

파랑과 해류가 공존하는 해역에서의 쇄파변형 모형

○이창훈¹⁾, 장성원²⁾, 염기대³⁾, 이광수⁴⁾

1. 머리말

우리나라의 서해안은 조수간만의 차가 크고 조석흐름의 속도가 1 m/s 내외로 상당히 크다. 태풍과 같은 바람으로 발생하는 파랑은 먼바다에서 발생하여 육지로 전파하면서 천수, 굴절, 회절, 반사등의 여러 가지 변형의 과정을 거친다. 파랑이 조석과 같은 흐름의 영향을 받을 경우 파랑이 전파되는 방향도 변하고 파고도 변하는데 서해안에서는 그 영향이 아주 크다. 우리나라의 서해안은 조수간만의 차가 크고 해저경사가 완만하여 갯벌이 넓게 분포해 있다. 그런데 최근 대규모 간척사업으로 갯벌이 많이 축소되고 있다. 이를 극복하는 수단으로 간척지 앞 해역에 수중 잠제 등의 인공갯벌을 조성해서 자연환경을 보존하고 갯벌의 생산성을 확보하는 내용의 연구가 최근 수행되고 있다. 파랑이 잠제를 지나면서 쇄파가 발생하고 에너지의 감쇠가 일어난다. 이때 쇄파에너지의 감쇠는 조석류의 영향을 받아 그 특성이 확연히 달라진다. 예를 들어 조석류가 파랑과 같은 방향으로 흐를 경우 조석류가 없는 경우에 비해 잠제 위에서의 에너지 감쇠가 작고 반대 방향으로 흐를 경우 에너지감쇠가 크다. 본 연구에서 파랑과 해류가 공존하는 해역에서의 쇄파변형 수치 모형을 개발하여 쇄파의 역학적인 거동을 예측하였다.

2. 모형 개발

파랑과 해류가 공존하는 해역에 적용 가능한 확장형 환경사방정식(Lee, 1998)은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\nabla \cdot (\mathbf{U} \eta) - \nabla \cdot \left(\frac{CC_g}{g} \nabla \tilde{\phi} \right) + \frac{\sigma^2 - k^2 CC_g}{g} \tilde{\phi} + \frac{\sigma^2}{g} \{ R_1 (\nabla h)^2 + R_2 \nabla^2 h \} \tilde{\phi} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial t} = -\mathbf{U} \cdot \nabla \tilde{\phi} - g\eta \quad (2)$$

위 식에서 η 는 해수면의 수직 변위이고, $\tilde{\phi}$ 는 평균 해수면에서의 속도포텐셜이고, \mathbf{U} 는 해류의 수평방향 속도이고, C 와 C_g 는 각각 파랑의 위상속도와 군속도이고, g 는 중력

-
- 1) 세종대학교 토목환경공학과 조교수
 - 2) (주)헤인E&C 사원
 - 3) 한국해양연구원 연안항만공학연구본부 책임연구원
 - 4) 한국해양연구원 연안항만공학연구본부 책임연구원

가속도이고, ∇ 는 수평미분연산자이다. 위 파랑식을 사용하면 파랑이 해류의 영향을 받아 Doppler shift 현상으로 파고와 파향이 변하는 현상을 모의할 수 있다. 또한, 심해부터 천해까지 전 해역에서 파랑의 전파현상을 정확히 모의할 수 있다.

심해에서 전파해 오는 파랑이 육지 가까이 천해에 와서는 파랑에너지가 증가하면서 급기야 한계 상태에 이르러 부서지게 된다. 이 쇄파의 한계를 결정하는 인자로서 다음과 같이 수심 대비 파랑의 진폭의 비를 많이 사용한다.

$$\text{쇄파한계} : \frac{|\eta|}{h} \geq 0.39 \quad (3)$$

위 식에서 h 는 수심이고, $|\eta|$ 는 해수면 변위의 진폭이다. 일단 쇄파가 발생하면 난류에 의한 파랑에너지 감쇠가 계속 발생하다가 더 이상 감쇠가 발생하지 않는 소위 파랑의 회복 (wave recovery) 상태가 된다(Dally 등, 1985). 파랑의 회복 상태를 결정하는 인자로 다음과 같은 수심 대비 파랑의 진폭의 비가 수리모형실험으로 검증되었다.

$$\text{파랑의 회복} : \frac{|\eta|}{h} \leq 0.18 \quad (4)$$

쇄파의 형상을 도수(hydraulic jump)와 비교하면, 상·하류의 수심이 각각 $h_1 \simeq (h - |\eta|)$ 과 $h_2 \simeq (h + |\eta|)$ 로 근사화 되고, 쇄파로 인하여 발생하는 손실수두는 다음과 같다.

$$h_L \simeq \frac{[(h + |\eta|) - (h - |\eta|)]^3}{4(h + |\eta|)(h - |\eta|)} \simeq 2|\eta| \left(\frac{|\eta|}{h} \right)^2 \left[1 + \left(\frac{|\eta|}{h} \right)^2 \right] \quad (5)$$

만일 선형의 자유수면에서의 동역학적 경계 조건에 쇄파에 의한 에너지 손실을 포함하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial t} = - \mathbf{U} \cdot \nabla \tilde{\phi} - g\eta - D_b \tilde{\phi} \quad (6)$$

여기서 D_b 는 쇄파에 의한 에너지 감쇠계수이며, 손실수두 (h_L)과 다음의 관계가 있다.

$$D_b \simeq \frac{gh_L}{|\tilde{\phi}|} \simeq 2\gamma\sigma \left(\frac{|\eta|}{h} \right)^2 \left[1 + \left(\frac{|\eta|}{h} \right)^2 \right] \quad (7)$$

여기서, γ 는 $O(1)$ 의 조율계수로서 식 (7)을 사용한 에너지감쇠계수로 수치실험을 한 뒤 그 결과가 실험 값 또는 관측 값과 일치하게 보정해야 한다. 에너지 감쇠계수 D_b 는 각주파

수에 비례하고, 대략 수심 대 파고 비의 제곱에 비례한다.

본 연구에서 지배방정식 (1), (6)을 사용하여 쇄파의 전파를 모의하였다. 쇄파의 시작과 끝은 각각 식 (3)과 (4)의 조건으로 결정하였다. 파랑이 위상속도 C 로 전파하는 현상을 이용하여 쇄파를 추적하고, 쇄파 에너지 감쇠를 식 (7)로 결정하였다. 연속방정식을 사용하여 수심에 따른 흐름의 속도 U 의 분포를 결정하였다. Adams-Moulton predictor-corrector 기법을 사용하여 식 (1), (6)의 시간 미분식을 차분하고, 3점대칭법(three point symmetric formula)을 사용하여 식 (1), (6)의 공간 미분식을 차분하였다.

3. 모형 적용

파랑은 흐름의 방향에 따라 Doppler shift 현상으로 파고, 파속, 파향이 달라진다. 파랑이 흐름과 같은 방향일 때 파고는 작아지고, 파속은 커진다. 반대 방향일 때 파고는 커지고, 파속은 작아진다. 또한 파랑과 흐름의 방향이 일직선 상에 있지 않을 때 마치 굴절 현상과 같이 파고, 파속, 파향이 바뀐다. 파랑과 흐름이 있는 해역에서 쇄파가 발생할 때는 더욱 복잡한 현상이 발생할 것이다. 대체적으로 인식되는 현상은 파랑이 흐름과 같은 방향일 때 파속이 크므로 주어진 거리를 통과하는 동안 쇄파 에너지의 감쇠는 적게 발생할 것이다. 반면, 반대 방향일 때 파속이 작으므로 주어진 거리를 통과하는 동안 쇄파 에너지의 감쇠는 크게 발생할 것이다.

Dally 등(1985)은 Horikawa와 Kuo(1966)의 실험자료에서 수심 대 파고 비가 $|\eta|/h=0.39$ 부근에서 쇄파가 발생하여 파고가 작아지다가 $|\eta|/h=0.18\sim 0.2$ 에서 더 이상 감소하지 않는 현상을 발견하였다. 본 쇄파 변형 모형에 Dally 등이 발견한 쇄파의 회복 조건을 사용하였다. Horikawa와 Kuo의 실험 예를 본 연구에 적용한 결과 파고의 수리모형 실험 치와 수치해석 결과가 최소가 되는 경우의 조율계수 γ 는 입사파 조건(파고, 주기)과 바닥 조건(경사도, 수심)에 따라 0.25~0.85로 약간씩 다른 것을 알 수 있었다.

바다에 잠제를 설치하면 잠제의 마루에서 쇄파가 발생할 것이다. 본 연구에서 그림 1과 같이 앞 뒤 경사가 일정한 사다리꼴의 잠제를 지나면서 쇄파 파고가 감소하는 정도를 예측하는 수치 실험을 수행하였다. 조율계수는 $\gamma=0.5$, 파고 대 수심 비는 쇄파 발생 시 $|\eta|/h=0.39$, 쇄파 회복 시 $|\eta|/h=0.28$ 로 하였다. 바닥 수심이 $h=6m$, 잠제 마루의 수심이 $h_c=1m$, 잠제 경사면의 기울기가 $V:H=1:1.5$, 입사파의 주기가 $T=5$ 초, 입사파고가 $H_I=1m$, 바닥에서의 해류의 속도가 $U_0=0m/s, +0.1m/s, -0.1m/s$ 인 경우 마루폭 B 를 변화시키면서 입사파고 대 잠제 후면에서의 통과파고의 비(즉, 통과율 K_T)을 그림 2에 도시하였다. 마루폭이 클수록 마루에서 감쇠되는 에너지가 많아 통과율이 작게 나타났다. 해류가 없는 경우 마루폭이 $B=30m$ 인 경우 통과율이 $K_T=0.18$ 밖에 되지 않았다. 파랑과 같은 방향의 해류가 있는 경우 해류가 없는 경우에 비해 통과율이 크고, 파랑과 반대 방향의 해류가 있는 경우 통과율이 작다. 이는 파랑과 해류가 같은 방향인 경우 쇄파가 잠제를 통과하는 시간이 짧아져 에너지 감쇠량이 작을 것이고, 반면 파랑과 해류가 반대방향인

경우 에너지 감쇠량이 크기 때문이다. 이는 물리적으로 타당한 현상이다.

4. 맺음말

본 연구에서 파랑과 해류가 공존하는 해역에서의 쇄파변형 수치 모형을 개발하였다. 파랑과 흐름이 있는 해역에서 쇄파가 발생할 때 확인된 현상은 다음과 같다. 파랑이 흐름과 같은 방향일 때 파속이 크므로 주어진 거리를 통과하는 동안 쇄파 에너지의 감쇠는 적게 발생하였다. 반면, 반대 방향일 때 파속이 작으므로 주어진 거리를 통과하는 동안 쇄파 에너지의 감쇠는 크게 발생하였다.

5. 참고문헌

- Dally, W.R., Dean, R.G. and Dalrymple, R.A. (1985). "Wave height variation across beaches of arbitrary profile." *J. Geophys. Res.*, Vol. 90, pp. 11917-11927.
- Lee, C. (1998). "Time-dependent equations for linear surface wave - current interaction over rapidly varying topography." *KSCE J. of Civil Eng.*, Vol. 2, No. 1, pp. 47-52.
- Horikawa, K. and Kuo, C.T. (1966). "A study on wave transformation inside surf zone." *Proc. 10th Coastal Eng. Conf.*, pp. 217-233.

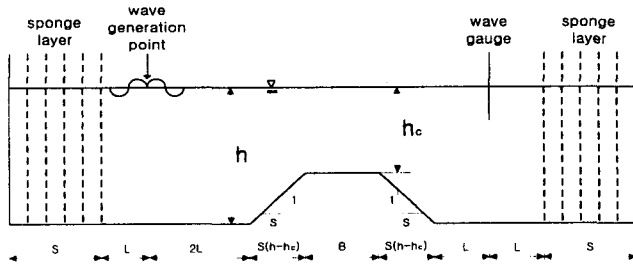


그림 1 잠제를 지나는 파랑의 전파를 모의하기 위한 계산영역

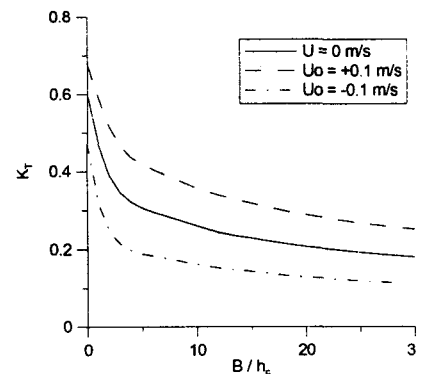


그림 2 잠제의 마루쪽에 따른 통과율의 변화