

유한요소법에 의한 제주항 정온도 모의

김 남 형 · 허 영 택
제주대학교 해양토목공학과

The Calmness Simulation of Jeju Harbor by Finite Element Method

Nam-Hyeong Kim and Yeong-Tak Heo

Department of Ocean Civil Engineering, Cheju National University, Jeju-Do, 690-756, Korea

In this paper, the finite element method is applied to the calmness simulation of Jeju Harbor. The mild-slope equation as the basic equation is used. The key of this model is that the bottom friction and boundary absorption are imposed. Two numerical computation, rectangular harbor and arbitrary shaped harbor are carried out to show the present study's applicability for the analysis of wave oscillation. These numerical results are compared with the results obtained from the other numerical analysis and experimental data and are in very well agreement. From the application to Jeju Harbor it is seen that wave height is relatively high in 4 pier and 6 pier, and low in 1 pier, 2 pier and 3 pier compared with design manual(MOMAF, 1999).

Key words : finite element method, mild-slope equation, harbor calmness, wave height

서 론

항만, 어항 등의 항내 정온도는 선박의 입출항의 안전성 및 물양장, 안벽에서의 하역 가동율의 관점에서 결정된다. 항만의 계획에 있어서는 소요의 정온도를 확보하기 위하여 항입구에서 직접파랑이 입사하지 않도록 방지해야 하며, 또한 다중반사가 일어나지 않도록 항내 형상이 계획될 때 동시에 반사파를 저감하기 위한 구조형식이 선정되어야 한다.

항만의 정온도는 일반적으로 외해로부터 항만의 입구를 통하여 입사하는 장주기파의 주기가 항만의 고유진동주기와 같거나 거의 비슷한 경우에 공진현상을 일으켜, 비정상적으로 파고가 증폭되는 현상을 말한다. 외국의 경우, 항만에서의 장주기 정온도에 관한 연구는 이미 오래 전부터 행하여져 왔으며, 새로운

항만을 건설하거나 기존의 항만을 정비하는 경우에는 반드시 장주기 정온도에 관한 대책을 수립하는 것이 일반적이다.

항만 정온도에 관한 연구는, 실험적인 연구로서 Ippen과 Goda(1963), Lee(1969), 齊藤 等(1993) 등이 있고, 수치해석 연구로서 Chen(1984, 1986), Houston(1986), Kashiyama(1993), 近藤 等(1987), 佐藤 等(1988), 西村 等(1993) 등 많은 연구가 있다. 국내는 주로 수치계산을 이용한 항만 부진동에 관한 연구가 많다(정 등, 1992, 1996, 1998; 서 등, 1994; 박 등, 1994; 이 등, 1994; 허 등, 2001). 이들의 연구는 주로 항내의 공진현상에 관한 연구이며, 항내 전 수역에 걸친 항만 정온도에 관한 연구는 아직 미비한 단계이다.

본 연구는 Chen and Houston(1987)에 의해 개발된 수치기법을 이용하여, 제주항의 항내 전 수역에서의 정온도를 예측한 것이다.

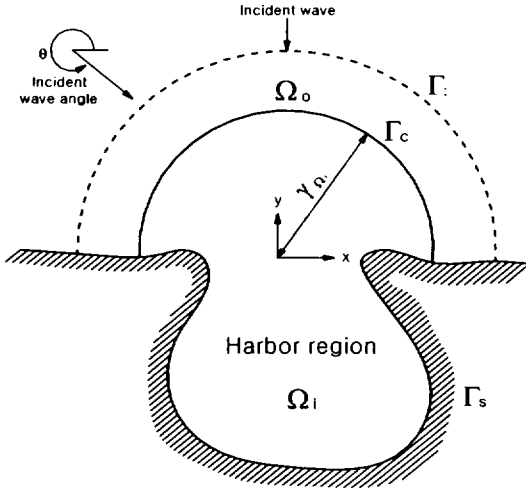


Fig. 1. Definition sketch.

기초방정식과 경계조건

유체는 비압축, 비점성, 비회전의 유체운동을 가정한다. Fig. 1에 나타낸 것과 같이 천해역에서 항만 부진동 해석의 기초방정식은 수심변화의 영향을 고려한 다음의 환경사방정식을 이용한다(Berkhoff, 1972; Chen, 1986).

$$\frac{\partial}{\partial x} \lambda h \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \lambda h \frac{\partial \phi}{\partial y} + \frac{\omega^2}{g} \phi = 0 \quad \text{in } \Omega_i \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{1}{1 + \frac{i\beta a_0}{kh^2} \exp(i\gamma)} \quad (2)$$

여기서, h 는 수심, ϕ 는 속도포텐셜, ω 는 각 진동수, g 는 중력가속도, Ω 는 해석영역을 나타낸다. 또 β 는 저면마찰계수, a_0 는 입사파 진폭, k 는 파수, $i = \sqrt{-1}$, γ 는 위상차이다.

방파제나 해안구조물과 같은 고체경계 Γ_s 는 음향학에서 사용된 임피던스조건과 비슷한 흡수경계조건을 사용하였고, 반사계수 K_r 을 이용하여 다음 식과 같다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} - \alpha \phi = 0 \quad \text{on } \Gamma_s \quad (3)$$

여기서, n 은 해석영역에서 외향인 단위수직벡터, $\alpha = ik \frac{1-K_r}{1+K_r}$ 이다. 유체의 연속성을 고려하여 경계 Γ_c 에서의 매칭조건(matching condition)은 다음 식과 같다.

$$\left(\lambda h \frac{\partial \phi}{\partial n} \right)_{\Omega_i} = \left(\lambda h \frac{\partial \phi}{\partial n} \right)_{\Omega_o}, \quad \phi_{\Omega_i} = \phi_{\Omega_o} \quad \text{on } \Gamma_c \quad (4)$$

방사조건은 무한한 것으로 가정하였고, 먼바다 경계 Γ_∞ 에서의 방사조건은 다음 식과 같다.

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{r} \left(\frac{\partial}{\partial r} - ik \right) (\phi - \phi_0) = 0 \quad \text{on } \Gamma_\infty \quad (5)$$

여기서, (r, θ) 는 극좌표이다. 또, ϕ_0 는 입사파의 속도포텐셜이며, 다음 식과 같이 주어진다.

$$\phi_0 = -\frac{iga_0}{w} \left\{ \exp[ikr \cos(\theta - \theta_0)] + K_r \exp[ikr \cos(\theta + \theta_0)] \right\} \quad (6)$$

여기서, θ_0 는 입사각이다. 경계조건식(3), (4), (5)를 고려하여, 기초방정식(1)을 풀면 항만의 정온도를 해석할 수 있다.

수치해석 및 고찰

유한요소모델의 정온도 검증해석

첫 번째로 모델을 검증하기 위하여 일정 수심의 직사각형 항만의 공진해석을 하였다. 수치모델에 이용한 직사각형 항만모델은 Goda and Ippen(1963), Lee(1969)와 Chen(1986)가 사용한 똑같은 직사각형 항만모델로 폭(B)은 6.04 cm, 길이(L)이 31.11 cm, 수심(h)는 25.72 cm, 원호의 반경(r)은 12.09 cm이다.

Fig. 2은 삼각형 유한요소를 이용하여 해석영역을 분할한 것으로, 요소수 3,655개, 절점수 1,962개이다. 또, 유한요소 분할은 입사파 중에서 주기가 가장 짧은 파($kL=5.0$)의 1파장에 58개의 요소가 포함 되

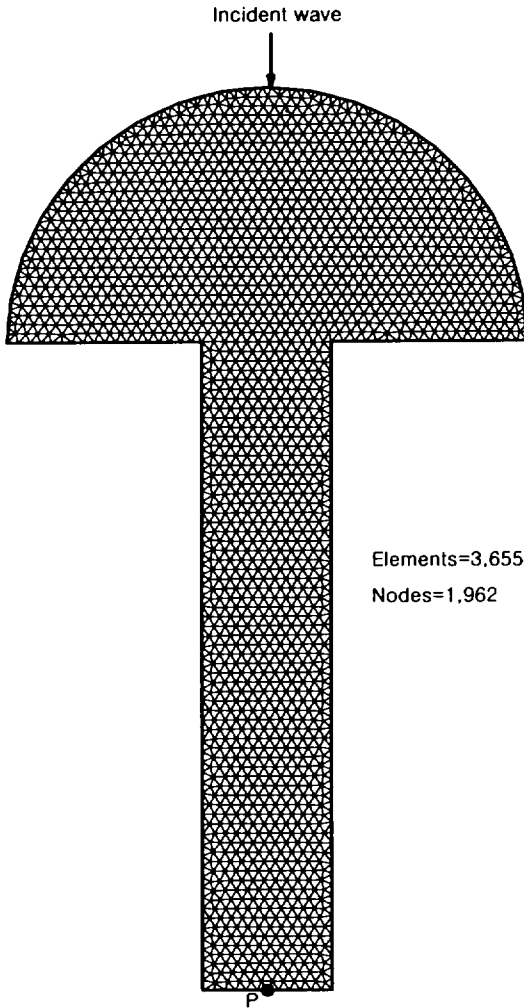


Fig. 2. Finite element mesh for full open rectangular harbor.

도록 분할했다. 수치해석의 조건으로서, 항만 경계부분에서의 반사율 K_r 은 0.98로 하였고, 저면에서의 마찰로 인한 에너지 손실이 없는 것으로 가정하여 마찰계수 β 는 0으로 했다. 파향은 정선에 직각으로 입사하는 것으로 하였고, 입사파의 진폭 a_0 는 0.127 cm로 주었다.

Fig. 3은 Fig. 2의 항만 제일 안쪽 P점에서의 계산된 공진 주기를 Ippen and Goda(1963) 및 Lee(1969)의 실험값과 Chen(1986)의 수치해석결과와 비교한 것이다. Fig. 4의 종축은 수면변위 (η)를 진폭의 2배

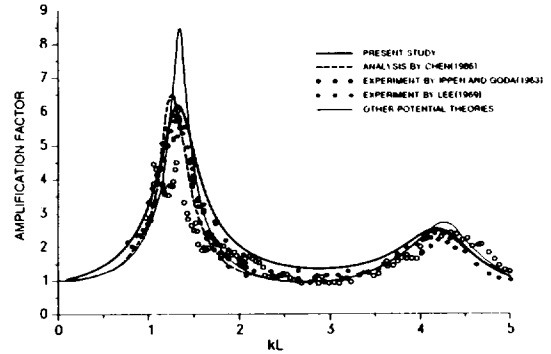


Fig. 3. Comparison of response curves at point P in fully open rectangular harbor.

($2a_0$)로 나눈 증폭비 ($\eta/2a_0$)를 나타내며, 횡축은 파수 (k)에 항만길이 (L)을 곱한 무차원화된 계수 kL 로 나타낸다. 수치모의는 횡축의 무차원 계수 kL 을 0.025부터 5.0까지 0.01간격으로 주어 계산하였다. 계산결과를 보면, 제1공진주기 ($kL=1.33$)와 제2공진주기 ($kL=4.18$) 부근에서의 증폭비는 실험값과 거의 같은 크기를 나타내고 있으며, 제1공진주기와 제2공진주기 사이에서의 값은 실험값보다 약간 진폭의 증폭비가 크게 나타내고 있으나, 대체로 실험결과와 같은 경향을 나타내는 것을 알 수 있다.

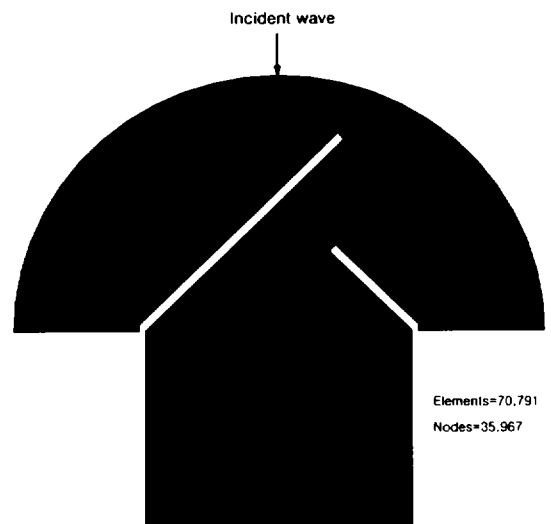


Fig. 4. Finite element mesh for arbitrary shape harbor.

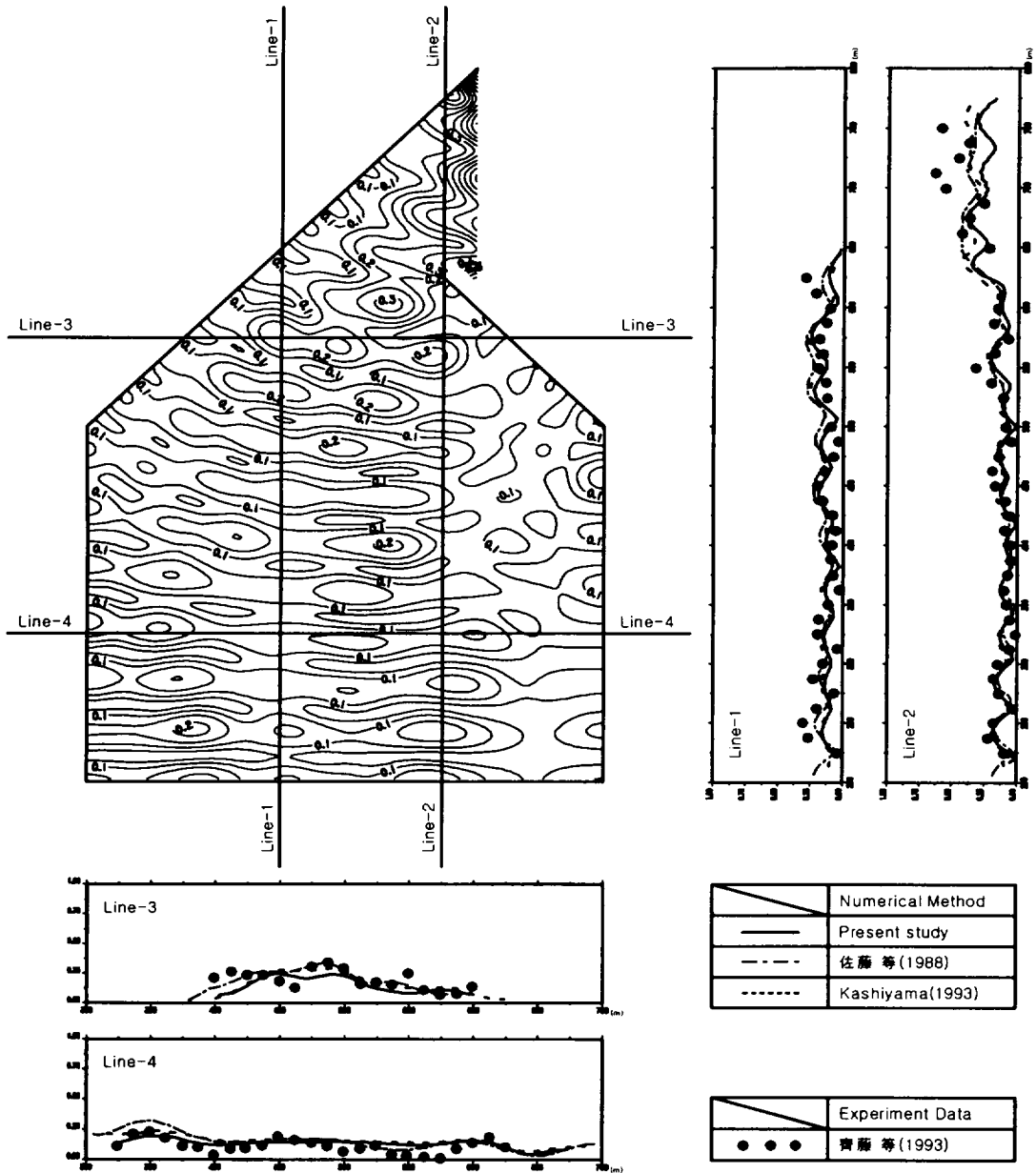


Fig. 5. Comparison of relative wave height in arbitrary shape harbor.

두 번째로 입의 항만의 항내 정온도 해석의 타당성을 검토하기 위하여, 佐藤等(1988), 齊藤等(1993) 및 Kashiya(1993)가 실시한 것과 동일한 재원의 입의 형상 항만 모델을 사용했다. 반사율은 畠田(1990)을 참고로 소파구조의 경우 0.4, 직립구조의 경

우 0.9로 했다. 수치계산조건으로서 입사파랑의 파고는 1.0 m, 주기는 10 sec를 주었고, 수심은 해석영역 전체를 7 m로 일정하게 주었다.

Fig. 4는 삼각형 유한요소를 이용하여 해석영역을 분할한 것으로, 삼각형 유한요소의 절점수는 35,967

개, 요소수는 70,791개이다. 방파제 선단으로부터 경계까지의 거리는 75 m로, 이것은 입사파의 1파장 78.92 m와 거의 같다. 또 요소의 크기는 파장과 요소의 크기의 비율이 1/20이 되도록 4 m로 일정하게 분할했다.

Fig. 5는 입사각 270° 인 입사파랑(파고 1 m, 주기 10 sec)에 대한 정온도의 수치계산 결과를 佐藤 等(1988) 및 Kashiya(1993)의 수치해석결과와 齊藤 等(1993)의 실험결과 비교한 것이다. Fig. 5에서 종축은 파고비를 나타내며, 횡축은 수치모의 항만의 거리

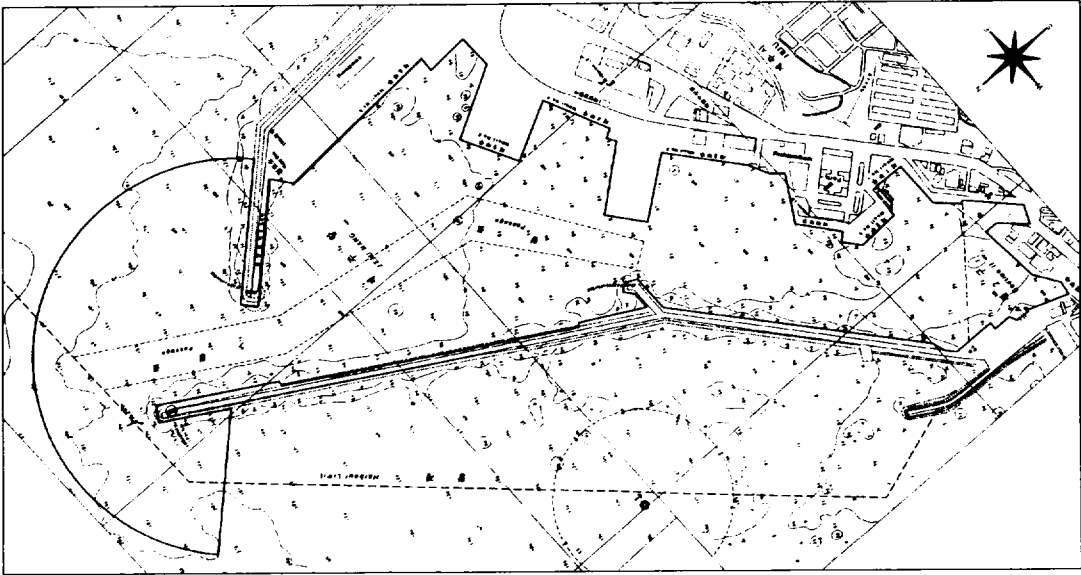


Fig. 6. Location map of Jeju Harbor.

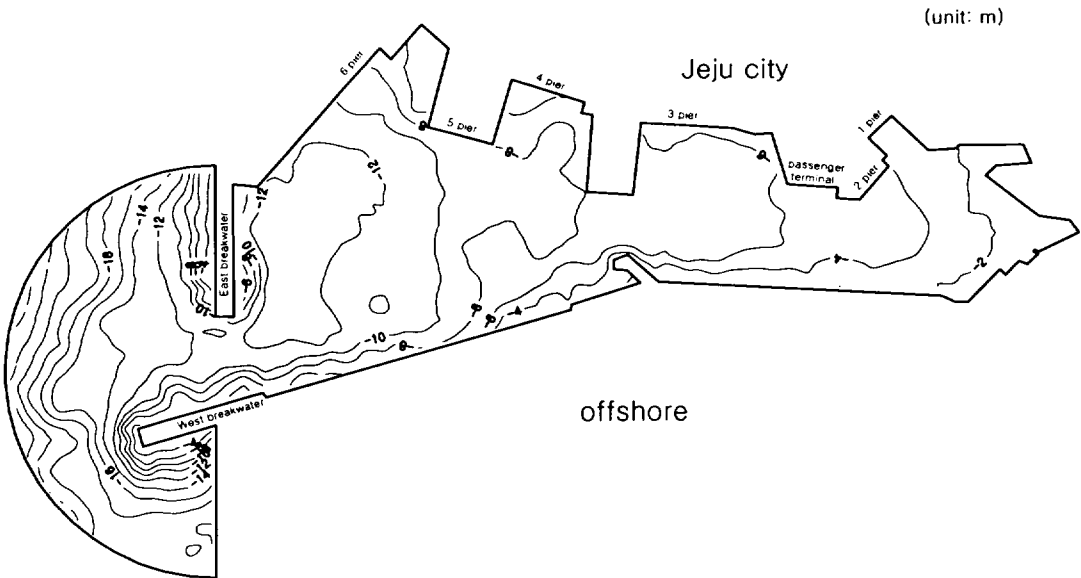


Fig. 7. Water depth diagram of Jeju Harbor.

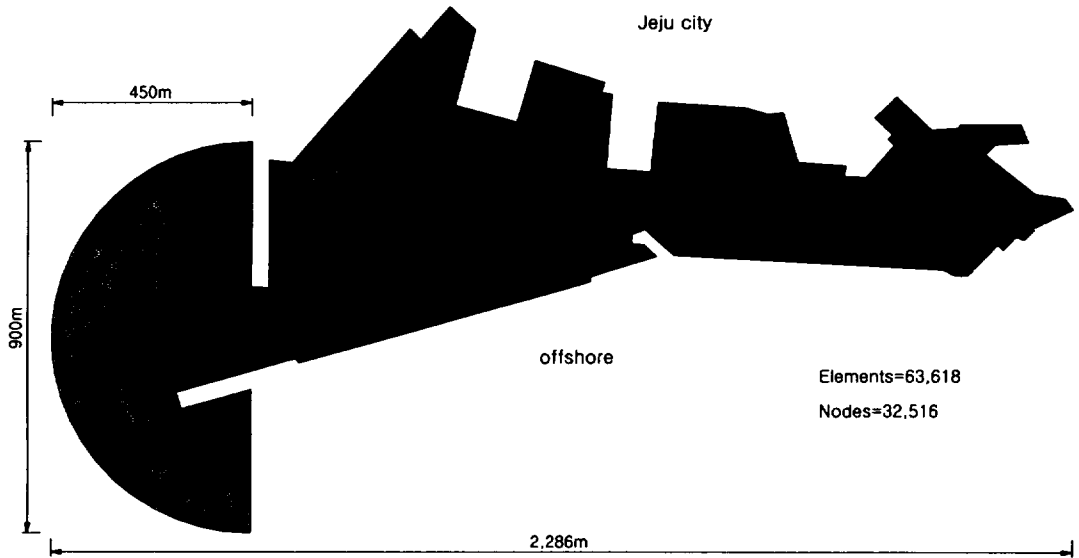


Fig. 8. Finite element mesh for Jeju Harbor.

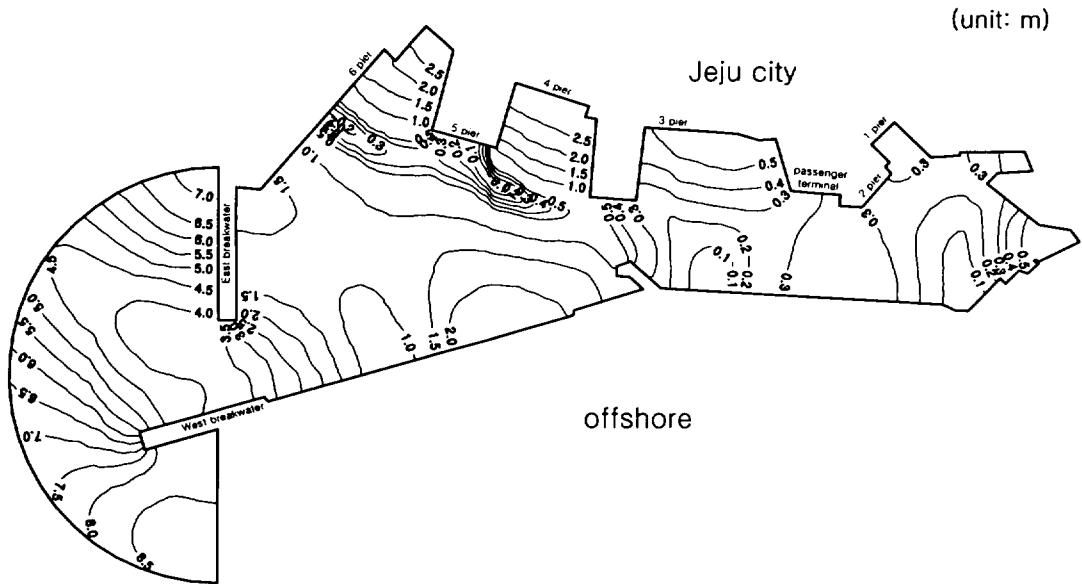


Fig. 9. Computed relative wave height in Jeju Harbor.

를 나타낸다. Fig. 5에 비교한 단면은 정선을 중심으로 세로방향으로 Line-1, Line-2, 가로방향으로 Line-3, Line-4 등 모두 4개의 단면이다. 먼저 Line-1, Line-2의 단면도의 세로방향에 관해서 검토해 보면, 공진조건에 의한 배와 절이 거의 일치하고 있고, Line-2에서

齊藤 等(1993)의 실험값만이 주방파제와 부방파제 사이의 항 입구 부분에서 약간 크지만 대체로 양호한 것을 알 수 있다. 가로방향의 Line-3, Line-4의 단면도를 검토해 보면, 공진조건에 의한 배와 절이 대부분 일치하고 있다.

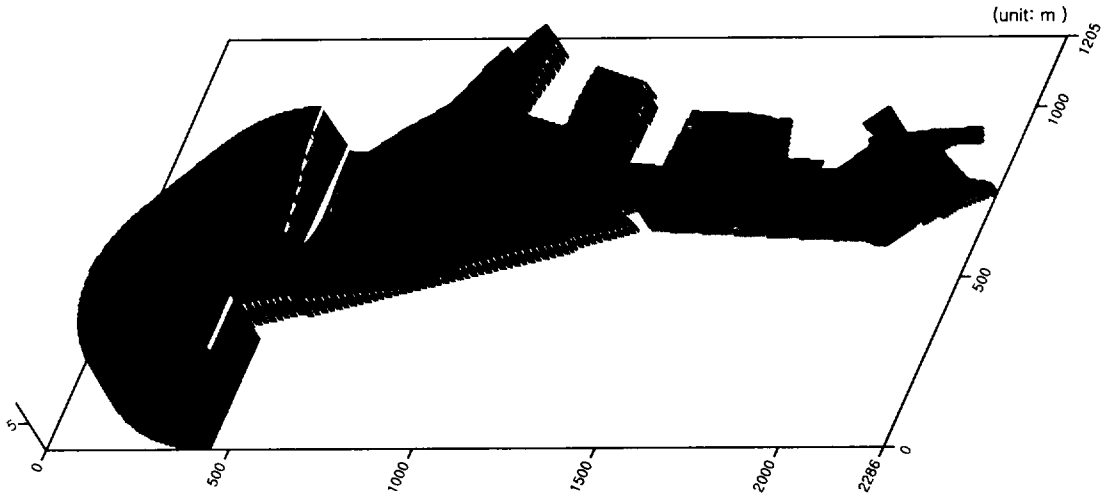


Fig. 10. Three dimensional wave height distribution in Jeju Harbor.

제주항의 정온도 유한요소해석

제주항은 제주도의 북쪽에 자리잡고 있으며, 연간 하역능력 2,135,000 ton, 동시접안능력 24척, 최대접안 능력은 20,000 ton인 제주도의 관문항이다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 제주항은 들출항으로 동서로 1.5 km, 남북 1.8 km이며, 항내의 수심은 2~11 m로 비교적 완만하다(Fig. 7). 외해와의 경계에는 방파제 2,969 m (동방파제 979 m와 서방파제 1,990 m)가 있고, 항내의 수면적은 790,000 m²이다.

제주항의 항내 정온도의 증폭현상을 예측하기 위하여 Fig. 8과 같이 삼각형 유한요소로 분할하였다. 분할된 유한요소의 절점수는 32,516개, 요소수는 63,618개이다. 요소의 분할은 Kashiya and Sakuraba(1994)가 제안하고 있는 파장과 요소크기의 비율이 10보다 커야한다는 조건을 만족하도록 분할하였다.

본 계산은 제주항의 심해설계파 조건에서 제시된 가장 큰 입사파고 7 m와 가장 긴 주기 11.0 sec를 사용하였고, 파향은 NNW를 사용하였다(정 등, 2000). 반사율은 소파구조에서의 반사계수 K_r 은 0.4, 직립구조에서의 반사계수 K_r 은 0.9로 했으며, 해저면 마찰계수 β 는 0으로 했다. Fig. 9는 제주항의 정온도 해석의 결과이다. 이 결과를 해양수산부(1999) 설계기준의 항내 파고 0.5~1.0 m의 값과 비교하면, 제4부두와

제6부두는 비교적 파고가 크며, 제1부두, 제2부두, 제3부두 등은 비교적 작은 파고를 나타내고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 10은 Fig. 9의 결과를 알기 쉽도록 하기 위해 3차원으로 나타낸 것이다.

요약 및 결론

본 연구에서는 항내 정온도를 계산하기 위하여, 수치해석모델의 기본방정식으로 저면마찰감쇄를 고려한 환경사방정식을 이용하였다. 직사각형 항만에서의 공간해석은 Ippen and Goda(1963) 및 Lee(1969)의 실험결과와 Chen(1986)의 수치해석결과와의 비교를 통하여 항만에서의 수치모델의 정확성이 확인되었다. 또, 임의 형상의 항만에서의 정온도 해석은 佐藤 等(1988) 및 Kashiya(1993)의 수치해석 결과와 齊藤 等(1993)의 실험데이터와의 좋은 일치를 보여 주었다. 제주항의 정온도 해석을 통하여 제주항내의 전수역에서의 파고분포를 예측하였고, 또 예측된 결과를 해양수산부(1999) 설계기준 값과 비교하여 항내 전수역에서 파고 높낮이의 경향을 알 수 있었다.

본 연구에서는 언급하지 않았지만, 김 등(2000)이 개발한 자동요소 생성기법을 다양한 형태로 구성되는 임의 형상의 항만에서도 적용이 가능하도록 개량하였

고, 또 단주기 입사파에 대해서도 충분한 수의 요소 분할을 할 수 있도록 계산 정도의 성능을 향상시켰다. 항후파제로서 제주항의 현지 관측을 실시하여, 본 연구 정온도 계산결과와 비교를 통해 어느 정도 정확한 예측이 가능한가 검토하는 것이다.

참고문헌

- 김남형역. 1995. 유한요소법유체해석. 원창출판사. 268 pp.
- 김남형역. 2002. 수치유체역학. 원기술. pp. 819-823.
- 김남형 · 박제선역. 1996. 유한요소법. 원창출판사. 273 pp.
- 김남형 · 양정필 · 박상길. 2000. 수심을 고려한 천해역에서의 자동요소 생성법. 한국항만학회. 14(1): 97-105.
- 박우선 · 전인식 · 정원무. 1994. 항만부진동 해석을 위한 무한요소. 한국해안 · 해양공학회지. 6(2): 139-149.
- 서승남 · 연영진. 1994. Galerkin 유한요소법에 의한 항내 정온도 모형. 한국해안 · 해양공학회지. 6(4): 439-451.
- 이철웅 · 이길성. 1994. 항만 및 해안공학파근에 따른 장주기파와 항만의 진동. 대한토목학회 논문집. 14(3): 607-618.
- 정원무 · 편종근 · 정신택 · 정경태. 1992. 복합요소법을 이용한 항내 파랑 응답 수치해석. 한국해안 · 해양공학회지. 4(1): 34-44.
- 정원무 · 박우선. 1996. 항만공진에 대한 복합요소 수치모형의 민감도 분석. 한국해안 · 해양공학회지. 8(2): 174-184.
- 정원무 · 이길성 · 박우선 · 정경태. 1998. 항입구 손실과 저면 마찰을 고려한 항만 부진동 유한요소 모형. 해양연구. 20(3): 285-306.
- 정태욱 · 김종인 · 류청노. 2000. 제주해역 항만 시설물의 수리환경적 특성에 관한 연구. 한국해양공학회지. 14(3): 1-10.
- 허명규 · 이종우. 2001. 공진 방파제를 이용한 항만 부진동의 저감. 한국항만학회지. 15(2): 191-200.
- 해양수산부. 1999. 항만 및 어항 설계기준. 상권. pp. 117-129.
- Berkhoff. J. C. W. 1972. Computation of combined refraction-diffraction. Proc. 13th International Conference on Coastal Engineering. ASCE. pp. 471-490.
- Chen. H. S. 1984. Hybrid element modelling of harbor resonance. 4th International Conference on Applied Numerical Modelling. pp. 312-316.
- Chen. H. S. 1986. Effects of bottom friction and boundary absorption on water wave scattering. Applied Ocean Research. 8(2): 99-104.
- Chen. H. S. and Houston. J. R. 1987. Calculation of water oscillation in coastal harbors: HARBS and HARBD user's manual. Instruction Report CERC-87-2. U.S Army Corps of Engineers. Waterway Experiment Station. 31 pp.
- Houston. J. R. 1981. Combined refraction and diffraction of short waves using the finite element method. Applied Ocean Research. 3(4): 163-170.
- Ippen. A. T. and Goda. Y. 1963. Wave induced oscillations in harbor: The solution for a rectangular harbor connected to the open sea. Report 59. Hydrodynamics Laboratory, MIT. 90 pp.
- Kashiyama. K. 1993. Numerical accuracy of a simplified finite element model for wave diffraction-refraction. Computational. Fluid Dynamics. 1: 305-320.
- Kashiyama. K. and Sakuraba. M. 1994. Adaptive boundary-type finite element method for wave diffraction-refraction in harbor. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 112: 185-197.
- Kashiyama. K. and Kawahara. M. 1988. A boundary-type finite element model for water surface wave problems. International Journal for Numerical Methods in Fluids. 8: 65-79.
- Lee. J. J. 1969. Wave induced oscillations in harbors

- of arbitrary shape. Report KH_R_20. W. M. KECK Lab. of Hydrodynamics and Water Resources. California Institute of Technology, Terminal Island, CA. 256 pp.
- 近藤浩右・清水琢三・山田耕一. 1987. グリーン関数法を用いた港内波方向スペクトル計算法. 第34回海岸工学講演會論文集. pp. 106-110.
- 西西村仁嗣・松岡道南・松本郎・篠田伸昌. 1993. グリーン関数法を用いた港内静穏度解析. 海岸工学論文集. 第40巻. pp. 51-55.
- 齊藤榮一・沖政和・清水琢三・鶴飼亮行・磯部雅彦. 1993. 港灣模型を用いた波の變形に特性する關研究. 海岸工学論文集. 40: 56-60.
- 佐藤典之・磯部雅彦・泉宮尊司. 1988. 任意港灣形狀に對する不規則波の港内波高分布の計算法の改良. 第35回海岸工学講演會論文集. pp. 257-261.
- 合田良實. 1990. 港灣構造物の耐波設計. 鹿島出版會. 333 pp.
- (김남형역. 1993. 항만구조물의 내파설계. 구미서관. 404 pp.)