

수중 천퇴 인근에 설치된 해양구조물에 작용하는 유체력 결정에 대한 고찰

Evaluation of Fluid Forces Acting on Offshore Structures Placed in the Vicinity of Underwater Shoal

전인식* · 민인기** · 심재설**

Insik Chun*, Inki Min** and Jaeseol Sim**

요 지 : 파랑이 수중 천퇴부를 넘어 쇄파하는 경우 파고는 작게 형성되나 강한 이차적 흐름(쇄파유도류)이 발생한다. 따라서, 임의의 해양구조물이 쇄파대에 위치할 경우에는 단순히 가시적인 파고에만 근거한 파력산정은 과소설계를 초래할 가능성이 있으며 구조물의 안정설계를 위해서는 쇄파유도류의 유속이 가미된 상태에서의 유체력을 정확히 산정하여 반영할 필요가 있다. 본 연구에서는 Boussinesq 방정식 모델을 이용하여 쇄파대내에서의 파고분포와 쇄파유도류를 계산하는 기법을 수립하였으며 과거에 수행하였던 이어도 해양과학기술의 수리모형실험(1/120)의 모델영역에 적용하였다. 이 계산결과를 이용하여 모형구조물에 작용하는 유체력을 계산하고 수리모형실험 결과와 비교함으로써 쇄파유도류의 영향을 정량적으로 평가하였다.

핵심용어 : 파력, 쇄파유도류, 쇄파, Boussinesq 방정식 모델, 수중 천퇴, 모리슨 방정식

Abstract : When waves propagating over an underwater shoal break at the top of the shoal, wave heights are drastically decreased in the downstream breaking zone, but a secondary current shooting downstream with strong velocity can be induced by the breaking waves themselves. In the case that an offshore structure is placed in the breaking zone, the estimation of wave force purely based on the visible wave height may cause an under-design of the structure. Thus, for the safe design of the structure, the breaking wave induced current should be necessarily considered in the comprehensive estimation of design load. In the present study, Boussinesq equation model to calculate the wave height distribution and breaking wave induced current was set up and applied to the scheme of a hydraulic model test previously undertaken. Based on the results of the Boussinesq model, fluid forces acting on the model structure were calculated and compared with the experimental results. The importance of the breaking wave induced current was quantitatively assessed by comparing fluid forces with or without current.

Keywords : wave force, wave induced current, breaking wave, Boussinesq equation model, underwater shoal, Morison equation

1. 서 론

해양개발의 입지가 다변화됨에 따라 해양구조물을 열악한 자연조건 환경에 설치해야 되는 경우가 종종 발생한다. 이 경우 구조물의 설치위치는 주로 경제성 및 시공성을 고려하여 가급적이면 수중천퇴 등 주변보다 비교적 수심이 작은 수역을 선정하는 것이 일반적이다. 그러나,

이와 같은 수중천퇴에서는 황천 시 항시 쇄파가 발생하며 쇄파이후에는 비교적 파고가 작게 나타나는 반면, 쇄파에 따른 이차적 흐름이 발생한다. 이와 같은 흐름은 인근에 설치된 구조물에 강한 유체력을 작용시킬 수 있으며 단순히 가시적인 파고데이터 및 조류데이터에만 의존한 해양구조물 설계는 과소설계를 초래할 가능성이 있다. 한국해양연구원(2002)이 설치한 이어도 종합해양과학기

*Department of Civil Engineering, Konkuk University, 1 Hwayang-dong, Kwangjin-ku, Seoul 143-701, Korea. ischun@konkuk.ac.kr
**Coastal and Harbor Engineering Division, Korea Ocean Research and Development Institute

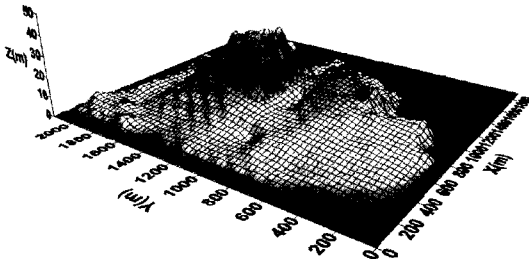


Fig. 1. 3D view of Ieodo underwater rock (●구조물 위치).

지도 수중 천퇴 인근에 위치하고 있다. 본 구조물은 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 수심 DL(-)40 m에 설치되어 있으며 평균수심이 약 DL(-)4.5 m인 이어도 정상부에서 남동쪽으로 약 600 m 이격되어 있다. 전 등(2000a, 2000b)은 이어도 해역에서의 파랑변형과 구조물 작용파력을 검토하기 위하여 수리모형실험을 수행한 바 있으며, 입사파랑의 파향에 따라서 단순히 발생파고에 근거한 모리슨 식의 파력계산치를 훨씬 상회하는 유체력이 발생할 수 있음을 보인 바 있다.

전 등(2005, 2006)은 이어도 암초와 같은 수중 천퇴 주변의 파고분포와 이에 따른 파랑류를 계산하기 위한 Boussinesq 방정식 모델을 수립하였으며, 천퇴 정상부에서 쇄파가 발생할 경우 천퇴 하류 쪽으로 향하는 강한 쇄파유도류가 생성됨을 보인 바 있다. 본 연구에서는 Boussinesq 모델을 실제 이어도 해역에 적용하여 정상부 쇄파발생에 따른 주변 파고분포와 흐름발생 양상을 파악하고 구조물에 작용하는 유체력을 계산하여 과거에 수행하였던 수리모형 실험의 파력 계측치와 비교하기로 한다.

2. 수리모형실험의 개요

수리모형실험(전 등, 2000a)은 Fig. 2에서 보이는 바와 같이 48 m × 48 m의 평면 조파수조에 1/120 축척의 이어도 및 이어도 구조물 모형을 거치한 후 심해설계파 추산결과에 근거하여 총 4 파향(S, SE, SSW, NNW)에 설계파를 입사하여 평면 파고분포와 구조물 작용파력을 계측하였다. 설계파 제원은 파랑추산작업에 의하여 주변 수심 0.49 m에서 파고 0.206 m, 주기 1.37초로 설정하였다.

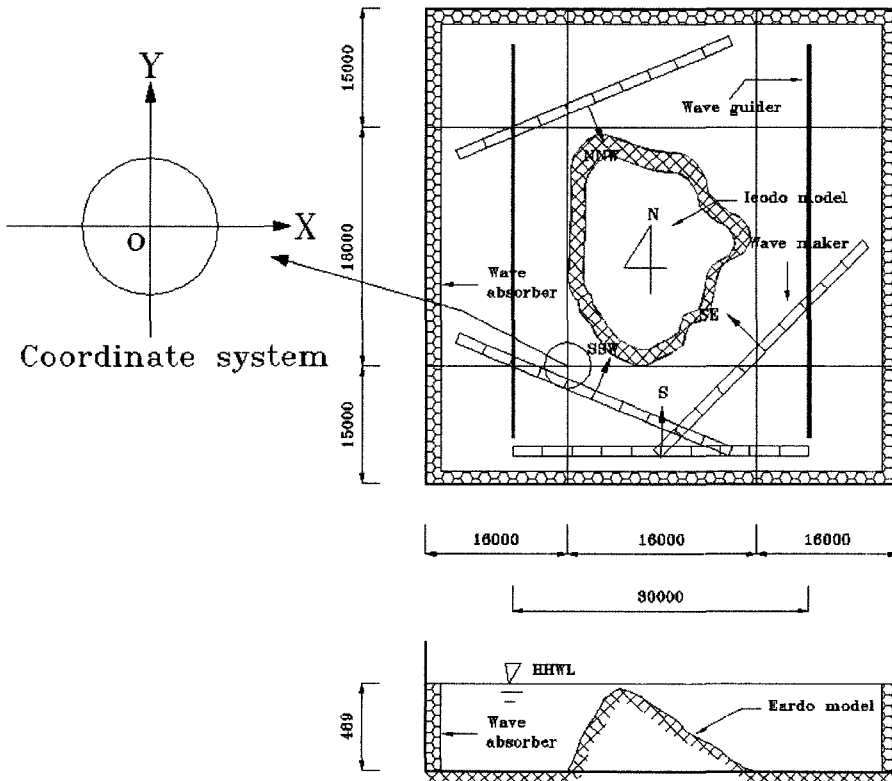


Fig. 2. Layout of the hydraulic model test.

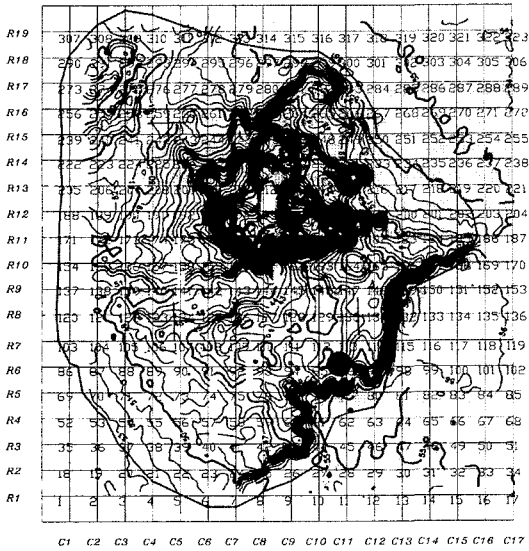


Fig. 3. Depth contour of leodo model and measurement grids of wave height (● 구조물 위치).

구조물 위치에서의 수심은 0.36 m이다. 좌표계는 그림에서 보이는 바와 같이 원점이 평면수조의 좌하귀에서 가로 세로 각각 16 m 이격된 점에 위치하는 관성좌표계(X, Y)와 그리고 원점이 구조물 중앙에 위치하며 각 입사파향의 하류쪽을 (+) x 로 취하는 파랑좌표계(x, y)의 두가지로 설정하였다.

파고계측은 Fig. 3이 보이는 바와 같이 1 m 간격의 격자점(총 323점)에서 수행하였으며, 파력계측은 Fig. 4가 보이는 바와 같이 구조물 모형의 상부에 하중계(Load cell meter)를 부착하여 구조물에 작용하는 F_x, F_y 및 M_y 를 계측하였다. 대표적으로 파향 S와 NNW에 대한 실험장면을 Fig. 5와 Fig. 6에 제시하였다. 실험은 이어도와 구조물 모

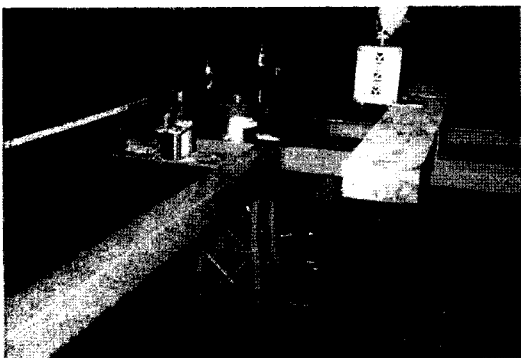


Fig. 4. leodo structure model and load cell meter.



Fig. 5. Experiment for S direction (▲ leodo, ● Structure).



Fig. 6. Experiment for NNW direction (▲ leodo, ● Structure).

형을 고정하고 조파기 패들을 이동하여 파향을 변경하였다. 따라서, 조파 패들을 수조의 모서리에 위치시키는 관계로 NNW 파향은 S 파향에 비하여 조파영역의 폭이 다소 좁으며 Fig. 3의 좌하귀와 우상귀의 일부 측정점이 파유도대 밖에 위치하게 된다.

파향 S, SE, SSW는 파가 이어도 정상부에서 쇄파되기 전에 구조물을 통과하나 파향 NNW는 이미 쇄파된 파가 구조물을 통과한다. 파력의 계측결과, 이와 같은 쇄파발생은 구조물에 작용하는 유체력에도 영향을 미치는 것으로 나타났다. 파향 S와 NNW에 대한 구조물 위치에서의 수면변위와 파력계측 결과를 Fig. 7과 Fig. 8에 도시하였다. 파향 S에서는 계측시그널들이 비교적 규칙적으로 나타난 반면, 파향 NNW에서는 수면변위가 다소 불규칙적이며 파력성분의 시그널들이 한쪽으로 쏠려 동요하는 일종의 극성을 보인다. 전 등(2000b)은 이와 같은 극성이 일

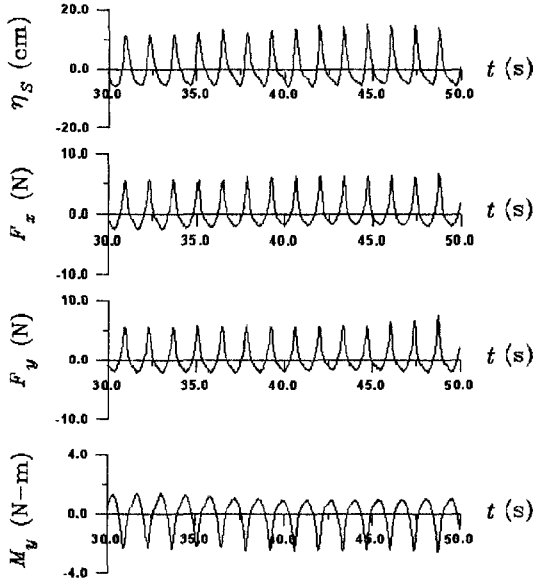


Fig. 7. Signals of wave gauge and load cell meter (S).

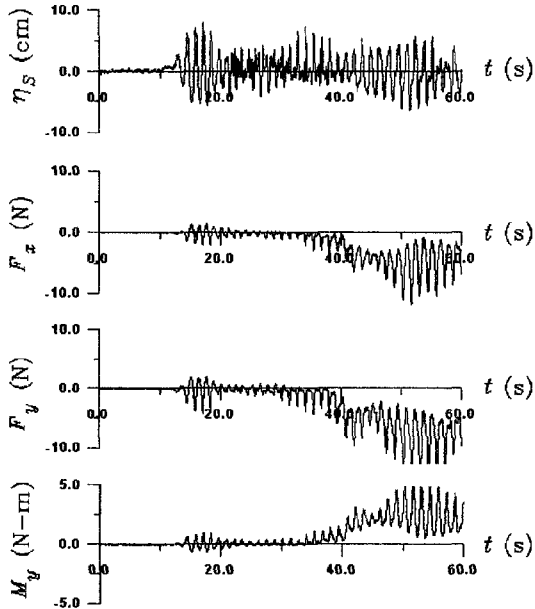


Fig. 8. Signals of wave gauge and load cell meter (NNW).

방향성 흐름의 영향에 의하여 비롯된 것으로 판단하였으며, 환경사 방정식 모델과 천수방정식 모델을 사용하여 이어도 정상부에서의 쇄파가 주변에 강한 이차적 흐름을 발생시킬 수 있음을 보인 바 있다. 파향 별 파력을 비교한 결과 파향 NNW은 파고는 가장 작으나 파력 측정치는 타 파향들의 경우보다도 큰 것으로 나타났다.

3. Boussinesq 방정식 모델에 의한 파고 및 파랑류 계산

이러도 주변 파랑변형과 쇄파유도류를 계산하기 위하여 Boussinesq 방정식 모델을 적용하였다. 본 연구에서는 Nwogu(1993)가 제안한 약비선형 형태의 Boussinesq 방정식(Wei et al, 1995)을 사용하였다. 수치해석의 미지수는 수면변위 와 연직위치 에서의 수평방향 유속 이며 지배방정식은 연속방정식 (1)과 운동방정식 (2)와 (3)으로 구성된다.

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

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

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

여기서,

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

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

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

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

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

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

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

이며, $\alpha = 0.5\beta^2 - 1/6$, $\alpha_2 = \beta + 0.5$, $b_1 = 0.5\beta^2$, $b_2 = \beta$, $\beta = z_a/h = -0.531$ 이다. 또한, $f(x, y, t)$ 는 조파항, (F_b, G_b) 는 바닥마찰항, (F_{br}, G_{br}) 는 쇄파감쇠항, (F_{bs}, G_{bs}) 는 격자내 혼합항(subgrid mixing), (F_{sp}, G_{sp}) 는 스폰지 감쇠항이다.

본 연구에서는 쇄파감쇠항을 정하기 위하여 Kennedy et al.(2000)이 제안한 다음과 같은 외점성계수 모델을 사용하였다.

$$F_{br} = -\frac{1}{h+\eta} \{ (v_b[(h+\eta)u]_x)_x + (v_b[(h+\eta)u]_y)_y \} \quad (11)$$

$$G_{br} = -\frac{1}{h+\eta} \{ (v_b[(h+\eta)v]_x)_x + (v_b[(h+\eta)v]_y)_y \} \quad (12)$$

여기서,

$$v_b = -B\delta^2(h+\eta)\eta_t \quad (13)$$

$$B = \begin{cases} 1 & ; \eta_t > 2\eta_t^* \\ \eta_t/\eta_t^* - 1 & ; \eta_t^* \leq \eta_t \leq 2\eta_t^* \\ 0 & ; \eta_t < \eta_t^* \end{cases} \quad (14)$$

$$\eta_t^* = \begin{cases} \eta_t^{(D)} + \frac{t-t_0}{T^*}(\eta_t^{(D)} - \eta_t^{(F)}) & ; 0 \leq (t-t_0) \leq T^* \\ \eta_t^{(F)} & ; T^* < (t-t_0) \end{cases} \quad (15)$$

$$\eta^{(D)} = P_1\sqrt{gh} \quad (16)$$

$$\eta^{(F)} = P_2\sqrt{gh} \quad (17)$$

$$T^* = P_3\sqrt{\frac{h}{g}} \quad (18)$$

식 (15)에서 t_0 는 쇄파시작 시각을 의미하며 식 (14)와 같은 η_t 를 이용한 쇄파편별 조건을 적용하여 결정할 수 있다. 외점성 계수를 결정하기 위한 매개변수는 δ , P_1 , P_2 와 P_3 이며, Kennedy et al.은 기본값으로서 $\delta = 1.2$, $P_1 = 0.65$, $P_2 = 0.15$, $P_3 = 5.0$ 을 권장하였으나 정확한 값은 쇄파가 발생하는 각 경우마다 개별적으로 실험 데이터 등을 이용하여 결정할 필요가 있다(전 등, 2006). 본 연구의 경사면 파동장 계산에서는 수치실험을 통하여 $P_1 = 0.4$ 로 정하였으며 이를 제외한 나머지 매개변수들은 상기 기본값들을 그대로 사용하였다.

계산격자간격은 $\Delta x = \Delta y = 0.125$ m, 시간증분은 $\Delta t = 0.0173$ 초로 하였으며, 계산시간은 총 200주기로 하였다. 계산중간과정에서 발생하는 수치잡음은 Shapiro 필터(Shapiro, 1970)를 이용하여 제거하였으며 전 등(2007)의 연구결과에 근거하여 필터 요소수를 4로, 필터 통과수를 50으로, 그리고 필터적용 주기를 200 연속 쇄파발생으로 설정하였다.

상기 Boussinesq 모델의 적용은 수리모형실험에서의 네

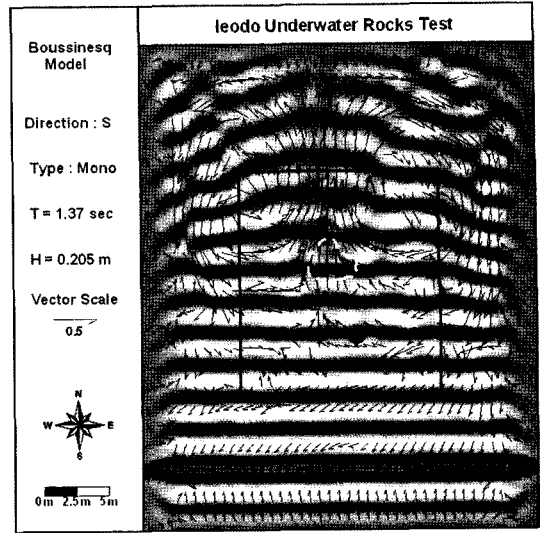


Fig. 9. Wave pattern and the secondary current induced by breaking waves (S-dir, ● structure).

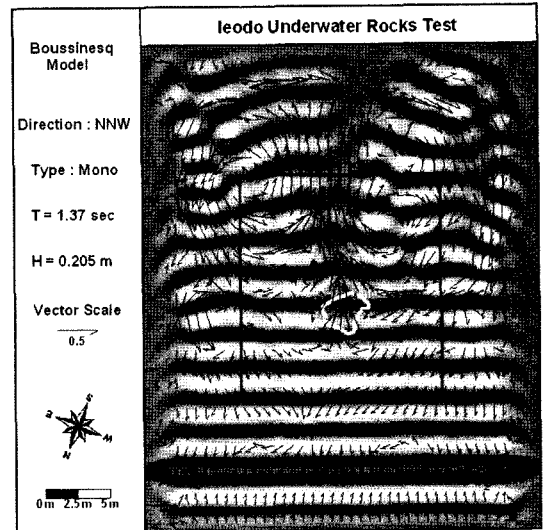


Fig. 10. Wave pattern and the secondary current induced by breaking waves (NNW-dir, ● structure).

파향 중에서 S 파향과 NNW 파향을 선별하여 수행하였다. S 파향은 구조물이 쇄파대 이전에, 그리고 NNW 파향은 쇄파대내에 위치한다. Fig. 9와 Fig. 10은 각 파향에 대한 수면변위와 파랑류의 계산 결과이다. 이들 두 그림에는 이어도 암초 정상부와 구조물 위치가 각각 표시되어 있으며 직사각형 박스는 파고계산 대상 영역을 의미한다. 그림들에서 두 파향 공히 이어도 정상부의 하류 쪽에서 약 0.5 m/s의 쇄파유도류가 발생하여 좌-우측으로

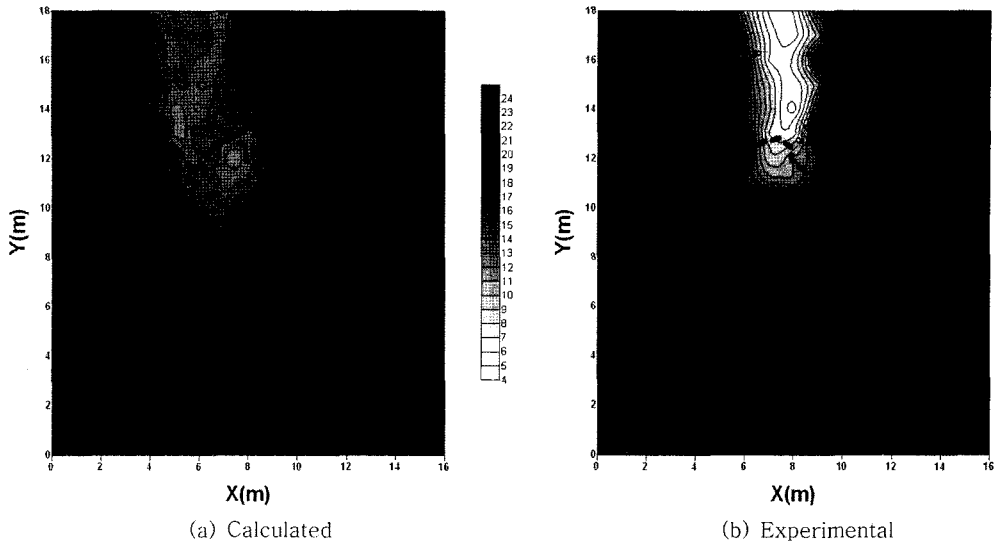


Fig. 11. Comparison of wave height contours (S-dir, ● structure).

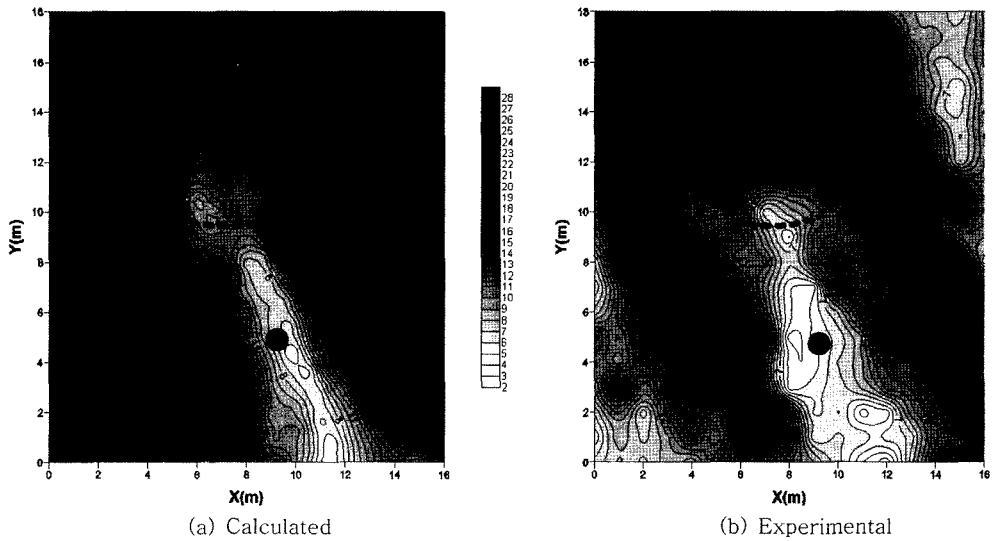


Fig. 12. Comparison of wave height contours (NNW-dir, ● structure).

순환 셀이 형성됨을 볼 수 있다. S 파향에서는 구조물 위치에서 파랑류가 미약하게 나타난 반면, NNW 파향에서는 구조물 위치에서 쇄파유도류가 강하게 발생한다.

각 측정에서의 수면변위 시계열을 zero-up-crossing 법에 의하여 분석하여(분석구간 200~270초) 각 측정파고를 결정하였다. 각 파향에서의 파고에 대한 등파고선도를 실험결과와 함께 Fig. 11과 Fig. 12에 제시하였다. NNW 파향에서 구조물은 쇄파대 내에 위치하며 상당히 감소된 파고의 영향을 받게 됨을 볼 수 있다. 두 파향 공히 계산

치와 실험치는 수조 가장자리에서의 흡수경계의 성능의 차이와 대상영역 크기의 차이 등에 의하여 정확히 일치하지는 않지만 대략적으로 유사한 양상을 보이고 있다. 특히, NNW 파향의 실험치에서 좌하귀와 우상귀에서의 저파고대는 해당지역이 수리모형실험 영역의 밖에 위치하고 있기 때문이다.

이어도 주변의 파고분포를 정량적으로 고찰하기 위하여 여러 횡선을 설정하고 각 횡선 상의 파고변화를 Fig. 13과 Fig. 14에 도시하였다. 각 그림에는 비교목적 상 완

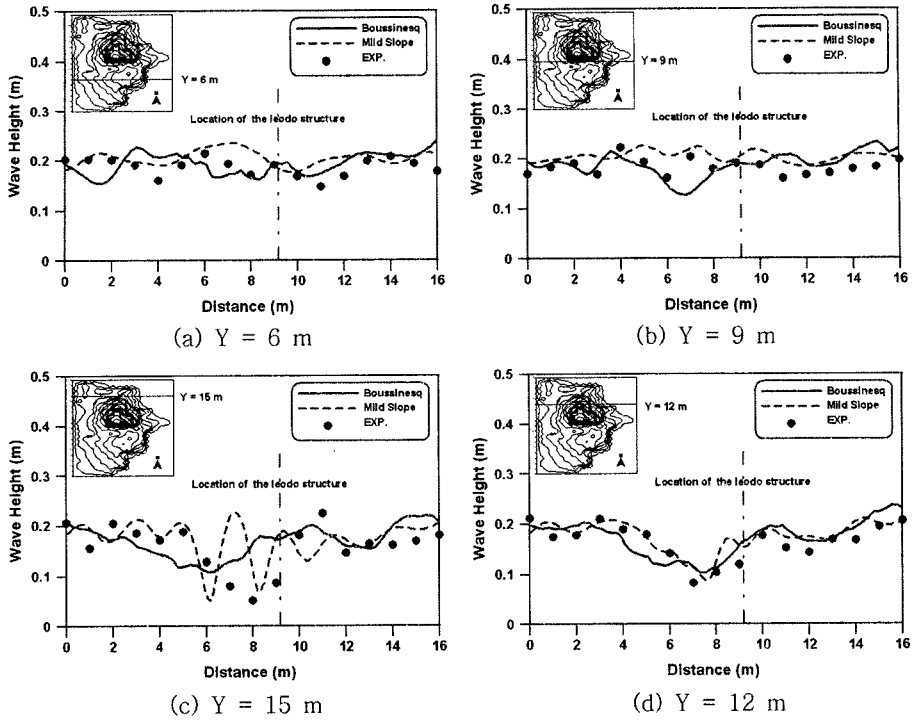


Fig. 13. Wave height variation along the preset transections (S).

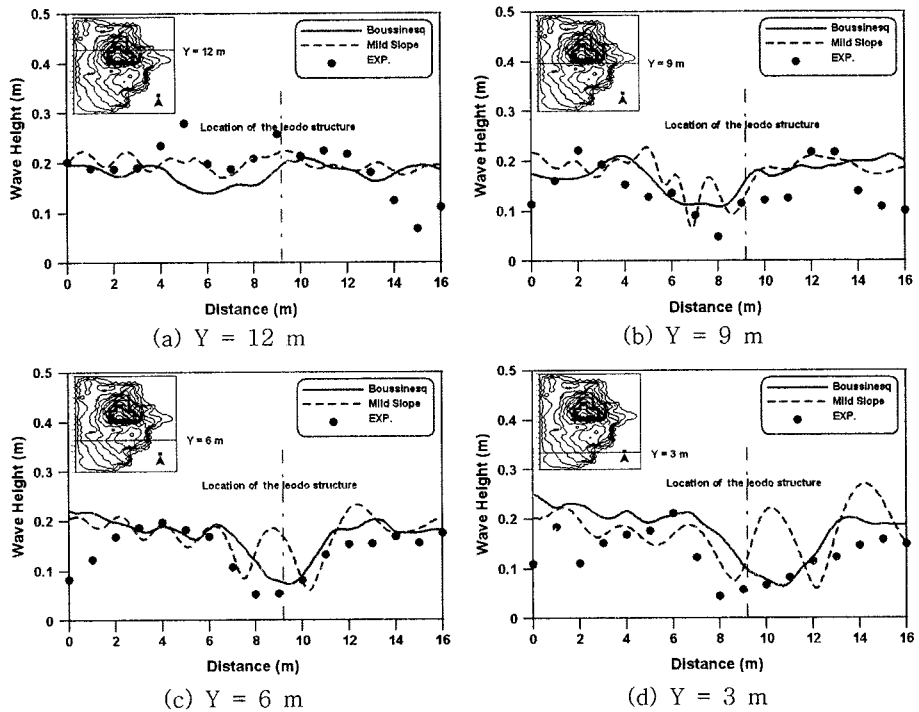


Fig. 14. Wave height variation along the preset transections (NNW).

Table 1. Wave height and velocity components of wave induced current calculated by the Boussinesq equation model

파향	파고 H_d (cm)	유속 (m/s)	
		u_c	v_c
S	19.5	-0.009	0.008
NNW	7.0	0.003	-0.536

경사 방정식 모델(전인식 등, 2006)의 적용결과도 도시되어 있다. 비 쇄파구역에서의 파고변화는 이들 수치해석에 의한 계산치가 실험치에 비교적 잘 일치하고 있으나 쇄파대내에서는 Boussinesq 모델의 결과는 저하된 파고 분포를 보이는 실험치와 정량적 유사성을 보이거나 완경사 방정식 모델은 오히려 돌출된 파고분포를 보이며 실험치와 상당한 차이를 보이고 있다. Yoon et al.(2004)은 이와 같은 저파고대의 형성을 수치적으로 재현한 바 있으며, 이와 같은 수치모델간 결과차이는 전 등(2006)에서도 고찰한 바 있다. NNW 파향의 실험치에서 각 횡선 좌·우단의 파고저하 부위는 해당 축점들이 수리모형실험의 파유도대(wave guider) 밖에 위치하고 있기 때문이다. 이를 감안하면 전반적으로 Boussinesq 모델의 결과가 실험치에 잘 일치하는 것으로 판단된다.

Boussinesq 모델의 계산결과에서 이어도 구조물 위치에서의 발생파고와 유속성분(Fig. 2의 관성좌표계 기준)을 도출하여 Table 1에 제시하였다. S 파향에서는 파고가 조파기 발생파고인 20.6 cm와 유사한 반면, 구조물이 쇄파대내에 위치하는 NNW 파향에서는 파고는 매우 작게 나타나며 대신 쇄파유도류가 강하게 나타남을 알 수 있다.

4. 쇄파대에서의 유체력 계산

이어도 구조물은 자켓식 구조물이며 파랑과 쇄파유도류가 복합되어 있는 상태에서 구조물의 각 부재의 단위 길이 당 작용하는 유체력 성분은 쇄파유도류의 속도가 가미된 다음과 같은 Morison 타입의 식(Dawson, 1983)을 사용하여 결정하였다.

$$f_i = \frac{1}{2}\rho_w C_D V V_i + \rho_w C_I \pi \frac{D^2}{4}; i = 1, 2, 3 \quad (19)$$

$$V = [U_i U_i - (n_i U_i)^2]^{0.5} \quad (20)$$

$$V_i = U_i - n_i (n_j U_j); i, j = 1, 2, 3 \quad (21)$$

$$A_i = a_i - n_i (n_j a_j) \quad (22)$$

$$U_i = U_{wi} + U_{ci} \quad (23)$$

$$(n_1, n_2, n_3) = (\sin\phi\cos\theta, \sin\phi\sin\theta, \cos\phi) \quad (24)$$

여기서, ρ_w 는 해수밀도, D 는 각 원형부재의 직경, C_D 와 C_I 는 각각 항력계수와 관성력계수이다. 하첨자 1,2,3은 각각 x, y, z 축을 의미하며, U_w 는 파랑좌표계(Fig. 2의 관성좌표계와 동일한 원점에서 파 진행방향의 하류쪽을 +x로 설정)에서 부재 단위길이의 중앙에서의 파 수립자 유속 성분($u_w, 0, w_w$)을, 그리고 U_c 는 흐름의 유속성분($u_c, v_c, 0$)를 의미한다. a_i 는 i 축 방향의 수립자 가속도 성분이며, θ 와 ϕ 는 각 부재의 시작점을 원점으로 한 원통형 좌표계의 좌표값이다.

파랑에 의한 수립자 유속과 가속도 성분은 Stream function 10차 파를 이용하였다. 식 (19)에 의하여 파력을 계산할 경우 적절한 C_D, C_I 값을 사용하여야 한다. 일반적으로 이들 계수값들은 직경 D 와 수립자의 최대 수평속도 u_{max} 에 근거한 Reynolds 수($Re = u_{max} D/\nu$)의 함수형태로 표현된다. 본 계산에서는 SPM(1977; pp. 7-110~7-120)을 참조하여 다음과 같은 값들을 사용하였다.

$$C_D = 1.2; Re = u_{max} D/\nu < 1 \times 10^5 \\ = 0.7; Re > 4 \times 10^5 \quad (25)$$

$$C_D = 2.0; Re < 2.5 \times 10^5 \\ = 1.5; Re > 5 \times 10^5 \quad (26)$$

파랑에 흐름이 복합되어 있는 경우에 대한 계수값들은 현재로서는 가용하지 않기 때문에 본 연구에서는 식 (25)와 식 (26)을 그대로 사용하였다.

파력계산에서 모형구조물은 총 200개의 원형 부재로 모델링하였다. 식 (19)를 이용하여 각 부재 길이 전체에 대한 유체력을 구하고 이들을 구조물 전체에 걸쳐 합산하여 구조물 전체에 작용하는 시스템 파력의 시계열을 구하였다. 일반적으로 자켓구조물의 설계가 최대 수평파력 시점에서의 각 부재파력에 대해서 이루어짐을 고려하여 계산된 시계열에서 최대값을 도출하였다. 단, 구조물 위치에서 구현되는 파향을 도출하는 것이 현실적으로 어렵기 때문에 가상 파향을 수개 설정하여 각 파향별로 유체력(파랑좌표계 기준)을 결정하였다. 수리모형실험에서도 파향의 불확실성을 고려하여 Load cell meter를 각 가상파향으로 표정하여 파력을 측정하였었다.

Table 1에서의 파고와 파랑류 유속을 이용하여 최대수평파력을 계산한 후 그 결과를 수리모형실험 결과와 함

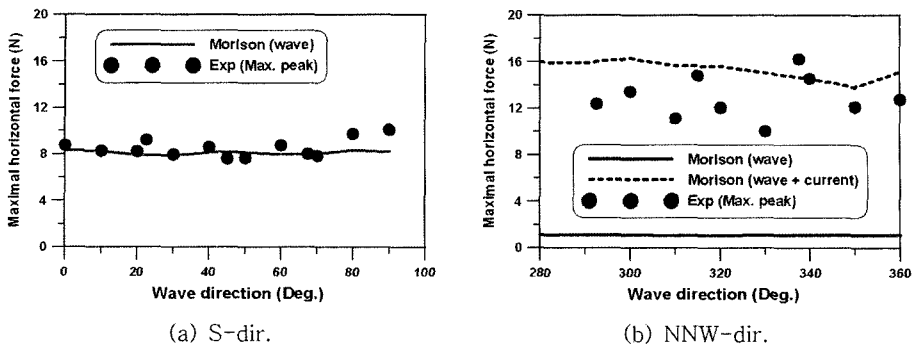


Fig. 15. Comparison of horizontal wave forces acting on the leodo structure model.

계 Fig. 15에 제시하였다. S 파향은 파랑류 유속이 미미하기 때문에 파력만 계산하였으며, NNW 파향은 파력과 그리고 쇄파유도류가 복합되어 있는 경우의 유체력을 같이 제시하였다. S 파향에서는 계산치가 실험치와 잘 일치함을 볼 수 있다. NNW 파향에서는 발생파랑만을 고려한 경우는 파력이 2 N 이하로 작게 나타나 있으나 쇄파유도류가 복합되어 있는 경우는 14 N 이상의 현격히 증가된 유체력을 보였다. 실험데이터의 분산정도가 다소 심하며 계산치가 실험치를 전반적으로 상회하는 편이나 계산치와 실험치가 공히 쇄파유도류에 의한 유체력 상승효과를 잘 보여주고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 Boussinesq 방정식 모델을 이용하여 쇄파내에서의 파고분포와 쇄파유도류를 계산하는 기법을 제시하였으며 과거에 수행하였던 이어도 해양과학기술의 수리모형(1/120)에 적용하였다. 이 계산결과를 이용하여 모형구조물에 작용하는 유체력을 계산하여 수리모형실험 결과와 비교하였다. 세부 결론은 다음과 같다.

- Boussinesq 방정식 모델에 의한 계산결과는 실험결과와 비교적 잘 일치하였다. 특히, 쇄파대의 중심선을 따라 고파고를 보였던 기존의 원경사방정식 모델 결과와는 달리 전 쇄파대내에서 저파고를 형성하였다. 계산결과를 보면 천퇴 정상부 상류쪽에서는 파랑류 발생이 미미하나 하류쪽에서는 쇄파에 의하여 파고는 대폭 감소한 반면, 0.54 m/s(실스케일에서 6 m/s)정도의 강한 파랑류가 형성되는 것으로 나타났다.

- 이어도 구조물에 작용하는 파력과 그리고 쇄파유도류가 가미된 유체력을 계산하여 실험치와 비교한 결과, 전

반적으로 잘 일치하는 것으로 나타났다. 구조물이 쇄파대에 위치하는 NNW 파향의 경우에서 흐름이 복합된 유체력은 단순 파고에 근거한 파력보다 약 7배 이상의 큰 값을 보이는 것으로 나타났다.

상기와 같이 파랑이 수중 천퇴부를 넘어 쇄파하는 경우 파고는 작게 형성되지만 강한 흐름(쇄파유도류)이 발생한다. 따라서, 임의의 해양구조물이 쇄파대에 위치할 경우에는 단순히 가시적인 파고에만 근거한 파력산정은 과소설계를 초래할 가능성이 있으며 구조물의 안정설계를 위해서는 쇄파유도류의 유속이 가미된 상태에서의 유체력을 정확히 산정하여 반영할 필요가 있다.

사 사

본 연구는 한국해양연구원에서 수행하는 2006년도 이어도 종합해양과학기술의 활용연구 중 “비선형 불규칙 파랑전파모델의 쇄파거동에 대한 수치해석” 사업의 결과 중 일부를 발췌한 것임.

참고문헌

- 전인식, 성상봉, 김귀동, 심재설 (2005). Boussinesq 방정식을 이용한 수중 천퇴에서의 파랑변형 및 파랑류 계산, 한국해양·해양공학회지, 202-212.
- 전인식, 김귀동, 심재설 (2006). 수중 천퇴에서의 쇄파거동 예측을 위한 Boussinesq 방정식 모델의 적용, 한국해양·해양공학회지, 154-165.
- 전인식, 김귀동, 이성엽 (2007). 비선형 불규칙 파랑전파모델의 쇄파거동에 대한 수치해석, 한국해양연구원 위탁연구과제 보고서, 79 p.
- 전인식, 심재설, 최성진 (2000a). 이어도 종합해양과학기술

- 에 대한 설계파력의 검토 I: 삼차원 수리모형실험, 한국 해안-해양공학회지, 157-167.
- 전인식, 심재설, 최성진 (2000b). 이어도 종합해양과학기지에 대한 설계파력의 검토 II: 쇄파역에서의 유체력, 한국해안-해양공학회지, 168-180.
- 한국해양연구원 (2002). 2001 이어도 종합해양과학기지 구축사업 보고서.
- Dawson, T.H. (1983). *Offshore Structural Engineering*, Prentice-Hall, 124-126.
- Kennedy, A.B, Chen, Q., Kirby, J.T. and Dalrymple, R.A. (2000). Boussinesq modelling of wave transformation, breaking, and runup. I: 1D., *J. Wtrwy, Port, Coast. and Oc. Engrg.*, 126, 39-47.
- Nwogu, O. (1993). Alternative form of Boussinesq equation for nearshore wave propagation, *J. Wtrway., 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.
- SPM, (1977). *Shore Protection Manual*, Coastal Engineering Research Center, Corps of Engineers, U.S. Army.
- 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 January 4, 2007

Accepted April 6, 2007