

## 개구부가 좁은 직사각형 항만의 공진 특성 (2. 항입구 에너지 손실의 영향)

### Resonant Characteristics in Rectangular Harbor with Narrow Entrance (2. Effects of Entrance Energy Loss)

정원무\* · 박우선\* · 서경덕\*\* · 채장원\*

Weon Mu Jeong\*, Woo Sun Park\*, Kyung Doug Suh\*\*, and Jang Won Chae\*

**요 旨** : 확장형 완경사방정식을 지배방정식으로 사용하며 무한원방에서의 방사조건은 무한요소로, 그리고 항입구에서의 흐름 분리로 인한 에너지 손실의 고려는 정합요소로 처리하는 Galerkin 유한요소 모형을 개발하였다. 완전 및 부분 개방 직사각형 항만에 대한 수치실험 결과 항입구에서의 에너지 손실의 포함은 港澳에서의 증폭비를 상당히 감소시키는 것으로 나타났으며, 입사파고와 제트 길이의 증가는 증폭비의 상당한 감소를 초래하였다. 감천항에서 제트 길이를 고려한 경우 공진주기의 이동으로 입사파 진폭이 작을 때는 손실을 고려하지 않은 경우보다 진폭비가 오히려 크게 나타났다. 관측된 입사 장주기 파고의 사용시에는 항입구 손실이 작은 것으로 나타났으나 지진해일의 내습시와 같이 파고가 큰 경우에는 상당한 입구 손실이 예상되었다. 감천항의 Helmholtz 공진 모드는 주기 31.0분으로 제시되어 관측 결과인 27.0~33.3분과 잘 일치하였다. 또한, 관측치인 주기 9.4~12.1분과 5.2~6.2분의 공진 모드도 10.4분과 6.6분 또는 5.6분으로 상당히 재현되었다. 한편, 감천항에는 매우 다양한 모드의 부진동이 존재하는 것으로 나타났으며, 영일만과 마찬가지로 주기 3.6분과 1.6분에서 상당한 진폭비의 횡방향 공진이 존재함을 확인하였다.

**핵심용어** : Galerkin 유한요소 모형, 무한과 정합요소, 입구 손실, 제트 길이, 입사 장주기 파고, 지진 해일

**Abstract** □ A Galerkin finite element model for the analysis of harbor oscillation has been developed based on the extended mild-slope equation. Infinite elements are used to accommodate the radiation condition at infinity and joint elements to treat the matching conditions at the harbor entrance which include the energy loss due to flow separation. The numerical tests for rectangular harbors with fully or partially open entrances show that the energy loss at the harbor entrance considerably reduces the amplification ratios at the innermost parts of the harbors and that the amplification ratios decrease considerably with increasing incident wave heights and jet lengths at the harbor entrance. Application of the model to the Gamcheon harbor show that when the incident wave amplitude is small the amplification ratios rather increase when the entrance energy loss is included than when ignored because of the shift of the resonance periods. Even though the entrance energy loss was insignificant for the measured long-period incident waves, it would be of great importance if the incident waves were large as in the attack of tsunamis. The resonance period of the Helmholtz mode at the Gamcheon Harbor was calculated to be 31 minutes, which agrees well with the measured one between 27 and 33.3 minutes. The measured resonance periods between 9.4 and 12.1 minutes and 5.2 and 6.2 minutes were also calculated by the numerical model as 10.4 minutes and 6.6 or 5.6 minutes, indicating good performance of the model. On the other hand, it was shown that a variety of oscillation modes exists in the Gamcheon Harbor and lateral resonances of considerable amplification ratios also exist at the periods of 3.6 and 1.6 minutes as in the Young-II Bay.

**Keywords** : Galerkin finite element model, infinite and joint element, entrance energy loss, jet length, incident long-period wave height, tsunami

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

\*\*서울대학교 지구환경시스템공학부(School of Civil, Urban and Geosystem Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

### 1. 서 론

기존의 항만부진동 현상 해석은 대부분 이상 유체라는 가정하에 선형 이론에 기초하여 개발된 수치모형에 의해 수행되고 있다. 따라서, 결과적으로 항입구를 축소 시킴에 따라 반응 곡선의 첨두치의 크기와 첨예도가 증가하게 되는 항만 역설(Harbor Paradox)이 존재하게 되며(Miles and Munk, 1961), 이는 항입구 축소에 따른 방사 감쇠의 감소에 기인된다. 이 역설은 특히 주기가 가장 긴 Helmholtz 모드의 경우에 가장 심하므로 지진 해일의 내습시와 같은 경우에 중요성을 가지며, 이러한 경우 항입구의 폭이 감소함에 따라 항내의 반응이 증가된다(Miles, 1971). 그러나, 이러한 현상은 공진이 발생하는 입구에서는 그 축벽을 따라 발생하는 난류와 입구폭이 좁은 항의 방파제의 선단에서 흐름의 박리가 발생하여 제트와 와류가 형성되는 현상에 의하여 많은 에너지가 감쇠된다. Wilson(1962)은 남아프리카 공화국의 Table Bay Harbor의 Duncan Basin에서 입구를 좁힘으로써 항만 공진이 감소되었음을 제시하였다.

좁은 수축부를 가진 1차원 장주기파 문제에서는 2차 수두 손실의 수리모형이 널리 사용되어 왔다(Unluata and Mei, 1975). 이들은 주로 다음 형태의 식을 고려하였다.

$$\eta^- - \eta^+ = \frac{f_c}{2g} u|u| + \frac{l_j}{g} \frac{du}{dt} \quad (1)$$

여기서,  $\eta^-$ 와  $\eta^+$ 는 수축부의 양쪽 면에서의 일정한 자유수면 변위,  $u$ 는 수축부를 지나는 평균 유속,  $f_c$ 는 마찰손실계수,  $l_j$ 는 수축부 부근의 2차원 와류 형성과 관련된 길보기 질량 길이(또는 제트 길이)를 각각 나타낸다. 주어진 형태에 대하여  $f_c$ 와  $l_j$ 는 모두 경험적으로 결정되어야 하지만 Reynolds수와 Strouhal수에 대한 이들의 의존성은 아직까지 불분명하다(Mei, 1983).

Ito(1970)는 Ofunato의 지진해일 방파제에 대한 수치적 연구에서 항입구에서  $l_j=0$ ,  $f_c=1.5$ 를 적용한 경우 수치적 결과가 현장관측 결과와 잘 비교될 수 있음을 제시하였다. 2차원 문제의 경우 이 법칙을 이론적으로 정당화하는 것은 분명하지 않으며  $f_c$ 의 직접적이고 경험적인 지식도 실제적으로는 존재하지 않는다(Unluata and Mei, 1975). Ito(1970)의 방법은 완전 유체 이론에 따르면 지진 해일에 대해 전혀 효율적인 대책이 될 수 없으나, 대략 40분의 가장 주기가 긴 모드가 방파제 건설후에 제거되는 효과가 제시되었다.

심해의 원형 항만에 대한 수리모형실험 연구에서 Lee(1971)는 폭이 넓고 60°로 개방된 항의 경우에는 실험과 이론에 의한 첨두치가 서로 잘 일치하였으나 10°로 개방된 입구폭이 좁은 항의 경우에는 실험치가 작음을 제시하였다. 여기서도 진폭비의 감소는 최장 주기인 Helmholtz 모드에서 가장 심하였다. 이러한 점들은 폭이 좁은 입구에서의 마찰 손실이 장주기파의 경우에는 현실적으로 흥미있는 문제임을 입증하고 있다. 한편, Bowers(1977)는 일정 수심과 좁은 입구를 가진 항만에 대한 수리모형실험을 통하여 상기식이 유효함을 입증하였다.

Ito(1970) 등과 동일한 가정하에 Unluata and Mei(1975)는 장주기파에 의한 직사각형 항만의 공진에 대한 항입구에서의 마찰 손실의 영향을 해석적인 방법으로, 그리고 Miles and Lee(1975)는 일반적인 항만의 Helmholtz 모드에 대해 조사하였다. 한편, 이러한 문제는 비선형성 때문에 입사파 주파수를 가진 기본적인 조화성분에 추가되어 홀수의 고차 조화성분이 발생한다. Unluata and Mei(1975)는 첫번째 조화 반응에 대한 상세한 검토를 통하여 마찰이 공진의 진폭을 감쇠시키는 방사 감쇠를 보조하며 Helmholtz 모드의 억제에 가장 효과적임을 제시하였다. 즉, 입구가 좁아지면 마찰 손실이 감소된 방사 감쇠를 능가하며 항내의 반응을 감소시켜서 항만 역설이 없어지게 되는 것이다. Murakami(1976)는 상대적으로 좁은 수로로 연결된 직사각형 항만에서 입구폭의 급격한 축소 및 확장에 대한 투과 및 반사계수를 실험을 통하여 구한 다음, 항입구의 방파제에 기인되는 에너지 감쇠를 이 계수들을 사용한 에너지 보존법칙으로 계산하였다. 이 결과를 기초로 에너지 감쇠가 있는 항만 진동의 해를 구하고 실험치와 양호한 일치를 보임을 확인하였다.

한편, Lepelletier(1980)는 수리실험과 비선형 수치모형을 이용하여 각종 에너지 손실에 대해서 연구하였으며, 항입구 손실계수에 관한 실험식도 제공하였다. Gerber(1986)는 흐름의 박리와 감쇠 효과를 포함하도록 Lee(1971)의 모형을 확장하였다. 흐름의 분리는 항입구에서의 정합 조건(matching condition)을 수정함으로써, 그리고 감쇠는 감쇠계수를 도입하여 변형시킨 Helmholtz 방정식의 해를 구함으로써 반영하였다. 그는 확장한 모형을 Cape Town의 Granger Bay 항에 적용하여 Lee(1971)의 모형보다 양호한 일치를 보임을 제시하였다. 최근, Raichlen *et al.*(1994)은 항만부진동에 대한 마찰 손실

과 항입구 손실의 영향을 수리모형실험과 Lepelletier (1980)의 수치모형으로 연구하고 Strouhal수를 기준한 입구 손실계수를 제시하였다.

국내에서는 Jeong *et al.*(1996)이 Chen(1986)의 모형을 항입구 손실을 고려할 수 있도록 확장하였으며, Cho (1997)는 항입구 폭의 조정으로 Helmholtz 모드의 진폭비를 감소시키는 방법을 연구하였다. 정 등(1998)은 해저면 마찰을 포함한 확장형 환경사방정식을 지배방정식으로 사용하며 항입구 손실을 고려하는 유한요소 모형을 개발하고 Lepelletier(1980)의 수리모형실험 결과와 비교하여 양호한 결과를 얻었다.

본 연구에서는 정 등(1998)이 개발한 모형을 실제로 항입구폭이 좁은 감천항에 적용한 결과를 제시하였다. 정확한 입사파 추정을 위해 관측자료를 이용한 절대진폭비 개념을 도입하고, 이를 기준하여 관측치와 계산치를 비교하였다. 입사파향, 조위 등의 변화에 따른 수치모형의 보정을 실시하고 실제 항만인 감천항에 적용하여 입사파고의 변화에 따른 감천항의 항입구 손실을 고려한 증폭비 변화를 검토하였다. 마지막으로 감천항에 대한 수치실험을 실시하여 주요 공진 모드 및 증폭비를 구하고 감천항의 공진 특성에 대해 상세한 검토를 실시하였다.

## 2. 부진동 수치모형

본 모형에 대해서는 정 등(1998)과 정(1999)에 자세히 기술되어 있으므로 유한요소 모형에 대한 상세한 내용은 이들을 참조하되 이하에서는 이해를 돕기 위해 수학적 정식화만 간략하게 기술하였다. 단, 이들의 연구를 통해 Chen(1986)이 제시한 해저면 마찰 계수의 경우 비현실적으로 큰 값을 사용해야 공진 모드의 특성에 변화가 나타났으므로 본 연구에서는 해저면 마찰을 고려하지 않았다.

### 2.1 지배방정식

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

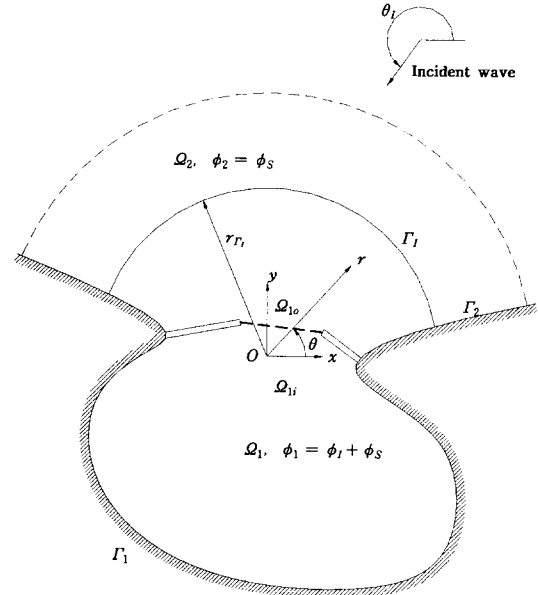


Fig. 1. Definition sketch for the boundary value problem.

대상 영역은 항내를 포함하는 유한요소 영역  $\Omega_1$ 과 이를 둘러싼 무한요소 영역  $\Omega_2$ 로 분리하고, 영역  $\Omega_1$ 에서는 임의의 수심이나 영역  $\Omega_2$ 에서는 일정 수심을 고려한다. 영역  $\Omega_1$ 과  $\Omega_2$ 에서의 속도포텐셜은 입사파 속도포텐셜  $\phi_i$ 와 산란파 속도포텐셜  $\phi_s$ 로 분리하여 표현할 수 있는데 영역  $\Omega_1$ 에서는 이들의 합인  $\phi_1 = \phi_i + \phi_s$ 가 미지수가 되며, 영역  $\Omega_2$ 에서는 입사파 속도포텐셜  $\phi_i$ 를 기지의 값으로 가정하므로  $\phi_2 = \phi_s$ 를 미지수로 하였다. 한편, 항입구의 축소에 따른 에너지 손실을 고려하기 위하여 유한요소 영역을 항내 수역( $\Omega_{1i}$ )과 항입구 외측의 개방해역( $\Omega_{1o}$ )으로 다시 구분하며, 이 경우 영역  $\Omega_{1i}$ 에서의 유체 이동은 영역  $\Omega_{1o}$ 에서의 유체 이동과 연결된다.

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

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

여기서,  $\nabla = (\partial/\partial x)\hat{i} + (\partial/\partial y)\hat{j}$ ,  $\hat{i}, \hat{j}$ 는  $x, y$ 방향 단위벡터,  $\phi_i$ 는 수평 2차원 공간 복소 속도포텐셜로  $i=1$ 은 유한요소 영역을,  $i=2$ 는 무한요소 영역을 나타내며,  $h(x, y)$ 는 수심을 나타낸다. 또,  $C$ 는 위상 속도,  $C_g$ 는 군속도,  $\omega$

는 각 주파수를 나타내며,  $R_1$ 과  $R_2$ 는 각각 해지면 경사의 제곱과 곡률에 관련되는 계수(Massel, 1993; Suh *et al.*, 1997)이다. 한편, 위상 속도  $C$ 와 군속도  $C_g$ 는 다음 식으로 주어진다.

$$C = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh kh} \quad (3)$$

$$C_g = \frac{C}{2} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \quad (4)$$

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 서와 연(1994)의 결과를 사용하였다. 즉, 영역  $\Omega_1$ 과  $\Omega_2$ 의 고체 경계면  $\Gamma_1$ 과  $\Gamma_2$ 를 따라서는 다음과 같은 부분반사 경계조건을 사용하였다.

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial n} = \alpha \phi_1 \quad \text{on } \Gamma_1 \quad (5a)$$

$$\frac{\partial (\phi_2 + \phi_I)}{\partial n} = \alpha (\phi_2 + \phi_I) \quad \text{on } \Gamma_2 \quad (5b)$$

여기서,  $n$ 은 고체 경계면에 대한 외향 법선 벡터이며,  $\alpha$ 는 다음 식으로 주어진다(서와 연, 1994).

$$\alpha = ik \cos \theta_r \frac{1 - K_r}{1 + K_r} \quad (6)$$

여기서,  $K_r$ 은 고체 경계면에서의 경험적 반사계수이며 일반적으로 파의 주파수와 진폭 및 고체 경계면의 특성에 의존된다.  $\theta_r$ 은 고체 경계면으로 입사하는 파의 법선 방향으로부터의 각을 의미하는데 일반적으로 대상 영역 내에서는 다중 반사가 일어나므로 어떤 일정한 값으로 정의하기가 어려우며 통상  $\theta_r$ 을  $0^\circ$ 로 하여 계산하는 경우가 많다.

유한요소 영역  $\Omega_1$ 과 무한요소 영역  $\Omega_2$ 의 원호 경계면  $\Gamma$ 를 따라서는 다음과 같은 정합조건을 만족해야 한다.

$$\phi_1 = \phi_2 + \phi_I \quad (7a)$$

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial n} = -\frac{\partial (\phi_2 + \phi_I)}{\partial n} \quad (7b)$$

무한요소내의 속도포텐셜,  $\phi_2$ 는 무한 원방에서 다음의 방

사 경계조건(Sommerfeld, 1896)을 만족하여야 한다.

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{r} \left( \frac{\partial \phi_2}{\partial r} - ik \phi_2 \right) = 0 \quad (8)$$

입사파가  $\theta_r$ 의 각도로 진입할 경우의 속도포텐셜  $\phi$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\phi_r = -\frac{ig a_0}{\omega} e^{ikr \cos(\theta - \theta_r)} \quad (9)$$

여기서,  $a_0$ 는 입사파의 진폭을 의미한다.

### 2.3 항입구에서의 정합조건

단면이 급격히 변하는 지점에서 손실 에너지를 고려한 두 영역간의 정합 조건은 다음과 같이 유속의 연속식과 압력의 연속식(Mei, 1983)을 이용하여 나타낼 수 있다.

$$u_i = u_o \quad (10)$$

$$\frac{p_i}{\rho} = \frac{p_o}{\rho} + \frac{1}{2g} u_o |u_o| + \frac{l}{g} \frac{\partial u_o}{\partial t} \quad (11)$$

여기서  $u$ 와  $p$ 는 유속과 압력,  $f_c$ 는 손실 계수,  $l$ 는 흐름의 제트 길이를 각각 나타내며, 본 연구에서는  $l$ 를 연한 제트의 속도가 일정한 것으로 가정하였다. 그리고, 아랫첨자  $i$ 와  $o$ 는 유한요소 영역의 항입구 경계면에서의 내부(영역  $\Omega_{1i}$ ) 및 외부(영역  $\Omega_{1o}$ )를 의미한다. 주파수 영역에서 해를 보다 효율적으로 구하기 위하여 식 (11)의 우변의 두 번째에 나타난 비선형 항을 Lorentz 변환(Morse and Feshbach, 1953)을 사용하여 다음과 같이 선형화하였다(정, 1999).

$$\frac{1}{2g} f_c u_o |u_o| = \alpha u_o \quad (12)$$

여기서,  $\alpha$ 는 선형화된 손실 계수로 다음 식으로 주어진다.

$$\alpha = \frac{9 f_c}{8 \pi g} u_o \tanh \frac{5 + \cosh 2kh}{2kh + \sinh 2kh} \quad (13)$$

여기서,  $\bar{u}_o$ 는 수면에서의 입구 유속의 진폭을 나타낸다. 그러면 선형화된 정합 조건은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial \phi_{1i}}{\partial n} = -\frac{\partial \phi_{1o}}{\partial n} \quad (14)$$

$$\frac{\partial \phi_{1i}}{\partial n} = \frac{1}{\frac{i\alpha}{\omega} + \frac{l_j}{g}} (\phi_{1o} - \phi_{1i}) \quad (15)$$

여기서,  $\phi_{1i}$ 와  $\phi_{1o}$ 는 항내 수역과 항외의 개방 해역의 복소 속도포텐셜을 각각 나타낸다.

전술한 식 (11) 또는 (15)에서  $f_e$ 와  $l_j$ 는 단면의 형상에 따라 실험적으로 결정되는 계수이다. 본 연구에서는 이 손실계수,  $f_e$ 를 다음과 같이 Lepelletier(1980)가 제안한 Strouhal수의 역수,  $u_e/(a\omega)$ 를 기준한 식을 사용하여 결정하였다. 즉, 항의 폭과 입구폭이 같은 경우( $a/b=1.0$ ;  $a$ 는 항입구의 폭,  $b$ 는 항의 폭)는

$$f_e = \begin{cases} 0.8 \left( \frac{u_e}{a\omega} \right) & \text{for } \frac{u_e}{a\omega} < 1.0 \\ 0.8 & \text{for } \frac{u_e}{a\omega} \geq 1.0 \end{cases} \quad (16)$$

항입구 폭이 항의 폭의 0.8배보다 작은 경우( $a/b \leq 0.8$ )는

$$f_e = \begin{cases} 1.15 \left( \frac{u_e}{a\omega} \right) & \text{for } \frac{u_e}{a\omega} < 1.0 \\ 1.15 & \text{for } \frac{u_e}{a\omega} \geq 1.0 \end{cases} \quad (17)$$

를 사용하였다. 한편, 제트 길이  $l_j$ 에 대해서는 다음 식을 사용하였는데,

$$l_j \approx b \frac{1}{\pi} \ln \frac{1}{2} \left( \tan \frac{\pi a}{4b} + \cot \frac{\pi a}{4b} \right) \quad (18)$$

이는 Morse and Ingard(1968)가 직사각형 단면인 경우 등각사상변환(conformal transformation)을 사용하여 제시한 것이다.

### 3. 모형의 보정

#### 3.1 이전 연구에서의 보정

Lee(1969)의 직사각형 모형항만에 대한 본 모형의 보정·검증에 대해서는 정 등(1998)과 정(1999)에 자세하게 기술되어 있으며 본 연구에서는 그 결과만 이하에 간단하게 정리하였다. 정 등(1998)은 입구 손실이 공진 주파수에 미치는 영향을 검토하기 위하여 부분개방 항만( $a/b=0.2$ )에서 항입구에 대해 수직으로 입사하는 파에 대해 항의 가장 내측 중앙점에서의 증폭비를 계산하였다. 수치계산은 항입구에서의 손실을 고려하지 않은 경

우 및  $l_j$ 로 0.0m, 0.00284m, 0.0284m를 사용한 경우의 네 가지 경우에 대해 무차원 파수  $kl=0.02 \sim 5.0$ 의 범위에 대해 0.02의 간격으로 실시하였다. 수치계산에서 입사 파고는 모두 동일하게 0.0029 m를 사용하였다. 그 결과에 따르면 부분개방 직사각형 항만의 경우  $l_j$ 가 증가함에 따라 공진주기가 완전개방 항만에 비해 길어지는 것으로 나타났다. 손실을 고려한 경우의 증폭비는  $l_j$ 를 증가시키기에 따라 상당히 증대되며, 특히  $l_j=0.0284$  m인 경우 제 2 공진 모드의 증폭비는 입구 손실을 고려하지 않은 경우보다 오히려 커지는 것으로 나타났다. 한편, 입구 손실을 고려한 경우에는 제 2 공진 모드의 증폭비가 제 1 공진 모드보다 더 커지며 이러한 경향은  $l_j$ 의 증가에 따라 심화되는 것으로 나타났다. 한편, Lepelletier(1980)가 수리모형실험에 사용한 주기 2초(즉,  $kl=1.226$ )는 완전개방 항만의 경우에는 제 1 공진주기보다 짧은 쪽에, 그리고 부분개방 항만의 경우에는 제 1 공진주기보다 긴 쪽에 위치하였다. 즉,  $l_j$ 를 증가시키기에 따라 부분개방 항만의 경우에는 제 1 공진 모드가  $kl=1.226$ 으로부터 멀어져서 증폭비의 감소가 상대적으로 심화되었다.

#### 3.2 입력자료 준비

감천항의 부진동 검토를 위해 작성한 유한요소망도와 등수심선도를 Figs. 2와 3에 각각 제시하였다. 이 유한요소망도의 작성시에는 항입구의 중앙 부근에 설정된 원점으로부터 외부 영역까지의 거리  $r_{T_1}$ 를 5,000 m로 하였다. 3절점 삼각형 유한요소를 사용하되 절점간 최소

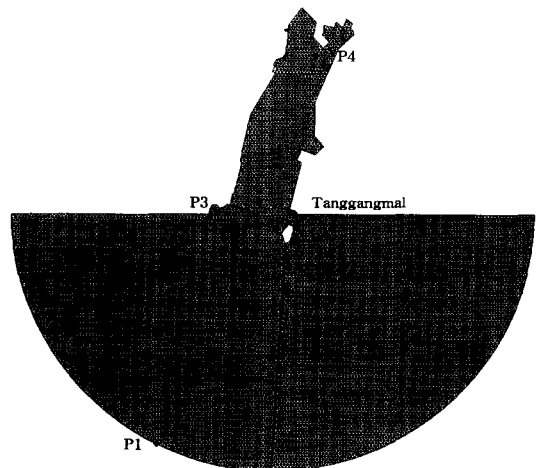


Fig. 2. Finite element mesh for the layout of Gamcheon Harbor in 1997.

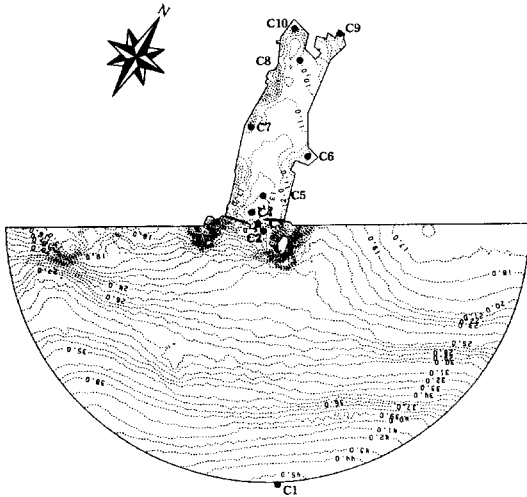


Fig. 3. Water depth contours around Gamcheon Harbor in 1997 (unit=m).

거리를 60 m로 설정하여 수치계산에서 고려한 입사파중에서 주기가 50초로 가장 짧은 파의 파장(수심 12 m 기준)에 9개 이상의 요소가 포함되도록 유한요소망을 구성하였다. 내부 영역은 13,181개의 절점과 25,702개의 요소로, 외부 영역은 276개의 2절점 무한요소로 구성하였다. Fig. 3에 제시된 C1~C10은 수치모형에서 설정한 10개의 계산 정점을 표시한 것으로서 이들 중에서 C1은 관측정점 P1, C2는 P2, C3는 C(유속 관측정점), C4는 P3, 그리고 C8은 P4에 각각 해당된다.

고체 경계면에서의 반사계수  $K_r$ 로는 직립 안벽의 경우 0.99, 압초 해안의 경우 0.98을 사용(감천항의 유한요소 영역내에는 테트라포드로 피복된 방파제나 사빈 해안이 없음)하였다. 감천항의 경우 대조평균만조위(H.W.O.S.T.)가 1.384 m로 비교적 커서 조석 변화에 따른 부진동의 특성 변화가 어느 정도 예상되어 후술하는 보정과정에서는 조위의 변화에 따른 검토도 추가하였다.

한편, 항입구의 개방비가 약 0.21(항입구 주변의 항폭은 1,150 m, 항입구의 폭은 240 m)로 상당히 작으므로 항입구에서의 흐름의 분리로 인한 입구 손실에 대한 검토가 요구되었다. 본 연구에서는 먼저 입구 손실을 무시하고 입사파향과 적정 조위를 결정한 후 입구 손실의 영향을 추가로 검토하였다. 한편, 저면 마찰은 진폭비의 감소에 미치는 영향이 작은 점과 마찰 계수를 산정하기 어려운 점을 감안하여 고려하지 않았다. 입사경계에서의 입사파 진폭은 항입구 손실을 고려하지 않는 경우에는 일정한 값을, 그리고 고려하는 경우에는 관

측치와 유사한 일정한 값을 사용하였다. 단주기파의 파향은 관측하지 못하였으나 남해안에 위치한 SSE 방향으로 개방된 항만인 점을 감안하여 ESE~SSW 사이에서 22.5° 간격으로 수치실험을 실시한 후 관측치와 가장 부합되는 방향을 결정하였다. 감천항의 경우에는 기존 연구를 통하여 관측치와의 오차가 크게 제시된 상대진폭비에 대해서는 검토하지 않고 절대진폭비를 기준으로 입사파향과 조위에 대한 비교·검토를 수행하였다.

### 3.3 절대진폭비 산정 방법

기존 연구에서 항외 정점에 대한 기타 정점에서의 상대진폭비의 재현에는 상당한 문제점이 노출되었다. 따라서, 본 연구에서는 수치계산 결과와 관측자료를 복합적으로 이용하여 각 주기별 입사파고의 추정을 시도하고 각 정점에서의 수위를 입사파고로 나누어서 구한 절대진폭비를 비교하였다. Helmholtz 공진이나 제 2 공진과 같이 주기가 매우 긴 장주기파의 항내 증폭은 입사파향에 그다지 민감하지 않은 점이 다른 연구 결과(Park et al., 1994; 정 등, 1995; 정과 박, 1996 등 참조)에서 제시되었다. 그러나, 국부 공진 모드 경우에는 입사파향이 상당한 영향을 미치게 되지만(정 등, 1995) 현실적으로 적절한 다른 대안이 없으므로(초음파식 파향·파고계에 의한 장주기파의 파향 관측이 일본 등에서 시도되고 있으나 아직까지는 실험 단계임) 본 수치계산시에는 단주기파의 평균파향을 입사파향으로 사용하였다. 본 연구에서 채택한 입사파고 및 진폭비의 결정 방법은 다음과 같다.

- ㉑ 관측치로부터 관측정점에서의 주기별 중복파고를 구한다.
- ㉒ 입사파향, 고체 경계면에서의 반사율 등을 적절하게 결정한다.
- ㉓ 입사파고를 가정(주기에 관계없이 일정)하여 수치모형으로 관측정점에서 주기별 중복파고를 계산한다.
- ㉔ 관측치와 계산치를 비교하여 입사파고를 결정한다. 즉, 관측정점에서 입사파고 = 관측 중복파고 / (계산 중복파고 / 가정 입사파고).

단, 가능한 한 항외에 위치한 관측정점을 사용하며 이것이 여러 개인 경우에는 이들을 평균하여 입사파고를 결정한다.

㉕ 저면 마찰이나 항입구 손실 등의 비선형 현상을 고려할 경우에는 입사파고가 가정한 값에 수렴할 때까지 ㉑~㉔의 과정을 반복한다.

① 관측 진폭비=관측 중복파고/입사파고

3.4 입사각의 보정

항의 정점 P1은 감천항의 남남서 방향으로 약 8 km 떨어진 목도 부근(Fig. 2 참조)에 설정되었다. 한편, 감천항의 동쪽에는 송도, 서쪽에는 다대포항이 있으며 매우 복잡한 형태의 해안선으로 구성되어 있다. 정점 P1을 포함하여 유한요소망도를 작성하는 것은 요소수가 매우 증가하게 되며, 영도와 송도 사이의 삼각형 수역과 다대포항 및 낙동강 하구 부근을 요소망도에 포함시키는 것은 해안선의 형태를 고려할 때 상당한 무리가 따르는 것으로 사료되었다. 따라서, 본 연구에서는 송도 방향과 다대포항 방향으로 일직선의 해안선을 가정하였으며(Figs. 2와 3 참조) 이 가상 해안선에서는 주위의 해안이 암초 해안인 점과 주변 수역을 부분적으로 육지화한 점을 감안하여 반사율을 0.97로 설정하였다. 먼저 평균해면(M.S.L.)인 0.783 m를 독취한 수심에 추가하여 입사파향을 결정한 후 적절한 조위를 구하였다.

전술한 바와 같이 감천항의 평면 배치를 고려하여 동지역으로 입사가 가능하다고 생각된 5개 입사파향(ESE, SE, SSE, S 및 SSW)에 대해 수치계산을 실시하고 정점 P4에서의 절대진폭비를 비교하였다.

Figs. 4~8에는 13 세트의 관측된 절대진폭비와 함께 ESE~SSW의 5개 파향을 사용하여 중앙 부두 전면에 위치한 정점 P4에서 계산된 절대진폭비를 각각 도시하였

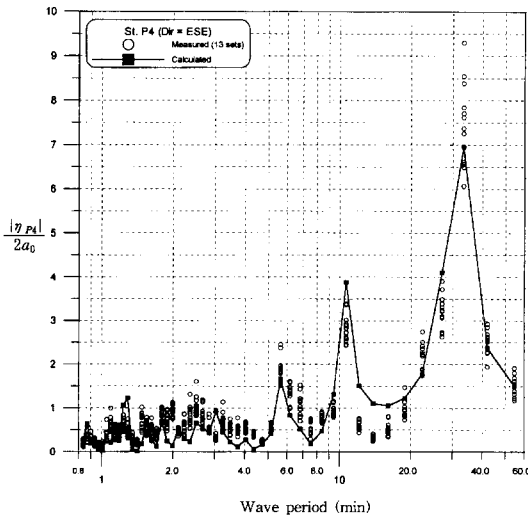


Fig. 4. Comparison of measured(Nov. 27~Dec. 10, 1997) and computed absolute amplification ratios for direction of ESE at St. P4 in Gamcheon Harbor.

다. 먼저, 파향 ESE에 대한 Fig. 4를 살펴보면 수치계산 결과가 Helmholtz 모드에 해당되는 주기 33.3분의 공진이나 주기 10.6분과 5.6분의 공진주기를 잘 재현하였다. 진폭비는 주기 33.3분과 5.6분의 공진은 계산치가 작게, 그리고 주기 10.6분의 공진은 계산치가 크게 제시되었다. 그러나, 관측치에서 나타나는 주기 2.5분(진폭비는 1.6) 부근의 국부 공진은 나타나지 않았다. Fig. 5에 제시된 파향 SE에 대한 결과도 ESE의 경우와 유사

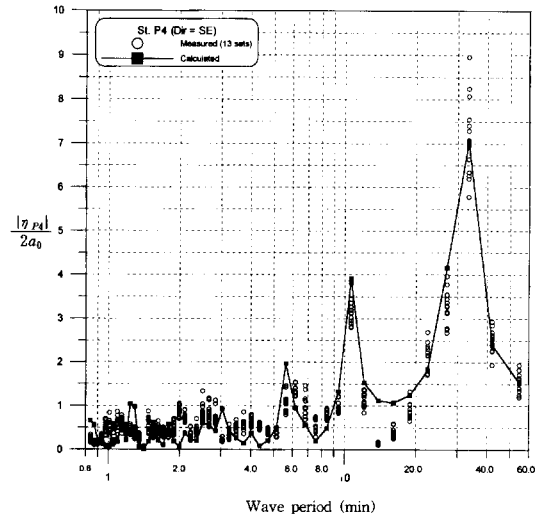


Fig. 5. Comparison of measured(Nov. 27~Dec. 10, 1997) and computed absolute amplification ratios for direction of SE at St. P4 in Gamcheon Harbor.

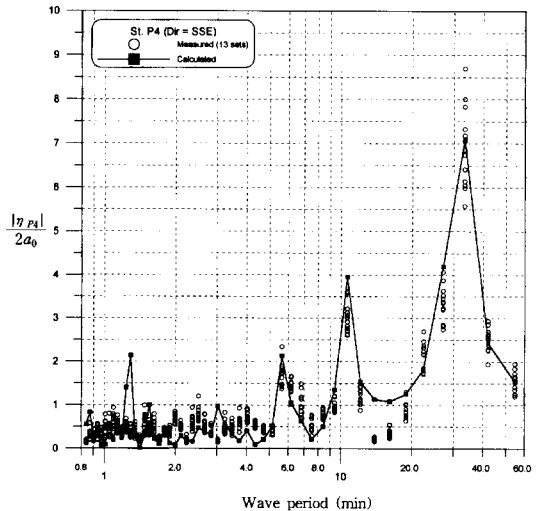


Fig. 6. Comparison of measured(Nov. 27~Dec. 10, 1997) and computed absolute amplification ratios for direction of SSE at St. P4 in Gamcheon Harbor.

하였으나 주기 33.3분의 공진에 대한 결과는 개선된 반면 5.6분의 공진에 대한 결과는 약간 나빠졌다. Fig. 6에 제시된 파향 SSE의 경우 전술한 3개 주기에서의 진폭비가 관측치와 가장 잘 부합되는 것으로 나타났다. 단, 계산치에서는 관측치에 없는 주기 1.3분의 국부 공진을 제시하였으나 이는 단주기쪽으로 갈수록 반사율이 작아져야 되는 점을 감안하면 큰 문제가 되지는 않을 것으로 사료되었다. Fig. 7에 제시된 파향 S의 경우는

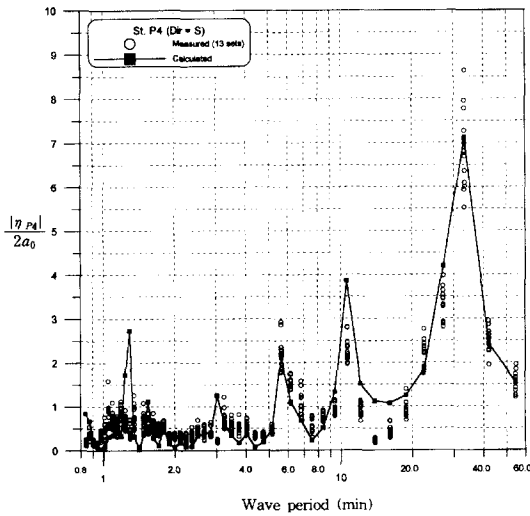


Fig. 7. Comparison of measured(Nov. 27~Dec. 10, 1997) and computed absolute amplification ratios for direction of S at St. P4 in Gamcheon Harbor.

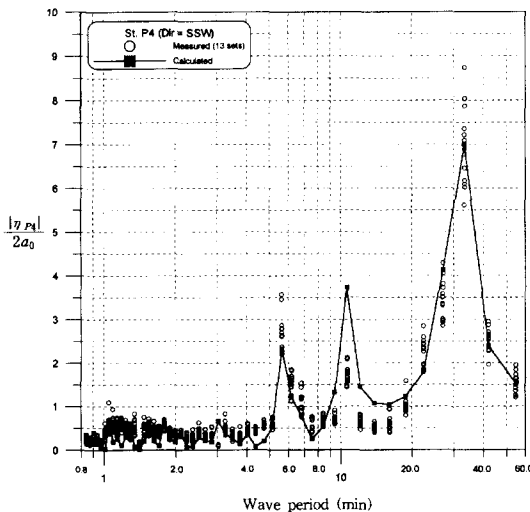


Fig. 8. Comparison of measured(Nov. 27~Dec. 10, 1997) and computed absolute amplification ratios for direction of SSW at St. P4 in Gamcheon Harbor.

SSE와 거의 동일한 경향을 나타내었으나 주기 10.6분과 1.3분의 공진의 계산치가 약간 커졌다. 파향 SSW에 대한 Fig. 8에서는 주기 10.6분의 진폭비가 크게, 그리고 주기 5.6분의 진폭비가 작게 제시되었다. 이들을 종합하면 13 세트의 관측자료와는 파향을 SSE로 가정하여 계산한 경우가 가장 잘 일치하는 것으로 나타났다.

### 3.5 조위의 보정

앞의 검토를 통하여 입사파향이 SSE로 결정되었으므로 여기서는 적절한 조위의 결정에 대해 검토하였다. 조위로는 대조평균만조위(H.W.O.S.T) 1.384 m, 평균해면(M.S.L.) 0.783 m 및 대조평균간조위(L.W.O.S.T) 0.082 m를 각각 적용하였다. 이 중에서 평균해면에 대한 결과는 Fig. 6에 제시되어 있다.

Figs. 9와 10에는 13 세트의 관측된 절대진폭비와 함께 대조평균만조위와 대조평균간조위를 사용하여 중앙 부두 전면에 위치한 정점 P4에서 계산된 절대진폭비를 각각 도시하였다. 먼저, 대조평균만조위를 사용한 경우에 대한 Fig. 9를 살펴보면 Helmholtz 모드에 대한 수치 계산 결과가 상당히 불량하게 나타났다. Fig. 10에 제시된 대조평균간조위를 사용한 결과에서는 주기 10.6분과 5.6분의 재현성이 평균해면을 사용한 경우보다 불량하게 제시되었다. 또한, 수치계산 결과에서는 관측치에 없는 주기 1.6분과 1.4분의 국부 공진이 나타났다. 이들을 종합하면 13 세트의 관측자료와는 조위를 평균해

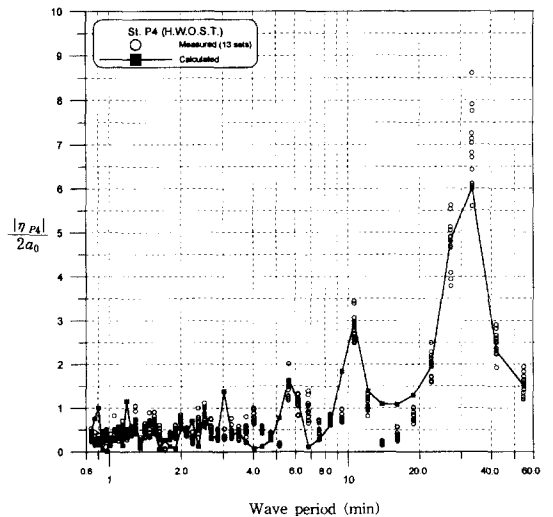


Fig. 9. Comparison of measured(Nov. 27~Dec. 10, 1997) and computed absolute amplification ratios for tide level of H.W.O.S.T. at St. P4 in Gamcheon Harbor.



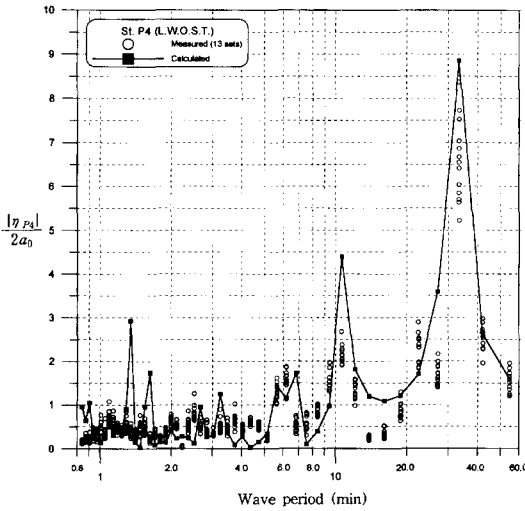


Fig. 10. Comparison of measured(Nov. 27~Dec. 10, 1997) and computed absolute amplification ratios for tide level of L.W.O.S.T. at St. P4 in Gamcheon Harbor.

면으로 가정하여 계산한 경우가 가장 잘 일치하는 것으로 나타났다.

3.6 항입구 손실의 영향

개방비가 0.21(항폭 1,150 m, 입구폭 240 m)인 감천항의 제트 길이를 식 (18)을 이용하여 구하면  $l_j=86.6$  m가 된다. 전술한 검토를 통하여 결정된 입사파향과 조위에 대한 평균해면의 사용을 반영하고 제트 길이를 무시한 경우와  $l_j=86.6$  m를 사용한 경우 주기 33.3분의 파랑에 대해 입사파 진폭을 0.06~4.0 m로 가정하여 계산한 절대진폭비를 Table 1에 제시하였다.

Table 1을 살펴보면 항입구 손실을 고려하지 않았을 때는 Helmholtz 모드의 절대진폭비가 약 7.1로 일정하게 나타났으나, 손실을 고려하는 경우 입사파 진폭의 증가에 따라 진폭비가 크게 감소하였다. 제트 길이를 고려하지 않은 경우 입사파 진폭 0.05 m 이하에서는 손실을 무시한 경우와 거의 동일한 값을 보였다. 제트 길이를 고려한 경우 입사파 진폭이 0.07 m 이하일 때는 절대진폭비가 손실을 고려하지 않은 경우보다 오히려 크게 나타났으며 이는 정 등(1998)에 제시된 것처럼 항입구 손실과 제트 길이의 고려로 인하여 Helmholtz 모드의 공진주기가 길어졌기 때문으로 사료된다.

장주기 성분 파고의 분석 결과와 정 등(1997)에 제시된 정점 P1에서의 시계열 자료를 참조하면 본 수치 모형의 입사 경계에서의 Helmholtz 공진 모드의 입사

Table 1. Absolute amplification ratios calculated for wave period of 33.3 minutes with various amplitudes of incident waves with and without entrance energy losses in Gamcheon Harbor.

Incident wave amplitude (m)	Without entrance energy loss	With entrance energy loss	
		$l_j=0$ m	$l_j=86.6$ m
0.06	7.098	7.036	7.607
0.07		6.832	7.322
0.08		6.644	7.068
0.10		6.330	6.657
0.15		5.748	5.952
0.20		5.301	5.452
0.30		4.677	4.762
0.50		3.906	3.949
1.00		2.973	2.990
2.00		2.212	2.218
4.00		1.620	1.622

파 진폭은 0.01~0.04 m의 범위인 것으로 추정된다. 이러한 입사파 진폭의 크기는 전술한 결과를 기준할 때 진폭비를 거의 감소시키지 않을 것으로 사료된다.

4. 감천항의 공진 특성

4.1 공진 모드

감천항의 부진동 공진주기를 보다 정확하게 검토하기 위하여 Fig. 3에 제시된 10개의 계산 정점에서의 절대진폭비를 계산하였다. 수치계산은 주기 50~3,000초의 범위에서 2초 간격으로 실시하였다. 전술한 바와 같이 감천항의 경우 입사파 진폭이 0.04 m 이하여서 손실을 무시한 경우에 비해 진폭비의 감소를 기대하기 어려우며, 또한 항입구 손실과 제트 길이를 포함한 실제 항만의 부진동 현상의 수치모델링에는 아직까지 문제점이 남아 있으므로 항입구 손실을 고려하지 않았다.

Fig. 11에는 계산 정점 C1~C5, 그리고 Fig. 12에는 C6~C10에서의 무차원 진폭비(각 정점에서의 중복파고/입사 중복파고)를 각각 도시하였다.

4.1.1 입사 경계

정점 C1은 관측정점 P1과 가깝고 유한요소 영역과 무한요소 영역 사이의 원호 경계에 위치하며 방사파의 적절한 처리 여부를 확인할 목적으로 설정하였다. 그림에서 알 수 있듯이 원호 경계에서는 전체 주기 영역에서 진폭비가 1 부근으로 제시되었으므로 전반적으로 방사파가 적절하게 처리된 안정된 결과를 제시하였다.

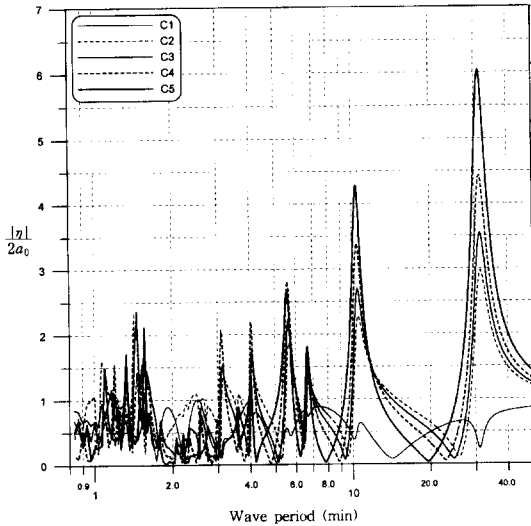


Fig. 11. Computed wave amplification ratios for wave periods of 50 to 3,000 seconds at stations C1~C5 in Gamcheon Harbor.

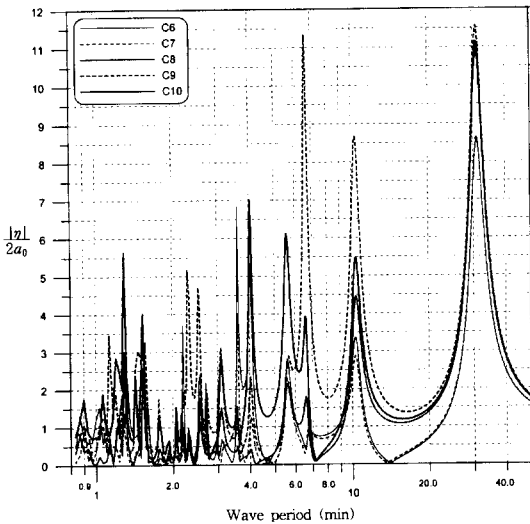


Fig. 12. Computed wave amplification ratios for wave periods of 50 to 3,000 seconds at stations C6~C10 in Gamcheon Harbor.

4.1.2 항입구

정점 C2에서는 주기 31.5분(진폭비 3.0), 10.6분(진폭비 2.3), 6.7분(진폭비 1.4), 5.7분(진폭비 1.9), 4.1분(진폭비 1.6), 3.2분(진폭비 1.3), 정점 C3(유속 관측정점 C)에서는 주기 31.4분(진폭비 3.5), 10.5분(진폭비 2.7), 6.7분(진폭비 1.5), 5.6분(진폭비 2.2), 4.1분(진폭비 1.8), 3.1분(진폭비 1.5), 그리고 정점 C4(관측정점 P3)에서는

주기 31.3분(진폭비 4.4), 10.5분(진폭비 3.4), 6.7분(진폭비 1.9), 5.6분(진폭비 2.8), 4.0분(진폭비 2.2), 3.1분(진폭비 2.1) 등의 인접한 주기에서 공진이 나타났으며 정점의 위치가 항내로 향할수록 주기는 짧아지고 진폭비는 증대되었다. 한편, 이 정점들에서는 주기 2분 이하에서도 진폭비가 2 내외인 여러 개의 공진이 제시되었으며, 항입구 중앙의 정점 C3에서는 주기 24.6분, 9.3분 및 5.1분에서 진폭비가 0.1보다 훨씬 작은 절점을 나타냈다.

4.1.3 항내

항내의 정점 C5에서도 상당한 진폭비를 가진 다수의 공진 모드가 나타난다. 한편, Helmholtz 모드의 경우 정점 C4의 31.3분(진폭비 4.4)에서 정점 C5의 31.1분(진폭비 6.0)으로 항내로 향할수록 공진주기는 짧아지며 진폭비는 증대되었다. 정점 C5에서는 이 외에도 주기 10.4분(진폭비 4.3), 6.7분(진폭비 1.8), 5.6분(진폭비 2.7) 및 2분 이하에서 다수의 공진이 출현하였다.

항의 내측에 위치한 정점 C6~C10에서의 진폭비를 제시한 Fig. 12를 살펴보면 모지포말 북측의 소형 slip의 내부에 위치한 정점 C6에서 공진 모드가 가장 많이 출현하였다. 항의 중앙부에 가까운 정점 C6~C8에서의 Helmholtz 모드의 주기는 31.0분으로 동일하였으나 진폭비는 정점 C6의 8.6에서 C8의 10.9로 증가되었으며, 두 번째 공진도 주기는 10.4분으로 동일하였으나 진폭비는 정점 C6의 3.3에서 정점 C8의 4.6으로 증가되었다. 주기 6.7분 부근의 공진은 정점 C6과 C7에서는 출현하지 않았으며, 정점 C8에서는 6.6~6.7분의 범위에서 진폭비 1.8로 약하게 나타난 반면, 주기 5.6분의 공진은 정점 C6~C8에서 2.1~2.8의 진폭비로 나타났다. 주기 4.0분의 공진은 정점 C6(진폭비 5.3)에서만 출현하였다. 이밖에 정점 C6에서는 주기 3.6분(진폭비 6.8), 2.7분(진폭비 2.2), 2.6분(진폭비 2.4), 2.2분(진폭비 3.7), 1.5분(진폭비 2.6), 1.3분(진폭비 2.3) 등에서, 정점 C7에서는 3.6분(진폭비 4.0), 2.6분(진폭비 2.0), 1.8분(진폭비 1.8), 1.5분(진폭비 2.1)에서, 정점 C8에서는 1.5분(진폭비 2.2)과 1.3분(진폭비 2.8)에서 다양한 공진 모드가 출현하였다.

4.1.4 港奧

항의 가장 내측에 위치한 정점 C9와 C10에서는 모두 31.0분에서 Helmholtz 모드가 출현하며 진폭비는 항전 부두의 동측에 위치한 소형 slip의 가장 내측에 위치한 정점 C9에서 11.6으로 가장 크다. 두 번째 공진

은 주기 10.4분에서 동쪽 수역의 정점 C9에서는 진폭비 8.7, 서쪽 수역에서는 진폭비 5.5로 약간 다르게 나타났다. 세 번째 공진은 주기 6.6분에서 동쪽의 정점 C9에서는 진폭비 11.3으로, 서쪽의 정점 C10에서는 진폭비 3.9로 나타났다. 네 번째 공진은 서쪽 수역의 경우 C9에서는 주기 5.7분에서 2.9의 진폭비를, 그리고 동쪽 수역에서는 주기 5.6분에서 6.1의 진폭비를 나타냈다. 주기 4.0분의 공진은 C9와 C10에서 각각 2.3과 7.0의 진폭비를 보였다. 이 밖에 국부 공진으로는 정점 C9에서는 3.1분(진폭비 3.1), 2.5분(진폭비 4.7), 2.3분(진폭비 5.2), 1.6분(진폭비 3.3), 1.5분(진폭비 3.0), 1.1분(진폭비 3.4)에서, 그리고 정점 C10에서는 3.1분(진폭비 2.9), 1.5분(진폭비 4.0), 1.3분(진폭비 5.7) 등에서 다양하게 나타났다.

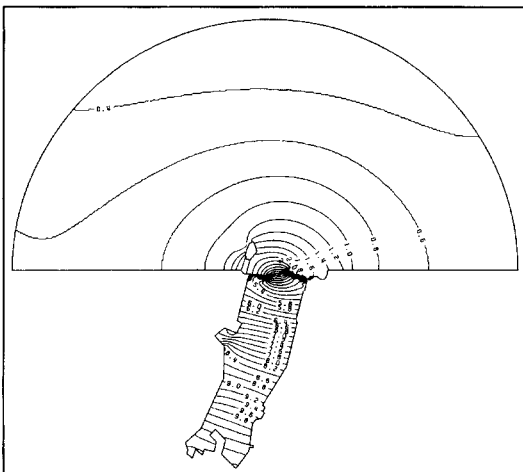
**4.2 부진동의 공간적 분포**

수치실험에서 설정한 105개 계산정점 중 중요하다고 판단한 정점들에서 공진 모드 또는 절점이 나타난 주기 31.0분(1,860초), 10.4분(622초), 6.6분(398초), 5.6분(336초), 4.0분(242초), 3.6분(216초), 3.1분(186초) 및 1.6분(94초)에 대한 진폭비 등치선도를 부록의 Fig. 13~20에 각각 제시하였다.

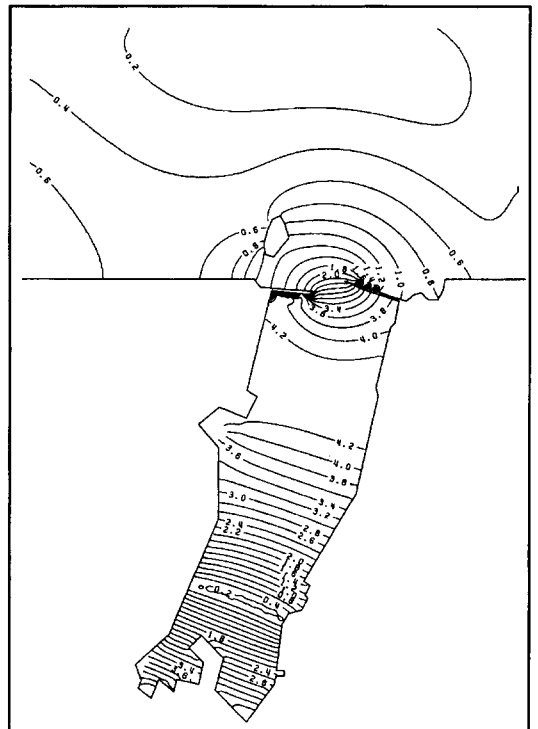
먼저, Fig. 13을 살펴보면 주기 31.0분인 공진 모드의 경우 절점선(nodal line)이 대체로 유한요소 영역의 원호 반경 외측에 형성되고 북(anti-node)은 항의 가장 내측 수역에서 생기는 감천항 수역의 Helmholtz 모드

이다. 주기 10.4분의 공진 모드(Fig. 14 참조)는 항입구 외측과 중앙 부두 전면에서 절점이 형성되므로 감천항의 제 2 공진 모드로 생각할 수 있다. 주기 6.6분의 공진 모드(Fig. 15 참조)는 항입구 외측과 항의 중앙 부근에서 절점이 형성되었다. 주기 5.6분의 공진 모드(Fig. 16 참조)도 항입구 외측과 항의 중앙 부근에서 절점이 형성되었으나 위치는 주기 6.6분에 비해 약간 항외측에 위치하였다. 주기 4.0분의 공진(Fig. 17 참조)은 항입구 외측의 두도 부근과 감천항의 종방향으로 1/3 및 2/3 지점의 3개소에서 절점이 형성되었다.

주기 3.6분의 공진 모드(Fig. 18 참조)는 항의 세로 방향으로 절점선이 형성된 감천항의 횡방향 공진으로 나타났다. Fig. 19의 주기 3.1분의 공진은 항외측과 항내의 3개 지점에서 절점이 나타났다. Fig. 20의 주기 1.6분의 공진은 항입구 내측의 중심부에 북이, 중앙 부두 전면에서 절점이 형성되는 국부 공진으로 나타났다. 이 외에도 본 연구에서 제시하지는 않았으나 주기 152초, 138초, 92초, 88초, 78초, 72초 및 68초의 국부 공진 등은 매우 복잡한 공진 형태를 보였다.



**Fig. 13.** Computed amplification ratio contours for wave period of 31.0 minutes in Gamcheon Harbor.



**Fig. 14.** Computed amplification ratio contours for wave period of 10.4 minutes in Gamcheon Harbor.

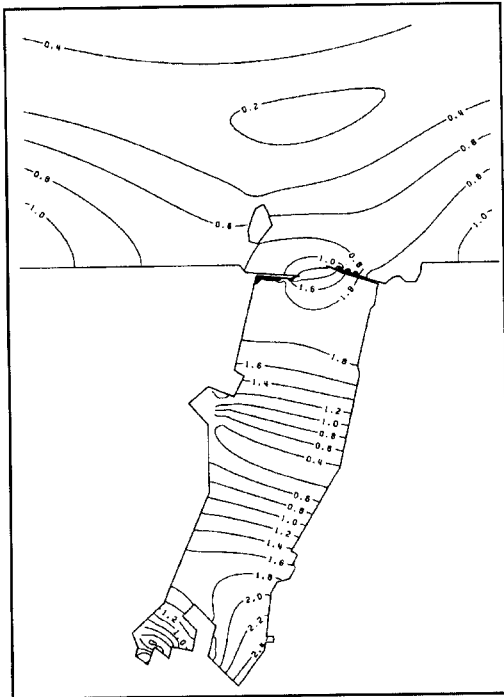


Fig. 15. Computed amplification ratio contours for wave period of 6.6 minutes in Gamcheon Harbor.

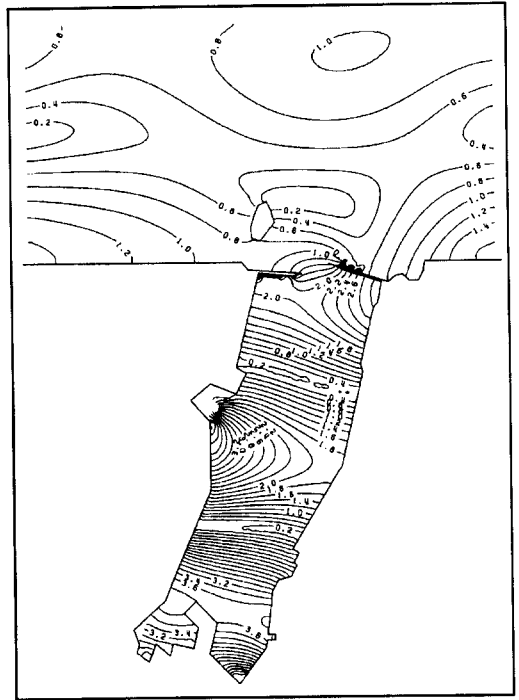


Fig. 17. Computed amplification ratio contours for wave period of 4.0 minutes in Gamcheon Harbor.

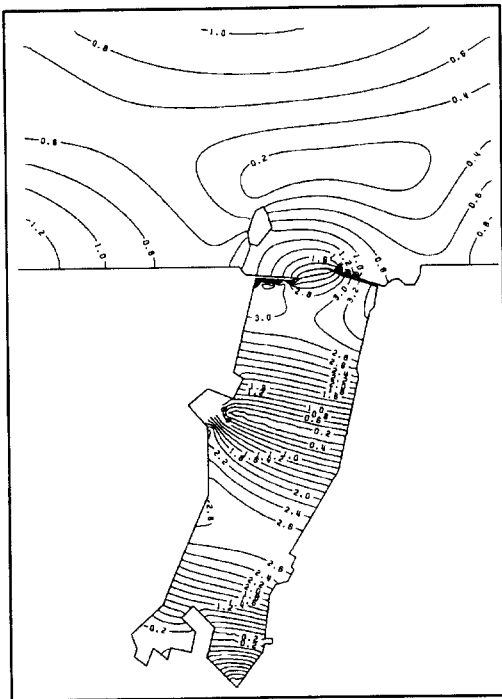


Fig. 16. Computed amplification ratio contours for wave period of 5.6 minutes in Gamcheon Harbor.

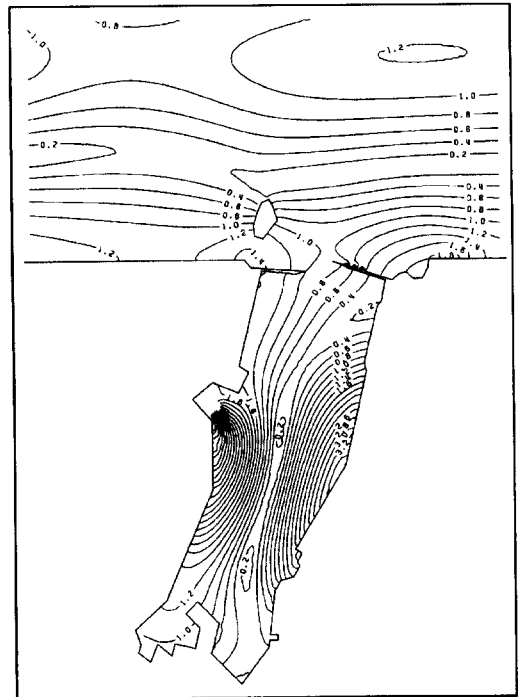


Fig. 18. Computed amplification ratio contours for wave period of 3.6 minutes in Gamcheon Harbor.

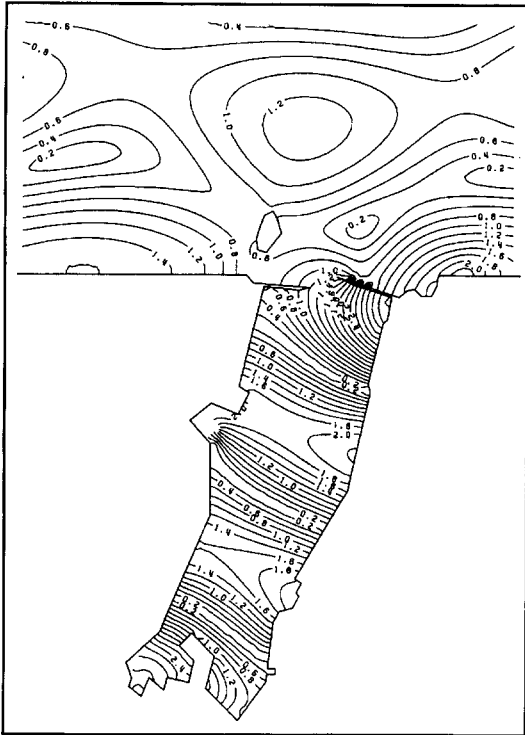


Fig. 19. Computed amplification ratio contours for wave period of 3.1 minutes in Gamcheon Harbor.

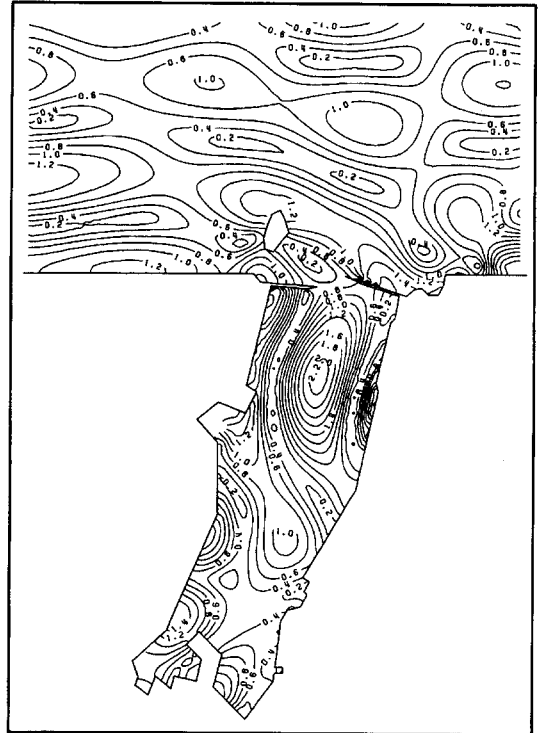


Fig. 20. Computed amplification ratio contours for wave period of 1.6 minutes in Gamcheon Harbor.

### 5. 결론 및 토의

본 연구에서는 정 등(1998)의 Galerkin 유한요소 모형을 실제로 항입구가 좁은 감천항의 부진동 검토에 적용하였으며 이를 통하여 구해진 주요 결론 및 토의 사항은 다음과 같다.

- 감천항에서는 무한요소 영역의 고체 경계면의 반사를 변화, 적용 수심의 변화, 입사 파향의 변화에 따른 수치모형의 보정 시험을 실시하였으며, 그 결과 반사율로 0.97, 조위로 M.S.L., 입사 파향으로 SSE를 사용하는 것이 적절한 것으로 제시되었다.

- 감천항에 대해 항입구 손실을 고려하지 않았을 때는 정점 C8(관측정점 P4)에서의 절대진폭비가 약 7.1로 일정하게 나타났으나 손실을 고려하는 경우 입사와 진폭의 증가에 따라 진폭비가 크게 감소하였다. 세트 길이를 고려하지 않은 경우 입사와 진폭 0.05 m 이하에서는 손실을 무시한 경우와 거의 동일한 값을 보였으며, 고려한 경우에는 공진주기의 이동으로 입사와 진폭이 작을 때는 절대진폭비가 손실을 고려하지 않은 경

우보다 오히려 크게 나타났다. 수치모형의 입사 경계에서의 Helmholtz 공진 모드의 입사와 진폭은 관측자료 분석 결과에서 0.01~0.04 m의 범위인 것으로 제시된 바 이는 진폭비를 거의 감소시키지 않을 것으로 사료되었다.

- 수치실험 결과 감천항의 Helmholtz 공진 모드의 주기는 31.0분으로 제시되어 관측자료 분석 결과인 27.0~33.3분과 잘 일치하였다. 관측자료에서 제시된 주기 9.4~12.1분의 공진 모드가 수치실험에서는 10.4분으로, 관측자료의 주기 5.2~6.2분의 공진 모드는 수치실험에서는 6.6분과 5.6분의 2개로 제시되었다. 강 등(1989)에 따르면 영일만에는 약 20.2분 주기의 횡방향 공진이 존재하며 감천항의 경우에도 수치실험을 통하여 진폭비가 상당한 횡방향 공진이 주기 3.6분과 1.6분에서 존재함을 확인하였다.

- 본 연구에서는 Morse and Ingard(1968)의 식으로 세트 길이를 추정하였으나 보다 개선된 추정 방법에 대한 추가적인 연구가 요망된다.

- 수치실험 결과에서는 주기 3분 이하에서 다수의 공진이 매우 복잡한 형태로 제시되었으나 이들의 스펙트

럼 밀도의 폭이 좁은 점을 감안하면 실제 항만에서는 보다 단순한 형태로 출현할 것으로 생각된다.

## 사 사

본 연구는 한국해양연구소의 기관고유사업인 “연안 방재 구조물의 설계기술 개발”과 기본연구사업인 “구속파의 전파 특성 해석”의 일환으로 수행되었음을 밝힙니다.

## 참고문헌

- 강석구, 이상룡, 소재귀, 1989. 영일만과 포항신항의 부진동 현상, *해양연구*, **11**(2): 31-41.
- 서승남, 연영진, 1994. Galerkin 유한요소법에 의한 항내 온도 모형, *한국해양·해양공학회지*, **6**(4): 439-451.
- 정원무, 1999. 항만부진동에 대한 현장연구와 유한요소 해석, 박사학위논문, 서울대학교, 445 p.
- 정원무, 박우선, 1996. 항만 공진에 대한 복합요소 수치모형의 민감도 분석, *한국해양·해양공학회지*, **8**(2): 174-184.
- 정원무, 이길성, 박우선, 정경태, 1998. 항입구 손실과 저면 마찰을 고려한 항만부진동 유한요소 모형, *해양연구*, **20**(2): 287-307.
- 정원무, 정경태, 채장원, 1995. 목호항의 항내 진동, *한국해양·해양공학회지*, **7**(1): 46-56.
- 정원무, 채장원, 전기천, 이종찬, 조홍연, 김용권, 백원대, 박승준, 김미경, 1997. 구속파의 전파 특성 해석, BSPE 97625-00-1055-2, 한국해양연구소, 174 p.
- Berkhoff, J.C.W., 1972. Computation of combined refraction-diffraction, *Proc. 13th Coastal Engrg. Conf.*, ASCE, pp. 471-490.
- Bowers, E.C., 1977. Harbour resonance due to set-down beneath wave groups, *J. Fluid Mech.*, **79**, Part 1, pp. 71-92.
- Chamberlain, P.G. and Porter, D., 1995. The modified mild-slope equation, *J. Fluid Mech.*, **291**, pp. 393-407.
- Chen, H.S., 1986. Effects of bottom friction and boundary absorption on wave scattering, *Applied Ocean Res.*, **8**(2), pp. 99-104.
- Cho, Y.J., 1997. Control of seiches by adjustment of entrance channel width, *J. Korean Soc. Coastal and Ocean Engrs.*, **9**(2), pp. 57-62.
- Gerber, M., 1986. Modelling dissipation in harbour resonance, *Coastal Engrg.*, **11**, pp. 211-252.
- Ito, Y., 1970. On the effect of tsunami breakwater, *Coastal Engrg. in Japan*, **13**, pp. 89-102.
- Jeong, W.M., Chae, J.W., Park, W.S. and Jung, K.T., 1996. Field measurements and numerical modeling of harbor oscillations during storm waves, *Proc. 25th Coastal Engrg. Conf.*, Orlando, Florida, pp. 1268-1278.
- 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., Terminal Island, California, 266 p.
- Lee, J.J., 1971. Wave-induced oscillation in harbors of arbitrary shape, *J. Fluid Mech.*, **45**, pp. 375-394.
- Lepelletier, T.G., 1980. Tsunamis - harbor oscillations induced by nonlinear transient long waves, *Report No. KH-R-41*, W. M. Kerck Lab. of Hydrodynamics and Water Resources, CIT, Pasadena, C.A.
- 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, 740 p.
- 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. and Lee, Y.K., 1975. Helmholtz resonance of harbors, *J. Fluid Mech.*, **67**, pp. 445-464.
- Miles, J.W. and Munk, W., 1961. Harbor paradox, *J. Waterways and Harbors Div.*, ASCE, **87**(WW3), pp. 111-130.
- Morse, P.M. and Feshbach, H., 1953. *Methods of Theoretical Physics*. Part I, McGraw-Hill, New York, 997 p.
- Morse, P.M. and Ingard, K.U., 1968. *Theoretical Acoustics*. McGraw-Hill, New York.
- Murakami, H., 1976. A solution for wave-induced oscillations in harbors considering energy dissipation, *Coastal Engrg. in Japan*, **19**, pp. 29-45.
- Park, W.S., Chun, I.S. and Jeong, W.M., 1994. Infinite element for the analysis of harbor resonances, *J. Korean Soc. Coastal and Ocean Engrs.*, **6**(2), pp. 139-149.
- Raichlen, F., Lee, J.J. and Lepelletier, T.G., 1994. The effects of dissipation on experimental and numerical models of harbor resonance, *Proc. Int. Symp.: Waves - Physical and Numerical Modelling*, Vancouver, Canada, pp. 260-269.
- 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.
- Unluata, U. and Mei, C.C., 1975. Effects of entrance loss on

harbor oscillations, *J. Waterways, Harbours and Coastal Engr. Div.*, ASCE, **101**(WW2), pp. 161-180.

Wilson, B.W., 1962. Discussion of "Harbor paradox." by Miles, J.W. and Munk, W., *J. Waterways, Harbors and*

*Coastal Engr. Div.*, ASCE, **88**(WW2), pp. 185-195.

---

Received December 9, 1999

Accepted January 6, 2000