

港灣設計에 있어서 하이브리드 要素法의 應用에 關한 研究

—釜山港 三段階 開發計劃을 中心으로—

李 重 雨*

A Study on Application of the Hybrid Element Method in Harbor Design

—Under the Third Development Plan for Pusan Harbor—

Joong-Woo Lee

目 次

Abstract

1. 序 論

2. 數值모델理論

3. 釜山港에의 適用例

4. 結 論

參考文獻

Keywords : hybrid element(하이브리드 요소), bottom friction(해저마찰), boundary absorption(경계면 흡수), symmetric banded matrix(대칭밴드 매트릭스), variational method(변분법), functional (범함수)

Abstract

A very large scale model is developed for calculating the transformation of waves over the bathymetry of a bay or harbor. The accuracy and applicability of the model are demonstrated for harbor design. The method used is the hybrid element method for monochromatic waves under the effects of bottom friction and boundary absorption is introduced to the model.

The model is applied to a real harbor, the Pusan Harbor, Korea, in order to analyze changing wave characteristics due to the construction of new shore structures.

The numerical results indicate that some resonance patterns within the selected wave frequency band. Moreover, the predicted waves at or near resonance without inclusion of the bottom friction and boundary absorption cause the high amplification and thus, unfavorable results in engineering design.

* 正會員, 韓國海洋大學 港灣·運送工學科 教授

1. 序 論

새로운 港灣設計나 기존의 港灣을 보완하고 향상시키기 위한 계획등에 필수적이라고 할 수 있는 분야는 의도하는 構造物을 설치하기전과 후에 있어서 만과 항에서의 入射波에 대한 反應을 예측하는 것이다. 따라서 이에 대한 문제를 더욱 효과적으로 해결하기 위해서는 工學的인 分析에 걸맞는 최선의 방법을 개발하는 것이 요구되며 또한 이를 개선하는데 노력과 투자를 아끼지 않아야 할 것이다. 특히 정확하고 효과적인 波浪의 變化에 관한 모델은 解析의일 수도 있고 水理모델(Hydraulic Model)이나 數值모델(Numerical Model)일 수도 있지만 서로 長短點을 지니고 있고 또한 대규모의 비용과 영구적인 시설물 설치, 나아가서는 자연환경의 변경이라는 관점에서 工事前に 충분한 分析과 檢討가 필요하므로 신중한 결정을 내려야 한다.

본 연구의 목적은 可變水深 港灣海域에서 波浪의 傳播와 變換에 대한 數值的 豫測으로 기존의 類似 數值모델에서 제외시킨 海底摩擦이나 境界面에서 波의 吸收등을 도입하고 특히 數值모델領域을 변환하지 않고 開放水路(open channel) 効果を 그대로 살릴 수 있는 방안을 제시하여 이를 실제 港灣에 적용한 예를 보여 設計者에게 중요한 자료를 제시함에 있다.

어떠한 波浪의 變換모델도 그 기본이 되는 波理論이 있다. 그 중 緩傾斜方程式(Mild Slope Equation)도 一般線型波理論의 한 분야로 Berkhoff(1972)에 의해 개발된 이후 Chen과 Mei (1974, 1975)에 의해 有限要素法(Finite Element Method)과 하이브리드 要素法(Hybrid Element Method)으로 방법이 제안되어 많은 학자들에 의해 개량되어 왔다. 이 式 자체로 淺水效果(shoaling), 回折 및 屈折과 反射등의 物理現狀을 포함하므로 數值解析에 빈번하게 사용되고 있으나 海底摩擦, 境界面 吸收, 反射波의 放射(scattering)등을 고려한 경우는 최근에 와서이고 그나마 이들 조건을 종합화한 시도는 Chen(1985, 1986)과 Lee (1987, 1989)등이 있었다. 그러나, Chen(1986)의 경우 境界面에서 吸收에 대한 기술은 예로 든 港

灣境界面에 동일한 反射係數를 설정하여 작은 축적의 港에만 적용할 수 있었고 또한 Lee(1989)의 연구에 의하면 摩擦係數에 대한 것은 실제 港灣과 같은 대규모 港의 分析에는 부적합한 것으로 나타났다. 한편 港灣이나 海岸 특정지역에 대한 시뮬레이션에 수반되는 문제는 방파제나 수로등에서 研究領域을 한정할 때 境界面에 대한 처리로, 數值解析의 결과에 상당한 영향을 미치고 있음을 알 수 있어서 이에 대한 적절한 처리방법이 아쉬운 실정이었다.

본 연구에서는 이러한 점을 보완하고 數值解析의 精度를 높이기 위해 有限要素法과 解析的인 방법을 접목한 하이브리드 要素法을 사용하여 基本方程式과 境界條件을 처리하고 유도된 모델을 통하여 관점이 되고 있는 釜山港 第三段階 開發海域에 대해 시뮬레이션하여 문제점을 도출해 보고자 한다.

2. 數值모델理論

앞에서 기술한 바와 같이 波浪의 分析을 위해 緩傾斜方程式을 많이 사용하고 있는데 本計算에서는 海底摩擦을 考察한 修正된 Helmholtz方程式即, 變換된 緩傾斜方程式(Transformed mild slope equation) 式(1)을 使用하고 Fig.1과 같은 問題領域에서 그 境界值條件으로 式(2)-式(5)를 使用하기로 한다.

$$\nabla \cdot (\lambda C C_g \nabla \phi) + \frac{C_g}{C} \omega^2 \phi = 0 \dots\dots\dots (1)$$

여기서

- ∇ : 水平方向 gradient 연산자
- C_g : 波의 群速度
- C : 波速, C²=g/k tanh kh
- h : 水深 h(x, y)
- g : 地球의 重力加速度
- k : 波數(2π/L)
- ω : 波의 角周波數(2π/T)
- φ : 2次元 複素速度포텐셜函數, φ(x, y)

海底摩擦 factor λ는 해저면에서 Shear Stress



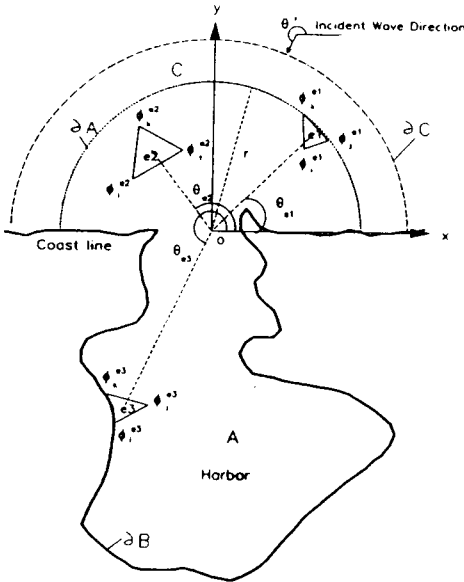


Fig. 1 Definition Sketch of the Finite Element Solution Region(A) and Analytical Solution Region(C)

성분을 海底에서 수평방향의 最大流速에 비례한다고 가정하여 다음 式(2)와 같이 정리할 수 있는데 여기서 β 는 地域에 따라 變하는 無次元의 係數, α_0 入射波의 波振幅, γ 는 波와 海底摩擦사이의 位相差(phase difference)이다.

$$\lambda = \frac{1}{1 + i \frac{\beta \alpha_0 e^{\gamma r}}{h \sinh kh}} \dots \dots \dots (2)$$

그 例로 $\beta=0$ 이면 $\lambda=1$ 로 方程式(1)은 海底摩擦이 포함되지 않은 緩傾斜 波浪式이 된다. 여기서 適用하게되는 港灣水域을 Fig. 1과 같이 任意形狀과 可變水深을 導入한다고 할때 岬, 海邊, 防波堤, 阜頭 등 境界面에서의 垂直方向에 대한 流速이 存在함을 反射係數(Reflection Coefficient, K_r)을 使用하여 나타내면 境界面을 따라 다음과 같다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \Gamma \phi \dots \dots \dots (3)$$

여기서 $\Gamma = ik \frac{1 - K_r}{1 + K_r}$ 이다.

海底摩擦係數 β 와 유사하게 係數 $\Gamma=0$ 일 때, 即, $K_r=1$ 로 境界面에서 完全反射할 경우는 式(3)이 一般的으로 數值모델에서의 境界條件처럼 境界面에서 流體速度의 垂直成分, $\partial \phi / \partial n$ 은 0이 됨을 알 수 있다. 또한 水路나 防波堤와의 gap에 대해서는 水理모델 경우처럼 Wave Absorber를 使用할 必要없이 $K_r=0$ 으로 됨으로써 같은 效果를 얻을 수 있다. 이에 대한 검정은 Lee(1989)의 모델 test에서 상술된 바 있다.

傳統的인 有限要素法(Finite Element Method, FEM)에 의한 副振動에의 接近은 必要水域을 三角形 또는 四角形의 要素로 나누고 이를 解析하고 있는데 Fig. 1에서 ∂A 와 유사한 境界面의 處理問題가 심각하게 대두되어 이 境界面의 設定範圍와 境界面에서의 再反射가 數值解析의 結果를 變化시키는 事例가 많다. 또한 이를 피하기 위해 넓은 水域의 開放境界面의 導入은 相對적으로 컴퓨터의 記憶容量(memory size)과 計算問題의 擴大라는 問題를 야기하고 있다. 이러한 問題點을 극복하기 위해 본 하이브리드要素法에서는 必要水域을 内部有限區間(A)과 外部無限區間(C)의 두 區間으로 나누고 A區間에서는 三角要素(Triangular Element)로 可變水深에 線形函數를 適用하고 C區間에서는 하나의 極大要素(Super Element)만을 使用하여 一定水深에 解析的 解(Analytic Solution)를 Shape函數로 導入한다. 즉, 離散解(Discrete Solution)와 解析解를 混合한 形態의 解析으로 하이브리드要素法の 그 意義를 갖게 된다. 이때 放射條件(Radiation Condition)이 外部無限區間에 適用되어 이 區間에서 外部로 向하는 波(Scattered Wave, ϕ^s)는 無限距離에서 소멸되어 反射해 돌아오는 波가 없어진다. 이는 式(4)와 같이 Sommerfeld의 放射條件으로 表現된다.

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{r} \left(\frac{\partial}{\partial r} - ik \right) \phi^s = 0 \dots \dots \dots (4)$$

여기서 r 은 極座標界의 距離를 나타낸다.

그 외에 A, C두 區間의 境界面, 即 開放境界 ∂A 에서의 連續條件을 導入하여



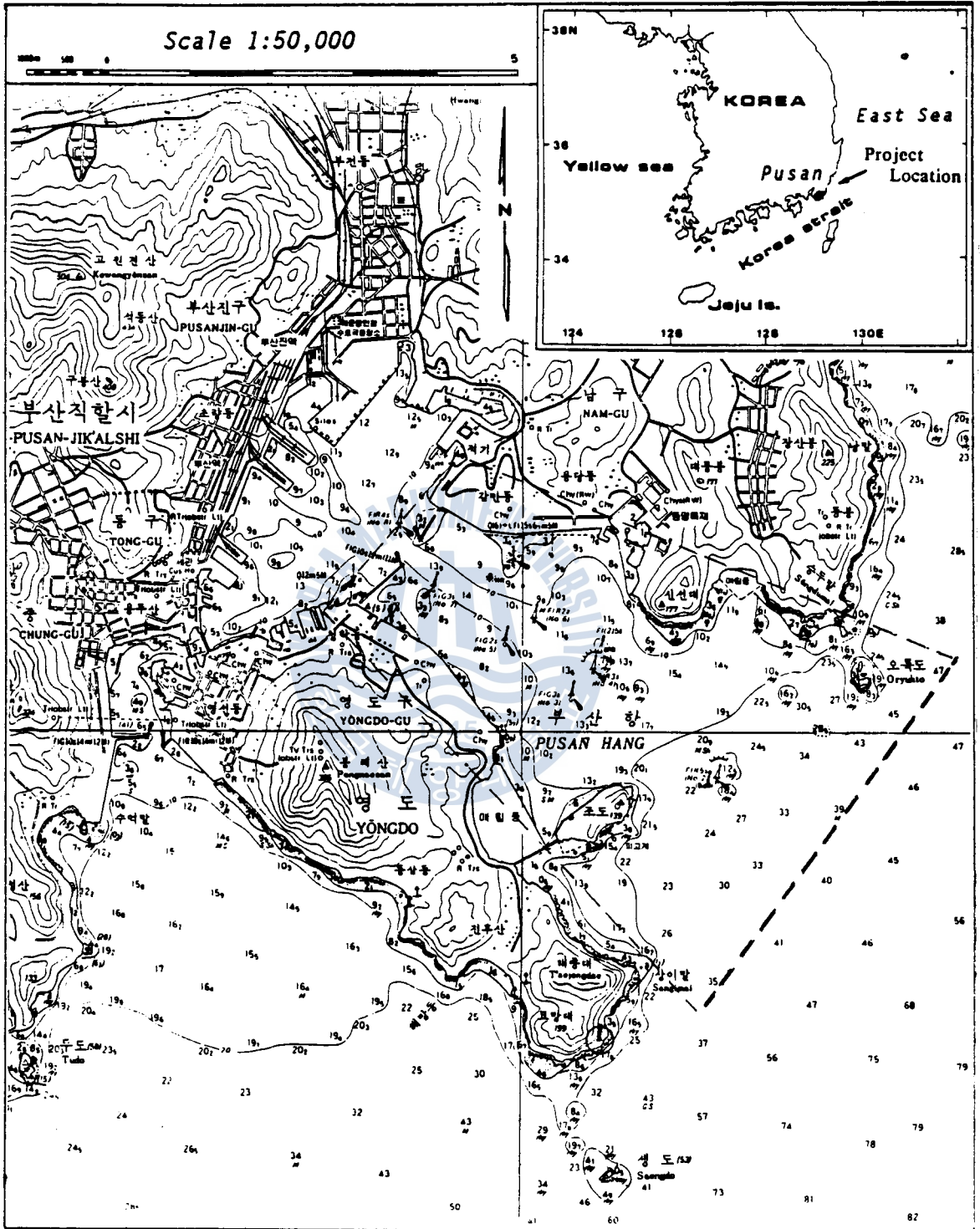


Fig. 4 Location and Limits of Numerical Model

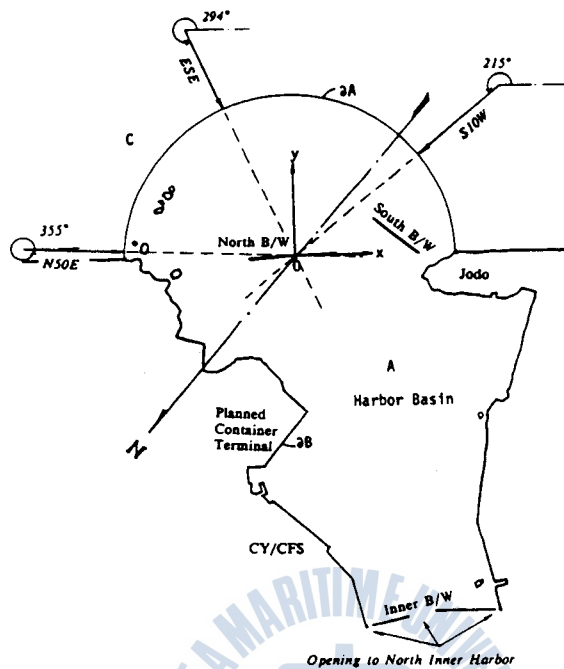


Fig. 5 Definition Sketch of the Coordinate System for Pusan Harbor and the Predominant Three Wave Directions

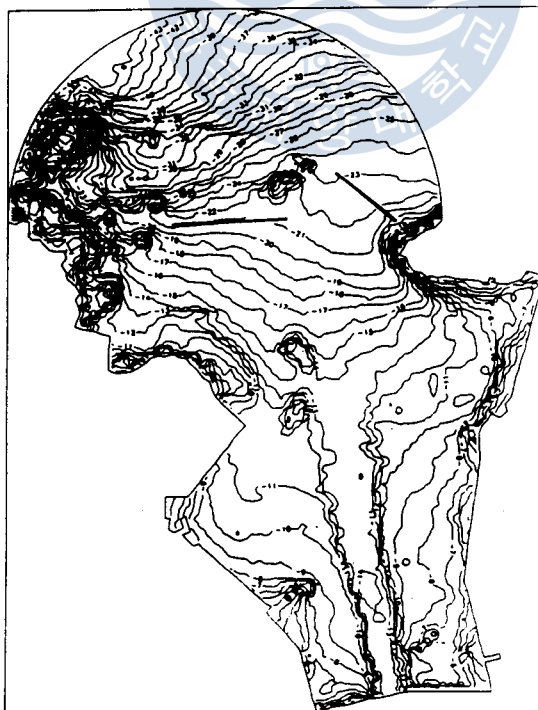


Fig. 6 Bathymetry of Pusan Harbor

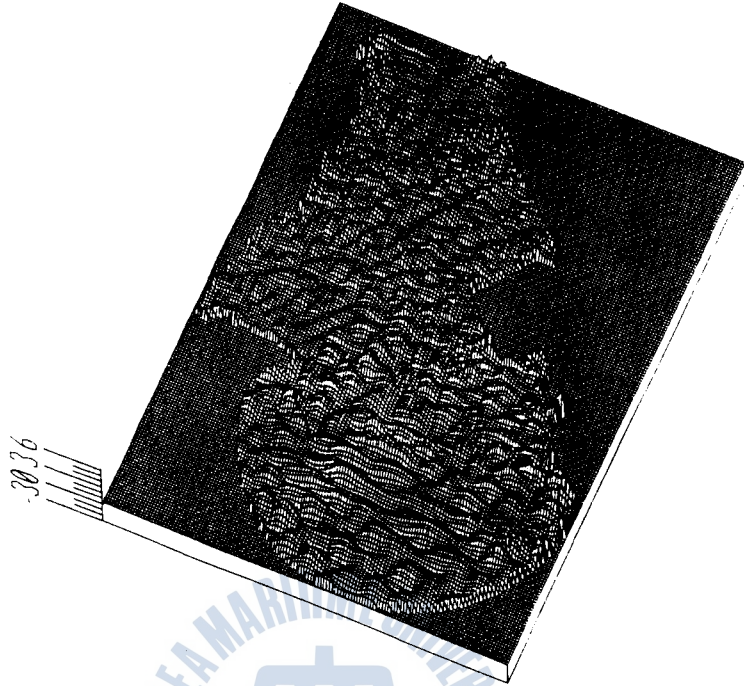


Fig. 11 Surface Pattern for Pusan Harbor (30sec, ESE direction, $K_r=0.9$, $\beta=0.0$, open end)

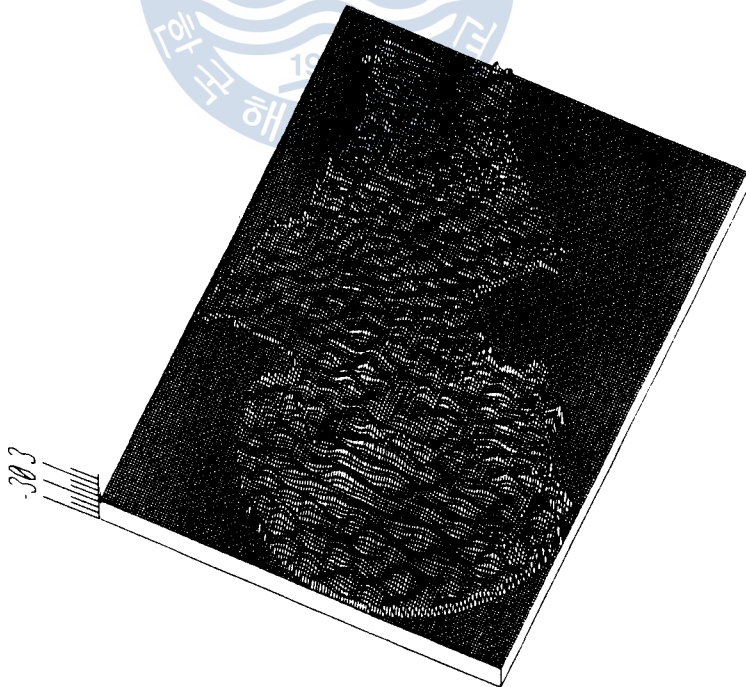


Fig. 12 Surface Pattern for Pusan Harbor (30sec, ESE direction, $K_r=0.8$, $\beta=0.0$, open end)



Fig. 13 Surface Pattern for Pusan Harbor (60sec, N50°E direction, $K_r=0.9$, $\beta=0.0$, open end)

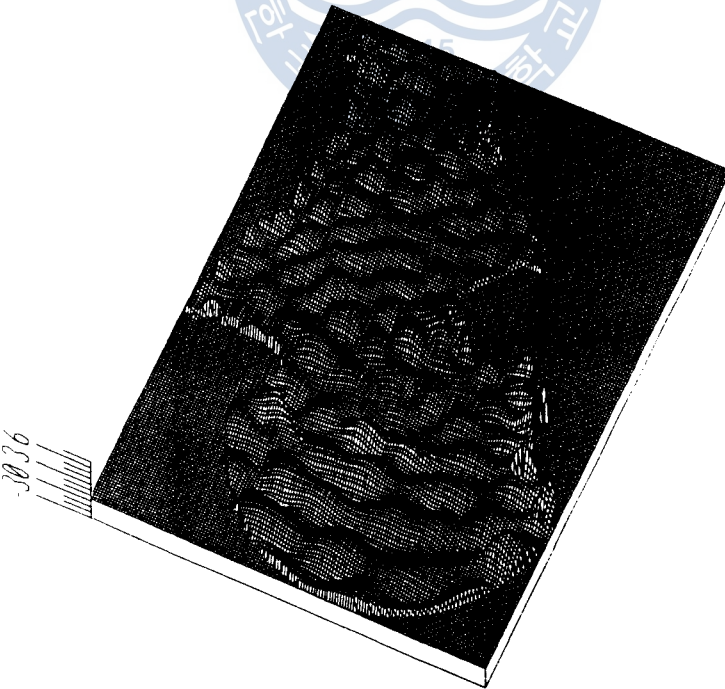


Fig. 14 Surface Pattern for Pusan Harbor (60sec, ESE direction, $K_r=0.9$, $\beta=0.0$, open end)

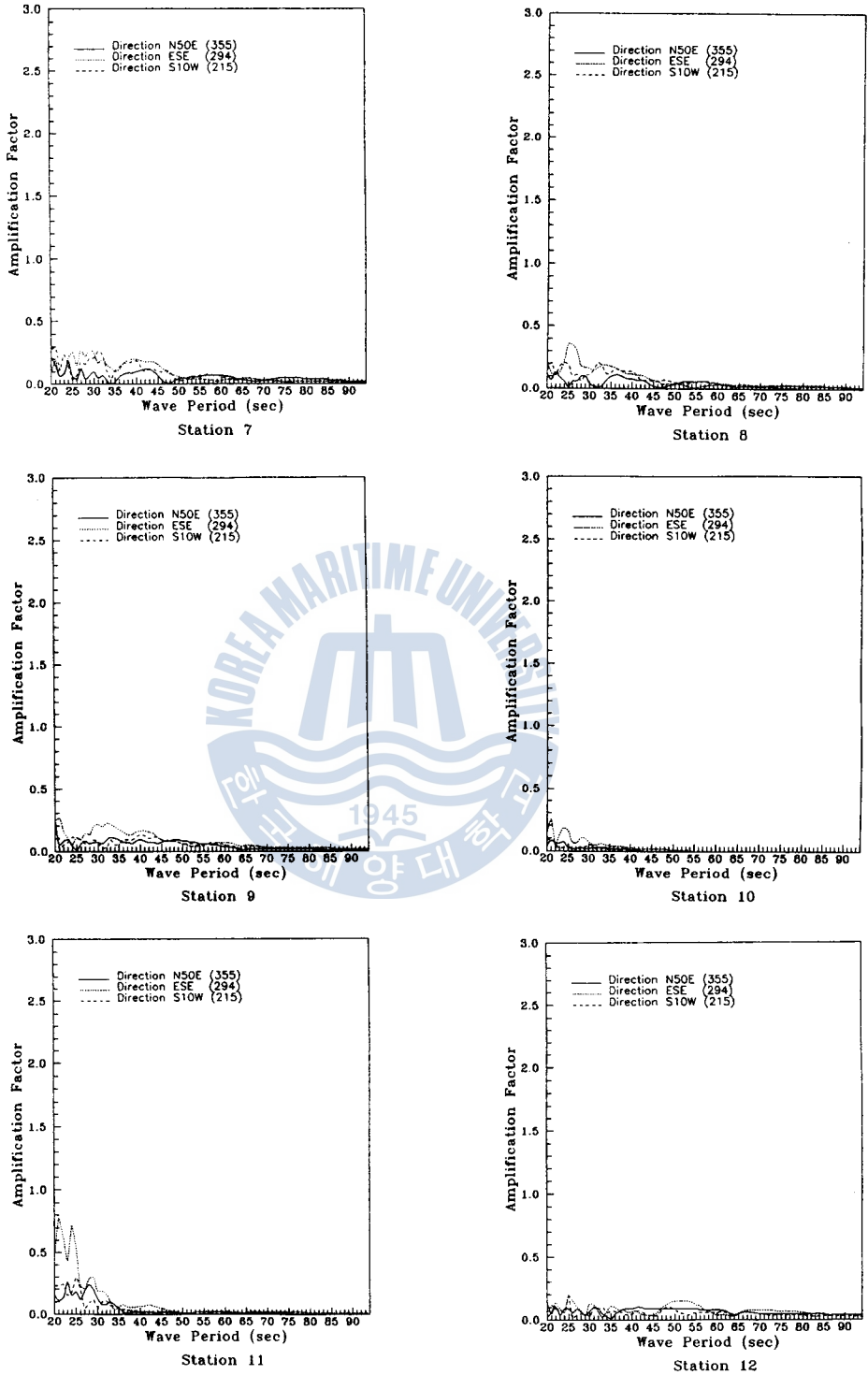


Fig. 18 Frequency Response Curves at Stations 7, 8, 9, 10, 11, 12 (Wave Height Amplification Factor with $K_r=0.8\sim0.98$, $\beta=0.05$, open end)

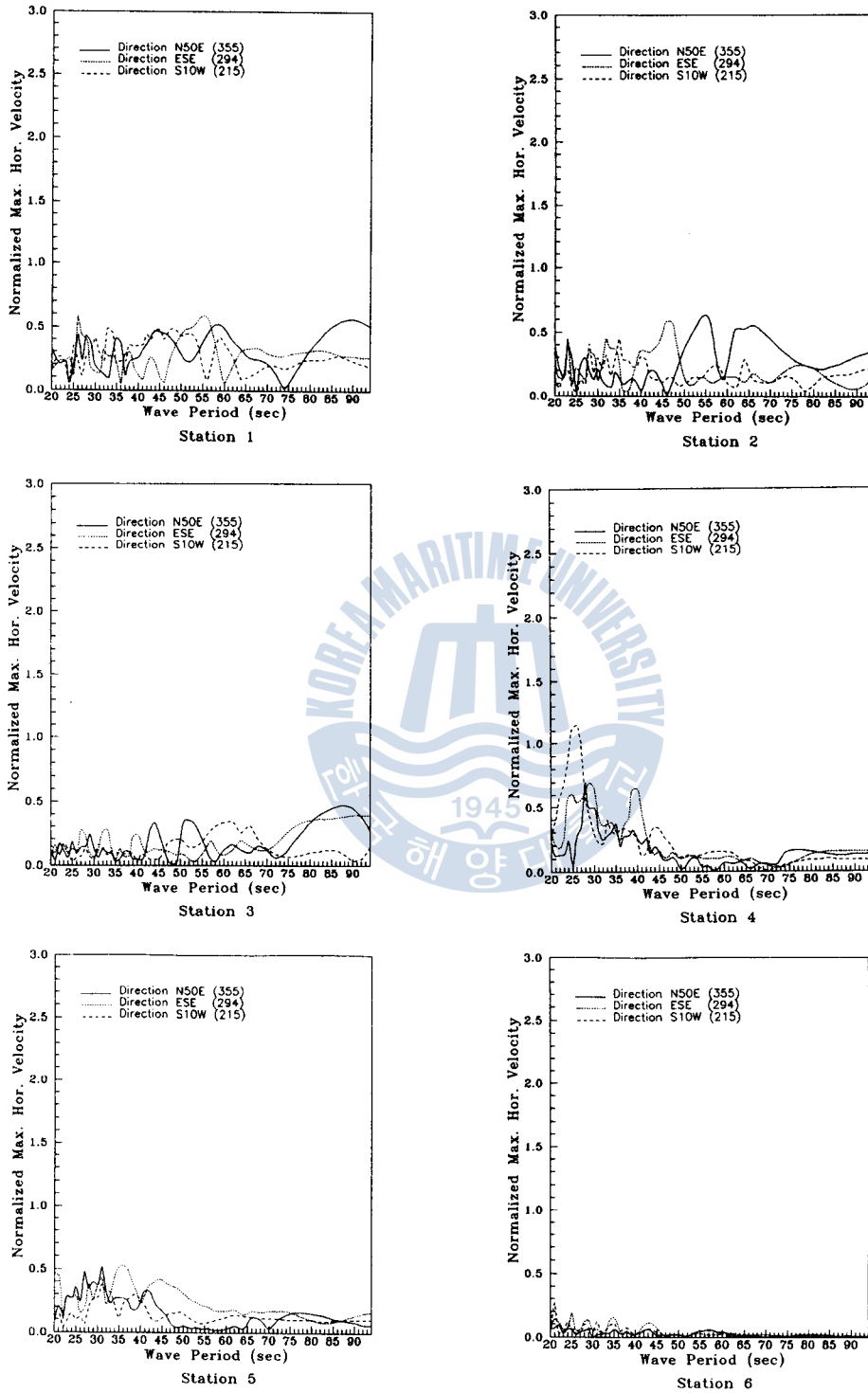


Fig. 19 Frequency Response Curves at Stations 1, 2, 3, 4, 5, 6 (Normalized Maximum Horizontal Velocity with $K_r=0.8\sim 0.98$, $\beta=0.05$, open end)

4. 結 論

以上은 外港으로부터 港灣의 固有振動 週期에 해당하는 長週期小振幅波의 進入에 따른 海面의 應答을 數値모델을 통해 밝히기 위한 한 段階로 釜山의 北外港을 대상으로 하여 特定 週期波 밴드에 대해 計算해 본 것이다. 이는 새로운 항만 설계나 기존의 항만을 보완하기 위한 계획을 수립할 때 수치모델의 이용을 나타내 보인 것으로 기존의 모델보다 합리적으로 접근하고 있음을 알 수 있다. 여기서 지적된 문제점들을 포함한 것에 대해서는 現地의 觀測結果로 檢證해 나가야 하고 실제 발견된 부분에 대해서는 항만계획을 실행해 나가는 단계에서 수정해 가지 않으면 안 될 것으로 사료된다. 또한 反射係數나 摩擦係數와 같은 파라메타들은 觀測 및 부분적인 水理實驗 結果의 分析을 통해서 도입될 때 비로소 그 精度가 확립된다고 하겠다. 물론 본 수치모델에서 사용하고 있는 파라메타의 범위는 이미 여러실험과 관측으로 얻어진 것을 토대로 하고 있으므로 일반적으로 이용이 가능하나 대규모의 컴퓨터사용과 사용시간의 방대성 때문에 선택한 周波數 밴드 이상으로 시뮬레이션은 행하지 못하였다. 今後에는 長週期에 대한 각 港의 應答을 觀測과 數値시뮬레이션을 통해 계속적으로 研究할 必要가 있으며 앞으로 합리적인 國토개발과 이용은 물론 자연재해 방지면에서도 국가적인 차원에서 港灣設計에 대한 과감한 研究費의 投資가 수반되어야 할 것이다.

參 考 文 獻

강시환, 이동영, 이중우 등(1989), “연안방재 시설의 설계기준 산출연구(Ⅰ),” 한국 과학기술원 해양연구소 BSPG 00076-230-2.
 한국종합기술개발공사, 일본테트라포드주식회사 등(1984a), “부산항 제3단계 개발사업 수리모형실험 보고서”.
 한국종합기술개발공사, 일본테트라포드주식회사 등(1984b), “부산항 제3단계 개발사업 파랑해석

조사 보고서”.

Abramowitz, M. and Stegun, I. A. (1964), “Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables, National Bureau of Standards”, Applied Mathematics Series 55.

Behrendt, L. and Jonsson, I. G. (1984), “The Physical Basis of the Mild-slope Wave Equation”, Coastal Engineering, pp. 941-954.

Berkhoff, J. C. W. (1972), “Computation of Combined Refraction-Diffraction”, Proc. 13th. Coastal Engng. Conf., Vancouver 1972, ASCE, Vol. 1, pp. 471-490.

Berkhoff, J. C. W. (1974), “Linear Wave Propagation Problems and the Finite Element Method”, Int. Sym. on Finite Element Methods in Flow Problems, Swansea.

Chen, H. S. and Mei, C. C. (1974), “Oscillations and Wave Forces in a Man-made Harbor in the Open Sea”, Proceeding of 10th Naval Hydrodynamics Symposium, June 1974, pp. 573-596.

Chen, H. S. (1984), “Calculation of Water Wave Scattering with Friction”, Proceeding of 5th DMD Specialty Conference, ASCE, August 1984, pp. 716-719.

Chen, H. S. (1986), “Effects of Bottom Friction and Boundary Absorption on Water Wave Scattering”, Applied Ocean Research, Vol. 8, No. 2, pp. 99-104.

Harms, V. W. (1975), “Diffraction of Water Waves by Cylindrical Structures of Arbitrary Shape”, Hydraulic Engineering Laboratory Report No. HEL 1-23, University of California at Berkeley, CA.

Houston, J. R. (1981), “Combined Refraction and Diffraction of Short Waves using the Finite Element Method”, Appl. Ocean Res., Vol. 3, No. 4, pp. 163-170.

Houston, J. R. and Outlaw, D. G. (1978), “Long Wave Simulations using a Finite Element Model”, Proceedings of the 2nd International Conference

on Finite Elements in Water Resources.

Ippen, A. T. and Goda, Y. (1963), "Wave Induced Oscillations in Harbours : The Solution for a Rectangular Harbor connected to the Open Sea", Hydro. Lab., Massachusetts Institute of Technology.

Jonsson, I. G., Skovgaard, O., and Brink-Kjaer, O. (1976), "Diffraction and Refraction Calculations for Waves Incident of an Island", J. Marine Research, Vol. 34, No. 3, pp. 469-496.

Lee, J. J. and Raichlen, F. (1971), "Wave Induced Oscillations in Harbors with Connected Basins",

W. M. Keck Lab. of Hydraulics and Water Resources, CIT, Rept. No. KH-R-26.

Lee, J. W. (1987), "Application of the Hybrid Element Method to Water Waves near Absorbing Shore Structures", Department of Ocean Engineering, University of Hawaii (Internal Report)

Lee, J. W. (1989), "Hybrid Element Analysis of Water Waves for harbor Design", Ph. D. Diss., Department of Ocean Engineering, University of Hawaii.

Mei, C. C. (1983), "The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves", John Wiley & Sons.



