한국해양공학회지 제25권 제1호, pp 1-7, 2011년 2월 (ISSN 1225-0767)

감쇠판이 부착된 원기둥의 동유체력 특성

조일형*
*제주대학교 해양시스템공학

Hydrodynamic Forces Characteristics of a Circular Cylinder with a Damping Plate

Il-Hyoung Cho*
Department of Ocean System Engineering, Jeju National University, Jeju, Korea

KEY WORDS: Hydrodynamic force 동유체력, Added mass 부가질량, Damping coefficient 감쇠계수, Eigenfunction expansion method 고유함수전개법, Damping plate 감쇠판

ABSTRACT: *The radiation of water waves by a heaving truncated circular cylinder with damping plate is solved in the frame of the three-dimensional linear potential theory. The damping plate has a distinct advantage in reducing the motion response of a floating circular cylinder by increasing the added mass and the damping coefficient. Using the matched eigenfunction expansion method, the characteristics of hydrodynamic added mass and the damping coefficient are investigated with various system parameters, such as the radius and submergence depth of the damping plate. It is found that both added mass and the damping coefficient are significantly increased due to the arranged features of the larger damping plate with shallow submergence, which are positive factors as a motion reduction device of the floating offshore platform. Also the numerical results for an oscillating submerged disk show that the added mass is negative and that the damping coefficient has a peak value at resonant frequency when submergence depth is sufficiently small.*

1. 서　　론

인장각식 구조물(TLP)이나 원통형(Spar) 구조물과 같은 해양구조물들은 입사파의 주파수와 구조물의 고유주파수가 일치될 때 공진현상을 경험한다. 공진으로 인한 대진폭 운동은 라이저나 계류시스템에 치명적인 손상을 가져올 수 있기 때문에 공진시 운동응답을 줄이기 위한 여러 가지 방안들이 제안되고 있다. 부유구조물의 운동응답을 줄이는 기본 개념은 방사 감쇠(Radiation damping)나 점성 감쇠(Viscous damping)를 증가시켜 시스템의 감쇠에너지를 높이거나 부가질량을 증가시켜 구조물의 고유주파수를 입사파의 주파수 범위 밖으로 이동시키는 것이다. 부가질량과 감쇠계수를 인위적으로 증가시키기 위하여 부유구조물에 나선형이나 원판 부착물을 설치한다. 이와같이 부유체의 운동을 저감시키는 목적으로 구조물에 부착하는 부가물을 감쇠판(Damping plate)이라 부른다.

부유구조물의 운동에 의한 동유체력 해석은 오래 전부터 많은 학자들에 의해 연구가 선행되어 왔다. Havelock(1955)은 수면위에 떠 있는 구에 대한 부가질량과 감쇠계수를 다중폴전개법(Multipole expansion method)을 사용하여 해석하였다. Mei and Black(1969)는 수면위에 떠 있는 2차원 사각형 구조물에 대한 방사문제와 회절문제를 풀었다. 경사 입사파와 2차원 사각형 구조물에 대한 상호작용문제는 Abul-Azm and Gesraha(2000)와 조일형과 표상우(2009)에 의해 해석되었다. 수면위에 떠 있는 원기둥에 대한 산란문제는 Garrett(1971)의해 다루어 졌고 방사문제는 Tung(1979)과 McIver and Evans(1984)에 의해 해석되었다. 또한 두께를 무시한 원판이 수면상에 놓여 있을 때와 수면아래 잠겨 있을 때, 수직운동에 의한 부가질량과 감쇠력에 대한 연구가 수행되었다(Miles, 1987; Yu and Chwang, 1993; Chwang and Wu, 1994; Linton and McIver, 2001). 이상의 연구들은 점성을 무시한 포텐셜 이론에 기반을 두었기 때문에 와류생성에 기인한 점성 감쇠를 무시한 방사 감쇠만을 고려하였다.

점성 감쇠를 다룬 연구로 Thiagarajan and Troesch(1988)는 PIV(Particle image velocimetry)기법을 이용하여 수면아래 잠긴 원판이 수직방향으로 운동할 때 발생하는 와류유동을 관찰하고, 원판으로부터 떨어져 나가는 와류의 패턴은 Keulegan-capenter 수, 원판의 형상, 그리고 잠긴깊이에 밀접한 관련이 있음을 밝혔다. Tao and Cai(2004)는 원기둥 밑면에 원형 감쇠판이 부착되어 있는 경우, 수직운동에 의한 와류생성문제를 Navier stokes 방정식을 유한차분법으로 풀어 수치해석하였다.

본 연구에서는 감쇠판이 부착된 원기둥이 수면아래 일정 깊이 잠긴 상태에서 수직운동을 할 때 구조물에 작용하는 동유체력(부가질량, 감쇠계수)을 고유함수전개법을 사용하여 해석하였다. 유체영역을 3개의 영역으로 나누어 각 영역에서 해를 독립적으로 구한 뒤 각 영역이 만나는 경계면에서 정합조건식을 적용하여 완전한 해를 구하였다. 감쇠판의 크기와 잠긴깊이 변화에 따른 동유체력의 특성을 살펴보았다. 본 해석결과는 부유식 해양구조

교신저자 조일형: 제주시 제주대학로 66, 064-754-3482, cho0904@jejunu.ac.kr

물 설계시 운동응답을 줄이는 목적으로 설치되는 감쇠판의 크기와 잠긴깊이를 설계하는데 기초자료로 활용될 것이며 특히 공진응답을 저감시키는데 큰 도움을 줄 것이다.

2. 문제의 정식화

본 연구에서는 반지름 b, 잠긴깊이 d인 원기둥 밑면에 반경 a인 원형 감쇠판(Damping plate)을 붙인 계산모델에 대하여 수직운동에 의한 동유체력(부가질량, 감쇠력)을 계산하였다. 극좌표계(r, θ, z)를 도입하고 원점은 수면위에 놓여 있으며, z축의 양의 방향을 연직 상향으로 잡았다. 수심은 h로 일정하며, 원기둥의 바닥과 해저면 사이의 간격은 $c=h-d$이다. 선형 포텐셜이론을 가정하여 속도포텐셜을 도입하고 감쇠판이 부착된 원기둥이 운동주파수 ω을 갖고 수직방향으로 조화운동을 한다면 속도포텐셜을 시간과 공간의 함수로 분리하여 $\Phi(r, \theta, z, t)=R\{\Psi(r, \theta, z)e^{-i\omega t}\}$로 쓸 수 있다. 계산모델은 축대칭 구조이므로 포텐셜은 θ와 무관하다. 따라서 U를 수직방향 속도의 복소진폭이라 하면 $\Psi(r, \theta, z)=U\phi(r, z)$이다.

고유함수전개법을 사용하기 위하여 유체영역을 Fig. 1과 같이 영역(I), 영역(II), 영역(III)으로 나눈다. 영역(I)은 $r>a$, $-h<z<0$, 영역(II)는 $b<r<a$, $-d<z<0$, 영역(III)은 $r<a$, $-h<z<-d$으로 정의된다.

Laplace 방정식과 함께 자유표면, 해저면, 방사 경계조건식을 만족하는 영역 (I)의 속도포텐셜은 다음과 같다.

$$\phi_1=\sum_{n=0}^{\infty}B_n\frac{K_0(k_{1n}r)}{K_0(k_{1n}a)}\psi_{1n}(z), \tag{1}$$

여기서 $n=0$는 진행파(Propagating waves)를 나타내며, $n\geq 1$은 원기둥 주위에만 존재하는 비진행파(Evanescent waves) 성분을 나타낸다. K_0는 변형된 제 2종 Bessel 함수이다. 영역(I)에서의 고유값($k_{10}=-ik_1$, k_{1n}, $n=1, 2, \cdots$)은 선형분산식($k_{1n}\tan k_{1n}h=-\omega^2/g$)을 만족하며, 고유함수 $\psi_{1n}(z)$은 다음과 같이 정의된다.

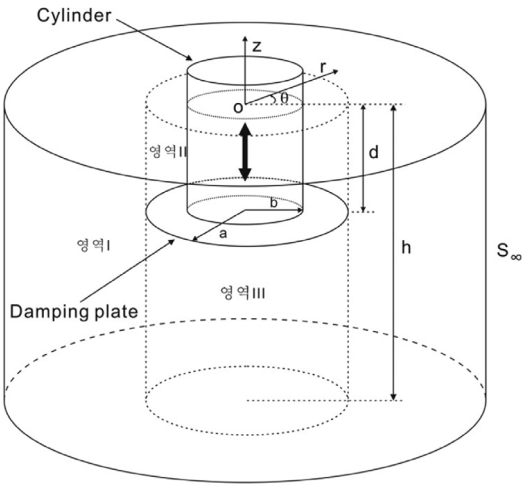


Fig. 1 Definition sketch of a oscillating circular cylinder with damping plate

$$\psi_{1n}(z)=N_{1n}^{-1}\cos k_{1n}(z+h), \qquad n=0,1,2,... \tag{2}$$

$$N_{1n}^2=\frac{1}{2}\left(1+\frac{\sin 2k_{1n}h}{2k_{1n}h}\right).$$

영역(I)에서의 고유함수 $\psi_{1n}(z)$는 아래와 같은 직교성(Orthogonality)을 만족한다.

$$\frac{1}{h}\int_{-h}^{0}\psi_{1m}(z)\psi_{1n}(z)dz=\delta_{mn}, \tag{3}$$

여기서 δ_{mn}는 $m=n$일 때 $\delta_{mn}=1$, $m\neq n$일 때 $\delta_{mn}=0$으로 정의된 Kronecker delta이다.

영역(II)는 Laplace 방정식과 자유표면경계조건식 그리고 감쇠판($z=-d$)에서의 경계조건식($\partial\phi_2/\partial z=1$)과 원기둥 벽면($r=b$)에서의 경계조건식($\partial\phi_2/\partial n=0$)을 만족한다. 주어진 경계조건식들을 만족하는 영역(II)에서의 속도포텐셜은 다음과 같다.

$$\phi_2=\phi_{2P}+\sum_{n=0}^{\infty}C_n\left[I_0(k_{2n}r)-\frac{I_0'(k_{2n}b)}{K_0'(k_{2n}b)}K_0(k_{2n}r)\right]\psi_{2n}(z), \tag{4}$$

여기서 I_0는 변형된 제 1종 Bessel 함수이다. 영역(II)에서의 고유값($k_{20}=-ik_2$, k_{2n}, $n=1, 2, \cdots$)은 선형분산식($k_{2n}\tan k_{2n}d=-\omega^2/g$)을 만족하며, 고유함수 $\psi_{2n}(z)$은 다음과 같이 주어진다.

$$\psi_{2n}(z)=N_{2n}^{-1}\cos k_{2n}(z+d), \qquad n=0,1,2,... \tag{5}$$

$$N_{2n}^2=\frac{1}{2}\left(1+\frac{\sin 2k_{2n}d}{2k_{2n}d}\right).$$

영역(I)의 고유함수와 같이 고유함수 $\psi_{2n}(z)$는 다음과 같은 직교성(Orthogonality)을 만족한다.

$$\frac{1}{d}\int_{-d}^{0}\psi_{2m}(z)\psi_{2n}(z)dz=\delta_{mn}, \tag{6}$$

감쇠판에서의 경계조건식($\partial\phi_2/\partial z=1$)을 만족하는 영역(II)의 특별해(Particular solution)는 아래와 같이 주어진다.

$$\phi_{2P}=\left(z+\frac{1}{K}\right). \tag{7}$$

여기서 $K=\omega^2/g$이다.

영역(III)에서의 속도포텐셜은 감쇠판에서의 제차 경계조건식($\partial\phi_3/\partial z=0$)을 만족하는 제차해(Homogeneous solution)와 감쇠판에서의 경계조건식($\partial\phi_3/\partial z=1$)을 만족하는 특별해의 합으로 아래와 같이 표현된다.

$$\phi_3=\phi_{3P}+\sum_{n=0}^{\infty}\varepsilon_n A_n\frac{I_0(\lambda_n r)}{I_0(\lambda_n a)}\cos\lambda_n(z+h), \tag{8}$$

여기서 ε_n은 $n=0$일 때 1을 갖고, $n\geq 1$일 때 2를 갖는 Neumann 기호이며, 영역(III)에서의 고유치는 $\lambda_n=n\pi/c$, ($n=0$, 1, 2..이다. 식 (8)에서 특별해는 아래와 같이 주어진다.

$$\phi_{3P}=\frac{1}{2c}\left((z+h)^2-\frac{r^2}{2}\right). \tag{9}$$

식 (1), (4), (8)의 미지수 A_n, B_n, C_n($n=0, 1, 2, \cdots$)는 $r=a$에서 인접한 영역의 속도포텐셜과 수평방향 속도가 서로 같다는 정합조건식으로부터 구해진다. $r=a$에서 속도포텐셜이 서로 같다는 정합조건식으로부터 아래와 같은 방정식을 얻을 수 있다.

$$\sum_{n=0}^{\infty}B_n\psi_{1n}(z)=\begin{cases}\phi_{2P}+\sum_{n=0}^{\infty}C_nS_n\psi_{2n}(z), & -d<z<0,\\ \phi_{3P}+\sum_{n=0}^{\infty}\varepsilon_nA_n\cos\lambda_n(z+h), & -h<z<-d.\end{cases} \tag{10}$$

여기서 $S_n=[I_0(k_{2n}a)K'_0(k_{2n}b)-I'_0(k_{2n}b)K_0(k_{2n}a)]/K'_0(k_{2n}b)$이다.

윗식의 양변에 $\{\cos\lambda_m(z+h);\ m=0, 1, 2, \cdots\}$를 곱하고 $-h$부터 $-d$까지 z에 대하여 적분하면 다음식을 얻을 수 있다.

$$g_m+A_m=\sum_{n=0}^{\infty}B_nG_{mn},\quad m=0,1,2,..., \tag{11}$$

여기서

$$g_m=\frac{1}{c}\int_{-h}^{-d}\phi_{3P}(a,z)\cos\lambda_m(z+h)dz=\begin{cases}\frac{1}{2}\left(\frac{c}{3}-\frac{a^2}{2c}\right), & m=0,\\ (-1)^m c/m^2\pi^2, & m\geqq 1,\end{cases}$$

$$G_{mn}=\frac{1}{c}\int_{-h}^{-d}\cos\lambda_m(z+h)\psi_{1n}(z)dz=\frac{(-1)^m k_{1n}\sin k_{1n}c}{N_{1n}c(k_{1n}^2-\lambda_m^2)}.$$

식 (10)의 양변에 $\{\psi_{2m},\ m=0, 1, 2, \cdots\}$를 곱하고 $-d$부터 0까지 z에 대하여 적분하면 또 다른 대수방정식을 얻을 수 있다.

$$h_m+S_mC_m=\sum_{n=0}^{\infty}B_nH_{mn},\quad m=0,1,2,..., \tag{12}$$

여기서

$$h_m=\frac{1}{d}\int_{-d}^{0}\phi_{2P}(a,z)\psi_{2m}(z)dz=\frac{\cos k_{2m}d+k_{2m}\sin k_{2m}d/K-1}{N_{2m}k_{2m}^2d},$$

$$H_{mn}=\frac{1}{d}\int_{-d}^{0}\psi_{1n}(z)\psi_{2m}(z)dz,\quad m=0,1,2,...,.$$

$r=a$에서 두 영역의 수평방향 속도가 서로 같다는 정합조건식은 다음과 같다.

$$\frac{1}{h}\sum_{n=0}^{\infty}B_nq_n\psi_{1n}(z)=\begin{cases}\frac{1}{d}\sum_{n=0}^{\infty}C_nw_n\psi_{2n}(z), & -d<z<0,\\ -\frac{a}{2c}+\frac{2}{c}\sum_{n=1}^{\infty}A_np_n\cos\lambda_n(z+h), & -h<z<-d.\end{cases} \tag{13}$$

여기서

$$p_n=\frac{\lambda_nc I_0'(\lambda_na)}{I_0(\lambda_na)},\ q_n=\frac{k_{1n}hK_0'(k_{1n}a)}{K_0(k_{1n}a)},$$ 이다.

$$w_n=\frac{k_{2n}d\left[I_0'(k_{2n}a)K_0'(k_{2n}b)-I_0'(k_{2n}b)K_0'(k_{2n}a)\right]}{K_0'(k_{2n}b)}$$

식 (13)의 양변에 $\psi_{1m}(z)$를 곱하고 z에 대해 $-h$에서 0까지 적분하면 다음식을 얻는다.

$$B_mq_m=\sum_{n=0}^{\infty}C_nw_nH_{nm}-\frac{a}{2}G_{0m}+2\sum_{n=1}^{\infty}A_np_nG_{nm},\ m=0,1,2,... \tag{14}$$

식 (11)과 (12)를 이용하면 A_m, C_m는 아래와 같이 표현된다.

$$A_m=\sum_{l=0}^{\infty}B_lG_{ml}-g_m,\quad m\geqq 0, \tag{15}$$

$$C_m=\frac{\sum_{l=0}^{\infty}B_lH_{ml}-h_m}{S_m},\quad m\geqq 0.$$

식 (15)를 식 (14)에 대입하여 정리하면 미지수 B_m에 대한 대수방정식을 구할 수 있다.

$$B_m+\sum_{n=0}^{\infty}\frac{F_{mn}}{q_m}B_n=\frac{X_m}{q_m},\quad m=0,1,2,.... \tag{16}$$

여기서

$$F_{mn}=-\sum_{l=0}^{\infty}\frac{w_lH_{ln}H_{lm}}{S_l}-2\sum_{l=1}^{\infty}p_lG_{ln}G_{lm},$$

$$X_m=-\frac{a}{2}G_{0m}-\sum_{l=0}^{\infty}\frac{h_lw_lH_{lm}}{S_l}-2\sum_{l=1}^{\infty}g_lp_lG_{lm}.$$

위의 대수방정식을 풀어 미지수 B_m을 구한다. 대수방정식을 수치적으로 풀기 위하여 고유함수의 개수를 N개 취한다.

감쇠판이 부착된 원기둥의 수직운동에 의한 동유체력은 영역(II)와 영역(III)의 동압력의 차를 적분하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_3=2i\pi\omega\rho\left\{\int_0^a r\phi_3(r,-d)dr-\int_b^a r\phi_2(r,-d)dr\right\}. \tag{17}$$

동유체력을 허수부와 실수부로 분리하여 각각을 부가질량과 감쇠력이라 부른다.

$$\mu=Im\left\{\frac{F_3}{\omega}\right\},\ \nu=-Re\{F_3\}. \tag{18}$$

3. 계산결과 및 고찰

고유함수전개법을 사용하여 얻은 해석해의 수렴도를 살펴보기 위하여 고유함수의 개수(N)를 증가시키면서 무차원화된 부가질량과 감쇠계수의 수렴도의 결과를 2개의 운동주파수 $\omega^2h/g=2.0$, 5.0에 대하여 Table 1에 정리하였다. 고유함수 개수가 증

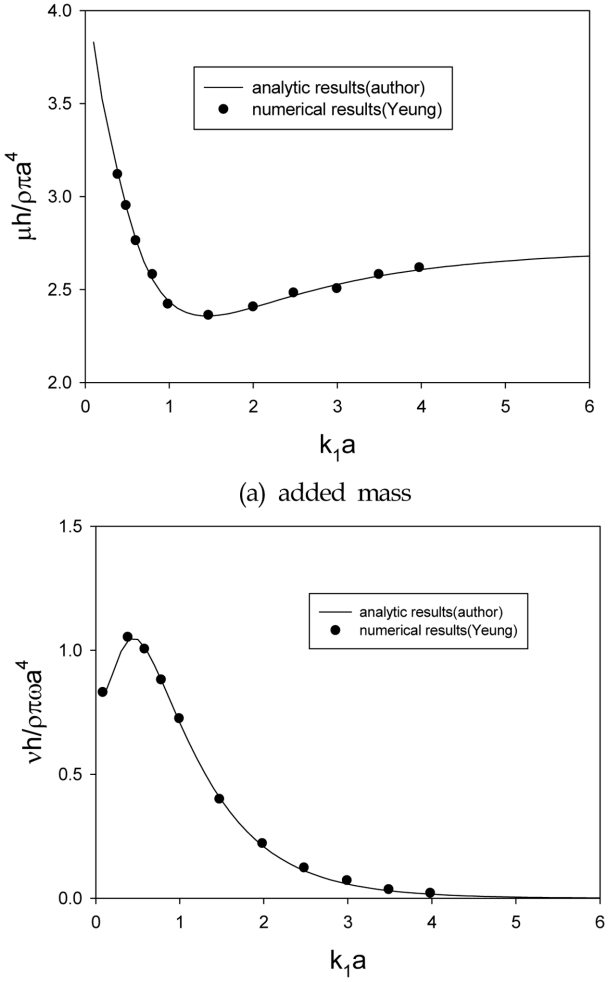
가함에 따라 부가질량은 증가하면서, 감쇠계수는 감소하면서 일정한 값에 수렴하나 감쇠판 양 끝단 가까이에서 발생하는 속도값의 특이 거동(Singular behavior)으로 고유함수의 개수 증가에 따른 수렴도는 상당히 느리다. 따라서 많은 고유함수 개수가 필요하다. 본 연구에서는 Table 1을 참조하여 소수점 이하 2자리까지 같은 결과를 주도록 고유함수 개수를 50개로 잡았고 이후 모든 계산에 같은 값을 적용하였다. 수렴도를 향상시키기 위해서는 감쇠판 양 끝단에서의 특이 거동을 정확히 구현하는 해석방법이 필요하며 Evans and Porter(1996)는 Galerkin 방법을 사용하여 수렴도를 크게 향상시켜 한자리 수의 고유함수 개수로 소수점 이하 4자리까지 정확한 해를 구하였다.

Table 1 Convergence test of (μ, ν) with the number of eigenfunctions (N) for $h/b = 5.0$, $d/h = 0.1$, $a/b = 1.5$

N	$\mu/\rho b^3$	$\nu/\rho\omega b^3$	$\mu/\rho b^3$	$\nu/\rho\omega b^3$
	$\omega^2 h/g = 2.0$		$\omega^2 h/g = 5.0$	
10	5.72731	0.13729	6.12598	0.23236
20	5.87715	0.12471	6.31213	0.28111
30	5.93913	0.11965	6.38376	0.30108
40	5.97238	0.11697	6.42132	0.31182
50	5.99304	0.11532	6.44442	
60	5.99812	0.11598	6.44953	0.31920

본 해석결과의 타당성을 검증하기 위하여 일정깊이 잠긴 원기둥에 대한 Yeung(1981)의 수치계산결과와 비교하였다. 현재의 계산모델에서 $a = b$이면 감쇠판이 없는 반경 b인 원기둥이 된다. 수심은 20m이며, 잠긴깊이는 2.0m, 원기둥의 반지름은 4.0m이다. 실선은 현재의 고유함수전개법을 이용한 해석결과이며, 동그라미는 Yeung(1981)의 수치계산결과이다. 무차원화된 부가질량과 감쇠계수 모두 서로 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다.

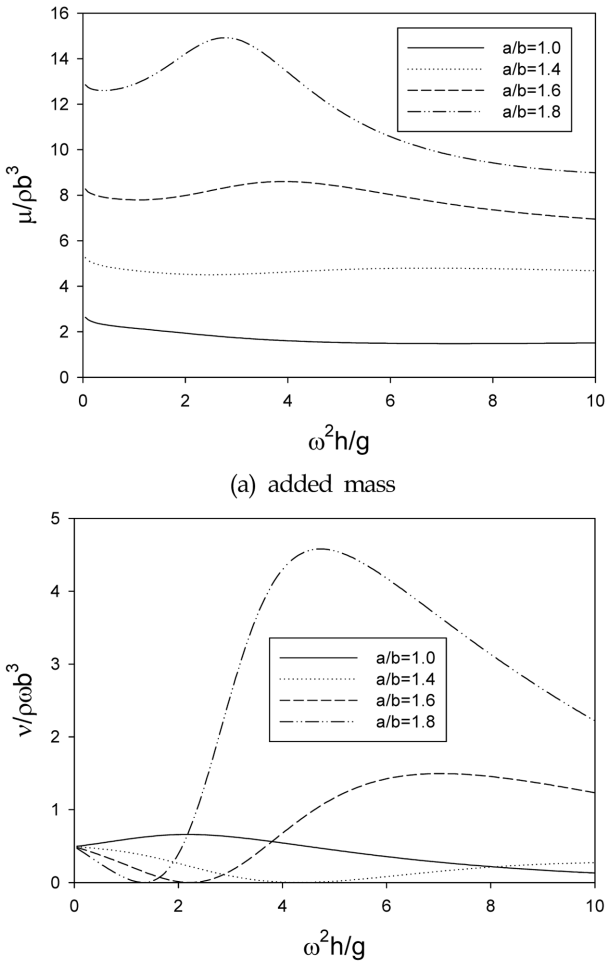
Fig. 3은 원기둥의 반지름은 고정시키고 원형 감쇠판의 반지름을 점점 증가시켰을 때 무차원화된 부가질량과 감쇠계수를 보여주고 있다. 수심과 원기둥 반지름의 비(h/b)는 5.0이며, 무



(a) added mass

(b) damping coefficient

Fig. 2 Comparison of added mass and damping coefficients from present solutions with Yeung's numerical results (h = 20 m, d = 2.0 m, $a = b$ = 4.0 m)



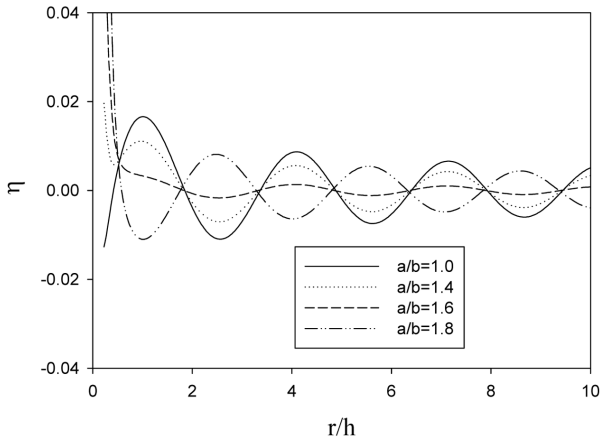
(a) added mass

(b) damping coefficient

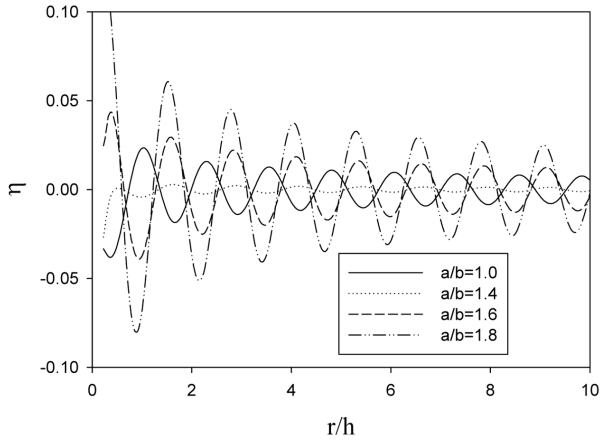
Fig. 3 Non-dimensional added mass and damping coefficient due to a oscillating circular cylinder with damping plate as function of $\omega^2 h/g$ and a/b for $h/b = 5.0$, $d/h = 0.1$

차원화된 잠긴깊이(d/h)는 0.2이다. 4개의 a/b에 대하여 계산을 수행하였는데 $a/b=1.0$인 경우는 감쇠판이 없는 원기둥을 나타낸다. 운동주파수(ω^2h/g)가 0부터 10까지 변할 때 예상대로 부가질량은 감쇠판의 크기가 커질수록 일정하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 감쇠계수는 다소 복잡한 경향을 보여주고 있다. $a/b=1.4$을 살펴보면 감쇠판을 설치하였을 때 오히려 감쇠계수가 줄어드는 예상치 못한 결과를 얻었다. 그러나 감쇠판의 반경이 증가하여 $a/b=1.6$인 경우를 보면 $\omega^2h/g=4.0$보다 작은 저주파수 영역에서는 감쇠판의 설치로 감쇠계수를 줄어드나 $\omega^2h/g=4.0$보다 큰 고주파수 영역에서는 감쇠계수는 증가한다. 감쇠판의 크기가 더욱 커진 $a/b=1.8$인 경우를 살펴보면 $\omega^2h/g=2.0$보다 큰 고주파수 영역에서 큰 폭의 감쇠계수의 증가를 보여주고 있다. 이는 감쇠판의 반경이 상대적으로 작을 때는 감쇠판과 원기둥 사이의 상호작용으로 인하여 오히려 감쇠판이 없을 때보다 운동으로 생성된 방사파의 진폭이 줄어들어 감쇠계수는 줄어든다. 그러나 감쇠판의 반경이 어느 값 이상이 되면 방사파의 진폭이 커져 감쇠계수는 크게 증가하는 경향을 보여주는데 특히 고주파수 영역에서 뚜렷이 나타난다. 이러한 계산결과로부터 감쇠판의 반경을 충분히 크게 잡아야 부유체의 수직운동을 저감시키는 의도했던 목적을 달성할 수 있다. 또한 운동주파수가 낮은 경우에 감쇠판의 설치는 오히려 감쇠계수를 줄이는 결과를 준다.

Fig. 3에서 살펴본 감쇠판의 크기 변화에 따른 감쇠계수의 특징을 원기둥으로부터 방사되는 파형을 가지고 Fig. 4에서 살펴보았다. Fig. 3과 같은 계산조건하에서 원기둥의 중심으로부터 멀어진 거리(r/h)에 따라 파형을 그렸다. 본 계산모델은 축대칭 구조이므로 방사 파형은 θ와는 무관하다. Fig. 4a는 무차원화된 운동주파수(ω^2h/g)가 2.0이며, Fig. 4b는 $\omega^2h/g=5.0$으로 상대적으로 짧은 주기로 수직운동을 하였을 때의 결과이다. y축은 단위 속도를 갖고 수직운동을 하였을 때의 원기둥으로부터 방사하는 파형을 나타낸다. Fig. 4를 Fig. 3의 계산결과와 함께 살펴본다면 저주파수 영역에 속하는 $\omega^2h/g=2.0$일 때의 방사파의 진폭은 감쇠판의 부착으로 오히려 줄어드는 것을 볼 수 있다. 그러나 상대적으로 고주파수 영역에 속한 $\omega^2h/g=5.0$로 수직운동을 시켰을 때는 감쇠판이 크기가 작을 때($a/b=1.4$)의 방사파의 진폭은 감쇠판이 없을 때보다도 작으나 감쇠판의 크기가 증

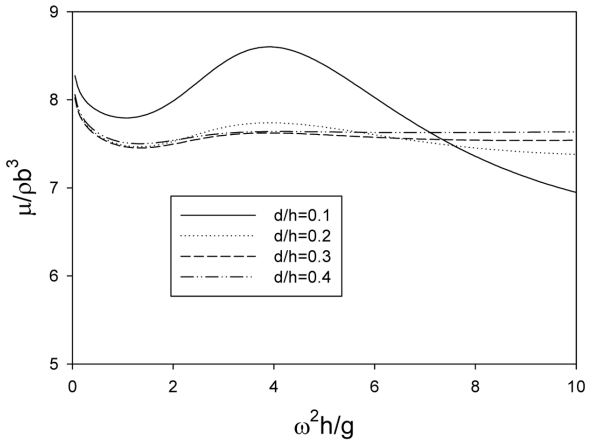


(a) $\omega^2h/g=2.0$

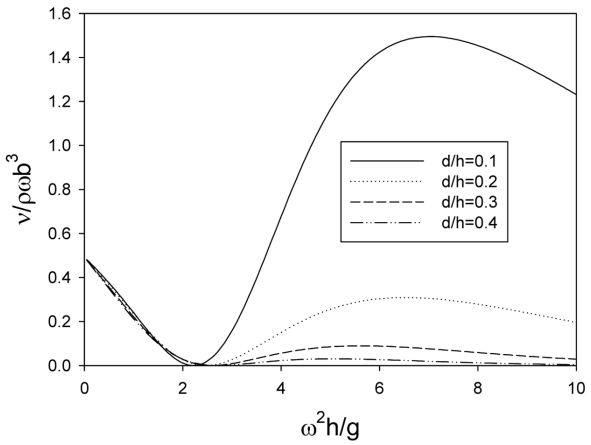


(b) $\omega^2h/g=5.0$

Fig. 4 The radiated wave profile from a oscillating circular cylinder with damping plate as function of ω^2h/g and a/b for $h/b=5.0$, $d/h=0.1$



(a) Added mass

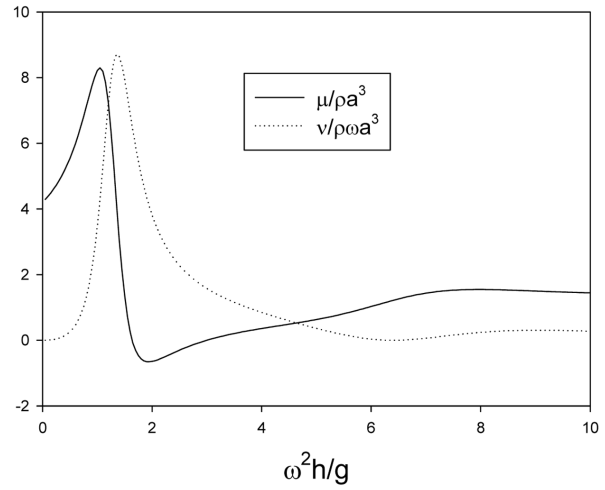


(b) Dampaing coefficient

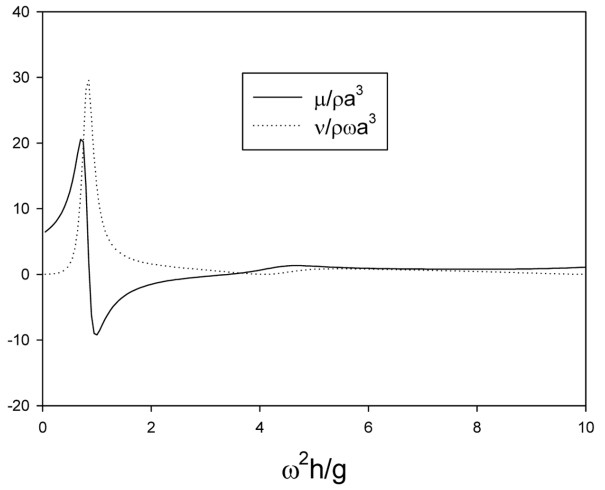
Fig. 5 Non-dimensional added mass and damping coefficient due to a oscillating circular cylinder with damping plate as function of ω^2h/g and d/h for $h/b=5.0$, $a/b=1.6$

가하여 $a/b = 1.8$일 때는 큰 방사파의 진폭을 보여주고 있다.

Fig. 5는 감쇠판이 부착된 원기둥의 잠긴깊이 변화에 따른 무차원화된 부가질량과 감쇠계수를 보여주는 그림이다. 계산모델의 잠긴깊이의 증가는 감쇠판의 잠긴깊이 증가와 함께 원기둥의 길이 변화를 유발하지만 수직운동의 경우 부가질량과 감쇠계수는 원기둥의 바닥면에 의한 유체교란으로 발생하므로 원기둥의 길이 변화는 계산결과에 영향을 주지 않는다. 따라서 Fig. 5의 잠긴깊이의 변화는 감쇠판의 잠긴깊이의 변화로 이해할 수 있다. 수심과 원기둥의 반경의 비 h/b는 5.0이며, 감쇠판의 반경과 원기둥 반경의 비(a/b)는 1.6이다. 4개의 무차원화된 잠긴깊이에 대하여 살펴본 결과, 잠긴깊이가 작을수록 부가질량과 감쇠계수 모두 증가하고 있음을 보이고 있다. 특히 저주파수 영역에서 감쇠계수는 잠긴깊이에 거의 영향을 받지 않지만 $\omega^2 h/g$보다 큰 고주파수 영역에서는 큰 차이를 보이고 있다. 또한 잠긴깊이가 어느 값 이상이 되면 부가질량과 감쇠계수 모두 잠긴깊이에 큰 영향을 받지 않는다. 이러한 결과로부터 감쇠판을 수면에서 멀리 떨어진 원기둥 하단에 설치하는 것 보다 수면에 가까운 위치에 설치하는 것이 바람직하다.



(a) $d/h = 0.1$



(b) $d/h = 0.05$

Fig. 6 Non-dimensional added mass and damping coefficient due to a oscillating submerged disk as function of $\omega^2 h/g$ for $h/b = 5.0$

현재의 감쇠판이 부착된 원기둥 계산모델에서 $b = 0$이면 원기둥은 사라지고 감쇠판만 남게 되어 수면아래 잠긴 원판에 대한 문제로 바뀐다. 원판의 수직운동에 의한 동유체력은 꽤 흥미로운 결과를 준다. 원판의 운동주파수와 원판과 수면사이의 닫혀진 유체영역내에 존재하는 고유주파수가 일치될 때 공진현상이 발생하며, 이러한 공진현상으로 공진주파수에서 부가질량은 음의 값을 갖으며 감쇠계수가 피크값을 갖는 독특한 현상이 발생한다. 이와 유사한 공진현상이 발생하는 문제들로는 수면아래 잠긴 사각형 또는 원형 주상체의 운동, 쌍동선과 같은 이중 선체의 운동, 수면위에 떠 있는 도넛모양의 원환체의 운동 등을 들 수 있다. 수면아래 잠긴 원판의 운동특성과 함께 소개한 계산예의 특징은 운동하는 물체 주변에 공진을 유발하는 닫혀진 영역이 존재한다는 것이다. Fig. 6은 수심과 원판의 반경의 비(h/a)가 2.0, 무차원화된 잠긴깊이(d/h)가 0.1,0.05일 때의 부가질량과 감쇠계수를 보여주고 있다. 두 경우 모두 공진주파수에서 부가질량이 음의 값이 되며 감쇠계수는 피크값을 보이는 현상을 나타내고 있다. 잠긴깊이가 작을수록 공진현상이 더욱 뚜렷이 나타나 공진폭이 줄어들고 부가질량의 음의 값이 더욱 커짐을 볼 수 있다. 반대로 잠긴깊이가 증가하면 원판과 수면사이의 유체영역으로부터 파가 밖으로 빠져나가 이러한 공진현상은 사라지게 된다.

4. 결 론

감쇠판이 부착된 원기둥의 수직운동시 동유체력(부가질량,감쇠계수)을 감쇠판의 반경과 잠긴깊이를 변화시키면서 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 부가질량은 감쇠판의 크기가 커질수록 일정하게 증가하나 감쇠계수는 감쇠판의 반경이 상대적으로 작을 때는 감쇠판과 원기둥 사이의 상호작용으로 인하여 오히려 감쇠판이 없을 때보다 줄어든다. 그러나 감쇠판의 반경이 어느 값 이상이 되면 감쇠계수는 크게 증가하는 것을 볼 수 있는데 이러한 특징은 고주파수 영역에서 뚜렷이 나타난다.

(2) 저주파수 영역에서 감쇠계수는 감쇠판의 잠긴깊이에 거의 영향을 받지 않지만 고주파수 영역에서는 감쇠계수는 큰 폭으로 증가한다. 또한 감쇠판의 잠긴깊이가 점점 증가하면 부가질량과 감쇠계수에 대한 잠긴깊이의 영향은 점점 줄어든다. 따라서 감쇠판을 수면에서 멀리 떨어진 원기둥 하단에 설치하는 것 보다 수면에 가깝게 설치하는 것이 바람직하다.

(3) 수면아래 잠긴 원판의 수직운동에 의한 동유체력 해석에서 잠긴깊이가 충분히 작을 때, 원판의 운동주파수와 원판과 수면사이의 닫혀진 유체영역내에 존재하는 고유주파수가 일치될 때 공진현상이 발생하며 이때 공진주파수에서 부가질량은 음의 값을 갖으며 감쇠계수가 피크값을 나타낸다.

후 기

이 논문은 2010년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단(과제번호: 2010-0461)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

조일형, 표상우 (2009). "경사 입사파중 계류된 부유식 방파제의 운동응답과 투과율 해석", 한국해양공학회지, 제23권, 제3호, pp 6-13.

Abul-Azm, A.G. and Gesraha, M.R. (2000). "Approximations to the Hydrodynamics of Floating Pontoons under Oblique Waves", Ocean Eng., Vol 27, No 4, pp 365-384.

Chwang, A.T. and Wu, J. (1994). "Wave Scattering by Submerged Porous Disk", J. Engrg. Mech., Vol 120, pp 2575-2587.

Evans, D.V. and Porter, R. (1996). "Hydrodynamic Characteristics of a Thin Rolling Plate in Finite Depth of Water", Appl. Ocean Res., Vol 18, No 4, pp 215-228.

Garrett, C.J.R. (1971). "Wave Forces on a Circular Dock", J. Fluid Mech., Vol 46, pp 129-139.

Havelock, T.H. (1955). "Waves Due to a Floating Sphere Making Periodic Heaving Oscillations", Proc. Roy. Soc. Lond., A Vol 231, pp 1-7.

Linton, C.M. and McIver, P. (2001). Handbook of Mathematical Techniques for Wave/Structure Interaction, CRC Press LLC.

McIver, P. and Evans, D.V. (1984). "The Occurrence of Negative Added Mass in Free-surface Problems Involving Submerged Oscillating Bodies", J. Engrg. Mech., Vol 18, pp 7-22.

Mei, C.C. and Black, J.L. (1969). "Scattering of Surface Waves by Rectangular Obstacles in Waters of Finite Depth", J. Fluid Mech., Vol 38, pp 499-511.

Miles, J.W. (1987). "On Surface Wave Forcing by a Circular Disk", J. Fluid Mech., Vol 175, pp 97-108.

Tao, L. and Cai, S. (2004). "Heave Motion Suppression of a Spar with a Heave Plate", Ocean Eng., Vol 31, pp 669-692.

Thiagarajan, K.P. and Troesch, A.W. (1988). "Effects of Appendages and Small Currents on the Hydrodynamic Heave Damping of TLP Columns", J. Offshore Mech. & Arctic Eng., Vol 120, pp 37-42.

Tung, C.C. (1979). "Hydrodynamic Forces on Submerged Vertical Circular Cylindrical Tanks under Ground Excitation", Appl. Ocean Res., Vol 1, pp 75-78.

Yeung, R.W. (1981). "Added Mass and Damping of a Vertical Cylinder in Finite-depth Waters", Appl. Ocean Res., Vol 3, No 3, pp 119-133.

Yu, X. and Chwang, A.T. (1993). "Analysis of Wave Scattering by Submerged Circular Disk", J. Engrg. Mech., Vol 119, pp 1804-1817.

2010년 9월 9일 원고 접수
2010년 12월 22일 심사 완료
2010년 12월 23일 게재 확정