공진장치에 의한 단주기파랑의 제어에 관한 연구 A Study on the Control of Short-period Waves by Resonator

이광호* · 범성심** · 김도삼** · 박종배*** · 안성욱***

Kwang Ho Lee*, Seong Sim Beom**, Do Sam Kim**, Jong Bae Park*** and Seong Wook An***

요 지 : 본 연구에서는 단주기파랑의 저감을 위해 시설의 직선배치된 방파제와 직사각형항만의 개구부에 기존의 연구에서 제안된 공진장치를 부착하여 3차원수리모형실험과 수치해석으로부터 공진장치의 제어능을 검토하였다. 수치해석에 있어서는 연직선 Green함수에 기초한 특이점분포법의 선형해석법과 3D-NIT모델에 의한 강비선형해석법을 적용하여 수리실험결과와 수치해석결과와의 비교·분석으로부터 본 수치해석법의 타당성을 검증하였다. 또한, 공진장치가 부착되지 않은 경우와 대비·검토하여 단주기파랑의 제어에 대한 공진장치의 제어능을 다각도로 검토하여 그의 유효성을 충분히 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 공진장치, 단주기파랑, 3차원수리모형실험, 3D-NIT모델

Abstract : In this study, the control performance of resonator was reviewed through numerical analysis and 3-dimensional hydraulic model experiments by attaching the resonator suggested in the existing studies to the openings of rectangular harbor and breakwater placed in a straight line to reduce short-period waves. In the numerical analysis, linear analysis method of singularity distribution method based on vertical-line Green function and full non-linear analysis method by 3D-NIT model were applied, and the validity of the numerical analysis methods was verified through comparative analysis between results of hydraulic experiments and numerical analysis results. In addition, effectiveness of the resonator was confirmed by reviewing its control performance on the short-period waves through review on the comparison with the case in which the resonator is not attached.

Keywords : resonator, short-period waves, 3-dimensional hydraulic model experiment, 3D-NIT model

1. 서 론

항의 기능 중 가장 중요한 요소는 선박을 안전하게 계류하고, 선박의 동요를 저감하여 하역과 선적작업을 효율적으로 수행하도록 하는 것이다. 이를 나타내는 지표 중의 하나로 종래부터 항만가동율이 사용되고 있으며, 이에 영향을 미치는 가장 중요한 인자가 입사파랑의 주기와 파고이다. 이 중에서 주기가 대략 30 sec 미만으로 그의 시간적 변화가 가시적인 단주기파는 대부분의 항내에서 수면교란의 주요한 원인으로 고려되고 있다(류, 2004). 따라서, 단주기파랑을 효율적으로 제어하기 위해 종래부터 외곽방파제와 같은 파랑제어구조물을 구축하여 왔지만, 폭풍시에는 차단되지 않고 항내로 침입하는 큰 수면교란에 의해 계류석이 파단되거나 선박끼리 충돌하여 피해가 발생하는 사례가 많이 발생하고 있다. 이에 대한 대책으로 주로 외곽방파제의 항내에 부방파제(secondary breakwater)를 구축하여 왔다. 한편, 다른 방안으로 정 등(2009)

및 이 등(2009)은 단주기파랑의 저감공으로 이열잠제를 제안하였고, 이열잠제간의 전후이격거리를 적절히 조절함으로써 단주기파랑을 약 50% 정도까지 감소시킬 수 있음을 나타내었다. 그리고, Nakamura et al.(1996, 1998)는 단주기파랑의 파랑제어를 목적으로 기존 방파제의 개구부에 Fig. 1의 공진장치를 부착하여 그의 파랑제어능을 확인하였고, 이 등(2010)은 Nakamura et al.(1996, 1998)에 의해 제안된 단주기파랑의 제어를 목적으로 하는 Fig. 1의 공진장치를 기존 방파제의 개구부에 적용하여 단주기파랑 및 고립파의 파랑변형에 대한 3차원적인 접근으로부터 공진장치를 통한 단주기파랑 및 고립파의 동시제어능을 수치적으로 규명하였다. Fig. 1의 공진장치를 단주기 및 고립파의 저감공으로 적용한 Nakamura et al.(1996, 1998) 및 이 등(2010)의 연구결과에 따르면 공진장치의 내부에 많은 파랑에너지가 포획되어 항내로 유입하는 파랑에너지가 현저히 감소되는 것을 나타내고 있다.

이와 같은 연구배경에 기초하여, 본 연구에서는 직선배치의 기

*(일)나고야대학교 공학연구과 사회기반공학전공 (Department of Civil Engineering, School of Engineering, Nagoya University)

**한국해양대학교 토목공학과 (Corresponding author : Do Sam Kim, Department of Civil Engineering, Korea Maritime University, Dongsam-dong, Busan 606-791, kimds@hhu.ac.kr)

***(주) 포스코건설 토목환경사업본부 토목기술그룹 (POSCO E&C, Songdo-dong, Yeonsu-gu, Incheon 406-732, Korea)

Fig. 1. Shape of wave resonator developed by Nakamura et al.(1995).

존방파제 및 직사각형항만의 입구부에 Fig. 1의 공진장치를 부착하여 3차원수리모형실험과 특이점분포법(연직선 Green함수법(Issacson, 1978; Nakamura and Oku, 1985))에 기초한 평면 2차원의 선형수치해석 및 3D-NIT(3-Dimensional Numerical Irregular wave Tank)모델에 기초한 3차원강비선형수치해석으로부터 공진장치에 의한 단주기파랑의 제어능을 해석한다. 이로부터 얻어지는 수치해석결과와 수리실험결과를 비교·분석하여 본 수치해석법의 타당성을 검증함과 동시에, 공진장치가 부착되지 않은 경우와 대비·검토하여 단주기파랑에 대한 공진장치의 제어능에 대한 유용성을 다각도로 검토한다.

2. 수치해석이론

2.1 선형평면파랑의 해석을 위한 특이점분포법

Fig. 2에 나타내는 임의형상단면의 불투과연직구조물에 의한 파랑변형 및 작용파력의 해석에는 일반적으로 수치해석법이 적용되며, 이에 대한 해석법으로 다양한 수치해석법이 제안되어 있지만, 본 연구에서는 Green함수를 사용하여 속도포텐셜에 관한 경계치문제를 적분방정식으로 변환하여 해석하는 특이점분포법(연직선 Green함수법)을 적용한다. 이는 불투과성의 연직구조물의 해석에 널리 사용되며, 해석기법이 상대적으로 간편한 장점이 있다.

속도포텐셜을 $F(x, y, z, t) = \phi(x, y, z)e^{-i\omega t}$ 로 나타내면 ϕ 에

Fig. 2. Definition sketch of a vertical surface-piercing structure in the 3-dimensional wave field.

관하여 3차원파동장 \$\Omega\$에서 주어지는 지배방정식 및 경계조건을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad \text{in} \quad \Omega \quad (1)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g} \phi = 0 \quad \text{on} \quad z = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad \text{on} \quad z = -h \quad (3)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad \text{on the submerged surface of structure} \quad (4)$$

여기서, 식(1)은 Laplace방정식을, 식(2)는 결합자유수면경계조건을, 식(3)은 해저경계조건을, 식(4)는 고정구조물의 표면에서 불투과경계조건을 각각 나타내며, \$i = \sqrt{-1}\$, \$t\$는 시간, \$(x, y)\$는 수평좌표, \$z\$는 연직좌표, \$\omega\$는 각주파수, \$g\$는 중력가속도, \$h\$는 정수심, \$n\$은 구조물표면에서 법선방향을 각각 나타낸다.

공간속도포텐셜 \$\phi(x, y, z)\$는 입사파성분 \$\phi_i\$와 회절산란파성분 \$\phi_s\$로 구성되고, \$\phi_s\$는 무한원방에서 Sommerfeld의 방사조건을 만족하여야 한다. 한편, \$\phi_i\$와 \$\phi_s\$는 각각 독립적으로 식(1)~(3)을 만족하여야 하고, 동시에 \$\phi = \phi_i + \phi_s\$가 식(4)를 만족하여야 한다. 여기서, \$\phi_i\$는 기지로 다음과 같이 주어진다.

$$\phi_i = \frac{igH_i \cosh k(z+h)}{2\omega \cosh kh} e^{ik(x \cos \alpha + y \sin \alpha)} \quad (5)$$

여기서, \$\alpha\$는 \$x\$축에 대한 입사파향각, \$k\$는 파수, \$H_i\$는 입사파고이다.

포텐셜이론에 따르면 회절산란속도포텐셜 \$\phi_s\$를 다음과 같이 구조물의 잠수표면에 점원(point source)을 분포시켜 나타낼 수 있다.

$$\phi_s = \frac{k}{4\pi} \left(\frac{igH_i}{2\omega} \right) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \iint f'(\xi, \eta, \zeta) G'(x, y, z; \xi, \eta, \zeta) dS' \quad (6)$$

여기서, \$f'\$는 파원강도분포함수, \$G'\$는 구조물의 잠수표면상에서 유동좌표 \$(\xi, \eta, \zeta)\$에서 점원에 대한 Green함수로, 일반적으로 Laplace방정식, 해저면과 자유수면에서 경계조건 및 방사조건을 만족하여야 한다. 그리고, \$dS'\$는 구조물의 잠수표면에서 미소면적을 나타낸다.

Issacson(1978)은 \$f'(\xi, \eta, \zeta)\$를 다음의 관계로 나타내고 있다.

$$f'(\xi, \eta, \zeta) = f(\xi, \eta) \frac{\cosh k(\xi+h)}{\cosh kh} \quad (7)$$

여기서, \$f(\xi, \eta)\$는 연직선파원강도분포함수이다.

식(6)에 (7)을 대입하면 다음의 관계식이 얻어진다.

$$\phi_s = \frac{k}{4\pi} \left(\frac{igH_i}{2\omega} \right) \int \left[f(\xi, \eta) \left\{ \int_{-h}^0 G'(x, y, z; \xi, \eta, \zeta) \frac{\cosh k(\xi+h)}{\cosh kh} d\zeta \right\} d\xi \right] d\eta \quad (8)$$

여기서, dS 는 구조물의 단면주변으로 취해지는 미소길이이다. 그리고, 이의 식은 다음과 같이 변형될 수 있다.

$$\phi_s = \frac{k}{4\pi} \left(\frac{igH_i}{2\omega} \right) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \int_s f(\xi, \eta) G(x, y; \xi, \eta) dS \quad (9)$$

여기서, Green함수에 관하여 다음의 관계가 주어진다.

$$G(x, y; \xi, \eta) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} = \int_{-h}^0 G'(x, y, z; \xi, \eta, \zeta) \frac{\cosh k(\zeta+h)}{\cosh kh} d\zeta \quad (10)$$

John(1949, 1950)은 다음과 같이 무한급수를 포함하는 급수형의 $G'(x, y, z; \xi, \eta, \zeta)$ 를 전개하였다.

$$\begin{aligned} G'(x, y; \xi, \eta) = & \frac{2\pi(\Gamma^2 - k^2)}{(k^2 - \Gamma^2)h + \Gamma} \cosh k(z+h) \cosh k(\xi+h) [-iH_0^{(1)}(kr)] \\ & + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k_n^2 + \Gamma^2}{(k_n^2 + \Gamma^2)h - \Gamma} \cos k_n(z+h) \cos k_n(\xi+h) [K_0(k_n r)] \end{aligned} \quad (11)$$

여기서, $H_0^{(1)}$ 은 제1종Hankel함수, K_0 는 0차제2종수정Bessel 함수이며, r 은 고정점 (x, y) 와 유동점 (ξ, η) 사이의 거리이고, k 와 k_n 는 각각 진행회절산란파와 정지회절산란파의 파수로 다음의 식으로 주어진다.

$$r = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2} \quad (12)$$

$$\Gamma = \frac{\omega^2}{g} = k \tanh kh = -k_n \tanh k_n h \quad (13)$$

식(11)을 (10)에 대입하고, $k \cosh k_h \sinh kh + k_n \sinh k_h \cosh kh = 0$ 의 관계를 이용하여 적분을 수행하면 다음과 같은 연직선 Green함수를 얻을 수 있다.

$$G(x, y; \xi, \eta) = i\pi H_0^{(1)}(kr) \quad (14)$$

식(14)를 (9)에 대입하고, 그 결과를 식(4)에 대입하면 연직선파원강도분포함수 $f(\xi, \eta)$ 를 산정할 수 있기 때문에 회절산란파의 속도포텐셜 ϕ_s 를 구할 수 있게 된다. 따라서, 수면 변동 η 는 다음과 같이 표현된다.

$$\eta = -\frac{i\omega}{g} (\phi_i + \phi_s) e^{-i\omega t} \quad \text{on} \quad z = 0 \quad (15)$$

2.2 3D-NIT모델에 의한 3차원강비선형파랑의 해석

2.2.1 기초방정식

전술한 바와 같이 본 연구의 3D-NIT모델은 기존의 2D-NIT모델의 계산수법을 3차원으로 확장한 것으로, 자유표면해석모델에 VOF법을, 난류해석에는 $k-\epsilon$ 모델을 각각 적용하며, 수치조파와 무반사시스템을 구축한 3차원수치파동수조를 적용하고 있다. 기초방정식은 3차원비압축성의 점성유체를 대상으로 한 연속식 및 Navier-Stokes방정식을 PBM (Porous Body Model(柳山 등, 1900)에 근거하여 확장한 다음의 식 (16)~(19)로 주어진다.

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_y v}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = \gamma_s \rho \quad (16)$$

$$\lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u u}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y v u}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z w u}{\partial z} = -\frac{\gamma_x \partial p}{\rho \partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} \quad (17)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y v_e \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} - \gamma_x D_x u - R_x + \gamma_s S_u$$

$$\lambda_v \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u v}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y v v}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z w v}{\partial z} = -\frac{\gamma_y \partial p}{\rho \partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right\} \quad (18)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y v_e \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right\} - \gamma_y D_y v - R_y + \gamma_s S_v$$

$$\lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x u w}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y v w}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z w w}{\partial z} = -\frac{\gamma_z \partial p}{\rho \partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} \quad (19)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y v_e \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} - \gamma_z D_z w - R_z + \gamma_s S_w - \gamma_s g$$

여기서, u, v, w 는 방향의 유속성분, ρ 는 유체밀도, p 는 압력, v_e 는 분자동점성계수 ν 와 와점성계수 ν_t 의 합, γ_x 는 체적공극율, $\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$ 는 x, y, z 방향의 면적공극율, D_x, D_y, D_z 는 경계에서 반사파의 제어를 위해 설치한 스폰지층에서 에너지 감쇠계수, S_p, S_u, S_v, S_w 는 해석영역 내의 조파를 위한 소스항, $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ 는 구조물로부터 받는 관성력효과를 나타내는 파라미터로 식(20)과 같이 표현된다.

$$\begin{cases} \lambda_x = \gamma_x + (1 - \gamma_x) C_M \\ \lambda_y = \gamma_y + (1 - \gamma_y) C_M \\ \lambda_z = \gamma_z + (1 - \gamma_z) C_M \end{cases} \quad (20)$$

여기서, C_M 은 관성력계수, R_x, R_y, R_z 는 투과층(porous media)에서 저항력으로 식(21)과 같이 주어진다.

$$\begin{cases} R_x = \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta x} (1 - \gamma_x) u \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \\ R_y = \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta y} (1 - \gamma_y) v \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \\ R_z = \frac{1}{2} \frac{C_D}{\Delta z} (1 - \gamma_z) w \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \end{cases} \quad (21)$$

여기서, C_D 는 항력계수, $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 는 x, y, z 방향의 격자간격이다.

이상의 3-D NIT모델은 불규칙파를 수치계산할 수 있도록 코딩되어 있지만, 본 연구에서는 규칙파를 대상으로 하였으며, 대상구조물이 투과성이 아니기 때문에 체적공극율, 면적공극율 및 투과층 내의 저항력은 무시된다. 또한, 계산영역의 양측면과 바닥에는 slip의 불투과경계조건을 적용하였다. 불규칙파동의 해석을 포함하는 3D-NIT모델의 보다 상세한 이론부분은 이 등(2012)를 참조바란다.

3. 3차원수리모형실험

기존의 방파제에 Nakamura et al.(1996, 1998)이 제안한 공진장치를 부착하여 단주기파랑과 고립파의 제어능을 수치적으로 검증한 이 등(2010)의 연구를 근거로, 기존의 직선배치된 방파제와 직사각형항만의 입구부에 공진장치를 적용하고, 단주기파랑의 제어능에 대한 공진장치의 유용성과 수치해석 결과의 타당성을 검증하기 위하여 3차원수리모형실험을 수행하였다. 수리모형실험은 일본 나고야대학 3차원조파수조 (길이 16.5 m; 폭 5.1 m; 높이 1 m)에서 수행되었으며, 조파수조 한쪽 끝에는 불규칙파랑의 조파가 가능한 피스톤형조파기가 설치되어 있다. 수조를 폭방향으로 양분하여 한쪽에만 Fig. 3에 나타난 바와 같이 방파제와 항만을 폭방향으로 대칭배치하고, 조파관으로부터 13 m 이격된 지점에 방파제와 항만을 설치하였다. 모형방파제와 항만의 제원과 배치는 Fig. 3과 5에 나타난

바와 같으며, 모형방파제의 경우 방파제 배후에서 반사파의 영향을 최소화시키기 위해 배후 끝단에 소파장치를 설치하였다. 또한, 모형방파제와 항만에 부착한 공진장치의 형상과 제원은 Fig. 4에 나타난 바와 같다. 모든 모형구조물은 베니어 합판(두께 10 mm)으로 제작되었으며, 방수를 위하여 페인트를 칠하였다.

수리실험에서 측정항목은 공진장치의 전면, 내부, 구조물 배후에서 수위변동이며, 이는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 수조 폭방향에 대해 중심에 설치된 용량식파고계(Kenek-CHT-6-30)를 기준으로 양방향으로 각각 25 cm, 75 cm, 110 cm, 190 cm 떨어진 지점에서 수위변동을 측정하였으며, 따라서 총 9개의 용량식파고계로부터 수위변동을 측정하였다. 수조의 길이방향에 대해서는 방파제의 경우 Fig. 5(a)에 Location (1)~(8)로 나타난 위치에서 용량식파고계를 파의 진행방향으로 이동시켜 수위변동을 측정하였고, 항만의 경우 Fig. 5(b)에 Location (1)~(11)로

Fig. 3. Definition sketch of 3-dimensional experimental wave tank and model.

Fig. 4. Sketch of wave resonator attached to breakwater and harbor.

Fig. 5. Layout of wave gauge arrangement.

(a) Breakwater : no resonator

(b) Breakwater : resonator

(c) Harbor : no resonator

(d) Harbor : resonator

Photo 1. Setup of breakwater, harbor, resonator and wave gauges.

나타낸 위치에서 수위변동을 측정하였다.

입사파랑조건은 Table 1에 나타내는 바와 같이 파형경사가 대략적으로 동일하도록 선정되었고, 모형방파제와 모형항만 두 경우 모두 동일한 입사파랑조건을 적용하여 수리실험을 수행하였다. Photo 1은 수리모형실험에서 방파제 및 항만에 부착된 공진장치와 용량식파고계의 배치상황 등을 나타낸다. 여기서, 모형은 실물의 1/50로 축척된 크기에 상당하며, 따라서 입사 주기는 실험장에서 Froude상사법칙을 고려하면 대략 10.6~17.7 sec의 범위에 있다.

Table 1. Condition of incident waves

Water depth h (cm)	Wave period T_i (sec)	Wave height H_i (cm)
25	1.5	2.27
	1.8	2.76
	2.0	3.45
	2.2	3.79
	2.5	4.18

4. 수리모형실험결과와 수치해석결과의 비교

공진장치에 의한 주기파랑의 제어에 관한 유용성과 본 수치해석법의 타당성을 검증하기 위하여 수리모형실험결과와 수치해석결과를 비교·분석하였다. 전술한 바와 같이 수치해석은 선형해석과 강비선형해석을 각각 수행하였으며, 선형해석에는 특이점분포법(Isaacscon, 1978; Nakamura and Oku, 1985)을, 강비선형해석에는 3D-NIT모델을 적용하였다. 수치해석으로부터 수리모형실험결과를 충분히 재현하기 위하여 동일한 크기의 수조와 구조물의 제원 및 배치를 적용하였고, 또한 동일한 입사파랑조건을 적용하였다.

4.1 방파제에서 주기파랑의 제어

Fig. 6(a)~(h)는 직선배치된 기존의 방파제에 공진장치를 부착한 경우 가장 큰 제어능을 보인 주기 $T_i=2.0$ sec, 파고 $H_i=3.45$ cm의 입사파랑조건에 대해 Fig. 5(a)에 나타낸 Location (이후부터 L로 표기함) (1)~(8)의 각 파고계 위치에서 공진장

Fig. 6. Variation of non-dimensional wave height at the positions of wave gauge numbers and locations in case of breakwater.

치의 유·무에 따른 수리모형실험과 선형 및 강비선형수치 해석으로부터 얻어진 무차원파고 H/H_b (H 는 각 파고계의 위치에서 파고)의 결과를 나타낸 것이다.

먼저, 공진장치의 전면부인 L(1)에서 수위변동을 살펴보면 Wave gauge (이후부터 WG로 표기함) (3)~(7)에서는 공진장치가 부착된 경우가, WG(1), (9)에서는 공진장치가 부착되지 않은 경우가 큰 파고를 나타내는 것을 알 수 있고, 반면에 L(2)

에서는 공진장치가 부착된 경우가 전체의 WG에서 작은 파고를 나타내며, L(3)에서는 WG(1), (9)를 제외하고 공진장치가 부착된 경우가 공진장치가 부착되지 않은 경우보다 큰 파고를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과는 기본적으로 중복파의 파동장을 형성하기 때문에 L의 위치에 따라 입사파와 반사파의 중첩위상이 상이하기 때문이고, L의 위치에 따라 WG(1), (9)에서의 파고의 크기가 중앙부 근방의 WG에서

의 값과 상이한 값을 나타내는 것은 공진장치가 파진행방향에 앞으로 돌출되어 있으므로 공진장치에서 반사되는 파와 기존의 방파제에서 반사되는 파와의 사이에 위상차이가 존재하며, 더불어 공진장치에서 반사된 파가 양측의 후방에 있는 방파제 쪽으로 회절되기 때문으로 판단된다.

한편, 공진장치의 내부위치인 L(4), (5)에서의 파고를 살펴보면 모든 WG에서 공진장치를 부착한 경우가 작은 파고값을 나타내는 것을 볼 수 있고, 특히 L(5)에서 이러한 현상이 명확하게 나타난다. L에 따라 상이한 파고분포를 나타내는 것은 전술한 바와 같이 공진장치 내에서 다중반사의 중복파동장을 나타내기 때문이며, 특히 WG의 위치에 따라 큰 변동의 파고값을 나타내는 것은 공진장치 내에서 파랑에너지의 수평분산과 집중이 크게 발생하기 때문이며, 공진장치가 없는 경우에 비해 WG의 위치에 따른 변동은 상대적으로 크게 나타난다.

다음으로, 방파제 배후에서 파고분포를 나타내는 L(6)~(8)에서는 WG 위치의 전반에 걸쳐 공진장치가 있는 경우가 훨씬 작은 파고분포를 나타내며, 이러한 결과는 WG(5)를 중심으로 한 중앙부의 WG에서 현저하게 나타난다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 기본적으로 Nakamura et al.(1996, 1998) 및 이 등(2010)이 지적하고 있는 바와 같이 공진장치 내에서 파랑에너지가 포획되기 때문이며, 결과적으로 방파제의 경우 단주기파랑의 제어에 관한 공진장치의 유용성을 충분히 확인할 수 있다.

선형해석과 강비선형해석의 결과를 살펴보면 경우에 따라 파고가 작은 경우에는 선형과 강비선형의 결과가 거의 동등한 정도의 값을 가지는 경우도 있지만, 전체적으로 강비선형의 해석결과가 선형해석결과보다 실험결과에 더 근접하는 것을 알 수 있고, 특히 Fig. 6(a)의 WG(3)~(7)의 위치에서 선형해석결과는 실험결과를 과대평가한다는 것으로부터 선형해석은 파고가 커짐에 따라 크게 발생하는 복잡한 자유수면의 정밀한 거동특성까지 해석하기에는 이론적인 한계가 있는 것으로 판단된다. 따라서, 전체적으로 강비선형결과가 선형해석결과보다 수리모형실험을 고정도로 재현하고 있다는 것을 확인할 수 있다.

4.2 항만에서 주기파랑의 제어

기존의 직사각형항만의 입구부에 공진장치를 부착한 경우 단주기파랑에 대해 가장 큰 제어능을 나타낸 주기 $T_i=2.0$ sec 및 파고 $H_i=3.45$ cm의 주기파랑에 대해 Fig. 5(b)에 나타난 L(1)~(11) 및 WG(1)~(9)의 각 위치에서 공진장치의 유·무에 따른 수리모형실험과 선형 및 강비선형수치해석에 의한 무차원파고 H/H_i 의 변화를 Fig. 7(a)~(f)에 나타낸다.

Fig. 7(a)~(c)는 공진장치의 전면부인 L(1)~(3)에서의 수위변동을 나타낸 것으로, 결과를 살펴보면 L(1)의 실험결과는 WG(1), (9)의 경우를 제외한 전부에서 공진장치가 부착된 경우가 약간 큰 파고를 나타낸다. 이와 같은 결과는 전술한 방파제의 경우에 제시된 특성과 유사하며, 특히 WG(3)~(7)에서는 공진장치의 부착유·무에 관계없이 선형해석결과는 실험치를 고정도로 재현하지 못하는 것으로 판단된다. 따라서,

실험치를 고정도로 예측하기 위해서는 본 연구의 강비선형해석법인 3D-NIT모델과 같은 해석법의 적용이 필요할 것으로 여겨진다. 선형해석결과의 불일치 정도는 반사파의 영향이 커지는 WG(5) 근방에서 현저하게 나타나며, 이러한 결과는 해안공학의 일반 파동이론특성과 잘 부합된다. 그리고, WG(4)~(6)를 중심으로 양측으로 갈수록 파고의 크기가 줄어드는 경향을 나타내는 것은 기본적으로 반사원(공진장치의 전면, 공진장치 내 항입구부의 양측에 있는 안벽, 항의 끝단부)의 위치와 측정지점간 거리의 차이로 인한 위상중첩의 결과로, 공진장치의 전면에서 반사된 파가 항내 및 항입구부의 양측에 있는 안벽으로의 회절 및 공진장치 내 및 항만 내에서 발생하는 다중반사 때문이다. 다음으로, L(2)의 경우는 중앙부인 WG(3)~(5)에서는 공진장치에 의한 파고의 변화가 거의 나타나지 않으나 양측으로 갈수록 공진장치가 부착된 경우가 보다 작은 파고를 나타내는 것을 알 수 있다. 전반적으로 무차원파고의 크기가 1보다 작은 경우가 많은 것은 L(2)의 위치가 중복파의 마디에 보다 근접한 것이기 때문이며, WG에 따라 약간 상이한 무차원파고값을 나타내는 것은 전술한 반사원 위치의 상이와 공진장치의 전면에서 반사회절파의 영향으로 여겨진다. L(3)의 경우는 WG(4)~(6)에서는 공진장치가 없는 경우가, 반면에 다른 WG의 위치에서는 공진장치가 있는 경우가 상대적으로 큰 파고를 나타내며, 특히 WG(2), (8)에서는 공진장치의 부착으로 인하여 중복파고가 가장 커지는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 WG(4)~(6)는 공진장치의 개구부에 위치하므로 공진장치의 전면에서 영향이 거의 포함되지 않지만, 공진장치 내로 유입되는 파랑에너지가 공진장치 내 및 항만 내로 수평확산되어 WG(4)~(6)으로 재입사되는 반사파가 작고 위상차를 갖고 중첩되기 때문에 공진장치가 없는 경우보다 작은 중복파고가 나타나는 것으로 판단된다. 그러나, WG(2), (3), (7), (8)은 공진장치의 바로 전면에 위치한 경우로 전면벽체의 반사영향이 그대로 포함된 경우이지만, WG(3), (7)은 공진장치의 개구부 근방으로 개구부로 약간 반사회절되는 파의 영향 때문에 WG(2), (8)보다는 약간 작은 중복파고를 나타낸다.

Fig. 7(d), (e)는 공진장치의 내부인 L(4), (5)에서 중복파고를 나타낸 것으로, L(4)의 경우는 공진장치 부착전·후에 무차원파고값의 차이는 크게 나타나지 않지만, L(5)의 경우는 큰 파고차이를 나타내며, 특히 공진장치의 개구부에 설치된 WG(4)~(6)에서 현저한 것을 알 수 있다. L(5)에서 나타나는 이러한 현상은 WG(4)~(6)이 항만 내 끝단부에서 반사파의 영향을 바로 받기 때문이며, 전체적으로 공진장치가 부착된 경우가 작은 파고를 나타낸다. 여기서, WG(4)~(6)의 위치에서는 공진장치의 미부착시에 선형해석결과는 큰 차이를 나타내는 것을 알 수 있다.

항만 내에 위치하는 L(6)~(11)에서 중복파고의 변화를 나타내는 Fig. 7(f)를 살펴보면 공진장치가 부착되지 않은 경우에 L(7), (10)의 위치를 제외하고 대단히 큰 중복파고를 나타내며, 이는 기본적으로 중복파의 배 근방에 해당하기 때문으로 여

Fig. 7. Variation of non-dimensional wave height at the positions of wave gauge numbers and locations in case of harbor.

겨지고, 따라서 L(7), (10)의 위치는 중복파의 마디 근방이라는 것을 알 수 있다. 그러나, 공진장치가 부착된 경우는 위치에 따라 약간의 파고변화는 있지만, 전반적으로 파고가 대폭적으로 줄어들어 항만에서 공진장치의 유용성이 전술한 방파제보다 크다는 것을 알 수 있다.

이상에서와 같이 항만의 경우 선형해석과 강비선형해석에 의한 결과를 살펴보면 선형해석결과보다 전반적으로 강비선형해석결과가 실험결과를 고도로 표현하는 것으로 판단되고, 특히 중복파고가 커지는 위치에서는 선형해석결과가 큰 차이를 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

4.3 시간파형에 대한 실험결과와 강비선형해석결과의 비교

다음의 Fig. 8에 나타내는 결과는 3D-NIT모델에 의한 강비선형 수치해석결과와 수리실험결과를 비교한 시간파형의 대표적인 일례로, 측정위치는 그림 중에 제시되어 있다. 전체적으로 두 결과에서 위치에 따라 고주파성분이 나타나는 것을 알 수 있고, 수

치해석결과는 이러한 성분을 잘 재현하고 있는 것으로 판단된다. 그러나, 방파제의 경우에는 두 결과의 일치 정도는 매우 높은 반면에, 항만의 경우에는 그 대응성이 약간 저하되는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 기본적으로 방파제의 경우보다 항만의 경우는 반사원이 위치가 다른 두 개(항입구부의 양측에 있는 안벽과 항내의 끝단부)가 존재하기 때문에 상대적으로 복잡한 중복파형을 나타내고, 위상간섭이 크게 발생하기 때문으로 판단된다.

4.4 중앙선을 따른 공간파고분포

본 절에서는 공진장치의 부착유·무에 따라 WG(5)를 방파제의 경우에 L(1)에서 L(8)로, 항만의 경우에 L(1)에서 L(11)로 이동한 경우인 중앙선을 따른 공간파고분포를 나타내며, 이로부터 공진장치에 의한 주기파랑의 제어능을 검토한다.

4.4.1 방파제

Fig. 9~13는 기준방파제에 공진장치의 적용유·무에 따라

Fig. 8. Comparison between experimental results and numerical ones by 3D-NIT model.

각 L에서 무차원파고를 나타낸 결과이다. 먼저, 입사파 주기 $T_i = 1.5$ sec, 파고 $H_i = 2.27$ cm에 대한 공간파고분포를 나타낸 Fig. 9를 살펴보면 공진장치의 전면부인 L(1)~(3), 공진장치 내인 L(4), (5), 배후인 L(6)~(8)에서는 수리실험과 강비선형 해석의 무차원파고가 공진장치의 부착전·후에 유사한 값을 나타내며, 또한 선형해석의 경우도 일부 지점에서 과대해석되는 경향을 나타내지만, 전술한 바와 같이 파고가 상대적으로 작은 곳에서는 수리실험결과를 합리적으로 재현하고 있는 것으로 판단된다. 여기서, 공진장치 내부인 L(4)를 제외한 다른 지점에서 무차원파고는 공진장치의 부착전·후에서 유사한 값을 가진다는 것을 알 수 있고, 특히 L(8)에서는 공진장치가 부착되지 않은 경우가 오히려 작은 파고를 나타낸다. 이러한 결과는 입사주기 $T_i = 1.5$ sec, 파고 $H_i = 2.27$ cm의 경우에 공진장치에 의한 파랑에너지의 감쇠가 그다지 발생하지 않기 때문인 것으로 판단된다.

입사파 주기 $T_i = 1.8$ sec, 파고 $H_i = 2.76$ cm일 때의 중복파의 공간파고분포를 나타낸 Fig. 10을 살펴보면 공진장치의 전

면부인 L(1)~(3)에서는 공진장치의 전면과 공진장치 내의 방파제로부터 발생하는 반사파와 입사파와의 위상차이로 인하여 L에 따라 중복파의 파고가 다르게 나타나며, 여기서는 L(3)에서 가장 큰 중복파고가 형성된다. 다음으로, 공진장치 내에서는 상대적으로 파고가 줄어들고, 더욱이 배후에서는 방파제 개구부에서 발생하는 회절현상으로 한층 더 파고가 감소하는 것을 알 수 있다. 특히, 배후에서는 공진장치가 부착된 경우가 공진장치가 없는 경우보다 매우 작은 파고값을 나타내므로 공진장치의 유용성을 확인할 수 있고, 공진장치의 부착으로 인하여 파고가 평균적으로 약 37% 정도 감소된다.

다음으로, 입사파 주기 $T_i = 2.0$ sec, 파고 $H_i = 3.45$ cm일 때의 공간파고분포를 나타낸 Fig. 11과 입사파 주기 $T_i = 2.2$ sec, 파고 $H_i = 3.79$ cm일 때의 공간파고분포를 나타내는 Fig. 12를 살펴보면 공진장치의 전면부인 L(1)~(3)에서 공진장치가 부착된 경우가 그렇지 않은 경우보다 파고의 변화가 크게 나타나므로 반사파의 크기가 크다는 것을 알 수 있고, 따라서 공진장치 내로 유입되는 파랑에너지가 상대적으로 작아지고, 결

Fig. 9. Spatial distribution of non-dimensional wave height along centerline in case of breakwater ($T_i = 1.5$ sec, $H_i = 2.27$ cm).

Fig. 10. Spatial distribution of non-dimensional wave height along centerline in case of breakwater ($T_i = 1.8$ sec, $H_i = 2.76$ cm).

Fig. 11. Spatial distribution of non-dimensional wave height along centerline in case of breakwater ($T_i = 2.0$ sec, $H_i = 3.45$ cm).

Fig. 12. Spatial distribution of non-dimensional wave height along centerline in case of breakwater ($T_i = 2.2$ sec, $H_i = 3.79$ cm).

국에는 배후에서 파고가 대폭적으로 감소된 결과로 나타난다. 여기서, 주기 $T_i = 2.0$ sec, $H_i = 3.45$ cm의 경우는 평균 79% 정도의 파고감소율을, 주기 $T_i = 2.2$ sec, $H_i = 3.79$ cm의 경우에는 평균 62% 정도의 파고감소율을 각각 나타낸다. 이러한 결과는 공진장치가 있는 경우에 공진장치 전면에서 큰 반사와 공진장치의 개구부에서 회절현상으로 유입된 파랑에너지가 공진장치의 내부로 확산되고, 또한 내부에 포획되면서 방파제의 전·후로 파랑에너지의 분산이 동시에 발생하기 때문으로 판단된다. 그리고, 이와 같이 분산되는 파랑에너지와 유입하는 파랑에너지의 중첩에 위상차가 존재하고, 방파제 배후로의 유입에 따른 회절현상으로 공진장치 배후에서 파고가 크게 감소하는 것으로 판단된다. 또한, 선형해석결과는 공진장치의 전면에서 수리실험과 강비선형해석의 결과보다 큰 값을 가지는 것을 확인할 수 있고, 고정도해석을 위해서는 강비선형해석이 필요한 것으로 판단된다.

Fig. 13은 입사파 주기 $T_i = 2.5$ sec, 파고 $H_i = 4.18$ cm의 경우에 공간파고분포를 나타낸 결과이다. 결과를 살펴보면 공진장치의 전면부인 L(1)~(3)에서 중복파고의 변화특성은 전술한 Fig. 11, 12와 유사하지만, 공진장치가 부착된 경우는 전술한 경우보다 파고변화가 커지는 않다. 따라서, 공진장치 내 및 배후에서 파고감소가 상대적으로 전술한 Fig. 11, 12보다 작다는 것을 알 수 있고, 평균적으로 약 51% 정도의 파고감

Fig. 13. Spatial distribution of non-dimensional wave height along centerline in case of breakwater ($T_i = 2.5$ sec, $H_i = 4.18$ cm).

소를 나타낸다.

이상으로부터 입사파 주기 $T_i = 1.5$ sec, 파고 $H_i = 2.27$ cm의 경우를 제외한 전 입사파 조건에서 공진장치에 의한 파고의 감쇠효과를 확인할 수 있었으며, 공진장치가 방파제에 작용하는 주기파랑의 에너지저감공으로서 유용성을 갖는다는 것을 확인할 수 있었고, 본 연구의 3D-NIT모델에 의한 강비선형 해석결과가 전반적으로 실험결과를 보다 고정도로 예측한다는 것을 알 수 있었다. 특히, 공진장치의 유용성은 입사파장과 공진장치의 크기(주로 길이)와 관계에 크게 좌우되는 것으로 판단되므로, 최적의 공진장치의 크기는 입사파랑의 주기에 따라 달라질 수 있다.

4.4.2 항만

Fig. 14~18은 기존의 직사각형항만에 공진장치를 적용하였을 경우 Table 1에 나타난 입사파 조건으로부터 각 측정지점에서 얻어진 무차원파고를 나타낸 결과이다.

먼저, 입사파 주기 $T_i = 1.5$ sec, 파고 $H_i = 2.27$ cm일 때의 공간파고분포를 나타낸 Fig. 14를 살펴보면 공진장치의 전면부인 L(1)~(3), 공진장치의 내부인 L(4), (5), 항만 내인 L(6)~(11)에서 무차원파고값은 위치에 따라 다소 차이가 있지만, 전반적으로 공진장치의 부착후에 더 큰 파고값을 나타내는 것을 알 수 있다.

입사파 주기 $T_i = 1.8$ sec, 파고 $H_i = 2.76$ cm일 때의 공간파

Fig. 14. Spatial distribution of non-dimensional wave height along centerline for harbor ($T_i = 1.5$ sec, $H_i = 2.27$ cm).

고분포를 나타낸 Fig. 15를 살펴보면 공진장치의 전면부인 L(1)~(3)에서는 중복파로 인하여 위치에 따라 파고의 변화가 크게 나타나는 것을 알 수 있고, 이러한 현상은 공진장치가 부착된 경우가 보다 크게 주어지므로 반사파의 크기가 큰 것으로 예상된다. 공진장치의 내부인 L(4), (5)와 항만의 내부인 L(6)~(11)에서는 공진장치의 부착후에 파고가 크게 감소하는 것을 확인할 수 있고, L(6)~(11)에서는 무차원파고가 평균적으로 75% 정도 감소하는 것을 확인할 수 있다. 여기서, 공진장치를 부착하지 않은 경우에는 항만 내에서 중복파의 형상을 명확하게 볼 수 있지만, 공진장치가 부착된 경우에는 항만 내로 유입되는 파랑에너지가 매우 작기 때문에 파고의 변화가 미미하게 나타난다. 입사파 주기 $T_i=2.0$ sec, 파고 $H_i=3.45$ cm의 경우에 공간파고분포를 나타낸 Fig. 16을 살펴보면 공진장치의 전면부인 L(1)~(3)의 지점에서는 공진장치의 부착유·무와 관계없이 중복파가 명확하게 형성되고, 공진장치의 내부인 L(4), (5)와 항만 내인 L(6)~(11)에서는 공진장치가 부착된 경우가 매우 작은 파고값을 나타낸다. 공진장치 내 및 배후에서 이러한 결과는 전술한 Fig. 15보다 현저하게 주어지며, 무차원파고가 평균적으로 76% 정도 감소되는 것을 확인할 수 있다.

다음으로, 입사파 주기 $T_i=2.2$ sec, 파고 $H_i=3.79$ cm의 경우에 공간파고분포를 나타낸 Fig. 17을 살펴보면 L(1)~(3)은 공진장치의 전면부에서 결과를 나타내며, 그림에서 공진장치가

부착된 경우가 중복파의 파고변화가 크기 때문에 반사파가 큰 것으로 예상된다. 그리고, 공진장치의 내부인 L(4), (5)와 항만 내인 L(6)~(11)에서는 공진장치 부착후에 파고가 크게 감소하는 것을 확인할 수 있고, 항만 내에서 무차원파고는 평균적으로 72% 정도의 감소를 보인다.

Fig. 18은 입사파 주기 $T_i=2.5$ sec, 파고 $G_i=4.18$ cm일 때의 공간파고분포를 나타낸 결과이다. 결과를 살펴보면 공진장치의 전면부인 L(1)~(3)에서 중복파의 파고변화를 볼 수 있고, 공진장치의 내부인 L(4), (5)와 항만 내인 L(6)~(11)에서 공진장치의 부착후에 파고감소를 확인할 수 있지만, 전술한 Fig. 15~17보다는 그 효과가 약간 작게 나타나며, 항만 내에서 무차원파고가 평균적으로 58% 정도 감소되는 것을 확인할 수 있다.

이상의 결과로부터 항만의 경우 입사파 주기 $T_i=1.5$ sec, 파고 $H_i=2.27$ cm인 경우를 제외한 전 입사파 조건에서 공진장치에 의한 파고의 감쇠효과를 확인할 수 있었으며, 공진장치가 항만에 작용하는 주기파랑의 에너지저감공으로서 유용성을 갖는다는 것을 확인할 수 있었다. 더불어, 공진장치의 효과는 전술한 바와 같이 입사주기에 따라 상이하게 나타나고, 특히 Fig. 14와 같이 경우에 따라서는 오히려 항만 내에서 파고증대를 초래할 수도 있다. 따라서, 최적의 공진장치크기를 결정하기 위해서는 현장의 대표주기 및 항만의 크기 등을 고려하여 것이 필요할 것이다.

Fig. 15. Spatial distribution of non-dimensional wave height along centerline for harbor ($T_i=1.8$ sec, $H_i=2.76$ cm).

Fig. 17. Spatial distribution of non-dimensional wave height along centerline for harbor ($T_i=2.2$ sec, $H_i=3.79$ cm).

Fig. 16. Spatial distribution of non-dimensional wave height along centerline for harbor ($T_i=2.0$ sec, $H_i=3.45$ cm).

Fig. 18. Spatial distribution of non-dimensional wave height along centerline for harbor ($T_i=2.5$ sec, $H_i=4.18$ cm).

5. 결 론

본 연구에서는 Nakamura et al.(1996, 1998)에 의해 단주기파랑의 제어를 위해 제안된, 그리고 단주기파랑과 장주기파랑의 동시제어를 위해 제안된 이광호 등(2010)의 연구를 바탕으로 기존의 직선배치된 방파제와 직사각형항만에서 단주기파랑의 저감공으로 공진장치를 부착하는 공법을 검토하였다. 수치해석에서는 선형해석에 연직선Green함수에 기초한 특이점분포법을, 강비선형해석에는 3D-NIT모델에 의한 강비선형해석법을 각각 적용하였고, 얻어진 결과를 수리실험결과와 비교·분석하였다. 또한, 단주기파랑의 입사주기 및 입사파고의 변화에 따른 공진장치의 전면부, 내부 및 배후에서 무차원파고분포를 공진장치가 없는 경우와 대비하여 공진장치의 제어능을 검토하였다. 이상의 3차원수리모형실험과 수치해석으로부터 얻어진 본 연구의 주요 내용을 아래에 기술한다.

(1) 기존의 직선배치된 방파제와 직사각형항만에 주기파랑을 입사시킨 경우 입사파 주기 $T_i = 1.5$ sec, 파고 $H_i = 2.27$ cm인 경우를 제외한 전 입사파 조건에서 공진장치를 부착한 경우가 부착전보다 상당히 작은 파고값을 나타내므로 공진장치에 의한 파고의 감쇠효과를 확인할 수 있었으며, 공진장치가 방파제에 작용하는 주기파랑의 에너지저감공으로서 유용성을 갖는다는 것을 수리실험 및 수치해석으로부터 확인할 수 있었다.

(2) 공진장치의 유용성은 입사주기의 영향을 많이 받고, 경우에 따라서는 역현상도 나타나므로 최적의 제어능을 갖는 공진장치의 크기는 입사주기에 의해 결정될 필요가 있다.

(3) 기존의 직선배치된 방파제와 직사각형항만에 주기파랑을 입사시킨 경우 공진장치의 유·무에 따른 특이점분포점에 기초한 선형해석과 3D-NIT모델에 의한 강비선형해석결과를 3차원수리모형실험결과와 비교하면 전체적으로 본 연구의 강비선형해석결과가 수리실험결과를 보다 더 잘 재현하고, 합리적인 일치를 나타내므로 3D-NIT모델의 타당성을 검증할 수 있고, 더불어 강비선형해석의 정당성을 확립할 수 있었다. 특히, 파고가 큰 위치에서는 고정도의 해석결과를 얻기 위하여 비선형해석이 필요한 것으로 판단된다.

참고문헌

류경호. (2004). 단·장주기파를 고려한 항만가동을 산정. 석사학위논문, 명지대학교.

이광호, 정성호, 하선욱, 김도삼 (2009). 2열 불투과성 사각형 잠제를 이용한 단주기파랑 및 고립파의 제어. 한국해양·해양공학회 논문집, 22(4), 203-214.

이광호, 정성호, 정진우, 김도삼 (2010). 공진장치를 이용한 단주기파랑과 고립파의 제어. 대한토목학회 논문집, 30(1B), 89-100.

이광호, 백동진, 김도삼 (2011). 3차원 불규칙 수치파동수조(3D-NIT)모델의 개발 및 그의 적용에 관한 연구. 한국해양·해양공학회지 논문집, (투고중).

정성호, 하선욱, 정진우, 김도삼 (2009). 2열잠제에 의한 지진해일파(고립파)의 제어. 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 발표논문집, 2267-2270.

Issacson, M.Q. (1978). Vertical cylinders of arbitrary section in wave. J. of Waterway, Coastal and Ocean Eng. Division, ASCE, 104(WW4), 309-322.

John, F.(1949). On the motions of floating bodies I. Comm. Pure Appli. Math., 2, 13-57.

John, F.(1950). On the motions of floating bodies II. Comm. Pure Appli. Math., 3, 45-101.

Nakamura, T., Mochizuki, H. and Morita, S. (1996). Performance of a resonator designed by the wave filter theory-applicability to a harbor. Proceedings of the 25th ICCE, ASCE, 1280-1292.

Nakamura, T., Morita, S. and Kato, K. (1998). Wave protection performance of a resonator founded at harbor entrance. Proceedings of Coastal Engineering, JSCE, 45, 721-725.

Nakamura, T. and Oku, Y. (1985). Wave scattering around a vertical breakwater of arbitrary plane geometry. Proceedings of Conference on Coastal Engineering, JSCE, 32, 594-598.

Ohyama, T. and Nadaoka, K. (1991). Development of a numerical wave tank for analysis of non-linear and irregular wave field. Fluid Dyna. Res., 8, 231-251.

柳山 勉, 阿部宣行, 鹿島遼一 (1990). ポーラスモデルによる透過性構造物周辺の非線形波動解析, 海岸工学論文集, 37, 554-558.

원고접수일: 2012년 2월 3일

수정본채택: 2012년 2월 14일

게재확정일: 2012년 2월 14일