

파랑류에 의한 방파제 두부 주위의 지형변화

김효섭¹⁾ · 정병순²⁾ · 오강인철³⁾ · 오병철⁴⁾

1. 서론

자연 해안 또는 장기간 안정되어 있는 연안에 방파제 등의 해안 구조물을 건설하는 경우 파랑에 의하여 발생하는 파랑류가 변화하며, 이로 인하여 구조물 부근 및 연안역에 퇴적물 이동의 유형이 달라진다. 특히 방파제 선단과 같은 돌출된 구조물 인근에서는 심한 세굴이 발생하는 경우가 많다. 이러한 세굴은 해역에 따라 통상 여러 원인이 복합적으로 작용하여 발생한다. 이 원인중 하나는 파랑류로서, 조석이 상대적으로 약하고 파랑이 우세한 해역에서는 지형변화에 큰 비중을 차지한다. 본 논문에서는 적절한 실물 크기의 방파제 두부형태를 선정하여 수치모형실험을 적용하였다. 수치모형 실험은 기존의 지형변화예측 수치모형시스템을 이용하여 수행하였다. 이 시스템은 파랑전파 모형(KU-IWPH-01, Kookmin University Inter-Wave-Period Hyperbolic-01)과 파랑류 모형(KU-WiFLOW-01, Kookmin University Wave induced FLOW-01)을 이용하여 파랑장과 흐름장을 계산하고 이를 토대로 퇴적물이동 모형(KU-SEDTRAN-01, Kookmin University SEDiment TRANsport-01)모형에 적용하여 퇴적물 이동과 지형변화를 예측하여 파랑이 지형변화에 미치는 파랑의 영향을 비교하였다.

2. 수치모형 시스템

2.1. 반사포함 파랑변형모형 (KU-IWPH-01)

Booij (1981)는 Berkhoff (1972)의 타원형 완경사 방정식을 변형하여 시간에 관한 항이 포함된

1 국민대학교 건설시스템공학부 부교수(E-mail: hkim@kookmin.ac.kr)

2 국민대학교 건설시스템공학부 박사과정(E-mail: bsjung@kordi.re.kr)

3 국민대학교 건설시스템공학부 석사과정(E-mail: 77sniper@orgio.net)

4 한국해양연구원 연안항만공학본부 책임연구원(E-mail: bcoh@kordi.re.kr)

방정식을 제시하였다.

$$\nabla(cc_g \nabla \eta) + (k^2 cc_g - \omega^2)\eta - \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} = 0 \quad (2.1)$$

여기서, η 는 수면변위, ω 는 각속도, t 는 시간이며, 위 식에서 정상 상태, 삼각함수 해를 가정하면

$$\nabla(cc_g \nabla \eta) - \frac{c_g}{c} \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} = 0 \quad (2.2)$$

이 된다. Copeland (1985)는 식(2.2)를 다음과 같이 두개의 미분 방정식으로 분리하였다.

$$\nabla Q + \frac{c_g}{c} \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + cc_g \nabla \eta = 0 \quad (2.4)$$

여기서, Q 는 매개 변수 선유량으로서 물의 입자 속도를 연직방향으로 적분한 것이다.

본 연구에서는 식 (2.3), (2.4)를 기본방정식으로 시간전진과 공간중앙 양해법으로 KU-IWPH-01 모형을 수립하였다.

$$\eta_i^{t+\Delta t/2} = \eta_i^{t-\Delta t/2} - \left(\frac{c}{c_g}\right)_i [Qx_{i+1}^t - Qx_i^t] \Delta t / \Delta x \quad (2.5)$$

$$Qx_i^{t+\Delta t} = Qx_i^t - (cc_g)_i [\eta_i^{t+\Delta t/2} - \eta_{i-1}^{t+\Delta t/2}] \Delta t / \Delta x \quad (2.6)$$

여기서, x 는 외해 방향의 축, i 는 x 방향으로의 첨자, t 는 시간, Δt 는 시간 증가분, Δx 는 x 방향의 격자크기 이다.

초기 조건은 임의의 상태를 지정하더라도 충분한 반복 주기수가 경과하면 최종 해에 도달하기 때문에 괜찮지만, 최종 해에 도달하기까지의 계산 주기수를 줄이기 위해서는 가급적 해에 가까운 상태의 조건을 지정하여 주는 것이 좋으므로 본 연구에서는 단주기 파랑이 진입할 때 구조물에 의한 간섭을 전혀 받지 않는 경우에 분포하는 파랑장을 초기치로 지정하였다. 이 경우의 파랑은 반사현상에 의한 변형이 이루어지지 않은 상태이고, 반복 주기수가 증가하면서 정확한 파랑 분포 상태를 구할 수 있게 된다.

계산영역의 경계면은 크게 외해 경계면과 육지 경계면의 두 가지로 구분할 수 있다. 외해 경계면에서는 파랑이 입사할 수 있는 조건을 지정하였으며, 동시에 계산영역 내에서 발생한 파랑이 계산영역 밖으로 빠져 나갈 수 있는 방사 경계조건을 지정하였다. 외방 경계 격자점에서의 방사파 계산은 매개변수 Q 에 대하여 계산하였다. 육지 경계면에서는 특히 고체 경계면에서는 반사가 주 현상이다. 경계 조건으로는 완전 통과나 완전 흡수, 부분 반사, 완전 반사의 조건이 있으며, 반사 계수에 대하여 여러 연구자들의 반사율에 대한 연구가 있었으며, 본 연구에서는 주기와 반사율에 대한 관한 연구는 수행하지 않았으며, 0.98을 적용하였다.

2.2 파랑류 모형(KU-WIFLOW-01)

Longuet-Higgins (1970)는 쇄파대 전·후에서 발생하는 강한 파랑류의 기인력을 잉여응력으로 설명하였으며, 잉여응력을 포함하는 수심평균 2차원 평면 부정류 장과방정식을 수치모형의 기본방정식으로 취하였다.

파랑류를 지배하는 물리적 성질은 해수의 질량 보존과 운동량 보존이며, 파랑류를 계산하는 수치모형의 기본방정식인 연속 방정식은 해수면 계산에 쓰인다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(HU) + \frac{\partial}{\partial y}(HV) = 0 \quad (2.7)$$

여기서, η 는 파랑주기평균(wave-period average) 수면높이, t 는 시간, x, y 는 각각 평면 직각 좌표축, H 는 평균 수심, U, V 는 각각 x, y 방향의 수심평균 속도이다. 두 번째로 수심평균된 파랑주기평균 운동방정식의 기본적인 형태는 다음과 같다.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{R_x}{\rho d} - \frac{T_x}{\rho d} = 0 \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{R_y}{\rho d} - \frac{T_y}{\rho d} = 0 \quad (2.9)$$

$$R_x = \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y}, \quad R_y = \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \quad (2.10)$$

여기서, g 는 중력가속도, ρ 는 밀도, S_{xx}, S_{xy}, S_{yy} 는 Longuet-Higgins의 잉여응력이며, T_x, T_y 는 각각 x, y 방향으로의 전단응력으로 해저면 마찰력항 ($F_{b,x}, F_{b,y}$)과 수평 확산항(lateral mixing term) ($F_{l,x}, F_{l,y}$) 으로 나눈다.

$$T_x = F_{b,x} + F_{l,x}, \quad T_y = F_{b,y} + F_{l,y} \quad (2.11)$$

다음 식은 위의 운동방정식에서 수평 확산항을 소거하여 간단하게 한 식이다.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{R_{x,f}}{\rho d} - \frac{F_{b,x}}{\rho d} = 0 \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{R_{y,f}}{\rho d} - \frac{F_{b,y}}{\rho d} = 0 \quad (2.13)$$

여기서, $R_{x,f}, R_{y,f}$ 는 각각 x, y 축으로 평활화된 구동력(smoothed driving force) 항이다.

본 실험에서는 기본 방정식 (2.7), (2.12), (2.13)을 양해 차분식으로 표현하여 작성한 수치모형 KU-WIFLOW-01(Kim, 1993)을 적용하여 파랑류를 산정하였다. 실험시 초기조건은 임의로 지정할 수 있으며, 잠잠한 상태(calm condition)를 지정하였다. 수치모형의 시간이 경과하면서 해수위와 유속이 평행상태에 도달하게 되면, 이를 최종해로 취하였고, 경계면은 육지경계면과 개방경계면으

로 나누어 각각의 조건에 적절한 경계조건을 지정해 주었다.

2.3. 퇴적물 이동 모형 (KU-SEDTRAN-01)

앞서 서술한 파랑전파 모형을 이용하여 파랑류 수치모형에 적용한 후 퇴적 현상을 재현하기 위하여 본 연구에서 사용한 토사이동 수치모형(KU-BATH-01)은 3차원 부유사 이동·확산 방정식을 기본방정식으로 하여 부유사의 거동을 계산하며, 동시에 소류사를 계산한다. 부유사 이동을 지배하는 방정식은 부유사의 질량 보존식으로 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + (w - w_f) \frac{\partial c}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_{sx} \frac{\partial c}{\partial x} \right) \\ - \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_{sy} \frac{\partial c}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon_{sz} \frac{\partial c}{\partial z} \right) = 0 \end{aligned} \quad (2.12)$$

여기서, c 는 파랑주기평균 퇴적물 농도, t 는 시간, u, v, w 는 각각 x, y, z 방향으로의 해수의 파랑주기평균 속도, w_f 는 퇴적물 침강속도이며, $\epsilon_{sx}, \epsilon_{sy}, \epsilon_{sz}$ 는 각각 x, y, z 방향에서의 난류 확산계수이다.

소류사 이동량은 해저 기준면에서의 부유사 농도를 구하기 위한 식을 변형한 것으로,

$$|\vec{\Phi}_b| = C_4 \overline{\Psi}_{cm}^{0.5} \langle |\vec{\Psi}_{wc}|^{0.5} \rangle \quad (2.13)$$

이다. 여기서, $\vec{\Phi}_b = \vec{q}_b / w_f d_{50}$ (단위 폭, 단위 시간당의 순 부피), C_4 는 조정상수, $\overline{\Psi}_{cm}$ 는 파랑에 의해서 수정된 평균 해저면 전단응력의 유효성분에 대한 Shields 계수, $\vec{\Psi}_{wc}$ 는 총 해저 전단응력을 표현하는 순간유효 Shields 계수이다.

총 퇴적물 이동량은 부유사 이동량과 소류사 이동량의 합으로 표현되며, 해저면의 퇴적율은 수평 방향의 퇴적물 이동률로부터 구한다.

$$\frac{1}{1-v} \frac{\partial z_b}{\partial t} = - \frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_y}{\partial y} \quad (2.14)$$

여기서, z_b 는 해저면의 높이, q_x, q_y 는 각각 x, y 방향의 총 토사이동률(부유사량+소류사량; 단위: 순체적/체적), v 는 공극률이다.

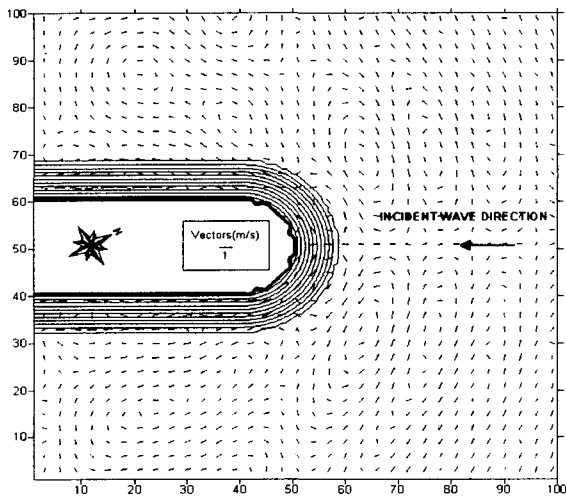
3. 적용 결과

본 연구에서는 방파제의 선단 부분에 해당하는 지역을 대상으로 입사 파향, 파고 및 주기는 삭망 평균 만조위시의 NE, 4.7m, 9.0sec 와 NW, 6.0m, 12.0sec 에 대하여 적용하였으며, 격자간격은 2m × 2m 이다. 조위에 따라 퇴적물 이동 양상이 약간씩 다르게 나타날 수 있으나, 조위가 높을수록 해안선 가까이에서 토사이동이 활발하므로 삭망평균만조위를 사용하였다. 해저면의 수심은 약 12m 정

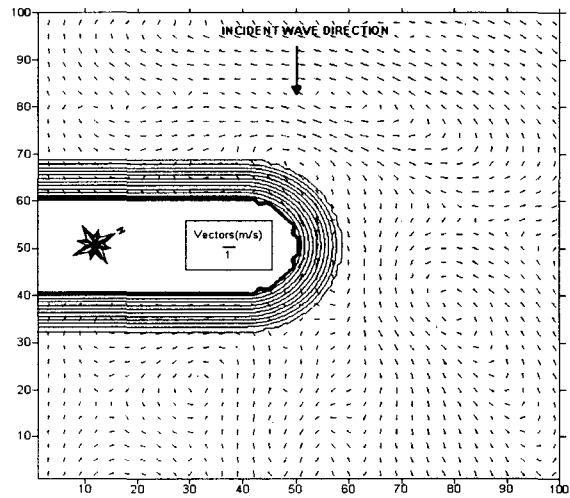
도이며, 사면경사는 1:1.5를 적용하였다.

파랑전과 모형의 결과를 이용한 연안류 변화를 <그림 3.1>과 <그림 3.2>와 같이 입사파 조건에 따라 비교하였다. 구조물 주위의 파랑류 변화에 의한 퇴적물 이동의 변화를 <그림 3.3>과 <그림 3.4>에 나타냈다.

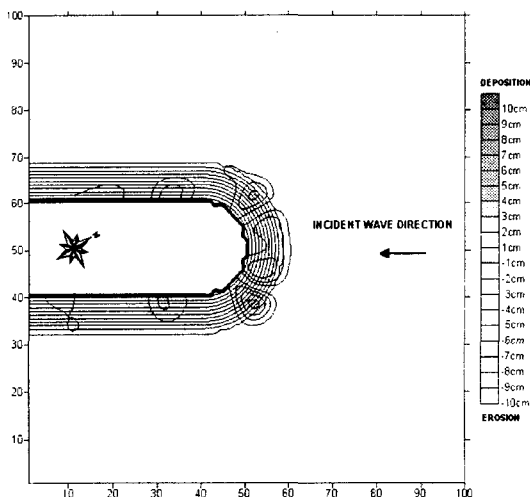
파랑모형에 따른 결과에서 IWPH 모형의 NE 파향에 대한 결과는 방파제 두부에 큰 파고가 부딪치는 관계로 선단부에 세굴과 퇴적이 나타났다(<그림 3.3>). NW 방향의 경우는 파랑 반사영향이 포함되어 흐름이 변화하여 두부 주위에 세굴과 퇴적 현상이 일어났으며, 간부에서도 세굴이 발생하였다. 방파제 선단부에만 퇴적·세굴이 집중되는 것을 볼 수 있다(<그림 3.4>).



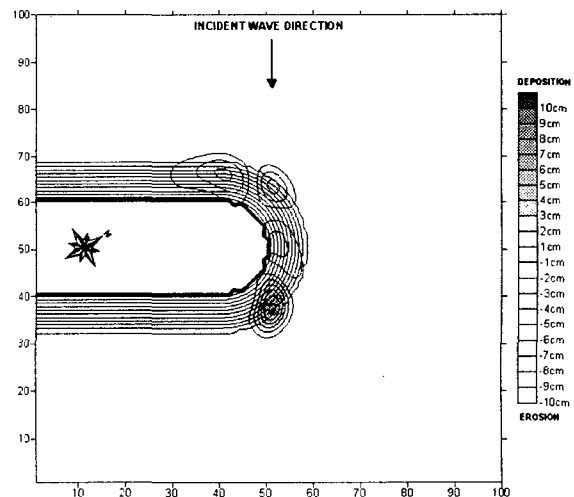
<그림 3.1> IWPH 모형 결과에 의한 파랑류 벡터도(NE 방향)



<그림 3.2> IWPH 모형 결과에 의한 파랑류 벡터도(NW 방향)



<그림 3.3> IWPH 모형 결과에 의한 퇴적 분포도(NE 방향)



<그림 3.4> IWPH 모형 결과에 의한 퇴적 분포도(NW 방향)

4. 결 론

신설되는 구조물 주위의 파랑류 변화는 구조물 주위의 지형변화에 영향을 미치며, 본 WPAP 모형과 IWPB 모형은 좁은 해역에 적용하여 비교적 정확한 재현을 할 수 있다. 적용한 지역처럼 실제로 현재 큰 규모의 폭풍 내습 등에 의한 방파제의 유실 뿐만 아니라 방파에 주위의 퇴적물 이동 현상에 의한 TTP 등의 유실 등이 발생하고 있다. 이에 대하여 본 논문에서는 구조물에 의한 파랑 반사현상이 중요한 경우에는 쌍곡선형 방정식을 이용한 파랑전파 모형을 적용하여 지형변화를 예측하였다. 실험결과 두부에서 퇴적과 세굴이 발생하였다. 앞으로 현장에 대한 관측을 통하여 실제 관측 자료와의 비교를 통하여 적절한 보강대책에 대하여 연구할 필요가 있다.

참고문헌

- Berkhoff, J.C.W. 1972. Computation of combined refraction-diffraction. ICCE, ASCE, pp. 471-490
- Booij, N. 1981. Gravity waves on water with non-uniform depth and current. Rep. 81-1, Dept. Civil Engrg, Delft Univ. of Tech.
- Copeland, G.J.M., 1985, A practical alternative to the "mild-slope" wave equation, Coastal Engineering, Vol. 9.
- Dalrymple, R.A. and Kirby, J.T. 1988. Models for very wide-angle water waves and wave diffraction. JFM, Vol. 192, pp. 33-50.
- Ebersole, B.A., Cialone, M.A. and prater, M.D. 1986. Regional coastal processes numerical modelling system. Report 1. RCPWAVE-A linear wave propagation model for engineering use. CERC, Department of the Army, US Army Corps of Engineers.
- Kim, H. 1993. Three-dimensional sediment transport model. Ph.D. Thesis, The University of Liverpool, U.K.
- Liu, P.L.-F. and Boissevain, P.L. 1988. Wave propagation between two breakwaters. J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 114(2), pp. 237-247.
- Penney, W.T. and Price, A.T. 1952. The diffraction theory of sea waves and the shelter afforded by breakwater. Phil. Trans., Roy. Soc. (London), ser. A, 244, pp. 236-253.
- Radder, A.C. 1979. On the parabolic equation method for water-wave propagation JFM, Vol. 95, pp. 159-176.