

천해역에서의 파랑변형해석 모형

A Time-Dependent Numerical WaveDeformation Model Around Coastal Sea

이 동 수* · 최 혁 진*

1. 서 론

해안 및 항만의 개발이 국가적차원에서 대규모로 개발되고 있는 현시점에서 계획과 설계의 가장 기본적인 외력으로 작용하는 천해의 파랑을 해석하는 것은 무엇보다 중요하며, 구조물 건설후 각종 재해로부터 안전하게 시설물을 보호할 수 있는 요건이 된다.

본 연구에서는 항만구조물 주변 및 항내정온도 해석 등에 적용성이 뛰어난 쌍곡선형 방정식을 이용하여 수치모형을 개발하였다. 기본방정식은 1986년 Watanabe and Maruyama의 비정상 환경사 방정식을 근간으로 하였으며, 수치해석 방법은 유한차분(F.D.M) 양해법으로 공간 및 시간에 대해 Staggered mesh 격자체계를 이용하였다. 연안해역의 에너지 감쇠효과를 보다 정도높게 모형내에 재현하기 위하여 본 연구에서 사용한 기본방정식에 1989년 Yoo의 마찰 감쇠효과를 부가하였으며, 쇄파에 의한 파랑에너지 감쇠도 함께 고려하였다. 또한 실제 해역의 수심이 불규칙하고 다소 급경사로 이루어져 있는점을 감안하여 비선형 효과를 모형내에 재현하고자 1984년 Dingemans의 경험적 비선형 분산관계식을 이용하였으며, 또한 측면입사 경계조건을 개선하여 모형의 정확도를 높이고자 하였다. 본 연구에서 개발된 모형의 적용성과 타당성을 검토하기 위하여 기존의 수리모형실험을 동일조건하에서 재현하였으며, 이론적 해석이 가능한 해역을 대상으로 파랑의 변화를 비교, 검토하여 모형의 신뢰도를 검증하였다.

2. 기본방정식 및 해석방법

유체의 연속방정식과 운동방정식으로부터 연직방향 분포 함수를 곱하여 저면에서 수표면까지 적분하고 저면이 환경사라는 조건으로부터 식(1)과 같은 쌍곡선형 방정식을 얻을수 있다.

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} = \left(\frac{1}{n}\right) \nabla \cdot (nC^2 \nabla \eta) \quad (1)$$

Nishimura 등(1983)은 식(1)을 한쌍의 1계 선형 연립방정식으로 다음과 같이 나타내었다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial t} + C^2 \nabla \eta &= 0 \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{n} \nabla \cdot (nQ) &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

* (주) 대영엔지니어링 부설기술연구소

여기서 Q 는 선유량 벡터로 $Q_x = \int_{-h}^{\eta} u dz$, $Q_y = \int_{-h}^{\eta} v dz$ 이다.

한편 Watanabe and Maruyama는 천수변형을 보다 엄밀하게 표현하기 위해 伊藤·谷本(1972)의 식을 기초로 수심변화의 영향을 고려하여 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{C^2}{n} \nabla(n\eta) &= 0 \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot Q &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

본 연구에서는 식(3)을 근간으로 하였으며, 식(3)에 저면마찰과 쇄파감쇠에 의한 에너지 감쇠항을 부가하여 천해역의 파랑변형을 계산하는 기본방정식으로 사용하였다. 쇄파판정은 Goda의 쇄파지표를 사용하였고, 에너지 감쇠항은 Yoo and O'Connor의 마찰 감쇠식(F_f)과 Watanabe and Maruyama의 쇄파 감쇠식(F_d)을 사용하였으며 다음과 같다.

$$F_f = \frac{8\pi}{3g} \left(\frac{\sigma}{\sinh kh} \right)^3 C_f \quad (4)$$

여기서 C_f 는 마찰계수, σ 는 절대 각 주파수이다.

$$F_d = \alpha_D \tan \beta \sqrt{(g/h) (\hat{Q}/Q_r - 1)} \quad (5)$$

여기서 $\hat{Q} = \sqrt{\hat{Q}_x^2 + \hat{Q}_y^2}$, $Q_r = 0.25\sqrt{gh^3} \hat{Q}_x$, \hat{Q}_y 는 x, y 방향 선유량 진폭,

$\alpha_D = 2.5 \tan \beta$ 는 쇄파대의 평균해저경사이다.

반사 구조물 주위의 파랑변형을 고려하기 위하여 파고는 최대 및 최소 수면변위의 평균으로, 파향은 최대 선유량 성분의 합성벡터로 파장 한주기 마다 각각 구하였다.

수치해석을 위하여 기본방정식 식(3)을 유한차분 양해법으로 차분화하며, 이때 선유량 Q_x, Q_y 성분은 공간적으로 반격자, 수면변위 η 는 공간적으로는 반격자, 시간적으로 반계산시간 간격 어긋나게 계산하는 Staggered mesh 격자체계를 구성하였다. 또한 수심에 따른 파장의 변화를 고려하여 해역별로 격자간격을 변화시킬 수 있는 가변격자체계로 구성하였다.

3. 모형의 검증

본 연구에서 개발된 모형의 타당성과 범용성을 검토하기 위하여 기존의 수리모형실험이 행하여졌던 경우는 수리모형실험과 동일조건으로, 이론해가 존재하는 경우는 이론해와 각각 비교, 검토하였다. Table 1은 본 모형의 검증을 위하여 수행한 실험조건을 제시한 것이다.

반사파 재현특성을 검토하기 위한 Case 1은 A와 B간의 거리가 290m로 A에서 B까지 전파 전달시간은 29초가 되며, 무반사 및 완전반사에 대하여 반사경계와 투과 경계의 반사파를 검토하였으며 결과는 Fig. 1과 같다. Fig. 2는 Case 2의 원형 천퇴 실험결과를 나타낸 것으로 伊藤·谷本の 수리모형 실험결과와 비교한 것이며 모두 타당한 결과를 나타냄을 알 수 있다. Berkhoff가 수행한 타원형 천퇴실험은 파랑의 비선형효과가 탁월하게 나타날 수 있는 실험으로 선형분산관계식(L.D)과 비선형분산관계식(N.L.D)을 사용하여 본 모형에 적용하였다. Fig. 3에 의하면 Dingemans가 제시한 경험적 비선형분산관계식을 이용하는 것이 천퇴주위의 비선형성을 더욱 잘 재현함을 알 수 있다. 측면입사경계의 무반사 경계처리를 검토하기 위해 Case 4와 같이 일정수심 정사각형 해역에 45°의 입사파향을 가지는 파랑을 재

Table 1. Experiment conditions of the numerical model

Experiment Case	1	2	3	4	5	6	7
Previous Physical Model	Analytic	伊藤・谷本 (1972)	Berkhoff (1982)	—	Analytic	Watanabe Maruyama (1986)	Isobe (1986)
Model Configuration	Rectangular Basin	Circular Shoal	Elliptic Shoal	Square Basin	Uniform Slope	Detached Breakwater	Model Harbour
Domain (m)	330×120	3.2×2.4	24×20	400×400	6×3	8×5	9×9
Depth	12m	5~15cm	0~45cm	15m	0~12cm	0~10cm	0~40cm
Grid	5.0m	5cm	10cm	5m	5cm	5cm	5cm
H(Height)	2.0m	1.0cm	4.64cm	1.0m	2.0cm	2.0cm	9.1cm
T(Period)	10.0sec	0.51095sec	1.0sec	10.0sec	1.2sec	1.2sec	0.83sec
θ (Direction)	0.0°	0.0°	0.0°	45.0°	60.0°	0.0°	18.0°
Δt (sec)	0.5	0.01	0.04	0.1	0.02	0.02	0.01
Reflection Coefficient	0.0, 0.5, 1.0	0.0	0.0	0.0, 1.0	0.0	0.1, 1.0	0.1, 1.0

현하였다. 무반사인 경우에 파고는 전영역에 걸쳐 입사파와 동일하게 나타났으며, 완전반사인 경우는 Fig. 4와 같이 외해 및 측면입사경계의 파고분포와 벡터도가 대칭으로 산출되었다. 식(4)와 식(5)의 에너지 감쇠항을 검토하기 위해 일정한 해저경사와 사면각을 가지는 입사파를 Case 5의 조건으로 재현하였다. 입사파랑이 심해에서 파고 2.0cm, 입사각 60.0° 이므로 천해역으로 입사되어 천수 및 굴절변형에 의해 파고 1.53cm, 입사각 28.3° 로 변형된다. 해저 마찰계수를 0.0과 0.016으로 나누어 Fig. 5와 같이 이론적 해석해와 비교한 결과 $x=4.5m$ 의 쇄파점이 후 약간 크게 나타났다. Case 6은 중복파, 회절파 및 쇄파에 의한 변형을 동시에 고려하기 위하여 Watanabe and Maruyama의 이안제 수리모형실험을 수행, 비교한 것이다. Fig. 6은 x 축으로 대칭되는 절반만을 나타낸 것이며 계산된 파고가 수리실험 결과와 전반적으로 일치하는 경향이 있어 이안제 주변 파랑장의 중복 및 회절영향을 잘 재현하고 있음을 알 수 있다. Case 7은 임의 항만 개구부를 통해 회절되어 내습하는 파랑의 파고변화를 검증하기 위하여 Isobe의 수리모형실험과 동일한 조건으로 본 모형에 적용한 것이다. Fig. 7의 단면 B-B' 결과는 수리실험 결과와 비슷한 경향을 보이고 있으나 항내 침입파랑의 영향을 직접 받는 개구부 후면 부근에서는 수치실험결과가 약간 높은 파고분포를 나타내고 있다.

4. 결 론

심해에서 발달하여 천해역으로 입사되는 파랑의 특성을 해석하기 위하여 쌍곡선형 방정식을 이용한 유한차분 양해법으로 수치모델을 개발하였다. 항만구조물과 쇄파대 근처의 파랑 변형 및 입사, 반사 및 투과경계에 따른 본 모형의 적용성을 몇가지 실험에 의해 검증하였으며 타당한 결과를 나타내었다. 특히 수심 및 해저경사가 다소 불규칙한 해역에서는 비선형 분산관계식을 사용함이 타당함을 알 수 있었다. 본 연구로 개발된 모형은 천해역으로 입사된 파랑의 특성을 보다 정도 높게 재현하는 것으로 판단되며 현지 항만 및 연안구조물 주변의 적용성도 탁월한 것으로 사료된다.

5. 참고문헌

- Berkhoff, J.C.W., Booij, N. and Radder, A.C., 1982, Verification of numerical wave propagation models for simple harmonic linear water waves, Coastal Eng., Vol. 6, PP. 255-279.
- Dingemans, M.W., Stive, M.J.F., Kuik, A.J., Radder, A.C. and Booij, N., 1984, Field and laboratory verification of the wave propagation model CREDIZ, Proc. 19th Inter. Conf. Coastal Eng., PP. 1178-1191.
- Isobe, M., 1986, A parabolic refraction-diffraction equation in the ray-front coordinate system, Proc. 20th Int. Conf. Coastal Eng., PP. 306-317.
- Nishimura, H., Maruyama, K. and Hiraguchi, H., 1983, Wave analysis by direct numerical integration, Proc. 30th Japanese Conf. on Coastal Eng., PP. 123-127.
- Watanabe, A. and Maruyama, K., 1986, Numerical modeling of nearshore wave field under combined refraction, diffraction and breaking, Coastal Eng. in Japan, 29, PP. 19-39.
- Yoo, D., and O'Connor, B.A., 1987, Bed friction model of wave-current interacted flow, Proc. Coastal Hydrodynamics, ASCE, PP. 93-106.
- 伊藤喜行·谷本勝利, 1972. 波向線交差領域での波の屈折-數値波動解析法の應用(2), 第19回海溝論文集, PP. 325-329.
- 金仁澈·片宗根, 1995, 時間依存 緩傾斜方程式을 이용한 波浪變形 數値模型의 側方入射境界의 處理, 韓國海岸·海洋工學會誌, 第7卷 第2號, PP. 141-147.
- 이동수·김태인, 1995, 可變格子體系에 의한 海岸構造物 周邊의 波浪變形模型, 韓國海岸·海洋工學會誌 第7卷 第1號, PP. 1-11.

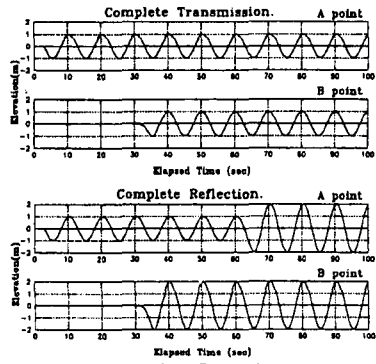
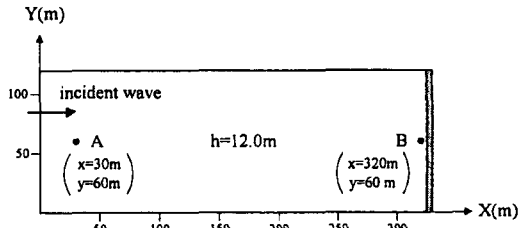


Fig. 1 Model configuration and time-series of elevation for Case 1

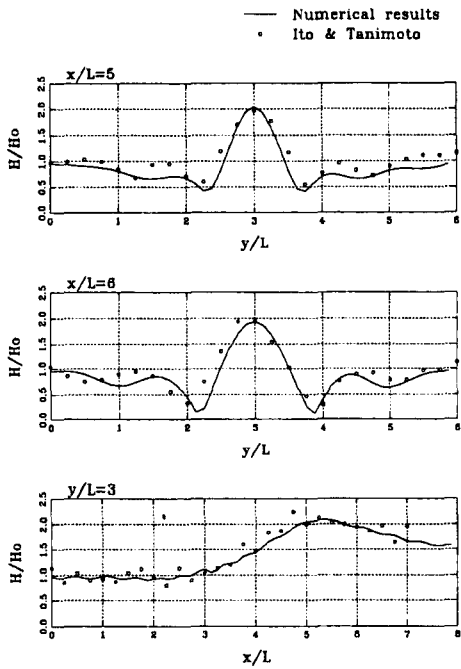


Fig. 2 Comparison of wave height ratio for Case 2

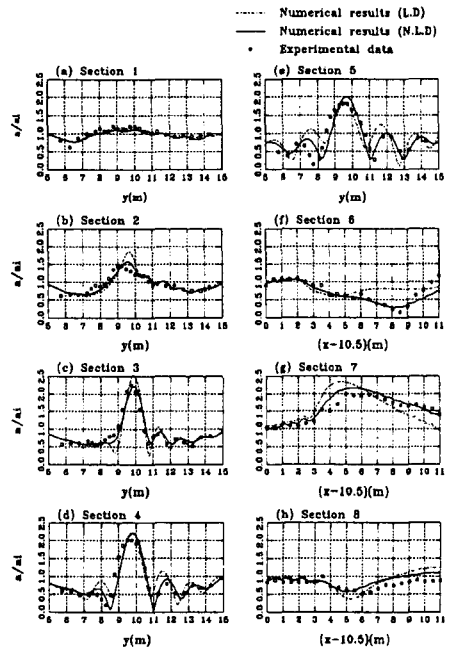


Fig. 3 Comparison of wave amplitude ratio for Case 3

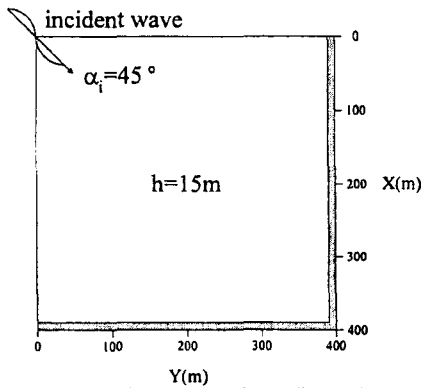
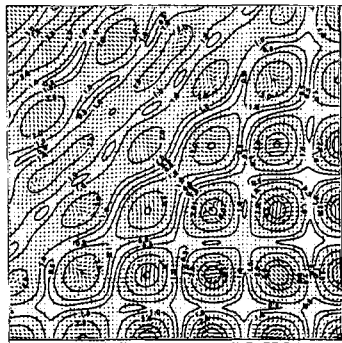


Fig. 4 Model configuration and wave distribution for Case 4



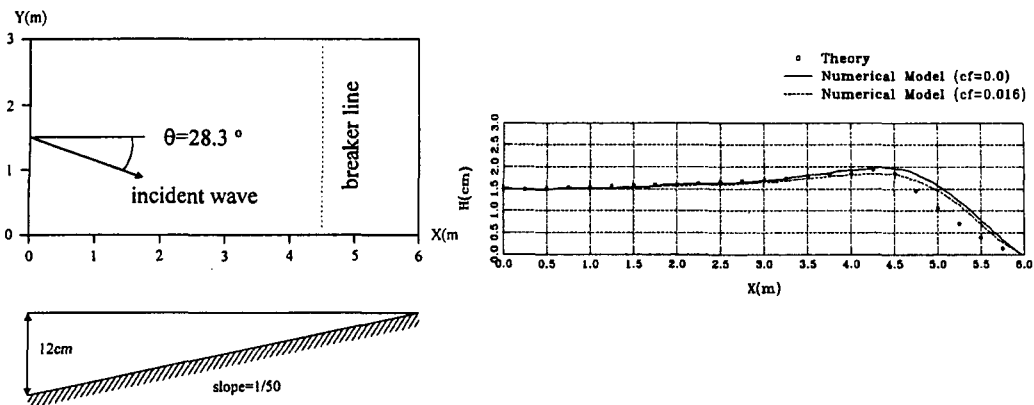


Fig. 5 Model configuration and wave height for Case 5

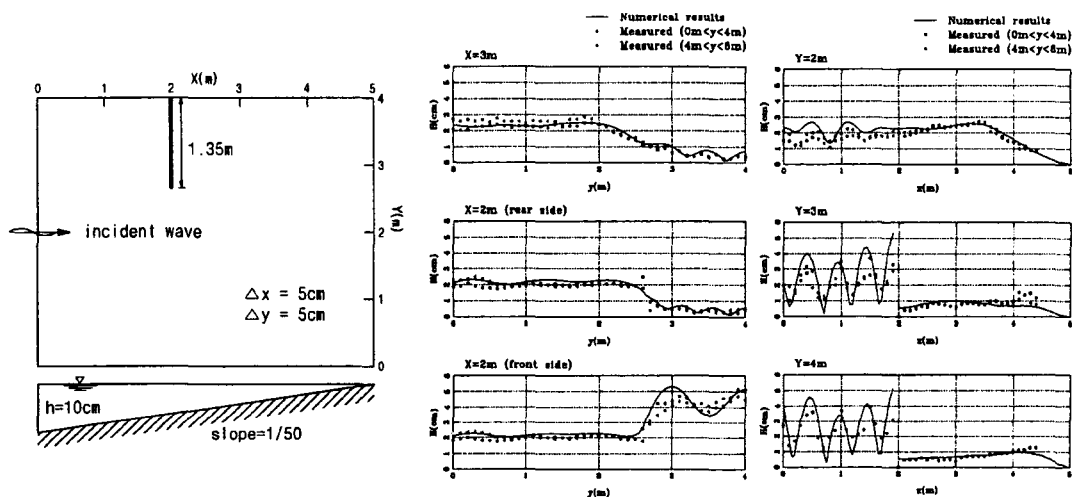


Fig. 6 Model configuration and wave height for Case 6

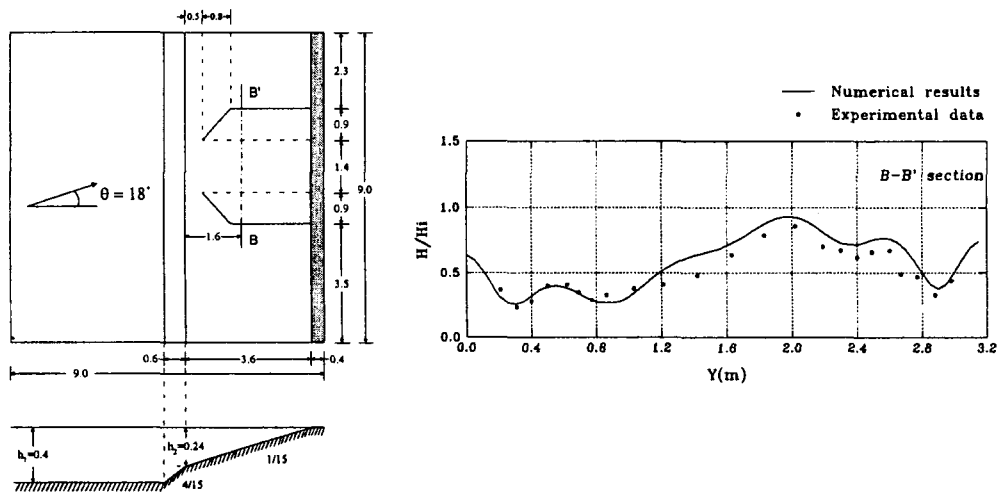


Fig. 7 Model configuration and wave height ratio for Case 7