

迎日灣의 不規則波 模型 Irregular Wave Model for Youngil Bay

鄭信澤* · 蔡璋源** · 李東永**

Shin Taek Jeong*, Jang Won Chae** and Dong Young Lee**

要 旨 : 파랑은 해안 구조물의 안정성 및 지형 변화 분석을 위해서 가장 중요한 동역학적 요소의 하나로서, 해안공학분야에서 매우 중요하게 취급된다. 그러나 바람에 의해 발생한 파랑은 매우 불규칙한 형태를 갖고 있으며, 해저 지형과 수심이 변하게 심하게 변하는 천해역으로 전파할 때 굴절, 회절 그리고 천수 효과에 의하여 변형된다. 최근 Vincent 등(1989)은 수중 타원형 천퇴에서 단순파 및 불규칙파의 변형에 대한 水理模型 實驗을 보고하였다. 이들은 단순파와 불규칙파의 경우 천퇴에서의 굴·회절 복합 현상에 의한 파랑변형 형태가 판이하게 다르다는 것을 발견하였다. 수년동안 불규칙파 변형에 대한 이론 및 수치해석 연구가 계속되어, 파랑변형에 대한 이론 연구 및 수리 모형 연구는 상당히 발전되었으나, 실제 현상을 예측하기 위해서는 현장관측결과와 수치해석에 의한 해와의 비교 등이 필요하다. 본 연구에서는 여러 종류의 기기를 이용하여 영일만에서의 입사파와 변형된 파를 현장 관측하고, Chae와 Jeong(1992)의 타원형 모형을 이용하여 수중 천퇴 배후에서 불규칙파 변형에 대한 수치모형 실험을 실시하였다. 이들 2종류의 비교 결과가 잘 일치함으로써, 불규칙파 수치모형의 현장 적용성을 입증하였다.

Abstract □ The waves are most important dynamical factors for the analyses of structural stability and topographical changes on coastal engineering field. However, wind-generated waves are very irregular in shape and transformed through refraction, diffraction and shoaling when they propagate into shallow water where bottom topography and water depth vary significantly. Recently, Vincent and Briggs (1989) reported hydraulic model experiments for the transformation of monochromatic and directionally-spread irregular waves passing over a submerged elliptical mound. They concluded that for the case of combined refraction-diffraction of waves by a shoal, the propagation characteristics of the irregular and equivalent regular wave conditions can be vastly different. On the irregular wave transformation have been made theoretical and numerical studies for several years. Although theoretical and laboratory studies on wave transformation have progressed considerably, field measurement and comparison of numerical results with related theories are still necessary for the prediction of the phenomena in reality. In this study, field measurement of both incident and transformed waves in Youngil Bay were made using various kinds of equipments, and numerical computations were made on the transformed frequency spectra of large waves propagating over the shoal using Chae and Jeong's (1992) elliptic model. It is shown that this model results agree very well with field data, and thus the applicability of the model is now validated.

1. 序 論

파랑의 굴절 및 천수효과만을 고려한 수치모형의 경우, 파향선법 또는 유한차분법 등을 이용하였다. 이 때까지는 구조물 주위 및 수중천퇴에서 발생하는 회절현

상에 대해서는 따로 분리하여 고려해야 하는 번거로움이 있었다. 그러나 완경사방정식(Berkhoff, 1972)이 유도된 이후 굴·회절을 동시에 고려할 수 있게 되어 대부분의 파랑변형연구에 사용되고 있다. 완경사방정식은 이상유체의 지배방정식과 경계조건을 수심 적분

*圓光大學校 工科大學 土木環境工學科 (Department of Civil and Environmental Engineering, Won Kwang University, Iksan 570-749, Korea)

**韓國海洋研究所 沿岸工學研究部 (Coastal Engineering Division, Korea Ocean Research and Development Institute, P.O. Box 29, Ansan 425-600, Korea)

하여 만든 2차원 식으로, 해지면 경사가 완만하다는 가정 하에 유도되었으며 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla \cdot (CCg \nabla \tilde{\phi}) + \omega^2 \frac{Cg}{C} \tilde{\phi} = 0 \quad (1)$$

여기서 $\tilde{\phi}(x, y)$ 는 수면변동의 振幅 또는 波高의 평면 분포를 나타내는 함수로서 속도 포텐셜에서 연직성분과 시간인자를 분리한 것이다. $\nabla = (\partial/\partial x)i + (\partial/\partial y)j$, C 는 波速, Cg 는 群速度, 그리고 ω 는 절대 각속도이다. 환경사의 가정은 실제로 그렇게 엄격한 편은 아니며, 이 식은 보통의 조건에 대해 공학적인 측면에서는 충분한 정도로 굴절, 회절, 반사 및 천수변형 효과를 고려할 수 있다.

현재 국내에서는 단주기 파랑의 해석에 주로 有義波法을 이용하고 있으나 이 경우 실제 현상과 큰 차이가 발생하는 것은 자명하다. 대부분의 波浪變形 數值模型에 대한 연구는 단순파에 집중되어 그 精度 및 效率을 높이는데 집중되어 왔으나 최근 Panchang 등(1990)에 의해 불규칙파 수치모형에 대한 연구가 시도되고 있으며, 국내에서는 鄭 등(1993)에 의해 반무한 방파제 주위에서의 불규칙파 회절에 대한 연구가 수행된 바 있으며, 유(1993)는 不規則波 수치 모형 결과와 수리모형 실험 결과와 비교하였다.

불규칙파를 처리하는 방법에는 유의파법, 최대파법, 확률 계산법, 불규칙파 실험법, 그리고 스펙트럼 계산법(spectral calculation method) 등이 있다(Goda, 1985). 이 중 스펙트럼 계산법은 실제의 불규칙한 파랑의 스펙트럼을 단순파로 분해한 뒤 각각의 성분파에 대하여 변형을 계산한 뒤 다시 중첩하는 방법으로 Panchang 등(1990)에 의해 그 수치모형의 타당성이 입증된 바 있다. 따라서 이 방법을 사용하는 경우 각각의 파랑 성분에 대한 변형을 정확히 계산할 수 있는 수치모형의 선택이 중요하다. 본 연구에서는 이 방법을 이용한 불규칙파 수치모형을 수립하여 영일만에 적용하였다.

2. 타원형 단순파 모형의 支配方程式

식 (1)의 포텐셜을 극좌표, $\tilde{\phi} = -ig a/\sigma e^{i\theta}$ 로 표현하여 대입하면 실수부와 허수부로 부터 다음 식들을 얻을 수 있다. 여기서, $a(x, y)$ 는 진폭, $S(x, y)$ 는 위상(Phase)이다.

이송방정식(Transport equation):

$$\nabla \cdot (CCg a^2 \nabla S) = 0 \quad (2a)$$

아이코널방정식(Eikonal equation):

$$|\nabla S|^2 = k^2 + \frac{\nabla \cdot (CCg \nabla a)}{CCg a} \quad (2b)$$

식 (2a), (2b)에는 3개의 미지수, 즉 진폭(a), 파수 벡터(∇S), 그리고 파향(θ)이 포함되어 있으므로 해를 구하기 위해서는 1개의 식이 더 필요하다. 일반적으로 도함수의 회전(Curl)은 0이 되므로 다음 식과 같이 표현되며 이 식은 파수 벡터의 비회전성을 나타낸다.

$$\nabla \times (\nabla S) = 0 \quad (3)$$

본 연구에서는 식 (2a), (2b), 그리고 (3)을 기본방정식으로 사용하였다.

3. 不規則波 數值模型

실제의 파랑은 무수한 성분파의 합으로 구성되어 있으며, 이 경우 파랑에너지는 주파수는 물론 파향에 대해서도 분포하고 있다. 파랑의 방향 스펙트럼, $S(f, \theta)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$S(f, \theta) = S(f)G(f, \theta) \quad (4)$$

여기서 $S(f)$ 는 일차원 주파수 스펙트럼이고, $G(f, \theta)$ 는 방향 분포 함수이다.

일차원 주파수 스펙트럼은 현장관측 및 분석을 통하여 Pierson-Moskowitz, Bretschneider-Mitsuyasu, JONSWAP, 그리고 TMA 스펙트럼 등 여러 종류가 제안되어 있으나 본 연구에서는 현장에서 관측된 특정 시각의 자료를 이용하였다.

특정 周波數 및 波向에서 入射波의 振幅 a_o 는 $\sqrt{2S_o(f; \theta)\Delta f \Delta \theta}$ 이며, 여기서 添字 o 는 入射波를 의미한다. 각 성분파에 대한 진폭을 파랑변형 수치모형을 이용하여 계산한 뒤, 변형된 스펙트럼 $S(f; \theta)$ 는 다음 식에 의해 구한다(Chae와 Jeong, 1992).

$$S(f; \theta) = [a/a_o]^2 S_o(f; \theta) \quad (5)$$

4. 現場觀測 및 分析

Fig. 1에는 海圖 No. 135, 136 및 146을 기준하여 작성된 영일만의 등수심도와, 관측기기가 설치된 위치를 도

시하였다. 현장관측기기중 ■는 directional waverider, ▲는 PUV, 그리고 ●는 wave gauge를 의미한다.

영일만에서는 크게 2회에 걸쳐 현장실험을 실시하였다. 전반기는 1993년 11월 12일부터 30일까지로 수심변화에 따른 천해파 변형에 대한 연구를 위하여 고안된 실험으로, 본 수치모형실험에서 사용한 자료는 이 기간의 자료를 분석하여 얻은 것이다(해운항만청, 1994). Fig. 1에서 보는 바와 같이 가장 외해에 Directional Waverider(DW1: 수심 31 m), 외해부터 연안쪽 순서대로 PUV(DP1: 수심 17 m), 수심 13 m(P2), 6 m(P1)에 수압식 파고계 각각 1대를 설치하여 분석을 실시하였다. 후반기에는 1994년 2월중에 동일한 기기들을 설치하여 관측 및 분석을 실시하였으나, 본 연구에서는 사용하지 않았다.

방향 스펙트럼을 추정하는 방법으로는 일정 간격의 방향에 대한 방향 분포 함수의 값을 관측 파동량간의 Cross 스펙트럼으로부터 직접 계산하는 방법과 방향 분포 함수를 몇 개의 파라메타로 표현하여 그 파라메타를 계산하는 방법으로 나눌 수 있는데, 주요 파랑 스펙트럼 추정방법은 직접 Fourier 변환법(DFT), Longuet-Higgins 방법(LHM), 확장 최우법(EMLM), 최

대엔트로피법(MEP), 그리고 Bayesian 파랑 분석법(BDM) 등이 있으며, 이들 방법의 장·단점은 해양연구소(1991, 1993)에 설명되어 있다. 본 연구에서는 이들 방법을 혼용하여 분석을 실시하였고, 여러 자료 중 1992년 11월 20일 10시의 자료가 각 측정에서의 동시 관측 목적에 적합하여 수치모형의 비교자료로 이용하였다.

5. 數值模型의 現場適用 및 分析

모형의 현장 적용성을 검토하기 위하여 영일만에 불규칙과 수치모형을 적용하였다. 격자망은 170×230개로 구성되었으며, 격자 간격은 등간격으로 $\Delta x = \Delta y = 200m$ 이다. 수심도의 형태를 분석한 결과, 대상 영역의 외해쪽에 수중천퇴(shoal)가 존재하며, 이는 파랑 변형에 큰 영향을 미치게 된다.

Fig. 2와 3은 심해파향이 각각 NNE와 NE일 때 단순 파 수치모형 결과의 등파고비선도를 도시한 것이다. 이들 결과중 특히 심해파향 NE의 경우 영일만의 중앙부근에서 수중천퇴의 영향으로 파가 집중되는 현상을 볼 수 있으며 심해파향 NNE의 경우보다 전반적으

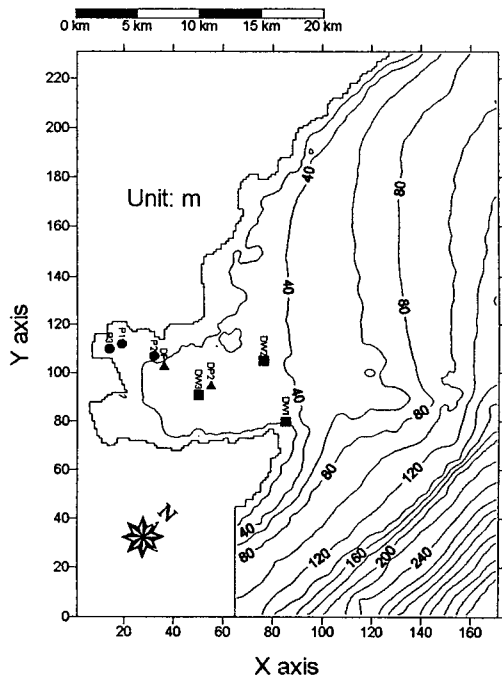


Fig. 1. Water depth contours and measuring points in Youngil bay.

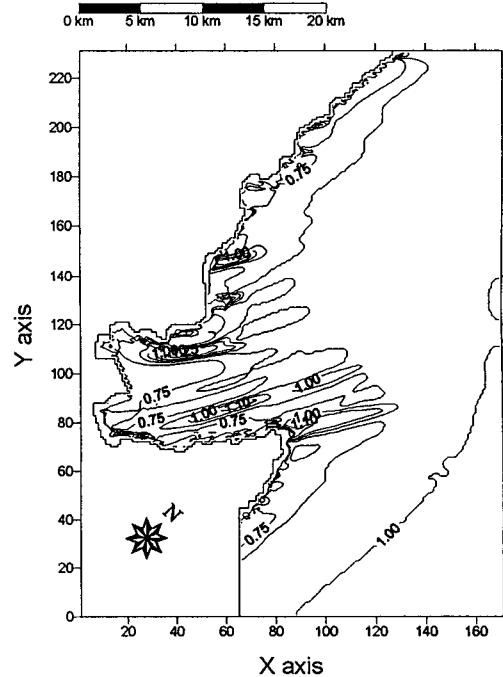


Fig. 2. Monochromatic wave height ratio contours (Wave direction: NNE).

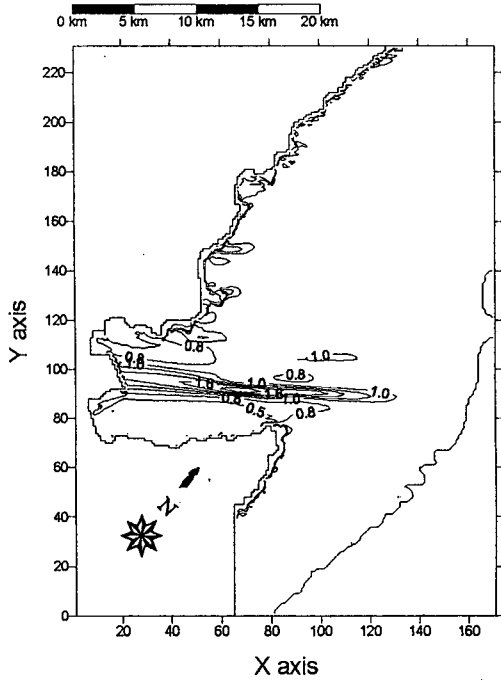


Fig. 3. Monochromatic wave height ratio contours (Wave direction: NE).

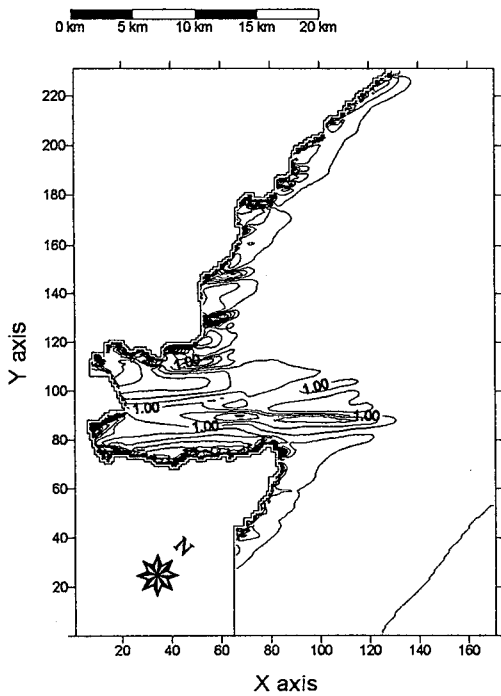


Fig. 4. Irregular wave height ratio contours.

로 파고가 크다. 이러한 파랑 집중현상은 단순파 모형에서 자주 발생하는 현상이나, Fig. 4와 같은 불규칙파

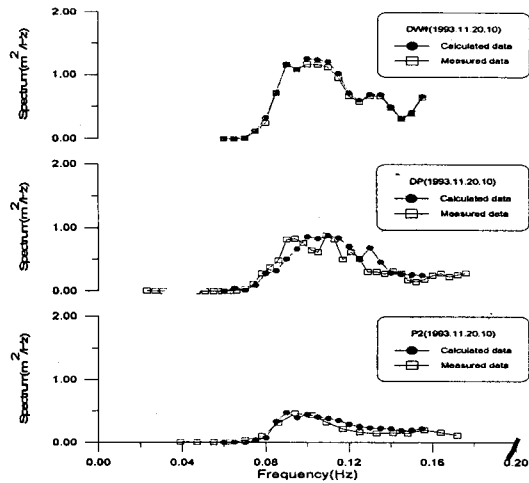


Fig. 5. Comparison of wave spectra between measured and calculated data at 3 observation points.

수치모형의 결과에서는 이러한 현상이 발생하지 않으며 평활화되어 실제 현상에 근접하게 된다.

Fig. 5는 DW1에서 관측된 파랑 스펙트럼 자료를 본 수치모형의 외해 입사파 조건으로 환산한 뒤, 본 수치모형을 이용하여 파랑변형을 계산한 결과로 DP 및 P2에서의 관측치와 비교적 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

6. 結論 및 討議

파랑관측업무 개선방안에서 수립된 우리 나라의 파랑관측망에서 심해 입사파는 primary wave station에서 원칙적으로 파랑스펙트럼을 실시간으로 관측하여 입사파의 정밀한 파랑 스펙트럼을 얻고, 이로부터 천해의 국지 지점에서 파랑스펙트럼은 수치모형에 의하여 간접적으로 구하는 방법이 추진되고 있다.

본 연구에서는 이러한 목적에 부응하도록 영일만에서 directional waverider, PUV, 그리고 wave gauge 등을 이용하여 관측을 실시하였으며, 또한 불규칙파 수치모형을 이용하여 이들 관측결과와 비교하였다. Fig. 5의 수치모형 결과는 현장 관측치와 비슷하게 계산되어, 이러한 분석 및 해석 방법이 타당하다는 것을 입증할 수 있다.

본 연구를 통하여 자연상태의 해저 수증천퇴에 의한 파랑 스펙트럼 변형에 관한 현장실험 및 수치실험을 실시하였는데, 이는 수치모형의 현장 적용성 및 현장 자료 분석 및 이용에 귀중한 자료가 될 것이며, 차후

보다 정밀한 수치모형의 개발 및 자료 분석 방법 개발 등이 필요할 것이다.

謝 辭

본 논문의 연구 결과중 현장관측 및 분석은 해운항만청의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사를 표한다.

參考文獻

- 유동훈, 1993. 천해에서 불규칙파의 변이, 한국해양·해양공학회지, 5(3): 212-220.
- 정신태, 채장원, 강관수, 전인식, 1993. 반무한 방파제주위에서의 불규칙파 회절에 대한 수치모형, 한국해양·해양공학회지, 5(1): 45-50.
- 韓國海洋研究所, 1991. 국가종합해양모니터링시스템 구축 기술개발(I), BSPG 00119-383.
- 韓國海洋研究所, 1993. 국가종합해양모니터링시스템 구축 기술개발(II), BSPN 00184-628-2.
- 海運港灣廳, 1994. 淺海波浪 算出 시스템 構築 用役 1次年度 報告書.
- Berkhoff, J.C.W., 1972. Computation of combined refraction-diffraction, *Proc. 13th Int. Conf. Coast. Engrg.*, ASCE, 471-490.
- Chae, J.W. and Jeong, S.T., 1992. Current-depth refraction and diffraction model for irregular waves, *Proc. 23th Int. Coast. Engrg. Conf.*, ASCE, Venice, Italy, 129-141.
- Goda, Y., 1985. Random seas and design of maritime structures, Univ. of Tokyo Press, Japan.
- Panchang, V.G., Wei, G., Pearce, B.R. and Briggs, M.J., 1990. Numerical simulation of irregular wave propagation over shoal, *J. Wtrway., Port Coast. and Oc. Engrg.*, 116(3), 324-340.
- Vincent, C.L. and Briggs, M.J., 1989. Refraction-diffraction of irregular waves over a mound, *J. Wtrway., Port Coast. and Oc. Engrg.*, 115(2), 269-284.