

부설 수심의 변화에 따른 파랑 중 원통형 부체의 운동 및 계류삭 장력 해석

김태호

여수대학교

Motion of Cylindrical Buoy and Its Mooring Line Tension by Installation Depth under the Action of Waves

Tae-Ho KIM

Yosu National University

Abstract

This paper presents a method analyzing the motion of cylindrical buoy moored at 2 points and tensions acting on each mooring line under the action of periodic waves. It was found that submersible buoy was more effective than floating one in the severe conditions considering its dynamic motions, wave forces, and mooring line tensions. The wave induced its dynamic responses and mooring line tensions peak when the ratio d/λ of the buoy length d to the waves length λ was 0.66 due to its natural frequency. The results of this study were in agreement with the existing measurement ones, however, further verifications are needed considering resonance of cylindrical buoy and its displacements to wave height by a series of model tests.

Key words : cylindrical buoy(원통형 부체), motion(운동), mooring line tension(계류삭 장력), waves(파랑)

서 론

최근 양식시설의 연안역 집중에 따른 해역의 생태·어장 환경적 문제를 근본적으로 해결할 수 있는 대안의 필요성이 증대되고 있다. 그러나, 기존 양식시설은 대부분 부유식 시설로서 태풍, 파랑에 매우 취약한 구조이며, 내만에 집중 설치됨으로써 적조 등의 재해로 인한 피해가 매년 급증하고 있다.

따라서 연안역의 생태 환경 및 어장 환경 기능을 복원함으로써 건강한 바다에서 양질의 연안 수산 자원을 공급할 수 있는 새로운 수산 양식의 패러다임 구축이 필요한 실정이다. 이를 위해서는 수질이 양호한 외해에서 고품질 어류의 안정적 생산이 가능하며, 태풍, 적조 등 긴급 재해 시 시설물의 일시

침하 및 부양으로 시설물 및 양식 생물을 동시에 보호할 수 있는 침하식 가두리 시설과 같은 외해 수산 시설물의 개발이 요구된다.

특히 침하식 가두리 시설의 개발을 위해서는 부체의 부설 수심 변화에 따른 그것의 동역학적 특성 해석 결과가 매우 중요한 설계 요소이다. 그러나 가두리 시설은 프레임의 경우 중력의 영향을 주로 받고 그물의 경우는 점성력의 영향을 주로 받기 때문에, 그것에 대해 동적 응답 특성을 정확하게 해석하는 것은 매우 어려운 실정으므로 우선 파랑에 대한 힘을 가장 많이 받는 부분인 프레임을 실린더형 부체로 단순화한 후 파랑 중 그것의 동적 거동에 대해 검토할 필요가 있다.

지금까지 파랑 중 원통형 부체의 동적 응답 특성 등에 대해 수행된 연구(堀川·渡邊, 1972; 堀川 *et al.*, 1974; 渡邊, 1978; 渡邊 *et al.*, 1979; 木村·大井, 1997; Kolarov, 1997; 木村, 1998)는 거의 대부분 수면에 고정된 것을 대상으로 하였다.

따라서 본 연구에서는 침하식 가두리 시설의 안정성 평가를 위한 기초 단계로서 일방향 규칙과 중 2점 계류된 원통형 부체에 대하여 부설 수심을 다르게 하는 경우 그것의 동적 거동 및 계류사에 작용하는 장력에 대한 수치해석을 수행하였다.

자료 및 방법

1. 이론 해석

1) 계류 모델의 가정

해석에서 대상으로 한 계류 모델은 파향에 평행으로 전 후단 대칭 2점 계류된 원통형 부체이며, 계산 시에는 다음과 같은 가정을 고려하였다.

- (1) 계류사의 유체력과 그것의 수중 무게는 무시한다.
- (2) 부체에 작용하는 외력은 중력, 계류력 및 파력이다.
- (3) 해석에 사용된 파는 미소진폭파이며, 흐름은 고려하지 않는다.
- (4) 계류사의 신장과 부체의 변형은 무시한다.
- (5) 부체는 전후 동요(Surge), 상하 동요(Heave) 및 종 동요(Pitch)의 2차원 운동을 한다.

2) 기하학적 관계

Fig. 1은 본 연구에서 대상으로 한 2점 계류된 부체의 계류 모델이다. 이것에서 (a)는 정적 상태, (b)는 동적 상태, (c)는 힘의 배치를 나타낸다. 먼저 계류 모델의 2차원 좌표(x, z)는 다음과 같다. 여기서 A, B는 해저, e 는 A와 B의 수직거리, α_s 와 β_s 는 정적 상태의 계류사 각도, α 및 β 는 동적 상태의 계류사 각도, a 및 b 는 계류사의 길이, G는 부체의 중심이다.

A, B, D, E 및 G점의 좌표(x, z)는 각각 A(0, 0), B($e, 0$), D($e - b \cos \beta, b \sin \beta$), E($a \cos \alpha, a \sin \alpha$) 및 G(x_G, z_G)이다.

또한, 계류 모델의 정적 및 동적 상태는 각각 다음과 같다.

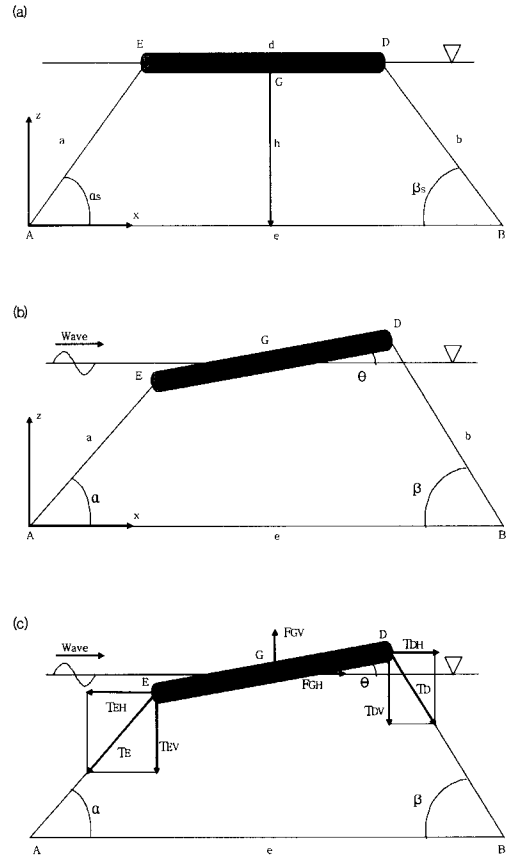


Fig. 1. Mooring model of cylindrical buoy used in the numerical calculation.

(a) Static condition (b) Dynamic condition (c) Force configuration

(1) 정적 상태

Fig. 1의 (a)에서

$$a \sin \alpha_s = h$$

$$b \sin \beta_s = h$$

이고, A에서 B까지의 거리 e 는

$$e = a \cos \alpha_s + b \cos \beta_s + d$$

이며, h 는 부체의 부설 수심이고, a 는 부체의 길이이다.

(2) 동적 상태

Fig. 1의 (b)에서

$$\overline{DE}^2 = (e - b \cos \beta - a \cos \alpha)^2 + (b \sin \beta - a \sin \alpha)^2 = d^2$$

이고, 이것으로부터

$$2e(a \cos \alpha + b \cos \beta) - 2abc \cos(\alpha + \beta) = a^2 + b^2 + e^2 - d^2$$

이며, DE 는 부체이다.

또한, 부체의 중심 G 는 각각

$$x_G = \frac{1}{2}(a \cos \alpha + e - b \cos \beta)$$

$$z_G = \frac{1}{2}(a \sin \alpha + b \sin \beta)$$

이며, 부체의 수평 경사각을 θ 라고 하면

$$d \sin \theta = b \sin \beta - a \sin \alpha$$

이다.

3) 역학적 관계

(1) 계류사의 장력

Fig. 1의 (c)에서 부체의 전 후단 계류사에 작용하는 장력 T_E 와 T_L 의 수평 및 연직 성분 T_{EH} , T_{EV} , T_{DH} 및 T_{DV} 는 (1)식과 같다.

$$T_{EH} = T_E \cos \alpha : T_{EV} = T_E \sin \alpha \quad (1)$$

$$T_{DH} = T_D \cos \beta : T_{DV} = T_D \sin \beta$$

(2) 부체의 운동 방정식

본 연구에서는 부체의 전후, 상하 및 종 동요와 같은 2차원 운동만을 고려하였으므로 부체의 운동 방정식은 (2)식과 같다.

$$M \ddot{x}_G = F_{GH} + T_{DH} - T_{EH}$$

$$M \ddot{z}_G = F_{GV} - T_{DV} - T_{EV} + B_G \quad (2)$$

$$I_G \ddot{\theta} = N_G - N_R - \frac{d \sin \theta (T_{DH} + T_{EH})}{2} - \frac{d \cos \theta (T_{DV} - T_{EV})}{2}$$

여기서, F_{GH} 및 F_{GV} 는 부체에 작용하는 파력의 수평 및 연직성분, M 은 부체의 질량, B_G 는 잉여부

력, N_G 는 부체에 작용하는 파력의 부심 G 의 회전 모멘트, N_R 은 부체의 복원력 모멘트이다.

4) 부체에 작용하는 파력

(1) 부체 부위에 작용하는 파력

운동하는 부체의 각 부위(x , z)에 작용하는 파력은 (3)식과 같다.

$$\Delta f_M = \rho(1 + C_M) \Delta V_o \frac{du}{dt} - \rho C_M \Delta V_o \frac{dw}{dt} \quad (3)$$

$$\Delta f_D = \frac{1}{2} \rho C_L \Delta S_o |u - w| (u - w)$$

단, Δf_M 및 Δf_L 는 각각 부체 부위의 질량력 및 항력, ρ 는 유체의 밀도, C_M 은 부체 부위의 부가 질량 계수, ΔV_o 는 부체 부위의 체적, C_L 는 부체 부위의 항력계수, ΔS_o 는 부체 부위의 투영면적, u 는 유체의 속도, w 는 부체 부위의 속도이다.

(2) 부체에 작용하는 파력

본 연구에서 대상으로 한 부체의 형태는 앞에서 설명한 바와 같이 수면과 그 아래에 위치하는 미소 경사진 원통형 부체로서 그것에 작용하는 파력의 수평 성분 F_{GH} 와 연직 성분 F_{GV} 및 파력의 부심 G 의 회전 모멘트 N_G 를 각각 다음과 같이 계산하였다.

먼저 부체에 작용하는 파력의 수평 성분 F_{GH} 는

$$F_{GH} = \sum [\Delta f_{MH}] + \sum [\Delta f_{DH}] \quad (4)$$

이고,

$$\sum [\Delta f_{MH}] = -2\rho(1 + C_{MH}) V_o \frac{u_0 \sigma}{kd}$$

$$\sin \frac{kd}{2} \sin \sigma t - M_{FH} \ddot{x}_G$$

$$\sum [\Delta f_{DH}] = \frac{1}{2} \rho C_{LH} \sum [\pi D_b \Delta \xi |u - \dot{x}_G| (u - \dot{x}_G)]$$

이다.

여기서, C_{MH} 는 수평파력의 질량력 계수, V_o 는 부체의 체적, σ 는 각주파수($2\pi/T$), k 는 파수($2\pi/L$), M_{FH} 는 $\rho C_{MH} V_o$, C_{DH} 는 수평파력의 항력계수, D_b 는 부체의 지름, ξ 는 부심 G 를 기점으로 한 x 좌표이다.

또한 부체에 작용하는 파력의 연직 성분 F_{GV} 는

$$F_{GV} = \sum [\Delta f_{MV}] + \sum [\Delta f_{DV}] \quad (5)$$

이며,

$$\sum [\Delta f_{MV}] = -2\rho(1 + C_{MV})V_0 \frac{v_0\sigma}{kd} \sin \frac{kd}{2} \cos \sigma t - M_{FV} \ddot{z}_G$$

$$\sum [\Delta f_{DV}] = \frac{1}{2} \rho C_{DV} \sum [D_b \Delta \xi | v - \dot{z}_G - \xi \theta | (v - \dot{z}_G - \xi \theta)]$$

이다.

여기서, C_{MV} 는 연직파력의 질량력 계수, M_{FV} 는 $\rho C_{MV} V_0$, C_{DV} 는 연직파력의 항력계수이다.

한편 파력의 부심 G의 회전 모멘트 N_G 는

$$N_G = \sum [\Delta f_{MV} \xi] + \sum [\Delta f_{DV} \xi] \quad (6)$$

이며,

$$\sum [\Delta f_{MV} \xi] = -\rho(1 + C_{MV})V_0 \left[+ \frac{v_0\sigma}{k} \left(-\frac{2}{kd} \sin \frac{kd}{2} - \cos \frac{kd}{2} \right) \sin \sigma t - I_{GM} \theta \right]$$

$$\sum [\Delta f_{DV} \xi] = \frac{1}{2} \rho C_{DV} \sum [D_b \Delta \xi | v - \dot{z}_G - \xi \theta | (v - \dot{z}_G - \xi \theta) \xi]$$

이다.

여기서, I_{GM} 은 $\rho C_{MV} V_0 \frac{d^2}{12}$ 이다.

2. 계산 조건

본 연구에서 대상으로 한 원통형 부체의 제원은 木村·大井(1997)가 수리 모형실험에서 사용한 것과 같은 규격으로 지름이 4.8cm이고 길이가 100cm이며, 그것의 수중 무게와 부력은 각각 950g 및 2,070g이다. 또한 계산 시 고려한 수심은 75cm이며, 부체의 부설 수심은 수면 상에 위치한 초기 상태 75cm(h)를 기준으로 하여 부체를 수면 아래로 각각 50cm(0.67 h)와 35cm(0.47 h)까지 침하시키는 3단계로 하였다.

수치 계산에서는 일방향 규칙파 중 부체의 동적 운동과 계류삭의 장력 특성을 해석하였는데, 이 경우 사용된 파랑 조건은 Table 1에서와 같이 파고

h 가 2.66~5.82cm의 8단계, 주기 T 는 0.6~1.2초의 4단계였으며, 계류삭의 길이는 부설 수심의 2배로 하였다.

수치 계산 시 원통형 부체의 수평 작용 파력이 연직 작용 파력에 비해 매우 작다고 생각되어 그것에 작용하는 C_{Mh} 와 C_{Dh} 는 각각 0.01을 대입하였으며, C_{Ml} 와 C_{Dl} 는 각각 1.0을 대입하여 계산하였다. 한편 본 수치 해석에서는 4계 Runge-Kutta 해법을 이용하여 계산을 수행하였다.

Table 1. Wave conditions used in the numerical calculation

Wave period(s)	Wave height(cm)	
0.6	5.82	4.32
0.8	5.07	3.55
1.0	5.29	3.44
1.2	3.59	2.66

결과 및 고찰

파랑 중 2점 계류된 원통형 부체를 대상으로 부설 수심을 각각 75cm(h), 50cm (0.67 h) 및 35cm(0.47 h)의 3단계로 변화시켜 부체의 동적 거동 및 계류삭의 변동 장력에 관해 수치 계산을 수행한 결과는 Fig. 2~5와 같다.

Fig. 2는 규칙파 중 부설 수심의 변화에 따른 전후단 계류삭의 각도 α 및 β 의 변동을 나타낸 결과이다. 작용 파에 대한 α 및 β 는 초기 상태 h 의 경우 약 22.9~29.5°로 그 변동폭이 6.6°였으나, 부체가 수중으로 침하됨에 따라 그것이 점점 작아져서 0.67 h 에서는 약 24~29.3°이고, 0.47 h 에서는 약 25.5~28.4°로 변동폭이 각각 5.3°와 2.9°로 나타났다. 즉, 계류삭의 각도가 초기 상태의 그것에 비하여 각각 20%와 50% 만큼 감소하였으므로 부체가 일정 깊이 만큼 수중으로 침하되면 그 동적 거동이 작아져서 그것의 안정성 유지에 매우 효과적임을 알 수 있다.

Fig. 3은 부설 수심의 변화에 따른 부체에 작용하는 파력의 수평 성분 F_{Gh} 및 연직 성분 F_{Gv} 를 나타낸 것으로 F_{Gv} 가 F_{Gh} 에 비해 월등히 크게 나타났다. 또한, 부체의 부설 수심이 깊어질수록 파력의 F_{Gh} 는 크게 감소하여 0.67 h 와 0.47 h 에서는 초기 상태 h 에 비해 각각 45%와 77%까지 감소하였다. 그러나 F_{Gv} 는 그 감소비가 초기의 그것에 비해 각

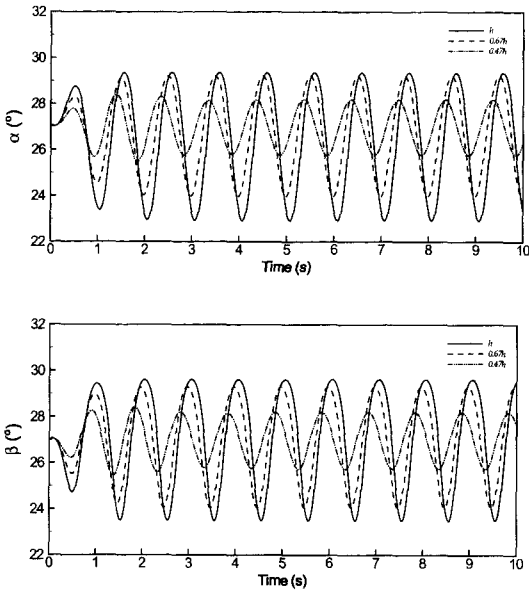


Fig. 2. Fluctuations of angle α and β at each mooring line of a cylindrical buoy due to wave(H : 5.29cm, T : 1.0s).

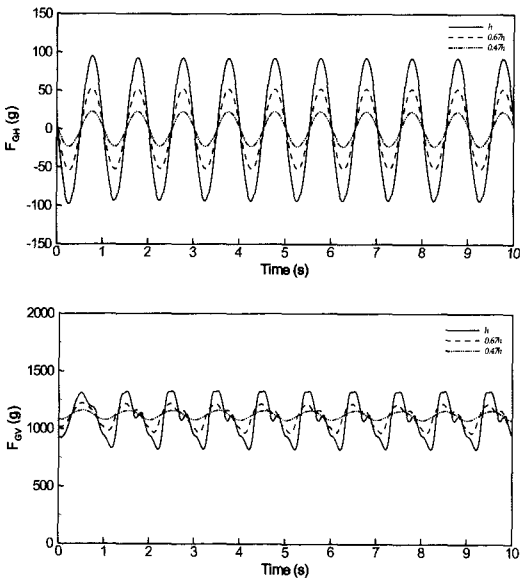


Fig. 3. Wave forces F_{GH} and F_{GV} acting on a cylindrical buoy due to wave(H : 5.29 cm, T : 1.0s).

각 8%와 17%로 나타나 수평 성분 에 비해 상대적으로 작게 나타났다.

Fig. 4는 부체에 작용하는 파력의 부심 G의 회전 모멘트 N_G 를 나타낸 것으로 부설 수심의 변화에 따라 N_G 가 매우 작아져서 0.67h와 0.47h에서는 초기 상태 h의 경우에 비해 각각 23%와 32%만큼 감소하였다.

Fig. 5는 부설 수심의 변화에 따른 부체의 전 후 단 계류삭에 작용하는 장력 T_E 및 T_L 를 나타낸 것이다. 이것에서 보면 규칙과 중 2점 계류된 원통형 부체 주기의 경우 부체가 1회 진동하는 순간에 장력은 2회 진동을 반복하고 있다. 즉, T_E 및 T_L 는 파의 1/2 주기에서 변동을 반복하였으며, 특히 이들

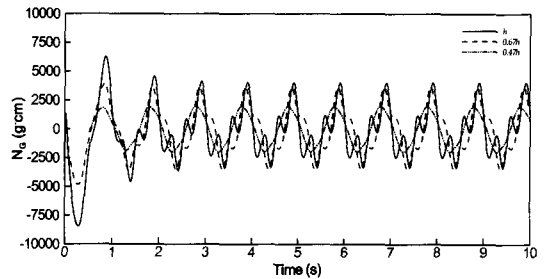


Fig. 4. Rotation moment N_G of a cylindrical buoy due to wave(H : 5.29cm, T : 1.0s).

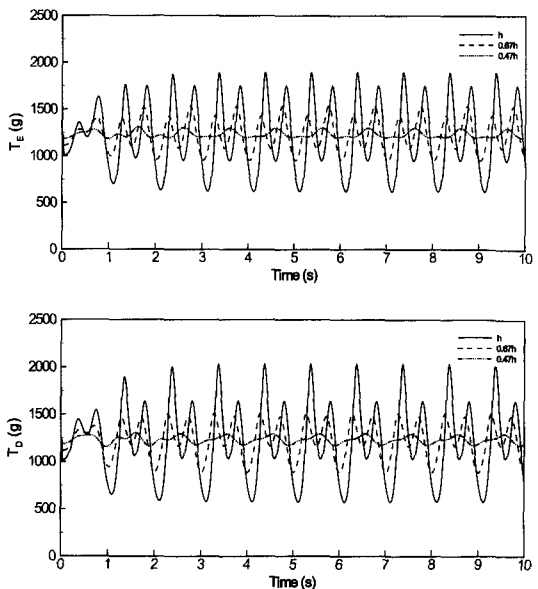


Fig. 5. Tensions T_E and T_D acting on each mooring line of a cylindrical buoy due to wave(H : 5.29cm, T : 1.0s).

의 위상이 서로 같게 나타났다. 그 이유는 앞에서 설명한 바와 같이 부체에 작용하는 파력의 연직 성분이 수평 성분보다 훨씬 커서 부체의 운동이 그것의 중심 G의 회전 모멘트 N_G 에 의해 좌우되기 때문이라고 사료되며, 이와 같은 현상은 木村·大井(1997)의 수리실험 결과와도 잘 일치하고 있다. 한편, 부체를 표층에서 수면 아래로 일정 깊이만큼 침하시킨 경우, 전 후단 계류삭에 작용하는 장력은 부체의 동적 거동에서와 같이 급격하게 감소하였으며, 0.67h와 0.47h에서 그 감소 비는 초기 상태 h의 그것에 비해 각각 23%와 34%로 나타났다.

Fig. 6 및 7은 각각 원통형 부체의 부설 수심의 변화에 따른 작용 파랑에 대한 부체의 전 후단 변위와 계류삭의 변동 장력의 관계를 분석한 결과로 가로축에는 파고 h에 대한 부체 전 후단 변위 $\Delta E/H$ 와 $\Delta D/H$ 의 비인 $\Delta E/H$ 와 $\Delta D/H$ 및 계류삭의 변동 장력 $\Delta T_E/H$ 와 $\Delta T_D/H$, 세로축에는 파장 λ 에 대한 부체 길이 a의 비, 즉 d/λ 를 나타내었다. 이들에

서 보면, 모든 경우에서 d/λ 가 0.66($T=1.0s$, $\lambda=1.55m$)에서 최대치가 나타났으며, d/λ 가 0.66보다 커져서 1.0 이상이 되면 0.47h인 경우를 제외하고는 부체 변위의 변동 폭과 계류삭의 장력이 급격히 감소하고 있다. 그러나 김(2000)과 Colbourne and Allen(2001)의 결과에서는 본 연구 결과와는 달리 부유식 구조물에 작용하는 파력이 부체의 길이와 파장이 같은 d/λ 가 1.0에서 최대치가 나타났는데, 이와 같은 차이는 부체의 고유 주기의 영향에 의한 것으로 사료된다. 즉, 부체의 강제 진동은 외력 주기가 고유 진동 주기에 가까우면 진동 외력에 의해 공진되어 그 진폭이 더욱 커지게 되는데(Kolarov, 1997), 본 연구에서 대상으로 한 원통형 부체의 고유 주기는 0.8초로서 작용 파의 주기인 1.0초에 가깝기 때문에 공진 현상에 의해서 d/λ 가 0.66에서 $\Delta E/H$ 와 $\Delta D/H$ 가 가장 크게 나타났다고 사료된다. 한편 木村·大井(1997)의 실험에서는 부체의 변위가 작용 파고의 3배 이하로 나

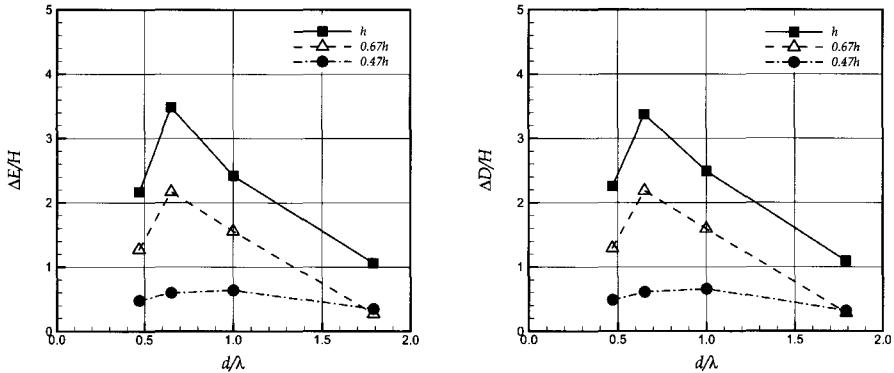


Fig. 6. Relation between $\Delta E/H$ and $\Delta D/H$ and d/λ of a cylindrical buoy due to waves.

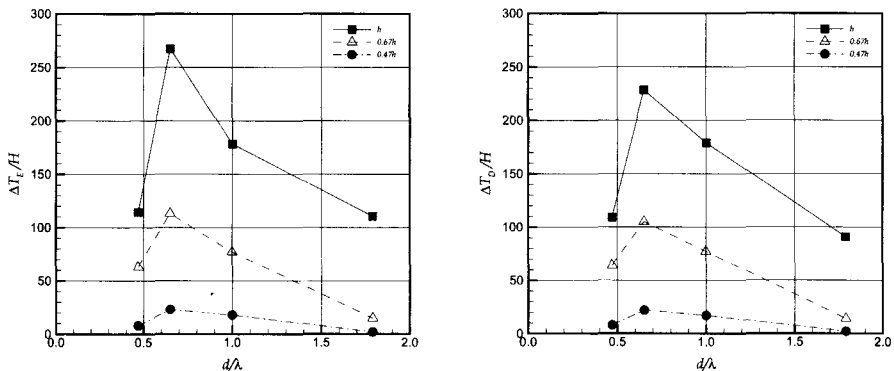


Fig. 7. Relation between $\Delta T_E/H$ and $\Delta T_D/H$ and d/λ of a cylindrical buoy due to waves.

타났지만, 본 연구에서는 원통형 부체의 부설 수심이 초기 상태인 h 에서 d/λ 가 0.66에서 파고에 대한 부체의 전 후단 변위가 모두 3.5 정도로 다소 크게 나타났다. 따라서 이와 같은 차이를 구명하기 위해서는 수리 모형실험을 통해 원통형 부체의 작용 파고에 대한 전 후단 변위에 대한 충분한 검토가 요구된다.

이상에서와 같이 규칙파 중 2점 계류된 부체의 동적 거동 및 계류삭에 작용하는 장력에 관한 수치 계산 결과, 수면 상에 설치된 부체를 수면 아래의 약 1/2되는 수층까지 침하시킨 경우 그것의 동적 거동과 파력은 각각 최대 50%와 77%까지 감소되어 시설물의 안정성 유지에 매우 효과적임을 확인하였다. 이와 같은 결과는 앞으로 침하식 가두리 시설 개발 등 외해 수산 시설물의 안정성 해석에 유용하게 활용할 수 있으리라 생각되며, 앞으로 그물 등이 부착된 실제 구조의 침하식 가두리 시설을 대상으로 한 보다 더 나은 연구가 기대된다.

요 약

침하식 가두리 시설의 안정성 평가를 위한 기초 단계로서 일방향 규칙파 중 2점 계류된 원통형 부체를 대상으로 부설 수심의 변화에 따른 부체의 동적 거동 및 계류삭에 작용하는 장력 산정에 관한 수치 계산을 수행하였다. 수치 계산 결과, 수면 상에 설치된 부체를 수면 아래의 약 1/2되는 수층까지 침하시킨 경우 그것의 동적 거동과 파력은 초기 상태에 비해 각각 최대 50%와 77%까지 감소되어 시설물을 수중으로 침하시키면 그것의 안정성 유지에 매우 효과적임을 확인할 수 있었다. 또한 부체의 전 후단 변위 및 계류삭에 작용하는 장력의 최대치는 부체의 고유 주기의 영향으로 인해 그것의 길이 d 에 대한 파장 λ 의 비 즉, d/λ 가 약 0.66에서 나타났으며, 이와 같은 현상은 기존 수리 모형실험 결과와 비교적 잘 일치하였다. 그러나 본 수치 계산의 신뢰성 확인을 위해서는 수리 모형실험을 통해 부체의 고유 주기와 작용 파고에 대한 전 후단 변위 등에 대한 충분한 검토가 요구된다.

참고문헌

- Colbourne D.B. and J.H. Allen(2001): Observations on motions and loads in aquaculture cages from full scale and model scale measurements, aquacultural engineering 24, 129-148.
- Kolarov, T. P.(1997): Buoys movement under sea motion conditions, Proceedings of the Third International Workshop on Methods for the Development and Evaluation of Maritime Technologies, Rostock, 147-167.
- 木村晴保・大井手伸一(1997): 水面下に水平に兩端係留した圓筒浮體の波による動搖に關す實驗, 日本水産工學會講演會集, 155-158.
- 木村晴保・大井手伸一(1998): 水面下に水平に兩端係留した圓筒浮體の波による運動と係留索張の算定法, 水産工學 35(2), 167-176.
- 堀川清司・渡邊晃(1972): 圓筒形浮體と淺海波の相互作用, 第19回海岸工學講演會論文集, 419-425.
- 堀川清司・渡邊晃・丸山康樹(1974): 係留圓筒形浮體の應答特性と索張力, 第21回海岸工學講演會論文集, 507-513.
- 渡邊晃(1978): 係留圓筒浮體の應答特性と索張力, 第25回海岸工學講演會論文集, 377-381.
- 渡邊晃・島田保之・堀川清司(1979): 不規則波に對する繫留圓筒浮體の應答, 第26回海岸工學講演會論文集, 480-484.
- 김태호(2000): 어업용 프레임 구조물의 역학적 특성에 관한 연구, 부경대학교 대학원 공학박사 학위 논문, 118-119.

2004년 8월 24일 접수

2004년 10월 20일 수리