

약 비선형 파랑에 대한 연직 2차원 부방파제의 동수역학적 해석

Hydrodynamic Analysis of Two-dimensional Floating Breakwater
in Weakly Nonlinear Waves

이정우* · 조원철**

Lee, Jeongwoo · Cho, Woncheol

Abstract

The performance of a pontoon-type floating breakwater (FB) is investigated numerically with the use of a second-order time domain model. The model has been developed based on potential theory, perturbation theory and boundary element method. This study is focused on the effects of weakly nonlinear wave on the hydrodynamic characteristics of the FB. Hydrodynamic forces, motion responses, surface elevation, and wave transmission coefficient around the floating breakwater are evaluated for various wave and geometric parameters. It is shown that the second-order wave component is of significant importance in calculating magnitudes of the hydrodynamic forces, mooring forces and the maximum response of a structure. The weak non-linearity of incident waves, however, can have little influence on the efficiency of the FB. From numerical simulations, the ratio of draft and depth, the relationship of wave number and width are presented for providing an effective means of reducing wave energy.

Keywords : floating breakwater, second-order time domain model, weakly nonlinear wave

요 지

본 연구에서는 포텐셜 이론, 섭동법, 경계요소법에 근간을 둔 이차의 시간영역 수치모델을 개발하고 이를 이용하여 폰툰형 부방파제의 성능을 평가하였다. 다양한 설계조건에 대하여 파력, 운동변위, 자유수면고, 투과율 등의 변화를 고찰하였으며, 파랑의 약 비선형성이 방파제의 동수역학적 특성에 미치는 영향을 분석하는데 주안점을 두었다. 수치모의 수행 결과, 이차의 성분 파는 동유체력, 계류장력, 운동변위에 미치는 영향이 큰 것으로 분석되었으나, 파랑의 약 비선형성이 투과율에 미치는 영향은 매우 작아 선형해석만으로도 파랑제어효율을 평가할 수 있음을 확인하였다. 또한 파랑제어효율이 우수한 수심과 흘수의 비, 파수와 폭과의 관계 등을 제시하였다.

핵심용어 : 부방파제, 이차 시간영역 모델, 약 비선형 파랑

1. 서 론

부방파제는 해수 중에 떠있는 부체와 이의 동요를 구속하는 계류라인으로 구성된 구조물로서 비교적 작은 파랑을 제어하는 것을 주 기능으로 하는 소파구조물이다. 파 에너지가 수면근처에 집중되어있기 때문에 구조물을 해저바닥까지 닿게 하지 않고 수면 아래 일부 깊이까지만 구조물을 잠기게 해서도 파 에너지의 상당부분을 차단할 수 있는 구조물이다. 부방파제의 특징은 대수심에서도 설치가능하고, 구조물 아래 공간을 통하여 항 내외의 해수 교환 및 퇴적물 이송이 가능하고 필요한 곳에 이동 설치가 용이하며, 방파기능 이외에 정박시설물, 수상보도 심지어 군사 활동 등 다목적으로 사용 가능한 장점이 있다. 이러한 부방파제를 설계하기 위해서는 바람, 파랑, 조류, 해류 등의 자연 환경적 요인, 구조물에

작용하는 하중, 부유체의 단면형상, 질량, 관성모멘트, 계류 시스템과 관련된 변수, 부체의 이동한계 등 여러 사항을 포괄적으로 고려해야 한다. 그러나 다양한 조건하에 수많은 실험을 수행하는 것은 현실적으로 어렵고 경제적인 문제 또한 수반되므로, 수치모델링을 이용하는 것이 효과적일 수 있다.

Adee와 Marin(1974)에 의해 부방파제의 동적거동해석을 위한 이론적인 방법이 정립된 이래로, 입사파랑조건과 방파제의 단면형상 및 규격에 따른 파랑제어 효과분석(양우석 등, 2001; Lee와 Cho, 2003), 다열 배치된 부방파제의 효율 평가(정신택 등, 2002), 운동변화에 지배적인 인자인 부가질량력, 감쇠계수 등의 동수역학적 매개변수 산정에 관한 연구(Leonard 등, 1983), 방파제에 장착된 계류라인의 형상 및 강성변화에 따른 응답거동 분석(Sannasiraj 등, 1998), 개선된 형태의 부방파제의 파랑제어 및 동적거동에 관한 연구(김

*정희원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 Post-Doc 연구원(E-mail : ljw2961@kict.re.kr)

**정희원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 토목환경전공 교수(E-mail : woncheol@yonsei.ac.kr)

도삼 등, 2004, 2005a, b) 등 부방파제에 대하여 다양한 수치해석적인 연구가 수행되었다. 그러나, 이러한 연구들은 선형 파랑하중에 대한 응답거동과 파랑제어기능을 분석한 것으로 파랑 및 계류계의 비선형성을 고려하지 못하였다. 따라서 본 연구에서는 파랑의 약 비선형성, 그리고 계류라인 장력에 의한 복원력의 비선형성을 반영할 수 있는 수치모델을 확립하고, 수치해석을 통하여 입사파랑 및 폭이나 흡수 등의 변화 등 다양한 설계조건에 따른 약 비선형 파동장에 놓인 부방파제의 운동변화특성과 파랑제어기능을 분석하고자 하였다.

비선형 파랑과 부유식 구조물간의 상호작용을 시간영역에서 해석하기 위한 수학적 모델은 크게 완전 비선형 모델 (fully nonlinear model)과 고차항 모델(high order model)로 구분할 수 있다. 전자는 파고의 제약이 없고 자유수면의 비선형성을 완전하게 반영할 수 있는 장점이 있어 파랑과 부체의 비선형적 상호작용 해석 문제에 사용되어오고 있으나(Cointe 등, 1990; Contento, 1996; Koo와 Kim, 2004), 물체 및 자유수면 경계조건 자체가 미지수인 점, 즉 해석영역이 시간에 따라 변한다는 점 때문에 시스템 매트릭스를 매 시간스텝마다 재구성함으로써 인해 계산시간이 많이 소요되는 단점이 있다. 이에 반해 Isaacson과 Cheung(1991), Isaacson과 Ng(1993) 등에 의해 개발된 후자는 섭동법을 이용하여 미지수를 각 성분별로 분할하고 테일러급수전개에 의해 자유수면 및 물체표면을 평균위치에 대해 표현함으로써 각 성분별 미지수를 고정된 해석영역에서 구하기 때문에 계산영역을 매 시간스텝마다 변경해야 할 필요가 없는 이점이 있으나, 파랑의 비선형성을 완전하게 반영하지 못하는 제약성을 가지고 있다. 한편, 주파수영역해석법을 이용하여 부유식 구조물과 2차의 약 비선형 파랑과의 상호작용 해석에 관한 다양한 연구(Zhao와 Faltinsen, 1989; Kim과 Yue, 1990, 1991; Grue와 Palm, 1993; Liu 등, 1993)들이 수행되었으며, 고정도의 해석을 위하여 비선형 성분의 차수를 3차항까지 확장한 연구(Pierson, 1993; Malenica 등, 1995; Scalavounos 등, 1995)도 행해졌으나, 경계치 문제의 수학적 표현이 대수적으로 매우 복잡한 단점이 있다.

본 연구에서는 비교적 작은 파고를 가진 약 비선형 파랑에 놓인 부방파제를 대상으로 하기 때문에 두 번째 방법인 고차항 모델을 근간으로 하여 시간영역에서의 2차의 약 비선형 수치모델을 구성하여 부방파제에 대해 수치모의를 수행하였다.

2. 지배방정식 및 경계조건

일반적으로 부방파제가 파동장에 놓여 있을 때 파랑에 의한 속도장 및 파력의 산정은, 포텐셜 이론에 입각하여 고정된 물체에 파가 입사하는 회절문제와 정수 중에서 구조물의 동요에 의해 발생되어지는 파를 다루는 방사문제로 다루어진다. 약 비선형 파동장에 계류된 부방파제의 연직 2차원 회절 및 방사문제는 그림 1과 같이 바다면, 방사경계면(S_c), 자유수면(S_o), 물체표면(S_b)으로 둘러싸인 영역을 해석영역으로 하여, 1차 및 2차의 성분파별로 식 (1)과 같이 Laplace 방정식으로 표현된 지배방정식과 식 (2)-식 (6)과 같은 경계조건으로 표현된 경계치 문제로 나타낼 수 있다(Ng과

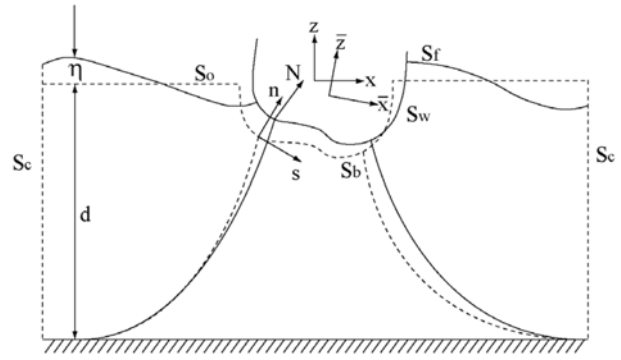


그림 1. 부방파제의 회절 및 방사 경계치 문제

Isaacson, 1992).

$$\nabla^2 \Phi_k^B = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \Phi_k^B}{\partial z} = 0 \quad \text{at } z = -d \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Phi_k^B}{\partial n} = f_k \quad \text{on } S_b \quad (3)$$

$$\frac{\partial \Phi_k^B}{\partial z} - \frac{\partial \eta_k^B}{\partial t} = f'_k \quad \text{on } S_o \quad (4)$$

$$\frac{\partial \Phi_k^B}{\partial t} + g\eta_k^B = f''_k \quad \text{on } S_o \quad (5)$$

$$\frac{\partial \Phi_k^B}{\partial t} + C \frac{\partial \Phi_k^B}{\partial n} = 0 \quad \text{on } S_c \quad (6)$$

여기서, $f_1 = -\frac{\partial \Phi_1^W}{\partial n} + (\dot{\zeta}_1 + \dot{\alpha}_1 \bar{z})n_x + (\dot{\zeta}_1 - \dot{\alpha}_1 \bar{x})n_z$

$$f_2 = -\frac{\partial \Phi_2^W}{\partial n} + (\dot{\zeta}_2 + \dot{\alpha}_2 \bar{z})n_x + (\dot{\zeta}_2 - \dot{\alpha}_2 \bar{x})n_z$$

$$-(\dot{\zeta}_1 + \dot{\alpha}_1 \bar{z}) \left(\frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial n^2} n_x + \frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial s \partial n} n_z \right)$$

$$-(\dot{\zeta}_1 - \dot{\alpha}_1 \bar{x}) \left(\frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial n^2} n_z - \frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial s \partial n} n_x \right)$$

$$+ \alpha_1 n_z \left(\dot{\zeta}_1 - \frac{\partial \Phi_1}{\partial n} n_x - \frac{\partial \Phi_1}{\partial s} n_z \right)$$

$$- \alpha_1 n_x \left(\dot{\zeta}_1 - \frac{\partial \Phi_1}{\partial n} n_z + \frac{\partial \Phi_1}{\partial s} n_x \right)$$

$$f'_1 = 0, \quad f'_2 = - \left(\frac{\partial \Phi_2^W}{\partial z} - \frac{\partial \eta_2^W}{\partial t} \right) + \frac{\partial \Phi_1}{\partial x} \frac{\partial \eta_1}{\partial x} - \eta_1 \frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial z^2}$$

$$f''_2 = - \left(\frac{\partial \Phi_2^W}{\partial t} + g\eta_2^W \right) - \frac{1}{2} |\nabla \Phi_1|^2 - \eta_1 \frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial z \partial t} \quad \text{이다.}$$

또한, Φ 는 파동장의 속도포텐셜로서 입사파 Φ_k^W (차수 $k=1,2$)와 회절 및 방사에 의해 교란된 속도포텐셜 Φ_k^B 의 합 ($\Phi = \alpha(\Phi_1^W + \Phi_1^B) + \varepsilon^2(\Phi_2^W + \Phi_2^B)$), z 는 연직상향의 좌표축, d 는 수심, t 는 시간, $\partial/\partial n$ 와 $\partial/\partial s$ 는 각각 물체표면에서 유체영역으로 향하는 외향 법선방향 및 접선방향에 대한 미분, g 는 중력가속도, C 는 시간에 따라 변하는 방사경계면에서의 파속, $\dot{\zeta}_k$, $\dot{\alpha}_k$ 는 각각 수평, 연직, 횡동요량, (\cdot) 는 시간미분치, \bar{x}, \bar{z} 는 물체표면 임의 위치에서의 좌표값, 그리고, η_k^B 는 $\eta = \alpha(\eta_1^W + \eta_1^B) + \varepsilon^2(\eta_2^W + \eta_2^B)$ 와 같은 관계를 가지며

회절 및 방사에 의해 교란된 k 차의 자유수면고를 나타낸다.

방사경계면(radiation boundary)에 의한 반사파의 영향을 최소화하기 위해서 에너지 흡수대(sponge layer)를 방사경계면 부근에 설정하면, 자유수면 경계조건인 식 (4)와 식 (5)를 다음 식 (7)과 식 (8)과 같이 흡수항이 추가된 형태로 나타낼 수 있다(Buchmann 등, 1998).

$$\frac{\partial \eta_k^B}{\partial t} = \frac{\partial \Phi_k^B}{\partial z} - f'_k - \nu(\mathbf{x}) \eta_k^B \sqrt{g/l} \quad \text{on } S_o \quad (7)$$

$$\frac{\partial \Phi_k^B}{\partial t} = -g \eta_k^B + f''_k - \nu(\mathbf{x}) \Phi_k^B \sqrt{g/l} \quad \text{on } S_o \quad (8)$$

여기서, l 은 길이 스케일 상수이며, $\nu(\mathbf{x})$ 는 거리에 따른 감쇠 정도를 결정하는 무차원 변수로서 식 (9)와 같이 방사경계면 근처를 제외하고는 0의 값을 갖는다.

$$\nu(\mathbf{x}) = \nu(s) = \nu_{max}(s-1)^2(2s+1) \quad \text{if } s \leq 1 \quad \text{otherwise } 0 \quad (9)$$

여기서 $s = \min(|\mathbf{x} - \mathbf{x}_{wall}|) / l_{sponge}$, l_{sponge} 은 에너지 흡수대의 길이, \mathbf{x}_{wall} 은 절단된 방사경계면상의 좌표 값이다. Buchmann 등 (1998)의 연구에서는 흡수항의 효과를 보기 위해서는 에너지 흡수대의 길이를 파장에 비해 충분히 길게 설정하고 $\nu(\mathbf{x})$ 값을 점진적으로 변화게 하는 것이 유리하다고 하였으며, $\nu_{max} = 0.2$ 정도의 값을 사용할 것을 제안하였다. 본 연구에서는 파장의 1/2 만큼 방사경계면 부근에 에너지 흡수대를 설정하였다.

3. 계류라인의 해석법

계류 부방파제의 파랑에 대한 동적응답 특성을 분석하기 위해서는 파동장에 놓인 부체에 대한 경계치 문제를 풀어 속도포텐셜 및 동유체력을 계산하는 동수역학적 해석뿐만 아니라, 계류라인의 곡선 형상, 부체의 동요로 인한 장력 등을 계산하는 계류해석이 수반되어야 한다. 부체의 동요에 따른 부체계류점의 이동이 비교적 작은 경우에는 계류라인의 복원력을 등가의 선형스프링으로 근사하여 취급할 수 있다 (Jain, 1980; Sannasiraj 등, 1998. Lee와 Cho, 2003; 김도삼 등, 2003). 그러나, 부체계류점이 크게 이동하여 케티너리 라인 형상이 직선에 가까운 형태가 되면 계류체인은 강한 비선형성의 반력특성을 나타내게 되므로(김도삼 등, 2003), 이러한 경우에는 부체계류점 이동에 따른 계류장력을 아래과 같이 케티너리 이론을 이용해서 구함으로써 계류체의 비선형성을 반영할 수 있다.

케티너리(catenary) 계류라인의 힘의 정적 평형관계로부터 수평 및 연직방향 장력 T_h 와 T_v 는 식 (10)과 식 (11)로 나타낼 수 있다(Jain, 1980).

$$T_h = T \cos \theta = T_0 \quad (10)$$

$$T_v = T \sin \theta = w_0 s \quad (11)$$

여기서, T 는 체인의 장력, s 는 아크의 길이, w_0 는 단위길이 당 수중 중량, T_0 는 장력의 수평방향 성분이다. 합력으로부터 장력 T 는 식 (12)와 같으며, 케티너리 계류라인의 형상을 나타내는 수평 및 연직거리는 식 (13)과 식 (14)와 같이 표현된다.

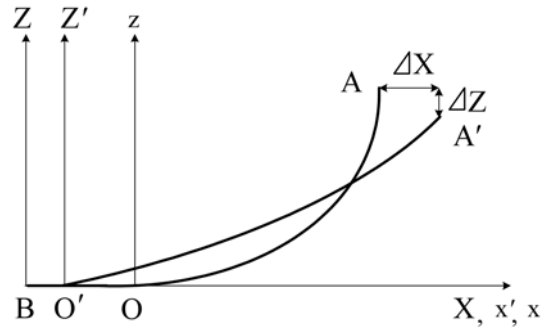


그림 2. 계류라인의 기하학적 형상 및 좌표계

$$T = T_0 \left\{ 1 + \left(\frac{w_0 s}{T_0} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (12)$$

$$x = \frac{T_0}{w_0} \sinh^{-1} \left(\frac{w_0 s}{T_0} \right) \quad (13)$$

$$z = \frac{T_0}{w_0} \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{w_0 s}{T_0} \right)^2} - 1 \right\} \quad (14)$$

계류라인은 탄성변형을 하지 않고 횡동요 성분에 대한 굽힘 강성은 없다고 가정하였으며, 계류라인에 작용하는 항력과 해저바닥과의 마찰을 무시하였다. 그림 2는 A점을 계류라인과 부체와의 연결점, B점을 앵커점으로 하는 길이 L 인 계류라인의 케티너리 곡선형상 및 좌표계를 나타낸 것이다.

좌표계 (x, z) 를 기준으로 정적인 초기 상태에 대한 부체계류점 A의 좌표 (x_A, z_A) 는 식 (13)와 (14)를 이용하여 다음 식 (15)와 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_A = \frac{T_0}{w_0} \sinh^{-1} \left(\frac{w_0 L'}{T_0} \right) \quad (15)$$

$$z_A = \frac{T_0}{w_0} \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{w_0 L'}{T_0} \right)^2} - 1 \right\} \quad (16)$$

여기서, $L (= L - l)$ 은 계류라인의 총 길이 L 에서 해저바닥에 닿아있는 부분의 길이 $l (= \overline{BO})$ 을 감한 길이이다. 초기 계류점에서의 계류라인의 장력 T 는 주어진 계류점의 수평 및 연직거리 (x_A, z_A) , 라인의 총 길이 L , 라인의 수중 중량 w_0 등의 입력 값에 대해서 식 (15)와 식 (16)을 Newton-Rapson 법을 이용하여 T_0 와 l 을 근사적으로 해석함으로써 구할 수 있다. 부체의 동요에 의해 부체계류점 A가 A'으로 ΔX 와 ΔZ 만큼 이동할 경우, 계류점의 위치변화는 계류점에서의 장력의 변화와 라인과 해저바닥과의 접촉길이의 변화를 야기하게 된다. 즉, O는 O'로 이동하게 되며 길이 l 은 $l' (= \overline{BO'})$ 로 변하게 된다. 따라서 O'를 기준으로 하는 좌표계 (x', z') 에 대한 부체계류점 A의 수평 및 연직거리 (x'_A, z'_A) 는 다음과 같이 표현할 수 있다. 부체의 수평 및 연직방향 운동변위량 및 횡동요량으로부터 ΔX 와 ΔZ 를 구하고, 식 (17)과 식 (18)으로부터 새로운 위치에서의 계류장력을 각각의 계류라인 별로 계산한 후에 반력의 방향을 고려하여 각 라인의 계류장력을 합산함으로써 부체에 작용하는 순 계류복원력을 결정할 수 있다.

$$x'_A = x_A + \Delta X + l - l' = \frac{T_0 + \Delta T_0}{w_0} \sinh^{-1} \left\{ \frac{w_0 (L - l')}{T_0 + \Delta T_0} \right\} \quad (17)$$

$$z'_A = z_A + \Delta Z = \frac{T_0 + \Delta T_0}{w_0} \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{w_0(L-l')}{T_0 + \Delta T_0} \right)^2} - 1 \right\} \quad (18)$$

4. 수치모델의 구성

Ng과 Isaacson(1992)은 비선형 파랑과 부유구조물간의 상호작용을 해석하기 위해서 속도포텐셜, 운동변위, 자유수면 등의 변수를 섭동법과 테일러급수전개를 이용하여 1차와 2차항 성분으로 구분하고, 각 성분별 미지수를 시간영역에서 구하는 수치모델을 제시하였다. 본 연구에서는 Ng과 Isaacson(1992)의 수치모델에 비선형 특성을 가진 케티너리 계류라인의 복원력을 계산하는 계류해석 루틴을 추가로 결합함으로써 부방과제에 대한 해석이 가능하도록 확장 개발하였다. 수치모델은 동유체력을 계산하는 동수역학적 해석 루틴과 케티너리 계류라인의 비선형 복원력을 계산하는 계류해석 루틴, 그리고 이를 연결하는 기능을 하며 운동변위를 계산하는 동요량 해석 루틴으로 구성되었다.

동수역학적 해석 루틴에서는 식 (1)-식 (6)과 같은 경계치 문제의 해를 구하게 되는데, Green의 2차 항등식을 이용하여 지배방정식 식 (1)을 식 (19)와 같이 경계적분방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\Phi_k^B(\mathbf{x}) = \frac{1}{\pi} \int_S \left(\Phi_k^B(\mathbf{x}') \frac{\partial G(\mathbf{x}; \mathbf{x}')}{\partial n} - \frac{\partial \Phi_k^B(\mathbf{x}')}{\partial n} G(\mathbf{x}; \mathbf{x}') \right) dS \quad (19)$$

여기서, \mathbf{x} 는 기저점의 좌표, \mathbf{x}' 는 적분이 수행되는 경계면 상의 소스점의 좌표이며, Green 함수 $G(\mathbf{x}; \mathbf{x}')$ 는 식 (20)과 같다.

$$G(\mathbf{x}; \mathbf{x}') = \ln r \quad (20)$$

여기서, r 은 \mathbf{x} 와 \mathbf{x}' 사이의 거리이다. 해저면이 수평이라는 가정 하에 식 (20)은 식 (21)과 같이 Laplace 방정식의 기본해와 수평 해저면에 대한 상(image)의 합으로 다시 쓸 수 있다.

$$G(\mathbf{x}; \mathbf{x}') = \sum_{k=1}^2 \ln r_k \quad (21)$$

여기서, r_k 는 기저점 \mathbf{x} 와 소스점 \mathbf{x}'_k 의 사이의 거리로서 식 (22)와 식 (23)과 같다.

$$r_1 = |\mathbf{x}'_1 - \mathbf{x}| = \sqrt{(x' - x)^2 + (z' - z)^2} \quad (22)$$

$$r_2 = |\mathbf{x}'_2 - \mathbf{x}| = \sqrt{(x' - x)^2 + (z' + 2d + z)^2} \quad (23)$$

적분방정식 식 (19)의 수치해를 구하기 위해서 경계요소법을 이용하였다. 각 요소에서의 속도포텐셜과 그 도함수는 상수라고 가정하여 각 요소의 중심에 대해 적용하면, 식 (24)와 같은 이산화방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\Phi_k^B(\mathbf{x}_i) = \frac{1}{\pi} \sum_{j=1}^{N_T} \left(\Phi_k^B(\mathbf{x}'_j) \int_{\Delta S_j} \frac{\partial G(\mathbf{x}_i; \mathbf{x}'_j)}{\partial n} dS - \frac{\partial \Phi_k^B(\mathbf{x}'_j)}{\partial n} \int_{\Delta S_j} G(\mathbf{x}_i; \mathbf{x}'_j) dS \right) \quad (24)$$

여기서, N_T 는 경계부 요소의 총 개수, ΔS_j 은 j 번째 요소의 길이이다. 식 (24)에 경계조건과 식 (21)을 대입하면 다음 식 (25)와 같이 속도포텐셜 및 그의 1차 도함수에 관한 일

련의 선형방정식을 얻게 된다.

$$\sum_{j=1}^{N_B} A_{ij} \Phi_{kj}^B + \sum_{j=N_B+1}^{N_T} B_{ij} \left(\frac{\partial \Phi_k^B}{\partial n} \right)_j - \sum_{j=1}^{N_B} B_{ij} \left(\frac{\partial \Phi_k^B}{\partial n} \right)_j + \sum_{j=N_B+1}^{N_T} A_{ij} \Phi_{kj}^B \quad (i=1, \dots, N_T; k=1, 2) \quad (25)$$

여기서, N_B 는 Neumann 타입의 경계조건이 부여되는 부체 경계부를 표현하는 요소의 개수이며, 계수 B_{ij} 와 A_{ij} 는 각각 요소 j 에서의 가중함수 G 와 그 도함수의 적분값으로서 식 (26)과 식 (27)과 같이 나타낼 수 있다.

$$B_{ij} = \frac{1}{\pi} \int_{\Delta S_j} G(\mathbf{x}_i; \mathbf{x}'_j) dS \quad (26)$$

$$A_{ij} = -\frac{1}{\pi} \int_{\Delta S_j} \frac{\partial G(\mathbf{x}_i; \mathbf{x}'_j)}{\partial n} dS + \delta_{ij} \quad (27)$$

여기서, δ_{ij} 는 Kronecker delta function으로서 $i=j$ 이면 1의 값을, $i \neq j$ 이면 0의 값을 갖는다. 위의 선형방정식 식 (25)에서 주목할 점은 해석영역을 고정시킴에 따라 좌변의 시스템 매트릭스 행렬은 시간에 따라 변하지 않으며, 우변의 입력벡터만이 경계조건에 따라 매 시간스텝마다 변하게 된다. 따라서 시스템 매트릭스를 구성하는데 따른 시간소요를 줄일 수 있다.

식 (25)의 우변에서 물체표면의 경계값은 매 시간스텝마다 식 (28) 또는 식 (29)와 같은 운동방정식을 4차의 Runge-Kutta 방법으로 풀어 수평, 연직, 횡동요로 인한 각 성분별 운동변위를 얻은 후에 식 (3)에 대입하여 계산하였다.

$$\mathbf{M} \ddot{\xi} + \mathbf{K} \xi = \mathbf{F}^* \quad (28)$$

$$\mathbf{M} \ddot{\xi} + \mathbf{R}(\xi) = \mathbf{F}^* \quad (29)$$

여기서, $\xi(=\xi, \zeta, \alpha)$ 는 부체의 각 방향 운동변위 벡터, \mathbf{M} 은 질량 매트릭스, \mathbf{K} 는 계류강성 매트릭스, $\mathbf{R}(\xi)$ 은 운동변위 ξ, ζ, α 의 함수인 계류장력에 의한 비선형 복원력을 나타내며, \mathbf{F}^* 은 파랑강제력, 파랑감쇠력, 부가질량력, 부체의 부력에 의한 복원력을 모두 포함하는 동유체력 벡터로서 병진운동방향 파력 F_x, F_z 와 회전운동방향 모멘트 M_y 를 나타내고 있다. 식 (28), 식 (29)와 같이 파력은 주파수영역해법과는 달리 관성력과 계류복원력을 제외한 모든 외력을 포함한 상태 그대로 방정식을 풀 수 있다. 일반적으로 선형 파랑에 의한 운동변위는 계류강성 매트릭스에 민감하지 않으므로 초기 정지시의 계류강성 매트릭스를 계산하여 계속 사용해도 무방하다. 그러나, 표류력과 같이 비선형 파랑에 의한 운동변위는 계류강성 매트릭스에 의해 매우 민감하게 반응하므로 운동변위를 결정할 때에는 매 시간 스텝마다 계류장력에 의한 복원력을 변화시켜 주어야 한다. 임의 시점에서 계류장력에 의한 비선형 복원력을 산정하려면 매 시간 스텝마다 운동변위에 따른 계류강성 매트릭스를 새로 구성하는 방법과 매트릭스를 구성하지 않고 케티너리 방정식으로부터 계류라인의 형상과 이에 따른 비선형 계류력을 매 시간 스텝마다 산정하여 직접 이용하는 방법이 있다(전인식, 1993). 본 연구에서는 후자의 방법을 이용하여 비선형 계류의 특성을 반영하였다.

물체표면 및 유동장 임의의 위치에서의 동압력은 선형화된 Bernoulli 방정식으로부터 계산되며, 부체에 작용하는 동유체력은 물체 표면에서의 압력을 적분함으로써 구할 수 있다. 수면고, 운동변위, 속도, 가속도 등의 초기치를 설정하고 시간 증분치 마다 이들 변수를 반복적으로 구하였다. 임의 시점에서의 자유수면 경계값인 자유수면고와 속도포텐셜은 전 시간 스텝에서의 기저 값과 Adams Bashforth의 식 및 Adams Moulton의 식을 이용하여 산정하였다.

5. 수치해석 및 결과분석

5.1 수렴성 테스트

수중에 고정된 직사각형 형상의 부유식 구조물을 대상으로 수치모델의 수렴성과 정확성을 테스트하였다. 파수(k)와 폭(a)의 비가 1.2, 파의 진폭(A)과 구조물 폭의 비가 0.0625, 수심(d)에 대한 흘수(D)의 비가 0.2인 조건에 대해서 절점간격(Δx) 및 시간간격(Δt)을 변화시켜가면서 투과계수(C_T)와 반사계수(C_R)를 산정하여 에너지 관계식($C_T^2 + C_R^2 = 1$)을 만족하는 지를 검토하였다. 그림 3에서 황축은 주기(T)를 시간간격으로 나누어 무차원화하였고, 종축은 투과계수 지승과 반사

계수 지승의 합이며, 실선은 선형과에 대한 결과, 그리고 점선은 2차의 약 비선형과에 대한 결과를 나타내고 있다. 절점간격에 따라 에너지 관계식을 만족하는 시간간격이 존재함을 확인할 수 있고, 절점간격을 작게 할수록 시간간격 역시 충분히 작게 설정해 주어야 수렴성과 정확성이 확보됨을 알 수 있다. 그림 3으로부터 파속과, 절점간격에 대한 시간간격의 비를 곱한 값이 약 $C\Delta t/\Delta x < 1.2$ 일 때 수렴성과 정확성이 확보되는 것으로 분석되었으며, 이는 수치해의 정도를 보장하기 위한 Courant의 안정조건(Courant Stability Condition)인 $C\Delta t/\Delta x < 1$ 에 비해서 다소 완화된 조건을 보이고 있다. 본 연구에서는 위와 같은 조건을 만족하는 범위에서 격자간격과 시간간격을 설정하여 수치모의를 수행하였다.

5.2 수치해의 검증

수치모델을 검증하기 위해서 Koo와 Kim(2004)의 완전비선형모델에 의한 수치해석 결과와 Nojiri와 Murayama(1975)의 실험결과와 비교하였다. 모의 대상인 부유식 구조물은 스프링 타입의 계류계에 의해 구속된 상태이며, 부체의 폭은 0.5 m이고 흘수는 0.25 m이며, 부체의 무게중심은 부체 바닥 면에서 0.135 m 떨어진 곳에 위치하고 있다. 운동변위

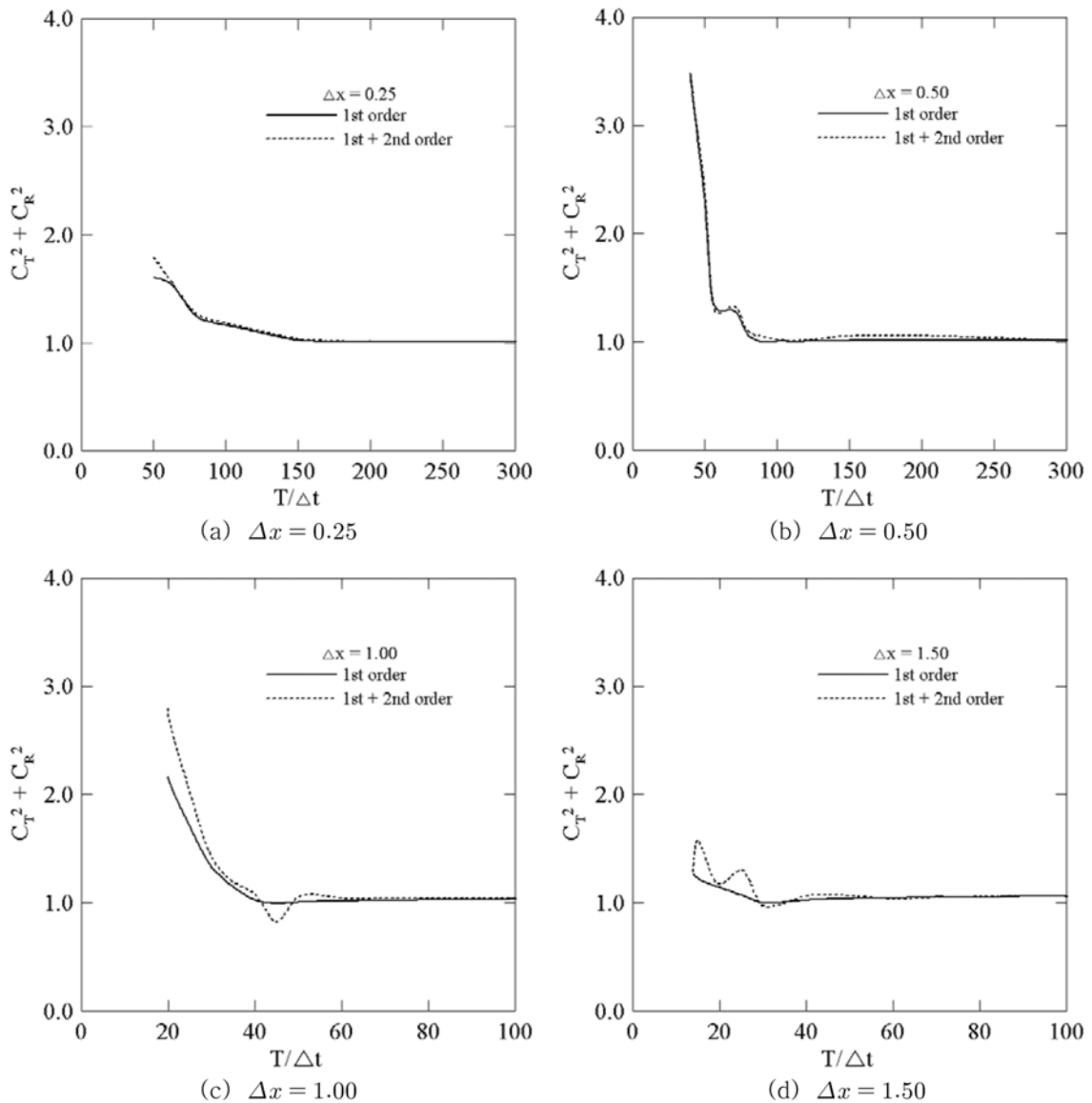


그림 3. 시간 및 공간 이산화 정도에 따른 투과 및 반사파 에너지

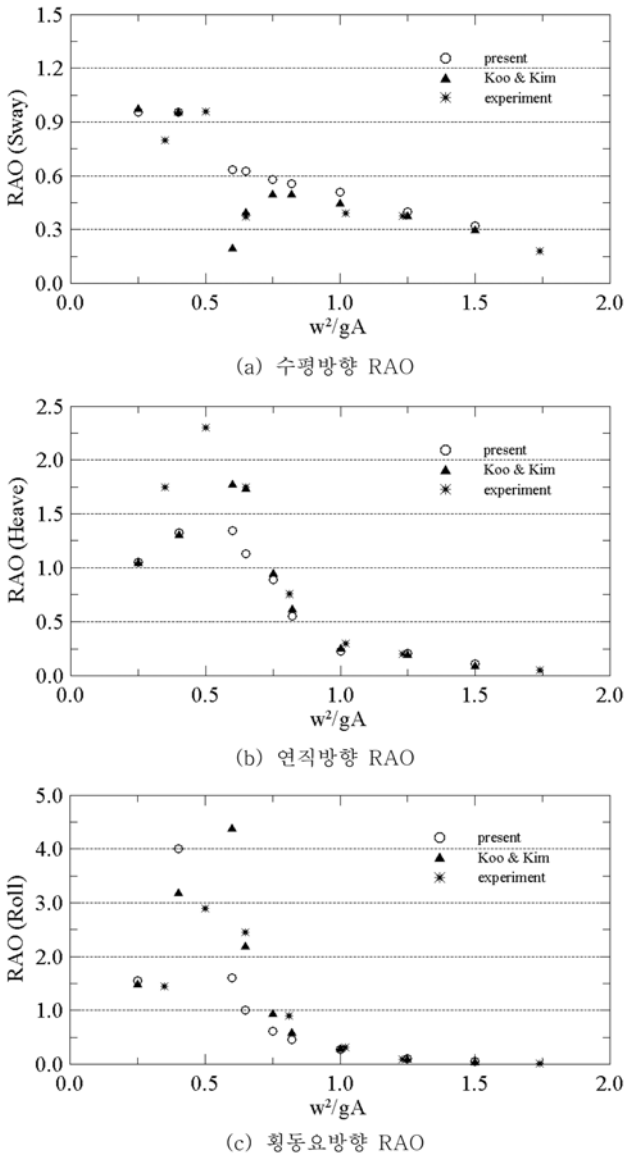


그림 4. 주파수 변화에 따른 각 방향 RAO값의 비교

를 산정하기 위한 조건으로 부체의 질량은 125 kg, 관성모멘트는 4.05 kgm², 스프링상수(K)는 197.58 N/m, 감쇠계수(C)는 198 N/m/s 이다. 입사 파고는 0.07 m이고 수심은 파장과 동일하게 설정하였다. 수치해석을 위한 이산화 과정으로서 절점간격은 0.05 m로 하였으며, 시간간격은 수렴성 테스트에서 얻은 $C\Delta t/\Delta x < 1.2$ 조건을 만족하는 범위 내에서 결정하였다. 그림 4는 본 연구에서 개발한 수치모형을 이용하여 계산한 입사파 진폭에 대한 각 방향 응답진폭인 RAOs (responses of amplitude operators)를 Nojiri와 Murayama (1975)의 실험 및 Koo와 Kim(2004)의 수치해석 결과와 함께 도시한 것이다. 그림에서 보이는 바와 같이 본 연구의 수치해석 결과 값은 공진주기 부근을 제외하고는 기 수행된 실험 및 수치해석 값을 비교적 잘 반영하고 있으며, 주파수가 짧아질수록 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 수치해석 결과와 실험결과 간의 차이는 구조물 주변의 흐름박리에 의한 점성 감쇠현상에 기인한 것으로 판단된다. 공진주기 부근에서 Koo와 Kim(2004)의 완전비선형해석결과와 본 연구에서의 수치해석 결과 간에 차이는 비선형성 반영 정도에 따른 결과로서 공진주기와 같이 부체의 운동변위가 매우 크게 발생하는 주파수대에서 부방파제의 특성을 보다 정도 높게

표 1. 수치모의에 사용된 부방파제 제원

구분	제원	
부체	질량	7.2 × 10 ⁵ kg
	관성모멘트	1.2 × 10 ⁷ kgm ²
	폭	8.0 m
	홀수	3.0 m
	길이	30.0 m
계류라인	수중단위중량	88 kg/m
	길이	81.0 m
	해저면 접촉 길이	58.0 m
	라인의 연직 투영길이	12.0 m
	라인의 수평 투영길이	76.5 m

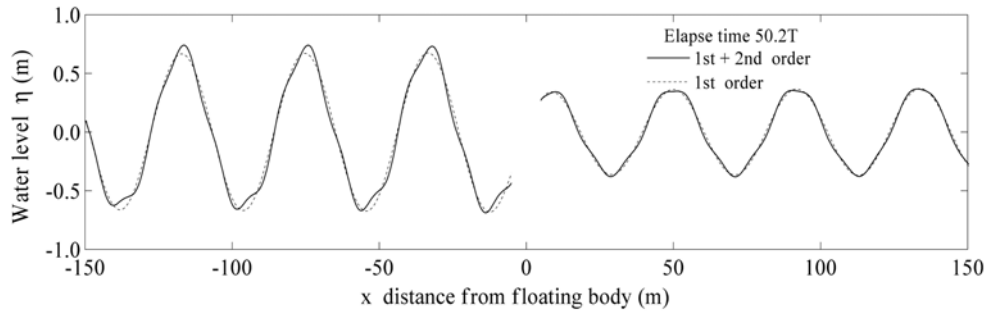
예측하기 위해서는 고차의 비선형 해석이 요구됨을 의미한다. 주파수가 짧아질수록 약비선형 해석결과는 완전비선형 해석결과에 수렴해 감을 볼 수 있다.

5.3 예제 해석

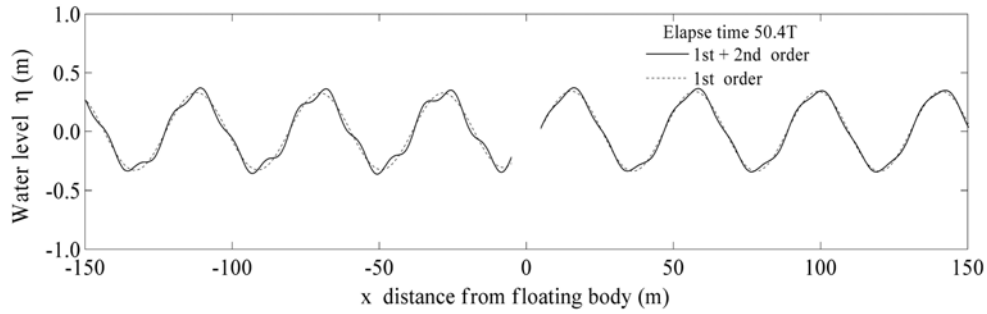
직사각형 형상을 갖는 폰툰형 부방파제를 대상으로 수치 실험을 수행하였으며, 방파제 제원은 표 1과 같다. 단위중량이 88 kg/m이고 길이 81인 6개의 케티너리 계류라인에 의해 부유체의 동요가 구속된다. 그림 5는 파수(k)와 폭(a)의 비가 1.2, 파의 진폭(A)과 방파제 폭의 비가 0.0625, 수심(d)에 대한 홀수(D)의 비가 0.2인 조건에 대해서 임의 시간대에서 방파제 주변의 공간과형분포도를 계산한 결과를 나타낸 것이다. 횡축은 방파제의 중심으로부터 떨어진 거리이고, 종축은 자유수면고이다. 그림에서 파는 우측으로 진행하고 있으며, 실선은 2차항 비선형과까지 고려했을 때의 수면형이고, 사인형태를 나타내는 점선은 선형 파형이다. 가운데 끊긴 부분에 부방파제가 위치하고 있으며, 배후지역에서 파고제어효과를 보이고 있다. 파랑의 비선형성으로 인해 실선과 같이 파형이 사인함수형태에서 벗어난 형태를 보이지만 선형파와 비선형파간의 파고 차이는 크지 않음을 확인할 수 있다. 이는 투과계수, 즉 차단효과를 결정할 때 선형파에 의한 결과만을 사용해도 무리가 없음을 입증하는 것이다.

그림 6-그림 8은 방파제에 작용하는 파력과 모멘트의 시계열을 나타낸 것이다. 그림에서 굵은 실선은 전파력을 나타내며, 가는 실선과 점선은 각각 파력의 1차 및 2차의 성분을 나타내고 있다. 수평 및 연직방향 파력의 2차 성분은 1차 성분에 비해 훨씬 작은 값을 나타내고 있으며, 전파력에 비해 무시할 정도로 2차의 비선형성이 파력에 미치는 영향은 크지 않음을 알 수 있다. 그러나, 수평방향 파력의 2차 성분은 진폭은 크지 않지만 그 평균값은 0 보다 커서 파의 진행방향으로 방파제를 미는 표류력이 작용함을 알 수 있다. 또한, 전모멘트는 그림 8에서 보이는 바와 같이 모멘트의 2차 성분으로 인해 진폭이 크게 증가하였으며, 이는 횡동요량과 계류력의 증가를 야기하게 된다.

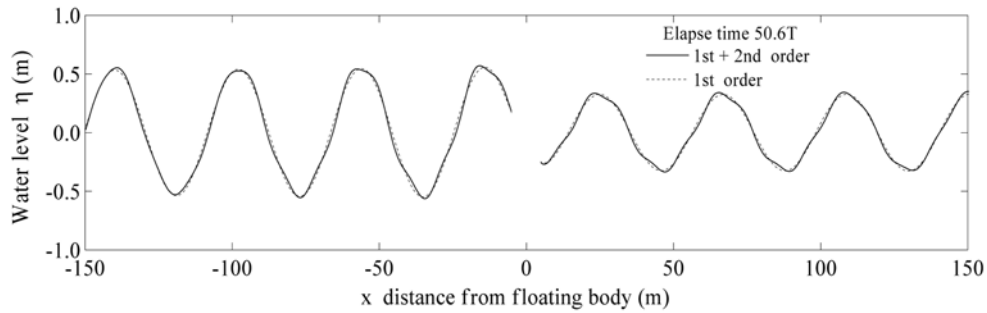
그림 9-그림 11은 수평 및 연직방향 운동, 그리고 횡동요의 시계열을 나타낸 것이다. 그림 9와 그림 11과 같이 2차의 약 비선형 파랑에 대한 부방파제의 수평운동 및 횡동요



(a)



(b)



(c)

그림 5. 임의 시간대에서의 방파제 주변의 공간파형 분포도 ($ka=1.2$, $a/A=0.0625$, $D/d=0.2$)

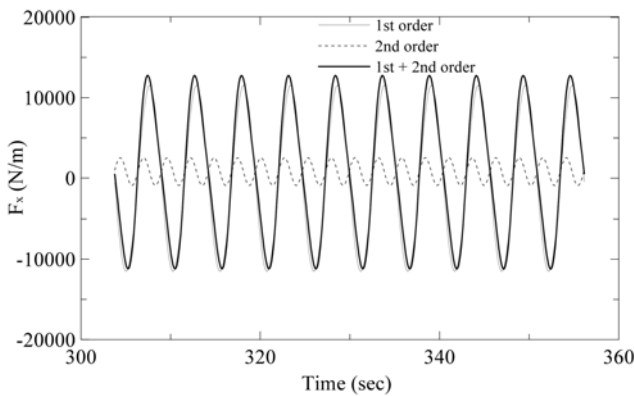


그림 6. 부방파제에 작용하는 수평방향 파력의 시계열

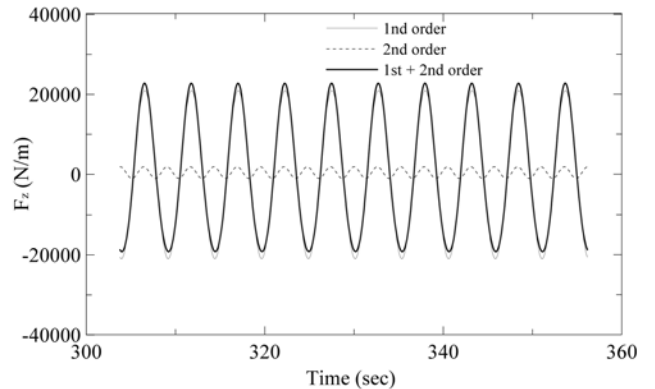


그림 7. 부방파제에 작용하는 연직방향 파력의 시계열

의 시계열은 1차의 선형파랑에 대한 것과 상이함을 확인할 수 있다. 특히 수평운동의 2차 성분의 진폭은 작지만, 파의 진행방향으로 작용하는 표류력으로 인해 평균위치가 약 0.55m 만큼 이동한 것을 볼 수 있다. 수평운동과 연동되는 횡동요의 시계열은 2차 성분파로 인해 음의 값을 나타내고 있는데 이는 횡동요가 비대칭적으로 거동함을 의미한다.

입사파의 파형경사가 증가함에 따라 파형이 정현함수형태를 벗어나게 되고 파랑은 비선형성이 증가하게 되는데 이러

한 파형경사가 부방파제 주변의 수면고에 미치는 영향을 분석하였다. 그림 12와 그림 13은 파장 L 에 대한 파고 H 의 비인 파형경사에 따른 수면고($\eta_1 + \eta_2$)의 시계열을 나타낸 것이다. 그림 12와 같이 해안 쪽에서는 파형경사가 클수록 파봉과 파곡에서 많은 변화가 있고, 평균수면이 점차 내려가는 set down 현상이 나타남을 알 수 있다. 해양 쪽보다 평균수면이 낮아 해양에서 해안 방향으로 미치는 힘인 표류력이 생기는 현상을 확인할 수 있다. 그림 13에서

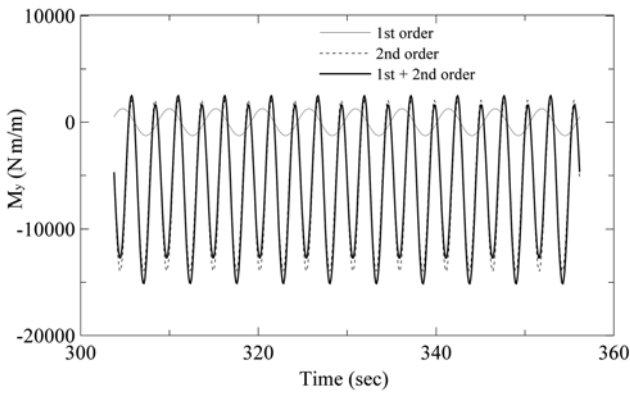


그림 8. 부방파제에 작용하는 모멘트의 시계열

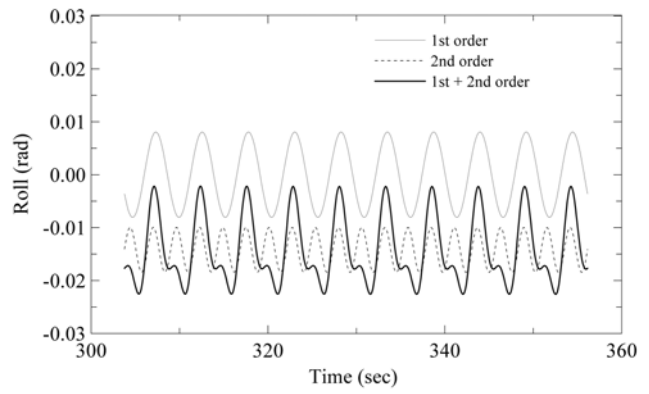


그림 11. 부방파제의 횡동요의 시계열

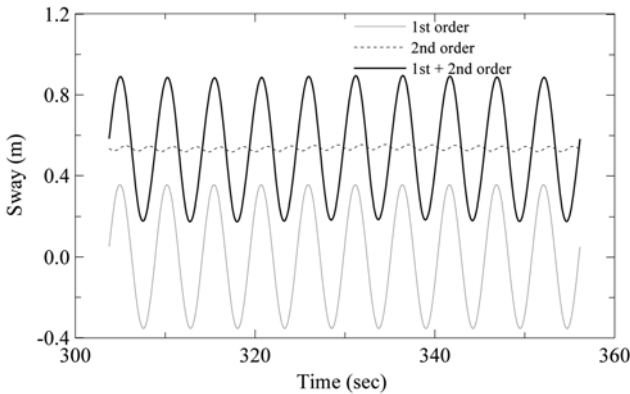


그림 9. 부방파제의 수평운동의 시계열

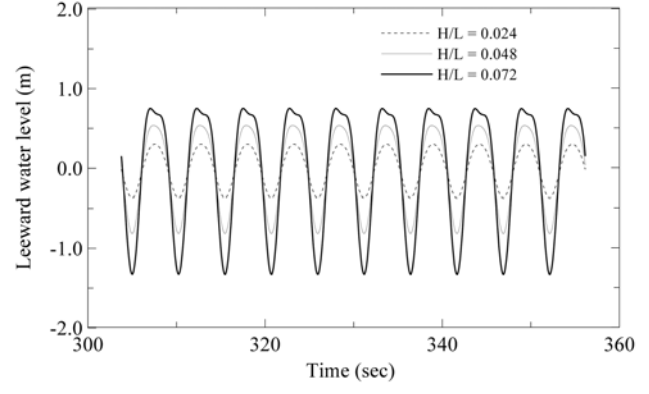


그림 12. 파형경사에 따른 해안쪽 수면고의 시계열

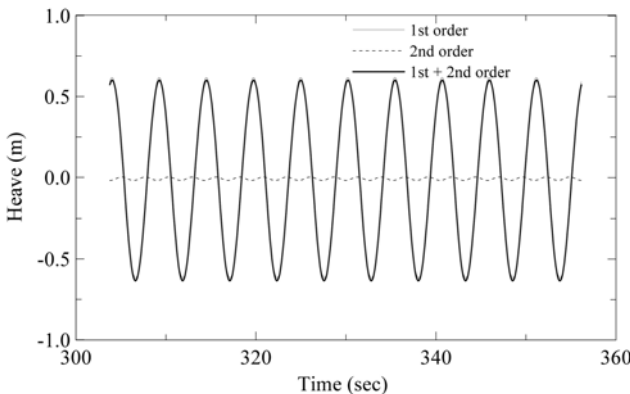


그림 10. 부방파제의 연직운동의 시계열

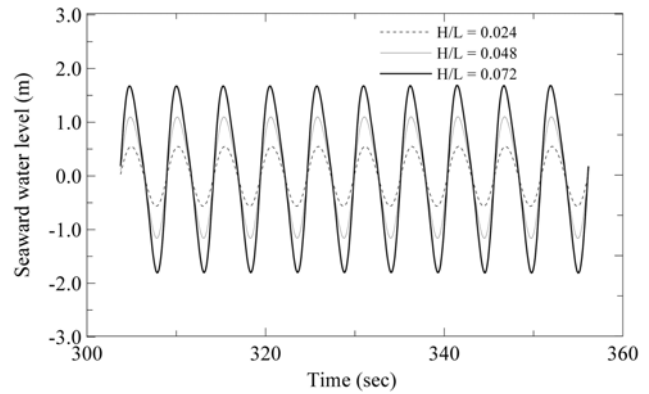
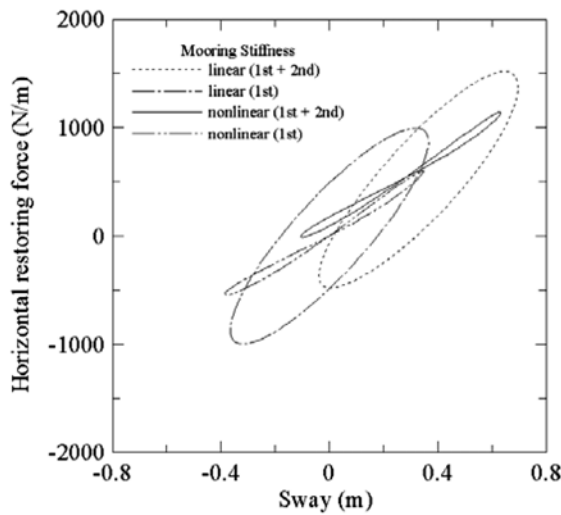


그림 13. 파형경사에 따른 해양쪽 수면고의 시계열

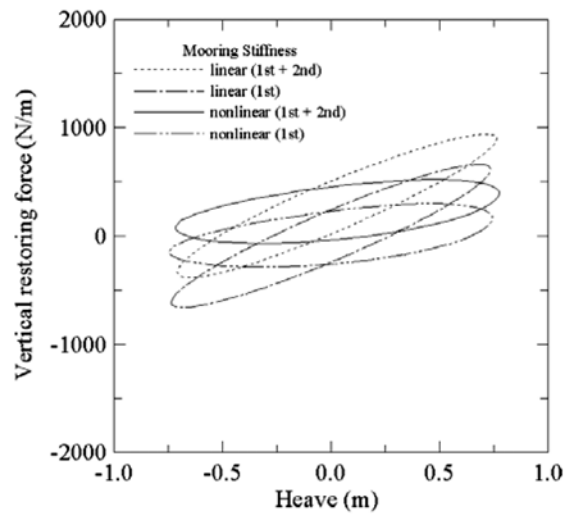
보이는 바와 같이 해양쪽 수면고는 거의 정현함수형태를 유지하고 있다.

그림 14는 기 조건에 대하여 임의 한 주기 동안에 좌우 및 상하운동 변위를 x 축으로, 계류라인에 의한 선형 및 비선형 복원력을 z 축으로 하여 2차원 평면상에 도시한 것이다. 그림에서 실선과 점선은 각각 약 비선형파에 대한 계류라인에 의한 선형 복원력과 비선형 복원력을 나타낸 것이며, 일 점쇄선과 이점쇄선은 각각 선형파에 대한 계류라인의 선형 복원력(Lee와 Cho, 2003), 비선형 복원력을 나타낸 것이다. 선형파 및 약 비선형파 모두에 대하여 계류라인의 복원력을 선형화한 경우와 비선형성을 반영한 경우 간에 부체의 동적 응답거동에 따른 복원력에 큰 차이가 있음을 볼 수 있다. 특히 선형 복원력은 완전한 타원 형태를 취하는데 반하여 비선형 복원력은 계류라인의 비선형성으로 인하여 타원 형태에서 벗어난 양상을 보이고 있다. 관성력, 부가질량력, 감

쇠력, 정수압 복원력 등 다른 성분의 힘들에 비해 계류장력에 의한 복원력이 상대적으로 작아 운동변위의 진폭에는 계류라인의 비선형성에 따른 큰 영향을 나타내고 있지 않으나, 계류라인에 의한 복원력, 즉 계류장력의 진폭은 계류라인의 비선형 고려 여부에 따라 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 또한 약 비선형파에 의한 영향으로 계류라인의 선형 및 비선형 복원력, 즉 계류장력의 최대치가 약 50% 이상 증가한 것을 확인할 수 있다. 따라서 파랑 및 계류라인의 비선형성을 고려해서 계류시스템의 안전성을 평가해야 한다. 그림 15는 계류라인의 단위중량을 196 kg/m로 하여 그림 14의 경우보다 2 배만큼 증가시켰을 때의 결과이다. 앞선 경우와 마찬가지로 계류라인의 비선형성의 영향이 나타나고 있으나, 계류라인의 강한 강성으로 인해 선형파 및 약 비선형파에 따른 동적응답 및 계류복원력의 특성이 비교적 유사한 것을 알 수 있다.

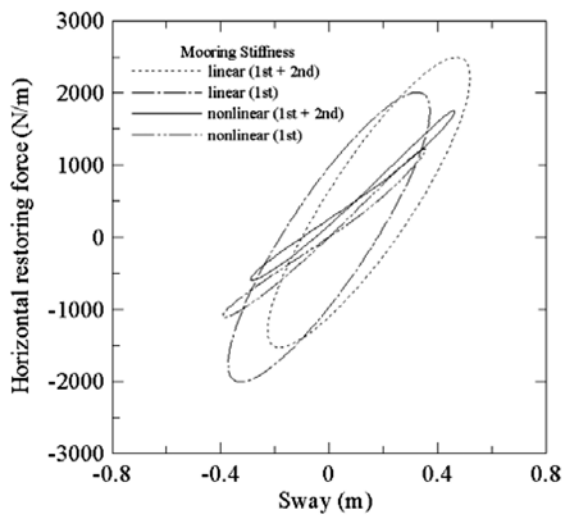


(a) 수평방향 변위와 계류복원력

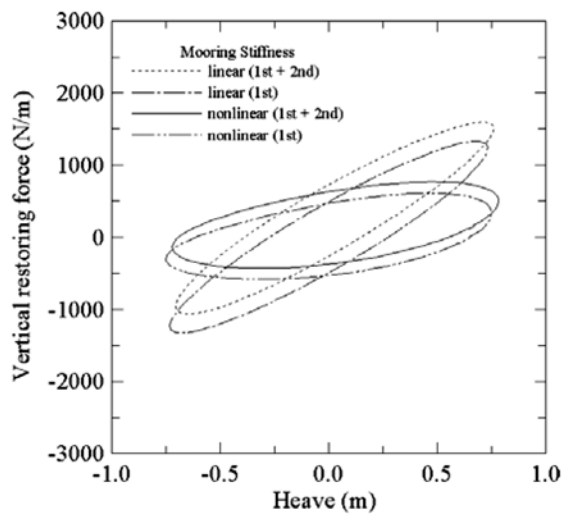


(b) 연직방향 변위와 계류복원력

그림 14. 운동변위에 따른 계류라인의 복원력 (계류라인의 단위중량: 98 kg/m)



(a) 수평방향 변위와 계류복원력



(b) 연직방향 변위와 계류복원력

그림 15. 운동변위에 따른 계류라인의 복원력 (계류라인의 단위중량: 196 kg/m)

5.4 부방파제의 파랑제어효율 평가

부방파제의 파랑제어효율을 결정하는데 지배적인 인자인 파수(k), 흘수(D), 폭(a)의 변화 등 다양한 설계조건에 따른 부방파제 배후지역에서의 투과계수를 산정하여 파랑제어효율을 평가하였다. 그림 16(a)는 규칙파에 대한 부방파제의 회절문제에 대한 결과로서 방파제가 수중에 고정되어 있다고 간주한 경우, 파수, 폭, 흘수 등의 변화에 따른 투과계수를 나타낸 것이다. 굵은 실선은 일반적으로 부방파제에서 허용하고 있는 50%의 투과율일 때를 나타낸 것이다. 파수가 클수록, 또는 방파제 폭이 넓을수록, 흘수가 클수록 투과계수가 작아 파랑제어효율이 좋으며, 장주기파에 대해서는 효율이 낮음을 볼 수 있다. 또한 선형과 비선형 파랑에 대한 투과계수 값에 차이가 크지 않음을 확인할 수 있다. 그림 16(b)는 앞선 경우와 동일한 조건에 방파제의 운동을 고려한 경우의 결과이다. 장주기대를 제외하고는 그림 16(a)와 전혀 다른 양상을 나타내고 있다. 가운데에 굵은 실선으로 둘러싸인 부분이 파랑제어효율이 우수한 설계조건으로서 상대흘수비(D/d)는 0.25 보다 작고, 무차원파수(ka)는 1.2 보다 큰 범위에서 파랑제어효율이 우수할 것으로 판단된다. 단주기파

일수록 폭이 넓을수록 파랑차단기능은 비교적 우수하지만, 흘수가 클수록, 즉 깊이 잠겨 있는 경우가 더 투과율이 커서 효율이 좋지 않는 경우가 발생하였다. 이는 동요에 의한 방사와 성분파 회절파 간에 위상차가 매우 작기 때문인 데서 기인한 것이다. 따라서 흘수 설계 때 이러한 결과에 유의하여 적절한 구조적인 제원을 결정하여야 한다. 회절문제와 마찬가지로 회절-방사문제에서도 선형파와 비선형파간 투과계수 값에는 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

그림 17(a)는 수평방향 최대동요량을 파의 진폭으로 나누어 무차원화하여 나타낸 것이다. 파랑의 약 비선형성을 고려하였을 경우의 수평방향 최대동요량은 선형파만 고려하였을 경우에 비해 수배이상 크고, 최대치 발생위치가 보다 단주기 영역으로 이동한 것을 알 수 있다. 이처럼 선형 및 비선형 해석 간에 수평방향 동요량 차이가 매우 큰데, 이는 입사파 진폭의 제곱에 비례하는 힘으로서 파의 진행방향으로 미는 표류력 성분이 큰 데서 기인한 것이다. 이러한 수평방향 대변위로 인해 계류계에 극심한 인장력 증가를 유발할 수 있다. 반면에 그림 17(b)와 같이 연직방향 최대동요량은 연직방향 표류력이 매우 작아 선형 및 비선형 해석 결과값 간에

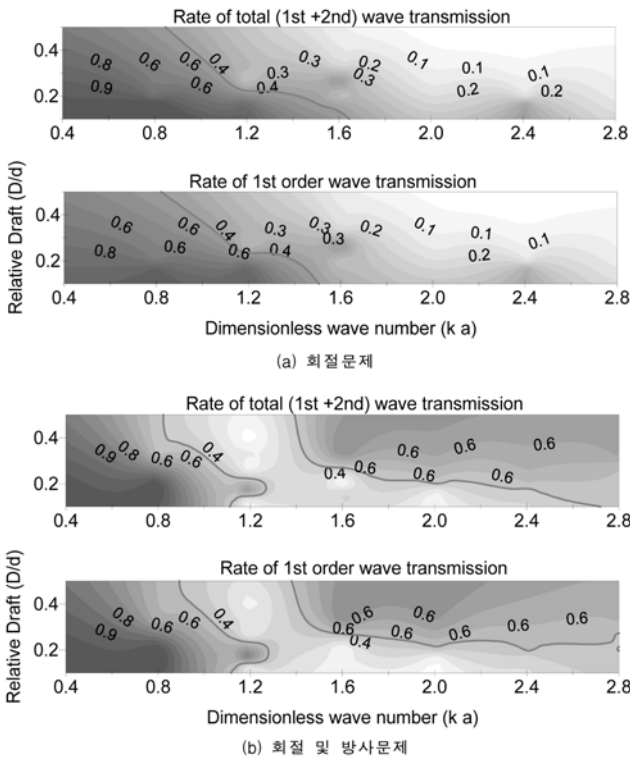


그림 16. 선형 및 2차 비선형 파랑에 대한 부방파제의 투과계수

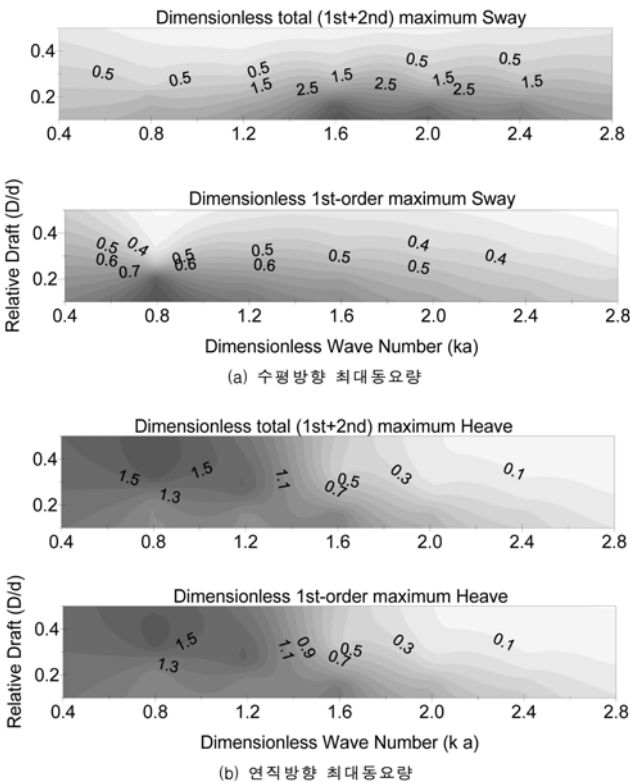


그림 17. 선형 및 2차 비선형 파랑에 대한 부방파제의 무차원화된 최대동요량

차이가 미미한 것을 확인할 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 약 비선형 파동장에 놓인 부방파제에 작용하는 파력 및 그에 따른 운동변위, 파고변화 등을 예측하기 위하여 테일러급수, 섭동법과 경계요소 수치기법에 기초한 2

차의 시간영역 해석모델(second-order time domain model)을 확립하였다. 수치모델을 이용하여 방파제 폭이나 흘수, 입사파의 주파수 등 설계인자 변화에 따른 수치모의를 수행한 결과, 상대흘수비(D/d)가 0.25 보다 작고, 무차원파수(ka)가 1.2 보다 큰 범위에서 파랑제어효율이 우수한 것으로 분석되었다. 또한, 파랑의 비선형성에 의한 영향으로 부방파제의 응답거동특성에 비선형성이 강하게 나타남을 확인할 수 있었으며, 특히 파랑과 구조물간의 비선형성과 계류시스템의 약한 복원력으로 인하여 대변위 표류운동특성을 보여 계류라인의 안정성에 영향을 미칠 수 있는 것으로 분석되었다. 그러나, 파랑의 2차항 성분이 투과율에 미치는 영향은 매우 작아 선형해석 결과만으로도 방파제의 파랑제어효율을 평가할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서 확립한 수치모델은 방파성능의 극대화, 계류계의 안전성 평가 등 부방파제의 기본설계에 효율적으로 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- 김도삼, 이광호, 최낙훈, 윤희면 (2004) 선형식 부방파제의 파랑 제어에 관한 연구, **한국해양공학학회지**, 한국해양·해양공학회, 제16권 제1호, pp. 1-9.
- 김도삼, 기성태, 허동수, 박경수, 이상기 (2005a) 복합관형 부소파제에 의한 파랑제어기능과 동적거동에 관한 연구, **대한토목학회 정기학술대회**, pp. 796-799.
- 김도삼, 박경수, 김창훈, 오윤석 (2005b) 연직관각형 부소파제에 의한 파랑제어기능과 동적거동에 관한 연구, **대한토목학회 정기학술대회**, pp. 1967-1970.
- 양우석, 조원철, 박우선 (2001) 부유식 방파제의 파랑 차단 성능 제어, **한국해양공학학회지**, 한국해양·해양공학회, 제13권 제3호, pp. 230-236.
- 전인식 (1993) 케티너리 계류 부유식 방파제 거동의 시간영역 해석, **한국해양공학학회지**, 한국해양·해양공학회, 제5권 제3호, pp. 182-190.
- 정신태, 박우선, 이호찬 (2002) 다열 부유식 방파제의 유한요소 해석, **한국해양공학학회지**, 한국해양·해양공학회, 제14권 제4호, pp. 257-264.
- Adee, B.H. and Martin, W. (1974) Analysis of floating breakwater performance, *Proceedings of the Floating Breakwater Conference*, University of Rhode Island. RI. pp. 21-40.
- Buchmann, B., Skoourup, J., and Cheung, K.F. (1998) Run-up on a structure due to second-order waves and a current in a numerical wave tank, *Applied Ocean Research*, Vol. 20, pp. 297-308.
- Cointe, R., Geyer, P., King, B., Molin, B., and Tramon, M. (1990) Nonlinear and linear motions of a rectangular barge in a perfect fluid, *Proc. 18th Symp. On Naval Hydrodynamics*, pp. 85-99.
- Contento, G. (1996) Nonlinear phenomena in the motions of unrestrained bodies in a numerical wave tank, *Proc. 6th Int. Off-shore and Polar Eng. Conf., ISOPE, Los Angeles, CA*, Vol. 3, pp.18-22.
- Grue, J. and Palm, E. (1993) The mean drift force and yaw moment on marine structures in waves and current, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 250, pp. 121-142.
- Isaacson, M. and Cheung, K.F. (1991) Second-order wave diffraction around two-dimensional bodies by time-domain method, *Applied Ocean Research*, Vol. 13, No. 4, pp. 175-186.
- Isaacson, M. and Ng, J.Y.T. (1993) Time-domain second-order wave radiation in two dimensions, *Journal of Ship Research*, Vol. 37, No. 1, pp. 25-33.
- Jeongwoo Lee, Woncheol Cho (2003) Hydrodynamic analysis of wave interactions with a moored floating breakwater using the element free Galerkin Method, *Canadian Journal of Civil*

- Engineering*, Vol. 30, No. 4, pp. 720-733.
- Kim, M.H. and Yue, D.K.P. (1990) The complete second-order diffraction solution for an axisymmetric body. Part 2. Bichromatic incident waves and body motions, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 211, pp. 557-593.
- Kim, M.H. and Yue, D.K.P. (1991) Sum-and difference frequency wave loads on a body in unidirectional Gaussian seas, *Journal of Ship Research*, Vol. 35, No. 2, pp. 127-140.
- Koo, W.C. and Kim, M.H. (2004) Freely nonlinear wave-body simulation by a 2D fully nonlinear numerical wave tank, *Ocean Engineering*, Vol. 31, pp. 2011-2046.
- Leonard, J.W., Huang, M.-C. and Hudspeth, R.T. (1983) Hydrodynamic interference between floating cylinders in oblique seas, *Applied Ocean Research*, Vol. 5, No. 3, pp. 158-166.
- Liu, Y., Yue, D.K.P., Kim, M.H. (1993) First- and second-order responses of a floating toroidal structure in long-crested irregular seas, *Applied Ocean Research*, Vol. 15, No 3, pp. 155-167.
- Malenica, S. and Molin, B. (1995) Third-harmonic wave diffraction by a vertical cylinder, *Journal of Fluid Mechanics*, 302, pp. 203-229.
- Ng, J.Y.T and Isaacson, M. (1992) Second-order wave interaction with two-dimensional floating bodies by a time-domain method, *Applied Ocean Research*, Vol. 15, pp. 95-105.
- Pierson, W.J. (1993) Oscillatory third-order perturbation solutions for sums of interacting long-crested Stokes waves on deep water, *Journal of ship research*, Vol. 37, No. 4, pp. 354-.
- Sannasiraj, S.A., Sundar, V., and Sundaravadivelu, R. (1998) Mooring forces and motion responses of pontoon-type floating breakwaters, *Ocean Engineering*, Vol. 25, No. 1, pp. 27-48.
- Sclavounos, P.D. and Kim, Y.W. (1995) Third order diffraction of surface waves by a time-domain ranking panel method, *Proceedings of the 10th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies*, Oxford. UK.
- Zhao, R. and Faltinsen, O.M. (1989) Interaction between current waves and marine structures, *Proceedings of the 5th International Conference on Num. Hydrodynamics*, Hiroshima, Japan, National Academy Press, Washington.

(접수일: 2005.12.19/심사일: 2006.2.3/심사완료일: 2006.8.21)