

가동식 잠수 방파제의 유체동력학적 성능 수치해석

구원철[†] · 김도현
울산대학교 조선해양공학부

Numerical Analysis of Hydrodynamic Performance of a Movable Submerged Breakwater

Weon-Cheol Koo[†] · Do-Hyun Kim
School of Naval Architecture and Ocean Engineering University of Ulsan, Korea

Abstract

Numerical analysis of hydrodynamic performance of a movable submerged breakwater was carried out as an eco-friendly marine structure for coastal and harbor protection. Using boundary elements method with two-dimensional frequency-domain reflection and transmission coefficients and wave forces acting on the submerged flat plate were calculated with various submerged depths and respective motion allowable modes. The movable breakwater was found to be more efficient in wave-blocking than the fixed structure. Variation of reflection coefficients was significantly influenced by vertical motion of the body.

Keywords : Submerged breakwater(잠수 방파제), Movable breakwater(가동식 방파제), Reflection coefficient(반사계수), Wave force(파력), Motion RAO(운동응답), Boundary element method(경계 요소법)

1. 서론

다양한 해상 환경적 원인으로 부터 발생한 해양파로부터 연안과 항만시설을 효과적으로 보호하기 위해 많은 종류의 방파제가 개발되었다. 하지만, 기존 방파제의 여러 환경적·기술적인 문제를 해결 하고자 환경 친화적인 신개념 방파제들이 고안되고 있다. 그 중 한 예로 제안된 잠수된 평판형태의 방파제는 해수면 아래 위치하여 해안경관을 해치지 않고, 선박의 운항 등 해상활동에 방해를 주지 않으면서 방파제의 역할을 효과적으로 할 수 있는 실용 가능한 모델로서 연구적 관심이 증대되고 있다.

잠수된 평판형태의 방파제에 대한 연구들은 1970년대부터 수행되어 왔다. Siew and Hurley(1977)는 장파에 대한 임의 깊이의 잠수 방파제의 반사계수와 투과계수를 계산하였다. 그 후 Patarapanich(1984)는 Siew and Hurley의 결과를 이용하여 잠수된 평판 길이에 대한 반사계수 및 투과계수의 변화를 장파장근사(long wave approximation)를 통해 조사하였다. 또한 Nallayarasu, et al.(1992)는 선형입사파 조건에서 잠수 평판의 압력과 파력을 유한 요소법(Finite Element Method)으로 계산하였고, Mullarkey, et al.(1992)는 고유함수 전개법을 사용한 해석적 방법을 통하여 유한한 길이를 가진 잠수된 폰툰(pontoon)형 구조물의 유체 동역학적 계수를 측정한 바 있다. Cheong, et al.(1996)은 고유함수 전개법을 사용하여 잠수된 평판형 구조물의 길이, 두께, 설치 수심에 따른 파력 변화등을 해석하였다. 또한 Brossard

and Chagdali(2001)는 실험을 통해 고정된 평판형 구조물의 설치 깊이에 따른 반사 및 투과 계수를 측정하여 파랑 감쇠성능의 차이를 비교하였다. 국내 연구로서 Lee and Choi(2001)는 특이점 분포법에 의해 탄성 지지된 잠수된 평판에 대해 입사파, 산란파 그리고 방사파의 상호작용을 연구하고 3차원상에서 잠수된 평판의 파랑감쇠성능에 대해 고찰한 바 있다. 유재문과 Lew and Kim(2002)은 B-Spline 기저 고차 경계 요소법을 사용하여 2차원 자유수면하 물체주위의 유동을 해석하였고, Kim, et al.(2003)은 3차원 잠수체 주위의 자유표면 유동을 수치적으로 계산하였다. Lee and Lim(2004)는 자유표면 아래에 타원형 실린더에 대한 비선형 운동에 관하여 고찰하였다. 한편, 가동식(movable) 잠수 방파제의 연구에 관해서는 Williams and McDougal(1996)이 잠수된 평판에 대한 동역학적 특성에 관해 고유함수 전개법을 이용하여 파랑감쇠 성능 및 평판 운동과의 상호작용을 연구하였다.

본 연구에서는 주파수 영역의 2차원 경계 요소법을 이용하여 계산영역을 비압축성, 비회전성, 비점성의 포텐셜 유동(potential flow)으로 가정하고 선형파이론(linear wave theory)을 적용하여 잠수된 방파제의 유체 동역학적 특성을 분석하고 방파성능을 계산하였다. 방파제의 유체 동역학적 계수(hydrodynamic coefficients)는 방사문제(radiation problem)를 계산하여 획득하였고, 파의 외력은 산란문제(diffraction problem)를 풀어서 계산하였다. 평판의 경우 고정식(fixed)과 잠

수 상태의 가동식을 모두 고려할 수 있지만, 실제 해상에 적용하기 위해서는 고정식 방파제의 설치는 매우 어렵기 때문에 가동식 방파제의 설치가 현실적이라고 할 수 있다. 가동식 구조물이 받는 파랑하중과 유체동역학적 계수들을 구하여 운동방정식을 계산함으로써 구조물의 변위를 계산하였다. 또한 가동식 잠수 방파제의 각 운동모드 제어를 통한, 방파제 각각의 운동이 반사 및 투과계수에 미치는 영향을 계산하여 보다 효율적인 가동식 잠수 방파제 설계의 가능성을 확인하였다.

본 연구의 수치 파동수조를 이용한 계산 기법은 해저면의 변화까지 계산영역에 포함시키기 때문에 다양한 형상의 해저면 영향을 고려할 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 연구의 후속 연구로서 다양한 형태의 해저면 변화에 대한 수중 방파제의 성능 변화 등을 연구할 계획이다.

2. 수학적 정식화

Fig. 1은 잠수 방파제의 기하학적 정보를 나타낸 것으로, 방파제의 반폭을 a , 수심은 d , 설치 깊이는 h , 두께는 b 로 정하였다. 2차원 직교 좌표계(x, z)를 사용하였고 수평방향을 x 축, 수직방향을 z 축이라 정하였다. 파랑조건은 선형파로 가정하여, 파고는 H , 진폭은 $A(=H/2)$, 파장은 L , 파주기 P , 파 주파수는 $\omega(=2\pi/P)$ 로 정하였다.

복원 모멘트를 계산하기 위해서, 평판의 무게 중심 (x_0, z_0)은 방파제의 기하학적 중심이며, 구조물 양 끝단에는 스프링으로 이루어진 수직 계류장치가 있고 이것의 스프링 상수는 K 이다. 방파제 전체의 비중은 유체와 비중이 같으며, 질량은 M , 2차 질량관성모멘트는 I 이다.

계산 영역내 유체는 비점성, 비압축성, 비회전성으로 가정한 포텐셜 유동이며, 속도포텐셜은 다음 수식 $\Phi(x, z; t) = Re[\phi(x, z)e^{-i\omega t}]$ 로 나타낼 수 있다. 유체 전 영역을 만족하는 지배방정식은 속도포텐셜의 정의와 유체의 연속방정식을 만족하는 라플라스(Laplace) 방정식으로 정의된다.

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

그린 함수(Green function)를 이용하여 지배 방정식은 아래의 경계적분방정식으로 표현될 수 있다.

$$a\phi_i = \iint \left(G_{ij} \frac{\partial \phi_j}{\partial n} \right) ds \tag{2}$$

2차원 문제에 적용되는 그린함수는 $G_{ij} = (x_i, z_i, x_j, z_j) = -(1/2\pi) \ln R$ 이며, α 는 입체각(Solid angle) 이고, R 은 각 경계면에 위치한 소스점 (x_i, z_i)과 필드점 (x_j, z_j)사이의 거리를 나타낸다. 자유표면의 경계조건은 동역학적 경계조건과 운동학적 경계조건이 결합된 식(3)을 사용하였으며 해저면은 비투과성 경계조건을 적용하였다(식(4)).

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

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

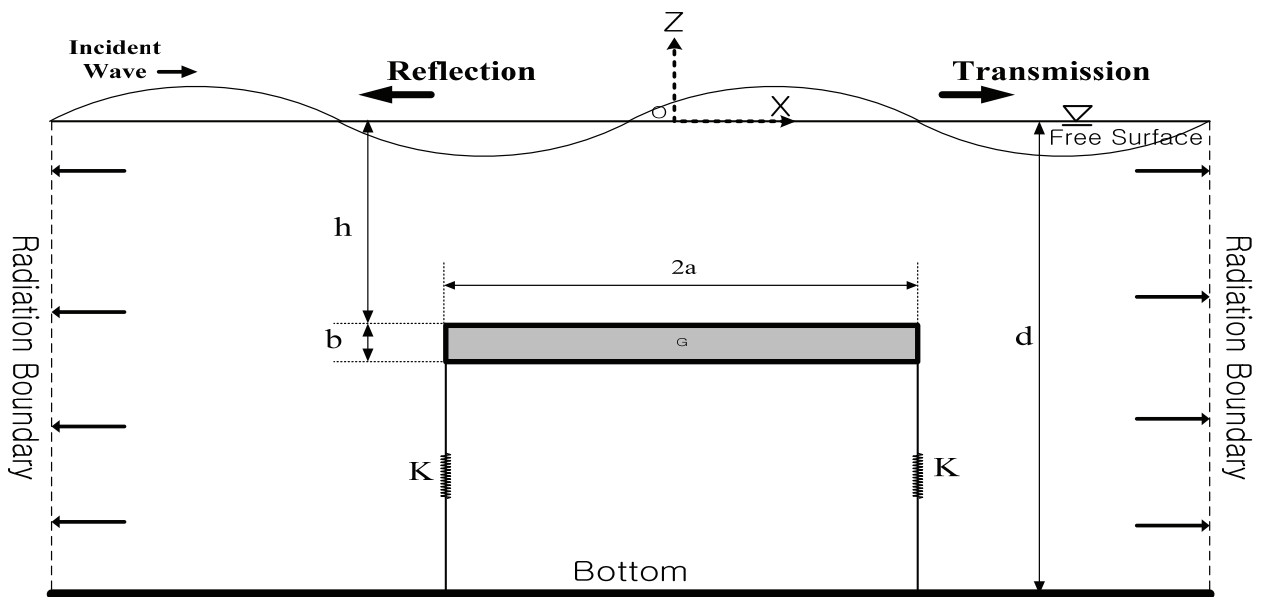


Fig.1 Definition of geometric conditions

방사문제와 산란문제 각각에 대한 방파제 경계조건은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \phi_R}{\partial n} = Vn \quad \text{on } S \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi_D}{\partial n} = \frac{\partial \phi_I}{\partial n} \quad \text{on } S \quad (6)$$

여기서 S 는 방파제 표면을 나타내며, V 는 방파제의 속도벡터, n 은 단위법선벡터, ϕ_R 은 방사 속도포텐셜, ϕ_D 는 산란 속도포텐셜을 나타낸다. 입사파 속도포텐셜 ϕ_I 는 식(7)과 같이 선형 입사파를 가정하여 적용하였다.

$$\phi_I = -i \frac{gH}{2\omega} \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kd} e^{ikx} \quad (7)$$

여기서 k (wave number)는 분산관계식 $\omega^2 = gk \tanh kd$ 을 이용하여 계산할 수 있다.

계산 영역의 방사 경계조건은 양 끝 경계면이 방파제로부터 충분히 멀리 있다고 가정하고 다음과 같이 적용 하였다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = ik\phi \quad (8)$$

산란문제를 통한 잠수체의 파랑하중에 대한 식은 다음과 같다.

$$F_x = i\rho\omega \int_s \phi_T n_x ds \quad (9)$$

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

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

여기서, $\phi_T = \phi_I + \phi_D$ 이며 F_x 과 F_z 는 수평 및 수직방향의 파력을 나타내며, F_R 은 방파제의 무게중심을 기준으로 하는 복원 모멘트이다. n_x 는 수평방향, n_z 는 수직방향의 단위벡터이다.

유체동역학적 계수에 관한 식은 다음과 같이 정의 할 수 있으며, 방사문제를 통해 계산된다.

$$A_j = Re \left[\rho \int_s \phi_j \cdot n_j ds \right] \quad (12)$$

$$B_j = Im \left[\rho \int_s \phi_j \cdot n_j ds \right] \cdot \omega \quad (13)$$

여기서, ϕ_j 는 방사 속도포텐셜을 나타내며 적분방정식의 실수 영역은 부가질량 A_j 이 되며 허수영역은 파랑감쇠계수 B_j 이 된다. $j=1,3,5$ 는 각 운동모드(surge, heave, pitch), $n_1=n_x$, $n_3=n_z$, $n_5(z-z_0)n_x - (x-x_0)n_z$ 를 나타낸다.

구조물의 영향에 의한 자유표면의 변위(wave elevation)는 계산위치에 따라 구조물 앞쪽변위 η_R 과 구조물 통과 후의 변위 η_T 로 나눌 수 있고 식 (14)과 식 (15)로 계산할 수 있다.

$$\eta_R = \frac{i\omega}{g} \left[\phi_D + \sum_{i=1,3,5} V_i \phi_i \right] \quad (14)$$

$$\eta_T = \frac{i\omega}{g} \left[\phi_I + \phi_D + \sum_{i=1,3,5} V_i \phi_i \right] \quad (15)$$

V_1, V_3 는 각각 구조물의 수평 및 수직방향운동속도, V_5 는 회전운동속도를 나타낸다. 반사계수와 투과계수는 다음 식으로 표현되며 계수들의 제곱합은 선형 계산에서 에너지의 손실이 없다고 가정하면 1이 된다(계산 영역내 에너지 보존). 반사계수는 잠수체를 기준으로 계산영역 왼쪽에서 투과계수는 오른쪽에서 자유표면의 변화를 측정하였다.

$$R = \left| \frac{\eta_R}{A} \right| \quad (16)$$

$$T = \left| \frac{\eta_T}{A} \right| \quad (17)$$

$$T^2 + R^2 = 1 \quad (18)$$

방사문제와 산란문제에서 계산한 유체운동학 계수를 이용하여 구조물의 3자유도 운동방정식을 아래 식과 같이 구성하고 그 해를 구함으로써 구조물의 운동을 계산할 수 있다. 여기서 각각의 운동들은 미소진폭을 가진 조화함수(harmonic function)로 가정하여 계산하였다.

$$\begin{aligned} & [-\omega^2(M+A_{11}) - i\omega B_{11} + K_{11}] \xi_1 \\ & + [-\omega^2 A_{15} - i\omega B_{15} + K_{15}] \xi_5 = F_x \end{aligned} \quad (19)$$

$$[-\omega^2(M+A_{33}) - i\omega B_{33} + K_{33}] \xi_3 = F_z \quad (20)$$

$$\begin{aligned} & [-\omega^2(I+A_{51}) - i\omega B_{51} + K_{51}] \xi_1 \\ & + [-\omega^2(I+A_{55}) - i\omega B_{55} + K_{55}] \xi_5 = F_R \end{aligned} \quad (21)$$

그리고 보다 상세한 운동성능해석을 위해 2차원 상의 3자유도 운동 중 오직 한 방향 운동만을 허용하고 다른 운동은 강제 구속하는 운동 방정식을 아래와 같이 설립하여, 각각의 독립 운동모드가 파랑감쇠에 미치는 영향을 조사하였다.

$$[-\omega^2(M+A_{11}) - i\omega B_{11} + K_{11}] \xi_1 = F_x \quad (22)$$

$$[-\omega^2(M+A_{33}) - i\omega B_{33} + K_{33}] \xi_3 = F_z \quad (23)$$

$$[-\omega^2(I+A_{55}) - i\omega B_{55} + K_{55}] \xi_5 = F_R \quad (24)$$

3. 결과 및 해석

본 연구에서 계산한 수치 결과들을 검증하기 위해 2차원 파랑 문제 해석에 효율적인 고유함수 전개법(Cheong, et al., 1996)과 유한 요소법(Nallayarasu, et al., 1992)의 결과들과 비교하여 본 계산 결과의 정확성을 검증하였다.

3.1 고정식 잠수 방파제의 계산 결과

해중에 설치된 고정식 평판형 구조물의 방파 성능을 조사하기 위해 반사계수와 투과계수를 계산하여 유한요소법 결과와 고유함수 전개법 결과와 비교하였다(Fig. 2).

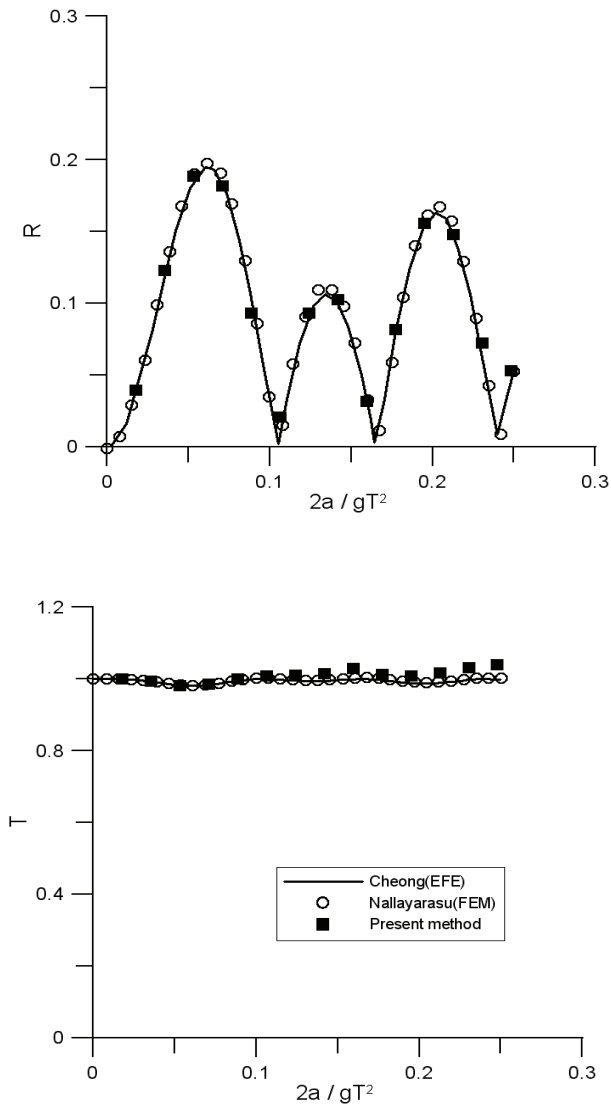


Fig. 2 Reflection (upper) and transmission (lower) coefficients for fixed submerged flat plate: $h/d = 0.3$, $d/L = 0.6$, $b/h = 0.025$

본 수치 계산 결과는 이론값인 고유함수 전개법 결과와 좀 더 일치하였고 유한요소법 결과는 두 결과와 약간의 차이가 있음을 확인하였다. 이를 통해 경계요소법을 사용한 본 계산 결과는 2차원 파랑 해석 문제에 있어서 자유표면의 절점(node)을 이산화시키는 것이 유한요소법에 비해 상대적으로 유리하기 때문에 자유표면의 변위를 보다 정확하게 계산할 수 있음을 알 수 있다. 또한 방파제에 작용하는 수평력과 수직력을 Fig. 3에서 비교하여 본 계산 방법의 정확성과 유효성을 확인하였다.

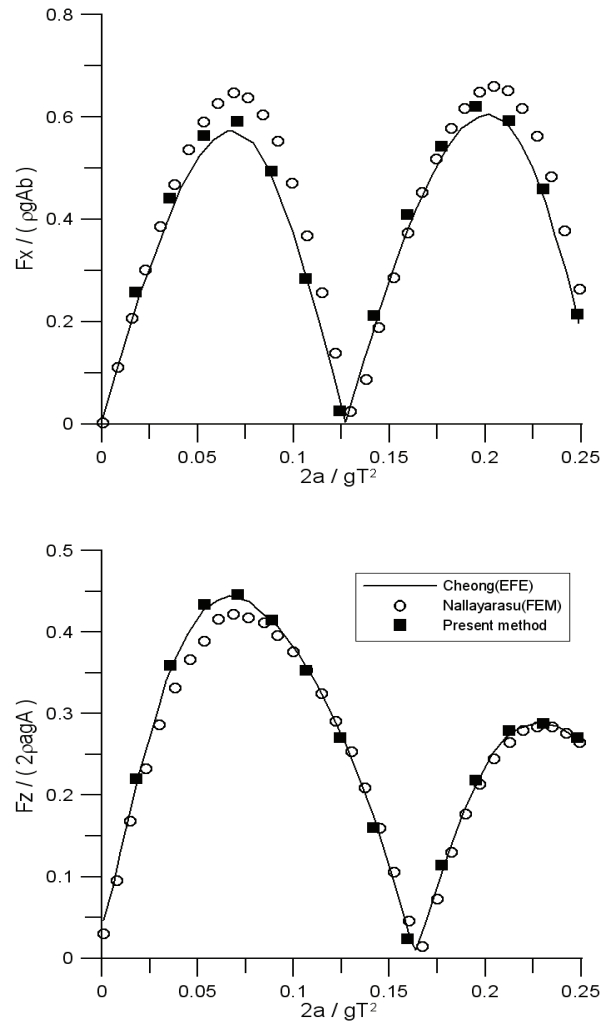


Fig. 3 Horizontal(upper) and vertical(lower) wave forces for fixed submerged flat plate: $h/d = 0.3$, $d/L = 0.6$, $b/h = 0.025$

Fig. 4에서는 방파제 설치 깊이에 따른 반사 및 투과계수를 전 주파수영역에서 비교하였다. 설치 깊이가 얕을수록 (왼쪽그림) 방파 성능이 좋은 것을 알 수 있다(특정 주파수 영역에서 약30% 반사율). 이는 잠수체가 수면에 근접 할수록 파와 잠수체간의 상호작용이 증가하기 때문으로 파악된다. 잠수 방파제 설치 깊이에 따른 방파제의 수평력, 수직력, 모멘트를 Fig. 5에서 비교하였다. 방파제의 잠수 깊이가 얕을수록 외력의 크기는 증가함을 알 수 있고 외력과 반사계수는 상호 비례관계에 있음을 유추할 수 있다. 잠수 깊

이가 알수록 입사파가 받는 평판의 영향이 증가수심이 알아지는 것과 같은 조건하여 방파제에 작용하는 외력이 최대가 되는 입사 주 파수가 약간씩 증가(입사파장이 짧아지는 효과)함을 알 수 있다. 이 같은 비교를 통해 잠수형 방파제는 수면 돌출형에 비해 반사계수는 작지만 방파제에 작용하는 외력이 상대적으로 작음을 알 수 있다.

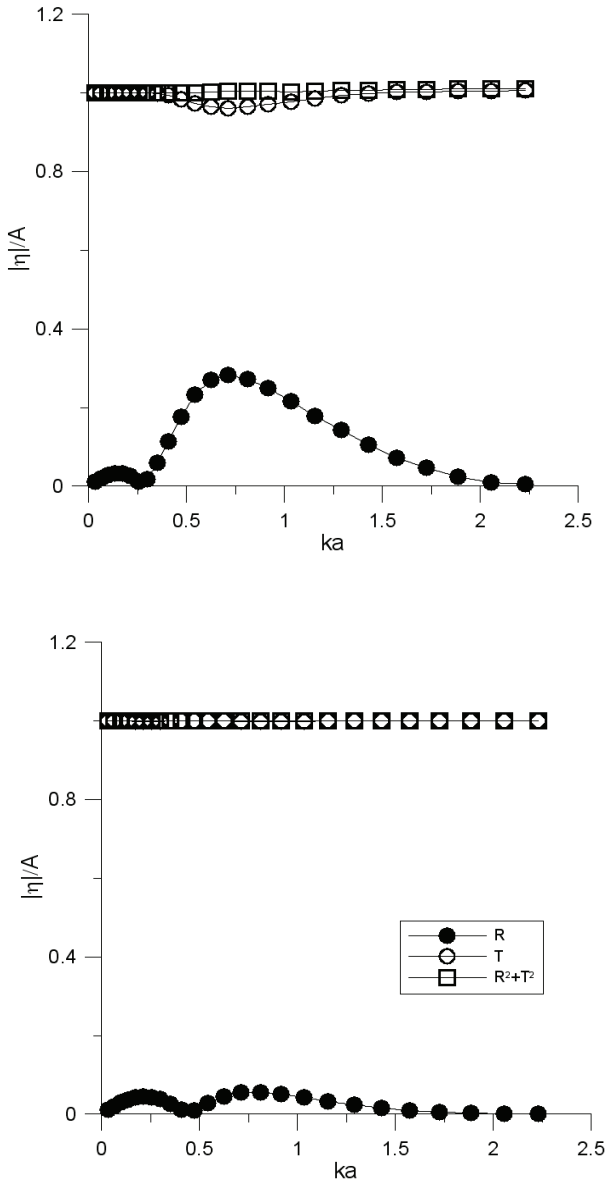


Fig. 4 Reflection and transmission coefficients for fixed submerged flat plate: $2a/d=0.6$, $b/d=0.2$, $h/d=0.25$ (upper), $h/d=0.5$ (lower)

3.2 가동식 잠수 방파제의 계산 결과

최적화된 방파제의 역할은 낮은 투과계수를 가지는데 있다 (Williams & McDougal, 1996). Fig. 4 에서와 같이 2차원 잠수 방파제가 완전 고정식일 경우 전 입사파장에 대한 파랑 감쇠 효과 (투과계수가 1보다 작음)는 상당히 제한적이며 그 크기도 상당히

작음을 알 수 있다. 또한 고정식 잠수 방파제의 3차원 계산 영역 해석의 경우 주위 파의 영향으로 투과 계수가 오히려 1보다 증가하는 경우를 알 수 있다(Lee & Choi, 2001). 따라서, 잠수된 방파제의 효과적인 파랑감쇠를 위해서는 완전 고정식이 아닌 가동식 방파제가 고려되어야 할 것이다.

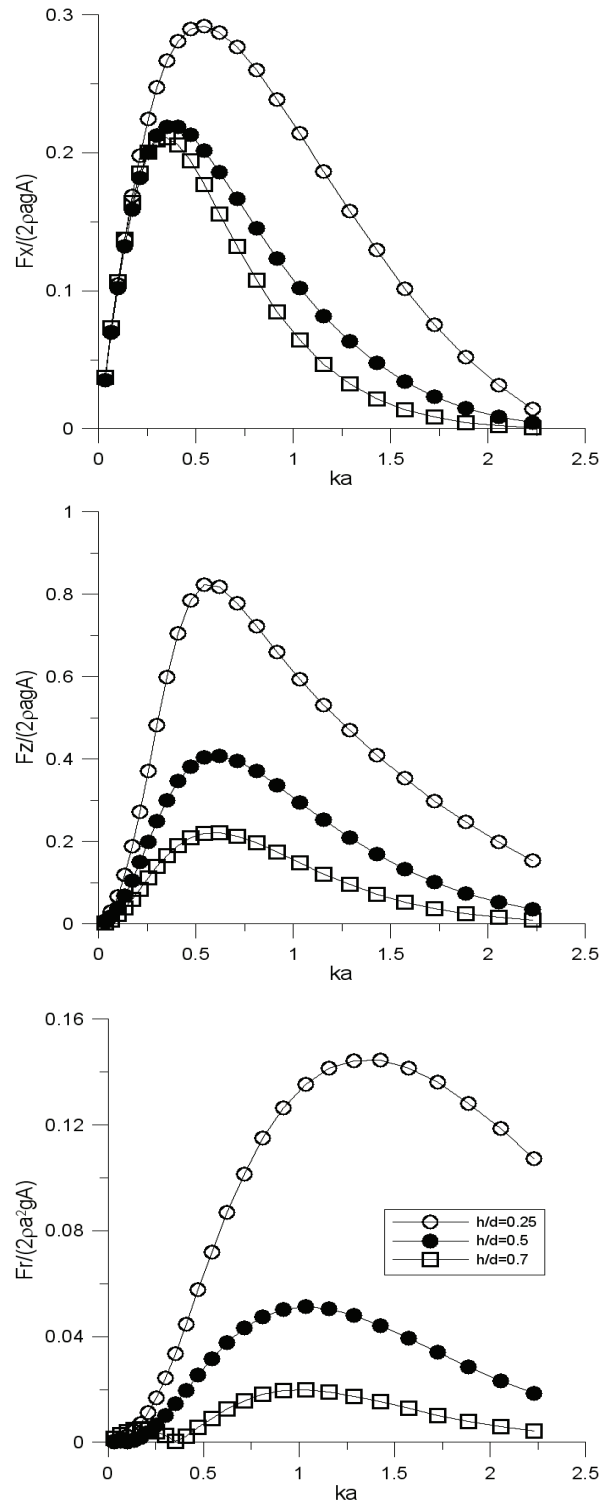


Fig. 5 Horizontal, vertical forces and moments for relative submergence ratios: $2a/d=0.6$, $b/d=0.2$

실용적 측면에서도 실제 해상에서 해중 구조물을 고정식으로 설치하기 위해서는 별도의 해저면구조물의 설치등 비용 추가와 구조물의 내구성 문제등이 발생한다. 그러므로 보다 실용적인 고찰을 위해서는 입사파에 의해 구조물이 운동하는 가동식 잠수 방파제를 주기 때문에 잠수 구조물의 운동성능을 해석할 필요가 있다. 구조물의 운동성능을 해석하기 위해 2절에서 정의한 운동방정식을 풀어야 한다. 이를 위해서는 구조물에 가해지는 파력과 유체동역학적 계수인 부가질량과 파랑감쇠계수를 경계값 문제의 방사 문제를 풀어서 계산해야 한다. 계산된 유체동역학적 계수들의 검증을 위하여 동일한 물리모형에 대해 고유함수 전개법(Williams & McDougal, 1996)으로 계산한 결과와 비교하였고, 높은 일치도를 보여주는 것을 Fig. 6을 통해 확인할 수 있다.

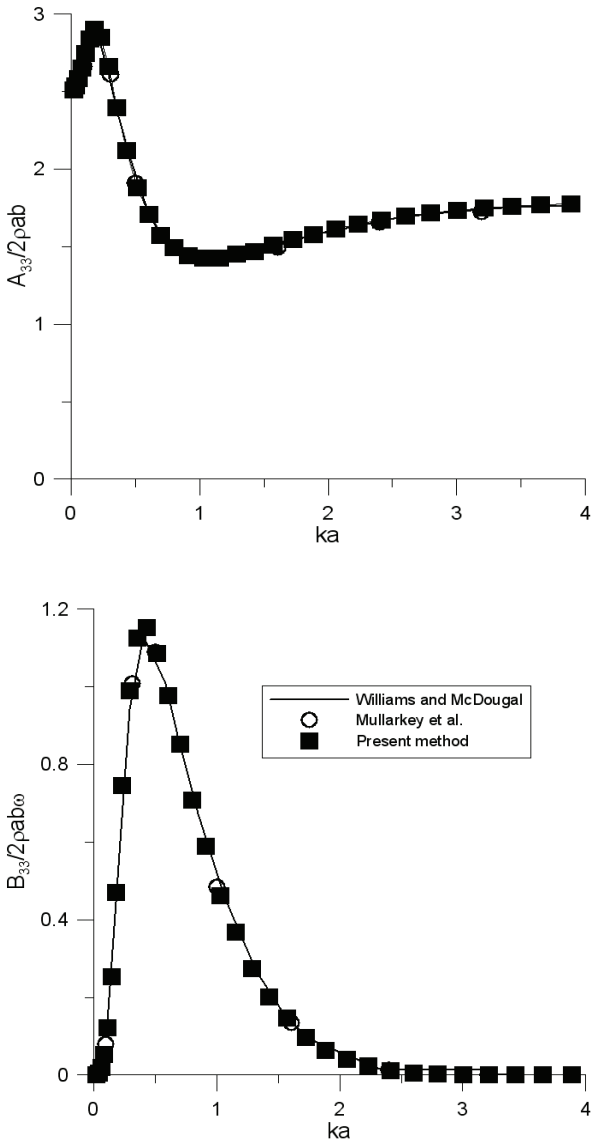


Fig. 6 Heave added mass(upper) and wave radiation damping coefficients(lower): $2a/d=0.2$, $h/d=0.1$, $b/d=0.1$

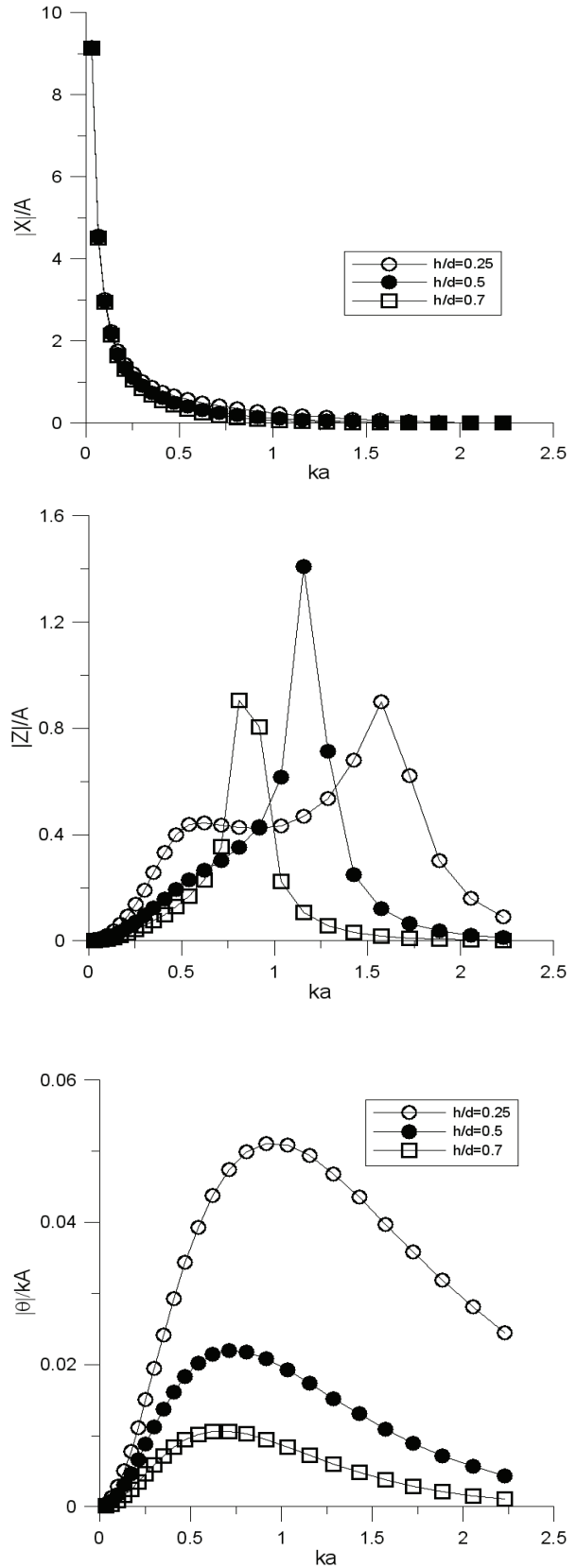


Fig. 7 Motion RAOs for relative submerged depth ratios: $2a/d=0.6$, $b/d=0.2$, $K/\rho gd=1.0$

Fig. 7은 2차원에서 3자유도 운동모드를 가진 잠수 구조물의 각 잠수 깊이에 따른 수평, 수직방향 운동응답과 회전운동 응답을 나타낸다. 본 계산결과에서 평판의 무게(Mg)는 평판이 받는 부력($2\rho g ab$)과 동일하다고 가정하였기 때문에 잠수상태에서 입사파의 영향을 받기 전에는 계류장치가 어떠한 선장력(pretension)도 걸리지 않는 상태이며, 파에 의한 구조물의 거동이 발생했을 경우에만 계류장치가 복원력을 발생시키게 된다. 계류식의 스프링상수 K 는 전체수심(d)과 유체의 밀도(ρ)와 중력가속도(g), 임의의 상수값에 대한 곱($K/\rho gd$)으로 정의하였는데, 본 계산에서는 전체수심의 깊이에 따른 충분한 복원력을 부여하기 위하여 이 상수를 1.0으로 정의하였다. 3자유도 운동을 하는 잠수된 방파제의 상하운동은 오직 평판이 받는 수직방향의 외력과 수직방향으로 작용하는 계류장치의 관계에 의해서만 작동한다. 방파제의 수평방향 운동응답은 장파(저주파수 파랑)영역에서 증가함을 알 수 있는데, 이는 장주기파의 수평변위가 크고 방파제 밀도가 해수와 동일하다는 가정하에 구조물이 물입자처럼 운동하기 때문이다.

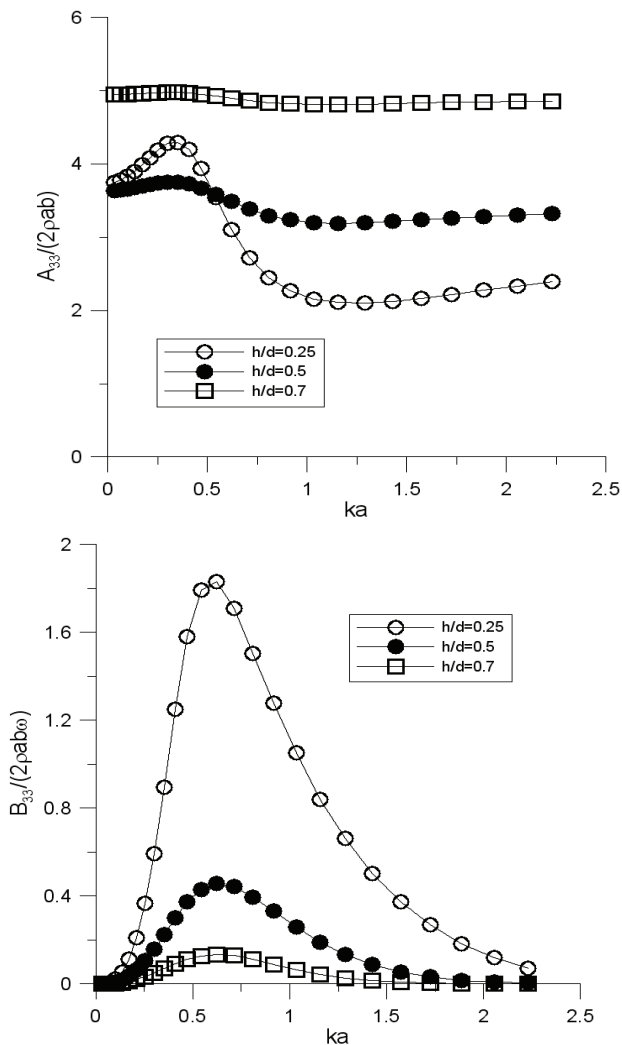


Fig. 8 Heave added mass(upper) and wave damping coefficients(lower) for relative submerged depth ratios: $2a/d=0.6$, $b/d=0.2$

또한 회전운동 응답의 경우 운동 변위의 크기는 고정식일 때 파로부터 받는 모멘트의 크기(Fig. 5)와 비례함을 알 수 있다. 수직방향 변위의 경우 잠수된 깊이에 따라 서로 다른 공진주파수 영역이 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 이는 Fig. 8의 유체동역학적 계수의 변화에 의한 것이라고 판단 된다.

서로 다른 잠수 깊이에 따른 구조물의 수직방향 변위는 부가 질량과 파랑 감쇠 계수의 변화에 영향을 받게 된다. Fig. 7에서 공진시 수직 방향 변위의 최대값은 오히려 $h/d = 0.5$ 에서 나타난다. 이는 잠수체가 더 얇은 잠수 깊이에서 파랑-구조물간의 상호작용 증가로 인해 더 큰 파력을 받게 되지만, 파랑감쇠계수가 또한 현저하게 증가하기 때문이다. 그리고 잠수된 수심이 얕을수록 자유표면의 영향 증가로 인한 부가 질량의 변화도 더 큰 것을 알 수 있다 (Fig. 8). 또 한가지의 특징은 장파에서는 부유체 운동에서 전형적으로 나타나는 수직운동응답의 수렴(heave RAO=1)이 나타나지 않고 오히려 급격히 감소하는 특징도 확인 할 수 있다 (Fig. 7).

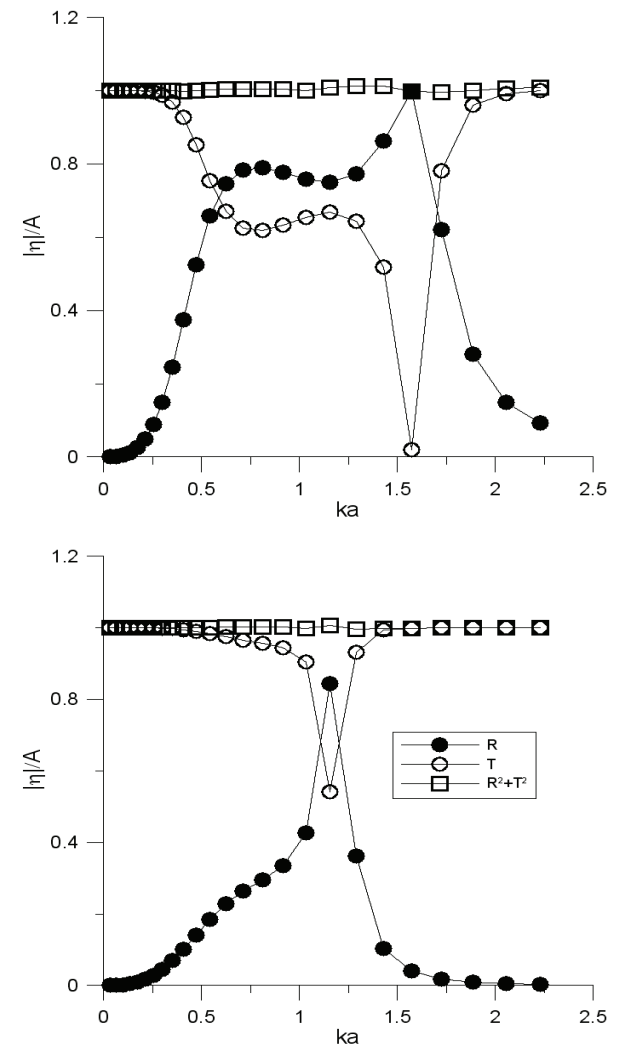


Fig. 9 Reflection and transmission coefficients for movable submerged breakwater with 3-degree of freedom: $a/d=0.6$, $b/d=0.2$, $K/\rho gt=1.0$, $h/d=0.25$ (upper), $h/d=0.5$ (lower)

Fig. 9는 3자유도 운동을 하는 평판형 잠수 구조물에서의 반사 계수와 투과계수를 나타낸 것이다. Fig. 4의 고정식 방파제와 비교했을 때 넓은 주파수 영역에서 큰 반사계수 (0.80이상) 와 이에 따른 낮은 투과계수 (0.60이하)를 나타내고 있다. 이는 구조물의 운동에 따라 파의 반사와 투과가 영향을 받기 때문이다. 또한 구조물의 운동이 클수록 그 영향의 크기는 증가한다. Fig. 9에서 나타나는 반사계수의 변화는 Fig. 7의 구조물의 수직 변위 변화와 매우 유사한 경향을 보임을 확인할 수 있다.

구조물의 운동과 반사/투과 계수의 상관관계를 보다 자세하게 분석하기 위해 각각의 독립적인 운동모드 (1자유도 운동) 에서의 결과를 Figs. 10~12에 나타내었다.

Fig. 10은 해중 구조물이 다른 운동모드는 고정된 상태에서 오직 수평운동만 가능한 상태에서의 반사 및 투과 계수, 그리고 이에 따른 수평방향운동변위를 나타낸다. Fig. 7의 3자유도 운동에서의 수평방향변위와 비교 했을 때 거의 같음을 알 수 있는데 이는 수평방향 변위의 경우 다른 운동모드의 영향을 거의 받고 장파장에서 높은 운동변위가 나타남을 알 수 있다. 반사/투과계수는 Fig. 4의 고정식 잠수 방파제의 결과와 유사한 경향을 보이지만 공진주파수 영역에서의 약간 큰 반사계수를 가지는 것을 알 수 있는데 이를 통해 수평방향 변위의 영향이 약간 존재함을 확인할 수 있다.

Fig. 11은 구조물이 회전운동만 가능한 상태에서의 계산 결과이다. 장파장에서의 운동변위가 3자유도일 때 비해 약간 증가하는 것 이외에는 전체적으로 비슷한 경향과 크기를 보인다. 반사 및 투과계수는 Fig. 10과 마찬가지로, Fig. 4의 고정식 방파제와 비슷한 경향을 볼 수 있다. 따라서 회전운동변위가 반사/투과 계수에 미치는 영향은 본 계산의 경우 상대적으로 매우 작음을 알 수 있다.

구조물이 수직방향의 운동만 가능할 때의 반사 및 투과 계수와 이에 상응하는 운동을 Fig. 12에 나타내었다.

반사 및 투과계수의 상대 크기는 3자유도 허용 구조물과 비슷하며 대체로 유사한 경향을 보인다. 앞에서 비교한 수평 및 회전 운동만 허용한 경우와 비교해 볼 때 수직 운동의 영향이 반사/투과 계수에 미치는 영향이 매우 큼을 알 수 있다. 또한 구조물의 수직운동의 경우는 다른 운동모드와 독립적이기 때문에 3자유도 운동 모드의 수직운동 결과 (Fig. 7)와 동일한 결과를 나타낸다.

그러므로 각 운동 방향의 1 자유도 운동 허용 모드의 경우를 종합해 볼 때 해중 잠수 평판형 방파제의 경우 구조물의 수직 운동이 반사 및 투과 계수에 미치는 영향이 가장 큰 것을 확인할 수 있다. 따라서 파 감쇠에 효과적인 가동식 방파제의 최적 설계를 위해서는 큰 수직 운동 응답을 발생시키고 이를 적절하게 제어해야 함을 알 수 있다. 본 연구는 유체의 점성 및 회전성으로 인한 파 감쇠 효과를 고려하지 않고 가동식 방파제의 운동제어를 통한 파-구조물간 상호작용의 증기를 통한 반사계수의 증가와 투과 계수의 감소를 고려하였다. 따라서 이러한 물리적 해양 유체 공학적 특성을 잘 이용할 경우 환경 친화적이면서 방파 효율이 우수한 신개념 방파제를 설계할 수 있으며 이는 기존 방파제를 대체 할 수 있는 좋은 방안이 될 수 있을 것이다.

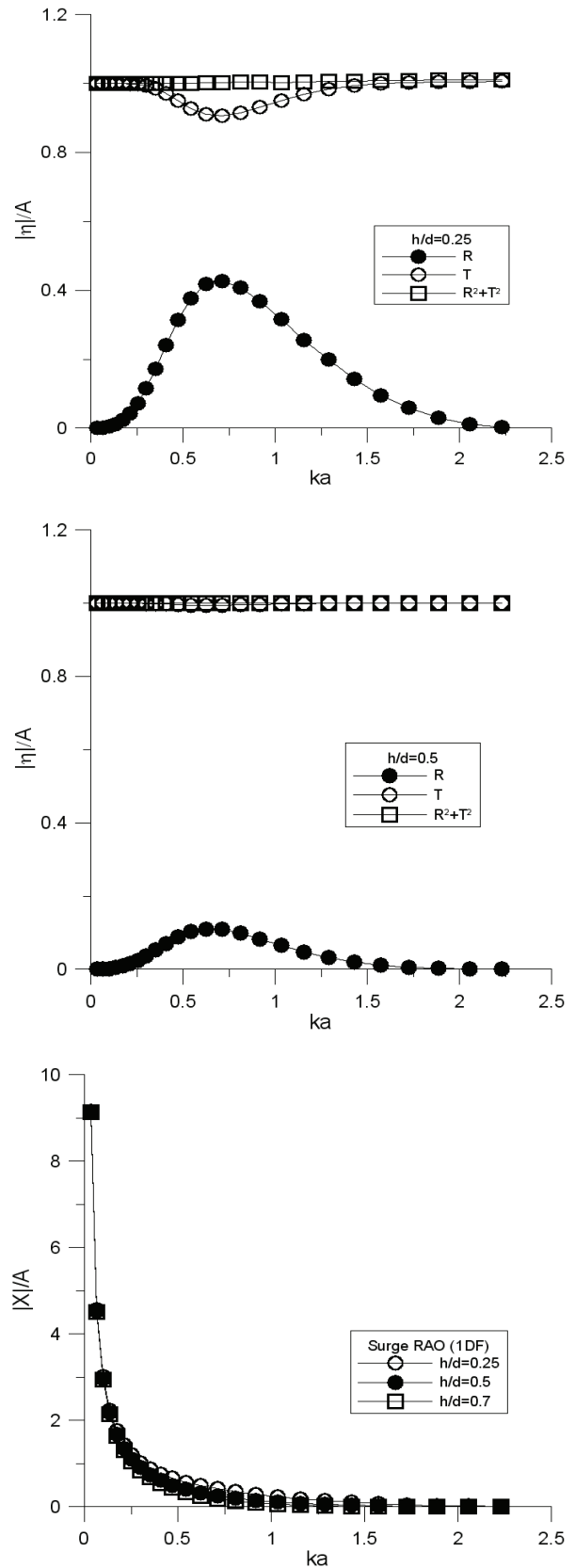


Fig. 10 Reflection, transmission coefficients and surge RAO with only horizontal motion allowable body: $2a/d=0.6, b/d=0.2, K/\rho gd=1.0$

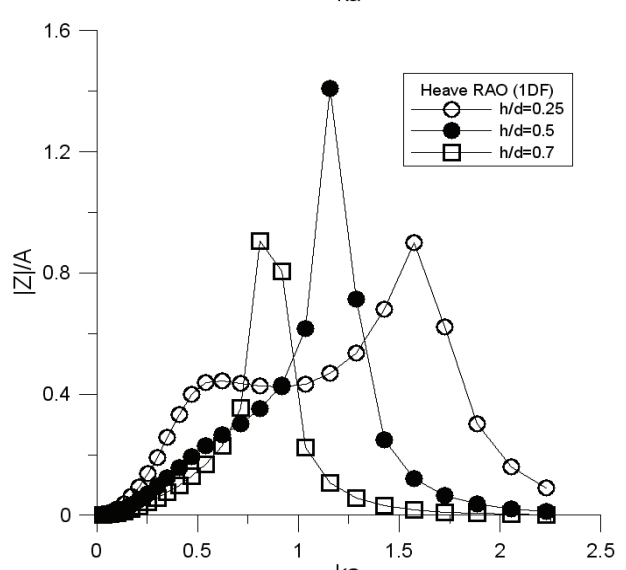
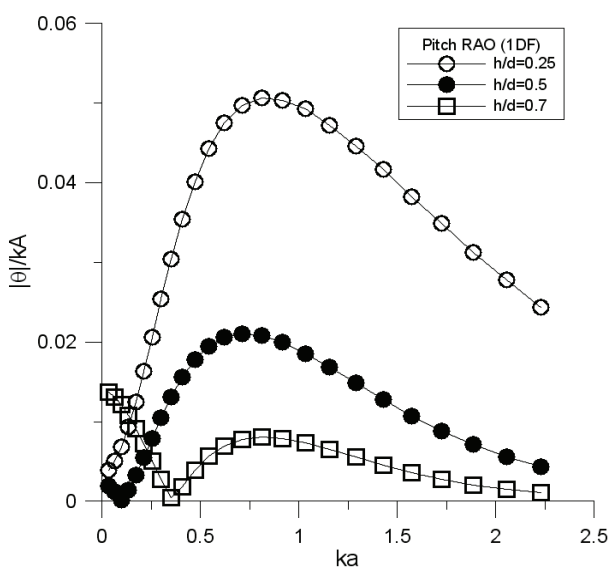
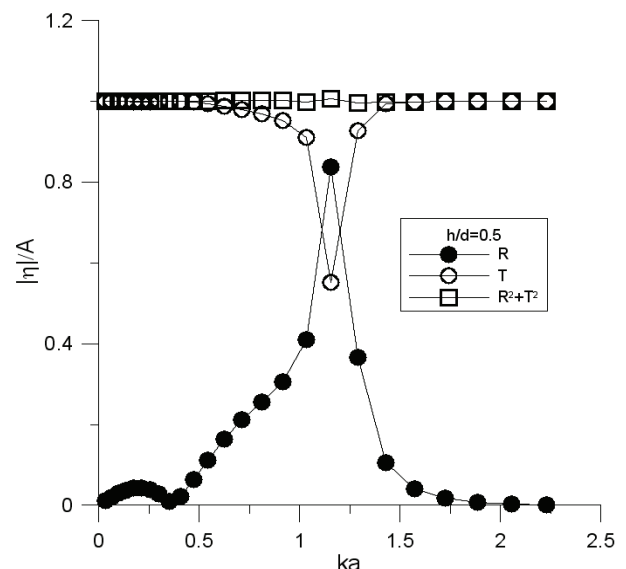
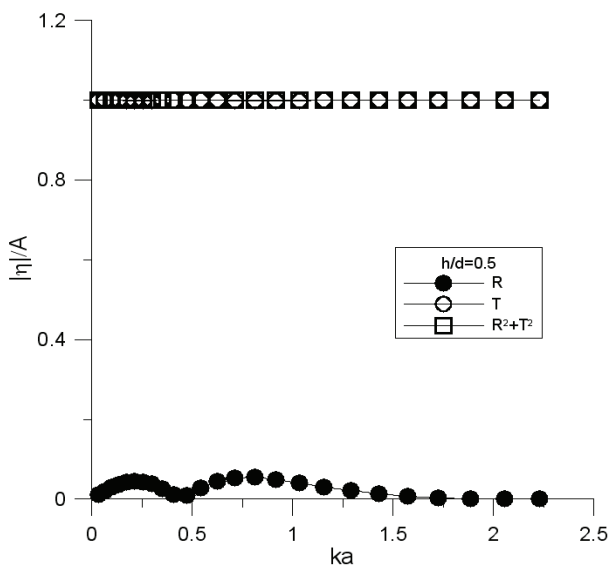
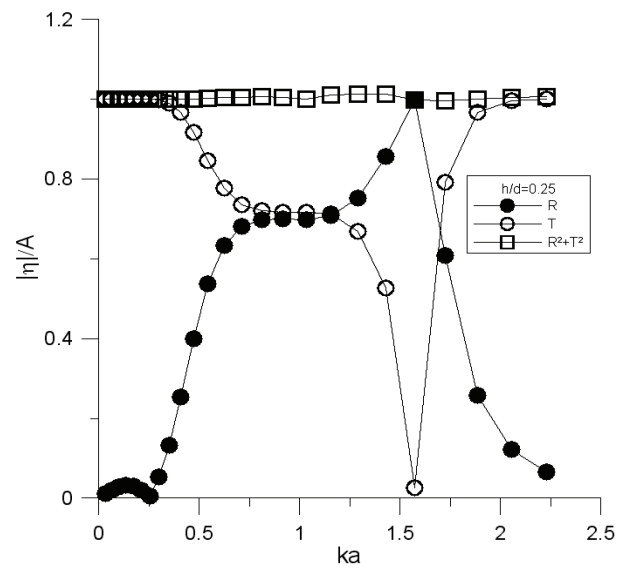
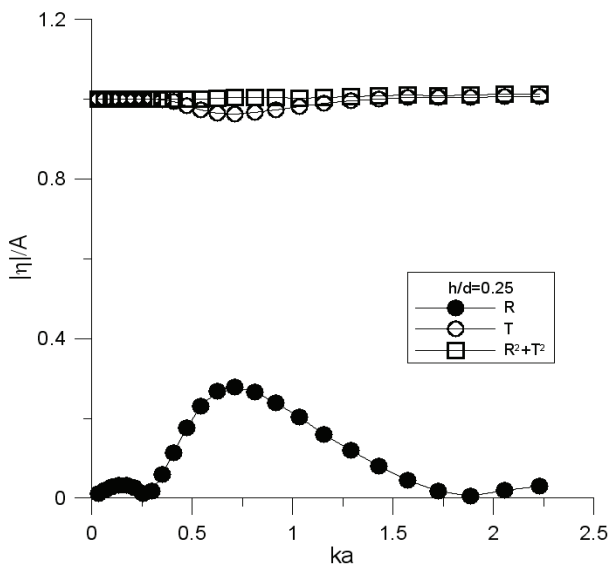


Fig. 11 Reflection, transmission coefficients and Pitch RAO with only rotational motion allowable body: $2a/d=0.6$, $b/d=0.2$, $K/\rho gd=1.0$

Fig. 12 Reflection, transmission coefficients and Heave RAO with only vertical motion allowable body: $2a/d=0.6$, $b/d=0.2$, $K/\rho gd=1.0$

4. 결론

주파수 영역의 2차원 경계 요소법을 이용하여, 잠수된 평판형 방파제의 산란문제를 해석하여, 잠수 깊이와 구조물의 운동에 따른 자유표면의 변위를 계산하여 입사파에 대한 방파 능력과 구조물에 미치는 파력을 조사하였다. 또한 잠수체의 각 운동 모드에 따른 반사 및 투과계수의 변화를 고찰하였다. 계산 결과의 유효성과 정확성을 확인하기 위하여, 기존의 이론 및 수치 계산 결과와 비교하였다.

2차원 계산영역에서 3자유도 운동이 모두 허용되는 가동식 잠수 방파제의 파랑감쇠 성능은 방파제의 수직방향 운동이 가장 큰 영향을 줌을 확인하였다. 또한 수평 및 회전 운동의 영향은 상대적으로 작지만, 장파장에서는 그 크기가 약간 증가함을 알 수 있었다.

해중 설치 방파제의 잠수 깊이가 얕을수록 파-구조물 상호작용의 증가로 인한 수직 방향의 파랑감쇠계수가 급격히 증가함을 알 수 있었고, 수직방향 변위의 경우 잠수된 깊이에 따라 서로 다른 공진주파수 영역이 나타나는 것을 확인 할 수 있었는데, 이는 자유표면의 영향 증가로 인한 부가 질량의 변화에 의한 것이라고 판단할 수 있다.

본 연구를 통해, 효과적인 방파능력을 가진 가동식 해중 평판형 방파제의 최적 설계를 위해서는 큰 수직 운동 응답을 발생시키고 이를 적절하게 제어해야 함을 알 수 있었다. 따라서 이러한 물리적 해양 유체 공학적 특성을 잘 이용할 경우 환경 친화적이면서 방파 효율이 우수한 신개념 방파제를 설계할 수 있으며 이는 기존 방파제를 대체 할 수 있는 좋은 방안이 될 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 2010년 울산대학교 연구비(과제번호: 2010-0511)에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

Brossard, J. & Chagdali, M., 2001. Experimental investigation of the harmonic generation by waves over a submerged plate. *Costal Engineering*, 42, pp.277-290.

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.

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.

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.

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.

Seiw, P.F. & Hurley, D.G., 1977. Long Surface Waves Incident on a Submerged Horizontal Plate. *Journal of Fluid Mechanics*, 83, pp.141-151.

Williams, A.N. & McDougal, W.G., 1996. A Dynamic Submerged breakwater. *Journal of Waterway port Coastal and Ocean Engineering*, 122(6), pp.288-296.

