

원형 수중천퇴상 불규칙파의 변형 모의

○ 윤성범* · 이정욱**

1. 서 론

파의 굴절과 회절 현상을 해석할 수 있는 환경사방정식이 Berkhoff(1972)에 의해 개발된 이래 파의 전파변형 해석은 큰 발전을 이룩하였다. 타원형식인 환경사방정식의 계산효율을 높이기 위해 Radder(1979)는 파의 반사를 무시한 포물형 근사식을 유도하였으며, Booij(1981)는 Padé 근사법을 이용하여 포물형 근사식의 전파방향에 대한 제한을 크게 완화한 광각 포물형 근사식을 제시하였다. 이러한 파랑 모형식은 단일주기의 규칙파를 대상으로 하므로 불규칙한 실제의 해상상태를 단일주기의 유의파로 단순화하고 규칙파 모형을 이용하여 파의 변형을 예측하여 왔다. 그러나 여러 주기와 전파방향의 파들이 합성된 불규칙파의 변형 거동은 규칙파의 경우와 매우 다르다(Goda, 1985). Vincent & Briggs(1989)은 타원형 천퇴 상의 파랑변형 수리실험을 통하여 규칙파와 불규칙파의 굴절과 회절 특성에 큰 차이가 있음을 보였다. Panchang *et al.*(1990)은 불규칙파를 여러 개의 주기와 방향별 성분파로 분리하고, 각 성분파를 규칙파 포물형 모형으로 해석한 다음, 그 결과를 선형중첩하는 방법으로 유의파고를 구하였다. 본 연구에서는 광각 포물형 근사식을 이용하여 개별적인 성분파를 해석하고 그 결과를 중첩하는 종래의 방법을 사용하나, 각 성분파에 대한 계산을 동시에 수행하여 성분파의 합성과 정보를 필요로 하는 쇄파를 고려할 수 있는 수치모형을 수립하였다. 수립된 수치모형을 Chawla, Ozkan & Kirby(1998)의 원형 수중 천퇴 상 파랑의 굴절·회절 및 쇄파 수리실험에 적용하여 불규칙파 수치모형의 적용성 및 정밀도 등을 검토한다.

2. 지배방정식

Radder(1979)의 포물형 근사식은 파랑의 주진행방향에 대해 비교적 작은 각으로 진행하는 경우에 대해 유도된 식이므로 진행각이 커지면 오차가 증가하여 적용에 제한을 받는다. 다방향 불규칙파에 대한 수치실험 수행 시에는 입사파의 방향분포가 $\pm 45^\circ$ 이상의 광각 범위를 포함하여 일반적인 포물형 근사식으로는 정도 높은 해석이 어렵다. 본 연구에서는 Kirby(1986)에 의해 유도된 다음과 같은 광각 포물형 근사식을 사용한다.

* 한양대학교 토목·환경공학과 부교수

** 한국건설기술연구원 수자원·환경연구부 위촉연구원

$$\begin{aligned} & \frac{\partial A}{\partial x} + i(k_0 - \beta_1 k)A + \frac{A}{2C_g} \frac{\partial C_g}{\partial x} + \frac{\sigma_1}{\omega C_g} \frac{\partial}{\partial y} (CC_g \frac{\partial A}{\partial y}) \\ & + \frac{\sigma_2}{\omega C_g} \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} (CC_g \frac{\partial A}{\partial y}) + W_b A = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 A 는 각 성분파의 복소 진폭함수, k 는 파수, k_0 는 기준 파수로서 파랑 입사지점에서의 횡방향 평균파수이다. ω 는 각진동수, C 는 전파속도, C_g 는 군속도이며, W_b 는 쇄파에 의한 에너지 감쇠계수, σ_1 과 σ_2 는 광각 입사 시 파 진행방향의 정밀도를 개선시키기 위한 각도 보정계수이다.

불규칙파 각각의 성분파에 대해 쇄파 변형을 모의하게 되면 성분파들의 진폭이 작아 쇄파 되지 않고 진행하게 되므로 쇄파를 적절히 재현하지 못하게 된다. 본 연구에서는 계산영역의 모든 점에 대해 각각의 성분파를 계산하고 계산된 성분파의 에너지를 중첩하여 구한 rms파고 (H_{rms})와 대표주기에 대한 쇄파한계파고 (H_{max})를 구한 다음, 불규칙파의 부분쇄파를 모의할 수 있는 Battjes & Janssen(1978)의 쇄파모형과 Thornton & Guza(1983)의 쇄파모형을 이용하여 불규칙파의 쇄파 현상을 재현하였다. Battjes 와 Janssen(1978)에 의해 제안된 쇄파모형은 다음과 같다.

$$W_b = \frac{\alpha}{8\pi} Q_b \omega_m H_{max}^2 / E \quad (2)$$

여기서 ω_m 은 rms파고의 각 주파수, α 는 조정계수로 일반적으로 1을 사용하며, Q_b 는 불규칙파의 파군 중 쇄파되는 개별파의 비율, H_{max} 는 Miche type의 쇄파한계파고, E 는 파의 전체에너지이다. Thornton & Guza (1983)에 의해 제안된 쇄파모형은 다음과 같다.

$$W_b = \frac{3\sqrt{\pi}}{4} \frac{\bar{f} B^3}{\gamma^4 h^5} H_{rms}^5 \quad (3)$$

여기서 h 는 수심이고 \bar{f} 는 주파수 스펙트럼에서 사용된 대표 주파수로서 본 연구에서는 첨두 주파수를 사용하였다. 또한 B 와 γ 는 상수로서 각각 1과 0.6을 사용하였으며 H_{rms} 는 각각의 성분파를 합성한 파고이다.

3. 수치기법

본 연구에서는 포물형 근사식의 수치기법 중 가장 광범위하게 사용되는 Crank-Nicolson 기법을 이용하여 유한차분화 하였다(윤·이, 1995). Crank-Nicolson 기법은 음해법의 일종으로 무조건적인 안정성과 높은 정확성을 가지며, 3열 주대각 행렬식(tridiagonal matrix)을 주므로 컴퓨터의 기억용량과 계산시간 면에서 매우 경제적이다.

4. Chawla, Ozkan & Kirby(1998)의 수리 실험

Chawla, Ozkan & Kirby(1998)(이후에는 COK라 칭함)는 원형 천퇴상을 전파하는 불규칙 파의 쇄파 현상을 실험하였다. 실험실 제원은 그림 1과 같다. 천퇴 주위에 설치된 126개의 측정점을 통해 A-A, B-B, C-C, D-D, E-E, F-F 그리고 G-G 7개의 단면의 파고를 측정하였다. 원형 천퇴는 지름이 5.2m이고 중앙부의 최대 높이는 0.37m이다. 실험은 천퇴를 제외한 구간의 수심을 0.4m로 하고 천퇴 중심부의 수심을 0.03m로 하여 수행하였다. COK의 쇄파실험에 사용된 입력과 조건은 표 1과 같다. 불규칙파 조파를 위해 TMA법으로 주파수 스펙트럼을 구성하였으며 wrapped normal function을 사용하여 방향분산함수를 구하였다. 그림 2와 3은 COK의 쇄파모형 실험에서 재현한 주파수 스펙트럼과 방향 스펙트럼이다. 표 1의 4가지 입사파조건은 좁은 방향분산을 가지는 Test 3과 5, 넓은 방향분산을 가지는 Test 4와 6으로 나누었으며, 같은 방향분산조건 상태에서 Test 5, 6은 Test 3, 4에 비해 파고가 커서 쇄파가 좀더 격렬하게 일어나는 조건이다. 수치계산을 위해 전 영역을 0.10m인 정방형 격자(183×183)로 분할하였으며, 주파수는 수리실험 조건과 같은 1.0 ~ 3.0 Hz의 범위를 $\Delta f = 0.095 \text{ Hz}$ 간격으로 20개의 주파수 성분으로 나누었다. 방향은 $-60^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ 구간을 $\Delta\theta = 5.71^\circ$ 간격으로 21개의 방향성분으로 분할하였다. 결과적으로 불규칙파를 총 420개 성분파로 분할하여 계산하였다.

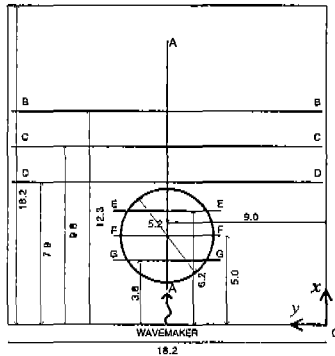


표 1 COK의 불규칙파 쇄파변형 실험에 사용된 입력과 조건(Chawla 등, 1998)

Test no.	$H_s(m)$	$T_p(sec)$	θ_m	Range
3	0.0139	0.73	0	$\pm 15^\circ$
4	0.0156	0.73	0	$\pm 45^\circ$
5	0.0233	0.73	0	$\pm 15^\circ$
6	0.0249	0.71	0	$\pm 45^\circ$

그림 1 원형 수중천퇴 및 파고 관측단면 위치, 거리단위 m (Chawla 등, 1998)

그림 4는 천퇴 중심부를 지나는 단면 A-A를 따른 파고분포를 비교한 그림이다. Test 3과 5는 입사파의 방향분산이 약해 쇄파를 무시한 경우 Test 4와 6의 경우보다 천퇴상에서의 파고가 크게 나타났으며, 천퇴의 후면부에서 추가적으로 에너지 집중구역이 나타났다. 이는 입사파가 여러 주기성분으로 구성되어 굴절특성이 서로 달라 에너지 집중이 2군데에서 나타나는 것으로 판단된다. 반면 방향분산이 강한 Test 4와 6의 경우 파고점이 분산되어 천퇴상에서의 파고가 작게 나타났으며 추가적인 에너지 집중도 나타나지 않았다.

쇄파를 고려했을 때 입사파고가 작은 Test 3과 4의 경우에는 비쇄파의 경우에 비해 천퇴상에서 파고감소가 나타났으나 전반적인 파고분포는 비쇄파의 경우와 비슷한 양상을 보인다. 반면 입

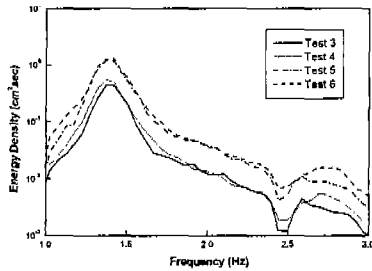


그림 2 COK의 쇄파실험에 사용된 주파수 스펙트럼

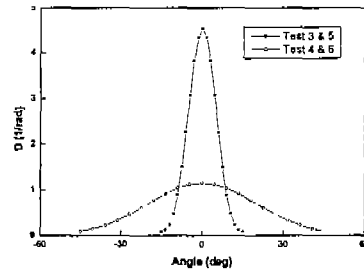


그림 3 COK의 쇄파실험에 사용된 방향분산함수

사파고가 큰 Test 5와 6의 경우 천퇴상에서의 파고가 쇄파에 의해 크게 감소하였다. 수치계산에서 두가지 다른 쇄파모형을 적용하여 보았으나 그 결과는 거의 비슷하게 나타났다. 단면 A-A를 따른 파고 분포에서 가장 관심을 끄는 것은 천퇴상의 최대파고 발생점 배후지역으로 관측치에 의하면 쇄파가 일단 발생하면 추가적인 파고상승이 없이 계속하여 지수함수적으로 파고가 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 수치계산에서는 Test 3과 5의 경우 추가적인 파고증가가 나타났다. 이는 본 연구에서 채용한 Thornton & Guza 및 Battjes & Janssen의 쇄파모형이 단조롭게 수심이 감소하는 1차원적인 지형에 대한 실험결과를 토대로 유도된 것이므로, COK의 실험에서와 같이 굴절과 회절이 복잡하게 발생하는 경우 그 정확도가 낮아짐을 의미한다. 이로부터 실제 물리현상은 굴절에 의해 파의 에너지가 집중되는 파고점에서 쇄파가 발생하면 쇄파에 의해 흐름 구조가 크게 변화되고 그 영향이 파진행방향으로 전달되어 추가적인 파의 증가를 억제하는 반면, Thornton & Guza 및 Battjes & Janssen 등의 쇄파모형에서는 쇄파에 의한 에너지 감쇠량이 상파역(upwave region)의 쇄파여부에 관계없이 그 지점의 파고에 의해서만 결정된다. 그러므로 실제 자연현상과는 큰 차이를 보이게 되며, 추후 이를 반영한 쇄파모형의 개선이 시급하다고 하겠다. 천퇴를 지난 D-D 단면을 따른 파고분포는 그림 5에 보인 바와 같이 관측치와 계산치가 전반적으로 매우 흡사하게 나타났는데, 이는 계산치가 쇄파에 의한 영향을 옳게 고려하였기 때문이라기 보다는 쇄파의 영향이 거의 나타나지 않는 천퇴로부터 거리가 먼 지역이기 때문인 것으로 판단된다. 이는 비쇄파 모형에 의한 계산결과와 쇄파를 고려한 결과가 거의 같은 것으로 미루어 판단할 수 있다.

5. 쇄파모형의 부정확성에 대한 분석

쇄파효과를 고려한 수치해를 살펴보면 그림 6(a)에 보인 바와 같이 천퇴 정상부의 얇은 수심에 의해 발생된 쇄파현상이 천퇴 배후지역으로 진행하면서 수심이 다시 증가하여 쇄파에 의한 에너지 감쇠가 미약해지고, 천퇴 좌우의 날개 쪽으로 입사한 파랑이 굴절되어 파고점(caustics)을 형성하므로 회복대(recovery zone)가 발달되어 파고가 다시 증가한다. 이러한 현상은 실제 물리현상이 아닌 수치적인 현상이며 수리실험에 의한 관측치에서는 나타나지 않는다. 이러한 분석을 토대로 천퇴 상에서 굴절, 회절 및 쇄파가 복합적으로 발생하는 경우의 파향선 추적에 의한 굴절도를 개념적으로 그려보면 그림 6(b)와 같이 나타낼 수 있다. 쇄파는 물 입자의 속도가 파의 전파속

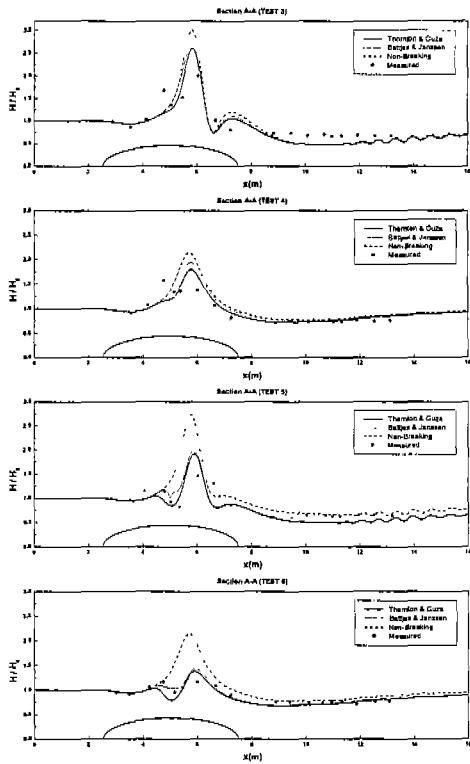


그림 4 COK 실험에서 A-A단면을 따른 계산치와 실측치의 파고분포 비교

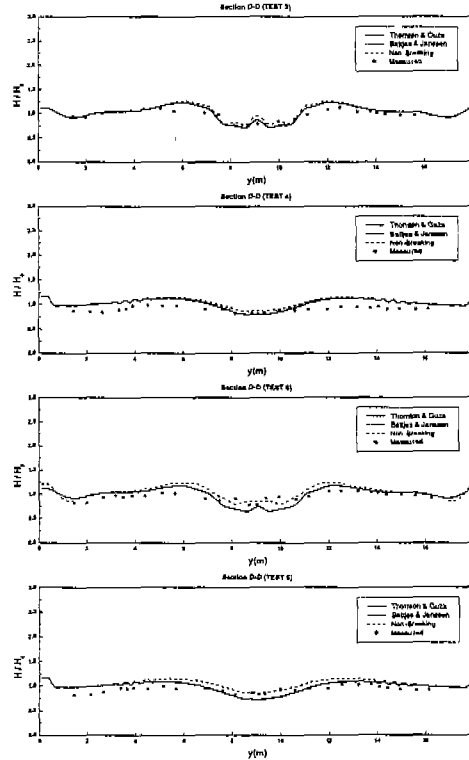
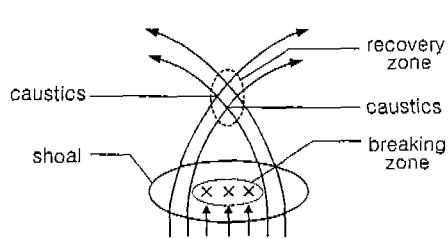
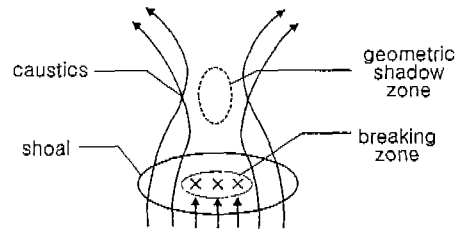


그림 5 COK 실험에서 D-D단면을 따른 계산치와 실측치의 파고분포 비교



(a) 수치적인 회복대의 형성



(b) 물리적인 지형음영대의 형성

그림 6 천퇴상 쇄파와 굴절 형상 개념도

도 보다 커서 물 덩어리가 파봉 전면의 수면으로 쥘(jet)을 형성하며 떨어지는 현상임을 상기하면, 수표면에서 발생된 파 진행방향의 강한 흐름이 천퇴의 양 날개 쪽에서 굴절되어 들어오는 파를 다시 외곽으로 굴절시켜, 천퇴 중앙부의 배후에는 회복대 대신 지형음영대가 발생하여 파고가 작아지고, 반대로 파향선이 교차하는 양쪽의 파교점 부근에서는 파고가 증가하는 것으로 추론이 가능하다. 그러므로 본 연구에서 수립된 포물형 수치모형을 비롯한 기존의 각종 수치모형에서 공통적으로 나타나는 수치적 파 회복대를 억제시키기 위해 실제 물리현상에 기초한 새로운 개념의 지

배방정식 개발이 필수적이다.

7. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 광각 포물형 근사식을 이용하고 각 성분파를 동시에 계산하여 다주기·다방향 불규칙파의 전파변형과 쇠파변형을 수치모의하기 위한 포물형 파랑 모형을 수립하였다. 수립된 수치모형을 이용하여 원형 천퇴 위를 전파하는 불규칙파의 전파변형을 수치모의하고 기존의 수리 실험에 의한 관측치와 비교하였다. 쇠파대 배후에서의 파고 관측치를 분석한 결과, 쇠파 수치모형의 부정확성은 주로 쇠파대 배후에서 실제 물리현상과 관련이 없는 수치적인 파 회복대가 발생하기 때문인 것으로 밝혀졌으며, 실제 물리현상을 충실히 만족시키기 위한 쇠파대와 그 배후지역에서의 새로운 파 굴절 미케니즘이 제안되었다. 향후 체계적인 3차원 수리실험을 실시하여 천퇴 상파의 쇠파변형에 관한 미케니즘을 정확히 이해하고, 이를 고려할 수 있는 새로운 지배방정식을 개발하고, 이에 기초한 수치모형을 수립할 예정이다.

8. 인 용 문 헌

- 윤성범, 이종인, 1995. 비선형 분산효과가 파의 굴절 및 회절에 미치는 영향, *한양대학교 환경과학 논문집*, 16, pp. 83-94
- Battjes, J.A. and Janssen, J.P.F.M., 1978. Energy loss and setup due to breaking of random waves, *Proc. 16th Intl. Conf. on Coastal Engineering*, Hamburg, pp. 569-587.
- Berkhoff, J.C.W., 1972. Computation of combined refraction-diffraction, *Proc. of the 13th Coastal Engrg. Conf.*, ASCE, pp. 471-490.
- Booij, N., 1981. Gravity waves on water with non-uniform depth and current, Report No. 81-1, *Communication on Hydraulics*, Department of Civil Engineering, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
- Chawla, A., Ozkan, H.T. and Kirby, J.T., 1996. Spectral Model for Wave Transformation and Breaking over Irregular Bathymetry, *J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, 124(4), pp. 189-198.
- Kirby, J.T., 1986. Higher-order approximations in the parabolic equation method for water waves, *J. Geophysical Res.*, 91(C1), pp. 933-952.
- Panchang, V.G., Wei, G., Pearce, B.R. and Briggs, M.J., 1990. Numerical simulation of irregular wave propagation over shoal, *J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, 116(3), pp. 324-340.
- Radder, A.C., 1979. On the parabolic equation method for water-wave propagation, *J. Fluid Mech.*, 95, pp. 159-176.
- Thornton, E.B. and Guza, R.T., 1983. Transformation of Wave Height Distribution, *J. Geophysical Res.*, 88, pp. 5925-5938.
- Vincent, C.L. and Briggs, M.J., 1989. Refraction-diffraction of irregular waves over a mound, *J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, 115(2), pp. 269-284.