

포물형 광역모형과 혼합요소모형의 결합을 통한  
 단주기 파랑전파 수치모의

Numerical Simulation of the Short Wave Propagation by the Combination of  
 Parabolic Model and Hybrid Element Model (PARA-FEM)

이우영<sup>1</sup> · 성상봉<sup>1</sup> · 전인식<sup>1</sup>

Woo Young Lee<sup>1</sup>, Sang bong Seong<sup>1</sup>, and In Sik Chun<sup>1</sup>

1. 서 론

기존의 혼합요소모형(박 등, 1994; Demirbilek and Panchang, 1998)은 반원형태의 정합경계에 파고와 파향을 일정하게 입력하게 되어 있기 때문에 보다 정확한 계산결과를 확보하기 위해서는 정합경계가 되도록이면 심해파 해역에 위치하는 것이 유효하다. 그러나, 국내의 남·서해안과 같은 지역은 심해역이 육지로부터 상당거리 떨어져 있으므로, 정합경계가 심해파 해역조건에 위치하게 되면 계산 Mesh의 수가 막대하게 되어 계산기 용량초과 및 계산속도 저하가 초래된다.

따라서, 불가피하게 적정 천해역에 정합경계를 놓게 되는데, 이러한 경우 입사파가 정합경계에 도달하기 전에 이미 파 굴절 및 천수변형을 겪게 되므로 정확한 계산결과와 획득이 어렵다.

이러한 난점을 극복하기 위하여 본 연구는 포물형 환경사 방정식을 기본으로 하는 광역모형(Kirby, 1984)을 혼합요소모형에 결합하여 정확한 정합경계조건을 확보함으로써 파랑전파 및 항만 정온도를 해석할 수 있는 PARA-FEM모형을 수립하였으며 그 적용예를 혼합요소모형의 결과와 비교하였다.

2. 수치해석이론의 개요

2.1 지배방정식

수중 임의점에서의 속도 포텐셜은

$$\Phi(x, y, z, t) = \phi(x, y)F(z)e^{-i\omega t} \quad (1)$$

와 같이 정의할 수 있다. 여기서,  $\phi(x, y)$ 는 수면에서의 포텐셜이며,  $F(z)$ 는

$$F(z) = \frac{\cosh[k(z+h)]}{\cosh kh} \quad (2)$$

와 같다.

해수면에서의 속도포텐셜  $\phi$ 는 다음과 같은 환경사 방정식(Berkhoff, 1972)을 풀어 결정할 수 있으며,

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \phi) + \frac{C_g}{C} \omega^2 \phi = 0 \quad (3)$$

이를 급경사에도 적용할 수 있는 확장형 환경사 방정식 (Extended mild slope equation)은 다음과 같다(Massel, 1993).

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \phi) + \frac{C_g}{C} \omega^2 \phi - \omega^2 [R_1 (\nabla h)^2 + R_2 \nabla^2 h] \phi = 0 \quad (4)$$

여기서,  $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ ,  $C$ =파속,  $C_g$ =군속도,  $\omega$ =각주파수,  $R_1$  = 해저면 경사의 제곱에 관련되는 수,  $R_2$  = 해저면 곡률에 관련되는 수

<sup>1</sup> 건국대학교 토목공학과 (Corresponding Author : Woo Young Lee, Department of Civil Engineering, Konkuk University, 1 Hwayang-Dong, Kwangjin-Ku, Seoul 143-701, Korea. L5401kr@yahoo.co.kr)

(Suh, et al., 1997),  $h=$  수심이다.

계산영역은 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 정합 경계  $\Gamma_I$ 를 기준으로 내부영역  $\Omega_1$ 와 외부영역  $\Omega_2$ 로 구분되며 내부에서의 속도포텐셜은  $\phi_1$ 으로, 외부영역에서의 포텐셜은  $\phi_2 + \phi_I$ 로 정한다. 여기서,  $\phi_I$ 는 입사파의 수면 포텐셜이다.

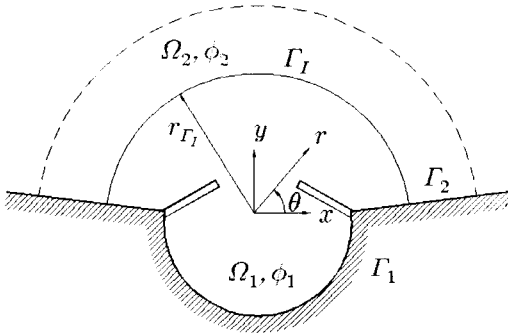


Fig. 1. 혼합요소모형의 계산영역.

## 2.2 경계조건

경계조건은 해안선 및 구조물에서의 흡수경계  $\Gamma_1, \Gamma_2$ 와 영역 간 정합경계  $\Gamma_I$ , 그리고 무한 원방 경계조건(Radiation Condition)으로 구성된다.

먼저, 내부영역, 외부영역에 대한 흡수경계조건은 각각

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial n_1} = -\alpha \phi_1 \quad ; \quad \Gamma_1 \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\phi_2 + \phi_I)}{\partial n_2} = -\alpha(\phi_2 + \phi_I) \quad ; \quad \Gamma_2 \quad (6)$$

와 같다. 여기서,  $n_1, n_2$ 는 각각 내부영역과 외부영역 경계면에서의 외향 법선벡터이며, 흡수 파라미터  $\alpha$ 는

$$\alpha = ik \cos \theta_n \frac{1 - K_r}{1 + K_r} \quad (7)$$

와 같다.

$\theta_n$ 는 입사파의 경계면 법선방향으로부터의 각도(통상 영으로 취함)이다. 정합경계조건은

$$\phi_1 = \phi_2 + \phi_I \quad (8)$$

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial n_1} = -\frac{\partial(\phi_2 + \phi_I)}{\partial n_2} \quad (9)$$

와 같다.

무한 원방 경계조건은 다음과 같은 방사조건(radiation condition)에 해당된다.

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{r} \left( \frac{\partial \phi_2}{\partial r} - ik \phi_2 \right) = 0 \quad (10)$$

## 2.3 수리특성의 결정

수치모델의 미지수는

$$\phi = -\frac{igA}{\omega} \quad (11)$$

이다. 여기서,  $A=$  복소진폭이며, 수면변위의 진폭과 위상은 각각 다음과 같이 구할 수 있다.

$$A = i \frac{\omega}{g} \phi = |A| e^{i\theta} \quad (12)$$

여기서,  $|A| =$  수면변위 진폭,  $\theta =$  위상이다. 파랑에 의한 동수압은

$$P = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \rho i \omega \phi F(z) e^{-i\omega t} \quad (13)$$

와 같이 구할수 있으며, 수립자 속도성분은

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} F(z) e^{-i\omega t} \quad (14)$$

$$v = \frac{\partial \phi}{\partial y} F(z) e^{-i\omega t} \quad (15)$$

$$w = \phi \frac{\partial F(z)}{\partial z} e^{-i\omega t} \quad (16)$$

와 같다.

### 3. 광역모형과 혼합요소모형의 결합

광역모형(유한차분모형)과 혼합요소모형(유한요소모형, FEM3D)의 결합모형(PARA-FEM)에서는 정합경계 인근 격자에서의 광역모형의 결과치(복소진폭, 위상, 파향)를 FEM3D모형의 정합경계에 존재하는 각각의 삼각형 요소 꼭지점에 보삽시킨다(Fig. 2). 이때 중요한건 바로 광역모형과 FEM3D모형 사이의 수면위상이 얼마나 연속적으로 잘 연결되는가 하는 것이다.

Fig. 3은 직선안벽에 직각으로 입사하는 파랑에 의한 수면위상을 PARA-FEM모형에 적용하여 구한 결과이다. 수면위상이 연속적으로 잘 연결되고 있음을 보여준다.

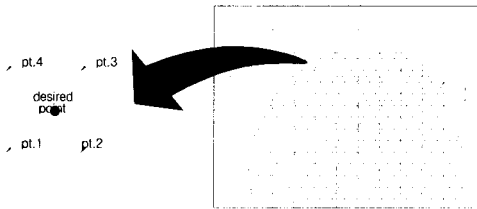


Fig. 2. PARA-FEM모형의 보삽방식.



Fig. 3. PARA-FEM모형의 수면위상 연결.

### 4. PARA-FEM의 적용사례

실해역에서의 적용성을 알아보기 위해 FEM3D모형과 PARA-FEM모형을 각각 포항신항에 적용하였다. 계산영역은 Fig. 4와 같으며, 각각의 계산결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 제시하였다 (해양수산부, 2003). 그림에서 화살표는 파고 값의 크기와 파향을 나타낸다.

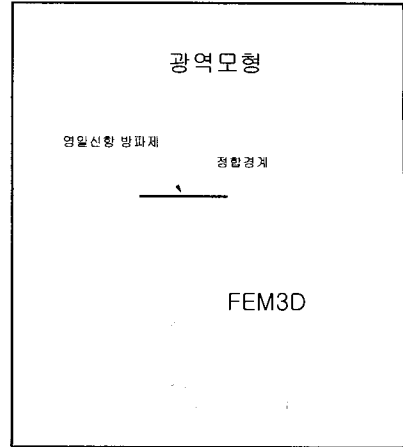
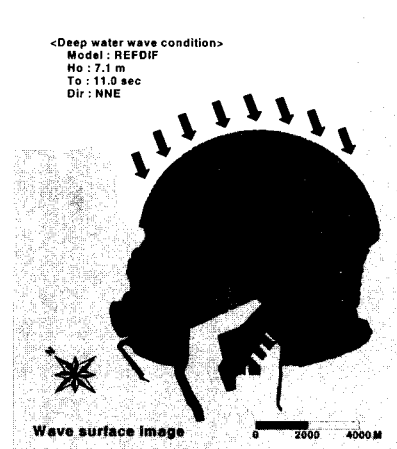
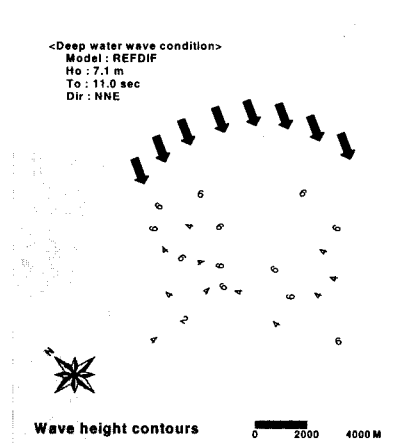


Fig. 4. PARA-FEM모형의 계산영역.

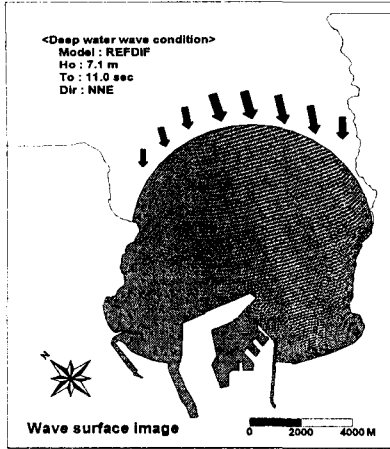


(a) 수면위상도

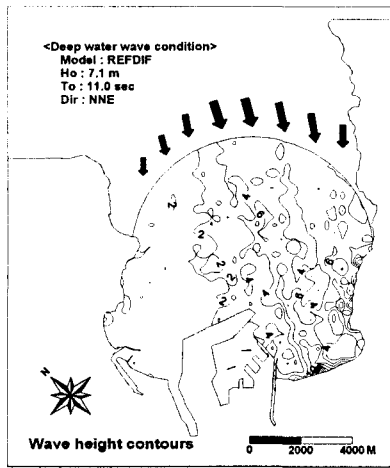


(b) 등파고도

Fig. 5. FEM3D모형의 수치모의 결과.



(a) 수면위상도



(b) 등파고도

Fig. 6. PARA-FEM모형의 수치모의 결과.

입사조건은 FEM3D모형과 PARA-FEM모형의 정확한 비교를 위하여 FEM3D모형에서는 광역모형의 계산결과를 이용하여 정합경계 중심위치에서의 파향과 파고값을 구한 후, 이들을 전 정합경계선상에 일정하게 입력하였고, PARA-FEM모형에서는 정합경계선을 따라 파향과 파고값을 보삽·결정하고 그 결과를 입력하였다.

수치모의 결과들을 봤을 때 포항신항을 중심으로 FEM3D모형의 경우 좌우의 파고 값과 수면위상이 거의 비슷하지만 PARA-FEM모형의 경우 좌측과 우측의 파고 값과 수면위상이 서로 다르다.

이 같은 결과는 FEM3D모형과 PARA-FEM모형의 가장 큰 차이점을 단적으로 보여주는 예이다. 즉, FEM3D모형의 경우 심해역에 있는 영일 신항 방파제 효과를 직접 반영하지 못하나, PARA-FEM모형의

경우는 방파제의 차폐효과가 그대로 포항신항에 파급됨을 보여준다.

Fig. 7은 광역모형의 수면위상도와 PARA-FEM모형의 수면위상도를 함께 도시한 것으로, 실해역에서도 정합경계에서의 수면위상이 연속적으로 잘 연결됨을 볼 수 있다.

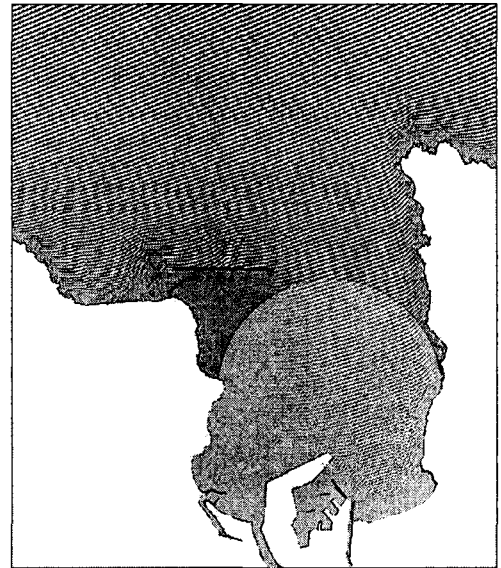


Fig. 7. 포항신항에서의 REFDIF모형과 PARA-FEM모형의 수면위상연결.

## 5. 결 론

본 연구에서는 기존 FEM3D의 정합경계에서의 일률적인 파랑 입사에 따른 수치해의 부정확성을 개선하기 위하여 포물형 완경사 방정식을 기본으로 하는 광역모형의 결과를 혼합요소모형의 정합경계에 보삽하여 계산하는 PARA-FEM모형을 제시하였다. PARA-FEM모형의 정확성을 검증하기 위하여 직선안벽 전면의 중복파와 포항신항의 파랑전파를 계산하여 기존의 FEM3D모형의 결과와 비교하였으며, 세부 연구결과는 다음과 같다.

- 광역모형과 FEM3D모형의 수면위상의 접속성을 검토한 결과, PARA-FEM모형에 의하여 두 모형간 수면위상이 연속적으로 잘 연결됨을 확인하였다.

- 실해역에서 모형의 적용성을 검토하기 위하여 포항신항을 대상으로 실시한 단주기 파랑전파의 수치

모의결과 PARA-FEM모형이 기존의 FEM3D모형에 비해 항내로 진입하는 파의 전파를 잘 나타내었다.

이상의 내용을 종합해 볼 때 심해역과 육지간 거리가 멀거나, 다수의 도서로 차폐된 해역에서의 파랑전파 및 정온도 계산에 본 PARA-FEM모형이 매우 유효하게 사용될 수 있을 것이라고 사료된다. 그러나 한편으로는 아직 흡수경계처리문제의 보완과 바닥마찰에 대한 고려 등의 해결되어야 할 문제들을 가지고 있으므로 향후 지속적인 연구가 진행되어야 할 것이다.

### 감사의 글

본 논문은 해양수산부의 연구사업으로 건국대학교에서 수행한 “항만시설 개선을 통한 가동율 제고방안 연구용역(I)”사업의 결과 중 일부를 발췌하여 수록한 것임을 밝히며 연구사업비 지원에 심심한 감사를 표합니다.

### 참고문헌

- 해양수산부, 2003. 항만시설 개선을 통한 가동율 제고방안 연구용역(I).
- Suh, K.D., Lee, C., and Park, W.S., 1997. Time-dependent equations for wave propagation on rapidly varying topography, *Coastal Eng.*, 32, pp. 92-118.
- Park, W.S., Chun, I.S. and Jeong, W.M., 1994. Infinite Element for the Analysis of Harbor Resonance, *한국해안 · 해양공학회지*, 6(2): 139-149.
- Berkhoff, J.C.W., 1972. Computation of combined refraction-diffraction, *Proc. 13th. Int. Conf. Coastal Eng.*, ASCE, Vancouver, pp. 471-490.
- Demibilek, Z and Panchang, V., 1998. *CGWAVE: A coastal surface water wave model of the mild slope equation*, Technical Report CHL-98-xx, 112 p.
- Kirby, J.T., 1984. A note on linear surface wave-current interaction over slowly varying topography, *J. Geophy. Res.*, 89(C1), pp.

745-747.

- Massel, S.R., 1993. Extended refraction -diffraction equation for surface waves, *Coastal Eng.*, 19, pp.97-126