

## 쇄파 유도류를 고려한 수중천퇴상 규칙파 전파 수치모의 Numerical Simulation of Monochromatic Wave Propagation Considering Breaking-Induced Currents over Submerged Shoal

윤성범<sup>1</sup> · 박준영<sup>1</sup> · 정인길<sup>1</sup> · 홍경욱<sup>1</sup>

Sung Bum Yoon<sup>1</sup>, Joon Young Park<sup>1</sup>, In Gil Jung<sup>1</sup>, and Kyung Wook Hong<sup>1</sup>

### 1. 서 론

파의 굴절·회절은 포물형 근사식을 이용하여 상당히 높은 정도의 계산이 가능하다. 이 포물형 근사식은 규칙파 뿐만 아니라 불규칙파에도 적용할 수 있으며, 적당한 에너지 감쇠모형을 추가하면 쇄파까지도 고려할 수 있다.

Kirby and Ozkan (1994)은 불규칙파 포물형 모형인 REF/DIFS 모형을 쇄파가 발생하는 경우에 대해 Vincent and Briggs (1989)의 실험에 적용하였다. 그러나 Vincent and Briggs의 실험결과와는 다르게 쇄파시 천퇴 배후지역에서의 파의 집중현상이 발생하여 그 정확성이 낮게 나타났으며, 이는 쇄파모형의 방향성 결여 때문이라고 판단하였다. 또한 전 등 (2001)은 Suh et al. (1997)에 의해 개발된 확장형 완경사방정식을 사용하여 쇄파시의 수치실험과 수치실험 결과를 비교하고, 천퇴 배후지역에서 쇄파에 의한 강한 흐름이 유도됨을 보였다.

Yoon et al. (2001)은 포물형 수치모형을 이용하여 Vincent and Briggs의 수중 천퇴상 파의 굴절·회절 실험을 수치모의하고 그 결과를 관측치와 비교한 결과, 쇄파가 발생하지 않는 미소진폭파의 경우 기존의 포물형 모형으로도 정도 높은 계산이 가능하나, 쇄파가 발생하는 경우에는 수치모의에서 쇄파가 고려되었음에도 불구하고 쇄파대 배후지역에서 파고가 과대평가되는 것으로 나타나 수치해의 정확성이 매우 낮아짐을 발견하였고, 그 이유를 쇄파에 의해 발생하는 쇄파 유도류(breaking-induced current)를 무시

한데서 비롯되는 것으로 추론한 바 있으며, 또한 윤 등 (2001)은 불규칙파에 대해 쇄파 유도류의 개념을 제시한 바 있다.

본 연구에서는 Kirby and Dalrymple (1993)이 개발한 단일주기파 포물형 모형인 REF/DIF 1 모형과 Kirby et al. (1998)이 개발한 쇄파 유도류를 고려할 수 있는 FUNWAVE 모형을 사용하여 기존의 쇄파시 수치모의에서 나타난 쇄파대 배후지역에서의 파고 과대평가의 원인을 분석하고, 쇄파 유도류를 고려한 새로운 역학구조가 규칙파의 경우에도 적용됨을 보이고자 한다.

### 2. 지배방정식

파의 굴절과 회절에 쇄파 유도류가 미치는 영향을 살펴보기 위해 단일주기의 포물형 파랑변형 모형인 REF/DIF 1 모형 (Kirby and Dalrymple, 1993)과 FUNWAVE 모형 (Kirby et al., 1998)을 사용한다. REF/DIF 1 모형의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & (C_g + U)A_x - 2\Delta_1 V A_y + i(\bar{k} - a_0 k)(C_g + U)A \\ & + \left\{ \frac{\sigma}{2} \left( \frac{C_g + U}{\sigma} \right)_x - \Delta_1 \sigma \left( \frac{V}{\sigma} \right)_y \right\} A + i\Delta'' \left[ (p - V^2) \left( \frac{A}{\sigma} \right)_y \right] \\ & - i\Delta_1 \left\{ \left[ UV \left( \frac{A}{\sigma} \right)_y \right]_x + \left[ UV \left( \frac{A}{\sigma} \right)_x \right]_y \right\} + \frac{i\sigma k^2}{2} D |A|^2 A + \frac{w}{2} A \end{aligned}$$

<sup>1</sup> 한양대학교 토목·환경공학과 (Department of Civil & Environmental Engineering, Hanyang University, Ansan, Kyunggi 425-791, Korea)

$$\begin{aligned}
& + \frac{-b_1}{k} \left\{ \left[ (p-V^2) \left( \frac{A}{\sigma} \right)_y \right]_{yx} + 2i \left( \sigma V \left( \frac{A}{\sigma} \right)_y \right)_x \right\} \\
& + b_1 \beta \left\{ 2i \omega U \left( \frac{A}{\sigma} \right)_x + 2i \sigma V \left( \frac{A}{\sigma} \right)_y - 2UV \left( \frac{A}{\sigma} \right)_{xy} \right. \\
& + \left. \left[ (p-V^2) \left( \frac{A}{\sigma} \right)_y \right]_y \right\} - \frac{i}{k} \{ b_1 (\omega V)_y + 3(\omega U)_x \} \left( \frac{A}{\sigma} \right)_x \\
& - \Delta_2 \left\{ \omega U \left( \frac{A}{\sigma} \right)_x + \frac{1}{2} \omega U_x \left( \frac{A}{\sigma} \right) \right\} + ik \omega U (a_0 - 1) \left( \frac{A}{\sigma} \right) = 0
\end{aligned} \tag{1}$$

$$p = CC_g \tag{2}$$

$$\beta = \frac{k_x}{k^2} + \frac{(k(p-U^2))_x}{2k^2(p-U^2)} \tag{3}$$

$$\Delta_1 = a_1 - b_1, \quad \Delta_2 = 1 + 2a_1 - 2b_1, \quad \Delta' = a_1 - b_1 \frac{\bar{k}}{k} \tag{4}$$

여기서  $U$ 와  $V$ 는 조석류 또는 쇄파 유도류의 수평방향 유속성분을 나타낸다. 쇄파 유도류는 파의 잉여응력을 이용하여 구할 수 있으나 파교점 부근에서는 아직 정확한 이론이 정립되어 있지 않으므로 본 연구의 REF/DIF 1 적용시에는 이를 무시한다.  $\bar{k}$ 은 파 입사 지점에서의 각 성분파의 횡방향 ( $y$  방향) 평균 파수이다.  $a_0, a_1, b_1$ 은 광각 전파시 정확도를 높이기 위한 각도 보정항에 사용되는 계수로서 다음과 같다.

$$a_0 = 1, \quad a_1 = -0.75, \quad b_1 = -0.25 \tag{5}$$

$$\sigma^2 = (\omega - kU)^2 = gk \tanh kh \tag{6}$$

$w$ 는 쇄파에 의한 에너지 감쇠계수로 Dally et al. (1985)과 Kirby and Dalrymple (1986)의 쇄파모형에 사용된 바와 같다.

$$w = \frac{KC_g(1-(\gamma h/H)^2)}{h} \tag{7}$$

여기서  $H = (2|A|)$ 는 파고이며,  $K$ 와  $\gamma$ 는 경험상수로 각각 0.017과 0.4이다. FUNWAVE의 지배방정식은 확장형 Boussinesq 방정식으로서 다음과 같다 (Kirby et al., 1998).

$$\begin{aligned}
& \eta_t + \nabla \{ (h+\eta) [u + (z + \frac{1}{2}(h-\eta)) \nabla (\nabla \cdot (hu))] \} \\
& + \left\{ \frac{1}{2} z^2 - \frac{1}{6} (h^2 - h\eta + \eta^2) \right\} \nabla (\nabla \cdot u) = 0 \\
& u_t + (u \cdot \nabla) u + g \nabla \eta + z \left\{ \frac{1}{2} z \nabla (\nabla \cdot u_t) + \nabla (\nabla \cdot (hu_t)) \right\} \\
& + \nabla \left\{ \frac{1}{2} (z^2 - \eta^2) (u \cdot \nabla) (\nabla \cdot u) + \frac{1}{2} [\nabla \cdot (hu) + \eta \nabla \cdot u]^2 \right\} \\
& + \nabla \left\{ (z - \eta) (u \cdot \nabla) (\nabla \cdot (hu)) - \eta \left[ \frac{1}{2} \eta \nabla \cdot u_t + \nabla \cdot (hu_t) \right] \right\} = 0
\end{aligned} \tag{8}$$

이 확장형 Boussinesq 방정식은 비선형항을 포함하고 있어 파 성분간의 비선형 간섭에 의해 유발되는 쇄파 유도류와 같은 흐름성분도 자동적으로 고려된다. 이 식의 변수 설명과 FUNWAVE의 수치 기법 및 적용사례는 윤·김(2001)에 자세히 소개되어 있으므로 생략한다.

**Table 1.** Input wave conditions for nonbreaking and breaking waves (Vincent and Briggs, 1989)

Input	Case ID	Peak-Period (sec)	Significant Wave Height (cm)	Freq. Spreading	Remarks
mono-chromatic	M2	1.3	2.54	mono	nonbreaking
mono-chromatic	M3	1.3	13.50	mono	breaking

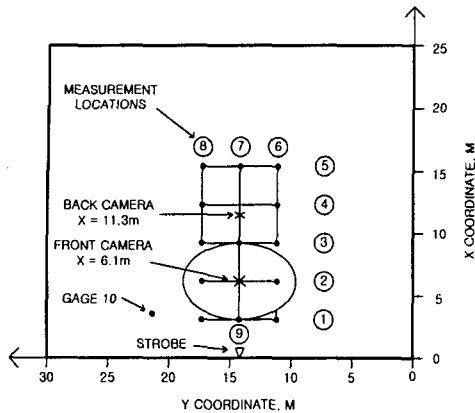


Fig. 1. Location of elliptical shoal and wave height measurement sections (Vincent and Briggs, 1989).

### 3. Vincent and Briggs의 수리실험

미 육군 공병단 산하 해안공학연구소 (Coastal Engineering Research Center)의 DSWG (directional spectral wave generator)를 사용하여 Vincent and Briggs (1989)은 타원형 수중천퇴상의 규칙파 및 불규칙파 전파를 실험하였다. 실험에 사용된 지형은 Fig. 1에 제시한 바와 같이 Berkhoff et al. (1972)의 것과 유사한 타원형 수중천퇴였다.

Vincent and Briggs의 수리실험에 사용된 입사파 조건중 규칙파에 대해 쇄파가 일어나지 않는 미소진폭파 조건과 쇄파가 일어나는 유한진폭파 조건은 Table 1과 같다.

### 4. 비쇄파실험에의 적용

실험도중 쇄파가 발생하지 않는 비쇄파에 대한 실험은 Table 1에 보인 M2 조건이다. 주어진 비쇄파 조건을 REF/DIF 1 과 FUNWAVE 에 적용하였으며, 비쇄파 조건이므로 쇄파 유도류는 발생하지 않는다.

Fig. 2는 Vincent and Briggs (1989)의 실험결과를 Fig. 1의 단면 4를 따라 계산치와 비교하여 도시한 것으로 본 연구에서 사용한 두 모형이 비쇄파시에는 같은 파고분포 경향을 주고 있다.

### 5. 쇄파실험에의 적용

Table 1에 나타난 M3 조건을 사용하여, Vincent and Briggs (1989)의 쇄파 실험을 수치모의하고 계산치와 실측치의 파고를 비교하였다. Fig. 3은 FUNWAVE의 계산결과로부터 단면 4를 따른 파고를 각각의 시간대에 따라 산출한 것으로 25-30sec 구간에서는

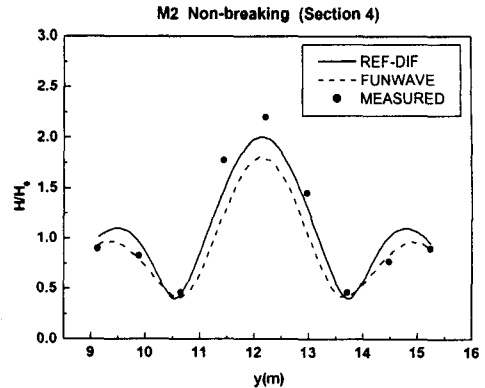


Fig. 2. Comparison of calculated and measured wave heights along section 4.

아직 쇄파 유도류가 미약하여 천퇴 중심부 배후에서의 파고가 약간 큰 것을 볼 수 있으며, 30-35sec 구간에서는 쇄파 유도류가 상당히 발달되어 중심부 파고가 주변보다 낮게 나타나고 있다. 35-40sec 구간에서는 쇄파 유도류가 매우 강해 중심부 파고가 주변보다 심하게 낮아짐을 볼 수 있다.

Fig. 4는 REF/DIF 1 모형에 의해 계산된 파고와 FUNWAVE에 의해 계산된 조파후 2.5-4.0sec 사이의 수면변위 이력에 의해 산정된 파고를 Vincent and Briggs의 실측치와 비교한 것이다. 실제 Vincent and Briggs의 실험에서는 조파된 파가 단면 4에 도달하는 시점으로부터 일정 시간동안의 수위변화를 모두 측정하여 파고를 산출하였으므로 FUNWAVE에 의한 결과는 Fig. 4의 경우가 Fig. 3의 경우에 비해 실험치에 더 부합된다.

그림에서 보듯이 쇄파 유도류를 무시한 REF/DIF 1 모형에 의한 결과는 천퇴 중심부 배후에서 굴절에 의한 에너지 집중으로 파고가 주변에 비해 매우 크게 나타난 반면, FUNWAVE에 의한 결과는 쇄파 유도류가 천퇴 양쪽 날개 부근에서 굴절되어 오는 파 에너지를 약화시켜 실측치에 매우 근접하게 나타났다.

Fig. 5는 천퇴 중심선을 따른 중단 파고 분포로 FUNWAVE에 의해 계산된 파고는 25-40sec 구간의 수위변화로부터 산출된 파고이다. 쇄파 유도류가 완전히 무시된 포물형 모형인 REF/DIF 1 모형에 의한 파고는 천퇴 정상부에서 쇄파의 영향이 뚜렷이 나타나나, 천퇴 배후에서 굴절에 의해 파고가 다시 증가하여 실제와 매우 다른 양상을 보인다. 그러나 FUNWAVE에 의한 계산결과는 쇄파 유도류에 의해 파고가 낮게 나타나는 구간이 훨씬더 연장되어 단면 4지점에서 실측치와 매우 근접한 결과를 보인다

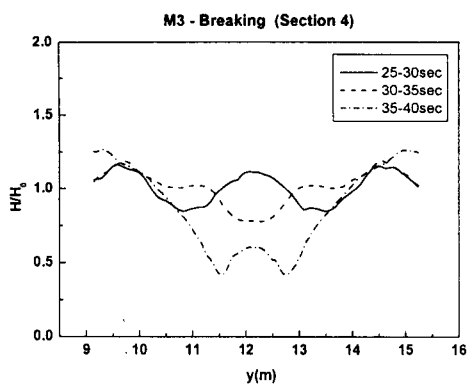


Fig. 3. Evolution of wave height along section 4 calculated using FUNWAVE.

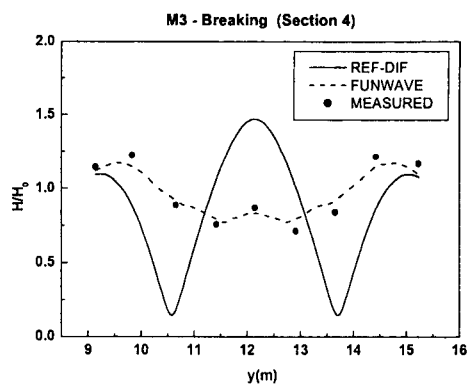


Fig. 4. Comparison of calculated and measured wave heights along section 4.

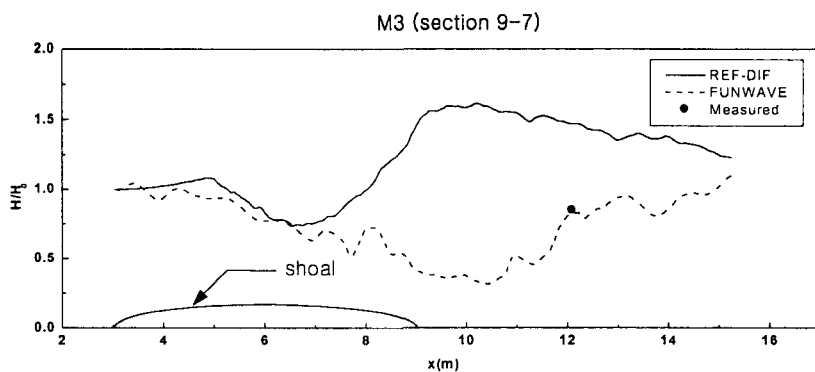


Fig. 5. Comparison of calculated using REF-DIF 1 and FUNWAVE wave heights along section 9-7.

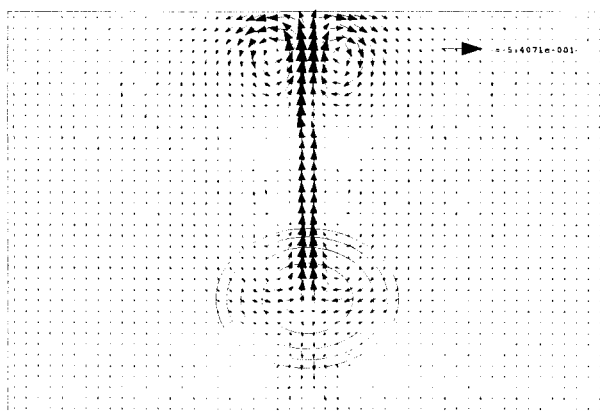


Fig. 6. Flow pattern of breaking-induced currents at  $t=100\text{sec}$  calculated using FUNWAVE.

Fig. 6 은 조파후 100sec 가 경과된 시점에서 FUNWAVE 에 의해 계산된 쇄파 유도류의 분포 형상을 나타낸 것으로 천퇴 중앙부로부터 jet 와 비슷한 강한 흐름이 발달된 것을 보여주고 있다

## 6. 결론 및 향후 연구과제

본 논문에서는 쇄파시 기존의 파랑변형 수치모형에서 나타난 부정확성의 이유와 이를 개선하기 위한 연구가 수행되었다. 이러한 기존 모형의 부정확성은 기존의 쇄파모형이 수심이 완만한 1 차원 지형에서 유도되어 방향 효과가 고려되지 않아, 2 차원 지형에 적용할 경우 굴절에 의해 파의 에너지가 집중되는 파교점과 수심이 다시 깊어지는 구간에서 정확하지 못한 결과를 보여주는 이유도 있겠으나, 주로 쇄파대 배후에서 쇄파 유도류가 무시되어 실제 물리현상과 관련이 없는 수치적인 파 회복대가 발생하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 쇄파 유도류를 고려하기 위해 Kirby et al. (1998)이 개발한 FUNWAVE를 이용하여 수치모의하고, 그 결과를 Vincent and Briggs(1989)의 수리실험과 비교 분석하였다. 그 결과 천퇴 배후지역에서 파고분포가 기존의 모형보다 실측치와 좋은 일치를 보여, 일단 쇄파 유도류가 파의 굴절·회절에 미치는 영향이 개념적으로는 정립되었음을 알 수 있었다.

향후 천퇴 상 파의 쇄파변형에 관한 역학구조를 정확히 이해하고, 이를 고려할 수 있는 새로운 지배 방정식을 개발하고, 이에 기초한 수치모형을 수립해야 할 것이며, 이를 위해서는 체계적인 3차원 수리실험을 실시하는 것이 필수적이다.

## 사 사

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실사업(한양대학교 해안공학연구실)으로 수행되었기에 이에 사의를 표합니다.

## 참고문헌

- 윤성범, 이종인, 이창훈, 박준영, 2001. 쇄파 발생시 파의 굴절과 회절, 2001년도 학술발표회 논문집 (CD), 대한토목학회.
- 윤종태, 김종무, 2001. 완전 비선형 Boussinesq 방정식을 이용한 쇄파대의 파랑변형 모의. 한국 해안·해양공학회지, 13(4): 296-308.
- 전인식, 황연호, 오병철, 심재철, 2001. 독도 해역의 파랑전파 특성. 대한토목학회논문집, 21(1-B): 63-73.
- Berkhoff, J.C.W., 1972. Computation of combined refraction-diffraction. *Proc. of the 13th Coastal Eng. Conf.*, ASCE, pp. 471-490.
- Dally, W.R., Dean, R.G. and Dalrymple, R.A., 1985. Wave height variations across beaches of a arbitrary profile. *J. Geophys. Res.*, Vol. 90, pp. 11917-11927.
- Kirby, J.T. and Dalrymple, R.A., 1993. *Combined Refraction/Diffraction Model REF/DIF 1, Version 2.4. Documentation and User's Manual*. Research Report No. CACR-92-04, Center for Applied Coastal Research, Department of Civil Engineering, University of Delaware, Newark.
- Kirby, J.T. and Ozkan, H.T., 1994. *Combined Refraction/Diffraction Model for Spectral Wave Conditions REF/DIF S, Version 1.1: Documentation and User's Manual*. Center for Applied Coastal Research, Department of Civil Engineering, University of Delaware, Newark, DE 19716 p.
- Kirby, J.T. and Dalrymple, R.A., 1986. Modeling waves in surfzones and around island. *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, Vol. 112, pp.78-93.
- Kirby, J.T., Wei, G., Chen, Q., Kennedy, A.B. and Dalrymple, R.A., 1998. *FUNWAVE 1.0. Fully nonlinear Boussinesq wave model. Documentation and user's manual*. Report CACR-98-06, Center for Applied Coastal Research, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Delaware.
- Suh, K.D., Lee, C. and Park, W.S., 1997. Time-dependent equations for wave propagation on rapidly varying

- topography. *Coastal Eng.*, Vol. 32, pp. 91-117.
- Vincent, C.L. and Briggs, M.J., 1989. Refraction-diffraction of irregular waves over a mound. *J. Waterw. Port Coastal and Ocean Eng.*, Vol. 115, No. 2, pp. 269-284.
- Yoon, S.B., Lee, J.W., Yeon, Y.J. and Choi, B.H., 2001. A note on the numerical simulation of wave propagation over a submerged shoal. *Proc. of Asian and Pacific Coastal Eng.*, 2001, Dalian, China, pp. 315-324.