

소흑산도 어항의 파랑산정 Wave Hindcast for Fishery Port at Soheuksando

최병호¹, 엄현민^{1,2}, 김경옥¹
Byung Ho Choi¹, Hyun Min Eum^{1,2}, and Kyeong Ok Kim¹

1. 서 론

2000년 8월 27일 ~ 9월 1일 기간 황해를 통과하여 안흥만에 상륙한 태풍 Prapiroon 은 소흑산도를 통과할 때 8월 31일 순간 최대 풍속 58m/sec, 십분 평균풍속 47m/sec를 기록하며 이때 발생한 해파에 의해 소흑산도 방파제의 두부가 64m, 제간부의 전후면이 486m의 유실되는 피해를 발생하였다. 본 연구에서는 광역의 해파산정은 WAM 모형에 의해 수행하였으며 내역 파랑변형 산정은 유한요소격자체계를 사용한 환경사방정식 모형을 사용하였다. 내역파랑변형모형(유한격자체계)의 외해측 개방경계의 파랑조건(심해파로 간주)은 3세대 모형 WAM 모형의 산정결과로 취하는데 WAM 모형의 제약성 및 방향스펙트럼의 설정에 따른 문제 (Sprinkler effect를 초래하는)들에 대해서는 비교적 잘 알려져 있어 생략키로 한다. WAM 모형은 기상 입력(decoupled run)과 해일, 조석에 의한 수위변화와 유속을 고려(loosely coupled run)으로 나뉘어서 산정하였는데 기상입력은 기상청의 국지대기모형(MM5) 예보자료(2000년 8월 27일 ~ 9월 1일)를 사용하였다. 실제 관측된 자료와 국지 대기모형의 해상풍과의 차는 관측치(소흑산도)와 보정시켰다. 소흑산도 어항외측 격자에서의 최대유의파는 11m, 침두주기는 15초이었다. 이를 토대로 내역 파랑모형에 의한 산정과정 및 경과를 본 고에서는 다룬다.

2. 전처리 과정

¹ 성균관대학교 토목환경공학과 (Civil and Environmental Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korean)

² 한동대학교 건설환경연구소 (Institute of Construction and Environmental Research, Handong Global University, Pohang 791-708, Korea)

성균관대학의 범용적(조석, 순환, 해파, 쓰나미 등) 유한 요소 생성, Numbering 최적화 및 전후처리 체계인 FEMEDITOR를 이용하여 신속하게 격자구성 및 모형 전후처리를 하였다. 모형 영역은 어항을 포함한 1.5km × 1km 영역으로 반원형과 개방경계를 취한다. 주로 이용가능한 격자수심과 파장당 노드수(본 경우는 15)를 입력하면 자동적으로 전영역의 메쉬가 생성된다. 경계입력은 해안선(육지와 섬, 방파제) 경계, 외해개방경계, 파입력경계로 설정된다(이 경우 file 편집이 수행된다). 삼각형요소의 정렬(Spring) 및 renumbering(최적화)이 이루어 파일이 생성되면 입력파일 조건이 완성된다.

SMS (Surface-Water Modeling System)은 Fasttab의 후신으로서 Brigham Young 대학의 Engineering Computer Graphics Lab에서 개발한 것으로 RMA, ADCIRC, CGWAVE 등의 FEM 모형을 운용하는 전, 후처리 프로그램이며 매 모형의 적용마다 개별적인 interface를 필요로 한다.

3. 유한요소 해파변형모형

소위 환경사방정식으로 불리우는 파랑변형모형이 Berkhoff(1972, 1976)에 의해 제시된 후 그 원형은 FEM 형태로서 출발하였으나 유한격자체계의 취급의 용이성 때문에 근년의 타원형, 포물형, 쌍곡형 환경사 모형들은 유한차분 격자체계 상에서 구성되어 활용되고 있다. 메인대학의 Vijay Panchang(1998)은

타원형 MSE를 근간으로 한 FEM 모형으로서 MSE 모형을 개발하였는데 이 모형의 불규칙한 실제 파를 산정하기 위한 two-level parallel 산정기법(MPI 및 OPENMP 사용)은 미국방성에서 활용되기 시작하고 있다. 기본방정식은 2차원 타원형 환경사방정식을 근간으로 하는데 아래와 같다.

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \hat{\eta}) + \frac{C_g}{C} \sigma^2 \hat{\eta} = 0 \quad (1)$$

여기서, $\hat{\eta}(x, y)$ 는 파고를 계산하기위한 복소수 해표면 함수, σ 는 대상 해파주파수 (radians/sec), C 는 위상 속도 ($=\sigma/k$), C_g 는 군속도 ($=\partial\sigma/\partial k = nC$)이다. 여기서,

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right) \quad (2)$$

이며 $k(x, y)$ 는 선형 분산관계를 통한 지역 수심 ($=d(x,y)$)에 관계된 파수 ($=2\pi/L$)이다.

$$\sigma^2 = gk \tanh(kd) \quad (3)$$

모형은 굴절, 회절 및 반사를 다루고 있는데 외측 개방경계는 구형, 원형 또는 반원형을 취할 수 있으며 쇄파조건은 북해 연안의 관측치 (Massel, 1992)와 잘 근사하는 Battjes와 Janssen (1978) 또는 Dally와 Dean (1985)의 식을 선택적으로 취할 수 있다. 바닥 마찰계수는 Dalrymple 등(1984)이 제시한 식을 취한다. 해안선, 방파제 및 섬에서의 파의 반사 영향을 고려하기 위해 영역(경계)을 분할 하여 반사계수가 설정된다. 개방 경계는 box형 (구형), 반원형, 원형으로 취급되며 포물형 근사 또는 Bessel Series 로서 취급된다. 자세한 이론적 배경은 별도의 문헌 (Demirbilek과 Panchang, 1998)에 수록되어 있으므로 재술치 않기로 하며 모형의 특성은 다음과 같다.

- 가) 환경사 및 급경사 파랑방정식 근거하며 넓은 해안영역을 취급
- 나) 선형파 및 Spectral wave를 산정
- 다) 구조물과 수심에 의한 굴절, 회절, 반사, 감쇄(쇄파 및 저면마찰)의 복합적인 과정을 산정
- 라) 입사파의 각도제한 없이 임의 자연 하안선 및 수심 상황에서 해파 산정
- 마) 단파 변형과 장파 공진 현상의 비교적 넓은 주파대 (단주기 풍파, 너울 및 infra-gravity wave)에 적용
- 바) 경계 반사율만이 유일하게 지정해야 하는 항목임.
- 사) 파고, 위상, 방향, 유속, 압력 산정

아) 바람의 효과는 입력되지 않음, 해파-해류 상호작용, 파간 상호작용은 고려되지 않음

4. 구형항만에서의 실험

여기서 구형항만에서의 공진파에 대한 마찰에 의해 파에너지 분산에 미치는 바다 마찰의 영향을 실험하였다. 항구의 길이는 0.3111m, 폭은 0.0604m 그리고 수심은 0.2572m 이다. 모형 이력값은 Lee(1969)와 Chen (1986)에서 참고하였다. Table 1에 입력상태를 나타내었다. 아래에서 k 는 파수이고 l 은 항만의 길이이다.

Table 1. Model Input Data

진폭	kl	진폭	kl
0.13	0.2	0.30	1.8
0.13	0.4	0.25	2.0
0.13	0.6	0.25	2.5
0.13	0.8	0.30	3.0
0.13	1.0	0.25	3.5
0.13	1.1	0.35	4.0
0.38	1.2	0.35	4.2
0.38	1.3	0.35	4.4
0.25	1.4	0.25	4.6
0.25	1.5	0.30	4.8
0.25	1.6	0.30	5.0

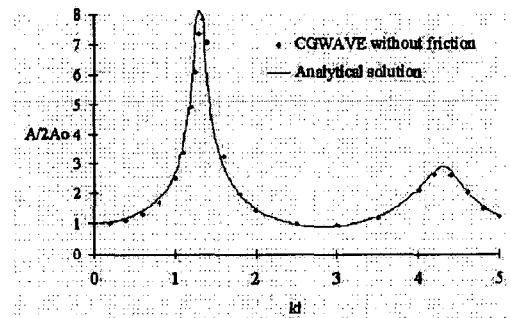


Fig. 1. Theoretical and numerical resonance curves for a fully reflecting rectangular harbor (Demirbilek et al., 1998)

완전 반사 항구에 대한 결과가 Fig. 1~3에 제시되어 있다. 마찰이 없는 선형 파랑변형 형의 결과는 Ippen and Goda (1963)의 이론적인 해와 잘 맞는 것으로 나타나고 있다 (Fig. 1). Fig. 2에는 공진의 최대에서 진폭이 해안경계의 반사계수가 감소함에 따

라 줄어들어 가는 것이 나타나 있다. 이 반사계수는 공진의 최대가 발생하는 주파수에 영향을 미치지 않는다. Fig. 3은 해파변형 모형의 예측에 마찰의 효과를 보여주고 있다. 마찰계수가 증가함에 따라 해가 처음 공진 최대값의 실험값으로 진전하는 것이 나타나 있다. 최대 주파수는 마찰 계수의 더 큰 값으로 이동한 것으로 보여진다.

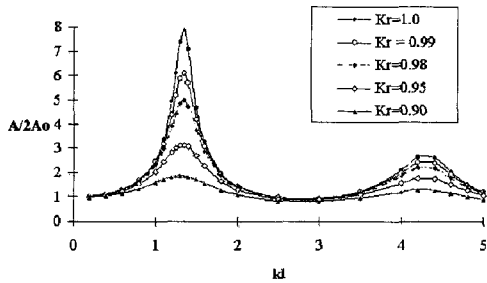


Fig. 2. Harbor response curves for various values of coastal reflection coefficient (Demirbilek et al., 1998)

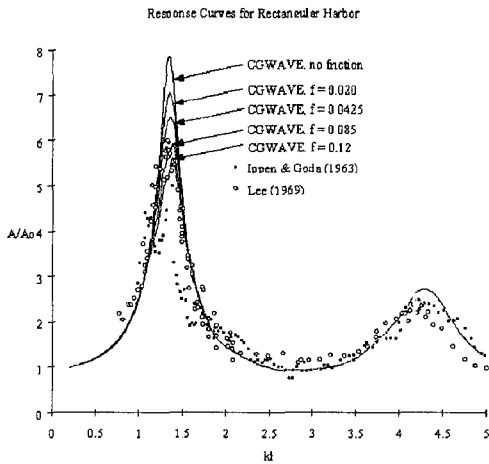


Fig. 3. Harbor response curves for various values of the friction factor (Demirbilek et al., 1998)

Fig. 4와 5에는 진폭 5m, 주기 4sec를 갖는 입사파에 대해 마찰계수 0.12를 적용하여 수치실험을 한 모형영역에서의 진폭과 위상의 분포가 나타나 있다.

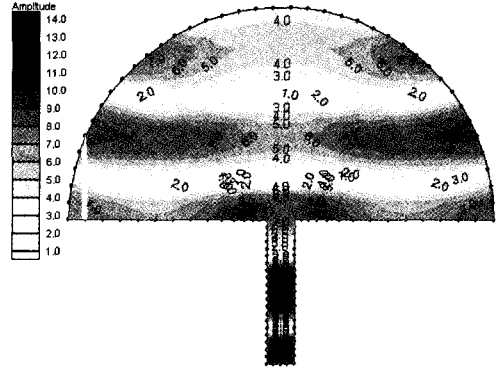


Fig. 4. Amplitude for a rectangular harbor (friction coefficient: 0.12).

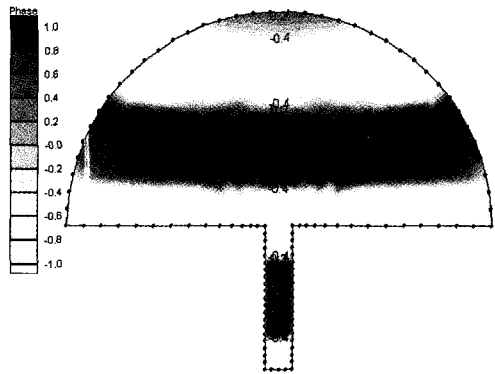


Fig. 5. As Fig. 4 but Phase

5. 소혹산도에의 적용

5.1 Mesh 형성

해파변형 모형을 소혹산도에 적용하기 위해 유한요소 체계를 SMS를 이용하여 Fig. 6과 같이 파장과 수심을 고려하여 제작하였다. 완성된 mesh의 총 노드 수와 요소 수는 24,815와 47,520개이다.

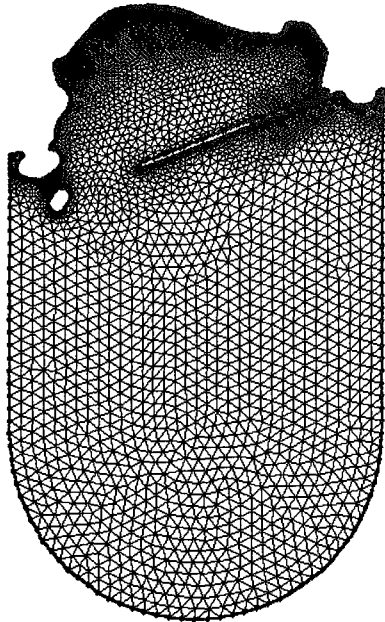


Fig. 6. FEM mesh for simulations (generated by SMS7.0)

5.2 모형 시뮬레이션

프라피룬 태풍이 소흑산도에 내습하여 발생한 피해는 다음과 같다. 방파제의 두부가 64 m 유실되었다. 항입구부의 집중된 파랑에 의해 피복재(T.T.P) 이탈하고 이에 따라 채부 사석 및 상치 콘크리트의 전도 및 붕괴가 일어났다. 또한 제간부의 배면 및 피복재가 436 m 파손되었다. 내항측에는 방파제를 넘어온 파랑의 충격에 의해 피복재(X-block) 및 내부 사석의 유실, 배면콘크리트 침하 및 붕락되었고 외항측에는 고 파랑에 의한 T.T.P 붕락 및 조위 변동 구간이 파손되었다(Fig. 7~9).

모형 시뮬레이션에 입력한 해파 정보는 표 2에 나타나 있는 것과 같다. 파향은 동쪽에서부터 반시계 방향으로 회전한 각으로 설정된다. 또한 시뮬레이션한 결과는 Fig. 10, 11에 나타내었다. Code 1은 정남에서 파가 입사하는 경우로 소흑산도 방파제 외항측에 9 m 이상의 진폭을 갖는 해파가 계산되었고 내항에도 진폭이 1 m 내외로 산정되어 있었다. Code 2



Fig. 7. Damage of T.T.P



Fig. 8. Loss of poured concrete and T.T.P

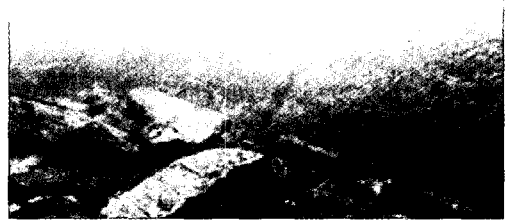


Fig. 9. Damaged armor rock and T.T.P

Table 2. Incident wave data

Code	Wave direction (deg)	Wave amplitude (m)	Period (sec)
1	90	5.5	15.0
2	100		
3	67.5		
4	112.5		

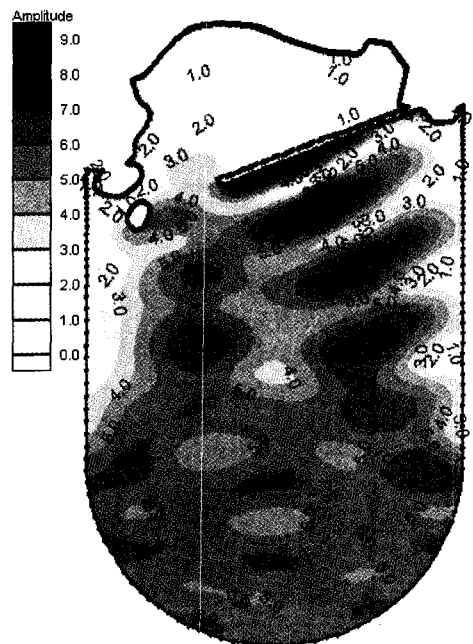


Fig. 7(a). Amplitude (wave direction : S)

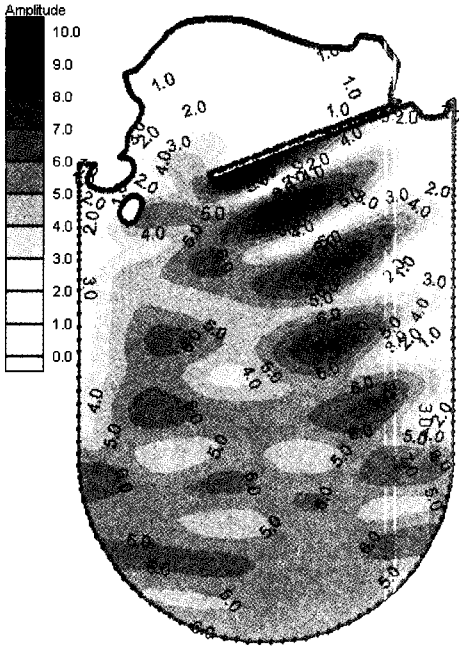


Fig. 7(b). Amplitude (wave direction : S10°E)

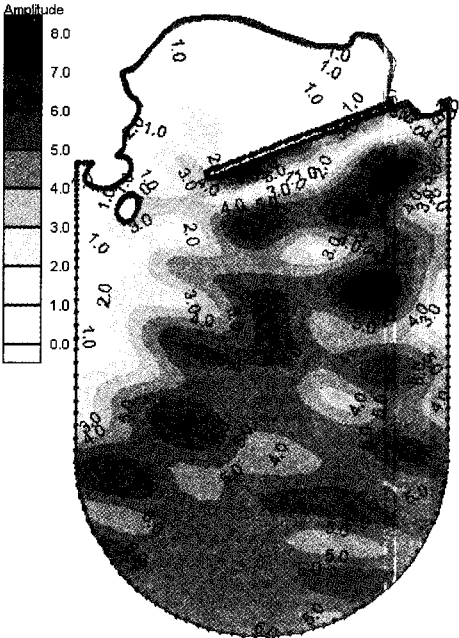


Fig. 7(c). Amplitude (wave direction : SSW)

는 파향을 100°(S10°E)로 설정하여 시뮬레이션을 하였는데 방파제에는 최고 10m 이상의 진폭을 갖는 파가 산정되었고 항입구에는 Code 1 보다 큰 진폭의 4 m 이상이 계산되었다. Code 3 는 파향이 SSW

로 입사하는 경우인데 방파제의 외측부에는 Code 1 2보다 작은 7m의 진폭이 산정되었고 항입구 부분에서도 진폭이 3m 정도로 작게 계산되었다. Code 4는 파향이 SSE인 경우로 Code 2보다 더 동쪽으로 회전하여 파가 입사한다. 이 시뮬레이션의 수행 결과, 방파제의 외측부에는 9m 이상의 진폭을 갖는 파가 산정되어 Code 1과 유사한 크기로 산출되었지만 항입구 부분에는 5m 이상으로 더 크게 계산되었다. 또한 녹점에는 8m 이상의 진폭을 갖는 높은 파가 산정되었다.

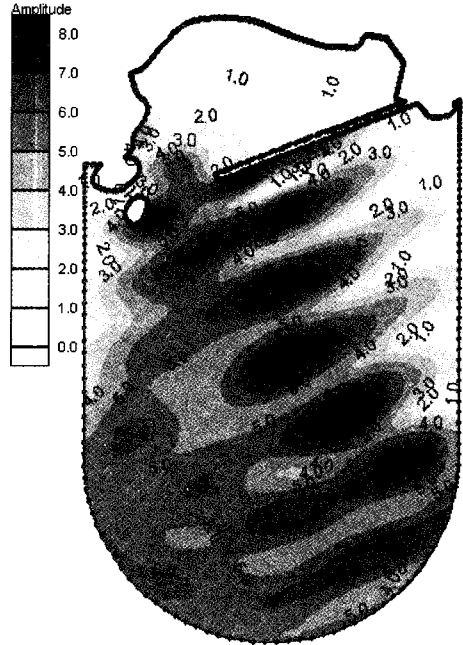


Fig. 7(d). Amplitude (wave direction : SSE)

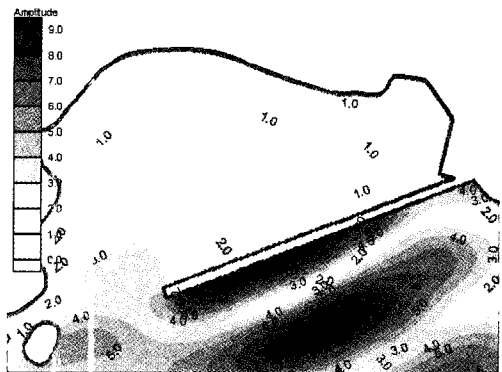


Fig. 8(a). Amplitude (wave direction : S)



Fig. 8(b). Amplitude (wave direction : S10°E)

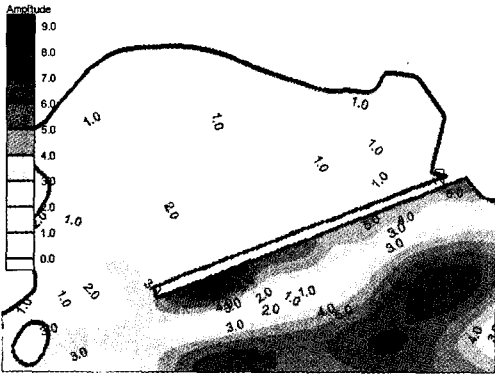


Fig. 8(c). Amplitude (wave direction : SSW)

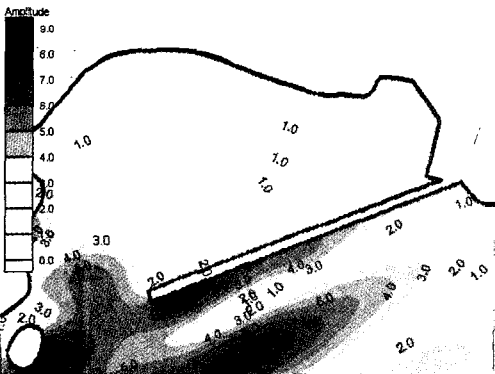


Fig. 8(d). Amplitude (wave direction : SSE)

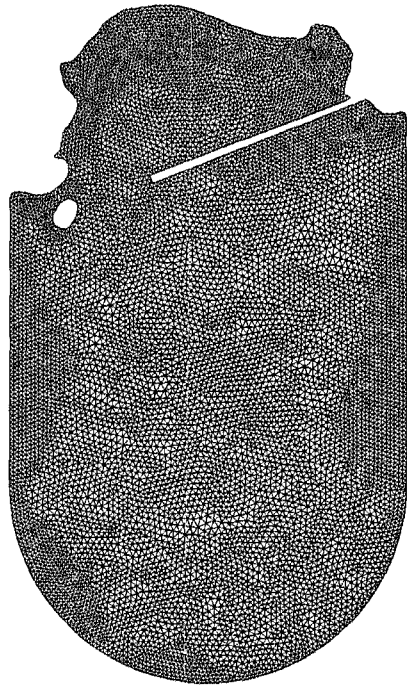


Fig. 9. FEM mesh (generated by FEMEditor)

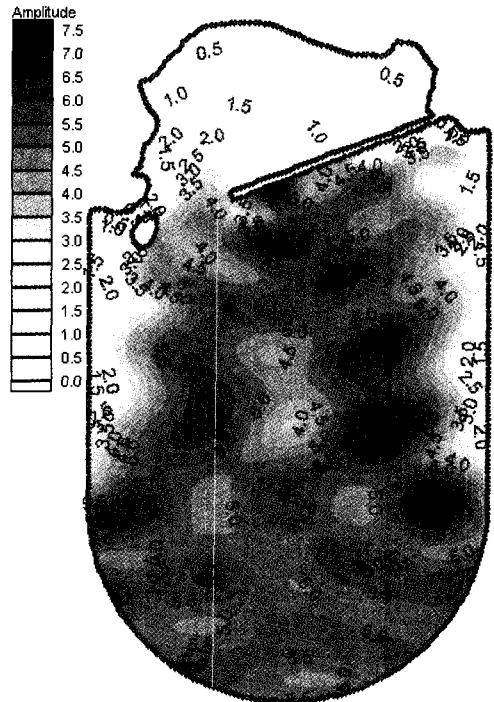


Fig. 10(a). Amplitude (wave direction : S)

6. 토의 및 결과

소혹산도 어항에 나타나는 파랑의 분포를 산정하기 위해 유한요소 해파변형모형을 이용하였다. 소혹산도 어항에 적용하기 전에 간단한 구형항만에 적용하여 실험하여 해파의 진폭 및 위상의 분포를 산정하였다. 소혹산도 어항에 적용하기 위해 필요한 유한요소 체계를 SMS 를 이용, 수심과 파장(한 파장당 15 개 정도의 요소가 포함되도록 함)을 고려

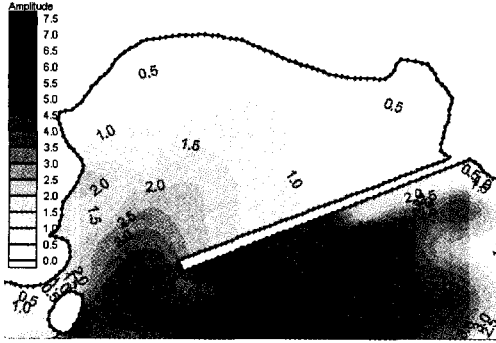


Fig. 10(b). Amplitude (wave direction : S)

하여 제작하였다. Fig. 9 에는 FEMEditor 에서 제작한 격자를 나타내었고 Fig. 10 에는 생성된 격자에서의 산정결과를 나타내었다. SMS 에서 생성한 격자로 산정한 결과(Fig. 7(a), 8(a))와 비교해 보면 항입구부에서의 진폭의 크기는 3~4 m 정도로 유사하게 계산되었다. 하지만 방파제 두부의 진폭은 6 m 정도로 SMS 에서 생성한 격자의 결과(9 m)와 많은 차이를 나타내었다. 파향에 따른 해파의 진폭 분포에 대해 몇 가지 경우의 수치실험을 통해서 알아보았다. 태풍 프라피룬이 소흑산도에 내습할 때 소흑산도에서는 파랑 관측소가 없어 자세한 비료는 불가능하였다. 악기상시에 항만 근처의 해파관측결과가 있는 상황에서 철저한 비교 평가가 수행되어야 모형의 신뢰성이 입증될 수 있는데 잠정적으로는 외국항만의 경우는 검증되었으므로 현업에 사용 가능한 모형으로 사료된다.

참고문헌

- Berkhoff, J.C.W., 1972. Computation of Combined Refraction Diffraction, *Proc. 13th International Coastal Engineering Conference*, 741-790.
- Berkhoff, J.C.W., 1976. Mathematical Models for Simple Harmonic Linear Water Waves Wave Refraction and Diffraction, Publ. 163, Delft Hydraulics Laboratory.
- Chen, H.S., 1986. Effects of Bottom Friction and Boundary Absorption on Water Wave Scattering, *Applied Ocean Research*, 8, 99-104.
- Dally, W.R., Dean, R.G. and Dalrymple, R.A., 1985. Wave Height Variation across beaches of arbitrary profile, *J. Geophys. Research*, 90, 1917-1927.
- Dalrymple, R.A., Kirby, J.T. and Hwang, P.A., 1984. Wave Diffraction due to areas of high energy dissipation, *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, 110, 67-79.
- Demirbilek, Z. and Webster, W.C., 1998. A Shallow-water Wave Theory Based on Green-

Naghdi Formulation, *Handbook of Coastal Engr.*, 4 (ed. Herbich, J.B.), Gulf Publ. Co. (to appear).

Ippen, A.T. and Goda, Y., 1963. Wave Induced Oscillations in Harbors: The Solution for a Rectangular Harbor Connected to the Open-Sea, Hydrodynamic Laboratory Report No. 59, Massachusetts Institute of Technology.

Lee, J.J., 1969. Wave Induced Oscillations in Harbors of Arbitrary Shape, Report No. KH-20, W.M. Keck Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, p.266.

Panchang, V.G., and Demirbilek, Z., 1998. CGWAVE: A Coastal Surface Water Wave Model of the Mild Slope Equation, U.S.Army Waterways Experiment Station, Technical Report CHL-98-26, September, 1998, p. 118.