수중천퇴상에서 규칙파 및 일방향 불규칙파의 전파변형에 대한 실험

Experiments for Wave Transformation of Regular and Uni-directional Irregular Waves over a Submerged Shoal

이종인* · 김영택**

Lee, Jong-In · Kim, Young-Taek

Abstract

Laboratory experiments are conducted to study transformation of water waves propagating over a submerged elliptic shoal in a basin. Incident waves are both regular and uni-directional irregular waves. For non-breaking wave conditions over the center of the shoal, a focusing of waves is observed at the rear side of the shoal. The measured relative heights of regular waves are greater than those of uni-directional irregular waves. Under breaking condition, the relative wave heights are small at the center of the shoal, while they are large relatively at laterals. Around the center of the shoal, the measured wave heights of uni-directional irregular waves are larger than those of regular waves because of the small wave height components of the irregular waves.

Key words : laboratory experiment, elliptic shoal, regular wave, uni-directional wave, breaking

요 지

타원형 수중 천퇴상을 통과하는 파랑에 대해 규칙파 및 일방향 불규칙파를 적용하여 전파변형에 대한 평면 수리실험을 수행하였다. 천퇴 중앙부에서 쇄파가 발생하지 않는 조건에서는 천퇴 후면에서 파랑의 집중이 나타났고, 규칙파의 상대파고가 일방향 불규칙파의 경우보다 크게 예측되었다. 쇄파조건에서는 천퇴 중앙부에서의 상대파고는 낮고, 측면에서 높게 나타났다. 그리고 비쇄파조건과는 달리 쇄파조건에서는 일방향 불규칙파의 상대파고가 규칙파 조건보다 크게 예측되었으며, 이는 불규칙파 성분중 저파고 성분에 기인한다.

핵심용어 : 수리실험, 타원형 천퇴, 규칙파, 일방향 불규칙파, 쇄파

1. 서 론

연안역의 개발 및 보전 등을 위해서는 해양외력의 평가가 선행되어야 하며, 여러 해양외력중 파랑은 가장 중요한 설계 외력이라 할 수 있다. 따라서 변수심에서 굴절, 회절, 천수 및 쇄파현상 등을 포함하는 전파변형 해석은 해안공학자에게 있어 중요한 사항이다. 연안구조물 설계 등에 필요한 천해설 계파 등을 산정하기 위해서는 이용 가능한 입력자료가 있는 심해에서 천해까지 전파하는 파랑을 해석하여야 한다. 심해로부터 천해로 전파하는 파랑은 해저지형과 인위적인 구조물 등의 영향으로 변형을 겪게 되며, 지배적인 특성으로 쇄파현상이 나타나는 천해역에서 파랑은 급격한 변형을 겪게 된다. 이러한 파랑의 전파변형 해석에는 수치모형이 일반적으로 활용되고 있다. 전파변형을 보다 정도 높게 해석하기 위한 여러 수치모형이 개발되어 왔으며, 개발된 수치모형은 이용 가

능한 수리실험 결과와 비교함으로써 그 정확도를 평가하는 것이 일반적이다.

기 수행된 대표적인 수리실험으로는 Berkhoff *et al.*(1982), Vincent and Briggs(1989), Chawla *et al.*(1996)을 들 수 있다. Berkhoff *et al.*(1982)은 타원형 수중 천퇴가 1/50의 경사면에 놓여 있는 영역에 규칙파를 대상으로 실험이 수행되었으며, 실험결과는 수치모형의 정확도를 평가하는데 있어 널리 활용되었다. Vincent and Briggs(1989)는 타원형 수중 천퇴상에서의 전파변형을 다양한 파랑조건(규칙파, 일방향 및 다방향 불규칙파)과 비쇄파 및 쇄파조건에 대해 수행하였다. Vincent and Briggs는 규칙파, 일방향 및 다방향 불규칙파에 따른 차이점을 밝힌 유용한 실험자료를 제공하였다. 실험은 일정 수심($h_o=45.72$ cm)상에 장축반경 3.96 m, 단축반경 3.05 m인 타원형 천퇴를 설치한 후 수행되었으며, 천퇴 중앙부 상단 수심(h_{top})은 15.24 cm이다. 실험에 적용된 파고는

*정회원. 전남대학교 공학대학 해양토목공학과 부교수(E-mail: jilee@chonnam.ac.kr)

Member. Associate Professor, Department of Marine and Civil Engineering, Chonnam National University

**교신저자. 정회원. 한국건설기술연구원 하천해안연구실 연구위원(Tel: +82-31-910-0654, Fax: +82-31-910-0251, E-mail: ytkim@kict.re.kr)

Corresponding Author. Member. Research Fellow, River and Coastal Research Division, Korea Institute of Construction Technology

2.54 cm~19.00 cm이지만, 주기는 1.30 sec로 동일하다. Vincent and Briggs의 쇄파조건 실험에서는 천퇴 후면의 파봉선과 나란한 1개 단면에 대해서만 실험결과를 제시하고, 파 전파방향, 즉 파봉선의 직각방향으로의 결과는 제시하지 않았다. Chawla *et al.*(1996)은 일정 수심($h_o=40$ cm)상에 직경 5.2 m인 원형 천퇴를 설치한 후 실험을 수행하였다. 실험에 적용된 천퇴의 최대높이(d_{top})가 37 cm이기 때문에 천퇴 중앙부 상단의 수심(h_{top})은 3 cm이다. 적용된 입사파의 주기는 0.71 sec~0.73 sec이고, 파고는 1.39 cm~2.49 cm이다. 실험에 적용된 파고가 상대적으로 작아 천퇴상에서의 쇄파로 인해 발생하는 흐름에 의한 여러 현상을 재현하기에는 다소 미흡한 점이 있다고 생각된다.

Yoon *et al.*(2004)은 REF/DIF S 모형(Kirby and Özkan, 1994)과 천수방정식에 기초한 흐름해석 모형을 이용하여 쇄파유도류가 파랑의 전파변형에 미치는 영향을 검토하였다. Yoon *et al.*은 타원형 수중 천퇴상에서 쇄파가 발생하면 천퇴 후면에 제트(jet)와 같은 강한 흐름(쇄파유도류)을 유발하고, 이러한 쇄파유도류(wave-induced current by breaking)로 인해 천퇴 중앙부 후면에서 파랑이 집중되지 못한다는 것을 보였다. 그리고 쇄파유도류에 의한 효과를 무시한다면 비쇄파조건의 경우와 같이 천퇴 후면에서 파랑이 집중됨으로서 파고가 과대평가됨을 보였다. Choi *et al.*(2009)는 파랑-흐름 결합모형과 FUNWAVE 모형(Wei *et al.*, 1995)을 이용하여 파랑과 쇄파유도류의 상호관계를 Vincent and Briggs(1989)의 실험영역에 적용하여 검토하였다. Yoon *et al.*(2004)과 Choi *et al.*(2009)은 실험자료의 부족으로 인해 쇄파유도류가 파랑의 전파변형에 미치는 영향을 1개 지점의 실험결과만을 대상으로 비교하였고, 쇄파조건에서의 전파변형에 대한 전반적인 비교는 수행하지 못했다.

쇄파로 인해 발생하는 쇄파유도류가 파랑의 굴절 및 회절에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 보다 다양한 실험자료의 구축이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 일정수심상에 타원형 수중 천퇴를 설치한 후 전파변형에 대한 실험을 수행하였다. 실험에 적용된 천퇴의 제원은 Vincent and Briggs(1989) 실험과 유사하지만 서로 다른 주기의 파랑을 적용하였다. 실험파는 규칙파와 일방향 불규칙파를 적용하였으며, 천퇴 상단에서 쇄파가 발생하는 경우와 발생하지 않는 경우를 포함하였다.

수리실험

수리실험은 길이 42 m, 폭 36 m, 높이 1.2 m의 평면수조에서 수행되었다. 실험에 사용된 조파기는 4개의 구동부로 구성되어 있고, 각 구동부에 연결된 조파관 하나의 폭은 5 m, 높이는 1.2 m로서 전체 폭은 20 m이다. 실험에 사용된 조파기는 전기서보피스톤식으로서 규칙파 기준으로 최대파고 0.4 m, 주기 0.5 sec~5 sec의 파를 재현할 수 있으며, 규칙파 및 일방향 불규칙파의 조파가 가능하다. 실험에 사용된 파고계는 용량식으로서 길이는 0.5 m이고, 측정범위는 ± 0.25 m이다. 본 실험에서는 각각의 계측단면에 대해 29대의 파고계를

Fig. 1. Experimental Setup, Location of Elliptic Shoal and Measurement Sections

이용하여 0.25 m 간격으로 파고를 동시에 계측하였으며, 1대의 파고계는 기준점에 상시 설치하여 입사파를 확인하였다.

Fig. 1은 평면수조내 천퇴의 위치, 반사파 제어를 위한 소파시설 배치 등을 도시한 것이다. 실험시 수조내에서의 반사를 억제시키기 위해 조파기 전면의 수조벽에는 1:10의 경사, 후면벽에는 1:3의 경사로 쇄석을 배치하였다. 그리고 측면벽은 1:2의 경사로 쇄석을 설치하고 전면에 유도판과 소파시설을 배치하여 조파기에서 발생한 파랑을 유도함과 동시에 반사파의 발생을 억제하였다. 실험영역내에 3곳의 계측단면을 설치하고, 자유수면을 계측한 후 자료를 분석하였다. Section 1과 Section 2는 파봉선과 평행하며, Section 3은 파봉선에 직각방향이다. 각 계측단면의 위치는 Fig. 1에 도시되어 있으며, Section 1과 Section 2는 $y=0$ m~7 m, section 3은 $x=5$ m~19.75 m 범위에서 0.25 m 간격으로 자유수면을 계측하였다.

실험에 사용된 천퇴는 높이에 맞춰 0.2 m 간격으로 제작된 알루미늄 뼈대를 설치한 후, 모래를 채우고 약 0.04 m의 두께로 모르타르를 피복하였다. 천퇴 중심의 좌표는 $x=8$ m, $y=0$ m에 위치하며, 사용된 천퇴의 장축반경은 3.5 m, 단축반경은 2.5 m로서 Vincent and Briggs(1989)의 실험에 적용된 천퇴보다 약간 작다(Fig. 1 참조). 그리고 천퇴의 경계는 식 (1)과 같이 정의된다.

$$\left(\frac{X'}{2.5}\right)^2 + \left(\frac{Y'}{3.5}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

여기서, X' 과 Y' 은 천퇴중심에서의 국부좌표이며, 각각 단축과 장축을 가리키는 것이다.

수조바닥으로부터의 천퇴높이는 식 (2)와 같이 주어지며, 천

Fig. 2. Side View of Submerged Elliptic Shoal

퇴 중심부($X'=Y'=0$ m)에서의 최대 높이는 $d_{top}=0.35$ m이다 (Fig. 2 참조).

$$d(m) = 0.875 \left\{ 1 - \left(\frac{X'}{3.125} \right)^2 - \left(\frac{Y'}{4.375} \right)^2 \right\}^{0.5} - 0.525 \quad (2)$$

따라서, 실험영역내 임의지점에서의 수심(h)은 다음과 같다.

$$h(m) = h_o - d \quad (3)$$

여기서, h_o 는 정수위에서 수조바닥까지의 수심이다. 본 실험에 적용된 천퇴는 Vincent and Briggs(1989)의 천퇴에 비해 크기가 약간 작고, 천퇴 중심부의 높이가 더 높기 때문에 상대

적으로 천퇴의 경사가 급하다.

3. 실험조건

본 실험은 규칙파(M-series)와 일방향 불규칙파(R-series)를 대상으로 하였으며, 주기는 1.4 sec와 1.8 sec에 대해 각 주기별로 2개의 파고(0.05 m, 0.12 m)를 적용하였다. 그리고 수심(h_o)은 0.45 m로 설정하였으며, $h_{top}=0.1$ m에 해당된다. Table 1은 실험에 적용된 입사파 조건을 정리한 것이며, 설정된 실험파는 천퇴에 도달하기 전까지는 쇄파가 발생하지 않는 조건이다. 불규칙파는 식 (4)와 같은 Bretschneider-Mitsuyasu 주파수 스펙트럼을 적용하여 재현하였다.

$$S(f) = 0.205 H_{1/3}^2 T_{1/3}^4 f^{-5} \exp[-0.75(T_{1/3} f)^4] \quad (4)$$

식 (4)에서 $H_{1/3}$ 는 유의파고, $T_{1/3}$ 는 유의주기이며, $f(=1/T_{1/3})$ 는 주파수이다.

자유수면자료는 20 Hz 간격으로 계측하였다. 규칙파의 경우에는 2,400개(120 sec), 불규칙파의 경우에는 6,000개(300 sec)

Table 1. Incident Wave Conditions for Shoal Test

Regular Waves			Uni-directional Irregular Waves			Water depth, h_o (m)
Case ID (M-series)	Wave period, T (sec)	Wave height, H_o (m)	Case ID (R-series)	Significant wave period, $T_{1/3}$ (sec)	Significant wave height, $(H_{1/3})_o$ (m)	
M1	1.4	0.05	R1	1.4	0.05	0.45
M2	1.4	0.12	R2	1.4	0.12	
M3	1.8	0.05	R3	1.8	0.05	
M4	1.8	0.12	R4	1.8	0.12

(a) case R1

(b) case R2

(c) case R3

(d) case R4

Fig. 3. Target and Measured Frequency Spectra

의 자료를 계측한 후, zero-up-crossing법을 이용하여 파고와 주기를 분석하였다. 실험파는 천퇴를 설치하기 전에 설정하였으며, 천퇴를 설치한 후 실험을 수행할 때에는 Fig. 1에 도시된 기준점에서 파고를 상시 계측하여 입사파를 점검하였다. Vincent and Briggs(1989)의 실험에서는 하나의 주기를 대상으로 하였지만, 본 실험에서는 주기의 변화에 따른 검토를 위해 2가지 주기조건을 적용하였다. Fig. 3은 R-series에 해당하는 주파수 스펙트럼을 나타낸 것이다. 4개의 실험과 조건 모두 목표 스펙트럼과 실험파 스펙트럼이 비교적 잘 일치함을 볼 수 있다.

천퇴 설치후의 전파변형 해석을 위해 실험과 설정시와 동일한 시간동안 자유수면을 계측한 후, 파고를 분석하였으며 실험결과와 신뢰도 확보를 위해 동일 조건에 대해 3회 이상 반복실험을 수행하여 결과를 분석하였다. 그리고 Fig. 1에서 볼 수 있는 바와 같이 본 실험영역은 천퇴 중심선($y=0$ m)을 기준으로 대칭이기 때문에 Section 1과 Section 2 단면에서는 $y=0$ m~7 m 구간을 대상으로 결과를 제시하고자 한다.

4. 실험결과 및 분석

Fig. 4와 Fig. 5는 $H=0.05$ m인 조건에 대한 M-series와 R-series의 실험결과이다. 천퇴상에서의 굴절로 인해 천퇴 중앙부($y=0$ m)에서 상대파고가 가장 크고, 그 측면에 상대파고가 가장 낮은 구간이 존재한다. 측면의 파고가 가장 낮은 지점은 주기가 길어질수록 천퇴 중앙부에서부터 멀어짐을 알 수 있다. 즉, Section 1에서 M1의 경우에는 $y=2$ m, M3의 경우에는 $y=2.75$ m에서 가장 낮은 상대파고를 보였으며, 이

Fig. 4. Normalized Wave Heights Along y-axis Dir. for Regular Wave Test Cases M1 and M3

Fig. 5. Normalized Wave Heights Along y-axis Dir. for Uni-directional Irregular Wave Test Cases R1 and R3

는 천퇴상에서의 굴절 정도가 상이하기 때문이다. 이러한 경향은 규칙파 및 불규칙파에서 동일하게 나타나며, 그 위치 또한 유사하다. M-series의 경우, 천퇴 중앙선을 따라 Section 1에서 M1인 경우는 $H/H_0=2.34$, M3인 경우는 $H/H_0=1.97$ 로 나타났으며, Section 2에서는 각각 $H/H_0=1.12$ 와 $H/H_0=1.22$ 로 계측되었다. R-series의 경우, 천퇴 중앙선을 따라 Section 1에서 R1인 경우는 $H_{1/3}/(H_{1/3})_0=1.92$, R3인 경우는 $H_{1/3}/(H_{1/3})_0=2.24$ 로 나타났으며, Section 2에서는 각각 $H_{1/3}/(H_{1/3})_0=1.25$ 와 $H_{1/3}/(H_{1/3})_0=1.23$ 로 계측되었다.

천퇴에서의 굴절로 인한 파랑의 집중으로 인해 $y=0$ m에서 최대 파고가 발생하는 것은 규칙파와 불규칙파 조건 모두 동일하지만, 천퇴가 설치된 구간을 벗어난 측면에서는 규칙파 조건의 경우에는 상대파고의 변동성이 큰 반면에 불규칙파의 경우에는 변동이 거의 나타나지 않고 상대파고가 1에 근접함을 알 수 있다. 이는 불규칙파의 특성상 여러 주기성분들이 존재하기 때문에 파랑의 굴절정도가 다르기 때문이다.

Fig. 6은 천퇴 상단에서 쇄파가 발생하는 조건의 실험결과로서 Section 1에 대해 결과를 도시하였다. Fig. 6(a)는 규칙파 조건, Fig. 6(b)는 불규칙파 조건으로서 천퇴 중앙부에서 상대파고가 작고, 측면에서 크게 나타나는 것은 Vincent and Briggs(1989)의 실험결과와 동일하다. M-series의 결과를 살펴보면, 천퇴 중앙부에서의 상대파고는 M2의 경우 $H/H_0=0.41$, M4의 경우 $H/H_0=0.64$ 로서 M1과 M3의 상대파고에 비해 각각 18%와 32%에 해당된다. M4에 비해 M2의 상대파고가 더 작게 나타난 것은 파고는 동일하지만, M2의 주기가 더 짧기 때문에 보다 큰 파형경사로 인해 쇄파가 강하게 발생하기 때문으로 생각된다. R-series의 경우, 천퇴 중

Fig. 6. Normalized Wave Heights Along Section 1 for Breaking Test Cases

양부에서 상대파고는 R2 조건에서 $H_{1/3}/(H_{1/3})_0 = 0.64$, R4 조건에서 $H_{1/3}/(H_{1/3})_0 = 0.86$ 로 계속되었으며, 이는 R1과 R3 조건에 비해 상대파고가 각각 33%와 38%에 해당된다. M-series에 비해 R-series에서 천퇴중앙부의 상대파고가 다소 크게 나타난 것은 불규칙파 성분중 저파고 성분이 영향을 미치기 때문으로 판단된다. 실험결과에서 알 수 있는 바와 같이 천퇴 중앙부에서는 파고가 작고, 그 측면부의 파고가 크게 나타난 것은 쇄파유도류로 인해 천퇴 중앙부에서 파랑이 집중되지 못하고, 흐름이 발생하는 구간의 측면에서 파랑이 집중되기 때문이다(Yoon *et al.*, 2004; Choi *et al.*, 2009).

Fig. 7과 Fig 8은 M-series 및 R-series의 실험결과를 비교 도시한 것이다. Fig. 7은 M1과 R1 조건의 상대파고를 Section 1과 Section 2에 대해 도시한 것으로서 파봉선 방향(y-dir.)으로의 변동성은 차이가 나지만 전반적인 경향은 유사함을 볼 수 있다. 쇄파조건에 해당되는 Fig. 8을 살펴보면, 쇄파로 인한 상대파고의 분포는 동일하지만, 규칙파의 경우가 천퇴 중앙부 측면에서 파랑의 집중도가 더 강함을 알 수 있다. 이는 전술한 바와 같이 불규칙파의 경우에는 서로 다른 주기 성분으로 인해 굴절 또한 다르기 때문으로 파랑이 집중되는 영역이 규칙파에 비해 넓기 때문이다.

Fig. 9는 Section 3의 상대파고를 도시한 것이다. $H_0=(H_{1/3})_0=0.05$ m의 결과(M1과 R1)를 살펴보면, M1이 R1에 비해 상대파고가 약간 크게 계속되었다. 그리고 천퇴 중앙부에서 M1의 상대파고의 변동이 더 큼을 볼 수 있다. 즉, 규칙파는 천퇴 중앙부에서 상대파고가 급격히 증가하였다가 감소한 후, 다시 증가하는 양상을 보인다. 불규칙파의 경우도 유사한 양상을 보이지만 그 변동폭은 상대적으로 크지 않다. 쇄파조건

Fig. 7. Comparison of Regular and Uni-directional waves for Test Cases M1 and R1

Fig. 8. Comparison of Regular and Uni-directional Waves Along Section 1 for Breaking Test Cases M2, R2, M4 and R4

에 해당하는 $H_0=(H_{1/3})_0=0.12$ m의 결과(M2와 R2)는 수심감소에 따른 천수효과로 파고가 증가하다가 천퇴 중앙부(수심이 가장 낮은 지점)에 도달하기 전에 쇄파가 발생하여 파고가 작아지는 것을 확인할 수 있다. 그리고 $x=8$ m~19.75 m

Fig. 9. Normalized Wave Heights Along Section 3

구간에서 상대파고는 1 이하로 나타났으며, 이는 쇄파유도류의 영향인 것으로 판단된다. 즉, 쇄파유도류로 인해 파랑이 천퇴중앙부로 굴절되지 못해 파고의 증폭이 발생하지 않은 것이라 할 수 있다. 그리고 전체적으로 규칙파와 불규칙파에 의한 상대파고의 차이는 크지 않았다. Vincent and Briggs (1989)의 실험결과에서는 파랑의 전파방향(x dir. at $y=0$ m in Fig. 1)에 대한 결과가 제시되지 않았다. 따라서 Yoon *et al.*(2004)과 Choi *et al.*(2009)은 파봉선과 평행한 계측구간의 결과 중 1개 지점의 실험결과와 비교하여 쇄파유도류가 파랑의 굴절 및 회절에 미치는 영향을 확인하였고, 전체적인 경향은 비교하지 못했다. 따라서 Fig. 9와 같이 쇄파조건에서 천퇴의 중앙선을 따른 파고계측 결과는 이러한 쇄파유도류에 의한 파 진행방향의 전파변형을 검증하는데 유용할 것으로 생각된다.

5. 결 론

본 연구에서는 규칙파 및 일방향 불규칙파를 적용하여 타원형 수중 천퇴상에서의 전파변형 실험을 수행하였다.

비쇄파조건에서는 굴절에 의한 파랑의 집중으로 인해 천퇴 후면에서 높은 상대파고가 나타나지만, 불규칙파의 경우에는 파랑의 집중도가 상대적으로 낮아 규칙파 조건에 비해 상대파고가 낮게 분포한다. 즉, 불규칙파의 경우에는 서로 다른 주기성분들로 인해 굴절양상이 다양하기 때문에 파랑의 집중이 약하기 때문이다. 쇄파조건에서는 천퇴상에서의 쇄파로 인해 jet와 같은 흐름이 천퇴 후면에 발생하게 되며, 이러한 흐름으로 인해 파랑의 집중이 비쇄파조건과는 다르다는 것을 실험으로 검토하였다. 쇄파조건에서는 천퇴 중앙부의 파고는

낮고, 측면부가 높게 나타났으며, 이러한 현상은 규칙파 조건에서 보다 명확하였다. 즉, 쇄파에 의해 발생하는 흐름으로 인해 천퇴 측면에서 굴절된 파랑이 천퇴 중앙부에서 집중되지 못하고, 흐름에 의해 재굴절되어 흐름이 발생하는 구간의 측면에서 파랑이 집중되어 파고가 증폭되는 것이다.

본 연구에서는 기존 실험에서 제시하지 않은 조건에 대한 실험결과를 제시하였으며, 파랑의 전파변형을 해석하는 수치모형의 검증자료로 활용될 수 있기를 기대한다.

감사의 글

본 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(NO. 2011-0030844)과 한국해양과학기술진흥원의 지원(NO. 20110131)을 받아 수행된 연구임.

References

- Berkhoff, H.C.W., Booij, N. and Radder, A.C. (1982) Verification of numerical wave propagation models for simple harmonic linear water waves. *Coastal Engineering*, 6, 255-279.
- Chawla, A., Özkan, H.T. and Kirby, J.T. (1996), Experimental study of breaking waves over a shoal. *Proceedings of 25th International Conference in Coastal Engineering*, 2-15.
- Choi, J., Lim, C.H., Lee, J.I. and Yoon, S.B. (2009) Evolution of waves and currents over a submerged laboratory shoal. *Coastal Engineering*, 56, 297-312.
- Kirby, J.T. and Özkan, H.T. (1994) Combined refraction/diffraction model for spectral wave conditions, REF/DIF S, version 1.1, *User Manual. Technical Report CACR-94-04*, University of Delaware.
- Vincent, C.L. and Briggs, M.J. (1989) Refraction-diffraction of irregular waves over a mound. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 115, No. 2, 269-284.
- 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 wave. *Journal of Fluid Mechanics*, 294, 71-92.
- Yoon, S.B., Cho, Y.-S. and Lee, C. (2004) Effects of breaking-induced currents on refraction-diffraction of irregular waves over submerged shoal. *Ocean Engineering*, 31, 633-652.

© Received May 13, 2013

© Revised May 16, 2013

© Accepted June 12, 2013