한국해안 · 해양공학회 정기학술강연회 발표논문 초록집, 1998년 9월 19일

원호수로형 방파제의 처올림 및 반사 특성 모의

박우선*, 이달수*

1. 서론

전통적으로 방파제란 단순히 파랑을 막는 구조물로만 인식되어 평상시 월파가 발생하지 않도록 축조되었고 이로 인하여 해수유통이 차단되어 항 내의 수질이 악화되는 문제가 발생되었다. 특히, 조차가 크지 않은 해역에서는 항 내의 물이 정체되어 항 내의 오염물질이 외해로 확산되지 못하여 부영양화가 빈번히 발생되고 있다. 이러한 항만 및 어항의 수질을 개선하기 위해서는 우선 오염원을 원천적으로 차단하는 것이 중요하며, 이와 더불어 방파제로 인하여 차단되었던 해수유통을 원활히 해 줄 수 있도록 하는 것이 또 다른 중요한 것이다.

이러한 실제적인 필요에 따라 Fig. 1에 보인 바와 같은 원호형 공진 수로와 도수로를 내장한 신형 해수교환 방파제가 개발되었다(한국해양연구소, 1994). 이 신형 방파제는 평상시의 대부분의 기간을 점하는 짧은 주기 및 낮은 파고의 파랑이 내습할 때 원호수로내의 공진 특성에 따른 수위상승효과를 이용하여 도수로 양단의 수위 차를 크게 함으로써 항 외의 신선한 해수를 지속적으로 항 내로 유입시키는 특징을 지니고 있다. 즉, 원호수로형 방파제의 해수교환 성능은 수로내의 공진현상에 의해 크게 좌우되게 된다. 수리실험 결과에 의하면 공진조건 부근에서 수로내 수위의 증폭현상이 발생하고 이에 비례하여 항내 유입수가 증가되는 것을 알 수 있으며, 공진조건 부근에서 반사율이 감소하는 현상을 볼 수 있다. 이 방파제의 주된 목적이 항내로 외해의 신선한 해수를 지속적으로 공급해 주는 것인 만큼 원호수로 내의 수위 증폭은 대단히 중요한 의미를 지닌다.

본 연구에서는 수치적으로 원호수로내의 수위증폭과 반사특성변화를 모의할 수 있는 기법의 개발을 수행하였다. 파동장은 선형 포텐셜이론으로 나타내었으며, 원호수로내를 출입하면서 발생하는 흐름분리에 따른 에너지 손실효과를 정합조건을 도입하여 고려하였다. Galerkin 기법을 이용하여 수치모델을 수립하였으며, 수리실험 결과와의 비교를 통하여 모델의 타당성을 입증하였다.

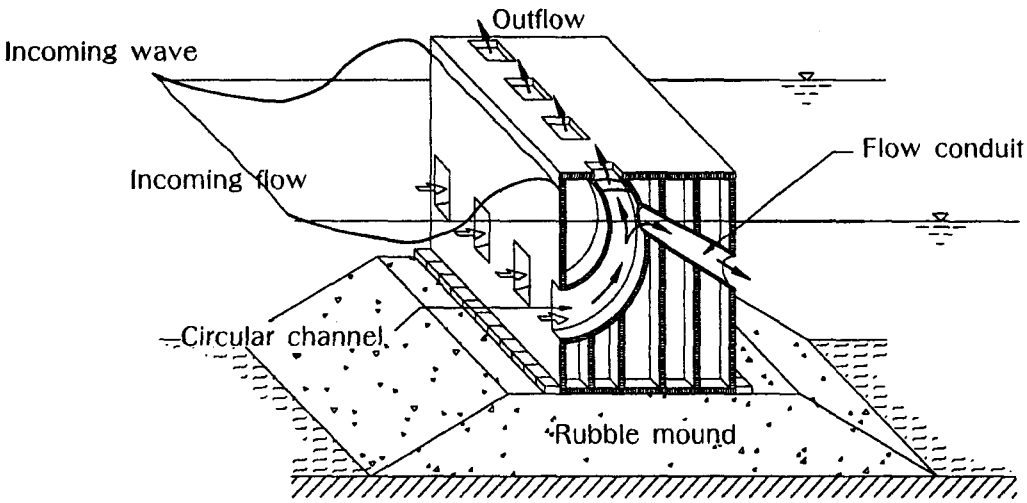

Fig. 1 Conceptual diagram of the Circular Channel Breakwater (CCB).

* 한국해양연구소 연안·항만공학연구센터

2. 수학적 모형

파동장의 유체입자의 거동은 유체를 비압축성, 비점성으로 가정하고 비회전류를 가정하는 포텐셜 이론을 사용하여 모형화하였다. 이에, 입사파랑의 파고가 작다는 가정하에 자유수면에서의 경계조건을 선형화하면, 파동장은 다음의 Laplace 방정식으로 나타낼 수 있으며,

$$\nabla^2 \Phi = 0 \qquad \text{in } \Omega \tag{1}$$

해석영역의 각 경계면에서는, 즉, 자유수면(S_f) 및 불투과 경계면(S_b)에서 다음과 같은 경계조건이 주어진다.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{\omega^2}{g} \Phi \qquad \text{on } S_f \tag{2}$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0 \qquad \text{on } S_b \tag{3}$$

원호수로 입구(S_J)에서는 단면 급축소/급확대에 의하여 발생되는 에너지 손실을 고려하기 위하여 다음과 같은 두 정합 조건식을 도입하였다.

$$u_1 = u_2 \tag{4}$$

$$\frac{p_1}{\rho} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2} f_e u_2 |u_2| + \int_l \frac{\partial u_2}{\partial t} dl \tag{5}$$

여기서, u와 p는 유속과 동압력을 나타내며 하첨자 1과 2는 각각 수로입구에서의 외부 및 내부를 나타낸다. ρ는 유체의 밀도, f_e는 단면 변화에 따른 에너지 손실계수를 나타내며, l은 입구에서 형성되는 제트류의 길이를 의미한다.

주파수 영역에서 해를 보다 효율적으로 구하기 위하여 식 (5) 우변의 마지막 항은 제트류 상의 수입자의 가속도는 일정한 것으로 가정하였고, 두 번째에 나타난 비선형 항은 Lorentz 변환을 사용하여 다음과 같이 선형화하였다.

$$\frac{1}{2} f_e u_2 |u_2| = \frac{1}{2} \alpha u_2 \tag{6}$$

여기서, α는 선형화된 손실계수로 유속의 함수로 다음과 같이 주어진다.

$$\alpha = \frac{8}{3\pi} \overline{u_2} \tag{7}$$

$\overline{u_2}$는 u_2의 진폭(amplitude)을 나타낸다.

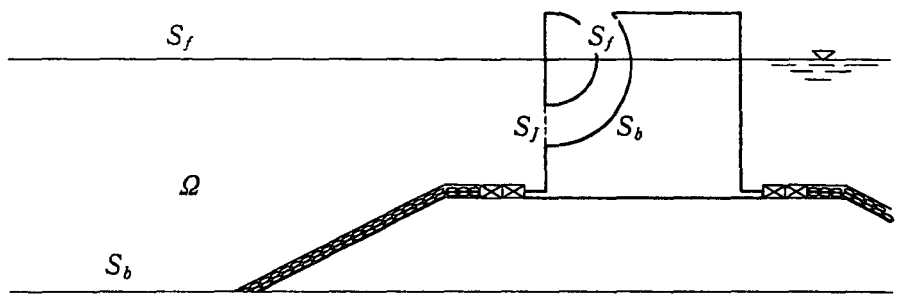

Fig. 2 Definition of an analyzed region and boundaries.

식 (4)와 선형화된 식 (5)를 속도 포텐셜로, Φ를 이용하여 정리하여 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \Phi_1}{\partial n} = -\frac{\partial \Phi_2}{\partial n} \tag{8}$$

$$\frac{\partial \Phi_1}{\partial n} = \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{\left(1 + \frac{i\alpha}{2\omega}\right)} \tag{9}$$

여기서, $\partial/\partial n$은 경계면에서의 외향법선 방향의 미분을 의미한다.

방파제로부터 반사된 파는 외부로 진행해 나가고 다시 반사되어 돌아오지 않는다는 다음의 방사 경계조건을 만족해야 한다.

$$\lim_{|x|\to\infty} \left(\frac{\partial \Phi^S}{\partial r} - ik_0 \Phi^S \right) = 0 \qquad \text{on } S_r \tag{10}$$

여기서, Φ^S는 반사된 파의 포텐셜을 의미하며, S_r은 방파제로부터 아주 멀리 떨어진 경계면을 나타낸다.

3. 유한요소 모형

가. 유한요소 근사

상기의 경계치 문제를 유한요소기법으로 근사하기 위해서 Galerkin 기법을 이용하였다. 즉, 파동장의 수입자의 거동을 나타내는 변수, Φ를 다음과 같이 보간하고,

$$\Phi = N^T \overline{\Phi}_e \tag{11}$$

보간함수를 가중함수로 사용하는 Galerkin 기법을 적용하면 미분방정식으로 표시된 이 경계치 문제는 다음과 같은 연립방정식으로 변환된다.

$$\sum_e K^e \overline{\Phi}_e = \sum_e f^e_{S_I} \tag{12}$$

여기서,

$$K^e = \int_{\Omega^e} \left(N_{,x} N^T_{,x} + N_{,z} N^T_{,z} \right) d\Omega - \int_{S_f^e} \frac{\omega^2}{g} N N^T \, dS_f$$

$$- \int_{S_I^e} \frac{1}{\left(1 + \frac{i\alpha}{2\omega}\right)} N N^T \, dS_I \tag{13}$$

$$f^e_{S_I} = \int_{S_I^e} N \frac{\partial \Phi^I}{\partial n} \, dS_I \tag{14}$$

여기서 하첨자 $,x$와 $,z$는 x 및 z방향의 미분을 의미한다.

나. 무한요소 및 접합요소

해석영역의 내부영역은 8절점 등매개변수 유한요소로 모형화하였으나, 외부영역은 효율적인 해석을 수행하기 위하여 무한요소로 분할하였다. Fig. 3에 개념적인 유한요소망도를 제시하였다.

무한요소의 보간함수는 진행파와 첫 번째 소멸파의 거동을 사용하여 결정한 다음과 같은 식을 사용하였다(박 등, 1991).

$$N = \begin{Bmatrix} M_i(\xi)\, N(\eta) \\ M_o(\xi)\, N(\eta) \end{Bmatrix} \tag{15}$$

여기서, $N(\eta)$는 2차 함수로된 보간함수벡터이며, $M_i(\xi)$와 $M_o(\xi)$는 다음과 같이 진행파와 첫 번째 소멸파의 거동의 함수로 표시된다.

$$\begin{Bmatrix} M_i(\xi) \\ M_o(\xi) \end{Bmatrix} = F^T \begin{Bmatrix} f_0(\xi) \\ f_1(\xi) \end{Bmatrix} \tag{16}$$

$$f_0(\xi) = e^{ik_0(\xi + r_i) - \varepsilon r_i} \tag{17}$$

$$f_1(\xi) = e^{-k(\xi + r_i)} \tag{18}$$

$$F = \begin{bmatrix} e^{ik_0 r_i} & e^{-k_1 r_i} \\ e^{ik_0 r_o} & e^{-k_1 r_o} \end{bmatrix}^{-1} \tag{19}$$

ε = 인위적으로 도입된 감쇠계수($0 < \varepsilon \ll k_0$); k_1 = 첫 번째 소멸파의 파수; r_i 와 r_o = 각각 원점으로부터 무한요소 내측절점과 외측절점까지의 거리를 나타낸다. 추가적인 감쇠계수, ε을 도입한 이유는 무한요소의 시스템 행렬구성시 반경방향으로의 적분치를 존재하게 하기 위한 것이다. 실제의 문제에서 유체의 점성과 해저면과의 마찰에 의한 손실이 예상되는 만큼 타당한 것으로 판단된다.

$M_i(\xi)$와 $M_o(\xi)$는 다음과 같이 외부영역의 산란파 속도포텐셜의 r 방향 거동을 진행파와 첫 번째 소멸파 성분으로 표시하여 구한 것이다.

$$\Phi_s \approx a e^{ik_0 r} + b e^{-k_1 r} \tag{20}$$

이와 같이 표시된 산란파의 거동은 무한경계면에서 방사경계조건을 만족하게 된다.

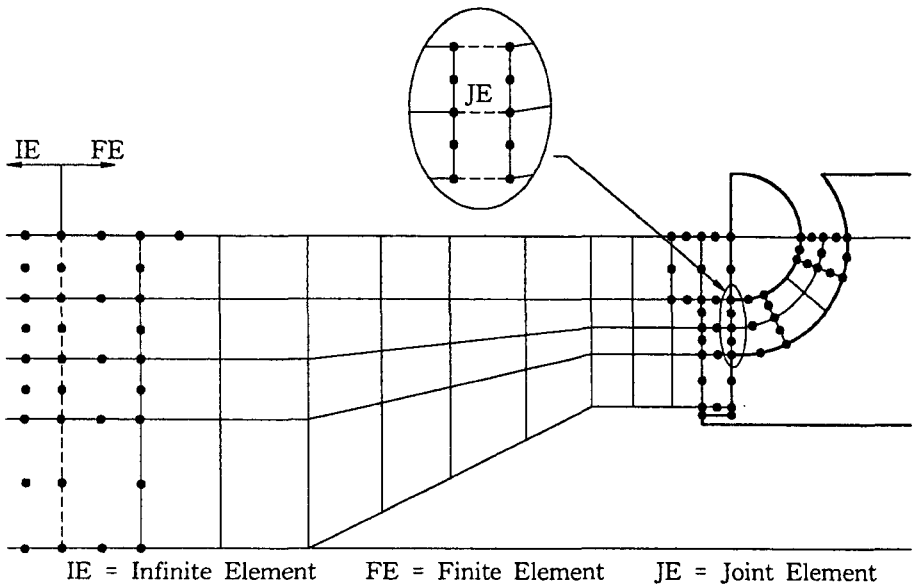

Fig. 3 Conceptual finite element mesh including IE's, FE's and JE's.

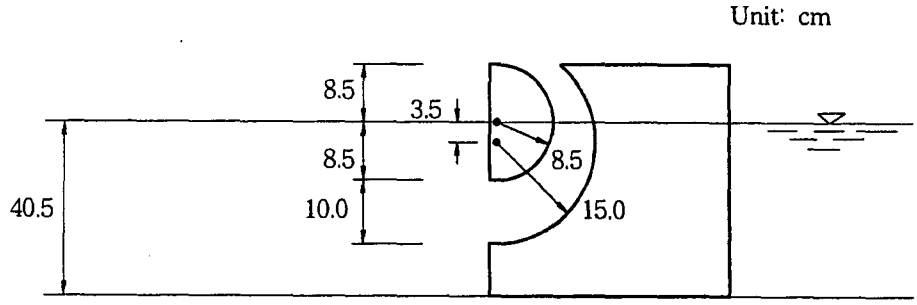

Fig. 4 An example structure of CCB w/o the rubble mound.

원호수로 입구에서 주워지는 두 개의 정합조건은 식 (13)의 세 번째 항으로 표시되고 이는 다음과 같은 수로 외부와 내부를 연결해 주는 접합요소로 나타낼 수 있다.

$$N = \begin{Bmatrix} -N(\eta) \\ N(\eta) \end{Bmatrix} \tag{21}$$

여기서, 위에 나타낸 보간함수 벡터는 입구의 외부에 위치(좌측)한 절점에 관한 것이고 아래는 수로 내부 절점(우측)에 관련된 보간함수벡터이다.

4. 수치모델의 검증

모델의 타당성을 검증하기 위하여 Fig. 4에 보인 바와 같은 마운드가 없이 원호수로형 케이슨 만이 존재하는 경우에 대한 기존의 수리실험 결과와 비교하였다(한국해양연구소, 1994). 실험용 파랑으로는 월파가 발생하지 않는 조건에서 파고 3cm급(WC1)과 5cm (WC2)급 두 조건이 사용되어졌다.

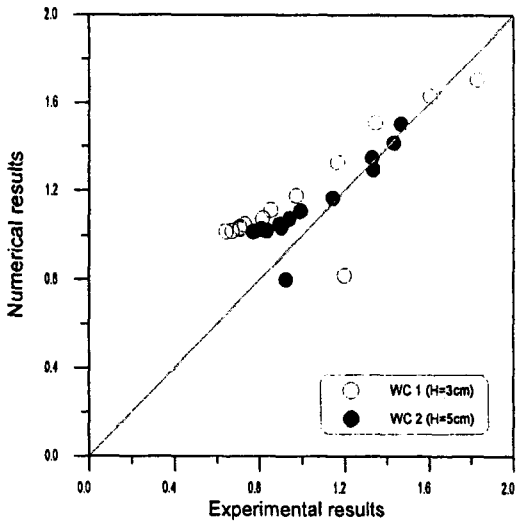

Fig. 5 Wave runup in the circular channel.

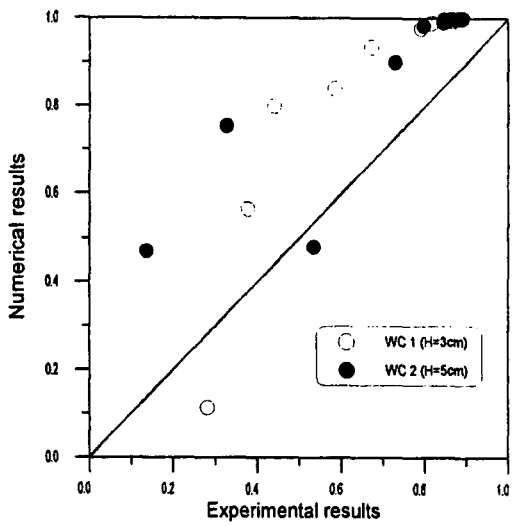

Fig. 6 Wave reflection coefficients.

Fig. 5와 6에 보인 것은 실험과 수치계산으로부터 얻어진 원호수로내 처올림 높이와 반사율을 각각 수평 및 수직축으로하여 도시한 것이다. 원호수로 내의 처올림 높이에 대한 비교결과는 대각선상에 잘 모여 있으나 반사율의 경우는 많은 경우가 대각선 위쪽에 놓여 있음을 알 수 있다. 이 결과는 본 모델이 방파제의 소파성능은 과소평가하고 있지만 원호수로 내의 수위 증폭현상은 비교적 잘 나타내고 있음을 보여주고 있는 것이다. 이 두 결과를 무차원 주파수를 수평축으로 하여 다시 나타낸 Fig. 7 - Fig. 10을 보면, 본 모델에 의해 예측된 반사율의 경향이 수리실험 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 특히, 값에서는 차이가 있지만 공진조건 부근에서 반사율이 최저가 되고 양쪽으로 갈수록 증가되는 경향이 수리실험의 경우와 완전히 일치한다. 수리실험시 예상되는 각종 에너지 손실을 생각한다면 수치실험의 결과는 상당히 타당한 것으로 판단된다.

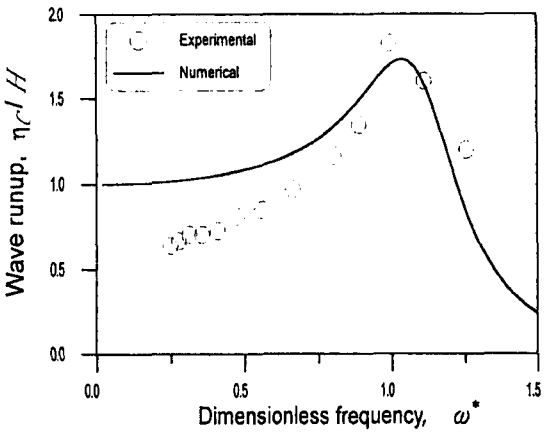

Fig. 7 wave runups in the circular channel (H = 3cm).

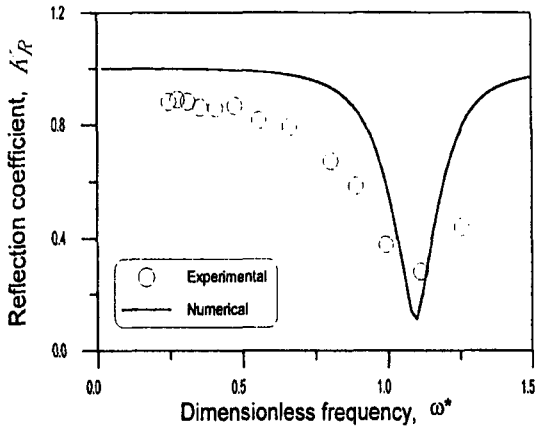

Fig. 8 Wave reflection coefficients (H = 3cm).

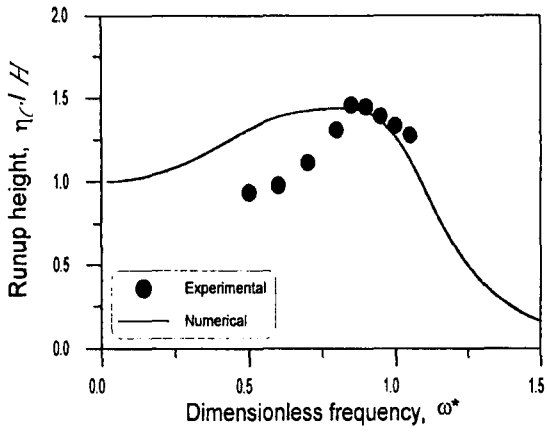

Fig. 9 wave runups in the circular channel (H = 5cm).

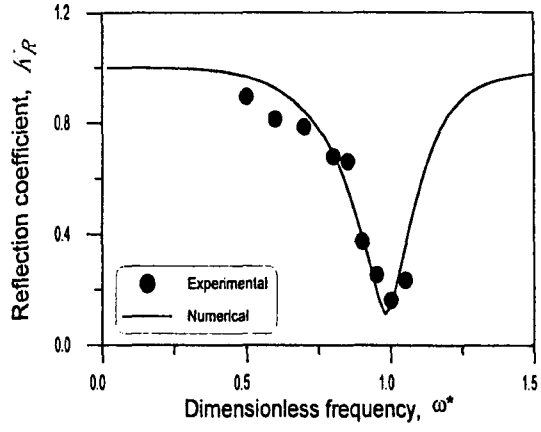

Fig. 10 Wave reflection coefficients (H = 5cm).

참고문헌

한국해양연구소, 1994. 항만수질개선을 위한 방파시설의 개발연구(III), 과학기술처, BSPN00232-767-2.

박우선. 이달수, 오영민, 정원무, 1991. 연직 2차원 회절 및 방사문제 해석을 위한 무한요소. 한국해안·해양공학회지, 3(4), pp. 235-243.