

군장항의 부진동 특성

조용준* · 박형수**

*서울시립대학교 토목공학과

**서울시립대학교 토목공학과 대학원

Seiche Characteristics of Gun-Jang Harbor

YONG-JUN CHO* AND HYUNG-SOO PARK**

*Dept. of Civil Engr, University of Seoul, Seoul, Korea

**Dept. of Civil Engr, University of Seoul, Seoul, Korea

KEY WORDS: Seiche 부진동, Natural frequency 고유진동수, Response spectrum of inner harbor 항 내 응답스펙트럼, Entrance head loss 유입부 손실, Harbor paradox 항 역설

ABSTRACT: Lately Gun-Jang Harbor has undergone a drastic change in hydraulic characteristics due to newly added harbor protection measures, like a wharf and breakwater. The wharf and breakwater, with a training dike, were constructed to keep enough depth for navigation. They make the plan view of Gun-Jang Harbor semi closed and very elongated, which makes it very vulnerable to seiche. Hence it is an urgent task to unveil the hydraulic characteristics, like seiche, for the optimal operation of the new harbor system. In this study, we numerically analyze the seiche characteristics of Gun-Jang Harbor over the 10-4~10-3 Hz frequency range, considering that wind waves due to seasonal winds are the most prevailing during winter in the West sea. As a wave driver, we use Mild Slope Eqs. and numerically integrate these using FEM based on Galerkin weak formulation. It turns out that the 1st, 2nd, 3rd and 4th eigen models are over 0.0009 Hz, 0.0013 Hz, 0.0017 Hz and 0.002 Hz.

1. 서 론

비교적 장주기의 파랑이 항으로 내습하는 경우 항 고유진동수 (Natural Frequency) 대역에서 파랑은 증폭되며 우리는 이러한 현상을 부진동 (Seiche)이라 한다. 고유진동수는 비교적 광대역에 분포하며 공진성 기작에 의해 항 내로 추가적으로 유입된 에너지로 인해 항은 요동하며, 중국에는 저면 마찰, 항 유입부에서의 박리, 경계층에서의 에너지 손실, 항 외부로의 에너지 방사 등으로 인해 점차 소산되나 최대 수일 동안 지속될 수 있다.

10¹Hz 정도의 단주기 파랑과 너울을 효과적으로 차폐하는 소규모 항의 경우 가장 역동적인 요동은 10⁻⁴~10⁻²Hz대역에서 관측되며, 이러한 요동은 항 하역작업에 역기능으로 작용하게 된다. 따라서 항 최적운행을 위해서 항의 부진동 특성을 이해하는 것은 선결 과제로 보인다.

이러한 부진동은 쓰나미, 기상해일, 너울무리에 의해 야기될 수 있으며 쓰나미와 기상해일의 경우 10⁻⁴~10⁻³Hz, 너울군의 경우 10⁻³~10⁻²Hz 대역에서 항 요동은 가장 역동적인 것으로 인지되고 있다. 이러한 부진동의 특성을 유입되는 파랑의 항 내 진폭 비율을 주파수의 함수로 해석하고자 하는 많은 노력이 Houston(1977), Yamada et al.(1983), Lewis et al.(1989), Morison

and Imberger(1992)에 의해 진행된 바 있다. 그러나전술한 연구들은 일정수심이라는 가정에 기초하여 비교적 짧은 주파수 대역에서는 상당한 오류를 야기 할 수 있다. 부진동 해석에 수심변화가 미치는 영향을 포함하려는 노력은 Olsen and Hwang(1971) 에 의해 처음 시도되었으나, 에너지 손실을 무시했음에도 불구하고 수치해석 결과는 관측치에 비해 상당히 큰 값을 보였다. Olsen and Hwang(1971)은 이러한 오류를 Edge wave가 관측지점과 연안 사이에서 발생하여 관측치에는 포함될 수 없었다는 사실로 설명하였다.

너울무리가 부진동을 야기 할 수 있다는 사실은 Bowers (1977), Mei and Agnon(1989), Wu and Liu(1990) 등에 의해 처음 규명되었다. 전술한 연구에서 쇄파 대역에서 흔히 관측되는 Free mode의 장주기 중력파가 항 부진동을 야기할 수 있다는 사실은 간과된 것으로 보여진다. 이러한 오류는 극 천해에 관측되는 Free mode의 장주기 파랑은 항에서 방사된 것이라는 당시의 이해에 기초한 것으로 보여지나 그 후 천해역에서 관측되는 파랑의 상당한 부분들이 Free mode의 장주기 파랑임이 Okihiro et al.(1992), Elgar et al.(1992) Herbers et al. (1992) 에 의해 규명되어 전술한 연구들은 시정되어야 할 것으로 보여진다.

너울무리가 잔잔할 경우 장주기파에서 Bound mode가 차지하는 비율은 그리 크지 않으며, 너울무리가 비교적 사나울 경우 Free mode와 Bound mode는 서로 대등한 세력으로 성장한다. 10⁻³~10⁻²Hz 대역의 Free mode 장주기 파랑의 생성 기작에

교신저자 조용준: 서울특별시 동대문구 전농동 90번지

02-2210-2521 young@uos.ac.kr

대하여서는 아직 이렇다 하게 규명된 것은 없으나, 쇄파대 인근 해역에서 생성되는 듯하다. 순차적으로 천해역에서 외해 쪽으로 방사되는 에너지는 굴절 등으로 연안 인근 해역에 갇힐 수 있다. 항 유입부 인근 천해역에서 관측되는 장주기 파랑의 대부분은 비선형 기작에 의해 생성되는 것으로 보이나 Wu and Liu(1990)에 따르면, 항 부진동 해석에서 비선형성이 미치는 영향은 그리 크지 않는 것으로 인식된다.

이러한 인식에 기초하여 Okihiro et al.(1993) 은 계산 영역을 항 내와 원역으로 구분하고 각 영역에서의 Wave driver로 환경사 방정식과 비선형 해석해를 차용하고 총 계산영역에서 해의 연속성을 담보하기 위해 두 영역의 경계에 접근 정합조건을 부과하여 항 부진동 문제를 수치적으로 해석하였다. 향후 이 해석방법은 항 부진동 해석의 큰 흐름을 형성하게 된다. 그러나 이 연구에서 Okihiro et al.(1993) 은 항 유입부에서의 흐름 단면 축소로 인한 와 형성, 이로 인한 에너지 손실을 간과하여 관측치 보다 다소 과대한 증폭비, 고유 주파수가 관측치에서 다소 미세하게 이격되는 Frequency shift 등의 문제를 내포하고 있으며 복잡한 수치적 구현방법은 실무에서의 사용을 어렵게 하는 것으로 보여진다.

따라서 본고에서는 Cho et al.(2004)에 의해 완성된 타원형 환경사 방정식에서의 내부조파 기법과 항 유입부에서의 에너지 손실을 반영한 항 부진동 해석을 위한 수치모형을 제시하고 균산외항 부진동 특성을 해석하고자 한다.

2. 기본방정식

천해역에서 굴절, 회절 그리고 반사로 인한 파랑변형의 이해는 연안수리 문제의 해결에 있어 중요한 역할을 수행한다 이러한 파랑변형구조의 해석을 위한 파랑모형으로 가장 선호되는 것은, 최근 비선형 계열의 파랑모형에서 진행된 발전(Nwogu, 1993)에도 불구하고 여전히 Berkhoff(1972; 1976)가 제시한 타원형 환경사방정식 계열로 판단된다.

이러한 선호도는 비선형 계열의 파랑 모형에 비해 수치적 해석이 상대적으로 용이하다는 점과 Berkhoff의 유도과정에서는 무시된 수심급변항이 보완되어 그 적용 범위가 확대된 것에 기인되는 듯하다(Chamberlain and Porter, 1995; Massel, 1993). Berkhoff(1972; 1976), Chamberlain and Porter(1995) 등이 제시한 타원형 환경사방정식, 수정 타원형 환경사방정식은 수치적 해석과정을 더욱 용이하게 하기 위해 쌍곡형 형태로 전환되어 사용되기도 하며, 이 경우 유한차분 기법이 선호된다(Copleland, 1985; Suh et al., 2001). 전술한 쌍곡형 수정환경사 방정식은 복잡한 지형의 경우 경계조건의 도입에 상당한 어려움이 수반되므로 이 경우 유한요소법을 이용하여 타원형 환경사방정식 계열을 해석하는 것이 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있다 (Thompson and Hadley, 1995). 이러한 인식에 기초하여 본 고에서는 Chamberlain and Porter,(1995)에 의해 제시된 수정 환경사 방정식 (Fully elliptic mild-slope equation)을 차용하였으며 내부조파를 위한 용출항 ψ 를 포함한 식을 나열하면 식 (1)과 같다.

$$\nabla \cdot (CC_g\phi) + (K^2 CC_g + gu_1 \nabla^2 h + gu_2 (\nabla h)^2)\phi = \psi \quad (1)$$

여기서,

$$u_1 = \frac{\text{sech}^2 kh}{4(K + \sinh k)} (\sinh K - K \cosh K)$$

$$u_2 = \frac{K \text{sech}^2 kh}{12(K + \sinh k)} (\sinh K - K \cosh K)$$

$$K = 2kh$$

또한 $\nabla = \tilde{i}\partial/\partial x + \tilde{j}\partial/\partial y$, (\tilde{i}, \tilde{j}) 는 이차원에서의 단위벡터, C , C_g 는 각각 파의 속도와 군속도, k 는 파수, ω 는 각주파수, ϕ 는 속도 포텐셜 함수를 나타낸다. 수면 변위 η 를 ϕ 로 기술하는 경우 $\eta = i\omega\phi/g$ 이며 여기서 $i = \sqrt{-1}$ 이다. 환경사 방정식에 기초한 장주기 파랑의 수치해석에 관한 우리의 경험은 항 고유의 주파수는 비교적 정확한 예측이 가능하나 항 유입부에서의 손실을 고려하지 않을 경우 유입부 쪽이 감소되면 파고가 증가하는 역설로 인해 어려움을 겪을 수 있다는 것이다. 이러한 반성에 기초하여 유입부 단면 수축부에서의 에너지 손실을 정량화 하려는 노력이 시도된다.

2.1 내부조파 기법과 유입부 손실 수두

타원형 환경사방정식 계열을 FEM을 이용하여 적분하는 경우, 항에서 산란되어 외해로 진행되는 파랑의 개방경계에서의 처리는 어려운 과제로 인식되어 왔다. 이러한 어려움은 최근 Boussinesq 계열과 쌍곡형 환경사방정식 같은 시간의존형 파랑모형의 경우, 파랑을 계산영역의 내부에서 조파하고 개방경계에 흡수층을 거치하여 계산영역 내부로부터 산란되어 접근하는 파랑에너지를 흡수하는 것이 일반화된 해법으로 보여진다 (Israeli and Orszag, 1981; Larsen Dancy, 1983; Wei et al., 1999). 이에 반해 타원형 파랑모형에서의 내부조파기법은 시간의존형 파랑모형에 비해 상대적으로 소홀히 다루어져 아직 미완의 과제로 남아 있었다. 최근 이러한 문제를 해결하기 위해 Bellotti et al.(2003) 은 계산영역 내부에 조파선을 거치하고 미리 추정된 산란파의 진행방향을 토대로 계산을 수행하여 순차적으로 산란파의 진행방향을 보정하는 반복법을 제시한 바 있다. 그러나 Bellotti et al.(2003)의 작업은 Berkhoff가 제시한 고전적인 타원형 방정식을 토대로 진행되어 수심이 급변하는 지형에 대한 검증은 부족한 것으로 보여지며, 내부조파를 위한 용출항을 Line source로 제시하여 유한요소로 수치해석시 어려움이 수반될 수 있다 (Wei et al, 1999).

최근 Cho et al.(2004)은 타원형 환경사 방정식을 두 개의 일차 쌍곡선 방정식으로 구성되는 계로 전환하고 내부 조파를 위해 주기적으로 침식되는 원천 항을 질량 보존식에 추가하였다. Cho et al.(2004)은 다시 이 계에서 타원형 형태의 방정식을 복원함으로써 타원형 환경사 방정식에서의 내부 조파 항을 제시하고 곡선수로에서의 파랑의 전이과정을 성공적으로 모의한 바 있다. 이러한 과정은 타원형 환경사 방정식에서 유입부 손실을 설명할 수 있는 단초를 제공하는 것으로 보여지며 편

의상 쌍곡형 환경사 방정식을 나열하면 식 (2)~(3)과 같다.

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t} + \frac{C}{C_g} \nabla \cdot Q = f \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + CC_g \nabla \eta = -\frac{Q}{C_e} \quad (3)$$

여기서 Q 는 수심이 일정한 경우 $C_g \nabla \eta$ 의 값을 지니는 선유량, f 는 내부 조파를 위해 주기적으로 침식되는 질량, Q/C_e 는 유입부에서의 흐름단면 축소로 인해 부과되는 응력항, u 는 수심 방향 평균유속, C_e 는 비선형 응력항을 등가 선형화 방법을 활용하여 선형화 하는 과정에서 도입된 마찰계수를 나타낸다(Madsen and Warren, 1984). 이러한 등가 마찰계수는 Mei and Agnon(1989)에 기초하는 경우 식 (4)와 같이 기술될 수 있다.

$$C_e = \frac{f_h}{2g} \frac{8}{3\pi} \left(\frac{a}{h} \sqrt{gh} \right) \left(1 - \frac{\sqrt{1+2\alpha}-1}{\alpha} \right) \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{4}{3\pi} \frac{f_h a}{h}$$

$$f_h = \left(\frac{S}{cS_0} - 1 \right)^2$$

$S - S_0$ 는 방파제 등으로 야기되는 흐름단면적의 감소량, h 는 수심, a 는 입사파의 진폭을 나타내며 유출계수 c 는 식(5)와 같이 기술된다.

$$c = 0.6 + 0.4 \left(\frac{S_0}{S} \right)^3 \quad (5)$$

식 (2), (3)을 연립하여 Q 를 소거하면 식 (6)과 같은 관계식을 얻을 수 있으며,

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} - \frac{C}{C_g} \nabla \cdot \left(\frac{hu}{C_e} + CC_g \nabla \eta \right) = -i\omega f \quad (6)$$

$\eta_t + \nabla \cdot (uh) = 0$ 을 활용하여 식 (6)를 η 중심으로 기술하는 경우 식 (7)과 같다.

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} - \frac{C}{C_g} \nabla \cdot (CC_g \nabla \eta) + \frac{C}{C_g C_e} \frac{\partial \eta}{\partial t} = -i\omega f \quad (7)$$

$\eta = i\omega \phi / g$ 를 활용하고, 조파영역과 항 유입수로에서 수심이 일정하게 유지된다는 추가적인 가정을 수행하면 식 (7)은 $O(\epsilon)$ 의 정도에서 식 (8)과 같이 근사화 될 수 있으며 여기서 ϵ 은 비선형 정도를 나타내는 무차원 변량으로 a/h 로 정의된다.

$$C^2 \nabla^2 \phi - \phi_{tt} - \frac{C}{C_g C_e} \phi_t = -gf \quad (8)$$

식 (8)에서 ϕ 와 f 를 y, t 영역에서 식 (9), (10)과 같이 Fourier 급수로 전개하고

$$\phi(x, y, t) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{\phi}(x, \lambda, \omega) e^{i(\lambda y - i\omega t)} d\lambda d\omega \quad (9)$$

$$f(x, y, t) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{f}(x, \lambda, \omega) e^{i(\lambda y - i\omega t)} d\lambda d\omega \quad (10)$$

식 (8)에 대입하면 식 (12)와 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$C^2 \hat{\phi}_{xx} + (\omega^2 C^2 \lambda^2) \hat{\phi} - i \frac{\omega C}{C_g C_e} \hat{\phi} = g \hat{f} \quad (11)$$

식 (9), (10), (11)에서 λ 는 y 방향 파수를 나타내며 $x = x'$ 에 순간적으로 부과된 질량 $\delta(x - x')$ 에 대한 식 (8)의 해 $G(x, x')$ 는 Green function의 정의에 따라 $C^2 G_x(x, x')|_{x=x'+0} = 1$, $G(x, x')$ 는 $x = x'$ 에서 연속하며, $G(x, x')$ 는 $x \rightarrow \pm \infty$ 에서 원역으로 진행된다는 경계조건을 적용하면 식 (12)와 같이 주어진다.

$$G(x, x') = \begin{cases} -\frac{il}{2\omega^2} \exp il(x - x') & \text{if } x > x' \\ -\frac{il}{2\omega^2} \exp il(x' - x) & \text{if } x < x' \end{cases} \quad (12)$$

여기서, $l = \sqrt{k^2 - \lambda^2} = k \cos \theta$ 로 정의 되는 x 방향의 파수를 나타내며 최종적으로 질량 gf 에 대한 식 (8)의 해 $\hat{\phi}$ 는 다음과 같은 선회적분 (convolution integral)으로 주어진다

$$\hat{\phi} = \int_{-\infty}^{\infty} G(x, x') g \hat{f}(x') dx \quad (13)$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} G(x, x') g \hat{f}(x') dx + \int_x^{\infty} G(x, x') g \hat{f}(x') dx$$

식 (13)에서 \hat{f} 는 여러 가지 형태를 취할 수 있으나 본고에서는 계산영역의 손실을 줄이기 위해 식 (14)와 같은 Gaussian 분포형을 취한다.

$$\hat{f} = D \exp(-\beta x^2) \quad (14)$$

식 (14)에서 D 는 용출항의 진폭, β 는 조파영역의 폭을 결정하는 인자로 본 고에서는 계산영역의 손실이 최소화되는 방향에서 결정된다. 식 (13)에서 일방향 진행파의 경우 첫 번째 항은 영이 되며 식 (12), (13), (14)에서 속도 포텐셜의 진폭 $\hat{\phi}$

는 식 (15)와 같이 유도될 수 있다.

$$\hat{\phi} = -gD \frac{il}{2\omega^2} I \exp(ilx) \quad (15)$$

여기서,

$$I = \sqrt{\frac{\pi}{\beta}} \exp\left(-\frac{l^2}{4\beta}\right)$$

식 (15)와 $\hat{\phi} = -iga \exp(ilx)/\omega$ 로부터 용출항의 진폭 D 은 식 (16)과 같이 주어진다.

$$D = \frac{2C_g a \cos \theta}{I} \quad (16)$$

타원형 환경사 방정식에서의 용출항을 유도하기 위해 식 (8)을 식 (17)과 같이 나타낸다.

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \eta) - \frac{C_g}{C} \eta_{tt} - \frac{\eta_t}{C_e} = i \frac{\omega C_g}{C} f \quad (17)$$

이에 $\eta = i\omega\phi/g$ 라는 관계식과 일반적으로 수심이 일정한 조파영역에서 수심 급변항을 무시하면 식 (18)과 같은 관계식을 유도할 수 있다.

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \hat{\phi}) + \left(\omega^2 \frac{C_g}{C} + i \frac{\omega}{C_e}\right) \hat{\phi} = -\frac{2C_g g a \cos \theta}{I} e^{-\beta x^2} \quad (18)$$

여기서 g 는 중력가속도, β 는 원천함수의 폭을 결정하는 변수로써 임의의 값을 지닌다. 식 (18)에서 허수 항은 유입부 폭 변화에 따른 손실을 나타내는 감쇄항이고 오른쪽 항은 내부 조파를 위한 항이다.

3. 수치해석

1899년 5월 1일 개항한 군산항은 금강 하구언에 위치하며 8·15광복 전까지 배후 곡창지대에서 생산되는 쌀의 대 일본수출항으로의 역할을 수행한 서해안 최대 항구였다 (Fig. 1). 항내 수면은 내항 310만m², 외항 412만m², 물양장 1,030m, 안벽 526m으로 구성되어 운영되어 왔으나, 급증한 물류를 소화하기 위해 1980년에 외항이 추가적으로 축조된 바 있다. 이와 더불어 외곽시설로 방조제와 방파제가 준공되었으며, 최근 아시아 물류 허브에 걸맞은 기능을 갖추기 위해 대규모 접안시설과 방파제 축조 공사가 예정되어 있어 수리특성에 상당한 변화가 예상된다. 따라서 군산외항 최적 운영에 필요한 군산외항 부진동의 특성을 규명하는 것은 상당히 시급한 과제로 인식되어왔다. 본 고에서는 보다 정확한 군산외항 부진동 수치해석을 위해 북으로는 비인만에서 남측으로는 선유도에 이르는 비교적

넓은 영역을 계산영역으로 선정하였으며 수치해석을 위해 생성된 Mesh는 Fig. 2에 도시하였다.

부진동시 가장 역동적인 요동이 출현하는 대역인 0.03~0.0067Hz 를 대상으로 북방파제 전면 4Km 떨어진 해역을 중심으로 조파하였다. 파고는 군장항 전면수역의 설계파고를 토대로 상대적인 비교가 용이하도록 전 수치모의 과정에서 H=4m로 유지하였다. 파향은 우리나라 서해안 동절기에 북서계절풍에 의해 가장 역동적인 파랑이 출현하는 NW로 선정하였고 총 511680개의 삼각형 모양의 유한요소를 사용하여 이산화 하였다. 이는 약 L/30의 해상도에 해당하며 (L은 파장) 개방경계에서는 에너지흡수 경계조건, 고정경계에서는 완전반사 조건을 사용하였다 (Panchang et al., 2000). 군산외항의 북방파제 후면부에서 군산 내항 쪽으로 세 개의 지점 P_1, P_2, P_3 에서 산출된 응답 스펙트럼을 각각 Fig. 4, 5, 6 에 도시하였으며, 각 측정점의 위치는 Fig. 3 에 도시하였다. 첫 번째 고유 진동수는 0.0009Hz, 두 번째와 세 번째 그리고 네 번째 고유 진동수는 각각 0.0013Hz, 0.0017Hz, 0.0022Hz로 비교적 용이하게 판독할 수 있으나 상대적으로 큰 주파수 대역에서 증폭 비는 다소 복잡한 양상을 보이며 이러한 경향은 도류제와 안벽에 적용한 No flux 경계조건에 의해 진행되는 수치적 완전반사에 기인한 것으로 판단된다. 0.0009Hz대역에서 P_2 지점 응답 스펙트럼은 뿔에 가까운 값을 지니며 이는 이 지점에서 마다가 위치함을 시사한다.

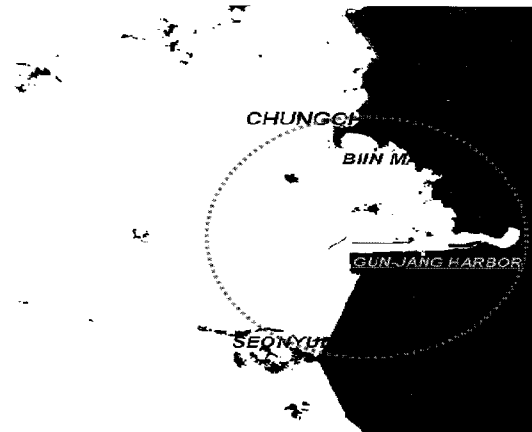


Fig. 1 Layout of Gun-Jang harbor

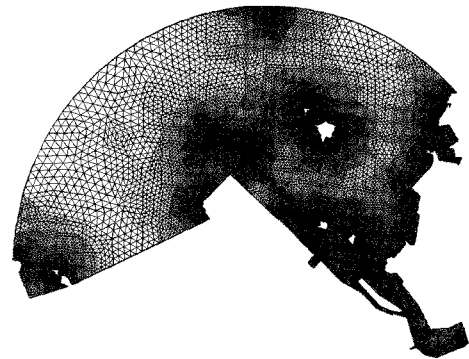


Fig. 2 Mesh system generated for numerical simulation

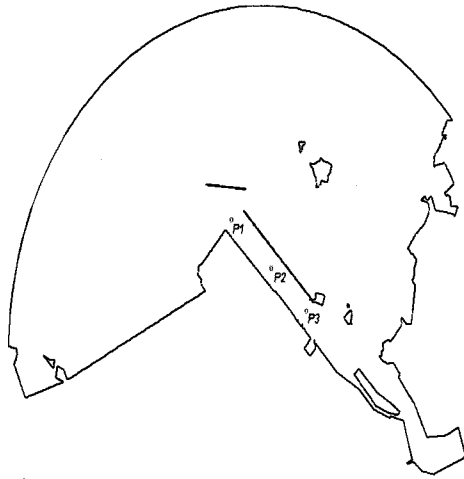


Fig. 3 Location of data acquisition site for the verification

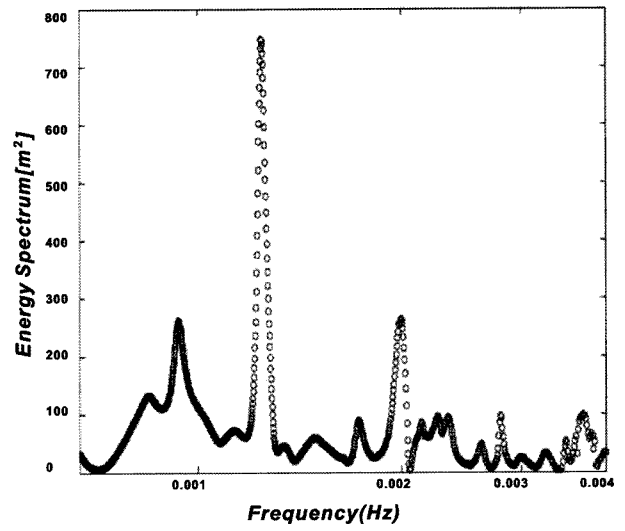


Fig. 6 Response spectrum at P_3

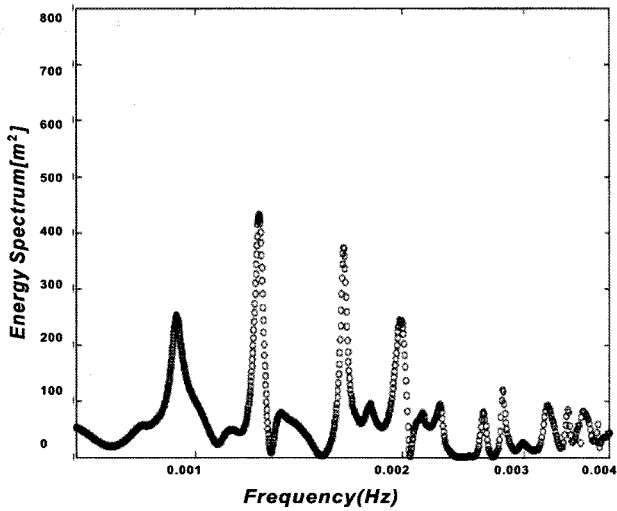


Fig. 4 Response spectrum at P_1

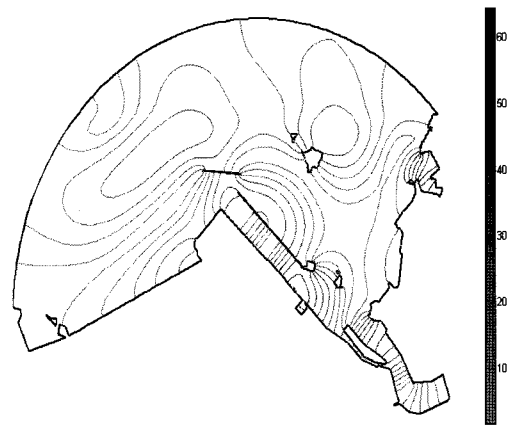


Fig. 7 Contour plot of wave height for $f_i=0.00328$ Hz

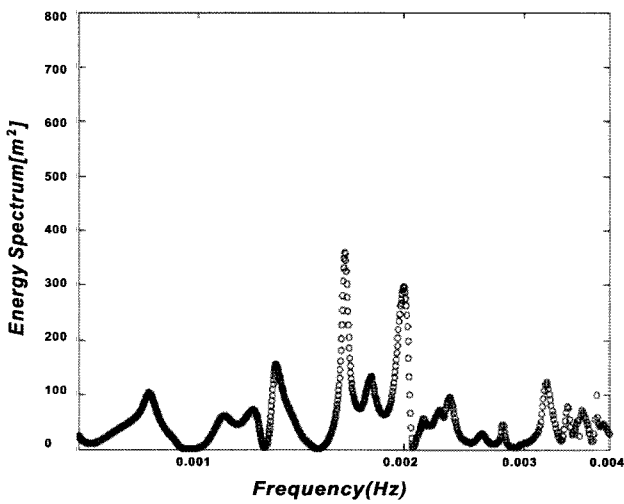


Fig. 5 Response spectrum at P_2

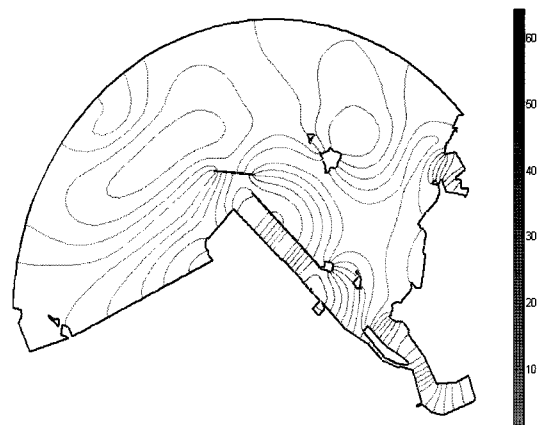


Fig. 8 Contour plot of wave height for $f_i=0.00097$ Hz

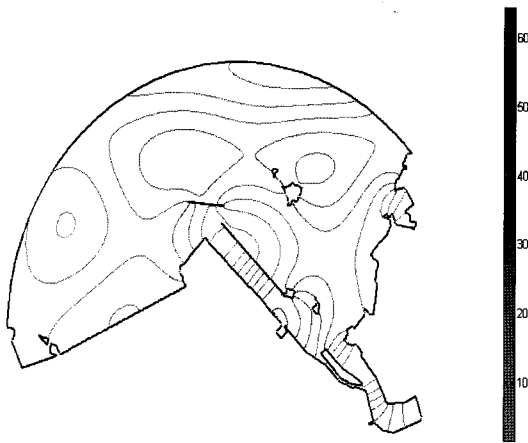


Fig.9 Contour plot of wave height for $f_1=0.00097\text{Hz}$

Fig. 7과 Fig. 8 에는 군산외항이 각각 $f_1=0.00328\text{Hz}$, $f_1=0.00097\text{Hz}$ 의 파랑에 노출되었을 경우의 파고증폭을 도시하였고 Fig. 9에는 군산외항으로 $f_1=0.00097\text{Hz}$ 의 파랑이 내습하는 경우의 자유수면에 대한 Snapshot을 도시하였다.

4. 결 론

최근 군장항은 아시아 물류 허브에 걸맞은 기능을 갖추기 위해 대규모 접안시설과 방파제 축조 공사가 진행되어 수리특성에 상당한 변화가 예상된다. 이와 더불어 금강 하구연 건설 이후 극심하게 진행되는 퇴적으로부터 선박의 운항에 필요한 수심을 확보하기 위해 축조된 도류제로 인해 군산항은 반 폐쇄 길쭉한 형상을 지니게 되었다. 이러한 형상은 부진동에 상당히 취약하여 항의 최적 운영을 위해서는 부진동 특성파악이 시급히 해결되어야 할 과제로 판단된다. 이러한 부진동은 쓰나미, 기상해일, 너울무리에 의해 야기될 수 있으나 본고에서는 동절기 북서 계절풍에 의한 풍성파가 가장 우세한 우리나라 서해안의 특성을 고려하여 주로 쓰나미와 기상해일에 의해 야기되는 $10^4 \sim 10^3$ 주파수 대역 부진동 특성을 수치해석 하였다. 수치해석결과 1st, 2nd, 3rd, 4th eigen mode는 각각 0.0009Hz, 0.0013Hz, 0.0017Hz, 0.002Hz 인 것으로 규명되었다.

참 고 문 헌

Bellotti, G., Beltrami, G.M. and Girolamo, P.D. (2003). "Internal Generation of Waves in 2D Fully Elliptic Mild-slope Equation FEM Models", *Coast. Eng.*, Vol 49, pp 71-81.

Berkhoff, J.C.W. (1972). "Computation of Combined Refraction-diffraction", *Proc. 13th Coastal Eng. Conf. American Society of Civil Engineers, Reston, VA, USA*, pp 471-490.

Berkhoff, J.C.W. (1976). *Mathematical Models for Simple Harmonic Linear Water Waves: Wave Diffraction and Refraction*, Publication No. 163, Delft Hydraulic Laboratory, Delft, the Netherlands.

Bowers, E.C. (1977). "Harbor Resonance due to Set-down Beneath Wave Groups", *J. Fluid Mech.*, Vol 79, pp 71-92.

Bowers, E.C. (1992). "Low Frequency Waves in Intermediate Depths", *Proc. Int. Coastal Eng. Conf.*, 23rd, pp 832-845.

Chamberlain, P.G., and Porter, D. (1995). "The Modified Mild-slope Equation", *J. Fluid Mech.*, Cambridge, U.K., Vol 144, pp 419-443.

Cho, Y.J., Cho E.K. and Kim M.S. (2004). "Numerical Implementation of Energy Absorbing B.C in Fully Elliptic Modified Mild-slope Equation under FEM Computational Environment", *Inter. Offshore and Polar Eng. Conf.*

Copeland, G.J.M. (1985). "A Practical Alternative to the Mild-slope Wave Equation", *Coast. Eng.*, Vol 9, pp 125-149.

Elgar, S., Herbers, T.H.C., Okihiro, M., Oltman-Shay, J. and Guza, R.T. (1992). "Observations of Infragravity Waves.", *J. Geophys. Res.*, vol 97(C10), pp 15573-15577.

Herbers, T.C.S., Elgar, R.T., Guza, W.C. O'Reilly (1992). "Infragravity Frequency (0.005-0.05 Hz) Motions on the Shelf", *Proc. Int. Coastal Eng. Conf.*, 23rd, pp 846-859.

Houston, J.R. (1977). "Los Angeles Harbor and Long Beach Harbor: Finite Element Numerical Model of Harbor Resonance", *Ports 77*, PP 119-137.

Israeli, M. and Orszag, S.A. (1981). "Approximation of Radiation Boundary conditions", *J. Comp. Phys.*, Vol 41, pp 113-150.

Larsen, J. and Dancy, H. (1983). "Open Boundaries in Short-wave Simulations-a New Approach", *Coast. Eng.*, Vol 7, pp 285-296.

Lewis, D.P., Tsutsui, S., Morison, M.L. and Imberger, J. (1989). "Esperance Harbour Ship Motion Study, Rep. WP-297-DL, Cent. For Water Res. Univ. of West. Aust., Nedlands.

Madsen, P.A. and Warren, I.R. (1984). "Performance of a Numerical Short-wave Model", *Coast. Eng.*, Vol 18, pp 183-204.

Massel, S.R. (1993). "Extended Refraction-diffraction Equation for Surface Waves", *Coast. Eng.*, Vol 19, pp 97-126.

Mei, C.C. and Agnon, Y. (1989). "Long-period Oscillations in a Harbour Induced by Incident Short Waves", *J. Fluid Mech.*, 208, pp 595-608

Morison, M.L. and Imberger, J. (1992). "Water-level Oscillations in Esperance Harbour", *J. Waterw., Port Coast. and Ocean Eng.*, Vol 118, No 4, pp 352-367.

- Nwogu, O. (1993). "An Alternative form of the Boussinesq Equations for Nearshore Wave Propagation", *J. Waterw., Port, Coast. and Ocean Eng.*, Vol 119, No 6, pp 618-638.
- Okihiro, M., Guza, R.T and Seymour, R.J. (1992). "Bound Infragravity Waves", *J. Geophys. Res.*, Vol 97(C7), pp 11453-11469.
- Okihiro, M., Guza, R.T. and Seymour, R. J. (1993). "Excitation of Seiche Observed in a Small Harbor", *J. Geophys. Res.*, Vol 98, No C10, pp 18,201-18,211.
- Olsen, K. and Hwang, L. (1971). "Oscillations in a Bay of Arbitrary Shape and Variable Depth, *J. Geophys. Res.*, Vol 76, No 21, pp 5048-5064.
- Panchang, B.V., Chen, W., Xu, B., Schlenker, K., Demirbilek, Z. and Okihiro, M. (2000). "Exterior Bathymetric Effect in Elliptic Harbor", *J. Waterw., Port, Coast and Oc. Engrg.*, Vol 126, No 2, pp 71-78.
- Suh, K.D., Lee, C., Park, Y. H. and Lee, T. H. (2001). "Experimental Verification of Horizontal Two-dimensional Modified Mild-slope Equation Model", *Coast. Eng.*, Vol 49, pp 1-12.
- Steward, D.R. and Panchang, V. (2000). "Improved Boundary Condition for Surface Water Waves, *Ocean Eng.*, Vol 28, pp 139-157.
- Thompson, E. F. and Hadley, L. L. (1995). "Numerical Modeling of Harbor Response to Waves, *J. Coast. Res.*, Vol 11, No. 2, 744-753.
- Wei, G., Kirby, J.T. and Sinha, A. (1999). "Generation of Waves in Boussinesq Models Using a Source Function Method", *Coast. Eng.*, Vol 36, pp 271-299.
- Wu, J. K. and Liu, P. L. F. (1990). "Harbour Excitations by Incident Wave Groups", *J. Fluid Mech.*, Vol 217, PP 55-613.
- Yamada, N., Yamamoto, S. and Hosokawa, Y. (1983). "Field Observations and Analyses of Long-period Oscillation in Harbors and Bays", *Coastal Eng. Jpn.*, Vol 26, pp 39-50.

2008년 2월 1일 원고 접수

2008년 2월 12일 최종 수정본 채택