

독도 인근해역에서의 천해파

황연호* · 전인식* · 오병철** · 심재설**

*건국대학교 토목공학과, **한국해양연구원

Shallow Water Waves around Tokdo

YEON-HO HWANG*, IN-SIK CHUN*, BYUNG-CHEOL OH** AND JAE-SHUL SIM**

*Konkuk University, Civil Engineering, Seoul 143-701, Korea

**Korea Ocean Research & Development Institute, Ansan 425-744, Korea

KEY WORDS: Tokdo 독도, extended mild slope equation 확장형 완경사방정식, wave breaking 쇄파, wave propagation 파랑변형

Abstract: For the effective development or preservation of Tokdo, the natural environments in the ambient sea area should be well investigated. The wave deformations and wave breaking in the vicinity have much affected the bottom morphology of Tokdo as well as its ecological environment. The present study investigates the wave deformations and wave breaking through a numerical model. The final goal is to provide the fundamental wave data for the effective development or preservation of Tokdo in future. The extended mild slope equation was applied to Tokdo sea area for three different deep water wave conditions (S, SSE, NNE directions). The results showed that for the S and SSE directions the wave heights in the area between the east island and the west island were very low with the level of 1 ~ 2 m, but for the NNE direction they appeared pretty high with 3 ~ 4 m. In the sea area near the northwest of west island, the wave heights were low to be 1 ~ 3 m for all three directions of deep water wave.

1. 서론

독도는 국가의 최동단에 위치한 섬으로서 오래 전부터 수산자원의 보고로 인식되어 왔으며 수중 생태계가 잘 보존되어 있어 최근에는 해양과학조사의 중요한 입지로 부각되고 있다. 또한 독도 주변해역이 완만한 지형을 이루고 있으며 동·서도간을 포함하여 수심 50 m이하의 수역이 상당부분을 차지하고 있음을 감안하면 심해파가 독도에 접근하면서 현저한 천해변형이 발생할 수 있음을 충분히 예상할 수 있다.

파의 천해변형은 일반적으로 Berkhoff (1972)가 제시한 완경사방정식 (이하 MSE로 칭함)을 이용하여 해석하여 왔으나 Massel(1993)이 경사도 1 : 3 이상의 비교적 급사

면에도 적용할 수 있는 확장형 완경사방정식 (이하 EMSE로 칭함)을 제시하였다. 현재까지 EMSE의 삼차원적 적용성에 대한 구체적 연구는 발견되지 않으나 본 연구에서는 다수의 국소적 급경사들이 존재하는 독도주변의 지형을 감안하여 EMSE의 적용을 시도하였다. EMSE는 천해에서의 쇄파 에너지 감쇠를 고려한 시간의존 형태의 완경사방정식 (Nishimura, et al., 1983; Copeland, 1985)을 확장하여 구성하였다. 삼차원적 적용성은 부분적이긴 하나 천퇴에서의 파랑변형에 대한 수치해석 결과와 그리고 수중압초부 주변에서의 파랑변형에 대한 기존의 수리모형실험의 결과들을 이용하여 검증하였다. 최종적으로, 세계의 심해파 제원의 각각에 대하여 EMSE를 적용하여 독도 인근에서 형성되는 천해변형 및 파고분포를 고찰하였다 (한국해양연구원, 2000).

2. 시간의존 확장형 환경사방정식의 이론

본 연구에서는 지배방정식으로 다음과 같은 확장형 시간의존 환경사방정식계를 이용하였다.

$$\frac{\partial \vec{Q}}{\partial t} + c^2 \nabla \zeta = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{n} \nabla \cdot (n \vec{Q}) + \frac{c}{c_g} \left\{ \frac{c_g}{c} - R_1 (\nabla h)^2 - R_2 \nabla^2 h \right\} \frac{\partial \zeta}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

기존의 환경사방정식은 식 (2)에서 $R_1 = R_2 = 0$ 인 경우에 해당한다. 쇄파가 발생하는 경우는 식 (1)대신에 쇄파감쇠 계수 ϵ_d 를 이용한 다음과 같은 식을 사용한다.

$$\frac{\partial \vec{Q}}{\partial t} + c^2 \nabla \zeta + \epsilon_d \vec{Q} = 0 \quad (3)$$

ϵ_d 와 에너지 보존식상의 쇄파감쇠율 Φ_d 의 관계는 다음과 같다.

$$\Delta \cdot (c_g E) = -\Phi_d = -\epsilon_d n E \quad (4)$$

여기서, Φ_d 에 대한 기존의 연구는 주로 실험적 연구에 치중되어 왔으며, 쇄파감쇠계수 ϵ_d 에 대해서 Le Mehaute (1963)가 제시한 다음과 같은 보어 (bore) 유사이론 결과를 이용하였다.

$$\Phi_d = n E \epsilon_d = \frac{\lambda \rho g^{3/2} k H^3}{8 \pi h^{1/2}} \quad (5)$$

여기서, $\lambda = O(1)$ 의 실험계수, $k =$ 파수, $H =$ 파고, $h =$ 평균수심이다.

또한, 최초쇄파발생여부를 $x = (H/h)_b = 0.78$ 로 취하였고 쇄파감쇠율을 다음과 같이 적용하였다.

$$H/h > x \text{ 또는 기쇄파: } \Phi_d \text{ 적용} \quad (6)$$

$$H/h < 0.4 \text{ 또는 비쇄파: } \Phi_d = 0$$

3. 확장형 환경사방정식(EMSL)의 삼차원 적용성 검토

3.1 천퇴에서의 파랑전파

계산영역은 Fig. 1에서와 같이 30 m × 30 m이며 반

경 5 m를 갖는 천퇴를 영역의 중앙에 위치시켰다. 입사파 조건은 규칙파로서 $H = 0.2$ m, $T = 0.8, 1.2, 1.6$ 초로 하였으며 수심은 50 cm이고 천퇴의 기부는 경사도 1 : 2의 급경사로 하였다. 계산 격자간격은 $\Delta x, \Delta y$ 를 공히 0.303 m로 하였으며 시간간격은 한 주기 당 70번의 반복계산을 수행할 수 있도록 취했다. 총 계산시간은 70 주기로 하였다. Fig. 2는 천퇴를 지나 $Y = 17.5$ 의 횡선에 따라 형성되는 파고변화에 대하여 MSE와 EMSE의 결과를 비교한 것이다. 전반적으로 정량적 유사성을 보이나 EMSE의 결과가 MSE에 비하여 해의 진동형태가 더 민감하게 나타났다. 또한, 천퇴 배후의 저파고대에서는 EMSE가 MSE보다 다소 큰 파고를 보이고 있다. 또한 타 주기 (0.8초, 1.6초)에 대한 파고분포결과도 주기가 작을수록 MSE와 EMSE는 거의 동일한 결과를 주고 있으나 주기가 길어질수록 이들의 차이는 증가하는 것으로 나타났다. 이는 주기가 증가할수록 수심의 영향이 EMSE에서 더 민감하게 반영되기 때문이다.

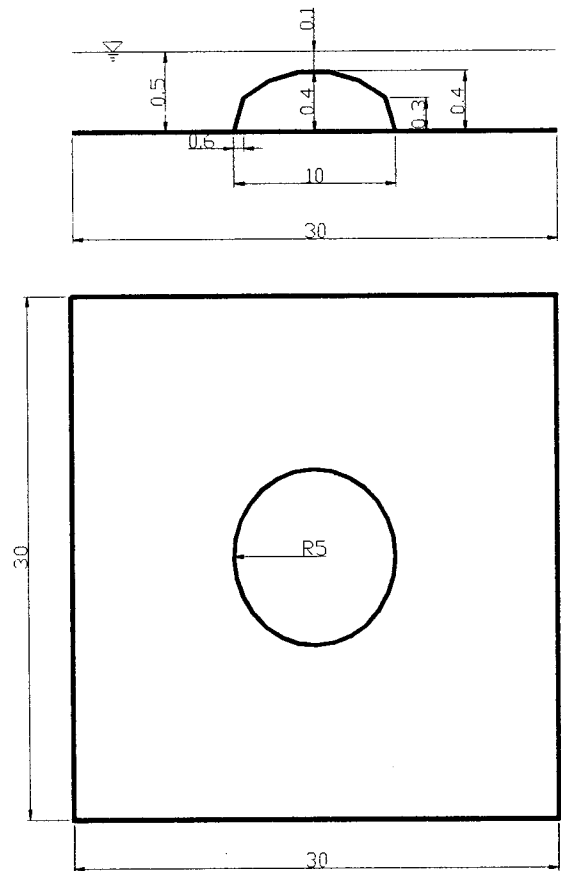


Fig. 1 Geometry of shoal (unit : m)

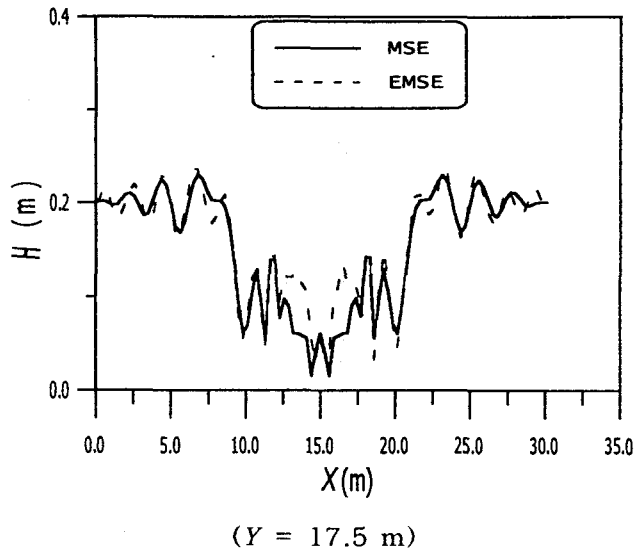


Fig. 2 Comparison of wave heights from MSE and EMSE along the lines of constant Y values

3.2 삼차원 수리모형실험 결과와의 비교

MSE와 EMSE의 정확도를 파악하기 위하여 기 수행된 수리모형실험 (한국해양연구원, 1999)의 파고계측 결과를 계산결과와 비교하였다. 모형실험의 대상해역은 등수심도를 갖는 수중암초로서 주변수심은 49 cm이고 암초 정상부에서의 수심은 정수면 하 4 cm이다. 모형실험 지형의 동남부는 수평거리 약 0.7 m 내에서 1 : 7의 경사를, 정상부는 수평거리 약 1.0 m 내에서 1 : 3.4의 경사를 이루고 있다. 입사파고는 20.5 cm, 주기는 1.37초이며 입사파향은 NNW로 하였다. 파고는 1 m 간격으로 총 323개의 측정에서 계측하였다.

Fig. 3은 수리모형실험의 계측결과를, Fig. 4와 5는 각각 MSE와 EMSE의 계산파고 분포를 보여준다. 이들은 공히 유사한 모양이며 정상부에서의 쇄파에 의한 파고감소 현상을 보여준다. 그러나, 정상부 너머에서의 파고 분포를 보면 계측파고는 저 파고대가 넓게 분포되어 있는 반면, 계산파고는 MSE와 EMSE 공히 두 개의 띠 모양의 저파고대의 사이에 고파고대가 위치한다. 이의 원인에 대한 추가적 연구가 필요할 것으로 판단된다. 일단은 MSE와 EMSE는 비슷한 결과를 줄 수 있으며 전반적으로 후자가 전자에 비하여 다소 높은 파고분포를 보이고 있다.

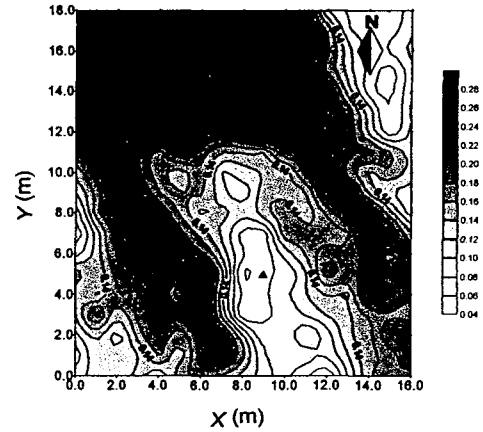


Fig. 3 Wave height distribution (measured)

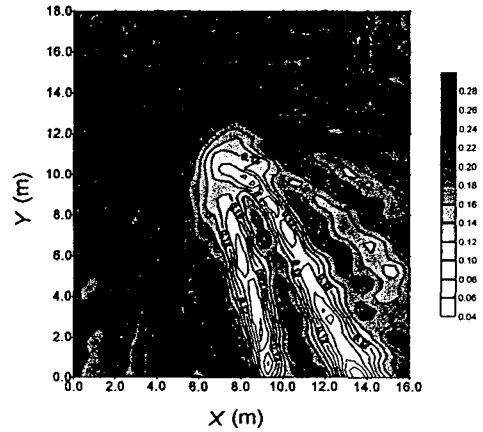


Fig. 4 Wave height distribution (calculated ; MSE)

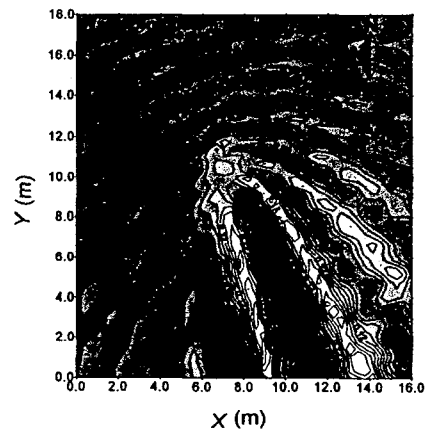


Fig. 5 Wave height distribution (calculated ; EMSE)

4. 독도해역의 파고분포

독도해역에 대해서 확장형 환경사방정식을 적용하여 주변 파고분포를 계산하였다. 독도해역의 심해설계파는 Table 1과 같으며 한국해양연구원 (2000)에 의하여 풍파추산방법을 이용하여 산출되었다. 상기 심해파를 각 방향별로 입사하여 EMSE에 대한 수치해석을 수행하였다.

독도근방의 파고분포를 확대하여 각 심해파향별로 Fig. 6~8에 도시하였다. S파향과 SSE 파향에서는 동도와 서도사이에 1 ~ 2 m의 분포를 보이는 반면 NNE 파향에서는 파고가 3 ~ 4 m로 다소 높게 발생함을 볼 수 있다. 서도의 북서 부위는 모든 방향에서 공히 파고가 1 ~ 3 m로 비교적 작게 형성되었다. NNE 파향에서 동 부위의 작은 파고분포는 독도 전면에서 횡으로 비교적 길게 형성되는 쇄파대에 기인한다 (한국해양연구원, 2000). 반면, 동도와 서도사이 공간의 상부는 모든 파향 공히 파고가 5 ~ 7 m로 다소 높게 형성되어 있다. Fig. 9는 S 파향에 대한 삼차원 수면변위를 보여준다.

Table 1 Deep water wave conditions of Tokdo

파향	파고 (m)	주기 (s)
S	7.6	11.0
SSE	7.7	11.0
NNE	8.6	13.0

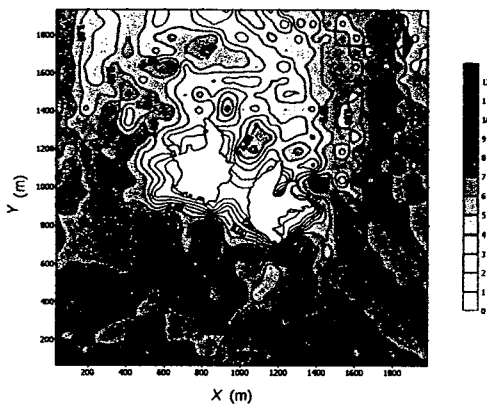


Fig. 6 Close-up of wave height distribution around Tokdo (S direction)

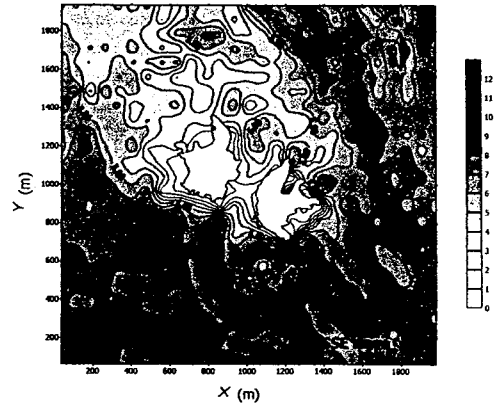


Fig. 7 Close-up of wave height distribution around Tokdo (SSE direction)

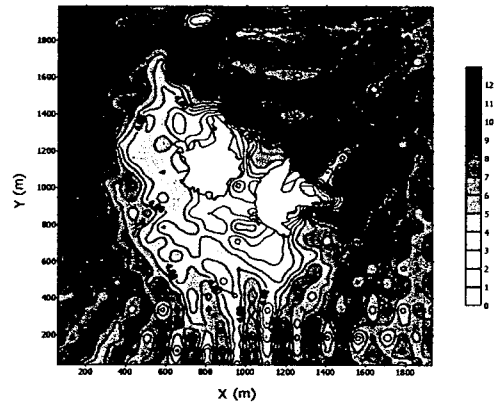


Fig. 8 Close-up of wave height distribution around Tokdo (NNE direction)

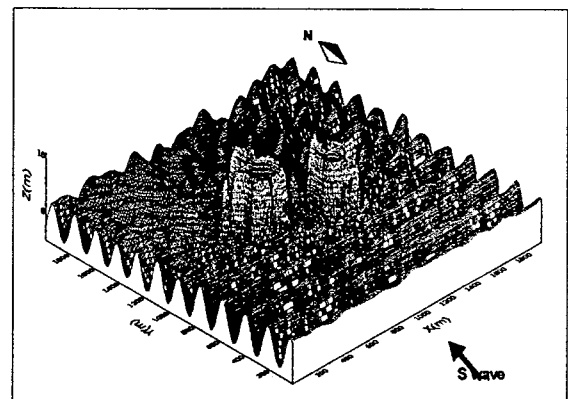


Fig. 9 Three dimensional surface plot of wave propagation (S direction)

5. 결론

해안역 파랑전파를 해석하기 위한 기존의 환경사방정식은 한 파장내의 수심변화가 비교적 작다는 가정을 내포하고 있다. 확장형 환경사방정식은 수심변화에 대한 이차 미분항을 포함한 식으로서 보통의 환경사방정식보다 수심변화의 효과를 보다 민감하게 반영할 수 있다. 본 연구에서는 일차적으로 확장형 환경사방정식 모델의 삼차원 적용성을 검토한 다음, 이를 독도해역에 적용하여 인근 해역의 세부적인 파고분포를 파악하였다. 또한, 천해역 쇄파에 의하여 발생하는 에너지감쇠를 모의하기 위하여 기존의 여러 기법들의 성능을 검토하였다. 모델의 적용성 검토를 위해서는 수중 압초에 대한 기존의 삼차원 수리모형실험의 계측결과를 이용하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다. 해안역 파랑전파를 해석하기 위한 기존의 환경사방정식은 한 파장내의 수심변화가 비교적 작다는 가정을 내포하고 있다. 확장형 환경사방정식은 수심변화에 대한 이차 미분항을 포함한 식으로서 보통의 환경사방정식보다 수심변화의 효과를 보다 민감하게 반영할 수 있다. 본 연구에서는 일차적으로 확장형 환경사방정식 모델의 삼차원 적용성을 검토한 다음, 이를 독도해역에 적용하여 인근 해역의 세부적인 파고분포를 파악하였다. 또한, 천해역 쇄파에 의하여 발생하는 에너지 감쇠를 모의하기 위하여 기존의 여러 기법들의 성능을 검토하였다. 모델의 적용성 검토를 위해서는 수중 압초에 대한 기존의 삼차원 수리모형실험의 계측결과를 이용하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 천해역 쇄파 에너지 감쇠를 모의하기 위한 기존의 보어유사 (Bore analogy) 기법은 타 기법들과는 달리 해저 경사도의 영향을 포함하지 않고 있으며 보정계수를 적절히 선택하여 사용하면 해저경사와 관계없이 쇄파 이후의 파고변화를 비교적 정확하게 재현할 수 있다.
- 천퇴 파랑변형에 대한 모의실험 결과, 환경사방정식과 확장형 환경사방정식의 차이는 동일 지형에서 주기가 커질수록 증가한다. 수중 압초에 확장형 환경사방정식을 적용한 결과, 계산 파고분포는 수리모형실험의 계측 파고분포와 비교적 잘 일치하였다.
- 확장형 환경사방정식을 독도해역에 적용하여 세 심해파 제원에 대한 파랑전파를 모의한 결과, S, SSE 파향은 동도와 서도사이에 파고가 1 ~ 2 m로 비교적 작게 나타난 반면, NNE 파향은 3 ~ 4 m로 높게 형성된다. 서도의 북서 인근해역은 파향에 관계없이 파

고가 1 ~ 3 m로 작게 나타났다.

참 고 문 헌

- 한국해양연구원, 1999. '99 이어도 종합해양과학기지 구축 사업 보고서. BSPM 99020-00-1209-2.
- 한국해양연구원, 2000. 독도 생태계 등 기초조사 연구 최종보고서. BSPM 99045-00-1282-6.
- Copeland, G. J. M., 1985. *A numerical model for the propagation of short gravity waves and the resulting circulation around nearshore structures*, Doctoral thesis. University of Liverpool.
- Horikawa, K. and Kuo, C.T., 1966. A study on wave transformation inside surf zone, *Proc. 10th Coastal Eng. Conf.*, ASCE, pp. 217-233.
- Kirby, J.T. and Dalrymple, R.A., 1984. Modelling waves in surfzones and around islands, *J. Waterw. Coastal Eng. Harbours. Div.*, ASCE, vol. 112, no. 1, pp. 78 - 93.
- Le Mehaute, B., 1963. On non-saturated breakers and the wave run-up, *Proc. 8th Int. Conf. on Coastal Eng.*, ASCE, pp.77-92.
- Massel, S.R., 1993. Extended refraction-diffraction equation for surface waves, *Coastal Eng.*, vol. 19, pp. 97-126.
- Nishmura, H., Maruyama, K. and Hiraguchi, H., 1983. Wave field analysis by finite difference method, *Proc. 30th Japanese Conf. on Coastal Eng.*, JSCE, pp. 123-127 (in Japanese).
- Suh, K., Lee, C. and Park, W., 1997. Time-dependent equations for wave propagation on rapidly varying topography, *Coastal Eng.*, vol. 32, pp. 91-117.
- Watanabe, A. and Maruyama, K., 1986. Numerical modeling of nearshore wave field under combined refraction, diffraction and breaking, *Coastal Eng. in Japan*, vol. 29, pp. 19-39.