

에너지 소산 모델을 이용한 잠수된 가동식 방파제의 유체동역학적 성능 수치해석

김도현¹·구원철^{2,†}
STX조선해양 기술연구소¹
울산대학교 조선해양공학부²

Numerical Analysis of Hydrodynamic Performance of a Movable Submerged Breakwater Using Energy Dissipation Model

Do-Hyun Kim¹·Weon-Cheol Koo^{2,†}
STX Offshore & Shipbuilding Ltd, Research Institute of Technology¹
School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan, Korea²

Abstract

Hydrodynamic performance of a movable submerged breakwater was analyzed using energy dissipation model. Based on two-dimensional boundary element method the equation of motion including a viscous dissipation term proportional to velocity squared was solved by Newton-Raphson method. Energy dissipation coefficients as well as reflection and transmission coefficients of a submerged flat plate were calculated with various plate lengths and thickness. Both real and imaginary components of body displacement and forces were used to solve the motion of breakwater accurately. The effect of the magnitude of dissipation coefficient on the body displacement was evaluated. The results from the potential theory with no dissipation term were found to be an overestimate in resonance frequency.

Keywords : Submerged breakwater(잠수 방파제), Transmission coefficient(투과계수), Newton-Raphson method(뉴턴-랩슨법), Wave force(파력), Motion response(운동응답), Boundary element method(경계 요소법), Dissipation model(소산모델)

1. 서론

해양 파로부터 연안 및 항구를 보호하기 위해 다양한 방파제가 개발되었다. 그러나, 고정식 방파제의 경우 유동의 흐름을 강제적으로 차단함으로써 파의 유입을 제한하는 방식이기 때문에 해안 생태계를 변화시키고 여러 환경적 기술적 문제를 야기시켜 왔다. 이에 대한 대비책으로 최근 들어 환경 친화적인 방파제들이 제안되고 있는데, 그 중에는 잠수된 부유식 방파제가 있다. 이는 해저의 유동을 방해하지 않은 부유식 구조물의 장점을 살리면서, 또한 해수면 위로 노출되어 해안 경관을 해치고 선박의 항해를 방해하는 수면 돌출형 방파제의 단점을 개선한 신개념의 방파제이다.

이 같은 신개념 잠수식 방파제의 실질적인 설계 및 활용을 위해서는 잠수체의 유체동역학적 특성에 대한 보다 현실적인 고찰이 필요하다. 구조물의 파랑 응답을 계산하기 위해 흔히 사용되는 포텐셜 유동에 기반한 수치 해석 방법들은 비점성 및 비회전성의 유체를 가정함으로써 유체 점성과 회전성에 기인한 파랑에너지의 감쇠 영향을 고려할 수 없는 한계를 가지고 있다. 따라서 포텐셜 유동 기반의 수치 해석 방법은 점성의 영향이 큰 특정 주파수지역에서 구조물의 운동 응답, 파랑 전달 및 반사에 부정확한 결과를

산출할 수 있다. 본 연구에서는 잠수된 부유체의 운동으로 인한 점성 에너지 소산을 고려하여 보다 현실적인 잠수체 운동과 자유수면문제를 해결 할 수 있는 수치적 기법 개발에 대한 연구를 수행하였다.

잠수된 평판형 구조물에 대한 연구는 1970년대부터 여러 연구자들에 의해 진행되어 왔다 (Siew & Hurrely, 1977; Patarapanich, 1984; Nallayarasu, et al., 1992). 고유함수 전개법을 사용하여 잠수된 평판 구조물의 유체동역학적 계수를 추정한 Mullarkey, et al. (1992)의 연구는 Cheng, et al. (1996)에 의한 평판의 길이, 두께 및 설치수심 등 매개변수 계산을 통한 파력 변화 연구 등으로 확장되었다.

국내에서 진행된 경계요소법을 활용한 파랑 연구 중 Sung, et al. (1997)은 비선형 자유표면파에 대한 수치해석을 수행하였고, Hong and Hong (2008)은 전진 속도상에서 자유표면 Green함수와 고차항 경계 요소법을 활용해 선체의 방사포텐셜을 계산하였다. 2000년대 이후, 잠수된 구조물과 파랑간 상호작용에 대한 연구적 관심이 고조되었다. 포텐셜 유동을 가정하여 특이점 분포법 (Lee & Choi, 2001)을 활용해 3차원 가동식 잠수 평판의 파랑문제에 대해 고찰하였고, Lew and Kim (2002)은 B-spline 기반의

고차 경계 요소법을 사용하여 2차원 자유수면 하 물체주위의 유동을 해석하였고, Kim, et al. (2003)은 3차원 잠수체 주위 자유표면 유동을 수치적으로 고찰하였다. Lee and Lim (2004)는 자유표면 아래에 타원형 실린더에 대한 비선형 운동에 관하여 고찰하였다. 최근에 Koo and Kim (2011)은 경계 요소법을 활용하여 2차원 수치파동수조 기법을 이용하여 잠수된 기동식 방파제의 파랑 중 운동 성능 및 각 조건에 따른 반사 및 투과 계수를 계산하였다.

잠수된 평판 구조물의 파랑 운동 응답 문제에서 유체 점성에 의한 에너지 소산 모델(dissipation model)의 적용은 Williams and McDougal (1996)에 의해 처음 제안 되었다. 이는 주파수 영역에서 포텐셜 유동과 선형파 이론을 적용한 고유함수 전개법을 사용하여 파력과 유체동역학적 계수를 계산하였고, 구조물의 운동방정식에 점성 감쇠항을 추가하여 구조물 운동시 점성에 의한 에너지 소산을 고려하였다.

본 연구에서는 주파수 영역에서 랭킨 소오스(Rankine Source)를 사용한 2차원 경계요소법을 활용하여, 해석유체를 비점성, 비압축성, 비회전성의 포텐셜 유동으로 가정하고 선형파 이론을 적용하여 산란문제(diffraction problem)를 통해 파의 외력을 계산하고, 방사문제(radiation problem)을 통해 유체 동역학적 계수인 부가질량 및 감쇠계수를 계산하였는데, 이 같은 수치 해석 방법은 Mei et al. (2005)에서 제시하는 것과 같은 파랑-물체간 상호작용에 관한 전통적인 이론을 근간으로 하고 있다. 잠수된 평판형 구조물은 탄성지지 장치를 가진 부유체로 가정하였으며, Williams and McDougal (1996)이 제안한 에너지 소산항이 포함된 운동방정식을 2차원 주파수 영역의 경계요소법을 통해 운동변위를 계산하고 잠수체의 운동과 연계된 파랑의 반사 및 투과 문제를 적용하여 자유수면 변화를 계산하였다. 이는 비선형 연립 운동방정식의 반복법을 통한 주파수 영역에서 잠수체의 운동변위를 계산할 수 있을 뿐만 아니라, 물체의 속도의 제곱에 비례하는 에너지 소산항이 운동변위와 자유수면에 어떤 영향을 주는지 분석하였다. 본 연구에 활용된 수치파동수조 기법은 해저면의 임의 변화 및 물체의 형상 변화를 쉽게 계산에 반영할 수 있다는 장점을 가지고 있으며, 본 연구에서 개발한 운동 방정식 해법은 포텐셜 유동 해석에서 고려할 수 없는 유체 점성에 의한 파랑 에너지의 소산을 포함할 수 있다는 확장성을 가지고 있다.

2. 수학적 정식화

잠수된 평판형 부유체의 수치적 해석을 위해 Fig. 1에 전체적인 계산영역을 표시하였다. 평판 부유체의 반폭은 a , 수심은 d , 잠수된 수심은 h , 구조물 두께는 b 로 정하였다. 2차원 직교 좌표계 (x, z) 를 사용하여 x 축 원점은 구조물의 중심이며 x 축은 오른쪽이 양의 방향이며, z 축 원점은 평균 수면이며 수직 상방향이 양의 방향이다. 입사파는 선형파이며 파고는 H , 진폭은 $A(=H/2)$, 파장은 L , 파주기 P , 파 주파수는 $\omega(=2\pi/P)$ 로 정하였다. 회전운동에 관여하는 복원 모멘트를 계산하기 위해 잠수체의 무게중심 (x_0, z_0) 은 기하학적 중심으로 가정하였으며, 양 끝단에는 스프링 상

수 K 의 수직방향 탄성계류장치가 있다. 잠수체의 비중은 유체와 동일하며, 질량은 M , 무게중심에 대한 질량관성모멘트는 I 이다. 유체는 비점성, 비압축성 및 비회전성의 포텐셜 유동으로 가정하였고, 속도 포텐셜을 도입하여 $\Phi(x, z; t) = \text{Re}[\phi(x, z)e^{-i\omega t}]$ 로 나타내었다.

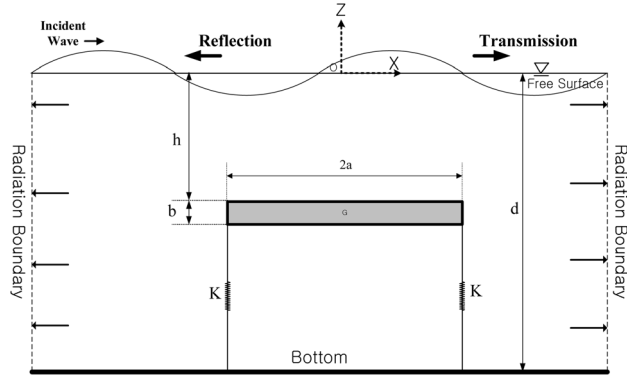


Fig. 1 Overview of computational domain

유체 전 영역을 만족하는 지배방정식은 속도 포텐셜과 연속방정식(continuity equation)을 이용하여 라플라스 방정식으로 표현할 수 있으며(식(1)), 그린함수(Green function)를 이용하여, 지배방정식을 계산 영역의 각 경계 조건을 이용하여 풀 수 있는 경계적분 방정식으로 변환할 수 있다(식(2)).

$$\nabla^2 \phi = 0 \tag{1}$$

$$\alpha \phi(x_i, z_i) = \iint \left(G_{ij} \frac{\partial \phi(x_j, z_j)}{\partial n} - \phi(x_j, z_j) \frac{\partial G_{ij}}{\partial n} \right) ds \tag{2}$$

2차원 그린함수는 $G_{ij}(x_i, z_i, x_j, z_j) = -(1/2\pi) \ln R$ 이며, S 는 잠수체의 표면을 나타내며, α 는 입체각(solid angle)이고, R 은 각 경계면에 위치한 소스점 (x_j, z_j) 과 필드점 (x_i, z_i) 사이의 거리를 나타낸다. n 은 법선 벡터를 나타내며, 유체 경계면 바깥쪽을 의미한다. 자유표면 경계조건은 동역학적 경계조건과 운동학적 경계조건이 결합된 식(3)을 사용하였으며, 해저면은 식(4)의 비투과성 경계조건을 적용하였다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g} \phi = 0 \text{ on } z = 0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \text{ on } z = -d \tag{4}$$

입사파 속도포텐셜 ϕ_I 는 식(5)과 같이 선형 입사파를 가정하였다.

$$\phi_I = -i \frac{gH}{2\omega} \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kd} e^{ikx} \tag{5}$$

여기서 k (wave number)는 분산관계식을 통해 구할 수 있다. 계산영역의 방사조건은 양 끝 수직 경계면이 잠수체로부터 충분히 멀리 있다고 가정하여 다음과 같이 적용 하였다. 본 연구에서는 방사조건을 만족을 위해 수렴성 테스트를 통해 각 방향 자유 수면의 길이를 잠수체 폭의 3배와 수심의 합으로 하여 계산을 수행하였다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \frac{\partial \phi}{\partial x} n_x = ik\phi \quad (6)$$

잠수체의 경계조건은 방사문제와 산란문제에서 각각 식(7)와 식(8)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \phi_R}{\partial n} = \vec{V} \cdot \vec{n} \text{ on } S \quad (7)$$

$$\frac{\partial \phi_D}{\partial n} = -\frac{\partial \phi_I}{\partial n} \text{ on } S \quad (8)$$

여기서 \vec{V} 는 속도벡터, \vec{n} 은 단위 법선벡터이다. 또한 ϕ_R 은 잠수체의 방사 속도포텐셜을, ϕ_D 는 산란 속도포텐셜을 나타낸다.

산란문제를 통한 잠수체의 파랑하중 식은 다음과 같다.

$$F_x = i\rho\omega \int_S \phi_I \cdot n_x ds \quad (9)$$

$$F_z = i\rho\omega \int_S \phi_T \cdot n_z ds \quad (10)$$

$$F_R = i\rho\omega \int_S \phi_T [(z - z_0)n_x - (x - x_0)n_z] ds \quad (11)$$

여기서, $\phi_T = \phi_I + \phi_D$ 이며 F_x 과 F_z 는 수평 및 수직방향의 힘을 나타내며, F_R 은 잠수체 무게중심(x_0, z_0)을 기준으로 하는 복원모멘트이다. n_x 는 수평방향, n_z 는 수직방향 단위벡터이다.

잠수체의 영향에 의한 자유표면 변위(wave elevation)는 계산위치에 따라 잠수체 전면의 η_R 과 후면의 변위 η_T 로 나눌 수 있다.

$$\eta_R = \frac{i\omega}{g} \left[\phi_D + \sum_{i=1,3,5} V_i \phi_i \right]$$

$$\eta_T = \frac{i\omega}{g} \left[\phi_I + \phi_D + \sum_{i=1,3,5} V_i \phi_i \right] \quad (12)$$

η_R 은 잠수체에 의한 산란파와 잠수체 운동에 의한 방사파의

합이며, η_T 는 입사파와 잠수체에 의한 산란파 및 방사파의 합으로 표현된다.

V_1, V_3 은 각각 구조물의 수평 및 수직운동 속도, V_5 는 회전 운동 속도를 나타낸다. 반사계수와 투과계수 및 소산계수(dissipation coefficient, D)는 파랑의 반사와 투과 및 에너지의 소산을 나타내며 η_R 를 통해 반사계수를, η_T 를 통해 투과계수를 결정할 수 있다. 계산 영역내의 에너지 보존 법칙에 의해 각 계수들의 제곱의 합이 1이 되는 관계에 의해 에너지 소산계수를 계산할 수 있다.

$$R = \frac{|\eta_R|}{A}, T = \frac{|\eta_T|}{A} \quad (13)$$

$$T^2 + R^2 + D^2 = 1 \quad (14)$$

유체동역학적 계수는 방사문제를 통해 다음과 같이 계산된다.

$$A_{ij} = \text{Re} \left[\rho \int_S \phi_i \cdot n_j ds \right], \quad (15)$$

$$B_{ij} = \text{Im} \left[\rho \int_X \phi_i \cdot n_j ds \right] \cdot \omega$$

여기서 ϕ_j 는 방사 속도 포텐셜이며, 실수부(A_{ij})는 부가질량 계수를, 허수부(B_{ij})는 파랑감쇠계수를 나타낸다. $j = 1, 3, 5$ 는 각 운동모드(surge, heave, pitch)를 의미하며, $n_1 = n_x, n_3 = n_z, n_5 = (z - z_0)n_x - (x - x_0)n_z$ 를 나타낸다.

식(9)~(11)에 의한 계산된 외력(파랑하중)과 식(15)에 의한 유체동역학적 계수들을 대입하여 잠수체에 대한 3 자유도 운동방정식을 설정하여 그 해를 구해 잠수체의 운동을 계산할 수 있다. 잠수체의 운동(복소변위 $\zeta_{1,3,5}$)을 미소진폭을 가정한 조화함수(harmonic function)로 가정하면 아래의 운동방정식을 예상할 수 있다.

$$\begin{aligned} & [-\omega^2(M + A_{11}) - i\omega(B_{11} + C_1 |\dot{\zeta}_1|) + K_{11}] \zeta_1 \\ & + [-\omega^2 A_{15} - i\omega B_{15} + K_{15}] \zeta_5 = F_x \end{aligned} \quad (16)$$

$$[-\omega^2(M + A_{33}) - i\omega(B_{33} + C_3 |\dot{\zeta}_3|) + K_{33}] \zeta_3 = F_z \quad (17)$$

$$\begin{aligned} & [-\omega^2 A_{51} - i\omega B_{51} + K_{51}] \zeta_1 \\ & + [-\omega^2(I + A_{55}) - i\omega(B_{55} + C_5 |\dot{\zeta}_5|) + K_{55}] \zeta_5 = F_R \end{aligned} \quad (18)$$

점성으로 인한 에너지소산은 잠수체에 가해지는 파력(Wave exciting force)의 계산에 심대한 영향을 미치지 않기 때문에 유체 영역계산에서 독립적으로 다루어질 수 있다(Chakrabarti, 1987). 여기서 잠수체 운동 속도의 제곱에 비례하는 에너지 소산항은

Williams and McDougal(1996)의 가정을 따라서 다음과 같이 가정하였다.

$$C_1 = \frac{1}{2}\rho C_D b, C_3 = \rho C_D a, C_5 = \frac{1}{8}\rho C_D (2a^4 + b^4) \quad (19)$$

여기서 C_D 는 점성에 의한 소산항의 크기를 결정하는 고유의 상수이다. 선형 경계조건과 비점성, 비회전성 유체 기반의 계산에서는 직접적으로 점성을 영향을 고려하는 것이 제한적이다. 점성의 영향에 의해 소산되는 에너지는 일반적으로 입사파의 주파수, 실험 시 사용한 구조물의 배수량과 관련되어 있지만, 본 논문에서는 소산되는 전체 에너지가 구조물의 운동 속도에 주로 연관된다고 가정(Chakrabarti, 1987)하였다. 따라서 Williams and McDougal (1996)은 점성의 영향을 잠수체 속도의 제곱에 비례하는 항으로 단순화 하였고, 실험을 통한 투과계수 및 반사계수 측정을 통해 점성 감쇠계수의 경험적 상수값을 도출하였다. 또한 점성의 영향은 입사파고와도 관련 있는데, 본 연구는 참고 문헌과 다른 수치 계산 방법의 제시와 이에 대한 결과 비교에 주안점을 두었기 때문에, 파고의 영향에 대한 혼동을 피하고자 모든 계산의 입사파는 단위 파진폭(A=1m)로 한정 하였다.

속도의 제곱에 비례하는 에너지 소산항이 포함된 본 운동방정식(비선형 연립방정식)의 해를 구하기 위해 Newton-Raphson법을 사용하였다.

$$f(\vec{x} + \vec{H}) \approx f(\vec{x}) + \mathcal{J}(\vec{x})\vec{H} + O(\|\vec{H}\|^2) \quad (20)$$

여기서 $f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0, 1 \leq i \leq n$
 $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T, f = (f_1, f_2, \dots, f_n)^T$

$$\mathcal{J}(\vec{x}) = f'(\vec{x}) = \begin{bmatrix} \partial f_1 / \partial x_1 & \partial f_1 / \partial x_2 & \dots & \partial f_1 / \partial x_n \\ \partial f_2 / \partial x_1 & \partial f_2 / \partial x_2 & \dots & \partial f_2 / \partial x_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \partial f_n / \partial x_1 & \partial f_n / \partial x_2 & \dots & \partial f_n / \partial x_n \end{bmatrix}$$

$$\vec{H} = -[\mathcal{J}(\vec{x})^{-1}]f(\vec{x}) \quad (21)$$

$$\vec{x}^{(k+1)} = \vec{x}^{(k)} + \vec{H}^{(k)} \quad (22)$$

오차범위(\vec{H})를 10^{-6} 으로 설정하여 계산 값 ($\vec{H}^{(k)} = \vec{x}^{(k+1)} - \vec{x}^{(k)}$)이 설정 범위에 수렴할 때까지 반복계산을 수행하여 비선형 연립방정식의 해를 구한다. 위의 Newton-Raphson법은 미지수가 실수인 미분 가능한 연립방정식에 적용 가능하지만, 본 논문의 운동방정식은 에너지 소산항 변위의 절대값을 포함하고 있기 때문에 불연속적이며, 따라서 상미분이 불가능할 뿐만 아니라, 시간의 조화함수를 가정하는 주파수 영역 계산에서 운동변위는 진폭과 위상으로 대변되는 복소수이다. 따라서 식(16)~(18)을 풀

기 위해 각 변수인 운동 변위와 파력을 실수와 허수 성분으로 다음과 같이 분리할 수 있다.

$$\zeta_i = (p_i + iq_i)e^{-i\omega t} \quad (23)$$

$$F_x = (F_{x1} + iF_{x2})e^{-i\omega t} \quad (24)$$

$$F_z = (F_{z1} + iF_{z2})e^{-i\omega t} \quad (25)$$

$$F_R = (F_{R1} + iF_{R2})e^{-i\omega t} \quad (26)$$

따라서 미분불능인 에너지 소산항의 속도 절대값을 다음과 같이 미분 가능한 연속함수로 표현할 수 있다.

$$|\dot{\zeta}| = |-i\omega\zeta_i| = \omega\sqrt{p_i^2 + q_i^2} \quad (27)$$

각 운동 방향에 따른 변위($p_{1,3,5}, q_{1,3,5}$)를 구하기 위해 식 (23)~(27)을 각 운동 방정식(식(16)~(18))에 대입하고 각각 실수와 허수 성분으로 분리하여 정리하면 Newton-Raphson법을 사용하여 해를 구할 수 있는 아래와 같은 6개의 연립방정식을 얻을 수 있다. 그러므로 계산된 외력항을 각 운동방정식에 대입하여 계산하면 에너지 소산항이 고려된 구조물의 운동 변위를 구할 수 있다.

$$-\omega^2(M + A_{11})p_1 + \omega B_{11}q_1 + \omega^2 C_{1q1}\sqrt{p_1^2 + q_1^2} + K_{11}p_1 - \omega^2 A_{15}p_5 + \omega B_{15}q_5 + K_{15}p_5 = F_{x1} \quad (28)$$

$$-\omega^2(M + A_{11})q_1 - \omega B_{11}p_1 - \omega^2 C_{1p1}\sqrt{p_1^2 + q_1^2} + K_{11}q_1 - \omega^2 A_{15}q_5 - \omega B_{15}p_5 + K_{15}q_5 = F_{x2} \quad (29)$$

$$-\omega^2(M + A_{33})p_3 + \omega B_{33}q_3 + \omega^2 C_{3q3}\sqrt{p_3^2 + q_3^2} + K_{33}p_3 = F_{z1} \quad (30)$$

$$-\omega^2(M + A_{33})q_3 - \omega B_{33}p_3 - \omega^2 C_{3p3}\sqrt{p_3^2 + q_3^2} + K_{33}q_3 = F_{z2} \quad (31)$$

$$-\omega^2 A_{51}p_1 + \omega B_{51}q_1 + K_{51}p_1 - \omega^2(I + A_{55})p_5 + \omega B_{55}q_5 + \omega^2 C_{5q5}\sqrt{p_5^2 + q_5^2} + K_{55}p_5 = F_{R1} \quad (32)$$

$$-\omega^2 A_{51}q_1 - \omega B_{51}p_1 + K_{51}q_1 - \omega^2(I + A_{55})q_5 - \omega B_{55}p_5 + \omega^2 C_{5p5}\sqrt{p_5^2 + q_5^2} + K_{55}q_5 = F_{R2} \quad (33)$$

위 운동방정식을 통해 구한 해를 식 (12)에 대입하면 다음과

같이 에너지 소산모델이 적용된 자유수면 변화를 구할 수 있다.

$$\eta_R = \frac{i\omega}{g} \left[\phi_D + \sum_{i=1,3,5} -i\omega(p_i + iq_i)\phi_i \right] \quad (34)$$

$$\eta_T = \frac{i\omega}{g} \left[\phi_I + \phi_D + \sum_{i=1,3,5} -i\omega(p_i + iq_i)\phi_i \right] \quad (35)$$

3. 결과 및 해석

3.1 고정식 잠수체 계산 결과 검증

먼저, 운동 속도의 제곱에 비례하는 에너지 소산항을 고려하

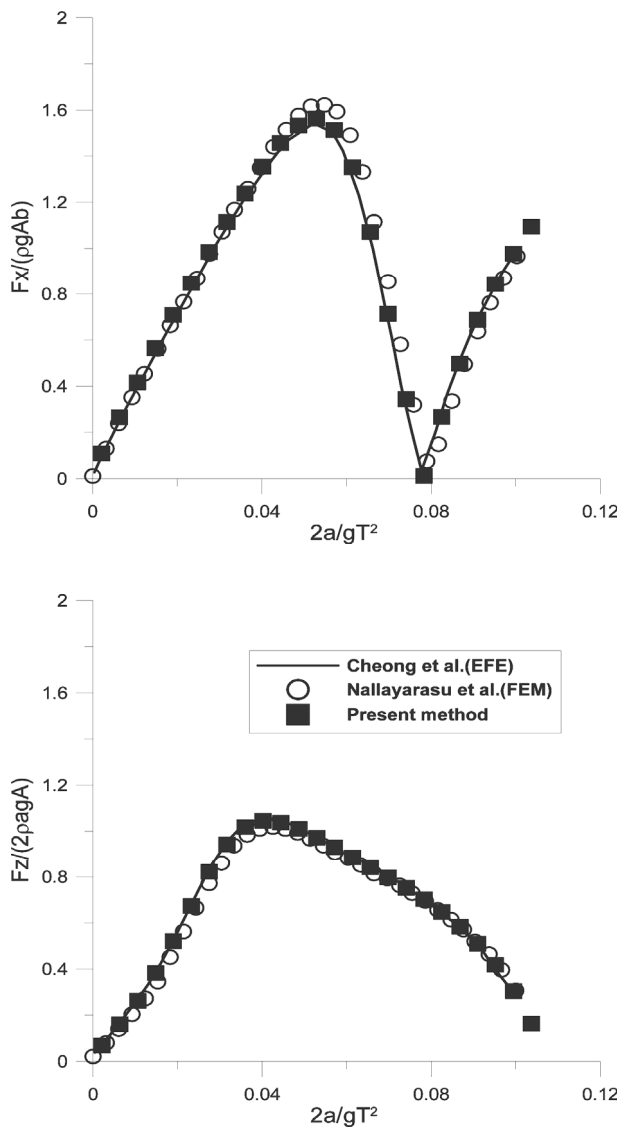


Fig. 2 Horizontal and vertical wave forces on the fixed submerged flat plate: $h/d=0.3$, $d/L=0.192$, $b/h=0.025$

지 않은 고정식 평판형 잠수체의 계산 결과를 고유함수 전개법 (Cheong, et al., 1996)과 유한 요소법(Nallayarasu, et al., 1992)의 결과와 비교하여 본 계산의 정확성을 확인하였다. Fig. 2는 잠수체에 작용하는 파랑하중을 각 계산 방법에 따라 계산하고 그 결과를 비교 하여 본 계산 결과가 다른 결과들과 잘 일치하는 것을 보여 준다. 또한 각 계산 방법에 따른 반사계수와 투과계수의 비교(Fig. 3)를 통해 고정식 구조물에 대한 본 연구 결과의 정확성을 검증하였다.

3.2 에너지 소산항을 고려한 계산 결과

잠수체가 파랑 중에서 운동하는 경우, 운동 속도의 제곱에 비례하는 에너지 소산항을 고려한 운동방정식을 계산하여야 한다. 본 연구에서는 잠수된 가동식 방파제의 파랑 중 운동으로 인한

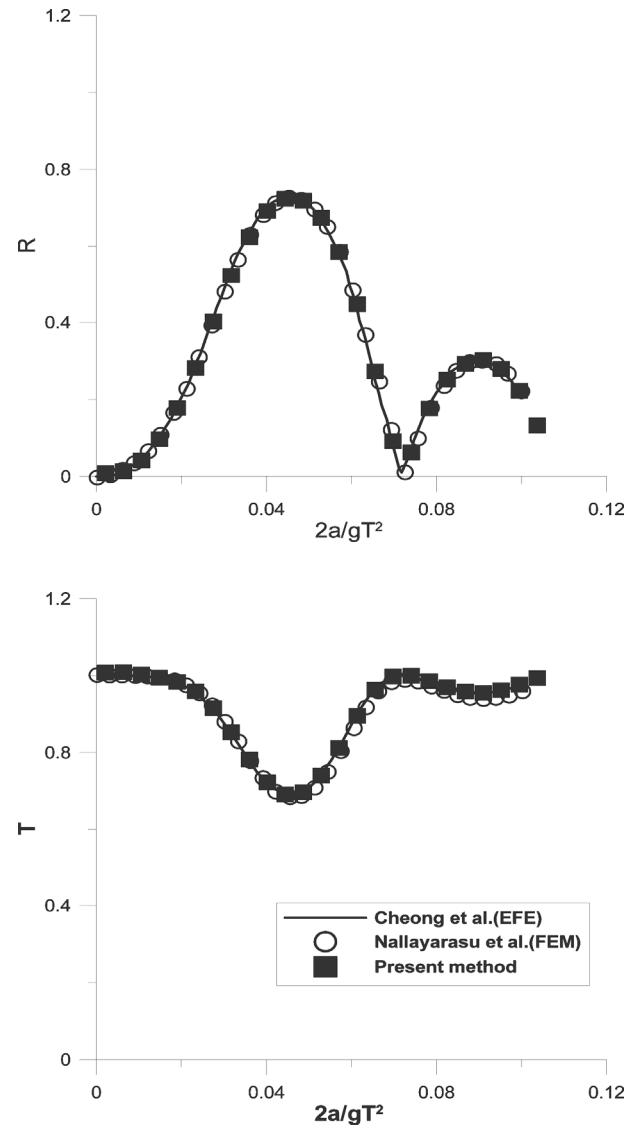


Fig. 3 Reflection and transmission coefficients for the fixed submerged flat plate: $h/d=0.3$, $d/L=0.192$, $b/h=0.025$

구조물 주위의 자유 수면 변화를 계산하고 비교하였다. 여기서 사용된 에너지 소산상수 C_D 값은 Williams and McDougal (1996)의 실험에서 결정한 경험적인 값인 3.0으로 하였다.

Fig. 4에서 잠수체의 설치 깊이의 변화에 따른 투과계수 및 소산계수를 비교하였는데, 본 계산 결과는 Williams and McDougal (1996)의 결과와 잘 일치 하는 것을 확인할 수 있었다. Koo and Kim (2011)의 연구 결과에서처럼 잠수된 수심이 알아질수록 파랑-구조물간 상호작용이 증가하여 낮은 투과계수를 나타내며, 소산계수는 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 파랑-구조물간 상호작용이 증가할수록 잠수체 운동 속도의 제곱에 비례하는 소산 에너지가 증가하는 것으로 판단된다.

잠수체의 폭 변화에 따른 투과계수 및 소산계수의 비교는 Fig. 5에 나타내었다. 잠수체 폭이 증가할 때 파랑과의 접촉면적이 증

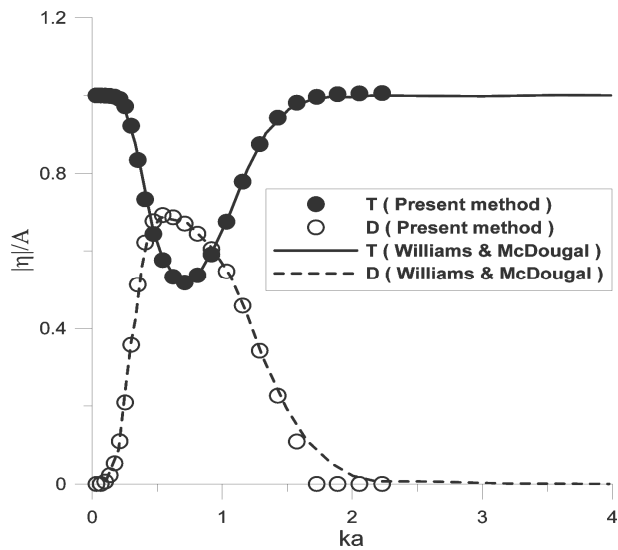


Fig. 4 Transmission and dissipation coefficients for relative submerged depth ratios: $2a/d=0.6$, $b/d=0.2$, $\rho_{body}/\rho_{water}=1.0$, $K/\rho gd=10$, $C_D=3.0$, $h/d=0.25$ (up), $h/d=0.50$ (down)

가함으로 이에 따른 높은 소산계수와 낮은 투과계수를 가지게 된다. 이는 잠수 수심이 알아지는 경우와 비슷한 결과를 나타낸다. 그러나, 잠수체 폭이 증가함에 따라 파랑-구조물간의 상호작용이 변하게 됨으로써 최대 소산계수와 최소 투과계수를 가지는 주파수 영역이 이동하는 것을 예상할 수 있다. Fig. 5에서는 잠수체 폭이 증가할수록, 투과 계수가 최소이고 소산계수가 최대인 주파수가 고 주파수 영역으로 이동하였음을 알 수 있다.

Fig. 6는 잠수체의 두께의 변화에 따른 투과계수 및 소산계수의 비교를 나타낸다. 구조물 두께의 영향은 투과 및 소산계수의 크기에 다소 영향을 미치는 것을 알 수 있으나, 파랑-구조물의

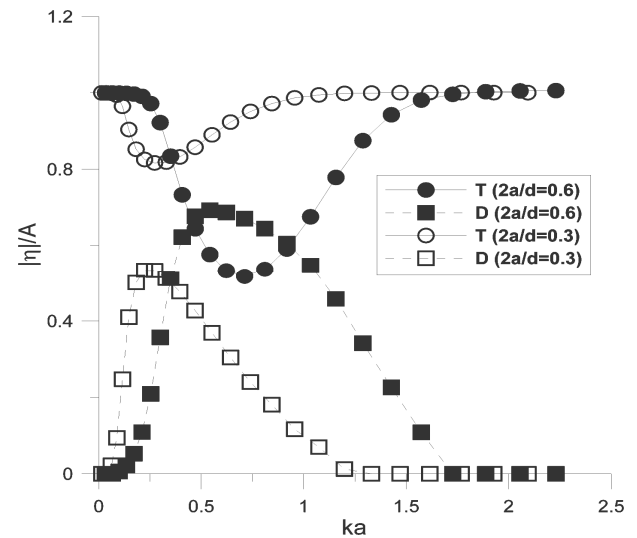


Fig. 5 Transmission and dissipation coefficients for relative breadths of submerged body: $h/d=0.25$, $b/d=0.2$, $\rho_{body}/\rho_{water}=1.0$, $K/\rho gd=10$, $C_D=3.0$

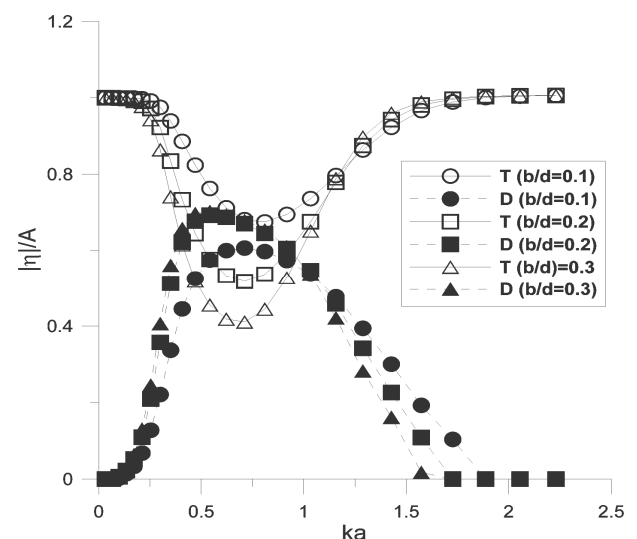
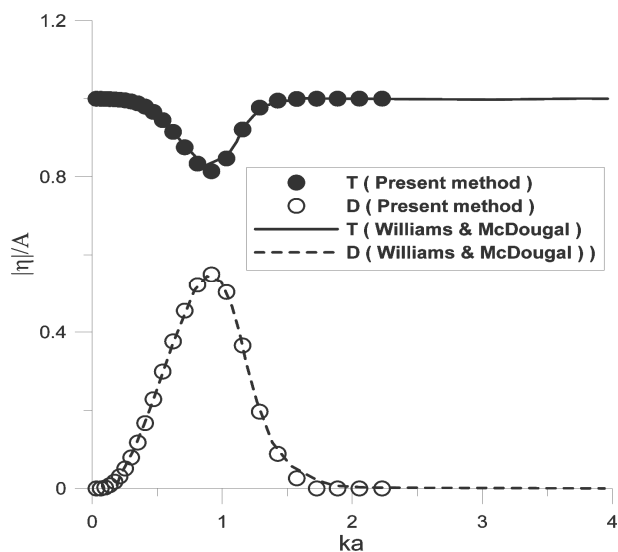


Fig. 6 Transmission and dissipation coefficients for relative thicknesses of submerged body: $h/d=0.25$, $2a/d=0.6$, $\rho_{body}/\rho_{water}=1.0$, $K/\rho gd=10$, $C_D=3.0$

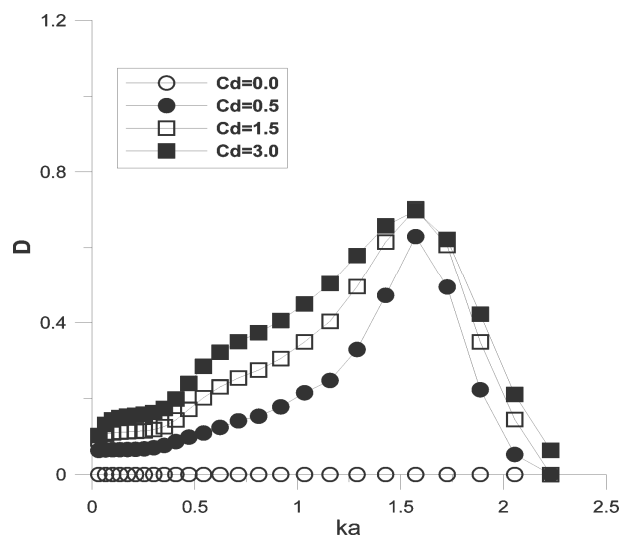
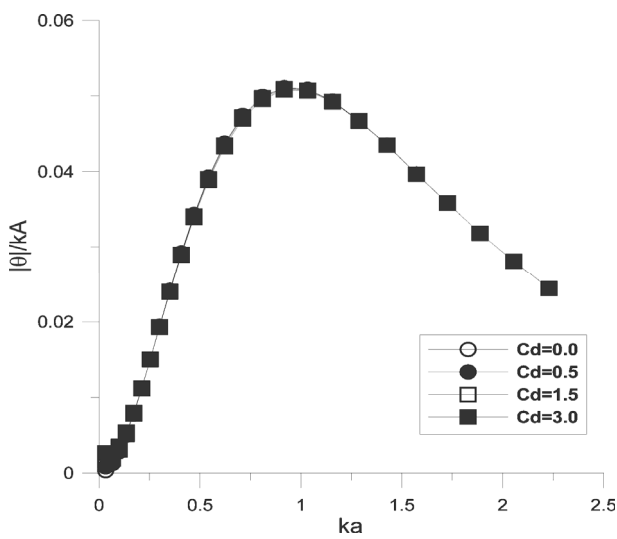
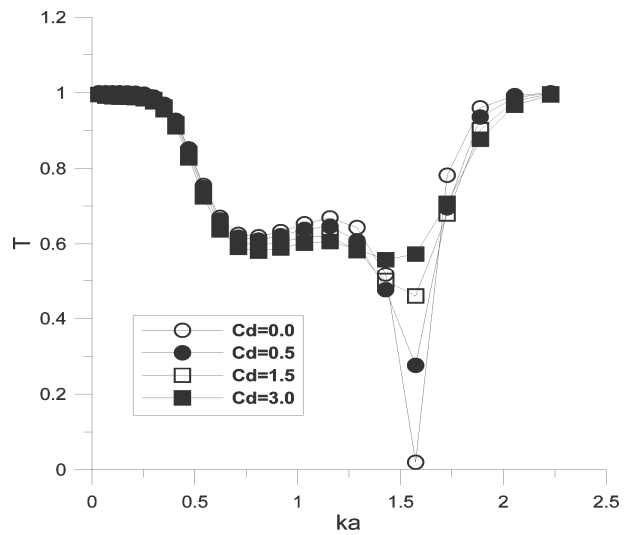
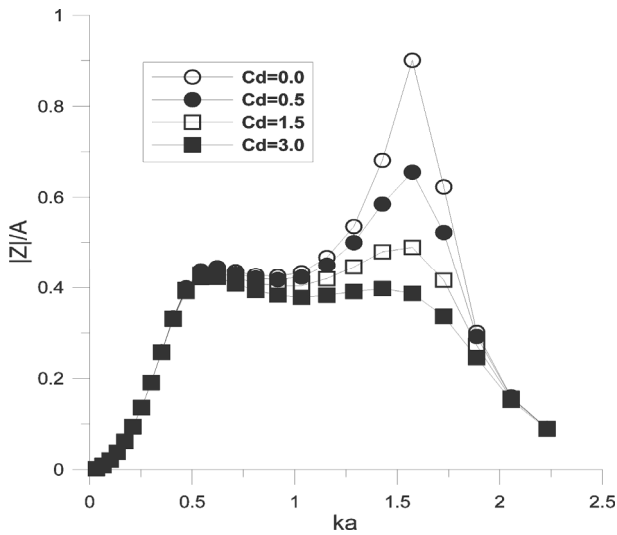
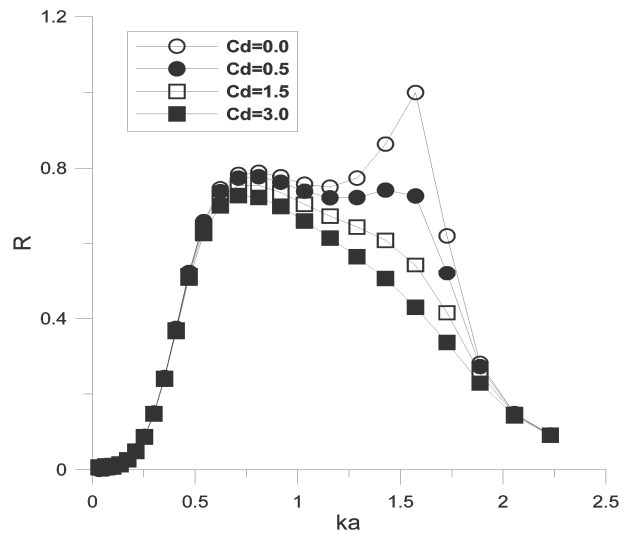
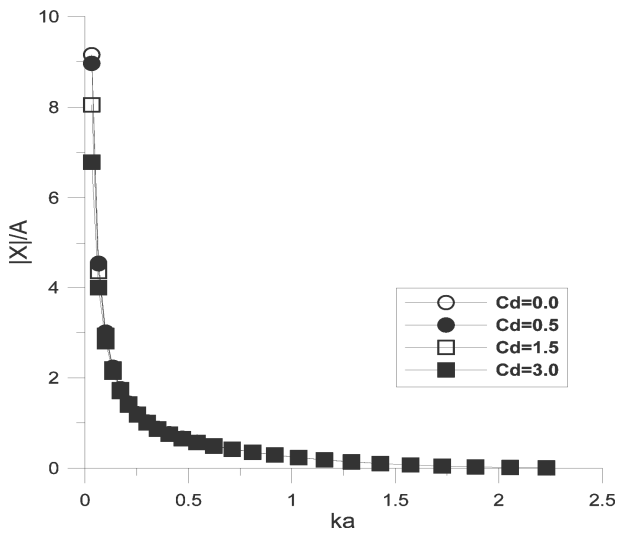


Fig. 7 Motion RAOs for submerged body with the dissipation model: $h/d=0.25$, $2a/d=0.6$, $b/d=0.2$, $\rho_{body}/\rho_{water}=1.0$, $K/\rho gd=1$, $C_D=3.0$

Fig. 8 Reflection, transmission and dissipation coefficients for submerged body with the dissipation model: $h/d=0.25$, $2a/d=0.6$, $b/d=0.2$, $\rho_{body}/\rho_{water}=1.0$, $K/\rho gd=1$, $C_D=3.0$

상호작용이 주로 구조물 폭과 관련이 깊기 때문에 최소 투과계수 주파수의 변화에는 큰 영향이 없는 것을 알 수 있다.

운동 잠수체의 기하학적 변화에 따른 자유 수면 문제의 해석은 고유함수 전개법을 사용한 Williams and MoDougal (1996)의 계산과 전체적으로 큰 차이를 보이지 않는다. 본 연구에서는 이를 좀더 보완하여 점성에 의한 에너지 소산상수 C_D 의 변화에 따른 잠수체의 운동 변위를 계산하여 비교 분석하였다.

Fig. 7에서는 다양한 C_D 에 따른 잠수체의 운동 RAO의 크기를 각 운동 방향에 따라 비교하였다. 점성에 의한 잠수체 운동의 변화를 좀더 명확히 비교하기 위해 스프링 상수 K 를 작게 하여 ($K/\rho g d = 1$) 구조물의 운동을 최대화 함으로써 점성상수와 운동간의 영향을 극대화 하였다. C_D 의 크기에 따른 수평 및 회전운동은 거의 차이가 없는 것을 알 수 있고, 수직운동의 경우 $ka = 1.5$ 부근에서 점성 에너지 소산 상수가 작을수록 큰 운동 변위를 가짐을 알 수 있다. 이는 Fig. 8의 반사 및 투과 계수의 비교에서도 명확히 알 수 있다. Fig. 4와 5에서 최소 투과 계수를 가지는 $ka=0.5$ 근처의 주파수 영역은 큰 스프링 상수로 인한 구조물 운동이 최소화 된 상태에서 구조물 폭에 의한 공진 주파수 영역이며, Fig. 8의 $ka=1.5$ 에서 나타나는 최소 투과계수의 주파수 영역은 스프링 상수 변화에 따른 잠수체 운동으로 인한 공진 주파수를 나타낸다.

에너지 소산 상수의 부재($C_D = 0$) 또는 감소로 인한 잠수체의 큰 수직 운동 변위는, 파랑-구조물 운동간의 상호작용이 증가함을 의미하고 이로 인해 매우 큰 반사계수(거의 전반사)와 작은 투과계수를 가지게 된다. 따라서 이 주파수 영역에서 에너지가 전혀 소산되지 않는 순수한 포텐셜 이론에 의한 계산 결과는, 결과적으로 잠수 방파제의 성능을 과대 해석할 수 있는 단점을 가지고 있다.

또한 에너지 소산 상수의 증가로 인한 운동변위의 감소율은 선형적으로 비례하지 않음을 확인할 수 있으며 작은 소산 상수에도 잠수체의 운동 변위가 급격히 감소함을 알 수 있다. 따라서 소산 상수의 변화는 잠수체 운동의 공진주파수에는 영향을 주지 않으며, 운동 변위의 크기에만 관여하는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

잠수된 가동식 평판형 방파제의 유체동역학적 성능 해석을 위해 경계요소법을 기반으로 한 주파수 영역의 2차원 수치파동수조 기법을 이용하였다. 점성에 의한 에너지 소산을 고려하기 위해 잠수체 운동 속도의 제곱에 비례하는 소산상수를 포함한 에너지 소산모델을 운동방정식에 적용하고, 복소수로 표현되는 운동변위를 매개변수로 하는 비선형연립방정식의 수치적 해법을 제시하였다. 본 수치 계산의 유효성을 확인하기 위해, 고유함수 전개법 및 유한요소법 결과와 비교하여 본 계산의 정확성을 검증하였다.

잠수체의 설치 깊이가 얕을수록, 파랑-구조물간 상호작용이 증가하여 낮은 투과계수를 나타내며, 소산계수도 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 파랑-구조물간 상호작용이 증가할수록 잠수체

운동 속도의 제곱에 비례하는 소산 에너지가 증가하는 것으로 판단된다. 또한 잠수체 폭이 증가할수록 파랑과의 접촉면적이 증가함으로 인해 높은 소산계수와 이에 따른 낮은 투과계수와 가지게 됨을 확인하였고, 파랑-구조물 상호작용의 변화로 최대 소산 계수와 최소 투과계수 주파수가 고 주파수 영역으로 이동함을 알 수 있었다.

에너지 소산항의 영향은 파랑-구조물 상호작용이 큰 공진주파수영역에서의 크게 나타남을 확인 할 수 있었고 그 외 주파수영역에서는 거의 영향이 없음을 확인하였다. 에너지 소산상수의 크기는 잠수체 운동변위의 변화율과 선형적이지 않고 공진주파수의 이동에 영향을 주지 않음을 알 수 있었다. 소산 상수의 부재($C_D = 0$) 또는 감소로 인해 잠수 방파제는 공진 주파수에서 큰 반사계수(거의 전반사)와 작은 투과계수를 가지게 된다. 따라서 이 주파수 영역에서 에너지가 전혀 소산되지 않는 순수한 포텐셜 이론의 적용은, 잠수 방파제의 성능을 과대 해석할 수 있는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 수치 해석 방법은 잠수체의 유체동역학적 성능을 보다 현실적으로 고찰할 수 있는 유용한 기법이며, 해저면의 영향 고려 등 가동식 잠수 방파제의 실제 설계 시 최적화 구조물 형상 설계 등에 활용될 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 2011년 울산대학교 연구비(2011-0147)에 의하여 연구 되었음.

참 고 문 헌

- Chakrabarti, S.K., 1987. *Hydrodynamics of offshore structures*. New York: Springer-Verlag.
- Cheong, H.F. Shankar, N.J. & Nallayarasu, S., 1996. Analysis of submerged platform breakwater by Eigenfunction Expansion method. *Ocean Engineering*, 23(8), pp.649-666.
- Hong, D.C. & Hong, S.Y., 2008. Numerical Study on the Radiation Potential of a Ship Using 3D Time Domain Forward-Speed Free-Surface Green Function and a Second-Order BEM. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(3), pp.258-268.
- Kim, Y.J. Ha, Y.R. & Hong, S.Y., 2003. Numerical Calculation of the Free-Surface Flows around a Submerged Body. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 40(2), pp.11-20.
- Koo, W.C. & Kim, D.H., 2011. Numerical Analysis of Hydrodynamic Performance of a Movable Submerged Breakwater. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(1), pp.23-32.
- Lee, D.H. & Choi, H.S., 2001. A Study on the

- performance of a submerged breakwater by using the singularity distribution method. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 13(1), pp. 73–79.
- Lee, H.Y. & Lim, C.G., 2004. Nonlinear Motion for an Elliptic Cylinder under Free Surface. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 41(4), pp.38–44.
- Lew, J.M. & Kim, Y.I., 2002. Analysis of Steady Flow Around a Two-Dimensional body Under the Free Surface Using B-Spline Based Higher Order Panel Method. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 39(1), pp.8–15.
- Mei, C.C. Stiassnie, M. & Yue, D.K.P., 2005. Theory and applications of ocean surface waves. *Advanced Series on Ocean Engineering*, 23. World Scientific.
- Mullarkey, T.P. McNamara, J.E. & Farrell, K.J., 1992. Semi-analytical solutions for the hydrodynamics of submerged pontoons of finite length. *Proc. of 11th International OMAE Conference*, New York, pp.135–142.
- Nallayarasu, S. Cheong, H.F. & Shankar, N.J., 1992. Wave induced dynamic pressures and forces on a submerged inclined plate by Finite Element Method. *Proc. of International Conference on Numerical methods in Engineering Singapore*, 18(1–3), pp.113–118.
- Patarapanich, M., 1984. Maximum and zero reflection from submerged plate. *Journal of Waterway port Coastal and Ocean Engineering*, 110(2), pp.171–181.
- Siew, P.F. & Hurley, D.G., 1977. Long Surface Waves Incident on a Submerged Horizontal Plate. *Journal of Fluid Mechanics*, 83(1), pp.141–151.
- Sung, H.G. Hong, S.Y. & Choi, H.S., 1997. A Study on the Boundary Element Method for Numerical Analysis of Nonlinear Free Surface Waves. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 34(4), pp.53–60.
- Williams, A.N. & McDougal, W.G., 1996. A Dynamic Submerged breakwater. *Journal of Waterway port Coastal and Ocean Engineering*, 122(6), pp.288–296.



김도현

구원철