노출될 수가 있다(이어도 실험에서도 실제 발생하였음). 이 경우에는 파고계측과 수치해석 공히 오차가 발생하게 된다. 수치해석에서의 이 오차는 하류 쪽 파고분포 계산에도 영향을 주어 결과적으로 실험결과와의 차이를 발생시킬 수도 있다. 수치해석에서 이에 대한 보완방법이 강구될 필요가 있다.

6. 결 론

수중 천퇴 정상부에서 쇄파가 발생할 시 천퇴 주변에 파랑류가 형성되고 이 파랑류는 다시 파랑과 작용하여 주변 파고분포를 변화시킬 수 있다. 본 연구에서는 쇄파발생 시 파랑과 파랑류의 평형계를 직접 해석할 수 있는 Boussinesq 방정식 모델을 수립하고 이를 Vincent and Briggs(1989)의 수리실험 중 쇄파조건들에 대하여 적용한 후 그 결과를 수리실험 결과와 비교하였다. 사용된 쇄파모형은 쇄파감쇠항을 모멘텀 방정식에 포함시키는 일종의 와점성 계수 모델로서 쇄파시작 및 지속조건과 와점성 계수의 결정에 관련된 여러 쇄파 매개변수들의 적절한 조합을 통하여 쇄파 양상을 재현할 수 있다. 세부적 연구결과는 다음과 같다.

- 천퇴 정상부에서 쇄파가 발생하는 경우 주변 특히 하류 쪽의 수면변위 양상은 비쇄파 경우와 판이한 것으로 나타났다. 규칙파 조건을 예를 들어, 비쇄파 경우에는 하류 쪽에 서로 위상이 다른 파 진행 열이 대칭구조로 반복 형성되며 종방향 중앙선에서 파고가 돌출되어 있는 고파고대를 형성한다. 그러나, 쇄파의 경우에는 파 진행열의 반복구조가 뚜렷하지 않으며 중앙선에서 파 진행방향으로 향하는 강한 쇄파유도류가 발생함에 따라 오히려 저파고대가 형성되는 것으로 나타났다.

- Vincent and Briggs(1989)의 수리실험 자료를 이용한 민감도 분석을 통하여 와점성계수의 쇄파모형에 포함되어 있는 매개변수들의 적정치를 제시하였다. Boussinesq 모델

에 이들 매개변수들을 입력하여 일방향 또는 다방향 불규칙파 조건에 적용한 결과 다소의 정량적 차이는 있으나 파고분포 및 파랑류 형성이 비교적 잘 재현되었다. 반면, 완경사방정식을 이용하는 선형파 모델의 적용에서는 천퇴 정상부 하류 쪽에 여전히 고파고대가 나타났다. 이를 고려할 때 쇄파대 부근의 파고분포와 파랑류 형성을 예측하기 위하여 본 쇄파개념의 Boussinesq 모델이 매우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

- 천연 수중암초인 이어도 주변의 파랑변형을 계산하여 수리모형실험 결과와 비교한 결과, 암초 하류 쪽에 비대칭성 쇄파유도류가 잘 형성되며 계산파고와 계측파고가 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

본 연구에서 조율된 쇄파 매개변수는 수중 천퇴에서의 파랑변형에 대한 것이며 경사면이나 연안사주(longshore bar) 등에서 쇄파가 발생하는 경우는 다소 다른 값을 가질 수 있다. 또한, 매개변수가 본 쇄파모델처럼 다수 존재할 경우 서로 다른 쇄파발생 경우마다 적정 매개변수의 값들을 개별적으로 정하기가 매우 어렵다. 궁극적으로 매개변수의 값들을 실험이 아닌 이론적 모형을 통하여 결정하여 모든 쇄파발생 경우에 보편적으로 적용할 수 있는 쇄파모델의 개발이 요구된다.

사 사

본 연구는 한국해양연구원에서 수행하는 이어도 종합해양과학기지의 활용연구 중 “비선형 불규칙 파랑전파모델의 쇄파거동에 대한 수치해석” 사업(2005.6.1-2006.1.31)의 결과를 발췌한 것임.

참고문헌

- 전인식, 심재설(2005). 이어도 주변 파고분포에 대한 수리모형실험. 한국해양·해양공학회지, 17(1), 55-59.
- 전인식, 성상봉, 김귀동, 심재설(2005). Boussinesq 방정식을 이용한 수중 천퇴에서의 파랑변형 및 파랑류 계산. 한국해양·해양공학회지, 17(3), 202-212.
- Borgman, L.E. (1984). Directional spectrum estimation for the gages. Tech. Rep. CHL-97-24, United States Army Corps of Engineers (USACE), Waterway Experiment Station.
- Dally, W.R., Dean, R.G. and Dalrymple, R.A. (1985). Wave height variation across beaches of arbitrary profile. J. of Geophys. Res., 90(C6), 11917-11927.
- Heitner, K.L. and Housner, G.W. (1970). Numerical model for

- tsunami run-up. *J. Waterw. Harbors Coastal Eng. Div.*, ASCE, 96, 701-719.
- Horikawa, K. and Kuo, C.T. (1966). A study on wave transformation inside surf zone. *Proc. 10th Coastal Eng. Conf.*, ASCE, 217-233.
- Karambas, Th.V. and Koutitas, C. (1992). A breaking wave propagation model based on the Boussinesq equations. *Coastal Engineering*, 18, 1-19.
- Kennedy, A.B., Chen, Q., Kirby, J.T. and Dalrymple, R.A. (2000). Boussinesq modeling of wave transformation, breaking, and runup I: 1D. *J. Waterway, Ports, Coastal and Ocean Eng.*, 126(1), 39-47.
- Le Mehaute, B. (1963). On non-saturated breakers and the wave run-up. *Proc. 8th Int. Conf. on Coastal Eng.*, ASCE, 77-92.
- Madsen, P.A., Bingham, H.B. and Liu, H. (2002). A new Boussinesq method for fully nonlinear waves from shallow to deep water. *J. Fluid Mech.*, 462, 1-30.
- Musumeci, R., Svendsen, I.A. and Veeramony, J. (2005). The flow in the surf zone: a fully nonlinear Boussinesq-type of approach. *Coastal Engineering*, 52, 565-598.
- Nwogu, O. (1993). Alternative form of Boussinesq equation for nearshore wave propagation. *J. Waterway, Port, Coast. and Oc. Engrg.*, ASCE, 119(6), 618-638.
- Schäffer, H.A., Madsen, P.A. and Deigaard, R. (1993). A Boussinesq model for waves breaking in shallow water. *Coastal Engineering*, 20, 185-202.
- Shapiro, R. (1970). Smoothing, filtering, and boundary effects. *Review of Geophysics and Space Physics*, 8(2), 359-386.
- Sorensen, O.R., Schäffer, H.A. and Madsen, P.A. (1998). Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq type model. III. Wave-induced horizontal nearshore circulations. *Coastal Engineering*, 33, 155-176.
- Strybny, J. and Zielke, W. (2000). Extended viscosity concepts for wave breaking in Boussinesq type models. *Proc. 27th Coastal Eng. Conf.*, ASCE, 1307-1320.
- Svendsen, I.A. (1984). Wave heights and setup in a surf zone. *Coastal Engineering*, 8(4), 303-329.
- Vincent, C.L. and Briggs, M.J. (1989). Refraction-diffraction of irregular waves over a mound. *J. Waterway, Port, Coast. and Oc. Engrg.*, ASCE, 115(2), 269-283.
- Wei, G., Kirby, J.T., Grilli, S.T. and Subramanya, R. (1995). A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves, Part 1, highly nonlinear unsteady waves. *J. Fluid Mechanics*, 294, 71-92.
- Yoon, S., Cho, Y. and Lee, C. (2004). Effects of breaking-induced currents on refraction-diffraction of irregular waves over submerged shoal. *Ocean Engineering*, 31, 633-652.
- Zelt, J.A. (1991). The run-up of nonbreaking and breaking solitary waves. *Coastal Engineering*, 15, 205-246.

Received January 16, 2006

Accepted June 1, 2006