

Boussinesq 방정식을 이용한 수중 천퇴에서의 파랑변형 및 파랑류 계산 Calculation of Wave Deformation and Wave Induced Current around an Underwater Shoal by Boussinesq Equation

진인식* · 정상봉* · 김귀동* · 심재설**

Insik Chun*, Sangbong Seong*, Guidong Kim* and Jaeseol Sim**

요 지 : 수중 천퇴 인근에 해양구조물을 설치하는 경우, 구조물에 작용하는 설계하중을 구하기 위하여 파고뿐만 아니라 천퇴 주변 파랑변형에 의하여 이차적으로 발생된 파랑류를 아울러 고려하여야 한다. 본 연구에서는 천퇴 주변의 파랑변형과 파랑류를 계산하기 위하여 비선형 Boussinesq 방정식 모델과 선형 완경사방정식 모델을 각각 적용하였다. 대상 천퇴는 Vincent and Briggs(1989)의 수리실험에서의 동일하며 실험조건은 규칙파, 일방향 또는 다방향 불규칙파 입사를 포함하는 비쇄파조건으로 하였다. 두 수치모델은 공히 천퇴 중심선을 따라 파랑류가 대칭적으로 형성됨을 잘 보여주었다. 그리고 수리실험에서의 파고계측선을 따라 계산된 파고변화는 전체적으로 실험결과와 잘 일치하였다.

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

Abstract : In the design of an offshore structure located near an underwater shoal, the same amount of attention given to the wave height may have to be put to the wave induced current as well since some of the wave energy translates to the current. In the present study, two numerical models each based on the nonlinear Boussinesq equation and the linear mild slope equation are applied to calculate the wave deformation and secondly induced current around a shoal. The underwater shoal in Vincent and Briggs' experiment (1989) is used here, and all non-breaking wave conditions of the experiment with various monochromatic and unidirectional or multidirectional spectral wave incidences are concerned. Both numerical models clearly showed wave induced currents symmetrically formed along the centerline over the shoal. The calculated wave heights along a preset line also generally showed very nice agreements with the experimental values.

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

1. 서 론

해양공간의 이용과 해저 천연자원 개발의 필요성이 증가함에 따라 인위적 해양구조물을 비교적 얇은 수심을 갖는 수중 천퇴 인근에 설치하는 경우가 발생하고 있다. 2002년도에 제주도 서남해역에 설치된 이어도 해양과학 기지도 정상부 수심이 4.5 m에 불과한 수중 압초인근에

설치된 것이다(한국해양연구원, 1999). 이와 같은 수중압초 인근에서의 파랑변형은 쇄파를 포함한 매우 복잡한 비선형 변형과정을 겪게 되며 파고의 공간적 차등에 따른 이차적 파랑류가 발생한다.

일반적으로 해양구조물은 입사파의 파고와 주기를 Morison식에 입력하여 파력 및 모멘트를 계산하는 것이 관례이다. 그러나, 수중 천퇴 인근에서와 같이 파랑과 호

*건국대학교 토목공학과(Corresponding author: In SiK Chun, 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)

름(파랑류)이 복합되어 있는 경우에는 파고는 비록 작으나 흐름 유속에 의한 항력이 상대적으로 커 이를 무시하고 파고만을 가지고 계산한 파력을 설계하중으로 채택할 경우 과소설계를 초래할 가능성이 있다. 이미 전 등(2000)과 최 등(2000)은 이어도 해양과학기지의 수리모형실험 및 수치해석을 통하여 파랑류에 의하여 모리슨 파력을 훨씬 능가하는 유체력이 발생할 수 있음을 보인 바 있다. 이와 같이, 해양구조물에 작용하는 유체력을 정확히 결정하기 위해서는 파고에 근거한 파력뿐만 아니라 파랑류에 의한 항력을 동시에 고려하여야 한다.

수중천퇴에서의 파랑류는 파고의 공간적 차등에 따른 잉여응력(radiation stress)의 공간적 분포에 의하여 발생한다. 이렇게 발생한 파랑류는 역으로 모체가 된 파랑의 파고 및 파향을 변화시키며, 변화된 파랑은 다시 파랑류의 변화를 일으킨다. 파랑과 파랑류의 공존상태는 이와 같은 상호 순환관계(feed-back)를 갖는 일종의 평형계이다. 지금까지의 파랑-파랑류의 평형계를 해석하는 방법은 먼저 흐름효과를 고려할 수 있는 파랑전파 수치모델을 통하여 파고분포 및 잉여응력 분포를 구하고 이들을 해수유동모델에 입력하여 파랑류의 흐름장을 결정한다. 다음 이 결과를 파랑모델(흐름효과 고려)에 입력하여 수정된 잉여응력장을 구하고 이를 이용하여 흐름장을 다시 계산하는 일련의 반복과정을 갖는다. Yoon et al.(2001)은 포물형 완경사방정식과 천수방정식을 결합하여 천퇴에서의 파랑변형과 파랑류의 발생을 수치적으로 모의한 바 있으며 천퇴하류에서 발생하는 파랑류에 의하여 천퇴이후 쇄파대에서의 파고분포가 낮게 나타남을 보인 바 있다.

본 연구에서 취급한 파랑모델은 Boussinesq 방정식을 이용하는 비선형 모델로서 지배방정식에 이미 수면변위와 유속성분이 원초적으로 결합되어 있다. 따라서, 파랑류를 결정하기 위하여 잉여응력을 별도로 구할 필요가 없으며 파랑류는 결정된 유속성분을 소정의 시간동안 평균하여 파랑의 왕복성 유속성분을 제거한 일종의 평균흐름 형태로 구해질 수 있다. 또한, 본 Boussinesq 방정식 모델은 직접 불규칙파를 입력할 수 있어 선형과 모델의 경우처럼 해를 선형합성할 필요가 없다. 본 연구에서는 수중 천퇴에서의 파랑변형과 파랑류 형성에 대한 본 Boussinesq 모델의 적용성을 고찰하기 위하여 Vincent and Briggs (1989)의 실험 중 비쇄파조건에 한정하여 파고분포를 계산하고 실험결과와 비교하였다. 파랑류 계산결과에 대해서는 현재로서는 실험결과가 가용하지 않기 때문에 기존의 완경사방정식의 선형과 모델과 해수유동모델을 결합하

여 구한 파랑류 계산결과와 비교하는 식의 간접적인 방법을 택하였다.

2. 지배방정식

2.1 Boussinesq 방정식 모델

본 연구의 수치해석에 사용된 Boussinesq 방정식은 Nwogu (1993)가 제안한 약비선형 형태이며 Wei et al.(1995)이 제안한 강비선형 모델에서의 방정식 형태를 참조하면 다음과 같다.

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

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

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

여기서,

$$U = u + h \left[b_1 h \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + b_2 \frac{\partial(hu)}{\partial x^2} \right] \tag{4}$$

$$V = v + h \left[b_1 h \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + b_2 \frac{\partial(hv)}{\partial y^2} \right] \tag{5}$$

$$E = - \left[\frac{\partial}{\partial x} \{ (h + \eta)u \} + \frac{\partial}{\partial y} \{ (h + \eta)v \} \right] - \frac{\partial}{\partial x} \left[a_1 h^3 \left\{ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} \right\} + a_2 h^2 \left\{ \frac{\partial^2(hu)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(hv)}{\partial x \partial y} \right\} \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left[a_1 h^3 \left\{ \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right\} + a_2 h^2 \left\{ \frac{\partial^2(hu)}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2(hv)}{\partial y^2} \right\} \right] \tag{6}$$

$$F = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) \tag{7}$$

$$G = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) \tag{8}$$

$$F_1 = -h \left[b_1 h \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + b_2 \frac{\partial^2(hv)}{\partial x \partial y} \right] \tag{9}$$

$$G_1 = -h \left[b_1 h \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + b_2 \frac{\partial^2(hu)}{\partial x \partial y} \right] \tag{10}$$

이며, $a_1 = 0.5\beta^2 - 1/6$, $a_2 = \beta + 0.5$, $b_1 = 0.5\beta^2$, $b_2 = \beta$, $\beta = z_a/h$, 이다. 또한, $f(x, y, t)$ = 조파항, (F_b, G_b) = 바닥마찰항, (F_{br}, G_{br}) = 쇄파감쇠항, (F_{bs}, G_{bs}) = 격자내 혼합항(subgrid mixing), (F_{sp}, G_{sp}) = 스폰지 감쇠항이다.

식 (1)~(3)에서 미지수는 수면변위 η , 임의 위치 $z_a = -0.531 \text{ m}$ 에서의 유속성분(u, v)이다. 이들을 구하기 위한 수치해석 방법은 Kirby et al.(1998)이 프로그램 FUNWAVE에서 사용한 Predictor-Corrector 방법을 사용하였다. 각 도함수들의 차분화는 5점 중앙차분을 사용하되 경계면 절점 및 인근에서는 5점 전방차분, 5점 후방차분 및 3점 중앙차분을 이용하였다. 혼합도함수(mixed derivatives)에 대해서는 주변 4점을 이용한 중앙차분을 사용하되 경계면 절점에서는 기 결정된 x 방향 차분값을 이용하여 y 방향으로 5점 또는 3점 차분을 적용하였다.

본 수치해석에서는 비쇄파 입사조건을 대상으로 하였기 때문에 쇄파감쇠항을 제외하였으며, 계산영역 중 비교적 지형변화가 완만한 수중천퇴를 대상으로 하기 때문에 격자내 혼합항을 제외하였다. 스폰지 감쇠항은 FUNWAVE와 동일하게 Newtonian cooling 기법을 이용하여 계산영역의 네 변에 설치하였다.

조파항은 FUNWAVE에서의 원천함수법(Source function method)을 사용하여 조파대를 계산영역의 3변 즉, 하변과 좌·우변 인근에 설치하였다. 규칙파와 일방향 불규칙파는 하변의 조파대를, 그리고 다방향 불규칙파는 3변의 조파대를 모두 가동하였다.

본 수치해석은 계산과정 중 여러 비선형항들의 상호작용에 의하여 파장이 매우 짧은 파들(superharmonics)이 생성된다. 또한, 본 수치해석에서는 제외하였으나 쇄파가 발생하게 되어 쇄파감쇠항(F_{br}, G_{br})을 적용할 경우 쇄파점 수면 및 유속에 갑작스런 불연속이 초래되어 해가 쉽게 불안정해진다. 이와 같은 수치적 오차들이 계속 누적될 경우 해가 발산하므로 반복계산 과정 중 주기적으로 평활 필터를 적용하여 수치오차를 제거하여 주어야 한다. 여기에서는 반복계산 중 매 10 입사파 주기마다 한 번씩, 그리고 매 50번 연속적 쇄파발생 시마다 한번씩 Shapiro (1970)의 필터를 적용하는 것으로 하였다.

2.2 환경사방정식 및 해수유동 모델

환경사방정식은 다음과 같이 수면변위 η , 선유량 벡터(Q_x, Q_y)를 미지수로 하는 시간의존형 환경사방정식을 사용하였다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{n} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (nQ_x) + \frac{\partial}{\partial y} (nQ_y) \right\} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} + c^2 \frac{\partial \eta}{\partial x} + (f_D + f_B) Q_x = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial Q_y}{\partial t} + c^2 \frac{\partial \eta}{\partial y} + (f_D + f_B) Q_y = 0 \quad (13)$$

여기서, n =천수변형 파라미터, c =파속, f_D =바닥마찰 감쇠계수, f_B =쇄파 감쇠계수이다.

수치해석을 통하여 (η, Q_x, Q_y)를 구한 후 잉여응력 (radiation stress)을 다음과 같이 구할 수 있다(Watanabe and Maruyama, 1986).

$$\frac{1}{\rho g} S_{xx} = \frac{n \overline{Q_x^2}}{2c^2} + \frac{(2n-1)\overline{\eta}^2}{4} + \Gamma \quad (14)$$

$$\frac{1}{\rho g} S_{yy} = \frac{n \overline{Q_y^2}}{2c^2} + \frac{(2n-1)\overline{\eta}^2}{4} + \Gamma \quad (15)$$

$$\frac{1}{\rho g} S_{xy} = \frac{1}{\rho g} S_{yx} = \frac{n \overline{Q_x Q_y}}{2c^2} \cos(\varepsilon_x - \varepsilon_y) \quad (16)$$

여기서, $\overline{Q_x}, \overline{Q_y}, \overline{\eta}$ 는 선유량과 수면변위의 진폭, $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ 는 선유량의 위상이며, Γ 는 선유량과 수면변위의 진폭 및 위상으로부터 결정되는 파라미터이다.

파랑류 발생력은 상기 잉여응력의 공간적인 분포에 의하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_x = \frac{1}{\rho(h+\overline{\eta})} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) \quad (17)$$

$$R_y = \frac{1}{\rho(h+\overline{\eta})} \left(\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) \quad (18)$$

파랑류에 의한 수면변위 η_s 및 수심평균유속 벡터(U, V)는 상기(R_x, R_y)를 다음과 같이 해수유동 방정식에 입력하여 구할 수 있다.

$$\frac{\partial \eta_s}{\partial t} + \frac{\partial(h+\eta_s)U}{\partial x} + \frac{\partial(h+\eta_s)V}{\partial y} = 0 \quad (19)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + F_x - M_x + R_x + g \frac{\partial \eta_s}{\partial x} = 0 \quad (20)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + F_y - M_y + R_y + g \frac{\partial \eta_s}{\partial y} = 0 \quad (21)$$

여기서, (F_x, F_y)는 바닥마찰항, (M_x, M_y)는 수평혼합항이다.

상기 환경사방정식 및 해수유동방정식과 이들의 해법은 전인식(2000)에 상세히 기술되어 있다. 본 연구에서는 규칙파에 대해서는 환경사방정식과 해수유동방정식을 해석하였으며, 불규칙파에 대해서는 여러 성분파에 대하여 환경사방정식을 적용하여 매 시간중분마다 계산결과를 선

형 합성하는 방식을 취하였다.

3. 수치모델의 적용

수치모델들의 적용은 Vincent and Briggs(1989) 수리 실험에서의 수중 천퇴를 대상으로 하였다. Fig. 1의 수중 천퇴의 기하학적 정의는

$$\left(\frac{x}{3.05}\right)^2 + \left(\frac{y}{3.96}\right)^2 = 1 \quad (22)$$

$$h = h_s - 0.7620 \left\{ 1 - \left(\frac{x}{3.8125}\right)^2 - \left(\frac{y}{4.95}\right)^2 \right\}^{0.5} \quad (23)$$

와 같다. 여기서, h 는 천퇴위에서의 수심, h_s 는 천퇴 밖 평탄지에서의 수심이며 0.4572 m이다.

수치모델적용은 Vincent and Briggs가 수행한 총 17 실험조건에서 비쇄파 조건만을 대상으로 하였다. Table 1에서 파라미터 α , γ 는 TMA 스펙트럼의 파라미터이며,

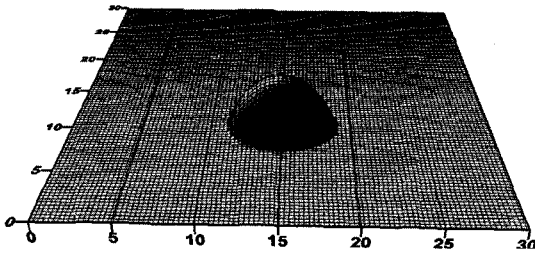


Fig. 1. Vincent and Briggs' shoal.

σ_m 은 Borgman (1984)의 방향분산함수 파라미터이다. σ 가 클수록 주파수 스펙트럼의 첨두성이 증가하며, σ 가 클수록 파향의 분산성이 증가한다. 여기에서는 성분파의 주파수와 방향을 각각 50개로 나누어 성분파를 구한 다음, 각각의 원천함수를 선형합성하여 조파항을 입력하였다. 성분파 주파수는 주기 0.5~2.5초에 해당하는 주파수대를 등간격으로 분할하여 설정하였다.

계산영역은 Fig. 2와 같이 설정하였다. 수리실험에서는 천퇴중앙이 수조 종방향 중심선에서 다소 우측에 위치하였으나 본 수치해석에서는 계산결과에 대한 정확성을 확인하기 위하여 천퇴의 중앙을 계산영역의 중심선에 위치시켰다. 조파대의 중심선은 하변과 좌우변에서 각각 2L 만큼 이격하여 폭 L로 설정하였다(여기서, L은 유의파 파장이며 수심 $d=0.4794$ m에서 $L=2.255$ m). 또한, 계산영역 네 변에서의 스폰지 층은 모두 폭 L로 설정하였다.

계산은 모든 실험조건 공히 300주기 동안 수행하였으며, 계산격자간격은 $\Delta x = \Delta y = 0.15$ m로 하였다. 시간중분 Δt 는 프로그램내부에서 Courant 조건을 만족하도록 자동계산되는 식으로 하였으며, 여기에서는 약 0.026초이다.

수치파고계는 Fig. 2가 보이는 바와 같이 수리실험과 동일하게 폭이 10m이며 하변에서 16.61 m 만큼 이격된 횡선을 따라 각 격자점마다 설치하였다. 또한, 천퇴이전 좌하부에 참조점 파고계를 설치하였다. 파고자료 분석은 총 300주기 중 마지막 200주기를 대상으로 하였다. 참고로 Vincent & Briggs는 규칙파에 대해서는 28파주기

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

Case ID (2)	Type (3)	Period (sec) (4)	Height (m) (5)	α (6)	γ (7)	γ_m (8)
M1	규칙파	1.30	0.0550	-	-	-
M2	"	1.30	0.0254	-	-	-
U1	일방향 불규칙	1.30	0.0775	0.01440	2	0
U2	"	1.30	0.0775	0.00440	20	0
U3	"	1.30	0.0254	0.00155	2	0
U4	"	1.30	0.0254	0.00047	20	0
N1	다방향 불규칙	1.30	0.0775	0.01440	2	10
N2	"	1.30	0.0775	0.00440	20	10
N3	"	1.30	0.0254	0.00155	2	10
N4	"	1.30	0.0254	0.00047	20	10
B1	다방향 불규칙	1.30	0.0775	0.01440	2	30
B2	"	1.30	0.0775	0.00440	20	30
B3	"	1.30	0.0254	0.00155	2	30
B4	"	1.30	0.0254	0.00047	20	30

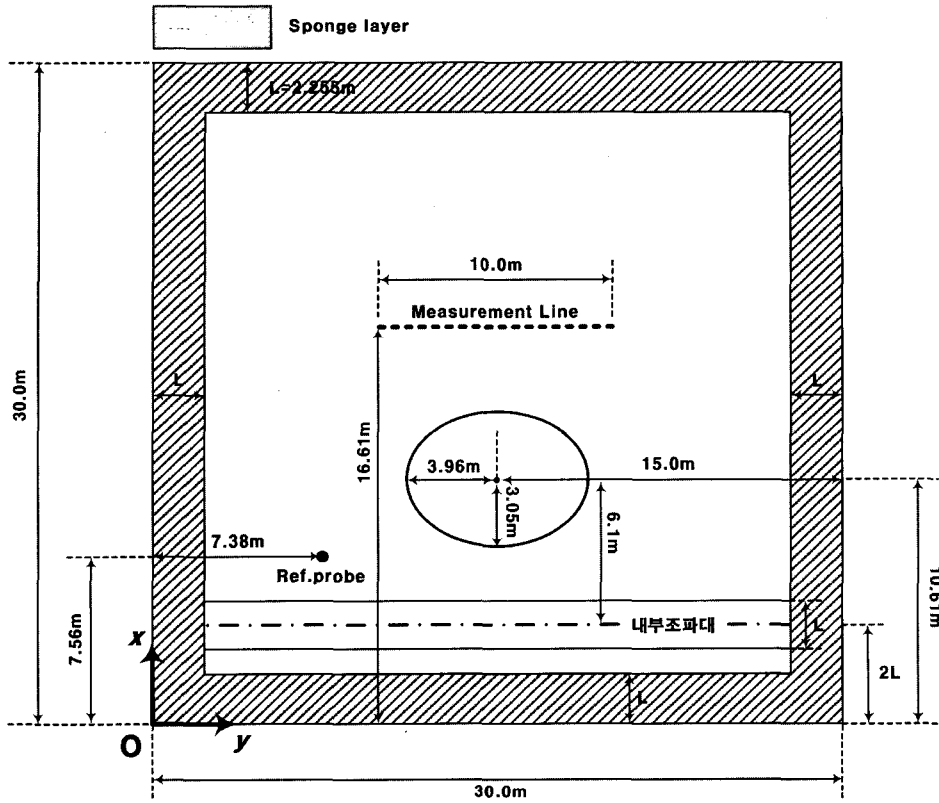
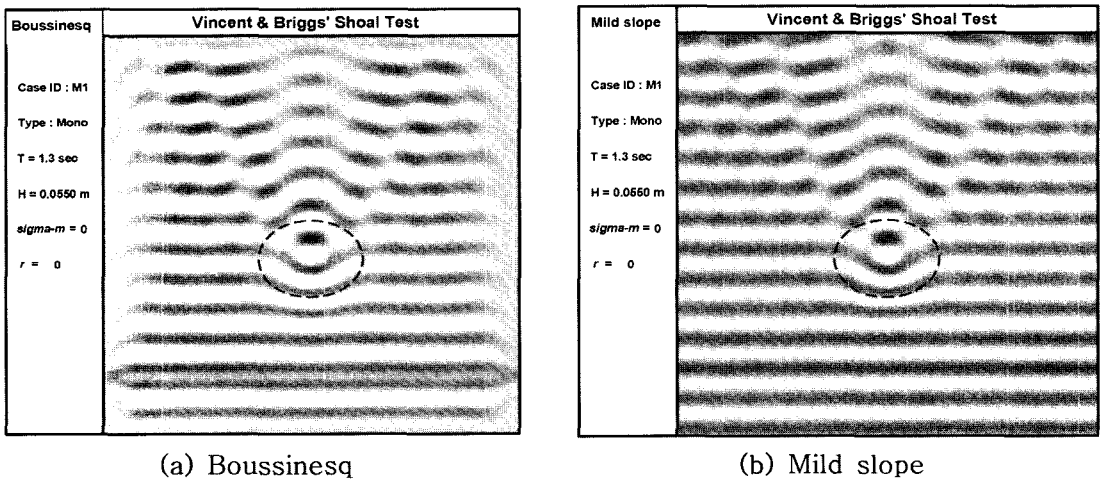


Fig. 2. Experimental condition for Vincent and Briggs' shoal.



(a) Boussinesq

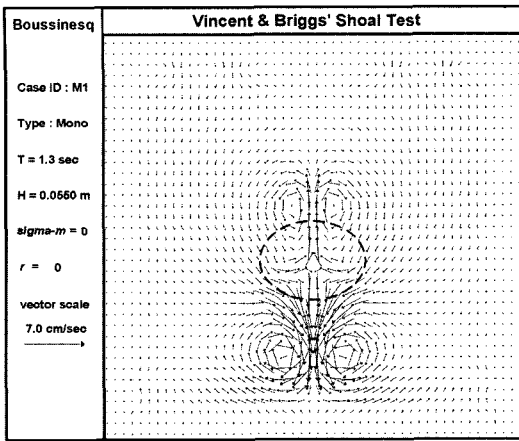
(b) Mild slope

Fig. 3. Water surface displacements for monochromatic wave (Case ID: M1).

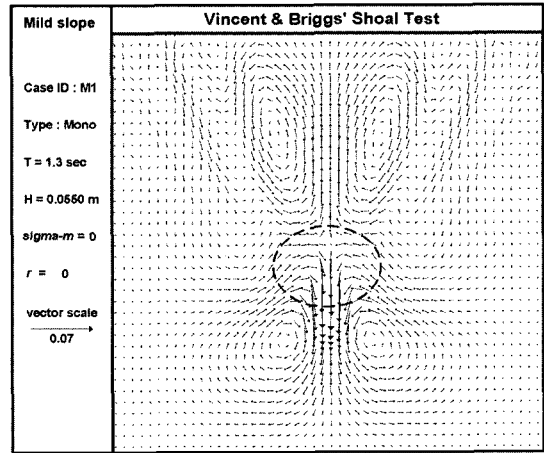
를 계측하였으며, 불규칙파에 대해서는 조파시작 후 충분한 시간을 기다린 다음 200주기 (첨두주기)를 계측하였다.

4. 계산결과 및 분석

Table 1의 실험조건에 대하여 Boussinesq 방정식과 완



(a) Boussinesq



(b) Mild slope

Fig. 4. Wave induced currents for monochromatic wave (Case ID: M1).

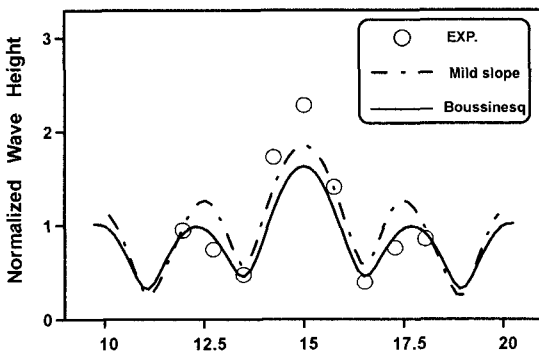
경사방정식(Mild slope equation)을 각각 적용하여 수면변위, 파고변화 그리고 파랑류를 계산하였다.

4.1 규칙파 계산결과

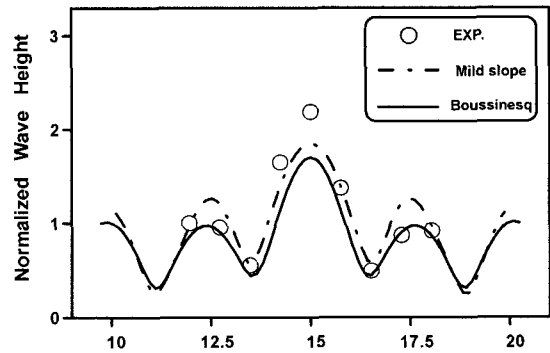
실험조건에 대한 수면변위를 Boussinesq 모델과 완경사방정식 모델에 의하여 각각 구하여 Fig. 4에 제시하였다. Boussinesq 모델에 의한 수면변위가 조파선 및 스폰지층을 제외하고는 전반적으로 완경사방정식 모델에 의한 수면변위와 유사하게 발생한다. 천퇴 외 평탄수심 (0.4572 m)에서 $d/L = 0.21$ 이며 대략적으로 $d/L < 0.5$ 에서 유효한 본 약비선형 Boussinesq 방정식이 본 실험조건을 잘 재현하고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 4는 실험조건 M_1 에 대하여 Boussinesq 모델과 완경사방정식 모델을 적용한 파랑류 계산결과이다. Boussinesq 모델의 결과가 일종의 정상해인 반면 완경사방정식의 결과는 파랑류의 부재 시의 계산결과를 가지고 파랑류를 계산한 일종의 비정상해이기 때문에 이들은 당연히 일치하지 않는다. 그러나, 공허 천퇴 하류쪽에서 파 입사방향과 동일하게 흐르는 파랑류가 형성되어 있음을 볼 수 있다. 또한, 천퇴 상류쪽에서는 오히려 파랑과 역방향으로 최대 약 5.8 cm/s의 흐름이 형성되어 있다. 이와 같은 흐름의 형성은 파랑-흐름의 상호작용에 의하여 파고를 감소시키거나 증폭시키는 역할을 할 수 있다.

실험조건 M_1 과 M_2 에 대한 계산파고를 참조점 계산과

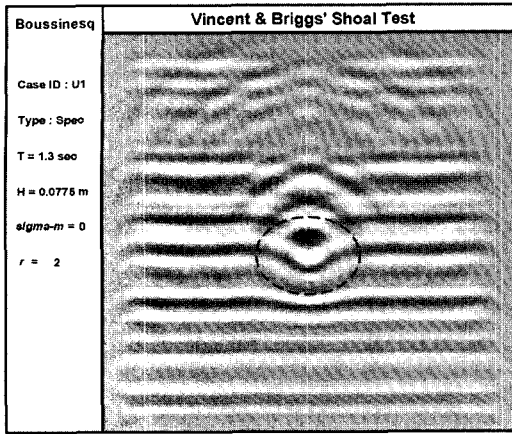


(a) Case ID : M1

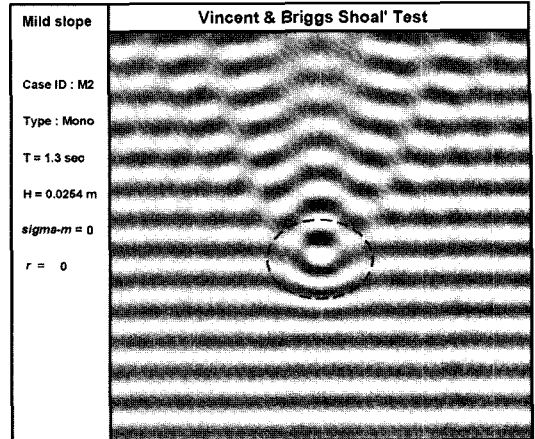


(b) Case ID : M2

Fig. 5. Normalized wave heights along transect4 for monochromatic wave (Case ID: M1, M2).



(a) Boussinesq



(b) Mild slope

Fig. 6. Water surface displacements for unidirectional wave (Case ID: U1).

고로 나누어 이 결과를 실험결과와 함께 Fig. 5에 도시하였다. 전반적으로 잘 일치하고 있으나 천퇴 중심선에서 실험결과가 계산결과를 상회함을 볼 수 있다. 또한, 파랑-흐름의 상호작용이 구현되는 Boussinesq 모델의 결과가 그렇지 않은 완경사방정식 모델의 결과보다 파고비가 작게 발생함을 볼 수 있다.

4.2 일방향 불규칙파 계산결과

실험조건 의 일방향 불규칙파에 대한 계산결과를 Fig. 6~Fig. 8에 도시하였다. 계산결과와 실험결과가 비교적 잘

일치함을 볼 수 있다. 특히, 천두치에서의 차이가 많이 감소되어 있다. 이는 불규칙파에 의한 분산효과에 기인한 것으로 볼 수 있으며, 또한 본 불규칙파 수리실험에서는 조파시작 후 충분한 시간이후에 계측을 착수함으로써 규칙파의 경우에 비하여 파랑-파랑류의 상호작용이 비교적 잘 재현되었기 때문인 것으로 판단된다.

4.3 다방향 불규칙파 계산결과

다방향 불규칙파인 실험조건 계열과 계열에 대한 Boussinesq 계산결과를 각각 Fig. 9~Fig. 11, Fig. 12~Fig. 14에 나타내었다. 일방향 파랑 입사와는 달리 완전한 대칭성을 발견할 수 없다. 이는 방향에 대한 각 성분파의 위상이 서로 다르게 설정되었기 때문이다.

B계열은 N계열에 비하여 방향분산함수의 폭이 비교적 넓게 분포되어 있기 때문에 천퇴에서의 뚜렷한 파랑변형이 포착되지 않는다. Fig. 10에서 천퇴상류에서 파랑류가 미세하게 형성되어 있으며 천퇴하류에서는 뚜렷한 흐름형성을 발견할 수 없다. Fig. 11에서 계산결과가 실험결과와 잘 일치함을 볼 수 있다.

방향분산함수가 비교적 협소한 N계열에서는 천퇴에서의 파랑변형이 탁월하게 나타난다. Fig. 13에서 미세하나마 천퇴 상·하류에서 파랑류가 형성되어 있음을 볼 수 있다. Fig. 14에서 주파수 스펙트럼의 폭이 상대적으로 넓은 N_1 과 $N_3(\gamma=2)$ 에서는 계산결과와 실험결과가 잘 일치하나, 주파수 스펙트럼 폭이 좁은 N_2 와 $N_4(\gamma=20)$ 에서는 천퇴 중심선 우측에서는 성향은 유사하나 일치정도가 다

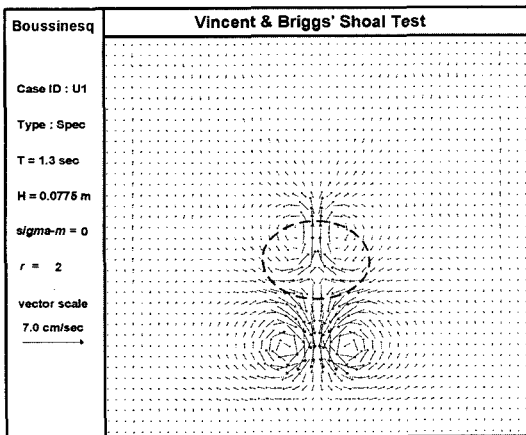
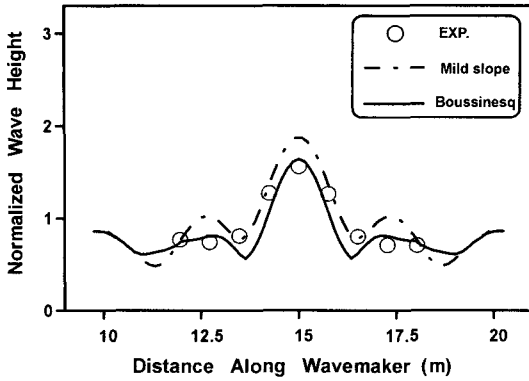
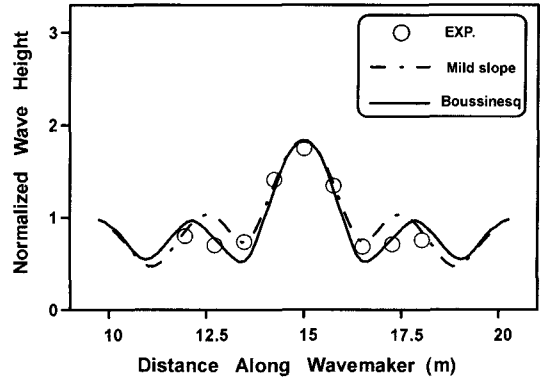


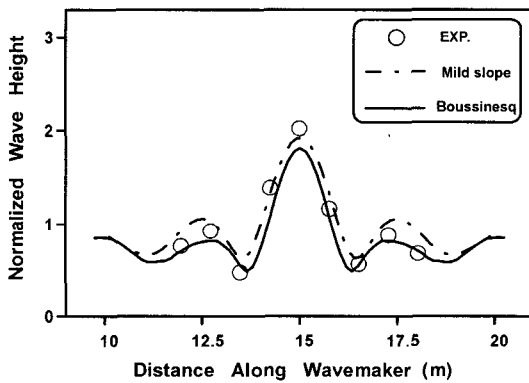
Fig. 7. Water induced currents for unidirectional wave (Case ID: U1).



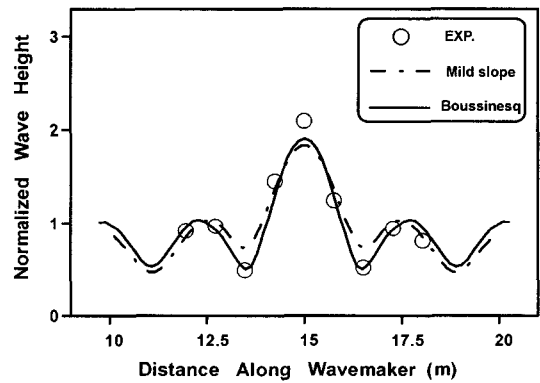
(a) Case ID : U_1



(b) Case ID : U_2



(c) Case ID : U_3



(d) Case ID : U_4

Fig. 8. Normalized wave heights along transect4 for unidirectional wave (Case ID: U_1 ~ U_4).

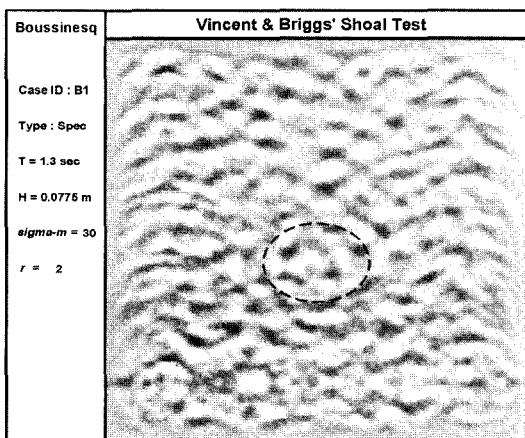


Fig. 9. Water surface displacements for multidirectional wave (Case ID: B_1).

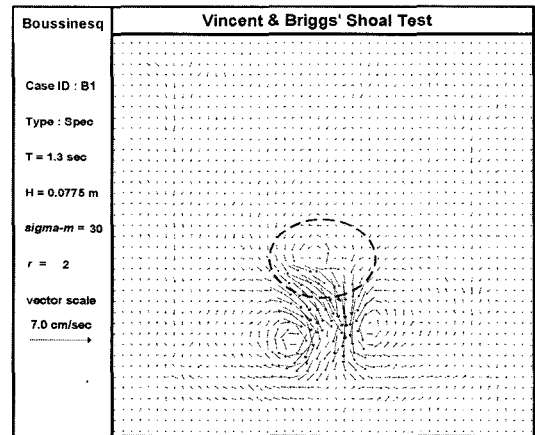
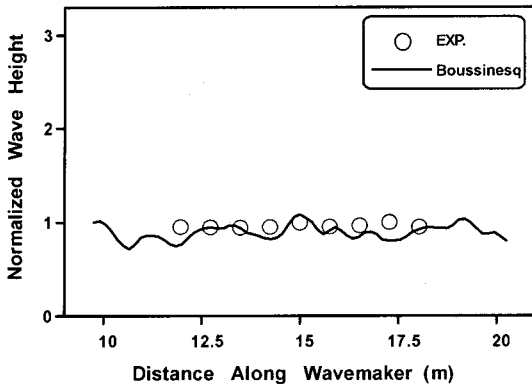


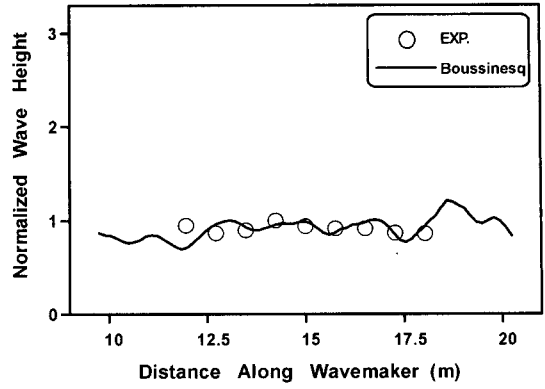
Fig. 10. Wave induced currents for multidirectional wave (Case ID: B_1).

소 떨어진다. 이는 입사파가 규칙파에 근접할수록 오차정도가 커짐을 의미하며, 이에 대한 원인은 수조내 다중반

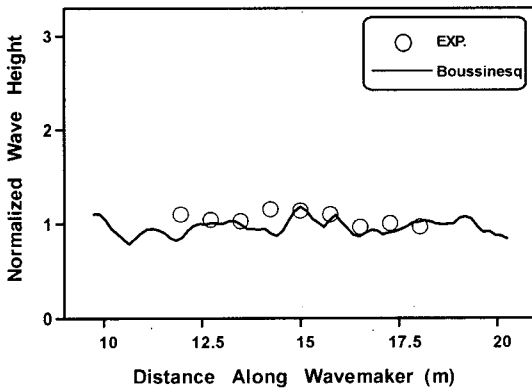
사 또는 이에 따른 실험의 조기 종료 등을 들 수 있다. 그러나, 다방향 조파실험의 어려움을 감안하면 전반적으로



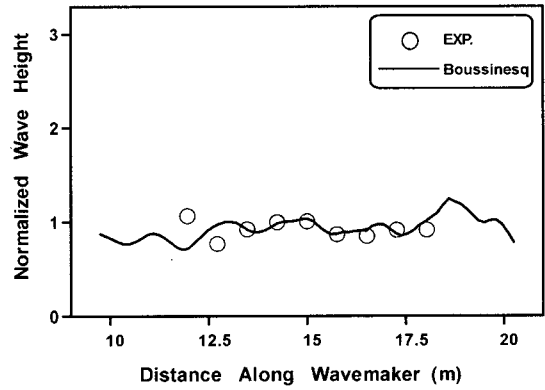
(a) Case ID : B1



(b) Case ID : B2



(c) Case ID : B3



(d) Case ID : B4

Fig. 11. Normalized wave heights along transect4 for multidirectional wave (Case ID: B1~B4).

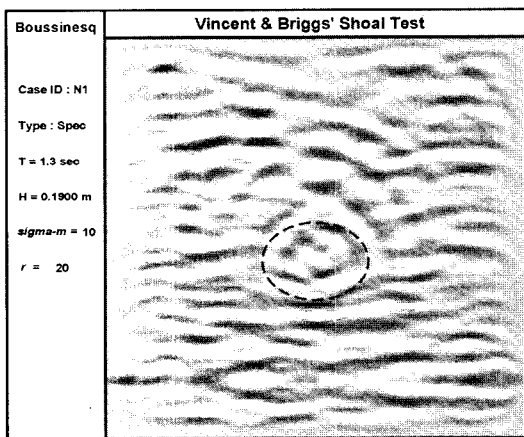


Fig. 12. Water surface displacements for multidirectional wave (Case ID: N1).

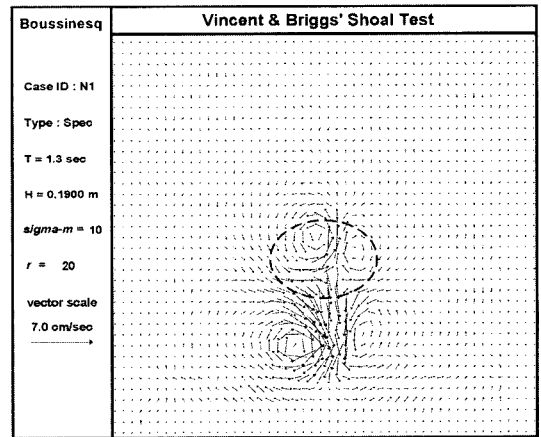
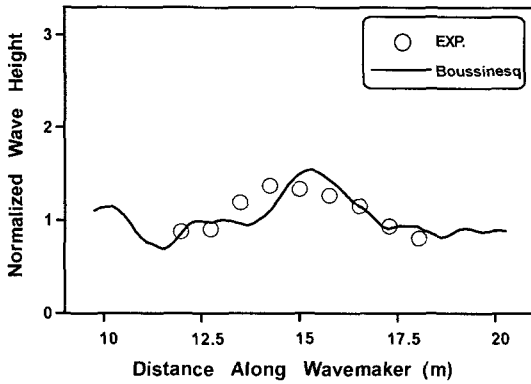
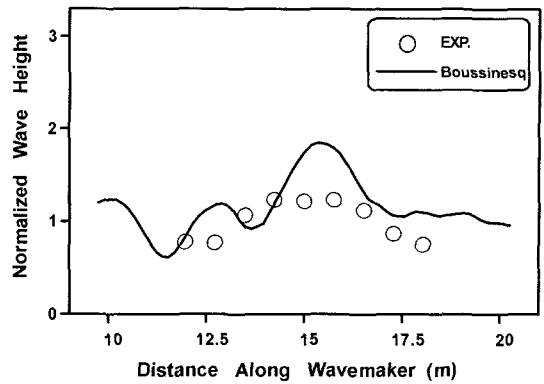


Fig. 13. Wave induced currents for multidirectional wave (Case ID: N1).

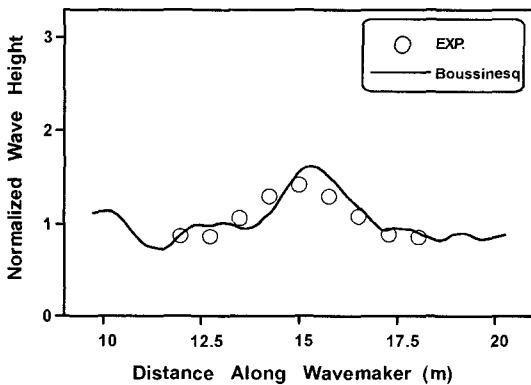
Boussinesq 방정식에 의한 계산결과와 실험결과의 일치정도는 비교적 양호한 것으로 판단된다.



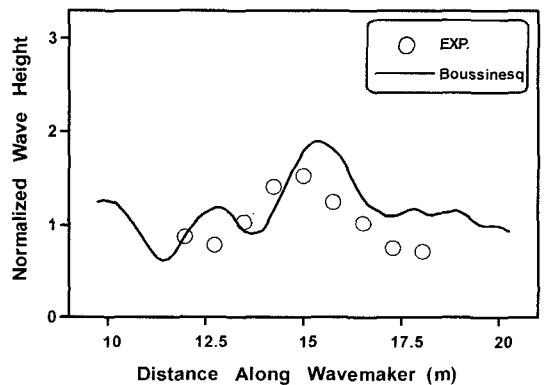
(a) Case ID : N1



(b) Case ID: N2



(c) Case ID: N3



(d) Case ID: N4

Fig. 14. Normalized wave heights along transect4 for multidirectional wave (Case ID: N1~N4).

5. 결 론

수중 천퇴인근에서의 파랑변형 및 파랑류의 형성을 구하기 위하여 Boussinesq 방정식 모델을 수립하고 이를 Vincent and Briggs의 수리실험 중 비쇄파조건들에 대하여 적용한 후 그 결과를 수리실험 결과와 비교하였다. 아울러, 규칙파와 일방향 불규칙파에 대해서는 기존의 환경사방정식 모델과 해수유동모델을 결합 적용하여 파랑변형 및 잉여응력에 의한 파랑류를 계산하고 이들을 Boussinesq 모델 결과와 비교하였다. 세부적 연구결과는 다음과 같다.

- 규칙파에 대해서는 두 모델의 계산결과와 실험결과가 전반적으로 잘 일치하나 천퇴 하류에서 실험결과는 계산결과보다 큰 파고를 보여주는 것으로 나타났다. 두 수치 모델 공히 천퇴 중심선을 따라 파랑류가 좌우 대칭으로 잘 형성됨을 보여주었다.

- 일방향 불규칙파에 대해서는 규칙파에 비하여 천퇴 하

류의 침두치에서 계산결과와 실험결과사이의 일치정도가 증가하였다.

- 다방향 불규칙파는 방향분산함수가 비교적 넓은 조건에서는 실험결과와 잘 일치하였으나 방향분산함수가 좁을수록 그리고 주파수 스펙트럼의 침두성이 증가할수록 일치정도가 다소 저하된다.

상기와 같이 본 Boussinesq 모델의 계산결과와 실험결과 사이에는 다소의 차이는 존재하나 조파실험의 난점 및 발생가능한 오차범위를 고려하면 이들의 일치정도는 전반적으로 양호한 것으로 판단된다. 단, 본 연구에서 대상으로 한 파랑조건은 천퇴에서의 비쇄파 조건에 해당한다. 그러나, 천퇴인근에 구조물을 설치하는 경우, 구조물의 설계파는 일반적으로 천퇴에서 쇄파를 발생시킨다. 향후 본 쇄파조건에서 Boussinesq 모델을 적용하여 천퇴주변에 구현되는 파고 및 흐름을 결정하기 위한 연구를 수행할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 한국해양연구원에서 수행하는 이어도 종합 해양과학기지의 활용연구 중 “비선형 불규칙 파랑전파모델의 쇄파거동에 대한 수치해석” 사업(2004.7.1-2005.3.31)의 결과를 발췌한 것임.

참고문헌

- 전인식 (2000). 쇄파유도류에 의한 유체력의 결정. 한국해양연구원, 93.
- 전인식, 심재설, 최성진 (2000). 이어도 종합해양과학기지예 대한 설계파력의 검토 II: 쇄파역에서의 유체력. 한국해양안 · 해양공학회지, 12(4), 68-180.
- 최성진, 심재설, 전인식 (2000). 쇄파역에서의 유체력. 대한토목학회 학술발표회 논문집, 629-632.
- 한국해양연구원 (1999). 99 이어도 종합해양과학기지 구축사업 보고서. 해양수산부, BSPM 99020-00-1200-2.
- Borgman, L.E. (1984). Directional spectrum estimation for the gages. Tech. Rep., CHL-97-24, United State Army Corps of Engineers (USACE), Waterway Experiment Station.
- Kirby, J.T., Wei, G. and Chen, Q. (1998). FUNWAVE 1.0, CACR-98-06, Center for Applied Coastal Research, University of Delaware.
- Nwogu, O. (1993). Alternative form of Boussinesq equation for nearshore wave propagation. *J. Waterway, Port, Coast. and Oc. Engrg., ASCE*, 119(6), 618-638.
- Shapiro, R. (1970). Smoothing, filtering and boundary effects. *Review of geophysics and space physics*, 8(2), 359-386.
- 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.
- Watanabe, A. and Maruyama, K. (1986). Numerical modeling of nearshore wave field under combined refraction, diffraction and breaking. *Coastal Eng. in Japan*, 29, 19-39.
- 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.

Received April 19, 2005

Accepted August 27, 2005