

항내 준설에 의한 항만 공진의 저감 Reducing Harbor Resonance by Dredging of Harbor Basin

정원무* · 박우선* · 서경덕** · 이광수* · 김지희*

Weon Mu Jeong*, Woo Sun Park*, Kyung Doug Suh**, Kwang Soo Lee*, and Ji Hee Kim*

요 旨 : 얇은 수심 위를 전파하는 파가 갑자기 훨씬 깊은 수심을 만나면 더 이상 전파하지 못하고 반사된다는 사실이 잘 알려져 있다. 이러한 현상을 항만에 적용하여 항내 수심을 항외에 비하여 매우 깊게 만들면 항내로 침입하는 파를 수심이 급변하는 지점에서 반사시킴으로써 항만 정온도를 개선할 수 있을 것이다. 본 논문에서는 우선 완경사방정식 및 확장형 완경사방정식을 사용한 모형들을 입구에 급격한 수심 경사가 있는 직사각형 항만에서의 장주기 부진동에 적용한 결과 두 모형 사이에 차이가 거의 없음을 확인하였다. 이 수치모형을 항내 전체를 준설한 현실감 있는 모형 항만에 적용한 결과 기존 수심의 2배로 준설한 경우에는 저감 효과가 크지 않았으나 3배로 준설한 경우 선체운동에 악영향을 미칠 수 있는 주기 1~5분의 장주기파를 크게 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 또한 항내 수역의 일부만 준설하는 경우에도 준설된 지역에서 전체 준설의 경우와 비슷한 정도의 효과가 있음을 확인함으로써 이 방법이 항내 장주기파 저감 대책의 하나로 고려될 수 있음을 제시하였다.

핵심용어 : 장주기파, 항만 공진, 항내정온도, 유한요소 모형, 수심 급변, 준설

Abstract □ It is well known that when waves propagating on a shallow water suddenly encounter a much deeper water they do not propagate further but are reflected. If we apply this phenomenon to a harbor by making the harbor depth much greater than outside, we could improve the harbor tranquillity by making the waves impinging into the harbor be reflected at the harbor entrance. In the present paper, first we apply the numerical models based on the mild-slope equation and extended mild-slope equation to calculate the long wave resonances in a rectangular harbor with a very large depth discontinuity at its entrance to find that the difference between the models is almost negligible. By applying the numerical model to a realistic model harbor whose inside is entirely dredged, it is found that the effect of dredging is insignificant when the inside depth is twice the outside one but tripled inside depth significantly reduces the long waves of period of one to five minutes which may exert a bad influence on ship motion. Moreover, even when only a portion of the harbor basin is dredged, the effect of dredging in the dredged area is found to be comparable to that of entire dredging, showing that the dredging of harbor basin can be a countermeasure for harbor resonance.

Keywords : Long-period waves, Harbor resonance, Harbor tranquillity, Finite element model, Depth discontinuity, Dredging

1. 서 론

항내에서의 하역 장애를 일으키는 선체운동은 장주기

수위진동과 繫留索의 공진에 의해 주로 발생하는 것으로 알려지고 있다[Hiraishi *et al.*(1997) 참조]. 이에 대한 대책으로는 방파제나 消波堤에 의해 안벽 전면의 장

*한국해양연구원 연안·항만공학연구본부(Coastal and Harbor Engineering Research Center, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P. O. Box 29, Seoul 425-600, Korea)

**서울대학교 지구환경시스템공학부 및 해양시스템공학연구소(School of Civil, Urban and Geosystem Engineering & Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

주기 파고를 감소시키는 방법과 繫留索이나 방충재의 재질을 변경하여 고유주기를 바꿈으로써 공진을 방지하는 방법 등을 생각할 수 있다. 또한 항내는 보통 직립 안벽으로 둘러싸여 있기 때문에 장주기파의 에너지도 대부분 항내의 다중반사의 영향을 받아서 증대되는 것으로 생각할 수 있다. 따라서, 장주기 파고 감소 방안에는 항내에 소파 시설을 설치하여 장주기파의 다중 반사를 억제하여 파의 증폭을 억제하는 대책도 포함된다. 이 외에도 장주기파의 발생을 미리 예측하여 이의 발생시에 하역작업을 중지하거나, 항내 구역의 일부를 준설하여 공진 형태의 변화 및 진폭비의 감소를 도모하는 방법도 생각할 수 있다.

남아프리카 공화국의 NRIO(National Research Institute for Oceanography)에서는 축척 1:120의 모형을 사용한 수리실험과 Leendertse(1967)의 모형을 개선한 수치모형을 Table Bay Harbor에 적용한 결과를 종합하여 방파제의 적절한 배치가 주기 50~200초의 장주기파 감소에 대한 유력한 대책안이 됨을 제시하였다(Bruun, 1989). 平石 等(1996)은 방파제의 배치가 단순하고 입구폭이 비교적 넓은 能大港에서는 항외의 장주기파가 감쇠되지 않고 항내로 침입하지만 那霸港과 같이 방파제 배치가 복잡하고 장주기파의 침입 방향과 거의 직교하도록 배치된 방파제를 가진 항만에서는 항의 깊숙한 부분에서의 장주기 파고가 작아지는 현상을 발견하였다. Hiraishi *et al.*(1997)은 선체운동과 밀접한 관계가 있는 주기 0.5~5.0분의 파에 대한 방파제의 차단 효과에 대해 검토하고 그 적용성을 확인하였다. 그러나 이러한 방안은 주로 소규모 항만에 적용되었으며, 항입구폭의 축소나 방파제를 파의 입사 방향과 직교하도록 배치하는 방안은 항로의 안전성이나 선박의 조종성에 큰 영향을 미침에 유의해야 한다.

Shiraishi *et al.*(1996)은 能大港의 繫留索 절단 사고의 원인 조사를 통하여 나일론 로프(직경 90 mm)에 의한 계류 시스템의 전후동요(surge)의 고유주기가 약 140초이며, 이것이 안벽 전면의 장주기파의 탁월 주기의 하나인 약 150초와 거의 일치한 점이 그 원인인 것으로 판단하였다. 이들은 새로운 繫留索으로 와이어 로프와 같이 신축률이 매우 작은 테크미론 로프(직경 60 mm)의 사용을 검토하였으며, 이를 사용하면 계류 시스템의 고유주기를 대폭 짧게 할 수 있음을 확인하였다. 단, 테크미론 로프는 신축률이 작기 때문에 작은 동요에도 장력이 커지고 통상의 파랑 성분예에 의한 동요로 로프가

절단될 가능성이 있으므로 선수와 선미에는 나일론 로프를 병용하는 경우에 대해 검토하였다. 그 결과 계류 시스템의 전후동요의 고유주기가 140초에서 80초로 짧아졌다. 한편, 계류 시스템의 수평이동(sway) 방향의 방충재의 변위복원력 특성의 비대칭성이 강할 때는 부차적 저주파수 조화운동(sub-harmonic motion)이 발생하는 점이 잘 알려져 있다(Ueda, 1984). 이 운동의 진폭이 커지는 것은 선체에 작용하는 풍하중이 작더라도 너울 성분의 파랑이 선체의 측면으로부터 작용할 때이다. 통상 사용되는 정반력형의 방충재 대신 공기식 반력점증형의 방충재를 사용하면 부차적 저주파수 조화운동의 진폭을 상당히 감소시킬 수 있는 것으로 제시되었다(白石 等, 1995; Shiraishi *et al.*, 1996)

한편, 선체운동과 공진을 일으킬 가능성이 큰 주기인 수 분 이하의 장주기파의 에너지를 효과적으로 흡수할 수 있는 우수한 소파 시설의 설치를 통해 항내 증폭을 감소시킬 수 있을 것으로 생각되나 이에 대해서는 현재까지 뚜렷한 연구 성과가 제시되지 않고 있다.

지진해일(tsunami)의 내습에 의한 항만 공진은 비점성 선형 장파 이론의 범주 내에서는 지금까지 많은 연구가 수행되어져 왔다. Raichlen *et al.*(1983)은 항만 외곽시설의 배치와 외해의 해저 지형이 항만 공진의 증폭과 감쇠에 중요한 역할을 함을 명백하게 입증하였다. Momoi(1976)와 Liu(1983)는 항만 공진과 대륙붕 상을 전파하는 파의 상호작용을 해석적으로 연구하였다. 그들은 대륙붕을 해안선에 평행한 띠 형태의 계단들로 모델링하였다. Liu(1983)는 대륙붕의 존재로 인해 항만 공진이 크게 증가됨을 수치적으로 입증하였다. 또한, Liu(1986)는 정합점근전개법을 사용하여 외해측 반원형 경계를 따라 수심 불연속이 존재하는 경우 항만에서의 공진에 대한 해석해를 제시하였다. 그러나 그의 해석해는 오류를 포함하고 있다. 그의 연구에서 진폭비의 증가는 주로 두 가지 인자에 기인되는 것으로 제시되었다. 첫째는 파가 해저 수심 불연속에 의해 포획되어 항입구 부근의 파랑 진폭이 증가되는 것으로 생각할 수 있다. 둘째는 방사 감쇠가 제1 공진주파수 부근에서는 거의 0이 되는 점이다. 그는 장파가 내습하기 쉬운 항만을 설계할 때는 항만 외부의 해저지형을 고려하여야 함을 결론적으로 제시하였다. 이에 관련된 연구로 최근 Hiraishi *et al.*(1997)은 항내 준설을 통한 일부 구역의 수심 증가 또는 항내 유수지의 설치 등을 통한 장주기파 감소 대책을 수치모형실험을 통하여 연구하였으나 개선된 효

과를 얻지 못하였다. 단, 이 경우 유한차분 모형이 사용되었으며 복합요소 모형 또는 본 논문의 유한요소 모형 등과 같은 다른 부진동 수치모형을 이용한 검토의 필요성도 있는 것으로 생각된다.

항만 내부의 진폭비를 감소시키는 관점에서는 Liu (1986)가 사용한 해저 지형과 정반대로 항내의 수심을 깊게 하는 경우를 생각할 수 있다. 이러한 지형에서는 입사파가 항내의 깊은 수심으로 전파하기가 어렵고, 역으로 방사파는 외해로 보다 쉽게 전파해 나갈 수 있다. 본 연구에서는 완경사방정식과 확장형 완경사방정식에 기초한 Galerkin 유한요소 모형을 항입구에서 수심 경사가 큰 직사각형 항만에 적용하고 그 결과를 상호 비교함으로써 수심 급변에 대한 장주기파의 반응을 검토한다. 다음으로 이 수치모형을 항내 전체를 준설한 모형 항만에 적용하여 준설에 의한 항만 공진의 제어 또는 감쇠를 검토한다. 또한 항내 수역의 일부만 준설하는 경우에 대해서도 검토함으로써 전체 준설의 경우와 비교한다.

2. 유한요소 모형

본 연구에서 사용한 유한요소 모형에 대해서는 정 등 (1998)과 정(1999)에 자세하게 기술되어 있으므로 모형에 대한 상세한 내용은 이들을 참조할 수 있을 것이며, 이하에서는 이해를 돕기 위해 개략적으로 기술한다. 단, 이들의 연구를 통해 Chen(1986)이 제시한 해저면 마찰 계수의 경우 비현실적으로 큰 값을 사용해야 공진 모드의 특성에 변화가 나타났으므로 본 연구에서는 해저면 마찰은 고려하지 않았다.

2.1 지배방정식

본 연구에서는 경계치 문제를 정식화하기 위하여 Fig. 1에 제시한 바와 같이 직교좌표계(x, y)와 원통좌표계(r, θ)를 모두 사용하였다. 후자에서 r 은 직교좌표계의 원점에서 방사상의 거리이며, θ 는 Fig. 1에 표시된 것처럼 양의 x 축에서 반시계 방향으로 측정된 각도를 나타낸다. 비점성, 비압축성 유체에서의 비회전류를 가정하면 속도포텐셜이 도입될 수 있다. 또한, 규칙 파열을 고려하며 미소 진폭을 가정하여 선형파 이론을 사용한다.

대상 영역을 항내를 포함하는 유한요소 영역 Ω_1 과 이를 둘러싼 무한요소 영역 Ω_2 로 분리하고, 영역 Ω_1 에서는 수심이 변하지만 영역 Ω_2 에서는 일정한 수심을 고

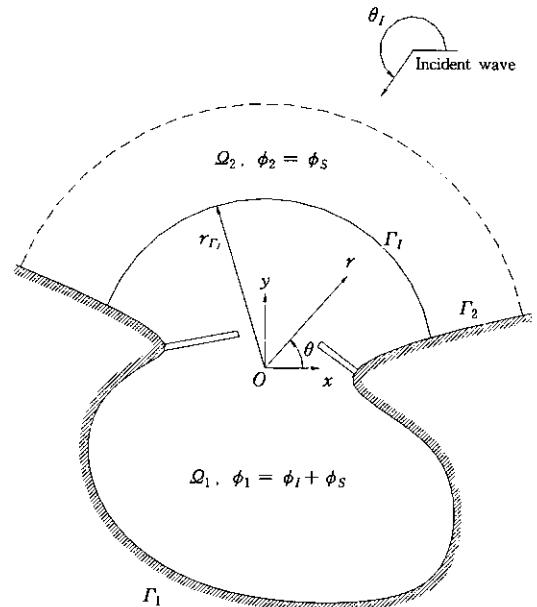


Fig. 1. Definition sketch for the boundary value problem.

려한다. 영역 Ω_1 과 Ω_2 에서의 속도포텐셜은 입사파 포텐셜 ϕ_i 와 산란파 포텐셜 ϕ_s 로 분리하여 표현할 수 있는데 영역 Ω_1 에서는 이들의 합인 $\phi_1 = \phi_i + \phi_s$ 가 미지수가 되며, 영역 Ω_2 에서는 입사파 포텐셜 ϕ_i 를 기지의 값으로 가정하므로 $\phi_2 = \phi_s$ 를 미지수로 하였다.

파동장은 기존의 Berkhoff(1972)의 완경사방정식에 고차의 수심 변화항과 저면에서의 마찰 손실이 포함된 다음의 확장형 완경사방정식(Massel, 1993; Chamberlain and Porter, 1995; Suh *et al.*, 1997)을 사용하여 나타내었다.

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \phi_i) + \frac{C_g}{C} \omega^2 \phi_i - \omega^2 \{R_1 (\nabla h)^2 + R_2 \nabla^2 h\} \phi_i = 0 \quad (1)$$

여기서 ∇ 은 (x, y) 평면에서의 수평미분연산자이고, ϕ_i 는 수평 2차원 공간 복소 포텐셜로 $i=1$ 은 유한요소 영역을, $i=2$ 는 무한요소 영역을 나타내며, $h(x, y)$ 는 수심을 나타낸다. 또, C 는 위상 속도, C_g 는 군속도, ω 는 각주파수를 나타내며, R_1 과 R_2 는 각각 해저면 경사의 제곱과 곡률에 관련된 계수(Massel, 1993; Suh *et al.*, 1997)이다. 한편, 위상 속도 C 와 군속도 C_g 는 다음 식으로 주어진다.

$$C = \sqrt{\frac{g \tanh kh}{k}} \quad (2)$$

$$C_g = \frac{C}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \quad (3)$$

여기서, g 는 중력가속도, k 는 파수를 각각 나타낸다.

2.2 경계조건

파 에너지 흡수 효과를 고려하기 위하여 고체 경계면을 따라서 Mei and Chen(1975)이 제시한 부분반사 경계조건을 수정한 서·연(1994)의 결과를 사용하였다. 즉, 영역 Ω_1 과 Ω_2 의 고체 경계면 Γ_1 과 Γ_2 를 따라서 다음과 같은 부분반사 경계조건을 사용하였다.

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial n} = \alpha \phi_1 \quad \text{on } \Gamma_1 \quad (4a)$$

$$\frac{\partial(\phi_2 + \phi_I)}{\partial n} = \alpha(\phi_2 + \phi_I) \quad \text{on } \Gamma_2 \quad (4b)$$

여기서, n 은 고체 경계면에 대한 외향 법선 벡터이며, α 는 다음 식으로 주어진다(서·연, 1994).

$$\alpha = ik \cos \theta_i \frac{1 - K_r}{1 + K_r} \quad (5)$$

여기서, K_r 은 고체 경계면에서의 경험적 반사계수이며 일반적으로 파의 주파수와 진폭 및 고체 경계면의 특성에 따라 결정된다. θ 은 고체 경계면으로 입사하는 파의 법선 방향으로부터의 각을 의미하는데 일반적으로 대상 영역내에서는 다중 반사가 일어나므로 어떤 일정한 값으로 정의하기가 어려우며 통상 θ 을 0° 로 하여 계산하는 경우가 많다.

유한요소 영역 Ω_1 과 무한요소 영역 Ω_2 의 원호 경계면 Γ_r 를 따라서는 다음과 같은 정합조건을 만족해야 한다.

$$\phi_1 = \phi_2 + \phi_I \quad (6a)$$

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial n} = -\frac{\partial(\phi_2 + \phi_I)}{\partial n} \quad (6b)$$

무한요소내의 속도포텐셜, ϕ_2 는 무한 원방에서 다음의 방사 경계조건(Sommerfeld, 1896)을 만족하여야 한다.

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{r} \left(\frac{\partial \phi_2}{\partial r} - ik \phi_2 \right) = 0 \quad (7)$$

입사파가 θ_i 의 각도로 진입할 경우의 속도포텐셜 ϕ 는 다

음과 같이 주어진다.

$$\phi_I = -\frac{ig a_0}{\omega} e^{ikr \cos(\theta - \theta_i)} \quad (8)$$

여기서, a_0 는 입사파의 진폭을 의미한다.

2.3 유체 영역의 이산화

통상적인 유한요소 해석 방법으로 유체 영역을 이산화하기 위해서는 해석 영역을 적당한 유한요소로 나타내고 각 요소 내의 미지 속도포텐셜, ϕ 를 요소(e)의 절점 포텐셜 벡터, $\{\phi_e^i\}$ 와 미리 규정한 보간 함수 벡터, $\{N\}$ 으로 근사하는 것이 필요하다. 즉,

$$\phi_i = \{N\}^T \{\phi_e^i\} \quad (9)$$

Galerkin의 방법을 이용하면 상기 경계치 문제는 적분 형태로 표시되는 약형(weak form)으로 치환하여 근사해를 구할 수 있다. 우선 요소의 보간 함수 $\{N\}$ 을 가중 함수로 사용하여 다음과 같이 각 요소의 잔차(residual)를 정의한다:

$$\{R^e\} = -\int_{\Omega_e^i} \{N\} \left[\nabla \cdot (CC_g \nabla \phi_i) + \frac{C_g}{C} \omega^2 \phi_i - \omega^2 \{R_1(\nabla h)^2 + R_2 \nabla^2 h\} \phi_i \right] d\Omega_e^i \quad (10)$$

Green의 제2 정리를 이용하고 경계조건들을 도입하여 각 요소의 시스템 행렬을 조합한 후, 잔차를 0으로 취하면 전체 행렬은 다음과 같이 구해진다:

$$\sum_e^n \{ ([K_{\Omega_1}^e] + [K_{\Gamma_r}^e]) \{\phi_e^i\} + \{F_{\Gamma_r}^e\} + \{F_{\Gamma_n}^e\} \} = \{0\} \quad (11)$$

여기서, 각 요소의 시스템 행렬, $[K_{\Omega_1}^e]$, $[K_{\Gamma_r}^e]$, $\{F_{\Gamma_r}^e\}$, $\{F_{\Gamma_n}^e\}$ 는 다음과 같이 각 영역에 대해서 주어진다. 내부 영역(Ω_1)에서는

$$[K_{\Omega_1}^e] = \int_{\Omega_e^i} CC_g \left[\left\{ \frac{\partial N}{\partial x} \right\} \left\{ \frac{\partial N}{\partial x} \right\}^T + \left\{ \frac{\partial N}{\partial y} \right\} \left\{ \frac{\partial N}{\partial y} \right\}^T \right] - \omega^2 \left(\frac{C_g}{C} - \{R_1(\nabla h)^2 + R_2 \nabla^2 h\} \right) \{N\} \{N\}^T d\Omega_e^i \quad (12a)$$

$$[K_{\Gamma_r}^e] = \int_{\Gamma_r} CC_g \alpha \{N\} \{N\}^T d\Gamma_r \quad (12b)$$

$$\{F_{\Gamma_r}^e\} = \{0\} \quad (12c)$$

$$\{F_{\Gamma_n}^e\} = -\int_{\Gamma_r} CC_g \frac{\partial(\phi_2 + \phi_I)}{\partial n} \{N\} d\Gamma_r \quad (12d)$$

으로 주어지며, 외부 영역(Ω_2)에서는

$$[K_{\Omega_2}^e] = \int_{\Omega_2} \left[CC_g \left(\left\{ \frac{\partial N}{\partial r} \right\} \left\{ \frac{\partial N}{\partial r} \right\}^T + \frac{1}{r^2} \left\{ \frac{\partial N}{\partial \theta} \right\} \left\{ \frac{\partial N}{\partial \theta} \right\}^T \right) - \omega^2 \left(\frac{C_g}{C} - \{R_1(\nabla h)^2 + R_2 \nabla^2 h\} \right) \{N\} \{N\}^T \right] d\Omega_2 \quad (13a)$$

$$[K_{\Gamma_2}^e] = \int_{\Gamma_2} CC_g \alpha \{N\} \{N\}^T d\Gamma_2 \quad (13b)$$

$$\{F_{\Gamma_2}^e\} = \int_{\Gamma_2} CC_g \left(\alpha \phi_l - \frac{\partial \phi_l}{\partial n} \right) \{N\} d\Gamma_2 \quad (13c)$$

$$\{F_{\Gamma_2}^e\} = - \int_{\Gamma_2} CC_g \frac{\partial(\phi_1 - \phi_l)}{\partial n} \{N\} d\Gamma_2 \quad (13d)$$

로 주어진다. 내부 영역은 3절점 삼각형 요소로 분할하였으며 수치계산상의 편의를 위해 각 유한요소 내에서 수심 h , 해저면 경사의 제곱 $(\nabla h)^2$, 해저면 곡률 $\nabla^2 h$ 는 일정한 값을 취하였다.

무한 원방에서의 방사조건을 효율적으로 모형화하고 외부 영역(Ω_2)의 해안선을 따른 파 에너지 흡수를 적절하게 고려하기 위하여 두 가지 무한요소를 사용하였다. 2절점 무한요소는 외부 유체 영역의 이산화에 사용되며, 1절점 무한요소는 외부 영역의 해안선을 따른 에너지 흡수 효과를 모형화하는 데 사용된다. 무한요소의 형상함수에 대해서는 정 등(1998)에 자세하게 제시되어 있으므로 여기서는 생략한다.

식 (13)으로 주어지는 무한요소의 시스템 행렬은 다음과 같이 해석적으로 구성할 수 있다.

$$[K_{\Omega_2}^e] = A_1 [K_{\theta\theta}] + A_2 [K_{\theta r}] - A_3 [\bar{K}_{\theta\theta}] \quad (14)$$

$$[K_{\Gamma_2}^e] = A_4 CC_g \quad (15)$$

$$\{F_{\Gamma_2}^e\} = A_5 CC_g \frac{ig a_0}{\omega} [ik(n_x \cos \theta_l + n_y \sin \theta_l) - \alpha] \quad (16)$$

여기서 n_x 와 n_y 는 각각 경계 Γ_2 에 대한 외향 법선 벡터의 x 및 y 성분이며, $A_i (i=1 \sim 5)$ 는 식 (13)을 무한 방향으로 적분함으로써 나타나는 복소 계수들이다[정 등(1998) 참조]. 한편, $[K_{\theta\theta}]$, $[\bar{K}_{\theta\theta}]$, $[K_{\theta r}]$ 는 각각 다음 식들로 정의된다.

$$[K_{\theta\theta}] = \int_{\theta} CC_g \{N_{\theta}\} \{N_{\theta}\}^T d\theta = CC_g \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \frac{\theta}{6} \quad (17)$$

$$[\bar{K}_{\theta\theta}] = \int_{\theta} \frac{C_g}{C} \omega^2 \{N_{\theta}\} \{N_{\theta}\}^T d\theta = \frac{C_g}{C} \omega^2 \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \frac{\theta}{6} \quad (18)$$

$$[K_{\theta r}] = \int_{\theta} CC_g \left\{ \frac{\partial N_{\theta}}{\partial \theta} \right\} \left\{ \frac{\partial N_{\theta}}{\partial \theta} \right\}^T d\theta = \frac{CC_g}{2\theta} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

여기서 θ 는 요소의 각을 나타낸다.

내부 영역에서는 전체 속도 포텐셜이, 그리고 외부 영역에서는 산란파 속도 포텐셜이 미지수가 된다. 따라서, 내부 영역과 외부 영역의 미지 속도 포텐셜을 통합시키는 것이 필요하다. 식 (6a)의 整合 境界條件을 사용하면 전체 시스템 행렬은 다음과 같이 구성된다.

$$\sum_e^n \{([K_{\Omega_2}^e] + [K_{\Gamma_2}^e]) \{\phi^e\} + \{F_{\Gamma_2}^e\} + \{F_{\Gamma_1}^e\}\} = \{0\} \quad (20)$$

여기서

$$[K_{\Omega_2}^e] = [K_{\Omega_2}^e] + [K_{\Gamma_2}^e] \quad (21)$$

$$[K_{\Gamma_1}^e] = [K_{\Gamma_1}^e] + [K_{\Gamma_2}^e] \quad (22)$$

$$\{F_{\Gamma_1}^e\} = \{F_{\Gamma_2}^e\} \quad (23)$$

$$\{F_{\Gamma_1}^e\} = - \int_{\Gamma_1} CC_g \frac{\partial \phi_l}{\partial n} \{N\} d\Gamma_1 - ([K_{\Omega_2}^e] + [K_{\Gamma_2}^e]) \{\phi^e\} \quad (24)$$

이며, $\{\phi^e\}$ 는 절점에 해당되는 입사파 속도 포텐셜의 벡터를 나타낸다.

3. 수심 급변에 대한 장주기파의 영향 검토

급경사면을 단주기파가 지나는 경우 기존의 환경사방 정식 대신 확장형 환경사방정식을 사용해야 정확도가 향상되는 것은 일반적으로 인정되고 있으나 장주기파에 대해서는 아직까지 뚜렷한 연구 성과가 제시되지 않고 있다. 물론 Helmholtz 공진 모드를 유발하는 것과 같이 주기가 수심 분으로 매우 긴 장주기파의 경우 급경사면이 거의 영향을 미치지 않을 것으로 유추할 수 있으나 저중력파와 같이 주기가 수 분 이하인 장주기파의 경우 수심 고차항의 영향을 확인할 필요가 있다.

본 연구에서는 항입구에서 내측으로 급경사가 있는 폭 300 m, 길이 750 m의 직사각형 항만에서의 부진동 해석에 환경사방정식 모형과 확장형 환경사방정식 모형을 각각 적용하여 수심 고차항의 영향을 검토하였다. 항외 수심은 10 m, 항내 수심은 110 m로 일정하며 수심 변동폭을 50 m로 설정하여 2:1의 급경사가 되도록 구성하였다. 이 경우의 유한요소망도는 항입구의 중앙에 위

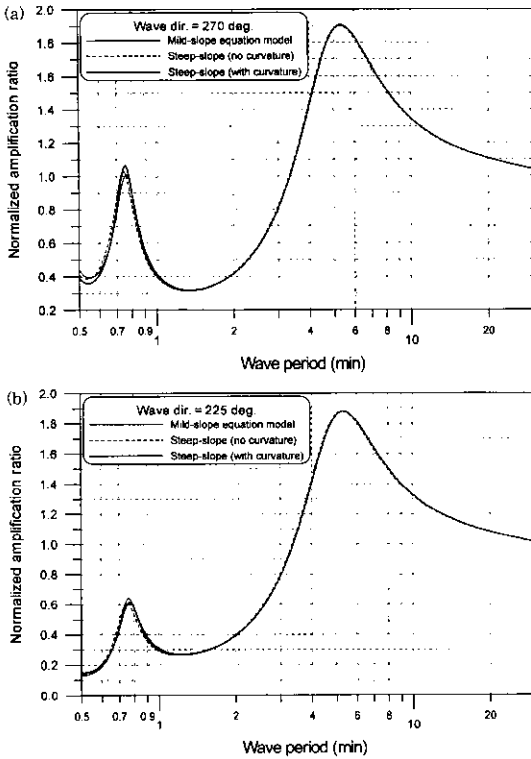


Fig. 2. Comparison of response curves obtained by mild-slope equation model and extended mild-slope equation model at the innermost point P of a rectangular harbor having steep slope at its mouth.

치한 원점에서 원호 경계면까지의 거리 R 을 450 m로 하였으며, 1,111개의 절점, 2,051개의 3절점 선형 3각형 요소 및 63개의 2절점 무한 요소로 구성되었다. 요소망도의 작성시에는 절점간의 최대 거리를 24.5 m 이하로 제한하여 수치계산 시에 사용한 최단 주기인 30초의 입사파 파장(수심이 10 m인 경우 약 295 m)에 약 12개를 포함시킴으로써 충분한 정확도가 유지되도록 하였다. 수치계산 시에 고체 경계면에서의 반사율은 편의상 모든 경계에서 완전 반사를 가정하였다.

Fig. 2(a), (b)에는 주기 0.5~30분의 입사파가 항에 대해 각각 수직 또는 45° 비스듬하게 입사하는 경우 港奥의 중앙에서 계산된 무차원 진폭비를 도시하였다. 여기서는 가는 실선이 환경사방정식, 점선이 경사의 제곱항만을 포함한 확장형 환경사방정식, 그리고 굵은 실선이 수심 고차항을 모두 포함한 확장형 환경사방정식을 사용한 모형에 의한 결과들을 각각 나타낸다. 이를 살펴보면 주기 5~6분 사이의 Helmholtz 공진 모드 부근

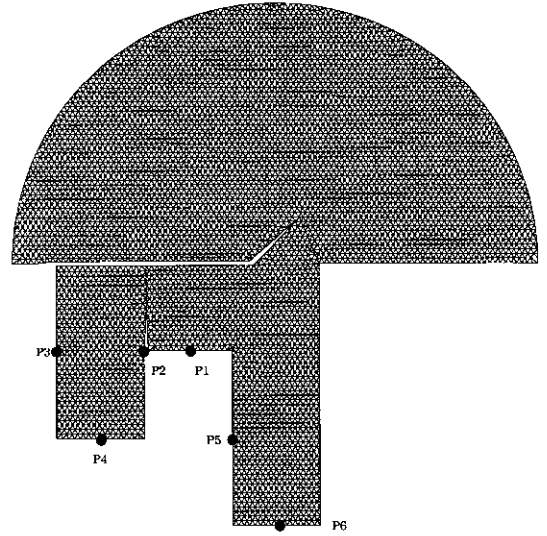


Fig. 3. Finite element meshes and designated calculation points for model harbor.

은 물론 주기 0.7~0.8분 사이의 제2 공진의 경우에도 서로 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 이 결과에 따르면 주기 30초 이상인 장주기과의 경우 급경사면이 존재하더라도 환경사방정식을 사용한 모형으로 충분한 정확도를 확보할 수 있는 것으로 판단된다. 한편, Fig. 2(a)와 (b)를 비교해보면 비스듬하게 입사하는 경우에 비해 수직 입사하는 경우에 수심 고차항의 효과가 약간 더 크게 나타나고 있다.

4. 수심 급변을 이용한 부진동 제어

여기서는 항내 전체 또는 일부의 수심을 깊게 함으로써 부진동의 공진 주기나 진폭비를 제어하는 방법에 대해 검토한다. 이를 위해 Fig. 3에 제시한 바와 같이 확장전 동해항의 평면을 약간 단순화시킨 모형 항만을 구성하였다. 이 모형 항만의 전체 폭은 1,200 m, 오른쪽 수역(제1 수역)의 길이는 1,200 m, 왼쪽 수역(제2 수역)의 길이는 800 m이며 각 수역의 폭 및 두 수역 사이의 거리는 각각 400 m이다.

Fig. 3의 유한요소망에서 반원형으로 나타낸 부분의 반경 R 은 1,200 m로 하였다. 이 요소망도는 6,430개의 절점, 12,323개의 3절점 선형 3각형 요소 및 171개의 2절점 무한 요소로 구성되었다. 요소망도의 작성 시에는 절점간의 최대 거리를 24.5 m 이하로 제한하여 수치계산 시에 사용한 최단 주기인 24초의 입사파 파장(수심

이 10 m인 경우 약 235 m)에 약 10개를 포함시킴으로써 충분한 정확도가 유지되도록 하였다. 한편, 수심은 준설을 하지 않는 경우 전체 영역에서 10 m로 일정한 것으로 가정하였다. 그리고, Fig. 3에는 각 부두에서의 공진 특성을 비교·검토하기 위하여 설정한 P1~P6의 6개 정점을 제시하였다. 수치계산 시에 고체 경계면에서의 반사율은 편의상 모든 경계에서 완전 반사를 가정하였다.

수치계산은 입사파 주기 24~1,800초의 범위에서 실시하되, 주기 1,200~1,800초에서는 10초, 480~1,200초에서는 5초, 240~480초에서는 2초, 120~240초에서는 1초, 60~120초에서는 0.5초, 그리고 24~60초에서는 0.3초로 시간 간격을 설정하였다. 단, 주기 1,076초와 466초 주변에서 발생하는 이 모형 항만의 제1 및 제2 공진 모드 주변에서는 시간 간격을 1초로 설정하여 보다 상세하게 알 수 있게 하였다. 한편, 동해향에서 주로 발생하는 폭풍파의 파향인 NE와 비슷한 300°와 특수 부두(제2 수역에 해당됨)의 정온도 저하를 초래하는 ESE에 가까운 230°를 입사 파향으로 고려하였다.

4.1 일정수심의 모형 항만에서 발생하는 부진동의 특성

Fig. 4에는 전체 수심이 10 m로 일정한 모형 항만에

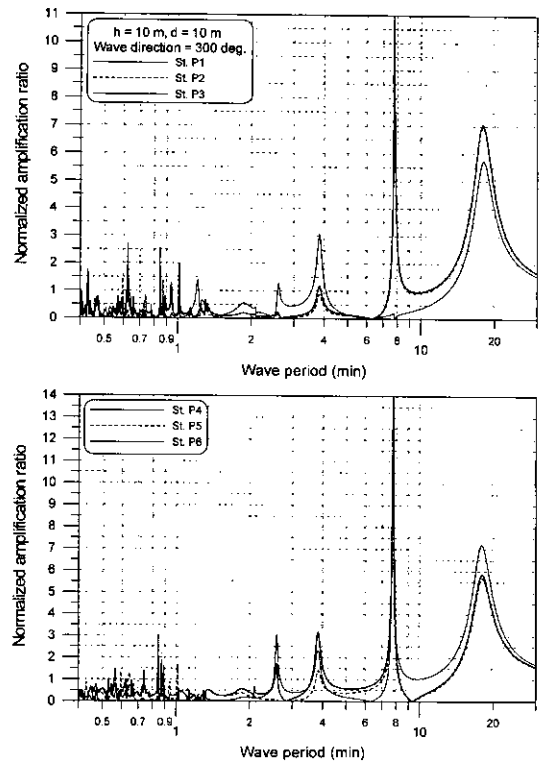


Fig. 4. Computed normalized amplification ratios at stations P1~P6 in a model harbor for wave periods of 24 to 1,800 seconds(incident angle = 300°).

Table 1. Characteristics of resonant peaks in a model harbor(incident angle = 300°).

Seiches		Stations					
		P1	P2	P3	P4	P5	P6
First	Period(s)	1,080.0	1,076.0	1,076.0	1,076.0	1,080.0	1,080.0
	N.A.R.	5.73	6.97	7.05	7.21	5.69	5.85
Second	Period(s)	-	466.0	466.0	466.0	466.0	466.0
	N.A.R.	-	10.25	10.96	12.44	11.93	13.99
Third	Period(s)	229.0	230.0	230.0	229.0	230.0	230.0
	N.A.R.	3.08	*0.88	*1.20	2.35	*1.42	3.18
Fourth	Period(s)	156.0	-	-	155.0	-	155.0
	N.A.R.	*1.30	-	-	3.08	-	*1.73
Fifth	Period(s)	61.0	61.0	61.0	-	61.0	-
	N.A.R.	*0.62	*1.64	*1.98	-	*1.65	-
Sixth	Period(s)	-	52.2	52.2	52.2	52.2	52.2
	N.A.R.	-	*1.37	*0.67	2.18	*1.38	*0.54
Seventh	Period(s)	50.7	50.7	-	-	50.7	50.7
	N.A.R.	2.56	*0.89	-	-	2.28	2.98
Eighth	Period(s)	37.5	-	37.5	-	-	-
	N.A.R.	2.72	-	*1.61	-	-	-

N.A.R.: Normalized amplification ratio, *: A resonant peak of which N.A.R. is less than 2.0.

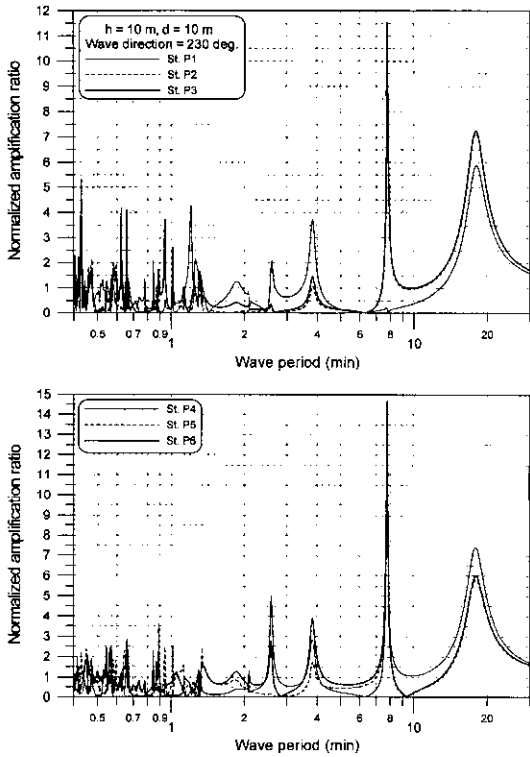


Fig. 5. Computed normalized amplification ratios at stations P1~P6 in a model harbor for wave periods of 24 to 1,800 seconds(incident angle = 230°).

입사하는 파향이 300°인 경우 정점 P1~P3(그림의 상부)와 P4~P6(그림의 하부)에서 계산된 무차원 진폭비 [각 정점에서의 중폭파고/입사 중폭파고, $|η|/(2a_0)$]를 도시하였다. 이들을 살펴보면 주기 1,076초와 466초 주변에서 공통적으로 제1 및 제2 공진 모드가 출현하며, 편의상 무차원 진폭비가 2를 초과하는 경우만 고려하면 주기 4분 이하에서 정점에 따라 1~2개의 공진 모드가 나타나고 있다. 이 경우에 정점 P1~P6에서 나타나는 중요한 공진 모드들을 Table 1에 정리하였으며, 이를 살펴보면 입사파향이 300°인 경우 모형 항만에서는 제1 및 제2 공진 모드 이외에도 주기 3분 이하에서 진폭비가 2~3인 모드가 4개 정도 나타남을 알 수 있다.

Fig. 5는 입사파향이 230°인 경우 정점 P1~P3(그림의 상부)와 P4~P6(그림의 하부)에서 계산된 무차원 진폭비를 도시한 것이다. 이 경우에도 주기 1,076초와 466초 주변에서 공통적으로 제1 및 제2 공진 모드가 출현하나 진폭비가 약간 증가되었으며, 주기 4분 이하에서는 정점에 따라 4~6개의 공진 모드가 나타나며 진폭

비도 파향이 300°인 경우에 비해 크게 증가되는 것으로 나타난다. 이 경우에 정점 P1~P6에서 나타나는 중요한 공진 모드들을 Table 2에 정리하였으며, 이를 살펴보면 입사파향이 230°인 경우 모형 항만에서는 제1 및 제2 공진 모드 이외에도 주기 3분 이하에서 진폭비가 3~5인 모드가 7개 정도 나타남을 알 수 있다. 한편, 이 표에서는 Fig. 5에서는 나타나지만 복잡성을 고려하여 상대적인 중요도가 작은 주기 2분 이하의 공진들을 다수 제외하였다.

입사 파향으로 300°와 230°를 사용한 결과 중에서 공진들이 보다 복잡하게 나타나고 진폭비도 큰 경우는 후자로 나타났다. 이들 중에서 제2 수역내의 정점 P2~P4에서 나타난 주요 공진으로는 1.076초, 466초, 155초, 61초, 56.7초, 53.4초, 39.6초, 25.8초 등을 들 수 있으며, 이 주기들에서의 진폭비 등치선도를 Fig. 6에 각각 제시하였다.

먼저, Fig. 6(a)에 제시된 주기 1,076초의 제1 공진 모드를 살펴보면 정합 경계면의 외측에 절점선이 형성되고 항입구 주변의 등치선도의 간격이 매우 조밀하다. 그리고, 제1 및 제2 수역의 港奥에 북(anti-node)이 형성되고 있으며 진폭비는 항입구로부터의 거리가 보다 먼 제2 수역의 港奥에서 가장 크게 나타난다. Fig. 6(b)의 주기 466초의 제2 공진은 정합 경계면의 외측과 제1 및 제2 수역의 중간 지점에 절점선이 형성되고 역시 제1 및 제2 수역의 港奥에 북이 형성되고 있으며 진폭비는 절점선으로부터의 거리가 먼 제1 수역의 港奥에서 더 크게 나타난다.

Fig. 6(c)와 (d)에 제시된 주기 155초와 61초인 공진 모드의 진폭비 등치선도를 보면 전자의 경우 제1 수역의 중앙부와 제2 수역의 중앙부에 횡 방향으로 절점선이 형성되어 수립자가 종방향으로 움직이게 되므로 선체운동에 악영향을 미칠 것으로 생각된다. 후자는 각 수역의 중앙부에서 십자 형태로 절점선이 형성되고 모서리에서 북이 형성되는 공진 형태를 나타내며 진폭비도 상대적으로 작은 편이다.

Fig. 6(e)와 (f)에는 주기 56.7초와 53.4초의 공진을 제시하였다. 양자가 모두 주기 61초의 공진과 유사하게 수역의 중앙부에서 복수 개의 십자 형태의 절점선이 형성되나 진폭비는 61초 공진보다 더 크며, 특히 후자의 경우 제2 수역에서는 횡방향으로 복수 개의 절점선이 형성되어 주기 155초의 공진처럼 선체운동에 큰 영향을 미칠 것으로 생각된다.

Table 2. Characteristics of resonant peaks in a model harbor(incident angle = 230 °)

Seiches		Stations					
		P1	P2	P3	P4	P5	P6
First	Period(s)	1,080.0	1,076.0	1,076.0	1,076.0	1,080.0	1,080.0
	N.A.R.	5.89	7.17	7.26	7.42	5.85	6.01
Second	Period(s)	-	466.0	466.0	466.0	466.0	466.0
	N.A.R.	-	10.78	11.52	13.08	12.53	14.70
Third	Period(s)	229.0	230.0	230.0	229.0	230.0	230.0
	N.A.R.	3.76	*1.07	*1.46	2.87	*1.73	3.87
Fourth	Period(s)	156.0	-	-	155.0	-	155.0
	N.A.R.	2.09	-	-	5.00	-	2.80
Fifth	Period(s)	72.5	-	-	-	-	-
	N.A.R.	4.25	-	-	-	-	-
Sixth	Period(s)	61.0	61.0	61.0	-	61.0	-
	N.A.R.	*0.91	2.16	2.61	-	2.47	-
Sevent	Period(s)	-	56.7	56.7	-	56.7	-
	N.A.R.	-	3.74	3.73	-	2.45	-
Eighth	Period(s)	-	53.4	53.4	53.4	53.4	-
	N.A.R.	-	*1.56	*1.74	3.59	2.31	-
Ninth	Period(s)	-	39.6	39.6	39.6	39.6	39.6
	N.A.R.	-	3.41	4.10	2.86	2.28	2.73
Tenth	Period(s)	37.5	-	37.5	37.5	-	37.5
	N.A.R.	4.18	-	2.44	*1.29	-	*1.12
Eleventh	Period(s)	25.8	25.8	25.8	-	25.8	-
	N.A.R.	2.93	5.31	5.32	-	2.22	-

N.A.R.: Normalized amplification ratio, *: A resonant peak of which N.A.R. is less than 2.0, **: In this table, resonant peaks at the periods of 80.5, 75.5, 50.7, 38.7, 34.2, 32.7, 28.5, 27.0, 25.2 seconds were omitted because of complexity and less importance.

Fig. 6(g)와 (h)에는 주기 39.6초와 25.8초인 공진 모드의 진폭비 등치선도를 제시하였다. 전자의 경우 제 2 수역에서는 절점선이 상당히 특이하게 원형으로 형성되었으며 북에서는 진폭비가 7.6 정도로 상당히 크게 제시되었다. 후자도 제2 수역에서는 여러 개의 십자 형태의 절점선이 형성되며 진폭비도 제법 크게 나타난다. 물론 실제 항만에서는 항내 수심이 비교적 일정하지 않고 입사파도 불규칙파이므로 이러한 규칙적이고 기하학적인 형태의 공진 모드가 출현하기는 어려울 것이다.

4.2 항내 전체 영역을 준설하는 경우

전술한 부진동을 제어하는 방법으로 항내 전체 영역 또는 일부 영역을 준설하는 방법을 검토하였다. 여기서는 먼저 항내 수역을 모두 일정하게 준설하는 경우 기

존의 공진 모드에서 발생하는 변화 및 진폭비의 감소 현상을 검토하였다. 준설 수심은 편의상 20 m와 30 m의 2가지를 고려하였으며, 수치계산 조건은 일정 수심의 경우와 동일하게 설정하였다.

Fig. 7에는 제2 및 제1 수역의 港奥에 위치한 정점 P4와 P6에서 입사 파향 300°, 주기 24~1,800초에 대해 계산된 무차원 진폭비를 도시하였다. 이 그림에서는 편의상 일정 수심을 h , 준설 수심을 d 로 표시하였다. 그림 중에서 가는 실선은 전체 수심이 10 m로 일정한 경우, 점선은 항내를 20 m로, 그리고 굵은 실선은 30 m로 깊게 한 경우의 결과를 각각 나타낸다. 이를 살펴보면 항내 수심이 증가함에 따라 공진 모드가 상당히 단주기적으로 이동되어 나타나고 있으며 주기 4분 이하에서 발생하는 공진 모드들은 진폭비도 크게 감소하고 있다. Fig. 8에는 정점 P4와 P6에서 입사 파향 230°, 주

기 24~1,800초에 대해 계산된 무차원 진폭비를 도시하였다. 이 경우에도 항내 수심이 증가함에 따라 공진 모드가 상당히 단주기적으로 이동되어 나타나고 있으며 주기 1분 이하의 공진 모드들은 진폭비도 크게 감소하고 있다.

동해항의 경우 제2 수역에 해당되는 특수 부두에서는 주로 정점 P2와 P4가 있는 부두를 따라 선박을 접안시키고 있다(정점 P3가 있는 부두는 항입구로 통하는 방향이 어느 정도 열려 있으며, 따라서 ESE 계열의 파가 침입하면 정온도가 불량해져서 선박이 이동해야 하므로

선박의 접안율이 다른 부두들에 비해 상대적으로 낮음). Figs. 7과 8에서 주기 1분 이하의 공진 모드의 변화를 자세하게 파악하기가 어려운 점을 감안하여 주기 24~240초의 구간에 대하여 정점 P2와 P3에서 구해진 무차원 진폭비를 입사 파향 300°와 230°에 대하여 Figs. 9와 10에 각각 제시하였다.

먼저, Fig. 9를 살펴보면 정점 P2와 P3 모두 수심을 30 m로 준설하는 경우 별다른 공진이 나타나지 않아서 매우 양호한 결과를 보여준다. Fig. 10에 제시된 입사 파향 230°에 대한 결과에서도 일정 수심이나 수심을 20

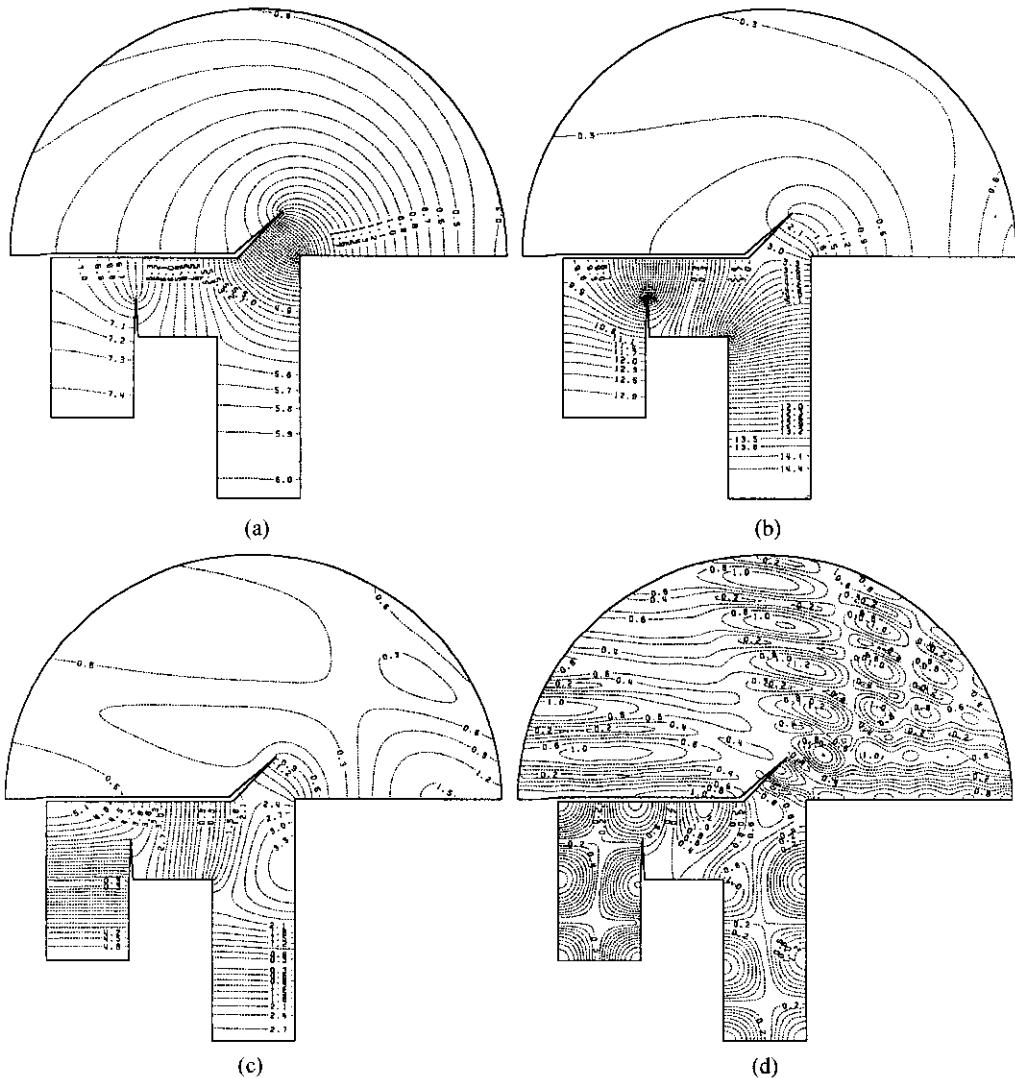


Fig. 6. Computed amplification ratio contours for wave periods of (a) 1,076.0 seconds, (b) 466.0 seconds, (c) 155.0 seconds, (d) 61.0 seconds, (e) 56.7 seconds, (f) 53.4 seconds, (g) 39.6 seconds, (h) 25.8 seconds in a model harbor.

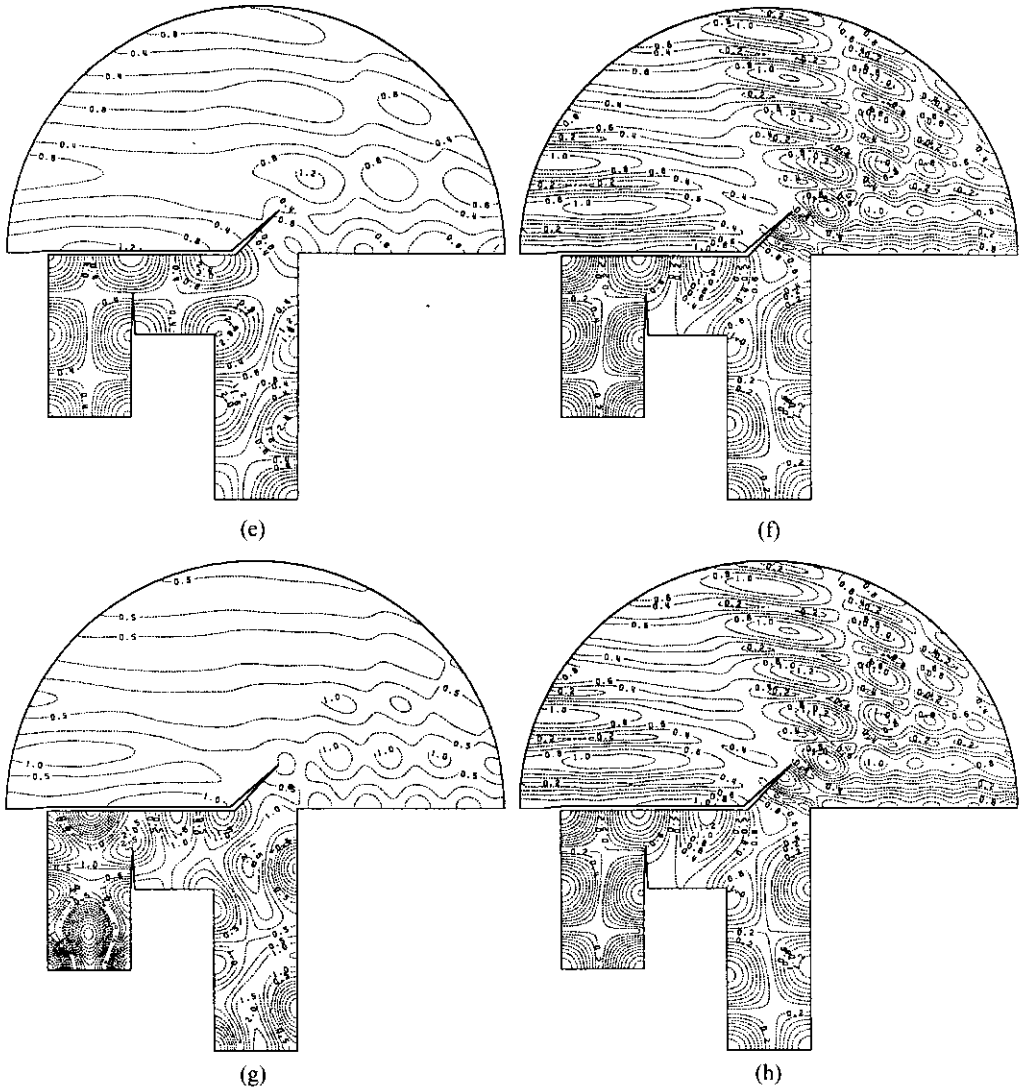


Fig. 6. Continued.

m로 준설하는 경우에 비해 30 m로 준설하는 경우가 크게 개선된 결과를 보여 준다. 그러나, 이 경우에는 300° 로 입사하는 경우와는 달리 주기 46.8초와 33.0초에서 진폭비가 2.8~3.8 및 2.2인 공진 모드가 두 정점에서 모두 제시된다.

230° 로 입사할 때 정점 P2와 P3에서 나타나는 주기 46.8초와 33.0초인 공진 모드의 특성을 살펴보기 위하여 이들의 진폭비 등치선도를 Fig. 11에 제시하였다. Fig. 11(a)에 제시된 주기 46.8초의 공진 모드는 제1 및 제2 수역 모두 중앙부에서 종 방향으로 절점선이 형성되고 좌우의 부두에서 북이 형성되는 일종의 횡방향 공

진 모드이며 수립자의 운동을 고려할 때 선체운동에 미치는 영향이 종 방향보다는 작을 것으로 생각된다. Fig. 11(b)의 33.0초의 공진 모드는 Fig. 6(e)에 제시된 일정 수심인 경우의 56.7초의 공진 모드와 매우 유사하다. 한편, 양자 모두 수심 급변에 의한 반사파로 인하여 항입구로부터 외해 방향으로 증폭파가 형성되고 있음을 알 수 있으며, 이는 선박의 입·출항에 약간의 저해 요소가 될 수도 있다.

4.3 일부 영역을 준설하는 경우

본 연구에서 모델로 한 동해항은 주로 제2 수역에서

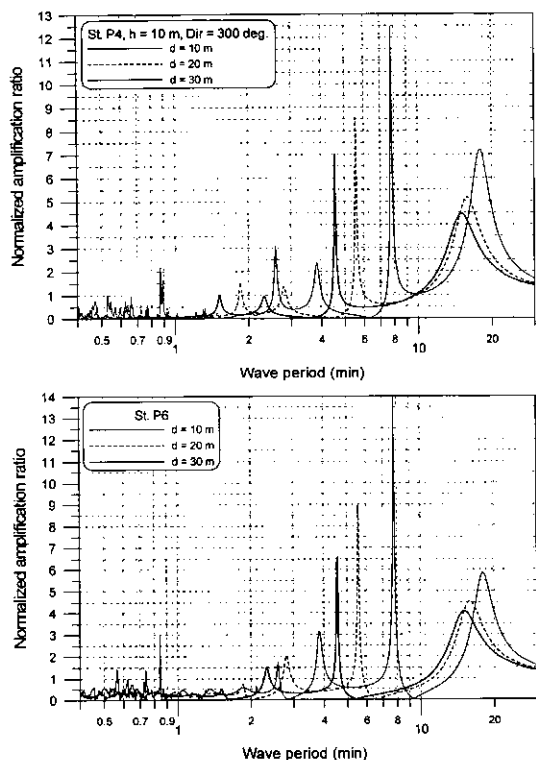


Fig. 7. Computed normalized amplification ratios at stations P4 and P6 in three different bathymetry of the model harbor for wave periods of 24 to 1,800 seconds(incident angle = 300°).

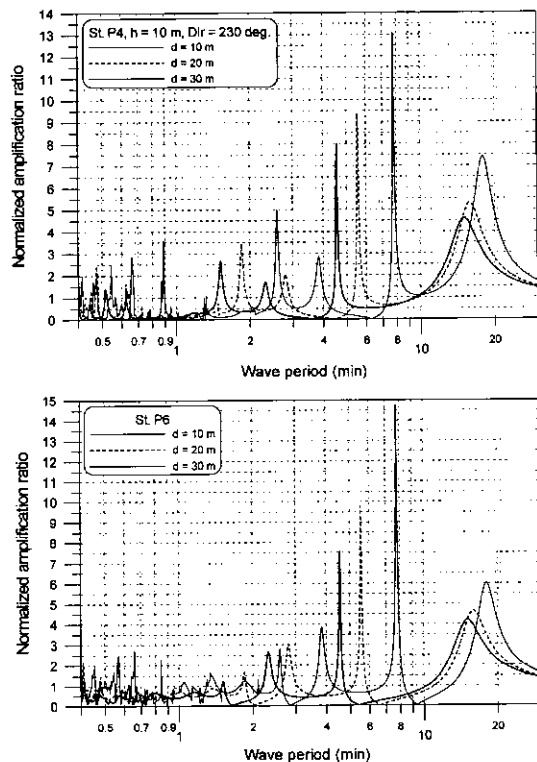


Fig. 8. Computed normalized amplification ratios at stations P4 and P6 in three different bathymetry of the model harbor for wave periods of 24 to 1,800 seconds(incident angle = 230°).

정온도 불량 문제가 제기되고 있으므로(단, 정점 P1이 위치한 중앙 부두에서도 수면 교란이 보고된 바 있음) 경제성을 감안하여 제2 수역만 준설하는 경우의 부진동 변화를 검토하였다. Figs. 12와 13에는 주기 24~240초의 구간에 대하여 제2 수역만 준설한 경우에 대해 입사 파향이 300°와 230°일 때 정점 P2와 P3에서 구해진 무차원 진폭비를 제시하였다.

Fig. 12를 살펴보면 먼저 수심 준설에 따라 공진 모드가 단주기쪽으로 이동되는 정도가 둔화되었으며 진폭비는 전반적으로 전체 준설의 경우와 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이 경우에도 수심을 30 m로 준설하는 경우에는 정점 P2와 P3에서 모두 별다른 공진이 나타나지 않아서 매우 양호한 결과를 보여준다. Fig. 13에 제시된 입사 파향 230°에 대한 결과에서도 공진 모드의 이동을 제외한 전반적인 경향은 전체 준설의 경우와 비슷하다. 30 m로 준설하는 경우 정점 P2에서는 주기 46.5초(진폭비 1.78), 34.8초(진폭비 1.95), 32.1초(진폭비 2.38), 그리고 정점 P3에서는 주기 48.6초(진폭비 2.14), 34.8초(진폭비 2.25), 32.1초(진폭비 2.07)에서 공진 모드가 출현하나 진폭비는 모두 2.4 미만으로 그다지 크지 않다.

한편, 이 경우에는 수심 급변에 의한 반사파로 인하여 항내 수역 전체를 준설하는 경우에 비해 제1 수역에서의 진폭비가 증가될 우려가 있다. 이를 검토하기 위하여 입사 파향이 300°인 경우에 대해 제1 수역 내의 정점 P1(중앙 부두에 해당)과 P5(북 부두에 해당)에서 구해진 무차원 진폭비를 Fig. 14에 제시하였다. 이를 살펴보면 전반적으로 주기 3분 이상에서는 준설하는 경우의 진폭비가 상당히 감소되나 그 이하에서는 상당히 진폭비가 큰 공진 형태가 나타나고 있다. 상부에 제시된 정점 P1에서는 20 m로 준설하는 경우가 30 m로 준설하는 경우에 비해 진폭비가 더 크며, 하부의 정점 P5에서는 반대되는 경향이 나타난다. 정점 P1에서는 20 m로 준설하는 경우 주기 135.0초(진폭비 3.90), 45.3초

폭비 2.38), 그리고 정점 P3에서는 주기 48.6초(진폭비 2.14), 34.8초(진폭비 2.25), 32.1초(진폭비 2.07)에서 공진 모드가 출현하나 진폭비는 모두 2.4 미만으로 그다지 크지 않다.

한편, 이 경우에는 수심 급변에 의한 반사파로 인하여 항내 수역 전체를 준설하는 경우에 비해 제1 수역에서의 진폭비가 증가될 우려가 있다. 이를 검토하기 위하여 입사 파향이 300°인 경우에 대해 제1 수역 내의 정점 P1(중앙 부두에 해당)과 P5(북 부두에 해당)에서 구해진 무차원 진폭비를 Fig. 14에 제시하였다. 이를 살펴보면 전반적으로 주기 3분 이상에서는 준설하는 경우의 진폭비가 상당히 감소되나 그 이하에서는 상당히 진폭비가 큰 공진 형태가 나타나고 있다. 상부에 제시된 정점 P1에서는 20 m로 준설하는 경우가 30 m로 준설하는 경우에 비해 진폭비가 더 크며, 하부의 정점 P5에서는 반대되는 경향이 나타난다. 정점 P1에서는 20 m로 준설하는 경우 주기 135.0초(진폭비 3.90), 45.3초

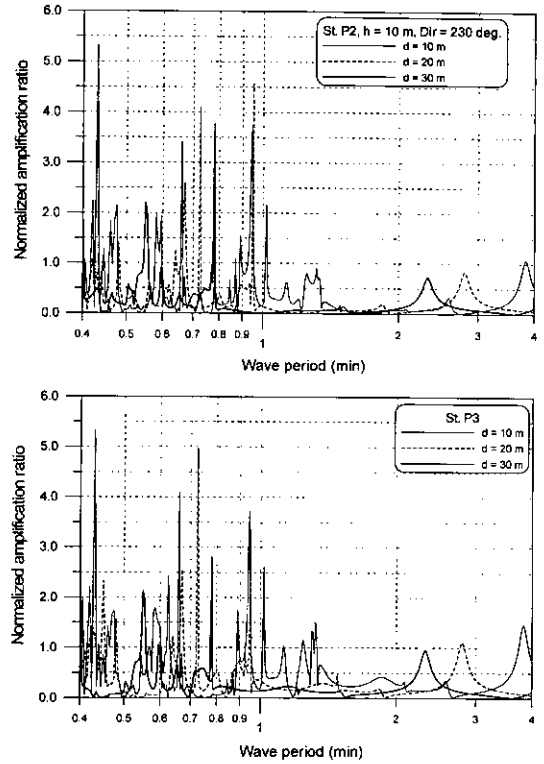
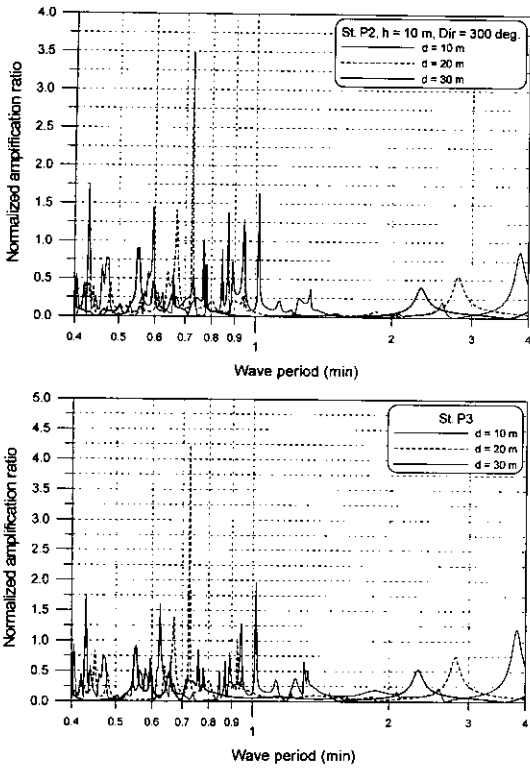


Fig. 9. Computed normalized amplification ratios at stations P2 and P3 in three different bathymetry of the model harbor for wave periods of 24 to 240 seconds(incident angle = 300°).

Fig. 10. Computed normalized amplification ratios at stations P2 and P3 in three different bathymetry of the model harbor for wave periods of 24 to 240 seconds(incident angle = 230°).

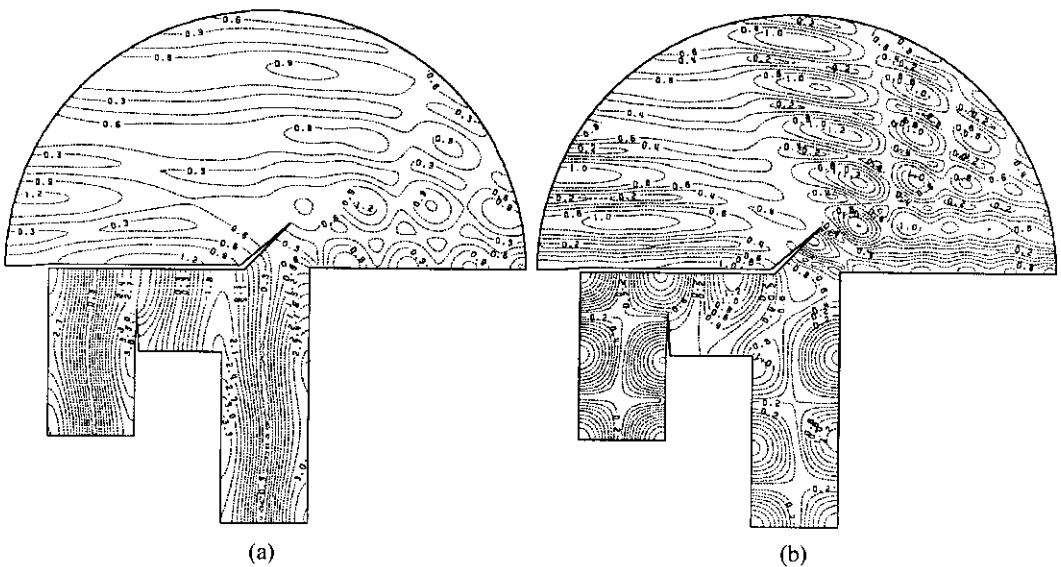


Fig. 11. Computed amplification ratio contours for wave periods of (a) 46.8 seconds, (b) 33.0 seconds in a model harbor.

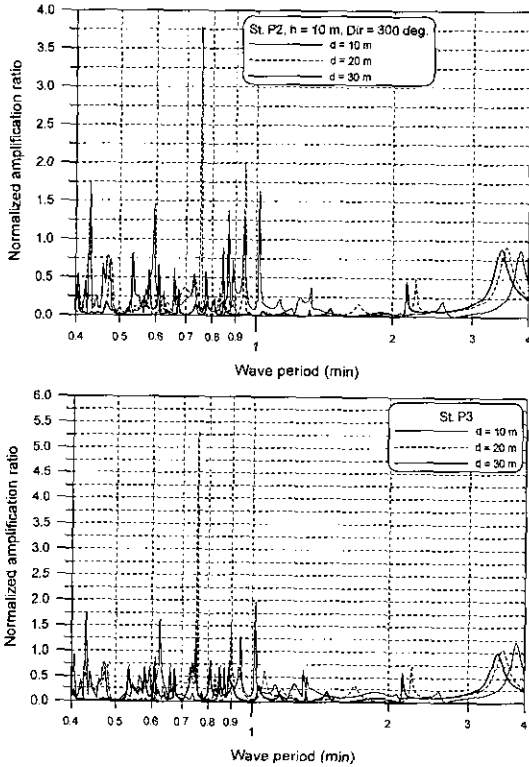


Fig. 12. Computed normalized amplification ratios at stations P2 and P3 in three different locally dredged model harbor for wave periods of 24 to 240 seconds(incident angle = 300°).

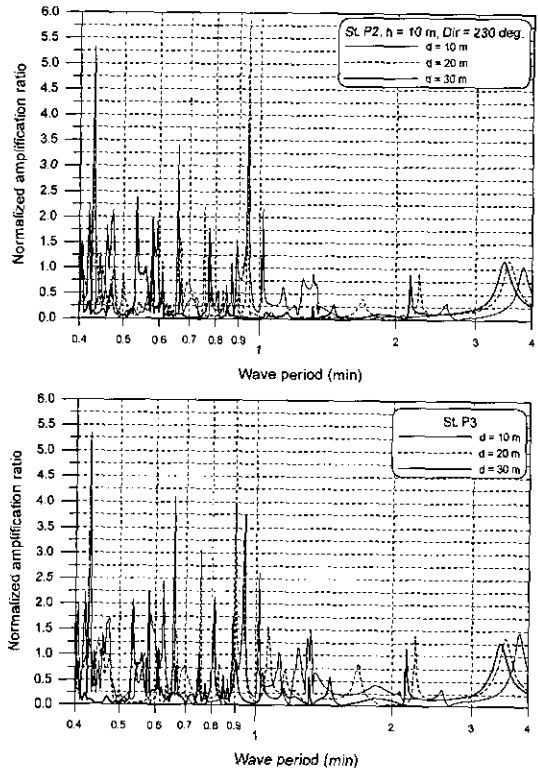


Fig. 13. Computed normalized amplification ratios at stations P2 and P3 in three different locally dredged model harbor for wave periods of 24 to 240 seconds(incident angle = 230°).

(진폭비 5.26), 38.1초(진폭비 1.78), 37.2초(진폭비 2.35)에서 공진 모드가 출현하며 주기 135.0초와 45.3초의 공진 모드는 일정 수심에 비해 진폭비가 크게 증가되었다. 정점 P5에서는 30 m로 준설하는 경우 79.0초(진폭비 3.36), 36.6초(진폭비 2.24)에서 공진 모드가 출현하나 진폭비는 그다지 크지 않다. Fig. 15에는 입사 파향 230°인 경우에 대해 정점 P1(상부)과 P5(하부)에서 구해진 무차원 진폭비를 제시하였다. 이 경우에도 주기 3분 이상에서는 준설하는 경우의 진폭비가 상당히 감소하고 있다. 300°로 입사하는 경우와 비슷하게 정점 P1에서는 수심 20 m로 준설하는 경우, 그리고 정점 P5에서는 30 m로 준설하는 경우의 진폭비가 더 크게 제시된다. 정점 P1에서는 20 m로 준설하는 경우 주기 135.0초(진폭비 7.25), 101.0초(진폭비 2.99), 69.5~74.5초(단, 진폭비 2.58~2.74는 일정수심인 경우의 72.5초에서 발생하는 4.25보다 상당히 작음), 45.3초(진폭비 3.12), 37.2초(단, 진폭비 3.63은 일정수심인 경우의 37.5

초에서 발생하는 4.18보다 작음), 25.8초(진폭비 3.65) 등에서 공진 모드가 출현하며 주기 135.0초의 공진 모드는 일정 수심에 비해 진폭비가 크게 증가되었다. 정점 P5에서는 30 m로 준설하는 경우 79.0초에서 진폭비가 8.53으로 매우 큰 공진 모드가 나타나며, 주기 62.0초(진폭비 3.18), 54.3초(진폭비 3.07), 38.7초(진폭비 2.23), 36.6초(진폭비 2.35), 27.0초(진폭비 2.57) 등에서 공진 모드가 출현하나 진폭비는 일정수심인 경우의 2.3~2.5에 비해 그다지 크지 않다.

이러한 제 1 수역에서의 새로운 공진 모드의 출현 및 진폭비의 증가는 바람직하지 못한 것으로 생각된다. 그러나, 본 연구에서 모델로 삼은 동해항은 정점 P5가 위치한 북 부두의 경우 연중 양호한 정온도를 유지하는 것으로 보고되고 있으므로 일부 진폭비가 큰 공진 모드의 출현이 큰 문제가 될 것으로는 생각되지 않는다. 또한, 여기서는 모든 구조물에서 완전반사를 가정하여 수치실험을 실시하였으므로 실제 진폭비는 다소 작게 제

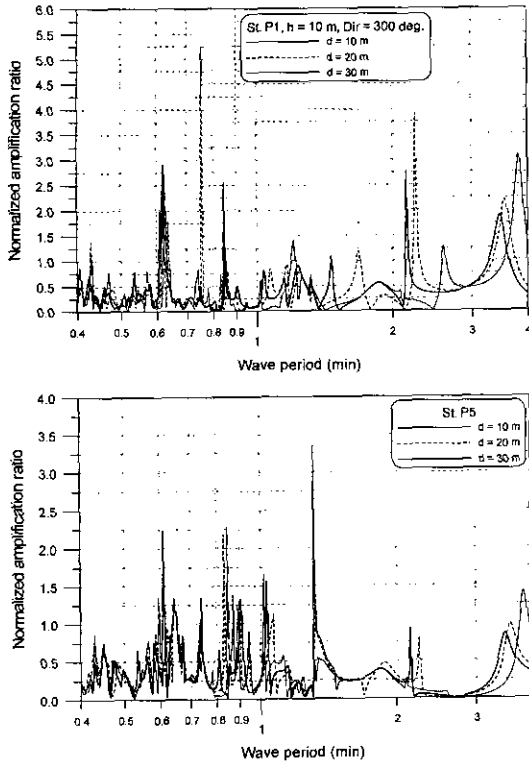


Fig. 14. Computed normalized amplification ratios at stations P1 and P5 in three different locally dredged model harbor for wave periods of 24 to 240 seconds(incident angle = 300°).

시될 것이다. 그리고, 주기 3분 이하의 국부 부진동의 경우 부진동 수치실험에서 통상 사용되는 0.95~0.99의 반사율보다 작은 값을 사용해야 되므로 진폭비는 더 줄어들게 된다.

5. 결론 및 토의

본 논문에서는 항 외측에 수심 불연속이 존재하는 항만에서의 부진동 증폭 현상에 대하여 해석해를 구한 Liu(1986)의 논문에 나타난 오류를 수정하고, 그 결과를 이용하여 확장형 환경사방정식을 지배방정식으로 사용하고 무한요소를 이용하여 방사조건을 처리하는 기 수립된 Galerkin 유한요소 모형을 검증하였다. 그리고, 이 수치모형을 항내 전체 또는 일부 수역을 준설했던 모형 항만에 적용하여 선체운동에 악영향을 미칠 수 있는 저중력파(FIG wave; Far-Infra-Gravity wave)에 해당되는 주기인 1~5분의 장주기파를 제어 또는 저감하는 방안

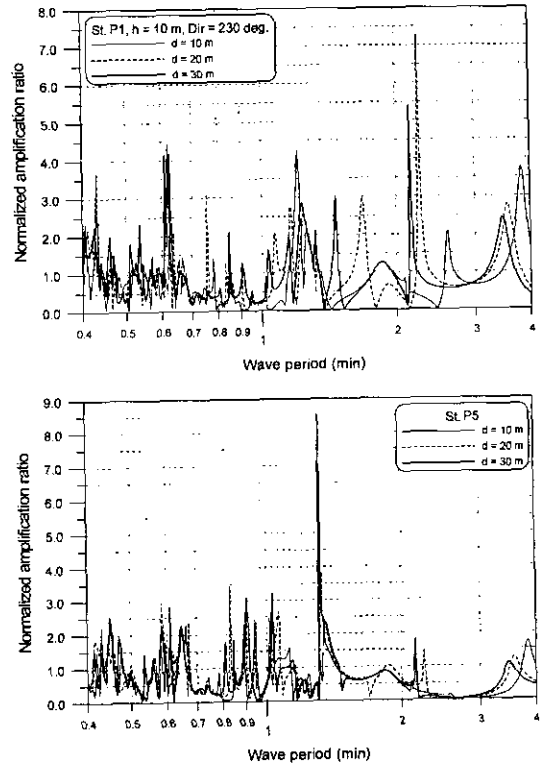


Fig. 15. Computed normalized amplification ratios at stations P1 and P5 in three different locally dredged model harbor for wave periods of 24 to 240 seconds(incident angle = 230°).

을 검토하였다. 본 연구를 통해 구해진 주요 결론 및 토의 사항은 아래와 같다.

1. 반원형 외해 경계를 따라 수심의 불연속이 존재하는 지역 내의 직선 해안 또는 직사각형 모형 항만에서의 공진에 대하여 Liu(1986)가 제시한 해석해의 오류를 수정하였으며, 수정된 해석해와 유한요소 모형에 의한 수치계산 결과를 비교하여 양자가 잘 일치함을 확인하였다. 단, 직사각형 모형 항만의 제1, 제3 및 제5 공진 모드 경우 수치계산에 의한 공진의 첨두치가 약간 단주기 측에서 나타났으며, 이는 해석해의 경우 항의 폭이 파장에 비해 작은 것으로 가정하고 방사파를 항입구의 중앙점에서의 점원에 의해 발생된 파로 간주하여 구하였으나 실제로는 항의 폭이 유한하므로 수치계산 시에는 이러한 점이 반영되어 나타난 차이로 판단된다.

2. 항입구에서 수심이 급변(경사 2:1)하는 직사각형 모형 항만에 환경사방정식과 확장형 환경사방정식을 사용한 모형을 각각 적용한 결과 그 차이는 5% 미만으로

작게 나타났다.

3. 동해항을 모델로 구성한 모형 항만에 대해 항내 수역의 전체 또는 일부를 준설하는 경우에 대해 수치계산을 실시하였으며, 그 결과 준설의 효과가 공진 모드의 단주기 쪽으로의 이동과 진폭비의 감소로 나타났다.

4. 수심을 20 m로 준설하는 경우에는 진폭비 저감 효과가 그다지 크지 않았으나 30 m 준설의 경우에는 저감 효과가 크게 나타났으며, 전체 수역을 준설하는 경우의 저감 효과가 일부 준설의 경우에 비해 약간 양호한 것으로 나타났다.

5. 동해항의 경우 목표로 하는 일부 수역만 준설하더라도 동계에 발생빈도가 높은 NE 계열의 파에 대해서는 큰 효과가 나타나며 동 수역에 침입하기 쉬운 ESE 계열의 파에 대해서도 양호한 저감 효과를 얻을 수 있을 것으로 제시되었다. 단, 이 경우 준설하지 않는 다른 항내 수역에서는 반사파로 인한 새로운 공진 모드의 출현 또는 기존 공진 모드의 진폭비 증가라는 역효과가 일부 제시되었으나 크게 심각하지는 않은 것으로 판단된다.

5. 본 수치모형은 선형 지배방정식을 사용하였으나 실제 현상이 비선형인 점을 감안할 때 Boussinesq 방정식 등의 비선형 지배방정식을 사용한 수치모형에 대한 연구가 필요한 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 한국해양연구소의 기관고유사업인 “연안방재 구조물의 설계기술 개발”의 일환으로 수행되었음을 밝히며, 서경덕 교수는 서울대학교 공과대학 공학연구소의 지원을 받았음을 밝히고 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

서승남, 연영진, 1994. Galerkin 유한요소법에 의한 항내 정온도 모형, 한국해양·해양공학회지, 6(4): 439-451.
 정원무, 1999. 항만부진동에 대한 현장연구와 유한요소 해석, 박사학위논문, 서울대학교, 445p.
 정원무, 이길성, 박우선, 채장원, 1998. 확장형 환경사방정식에 기초한 Galerkin 유한요소 모형, 한국해양·해양공학회지, 10(4): 174-186.
 Abramowitz, M. and Stegun, A., 1970. *Handbook of Mathematical Functions*, Dover, New York, 1046p.
 Berkhoff, J.C.W., 1972. Computation of combined refraction-

diffraction, *Proc. 13th Coastal Engrg. Conf., ASCE*, pp. 471-490.
 Brebbia, C.A. and Walker, S., 1979. *Dynamic Analysis of Off-shore Structures*, Butterworth, 323p.
 Bruun, P., 1989. *Port Engineering*, 4th ed., Gulf Pub. Co., 1,461p.
 Chamberlain, P.G. and Porter, D. 1995. The modified mild-slope equation, *J. Fluid Mech.*, 291, pp. 393-407.
 Hiraishi, T., Shiraiishi, S., Nagai, T., Yokoda, H., Matsubuchi, S., Fujisaku, H. and Shimizu, K., 1997. Numerical and field survey on port facility damage by long period waves and those countermeasure, *Tech. Note of Port and Harbour Res. Inst.*, No. 873, 39p (in Japanese).
 Ippen, A.T. and Goda, Y., 1963. Wave induced oscillations in harbor: The solution for a rectangular harbor connected to the open-sea, *Rep. 59*, Hydrodynamic Laboratory, MIT.
 LeBlond, P.H. and Mysak, L.A., 1978. *Waves in the Ocean*, Elsevier Oceanography Series 20, Elsevier, 602p.
 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 Inst. of Tech., 266p.
 Leendertse, J.J., 1967. Aspects of a computational model for long-period water wave propagation, *Memo RM-5294-PR*, The Rand Corporation, Santa Monica, CA.
 Liu, P.L.-F., 1983. Effects of the continental shelf on harbor resonance, In: K. Iida and T. Iwasaki (Editors), *Tsunamis - Their science and engineering*, Terra Scientific Pub. Co., Tokyo, pp. 303-314.
 Liu, P.L.-F., 1986. Effects of depth discontinuity on harbor oscillations, *Coastal Engrg.*, 10, pp. 395-404.
 Massel, S.R., 1992. Extended refraction-diffraction equation for surface waves, *Coastal Engrg.*, 19, pp. 97-126.
 Mei, C.C., 1983. *The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves*. World Scientific, 740p.
 Mei, C.C. and Chen, H.S., 1975. Hybrid-element method for water wave, *Proc. Symp. on Modeling Techniques*, San Francisco.
 Miles, J.W., 1971. Resonant response of harbours: An equivalent-circuit analysis, *J. Fluid Mech.*, 46, Part 2, pp. 241-265.
 Miles, J.W., 1972. Wave propagation across the continental shelf, *J. Fluid Mech.*, 54, Part 1, pp. 63-80.
 Miles, J.W. and Lee, Y.K., 1975. Helmholtz resonance of harbors, *J. Fluid Mech.*, 67, pp. 445-464.
 Momoi, T., 1976. Scattering of long waves at the mouth of estuaries bordering on a continental shelf, Part I and II, *J. Phys. Earth*, 24, pp. 1-25 and 237-250.

- Raichlen, F., Lepelletier, T.G. and Tam, C.K., 1983. The excitation of harbors by tsunamis, In: K. Iida and T. Iwasaki (Editors), *Tsunamis - Their science and engineering*. Terra Scientific Pub. Co., Tokyo, pp. 359-385.
- Shiraishi, S, Kubo, M., Ueda, S. and Sakakibara, S., 1996. A countermeasure by mooring system for moored ship motions under long period waves, *Proc. Int. Symp. on Coastal & Ocean Space Utilization*.
- Sommerfeld, A., 1896. Mathematische theorie der diffraction, *Math. Ann.*, **47**, pp. 317-374.
- Suh, K.D., Lee, C. and Park, W.S., 1997. Time-dependent equations for wave propagation on rapidly varying topography, *Coastal Engrg.*, **32**, pp. 91-117.
- Ueda, S., 1984. Analytical method of ship motions moored to quay walls and the applications, *Tech. Note of Port and Harbour Res. Inst.*, No. 504, 372p (in Japanese).
- 平石哲也, 林恒一郎, 栗田一昭, 河野信二, 1996. リーフおよび港湾内における現地観測に基礎した長週期波対策, *海岸工学論文集*, 第43巻, pp. 206-210.
- 白石悟, 久保雅義, 上田茂, 神原繁樹, 1995. 繫留システムに着目した長週期波に対する船舶の動揺抑制対策, *海岸工学論文集*, 第42巻, pp. 941-945.