

파랑변형 및 해빈류에 대한 Boussinesq 모형의 적용성 검토

조영준* · 박일흠**†

* 전남대학교 대학원 해양공학과, ** 전남대학교 해양기술학부

Applicability of Boussinesq Models for Wave Deformation and Wave-Induced Current

Young-Jun Cho* Il-Heum Park**†

* Department of Ocean Engineering, Graduate School, Chonnam National University, Yeosu, Korea,

** School of Marine Technology, Chonnam National University, Yeosu, Korea

요약 : Boussinesq 모형을 이용하여 규칙파 조건(Regular wave condition)에서 파랑변형 및 해빈류의 수치모의를 하였다. 파랑변형의 수치 결과는 선행 연구에 의한 수리실험 결과와 비교하여 매우 좋은 일치를 보였으며, 검증한 파랑변형 결과를 바탕으로 충분히 안정한 상태 이후의 해빈류를 계산하여 예측하였다. 모형의 현장 적용성을 위해, 실규모해역에서 관측한 선행 연구의 현장자료와 비교하였으며, 파랑변형의 수치 결과는 현장자료와 비교적 양호한 일치를 보였다. 해빈류의 수치결과는 연안사주가 발달된 지역에서 다소 과소평가 되었지만, 전반적으로 해빈류의 공간적 분포에 대하여 정도 있게 예측한 것으로 여겨진다.

핵심용어 : 천해역, 파랑변형, 해빈류, 부시네스크 모형, 수치모의

Abstract : In the present study, wave deformation and wave-induced current were calculated under the regular wave conditions using the Boussinesq model. The model results of the wave deformation showed good agreements with the preceding laboratory experiments or others. The wave-induced current of the fully developed sea state was calculated. For field application of model, the preceding field data by others in the real scale of the water area were compared, the numerical result of wave deformation showed a relatively good agreement with the field data. Although the numerical result of wave-induced current was underestimated over the longshore bar developed area, the Boussinesq model is generally suitable to predict the wave-induced current.

Key Words : Shallow waters, Wave deformation, Wave-induced current, Boussinesq model, Numerical simulations

1. 서 론

심해에서 발생한 파랑은 수심이 얇은 천해로 진행하면서 지형 및 수심의 변화에 의하여 천수, 회절 및 굴절현상 등을 일으키면서 복잡하게 변형된다. 이러한 변화를 거치면서 수심이 아주 얇아져 그 에너지가 한계점에 이르면 파가 부서지면서 쇄파가 일어난다. 또한 라디에이션 응력의 장소적 차이는 평균수위의 변동을 일으켜 해빈류를 발생시키고, 해빈류는 해저 물질의 이동과 그로 인한 해저지형 변화의 요인이 된다.

해빈류에 관한 이론적인 취급은 Longuet-Higgins and Stewart(1962, 1964), Longuet-Higgins(1970)가 라디에이션 응력(Radiation stress)에 대한 개념을 제안한 후, 쇄파대 내에서 여러 현상에 대한 연구가 이루어 졌으며, Sonu(1972)는 대규모

현지 관측을 실시하여 해빈류에 대한 정량적인 평가를 시도하였다. Noda(1974)는 수평확산항과 이류가속도항을 무시하고 정상상태를 가정하여 흐름함수(Stream function) 형태의 파-흐름의 상호간섭을 고려한 지배방정식을 유한차분법(FDM)으로 수치해를 계산하였다. Birkemeier and Dalrymple(1976)은 흐름의 계산시 흐름함수를 사용하지 않고 평균유속으로 표현된 식으로 파-흐름의 상호간섭을 고려하여 유한차분법으로 계산하였고 Liang(1983)은 정상형태의 지배방정식을 유한요소법(FEM)으로 수치해석하였다. 상기와 같이 파-흐름의 상호작용에 관한 연구는 먼저 흐름효과를 고려할 수 있는 파랑전파 수치모형을 통하여 파고분포 및 잉여응력 분포를 구하고 이들을 해수유동 모델에 입력하여 해빈류의 흐름장을 결정한다. 그리고 이 결과에 흐름효과를 고려한 파랑모형에 입력하여 수정된 잉여응력장을 구하고 이를 이용하여 흐름장을 다시 계산하는 일련의 반복 과정을 갖는다. 그러나 본 연구에서 사용된 FUNWAVE(Fully

* 대표저자 : 정희원, yjcho@moiza.chonnam.ac.kr, 061-659-3152

† 교신저자 : 정희원, parkih@chonnam.ac.kr, 061-659-3152

Nonlinear Boussinesq Wave Model) 모형은 Boussinesq 식을 이용하는 비선형 모형으로서 지배방정식에 이미 수면변위와 유속성분이 기본적으로 결합되어 있다. 따라서, 해빈류를 결정하기 위하여 라디에이션 용력을 별도로 구할 필요가 없으며 해빈류는 결정된 유속성분을 일정 시간동안 평균한 흐름 형태로 구해질 수 있다.

이와 같은 Boussinesq 모형은 파랑의 비선형성과 분산성이 고려되어, 내재된 가정에 따른 적용범위 내에서는 상당히 정확한 모형이지만 약분산성(Weak dispersion)과 약비선형(Weak non-linearity)가정 때문에 그 적용대상이 천해역과 비선형 효과가 작은 경우로 제한되었다(Table 1).

국내에서 Boussinesq 모형을 이용한 파랑변형에 관한 연구는 윤과 이(1999)의 스폰지 경계층을 사용하여 반사파로 인한 문제를 해결하기 위해 면 내부조파기법과 쇄파구조를 고려한 Nwogu(1993)의 확장형 Boussinesq 모형을 이용하여 일정경사를 가진 수심에 대하여 수치모의하여 수리실험 결과와 비교하여 제시하였다. 윤과 김(2001)은 Kennedy et al.(2000)의 와점성 모형의 쇄파기법을 추가한 Kirby et al.(1998)의 완전비선형 Boussinesq 모형을 이용하여 수중천퇴에 대한 실험을 수치모의하여 수리실험 결과와 비교하여 제시하였다. 윤과 박(2005)은 Wei and Kirby(1995)의 완전비선형 Boussinesq 모형을 이용하여 쇄파대를 포함한 천해역에서의 파랑변형을 수치모의하여 실험치 및 완경사방정식을 이용한 선형모형의 결과와 비교하여 제시하였다. 이 등(2007)은 이와 윤(2006)이 수행한 동일한 실험조건에 대해 고차 Boussinesq 모형을 이용하여 수치모의하였고, 수리실험 결과 및 포물형 근사식에 의한 수치해석결과와 비교하여 적용성을 검토하였다. 류 등(2007)은 계산에 이용한 Boussinesq 모형의 격자크기와 계산시간 간격에 대한 계산의 유효성을 검토하기 위하여 제주 차귀도 주변해역의 파랑변형을

수치모의하여 제시하였다. 최근에는 이와 김(2008)이 Lynett and Liu(2004a, b)에 의해 유도되어 심해역까지 적용이 가능한 다층 Boussinesq 식 모형의 적용성에 관하여 검토하였다.

해빈류에 관한 연구는 전 등(2005)이 확장형 Boussinesq 모형을 이용하여 Vincent and Briggs(1989)의 실험 중 비쇄파조건에 한정하여 계산한 결과와 완경사방정식의 선형파 모형 및 해수유동모형을 결합하여 계산한 결과를 비교하여 제시하였다. 추후, 전 등(2006)은 Vincent and Briggs(1989)의 규칙파 실험 결과를 이용하여 불규칙파 실험결과와 그리고 전 등(2005)이 수행한 이어도 수리실험 결과를 비교하여 제시하였다. 최 등(2007)은 FUNWAVE 모형을 이용하여 Vincent and Briggs(1989)의 실험 중 쇄파 및 비쇄파조건에 대하여 규칙파의 해빈류를 수치모의하여 제시하였다.

본 연구에서는 천해역에서 파랑변형과 해빈류에 대한 Boussinesq 모형의 적용성을 고찰하기 위하여, Berkhoff et al.(1982)의 타원형 천퇴와 Watanabe and Maruyama.(1984)의 이안제의 수리실험 조건에 대하여 파랑변형과 해빈류를 계산하며, 수치모형은 기본형, 확장형 그리고 완전비선형 Boussinesq 식을 이용하여 수리실험 결과와 비교·검증한다. 본 모형의 현장 적용성은 완전비선형 Boussinesq 모형을 이용하여 Sonu(1972)와 DELLAH PROJECT(Birkemeier et al., 1997)의 현장자료와 비교·검증하여 파랑변형과 해빈류를 계산하고 그 결과를 검토하고자 한다.

2. Boussinesq 수치모형

본 모형에 사용된 Boussinesq 식은 Nwogu(1993)의 확장형 Boussinesq 식을 기초로 하여 Wei and Kirby(1995)에 의해 완전비선형 방정식의 차원을 가진 형태는 다음과 같다(Kirby et al., 1998; 2003).

Table 1. Application limits of Boussinesq equations

Boussinesq Eq.	Application of deep water depth(relative water depth maintained accuracy of 90% for phase velocity)		Application of nonlinear (O(a/h,(a/h)2,...)including)		Application of water depth changes (O(∇h,∇2h,...,(∇h)2,(∇h)3,...) including)	
	kh≤0.58II		O(a/h)	Weak nonlinear	Impassible	Constant depth
Boussinesq(1872)	kh≤0.58II		O(a/h)	Weak nonlinear	Impassible	Constant depth
Peregrine(1967)	kh≤0.58II		O(a/h)	Weak nonlinear	O(∇3h) Including parts	Mild slope depth
Nwogu(1993)	kh≤1.32II	Extended	O(a/h)	Weak nonlinear	O(∇3h) Including parts	Mild slope depth
Wei and Kirby(1995)	kh≤1.32II	Extended	Including all orders	Fully nonlinear	O(∇3h) Including parts	Mild slope depth

‡ k: Wave number, h: Water depth, a: Wave amplitude, ∇: (∂/∂x, ∂/∂y)

$$\eta_t = E(\eta, u, v) + \gamma E_2(\eta, u, v) + f(x, y, t) \quad (1)$$

$$[U(u)]_t = F(\eta, u, v) + [F_1(v)]_t + \gamma [F_2(\eta, u, v) + F^t(\eta, u, v, v_t)] + F_b + F_{br} + F_{bs} + F_{sp} \quad (2a)$$

$$[V(v)]_t = G(\eta, u, v) + [G_1(u)]_t + \gamma [G_2(\eta, u, v) + G^t(\eta, u, v, v_t)] + G_b + G_{br} + G_{bs} + G_{sp} \quad (2b)$$

여기서, u 와 v 는 $z = z_\alpha = -0.531$ 의 수심에서 수평 방향 x 와 y 축에서 속도이다. 즉, (u, v) 는 u_α 이다. 그리고 γ 는 완전 또는 약 비선형 사이의 값을 사용하는 제어 변수로서 1일 경우 완전 비선형 Boussinesq 식이 되고 0이 되면 Nwogu의 확장형 Boussinesq 식이 된다. 또한, $f(x, y, t)$ 은 조파항, (F_b, G_b) 는 저면마찰항, (F_{br}, G_{br}) 은 쇄파감쇠항, (F_{bs}, G_{bs}) 은 격자내 혼합항, (F_{sp}, G_{sp}) 는 스폰지 감쇠항이다.

또한, $U, V, E, E_2, F, F_1, F_2, G, G_1, G_2, F^t, G^t$ 의 값들은 FUNWAVE 1.0 Manual(Kirby et al., 1998)에 자세히 기술되어 본 절에서는 생략하였다.

3. Boussinesq 수치모형의 검증

3.1 타원형 천퇴의 경우

Berkhoff et al.(1982)에 의한 실험은 완경사 방정식에 기초한 검증 모형에 관한 표준으로 수년에 걸쳐 연구되었다. 이 실험에서 측정된 파고의 정확한 재현은 천수, 굴절, 회절, 비선형 분산을 포함한 요소의 수에 관하여 의존된다. 실질적으로 실험에서 비선형성의 중요성은 Kirby and Dalrymple.(1984)에 의해 증명되었다. 하지만, 실험($kh = 1.9$)에서 큰 kh 값 때문에 모형은 이 상황에서 비선형 천수방정식 또는 표준 Boussinesq 식에 기초하면 맞지 않는다. 중간수심에서 개선된 선형분산특성을 가진 현 모형은 Nwogu(1993)의 확장형 Boussinesq 식 또는 완전 비선형방정식이 자료의 정확한 예측을 제시하고 적용할 수 있다.

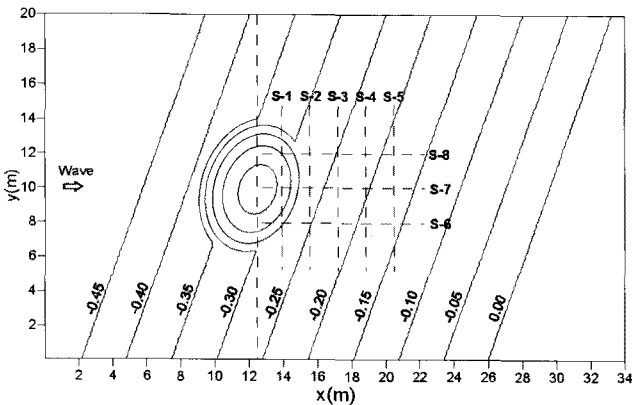


Fig. 1. Bottom contours and computational domain for the Berkhoff et al.(1982)'s elliptic shoal.

수리실험대상 영역의 저면 지형은 Berkhoff et al.(1982)에 의한 실험조건으로 일정 경사 1/50을 가진 비교적 평평한 해안에서 타원형 천퇴가 존재하고 경사에 관한 저면 지형은 y 축에 대하여 20° 의 방향을 가진다. 규칙파 조건으로 파를 생성하고 2개 연직 측면은 벽 경계조건을 가지며 해안선 쪽으로 흡수경계가 위치한다.

수치모형 실험조건은 기존의 수리실험의 영역보다 해안선 쪽으로 최대한 영역을 확장하여 파가 충분히 쇄파하도록 계산 영역을 Fig. 1과 같이 증가시켰다. 외해 수심이 45cm, 입사파고 464cm, 주기 1초의 규칙파가 해안선에 직각으로 입사하는 조건이다. 규칙파는 영역의 $x=2m$ 에서 내부조파함수를 이용하여 파를 생성하였다. 그리고 스폰지 경계는 조파위치와 같은 $x=2m$ 와 해안선 부근 $x=34m$ 에 위치하고, 측면 상단부에서 y 축 방향으로 기존 영역에 파장의 2배 만큼 연장하여 흡수경계처리를 하였다. 계산의 격자간격 Δx 는 0.1m이고 시간간격 Δt 는 CFL 조건에 만족하는 0.01초로 하였으며 20주기 이상을 정상상태로 간주하고 모형의 계산종료 시간은 200주기에서 수렴하는 조건으로 수행하였다.

수치계산결과는 Fig. 1에서 점선으로 표시된 8개의 단면에서 Berkhoff et al.(1982)의 수리실험 결과와 비교하여 Fig. 2에 나

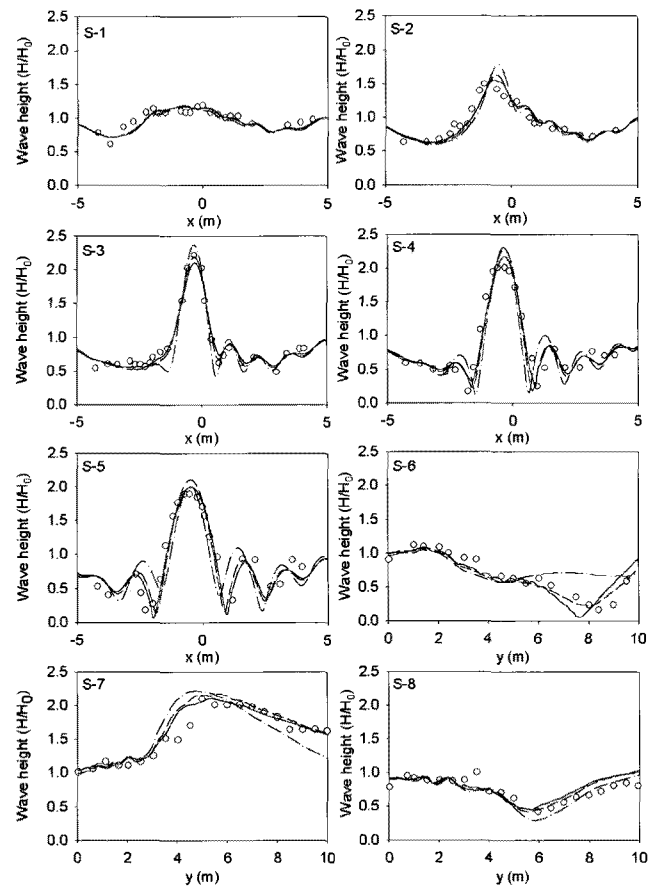


Fig. 2. Wave height ratio along the specified sections, Solid line: A fully non-linear Eq.; Short dash: Extended Eq.; Dash-dot: Basic Eq.; Circles: Experiment data.

타내었다. 1~5단면에서 기본 Boussinesq 모형결과는 x-축 중앙 부분에서 값이 과대평가되고 좌우측 위상차가 나타났다. 반면 전체적으로 확장형 Boussinesq 모형이 실험값과 매우 일치하고 이 보다 더 완전비선형 Boussinesq 모형의 결과가 크기 뿐 만 아니라 위상차까지 더 좋은 결과를 보인다. 이것은 Berkhoff et al.(1982)에 의한 실험이 비선형 파랑 현상에 의한 영향을 상당히 받고 있는 편이어서 기본 Boussinesq 모형보다는 확장형 Boussinesq 모형에서 더 좋은 결과가 나타났다. 6~8 단면은 천퇴 배후에서 x-축 방향에 대한 파고분포로서, 전반적으로 기본형 Boussinesq 모형보다는 확장형 Boussinesq 모형의 결과가 수리실험 결과와 좋은 결과를 보였다. 하지만 8단면에서는 천퇴의 영향으로 파형이 완전 분산되지 않고 약분산의 형태를 나타내며, 기본형 모형에서 보다 나은 결과가 나타난 것처럼 보인다.

해빈류는 총 200주기 중 마지막 100주기를 대상으로 한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 그 결과 천퇴를 중심으로 전방은 양쪽으로 약한 회전류가 발생하고 후방 역시 양쪽으로 회전류가 발생하였다. 그리고 해안선 부근에서는 연안류가 정선을 따라 영역의 상단부분으로 진행하며, 일부는 회전을 하여 외해쪽으로 순환류의 흐름을 보였다. 이때 최대 16cm/s 유속이 나타났다. 하단 부근에서도 해안선을 부근에서 하단으로 내려가는 연안류와 외해쪽으로 순환류의 흐름이 나타났다.

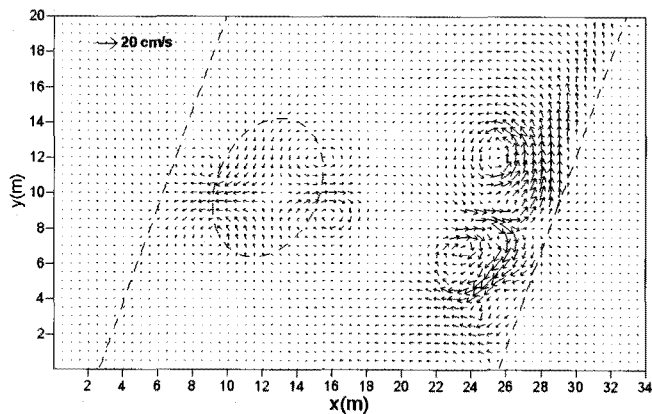


Fig. 3. Wave-induced currents around the elliptical shoal.

3.2 이안제의 경우

구조물에 의한 반사파가 존재하는 중첩된 파랑장을 해석하기 위해서 이안제가 설치된 평면수조의 해저지형 경사는 1/50의 평행 등심선을 갖는 지형이다. 대안거리 3.0m, 수심 6cm의 위치에 길이 2.67m의 이안제가 해안선과 평행하게 설치된 모형이다. 수치모형의 실험조건은 입사파에 대해 심해파 파고 2.0cm, 주기 1.2초의 규칙파가 해안선에 직각으로 입사하는 조건이다. 경계조건은 이안제의 중심을 자르는 선 및 이안제상에서는 벽 경계로 완전 반사조건이며, 그 외의 경계는 스폰지 경계로 하였다. 격자간격 Δx 는 0.05m이고 시간간격 Δt 는 0.02초로 하였으며, 20주기 이상을 정상상태로 간주하고 모형의 결과는 200주기 때를 나타내었다.

Fig. 4는 파고 분포를 단면에 따라 수리실험(Watanabe and Maruyama, 1984)과 비교한 결과로 이안제를 중심으로 대칭하는 특성에 따라 한 쪽 면만 비교하였다. Fig. 4(a)에서 이안제 전면(x=2m, front side)의 횡단방향 파고분포는 기본 Boussinesq 모형과 확장형 Boussinesq 모형 둘 다 이안제 영향이 없는 부분에서는 실험값보다 전체적으로 과대평가 되었다. 이안제 부근에서의 반사파는 기본 Boussinesq 모형이 실험값보다 과소평가 되었으며, 확장형 Boussinesq 모형은 과대평가 되었다. 하지만 완전비선형 Boussinesq 모형 결과는 전반적으로 실험값과 좋은 결과를 보였고 이안제 부근에서 반사파 재현도 좋은 결과를 보였다. Fig. 4(b)에서 이안제 후면(x=2m, rear side)의 횡단방향 파고분포는 기본 Boussinesq 모형과 확장형 Boussinesq 모형 둘 다 이안제 전면과 유사하게 실험값보다 전체적으로 과대평가 되었다. 이안제 부근에서의 회절파는 기본

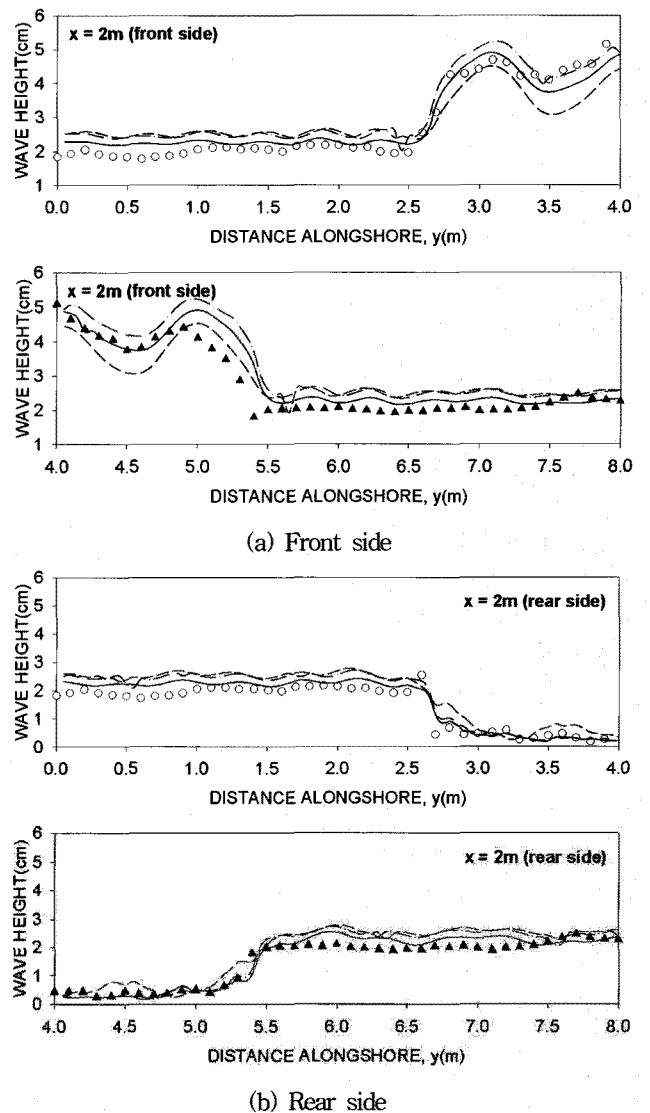


Fig. 4. Comparison between computed and measured wave height, Solid line: A fully non-linear Eq.; Dash-dot: Extended Eq.; Short-dash: Basic Eq.; Circles and triangle: Experiment data.

값보다 과대평가 되지만 완전비선형 Boussinesq 모형 결과는 전반적으로 실험값과 좋은 결과를 보였다.

Fig. 5는 규칙파 조건에 대한 해빈류 유형을 나타내었다. 해빈류 유형은 이안제 배후의 $y=4m$ 축을 기준으로 하여 양쪽으로 대칭하는 흐름으로 강한 회전류가 발생하였으며 최대유속 $19cm/s$ 의 크기를 가진다. 수리실험 자료(Nishimura et al., 1985)와 비교하여 전반적으로 이안제 안쪽으로 회전하는 유속 유형이 서로 유사하게 나타났다.

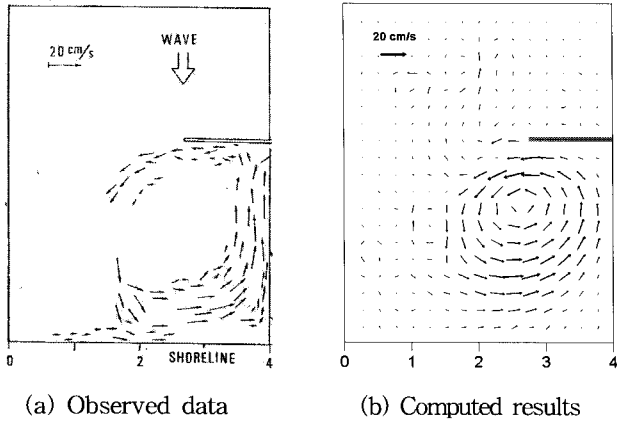


Fig. 5. Comparison between computed and observed wave-induced currents pattern behind the detached breakwater.

4. 완전비선형 Boussinesq 모형의 현장적용

4.1 복잡한 해저지형의 경우(Sonu, 1972)

Fig. 6은 해빈류를 연구하기 위해 부표 추적식을 이용하여 대규모 관측을 실시한 Sonu(1972)에서의 해저지형을 나타낸다. 실험에 사용된 완전비선형 Boussinesq 모형은 이 영역을 $\Delta x = 0.5m$ 로 220×160 의 격자망으로 구성하였다. 입사조건은 파고 $0.3m$, 주기 $3.77sec$, 파향이 해안선에 직각으로 입사한다. 그리고 규칙파의 조건으로 해빈류($t=200sec$)를 계산하였다.

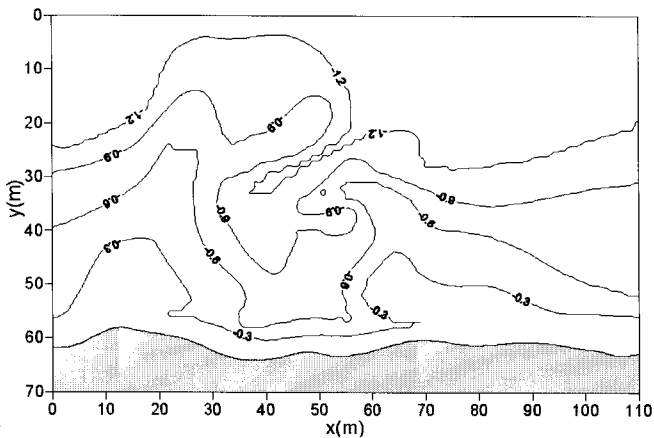
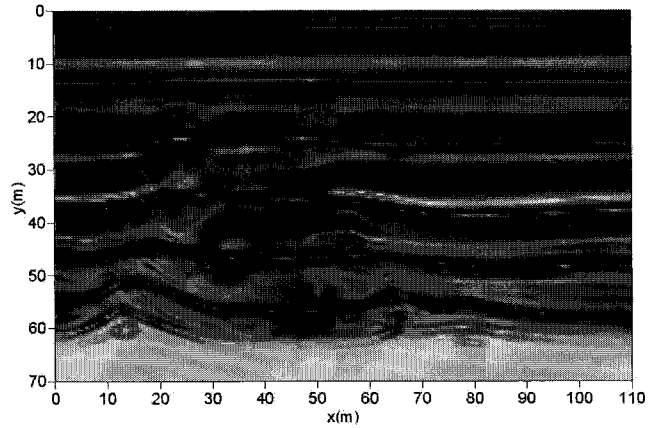
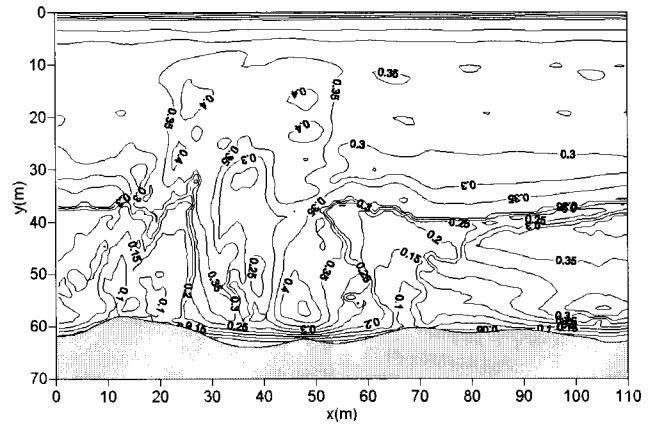


Fig. 6. Field area of Sonu(1972)'s study.

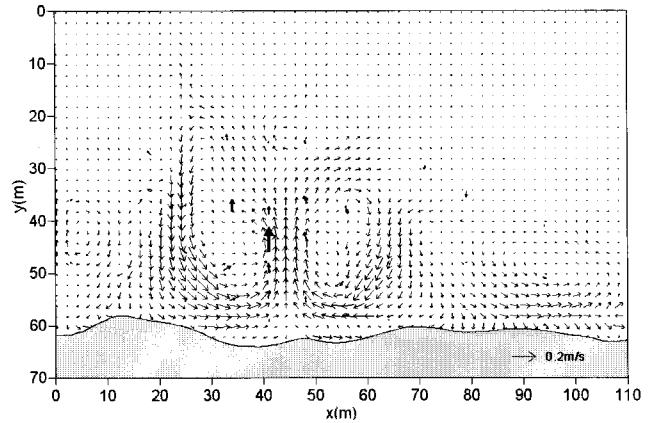
수치모형에 의한 계산결과는 규칙파에 대하여 수면변위(Fig. 7(a)), 파고분포(Fig. 7(b)), 해빈류(Fig. 7(c))의 유형으로 나타내었다. 수면변위는 입사 경계부분에서 선형적으로 진행하며 복잡한 협곡 지형을 지나면서 비선형적인 변화가 나타났다.



(a) Surface elevation($t=200s$)



(b) Wave heights distribution($t=200s$)

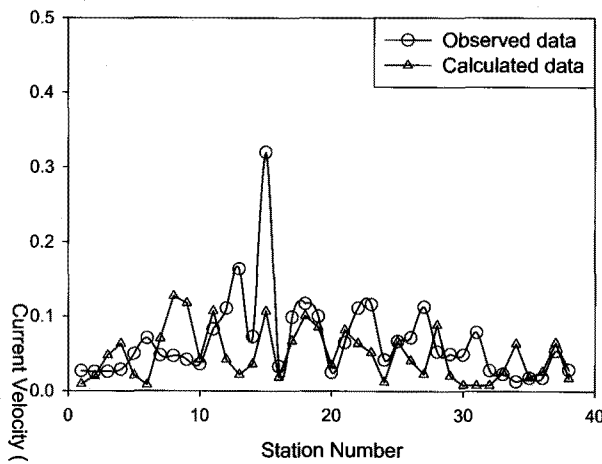


(c) Wave-induced currents pattern($t=200s$)

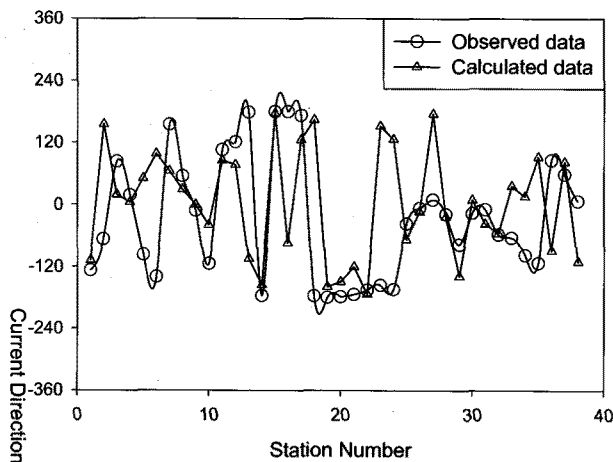
Fig. 7. Surface elevation, wave height distribution and wave-induced currents pattern by Sonu(1972)'s bathymetry.

파고분포는 규칙파에 대한 초기 입사파고 0.3m 조건에서 파가 진행하면서 협곡지형에서 복잡한 파고분포를 나타내고 있는 반면에 해안선에서 좌측과 우측 능선부근에서는 비교적 완만한 파고분포가 나타났다. 특히, 우측 능선부근의 쇄파대에서는 알은 수심에 따른 천수 효과가 나타났다.

계산된 해빈류의 결과는 협곡 중앙부근에서 이안류 형태의 흐름이 최대 0.2m/s 정도로 발생하였다. 또한 해안선에서 좌측 큰 능선부와 우측의 작은 능선부에서 해빈류가 집중하면서 회전하는 형태를 보였다. Fig. 8은 각 정점에서 계산된 값과 Sonu(1972)의 현장자료(39개 정점)와 비교한 결과로, 해빈류의 크기와 방향이 다소 차이를 보이지만 전반적으로 해빈류의 유형을 잘 나타내는 것으로 사료된다. 이와 같은 차이는 현장자료는 관측된 표층에서 부표의 수송속도개념이며, 계산값은 수심 평균된 흐름으로서 해빈류를 정의하기 때문이다.



(a) Current velocity



(b) Current direction

Fig. 8. Comparison between computed and observed wave-induced currents at 39 stations.

4.2 연안사주가 발달해역의 경우(North Carolina의 Duck)

실규모 해역에서 완전비선형 Boussinesq 모형의 적용을 위하여

1990년에 수행된 DELILAH(Duck Experiment on Low-frequency and Incident-band Longshore and Across-shore Hydrodynamics) PROJECT의 현장 관측자료(Birkemeier et al., 1997)와 비교하였다. Birkemeier et al.(1997)에 의하면, 관측 영역은 미국의 North Carolina의 Duck 해안으로서, Fig. 9는 관측 영역의 지형 및 수심 (http://frf.usace.army.mil/delilah)을 나타내며, 상세지형의 중앙부근(y=985m)에서 외해쪽으로 9개의 수압식 파고계와 전자식 유속계를 설치하여 파고와 해빈류를 측정하였다고 한다. 하지만 9개의 관측지점 중 해안선에 가장 가까운 파고와 유속자료는 기기의 손상으로 인해 분석을 수행할 수 없어 본 연구에서 그 결과는 제외하였다. 그리고 사용된 자료들은 1990년 10월 9일에 측정된 값들이다.

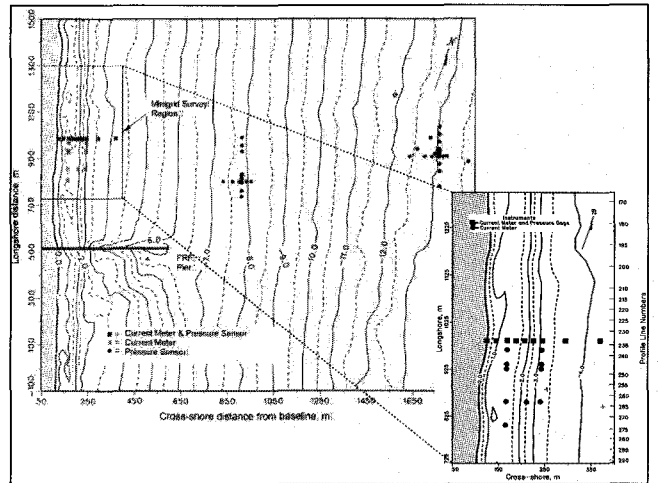


Fig. 9. Observation stations and bathymetry Duck experiment area(after Birkemeier et al., 1997).

모형의 계산조건은 입사파고 0.9m, 주기 10.72sec, 파향 30°이며, 격자망은 외해 수심 8m에서 조파되는 것으로 간주하여 501×401(Δx=2m, Δy=4m)로 구성하였다. 그리고 규칙파 조건으로 해빈류(t=300sec)를 계산하였다.

모형의 계산결과를 도시한 Fig. 10(a)~(c)는 각각 수면변위, 파고분포, 해빈류의 유형을 나타낸 것이다. 수면변위는 입사경계에서 파향이 30°로 입사하면서 연안사주가 발달된 지역(x=200m)에서부터 비선형적으로 변화된다. 파고분포는 입사경계에서 파가 규칙파로 진행하면서 연안사주가 발달된 지역에서부터 쇄파하여 점진적으로 해안선 부근까지 감소된다. 이에 따라 해빈류는 연안사주가 발달된 지역을 따라 남류하는 연안류가 주로 나타나며 최대 유속이 0.65m/s이다. 또한, Fig. 8에서와 같이 y-축 방향 1200m 부근의 연안에서 지형특성에 따라 외해로 흐르는 작은 크기의 이안류가 나타나기도 한다.

Fig. 11과 Fig. 12는 대상해역의 센터라인 9개의 현장자료와 계산영역의 x-방향 단면(y=985m)에 대한 결과를 비교한 것으로, 파고분포와 해빈류를 나타낸다. 파고분포는 연안사주에서 파가 쇄파하여 점진적으로 감소하는 현장 자료와 같이 비교적 좋은 결과를 보였다. 하지만 해빈류는 현장 자료가 연안사주에

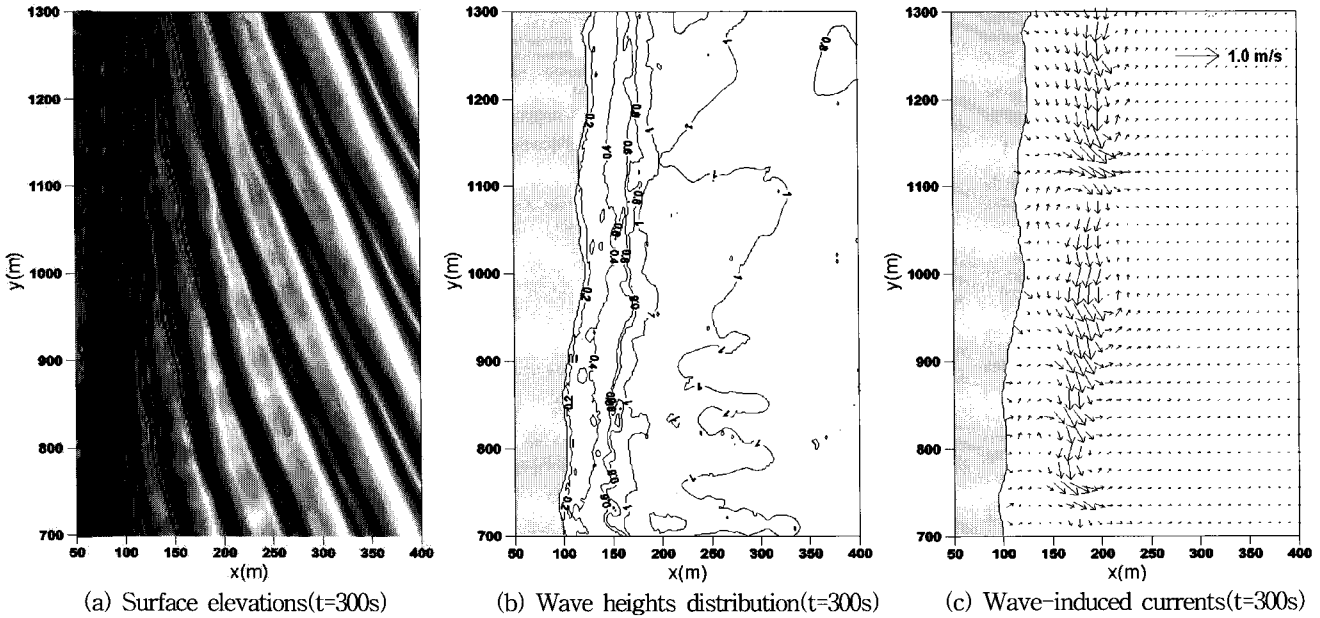


Fig. 10. Surface elevation, wave height distribution and wave-induced currents pattern by numerical simulations.

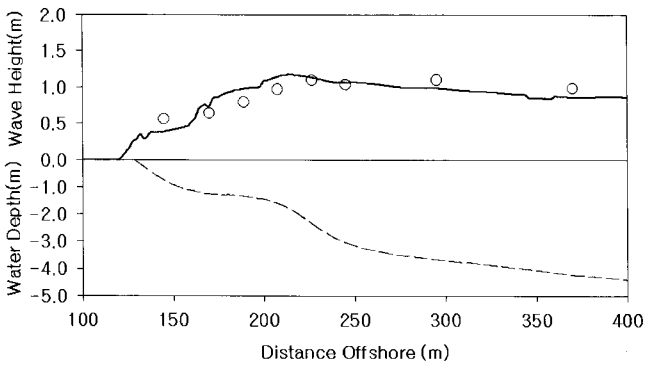


Fig. 11. Comparison between observed and various calculated wave heights; Solid line: present study; circles: field data; short dash line: Water depth.

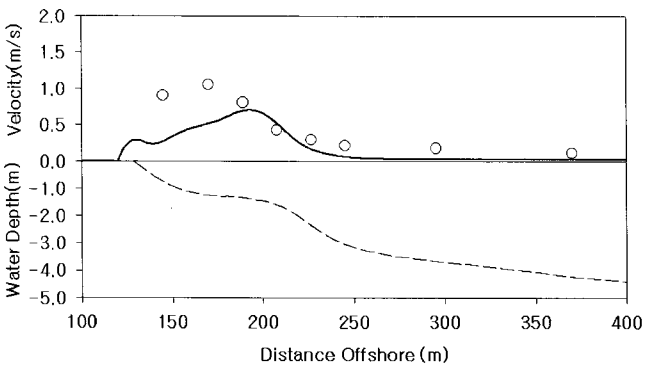


Fig. 12. Comparison between observed and various calculated wave-induced currents; Solid line: present study; circles: field data; short dash line: Water depth.

서 유속이 증가하여 해안선 부근까지 유속이 최대 1.05m/s로 크게 나타났지만, 본 모형의 계산결과는 연안사주에서 유속이 최대 0.65m/s로 소폭 상승하고 해안선 부근까지 점진적으로 감소하는 경향을 보였다. 이런 현상은 앞선 Berkhoff et al.(1982)의 수리실험 조건에서 완전비선형 Boussinesq 방정식을 사용한 결과에서도 유사한 경향을 보였다. 실제 연안사주가 발달된 천해역에서는 파가 진행할 때 연안사주 상단에서 급격한 파의 변화로 인하여 운동량유량(Momentum flux)의 기울기 변화에 의해 발생하는 평균 수위변화가 흐름을 일으킨다. 그 이후의 구간에서는 파가 점진적으로 감소하면서 해안선 부근에서 완전 쇄파되지만 해빈류는 상단에서 흐름이 점진적으로 커지면서 연안사주와 해안선 사이의 곡(Trough) 부근에서 가장 크게 나타나며 해안선 부근에서 급격히 감소한다. 하지만 본 모형에서는 천퇴배후에서 파가 부서지면서 기인된 흐름에 의한 굴절로 나타나는 파의 그림자 영역이 나타나기 때문에 현장자료 보다 작은 유속이 나타났다.

이것은 본 모형에서 쇄파를 재현하기 위해 난류혼합과 에너지 감쇠를 포함한 와점성모형을 사용하였지만, 연안사주가 발달된 지형에서는 본 모형이 잘 재현되지 않는 것으로 보인다. 따라서 연안사주가 발달한 곳에서 정확한 해빈류 재현을 위해, 쇄파에 관한 난류모형의 적절한 개선과 다방향 불규칙파의 적용이 차후에 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 천해역에서의 파랑변형과 해빈류를 예측하기 위한 여러 모형 중에서 특히, 비선형성 효과를 반영할 수 있는 완전비선형 Boussinesq 식을 이용한 FUNWAVE 모형으로 수

치모의를 실행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 타원형 천퇴가 존재하는 해역에 관한 수치계산결과는 완전비선형 모형이 파고분포의 수리실험값(Berkhoff et al., 1982)과 가장 좋은 결과를 보였다. 해빈류는 천퇴 배후에서 회전류와 해안선을 따라 연안류가 발생하였으며 최대 16cm/s 정도로 나타났다.

(2) 이안제가 존재하는 해역에 대한 수치계산결과, 이안제 전후에서 반사파와 회절파 재현은 완전비선형 모형이 수리실험값(Watanabe and Maruyama, 1984)과 비교하여 좋은 결과를 보였다. 이안제 배후의 해빈류 수치계산결과는 수리실험치(Nishimura et al., 1985)와 비교하여 흐름 유형이 서로 유사하게 나타났으며, 최대 유속이 19cm/s이다.

(3) 완전비선형 Boussinesq 모형을 Sonu(1972)의 현장자료에 적용한 결과, 수치모형의 계산결과는 해안선 부근의 복잡한 협곡지형에서 파를 발산 없이 잘 재현하였다. 해빈류는 협곡중앙부근에서 최대 0.2m/s 정도로 나타났으며, 그 위치는 현장자료와 비교하여 다소 차이가 있으나, 전체적으로 해빈류의 유형을 잘 나타내었다.

(4) 연안사주가 발달된 DELILAH PROJECT(Birkemeier et al., 1997)의 현장자료에 완전비선형 Boussinesq 모형을 적용한 결과로 파고분포는 현장자료와 비교하여 좋은 결과를 보였다. 하지만 해빈류의 크기는 현장자료와 달리 연안사주와 해안선 부근에서 유속이 과소평가되는 경향이 나타났다.

(5) 상기의 수치계산결과는 수리실험치와 비교하여 좋은 결과를 보였지만 현장자료와 비교에서는 다소 차이를 보였다. 따라서 연안사주가 발달한 곳에서 정확한 파랑변형과 해빈류 재현을 위해서, 쇄파에 관한 난류모형의 적절한 개선과 다방향 불규칙파의 적용이 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

[1] 류황진, 신승호, 홍기용, 홍석원, 김도영(2007), "Boussinesq 모델을 이용한 제주 차귀도 해역의 다방향 불규칙파 시뮬레이션", 한국해양공학회지, 제21권, 제1호, pp. 7-17.

[2] 윤종태, 김중무(2001), "완전비선형 Boussinesq 방정식을 이용한 쇄파대의 파랑변형 모의", 한국해양·해양공학회지, 제13권, 제2호, pp. 296-308.

[3] 윤종태, 박승민(2005), "완전비선형 Boussinesq 모형의 천수 및 쇄파 특성", 한국해양공학회지, 제19권, 제2호, pp. 29-33.

[4] 윤종태, 이창훈(1999), "쇄파구조를 고려한 확장형 Boussinesq 방정식의 수치 실험", 한국해양·해양공학회지, 제11권, 제3호, pp. 149-155.

[5] 이종인, 김영택(2008), "다층 Boussinesq 방정식 모형의 적용성 검토", 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 논문집, pp. 2749-2752.

[6] 이종인, 김영택, 윤성범(2007), "Boussinesq 방정식을 이용

한 규칙파의 연파해석", 한국해양·해양공학회지, 제19권, 제5호, pp. 446-456.

[7] 이종인, 윤성범(2006), "직립벽을 따른 연파의 수리 및 수치실험", 대한토목학회논문집, 26(4B), pp. 405-412.

[8] 전인식, 김귀동, 심재설(2006), "수중 천퇴에서의 쇄파거동 예측을 위한 Boussinesq 방정식 모델의 적용", 한국해양·해양공학회지, 제18권, 제2호, pp. 154-165.

[9] 전인식, 정상봉, 김귀동, 심재설(2005), "Boussinesq 방정식을 이용한 수중 천퇴에서의 파랑변형 및 파랑류 계산", 한국해양·해양공학회지, 제17권, 제3호, pp. 202-212.

[10] 최준우, 백운일, 윤성범(2007), "수중타원형 천퇴를 통과하는 규칙파의 파랑쇄파류에 의한 변형", 한국해양·해양공학회지, 제19권, 제6호, pp. 557-564.

[11] Berkhoff, J. C. W., N. Booy and A. C. Radder(1982), "Verification of numerical wave propagation models for simple harmonic linear water waves", Coast. Engrg., Vol. 6, (13), pp. 255-279.

[12] Birkemeier, W. A. and R. A. Dalrymple(1976), Numerical models for the prediction of wave set-up and nearshore circulation, Ocean Eng. Rep. No. 3, Univ. Dalaware, Dept. of Civ. Eng., pp.1-20.

[13] Birkemeier, W. A., C. Donoghue, C. E. Long, K. K. Hathaway and C. F. Baron(1997), The DELILAH Nearshore Experiment : Summary Data Report, US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS., pp. 1-11.

[14] Kennedy, A. B., G. Wei, Q. Chen, J. T. Kirby and R. A. Dalrymple(2000), Boussinesq modelling of wave transformation, breaking and runup. I : One dimension, J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engrg., 126, pp. 48-56.

[15] Kirby, J. T. and R. A. Dalrymple(1984), "Verification of a parabolic equation for propagation of weakly non-linear waves", Coastal Engineering, pp. 219-232.

[16] Kirby, J. T., W. Long and F. Shi(2003), FUNWAVE 2.0. Fully nonlinear Boussinesq wave model on curvilinear Coordinates; document and user's manual, Center for Applied Coastal Research, University of Delaware, pp.7-35.

[17] Kirby, J. T., G. Wei, Q. Chen, A. B. Kennedy and R. A. Dalrymple(1998), FUNWAVE 1.0. Fully nonlinear Boussinesq wave model; document and user's manual, Center for Applied Coastal Research, University of Delaware, pp. 9-19.

[18] Liang, S. C.(1983), Prediction of wave induced surf zone current adjacent to breakwaters, Ph.D. Thesis, U.K. Swansea, pp. 1-10.

[19] Longuet-Higgins, M. S.(1970), "Longshore currents generated by obliquely incident sea waves", 1, 2, J.

- Geophys. Res., Vol. 75, pp. 6778-6801.
- [20] Longuet-Higgins, M. S. and R. W. Stewart(1962), "Radiation stress and mass transport in gravity waves; with application to surf beat", J. Fluid Mech., Vol. 13, pp. 481-504.
- [21] Longuet-Higgins, M. S. and R. W. Stewart(1964), "Radiation stresses in water waves: a physical discussion, with applications", Deep-Sea Research, Vol. 11, pp. 529-562.
- [22] Lynett, P. and P. L. - F. Liu(2004a), "A two-layer approach to water wave modelling", Proc. Royal Society of London A., 460, pp. 2637-2669.
- [23] Lynett, P. and P. L. - F. Liu(2004b), "Linear analysis of the multi-layer model", Coastal Engineering, 51(6), pp. 439-545.
- [24] Nishimura, H., K. Maruyama and T. Sakurai(1985), "On the numerical computation of nearshore currents", Coastal Engineering in Japan, Vol. 28, pp. 137-145.
- [25] Noda, E.(1974), "Wave-induced nearshore circulation", Journal of Geophysical Research, Vol. 77, No. 8, pp. 4097-4106.
- [26] Nwogu, O.(1993), "An alternative form of the Boussinesq equations for nearshore wave propagation", J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engrg., Vol. 119(6), pp. 618-638.
- [27] Peregrine, D. H.(1967), "Long waves on a beach", J. Fluid Mech., 27, pp. 815-820.
- [28] Sonu, C. J.(1972), "Field observation of nearshore circulation and meandering currents", Journal of Geophysical Research, Vol. 16, pp. 3232-3246.
- [29] Vincent, C. L. and M. J. Briggs,(1989), "Refraction-diffraction of irregular waves over a mound", J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engrg., ASCE, 115(2), pp. 269-283
- [30] Watanabe, A. and K. Maruyama(1984), "Numerical Analysis of Combined Refraction, Diffraction and Breaking", Proc. 31st Japanese Conf. on Coastal Eng., JSCE, pp. 103-107.
- [31] Wei, G. and J. T. Kirby(1995), "Time-dependent numerical code for extended Boussinesq equations", J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engrg., Vol. 121(5), pp. 251-261.
- [32] http://firf.usace.army.mil/pub/survey_data/bathy/

원고접수일 : 2010년 03월 25일

원고수정일 : 2010년 05월 14일 (1차)

: 2010년 06월 07일 (2차)

: 2010년 06월 15일 (3차)

게재확정일 : 2010년 06월 24일