

파랑 중 계류된 스파 플랫폼의 시간영역 해석

이호영^{†*}, 임춘규^{**}

목포대학교 선박해양시스템전공^{*}
현대미포조선(주)^{**}

Time Domain Analysis of a Moored Spar Platform in Waves

Ho-Young Lee^{†*} and Choon-Gyu Lim^{**}

Major in Naval Architecture and Marine System Engineering, Mokpo National University^{*}
Hyundai Mipo Dock Yard Co., Ltd^{**}

Abstract

The Spar platform with deep draft is characterized as effective structure in extreme wave condition, which has larger natural period than that of waves in sea. In this paper, the time domain simulation of motion responses of Spar with catenary mooring line is presented in irregular waves. The memory effect is modeled by added mass at infinite frequency and convolution integrals in terms of wave damping coefficients. The added mass, wave damping coefficients and wave exciting forces are obtained from three-dimensional panel method in the frequency domain. The motion equations are consisted of forces for inertia, memory effect, hydrostatic restoring, wave exciting and mooring line. The forces of mooring line are modeled as quasi-static catenary cable.

※Keywords: 3-Dimensional Panel Method(3차원 패널법), Catenary Mooring Line(현수선 계류), Wave Drift Forces(파랑 표류력), Spar Platform(스파 플랫폼), Memory Effect(기억효과), Time Domain(시간영역)

1. 서 언

근래에 해저 석유 개발이 천해에서 심해로 옮겨 감에 따라 기존의 고정식 구조물이 아닌 FPSO 나

스파 플랫폼이 경쟁력 있는 구조물로 대두되고 있다. FPSO는 선박 형태이기 때문에 플랜트 공장의 배치면이나 원유 저장에 대한 선체의장 면에서 강점을 갖고 있거나, 심한 해상상태에서 나쁜 운동 특성을 갖고 있기 때문에 거친 해상상태에서는 스파 플랫폼이 경쟁력 있는 구조물로 인정받고 있다(임춘규/이호영 2003). 파랑에 의한 힘을 줄이기 위하여 채택된 깊은 흘수를 가진 스파 플랫폼

접수일: 2004년 4월 29일, 승인일: 2004년 6월 1일

† 주저자, E-mail: ocean-ship@hanmail.net

Tel: 011-9539-9930

은 결과적으로 긴 고유주기를 갖고 있기 때문에 거친 해상 상태에서도 운동이 거의 없는 장점을 갖고 있다. 스파 플랫폼의 상하동요 고유주기는 대략 30sec 정도이며 이에 비해 종 동요 고유주기는 100 sec 정도 되기 때문에 아무리 해상상태가 거칠더라도 상하동요에 대한 운동을 줄이면 Mathieu형 불안정에 의한 종동요도 동시에 줄일 수 있으므로 상하동요를 줄이기 위해 구조물 밑에 감쇠판을 채용하는 경우가 많다.

지금까지 각종 환경외력을 고려하여 계류된 스파 플랫폼에 대한 비선형 운동 해석은 국내외에서 많은 연구가 수행되었다. 국내의 연구로 노준범 등(2002)은 주파수 영역의 선형 계산과 실험을 통하여 스파 플랫폼에 대한 감쇠판에 대한 영향을 검토하였고, 과도한 상하 운동이 종동요에 대한 Mathieu형 불안정성에 미치는 영향을 계산하였다(노준범/최항순 2003). 국외의 연구로는 스파 플랫폼의 개념은 Glanville et al.(1991)에 의해 깊은 흡수를 가지며 큰 직경과 느슨한 혹은 단단한 계류 시스템을 갖는 구조물로 창안되었고, 1996년에 스파 플랫폼의 생산 시설이 해역에 처음으로 설치되었다. 또한 Ran et al.(1996)과 Jha et al.(1997)은 불규칙 파랑 중 시간영역에서 계류된 스파 플랫폼에 대한 비선형 운동 해석을 수행하였다.

본 논문은 파랑 중 심해에 계류된 스파 플랫폼에 대해 전후운동, 상하운동 및 종운동에 대한 시간영역에서 비선형 운동 해석을 수행하였다. 파랑에 의한 유체력을 해석하기 위해 3차원 패널법을 사용하여 부가질량, 파랑감쇠계수, 1차항 및 2차항 파강제력을 계산하였다. 시간 영역에서 운동 방정식은 시간 기억효과를 고려하였고(이호영 등 2003), 계류력은 현수선 이론에 의한 준정적 이론을 사용하였으며 현수선 자체의 감쇠력과 부가질량은 무시하였다. 본 연구에서는 깊은 흡수를 갖는 스파 플랫폼을 도입하여 불규칙 파랑 중 시간영역에서 응답을 계산하여 도출된 결과에 대해 토론하였다.

2. 수치해석 방법

본 스파 플랫폼의 운동을 표현하기 위해 정수면을 원점으로 하고 수직 상 방향을 양의 z 축으로 한 고정 좌표계($o-xyz$)를 사용한다. 구조물은 축대칭이므로 전후운동, 상하동요 및 종동요만 의미가 있다. Fig. 1에서 좌표계와 구조물의 모습을 나타내었다.

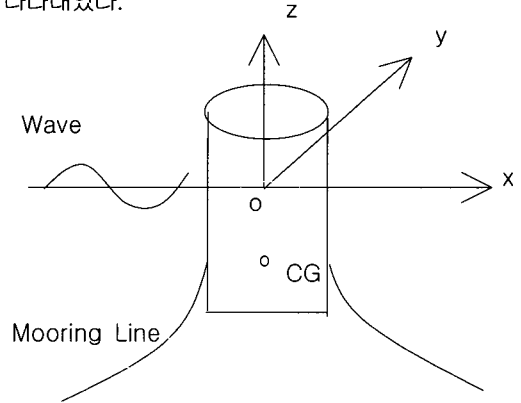


Fig. 1 Coordinate system

유체는 비압축성, 비점성이고 유동은 비회전적인 포텐셜 유동이라 하면 지배 방정식은 라플라스 방정식을 만족한다. 입사파의 기울기와 운동이 작다고 하면 모든 경계조건과 포텐셜을 선형화 시킬 수 있다. 1차항 포텐셜은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi^{(1)} = \phi^{(1)} e^{-i\omega t} = -i\omega [\zeta_0 (\phi_0^{(1)} + \phi_1^{(1)}) + \sum_{j=1}^6 x_j^{(1)} \phi_j^{(1)}] e^{-i\omega t} \quad (1)$$

여기서, ζ_0 : 입사파 진폭, ω : 진동수,

$x_j^{(1)}$: 1차 복소 운동

유한 수심에서 입사파 포텐셜은 다음과 같이 표현된다.

$$\phi_0^{(1)} = \frac{1}{\nu} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} e^{ik(x\cos\beta + y\sin\beta)} \quad (2)$$

여기서, h : 수심, k : 파수

여기서 $\nu = \omega^2/g$ 이다. 1차항 포텐셜을 구하기 위해 그린 함수를 도입하여야 한다. 그린 함수는 라플라스 방정식, 자유표면조건, 해지면 경계조건, 방사조건을 만족한다.

3차원 소스-다이폴 분포법을 사용하여 속도 포텐셜을 표현하면 다음과 같다.

$$-2\pi\phi^{(1)}(x) + \iint_{S_0} \phi^{(1)}(\xi) \frac{\partial G(x, \xi)}{\partial n_\xi} ds(\xi) = \iint_{S_0} \frac{\partial \phi^{(1)}(\xi)}{\partial n_\xi} G(x, \xi) ds(\xi) \quad (3)$$

여기서, x : 관측점(Field point)

ξ : 용출점(Source point)

S_0 : 표면파와 물체의 운동에 의한 접수면

여기서 $\phi^{(1)}(x)$ 는 관측점 x 에서 구조물 운동에 기인하는 방사파 및 산란파 포텐셜이다. 부유체가 j 모드의 동요를 할 때 i 방향의 부가질량 및 조파감쇠계수는 다음과 같다.

$$\omega^2 a_{ij} + i\omega b_{ij} = -\rho\omega^2 \iint_{S_0} \phi_j^{(1)} n_i ds \quad (4)$$

1차항 파강제력의 i 방향 성분은 입사파 포텐셜과 산란파 포텐셜의 합으로 계산된다.

$$f_i^{(1)}(\omega) = -\rho i\omega \iint_{S_0} (\phi_0^{(1)} + \phi_i^{(1)}) n_i ds \quad (5)$$

부가질량, 조파감쇠계수 및 1차항 파강제력을 이용하여 주파수 영역에서 파랑 중 부유구조물의 선형 운동 방정식을 표시하면 다음과 같다.

$$\sum_{j=1}^6 [-\omega^2 (M_{ij} + a_{ij}) - i\omega b_{ij} + (C_{ij} + R_{ij})] x_j^{(1)} = f_i^{(1)} \quad (6)$$

여기서, M_{ij} : 구조물의 질량 또는 관성 모멘트

a_{ij} : 부가 질량

b_{ij} : 조파감쇠 계수

C_{ij} : 정적 복원력 계수

R_{ij} : 계류력 계수

$f_i^{(1)}$: 1차항 파강제력

2차항 표류력 계산시 1차항들의 조합으로 발생하는 비선형항만 고려하여 계산하면 다음과 같다 (이호영 등 2003).

$$F^{(2)} = - \int_{vol} \frac{1}{2} \rho g \zeta_r^{(1)} n dl - \int \int_{S_0} [-\frac{1}{2} \rho \nabla \phi^{(1)} \cdot \nabla \phi^{(1)} - \rho(x^{(1)} \cdot \nabla \phi_i^{(1)})] n ds + \bar{\alpha}^{(1)} \times (m \ddot{x}_0^{(1)}) - \rho g x_4^{(1)} x_6^{(1)} S_{10} \bar{k} \quad (7)$$

$$M^{(2)} = - \int_{vol} \frac{1}{2} \rho g \zeta_r^{(1)} (x \times n) dl - \int \int_{S_0} [-\frac{1}{2} \rho \nabla \phi^{(1)} \nabla \phi^{(1)} - \rho(x^{(1)} \cdot \nabla \phi_i^{(1)})] (x \times n) ds + \bar{\alpha}_0^{(1)} \times (m \ddot{x}_0^{(1)}) + \bar{\alpha}^{(1)} \times (I \ddot{\alpha}^{(1)})$$

$$- \rho g \begin{pmatrix} x_2^{(1)}(x_3^{(1)} S_{00} - x_5^{(1)} S_{10}) + x_3^{(1)} x_6^{(1)} S_{10} + x_5^{(1)} x_6^{(1)} (S_{02} - S_{20}) \\ - x_1^{(1)}(x_3^{(1)} S_{00} - x_5^{(1)} S_{10}) + x_4^{(1)} x_6^{(1)} (S_{02} - S_{20}) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

여기서, $x^{(1)} = x_0^{(1)} + \alpha^{(1)} \times r$

$x_0^{(1)}$: 선형 직선 운동

$\alpha^{(1)}$: 선형 회전 운동

ζ_r : 상대파고, $\phi^{(1)}$: 1차항 포텐셜

ρ : 유체 밀도, g : 중력 가속도

n : 법선 벡터, I : 관성 모멘트

\mathcal{M} : 정수면에 대한 접수 표면적

S_0 : 표면파와 물체의 운동에 의한 접수면

식(7), (8)을 이용하고, 해상에 계류된 스파 플랫폼은 차 주파수 성분의 표류력이 계류계와 공간에 의한 대진폭 운동을 발생시키므로 차주파수 성분만을 고려하였다(임춘규/이호영 2003).

수직면 상의 3자유도(surge, heave, pitch)운동방정식은 물체 중심에 고정된 공간고정 좌표계에서 문제를 정식화 하였으며 다음과 같이 표현된다(이호영 등 2003, 노준범/최항순 2003).

$$(M + a_{11}(\infty)) \ddot{x} + (-Mz_G + a_{15}(\infty)) \ddot{\theta} + \int_0^t K_{11}(t-\tau) \dot{x}(\tau) d\tau + \int_0^t K_{15}(t-\tau) \dot{\theta}(\tau) d\tau = F_1^{(1)} + F_1^{(2)} + X_m \quad (9)$$

$$(M + a_{33}(\infty)) \ddot{z} + \int_0^t K_{33}(t-\tau) \dot{z}(\tau) d\tau + C_{33} z = F_3^{(1)} + F_3^{(2)} + Z_m \quad (10)$$

$$(Mz_G + a_{51}(\infty)) \ddot{x} + (I_y + a_{55}(\infty)) \ddot{\theta} + \int_0^t K_{51}(t-\tau) \dot{x}(\tau) d\tau + \int_0^t K_{55}(t-\tau) \dot{\theta}(\tau) d\tau + (C_{55} - \frac{z}{2GM}) \theta = M_2^{(1)} + M_2^{(2)} + M_m \quad (11)$$

여기서, M : 질량

$a(\infty)$: 주파수 무한대에서 부가질량

$F^{(1)}, F^{(2)}, M^{(1)}, M^{(2)}$: 1차항 및 2차항

파강제력 및 모멘트

l_y : y축에 관한 질량관성모멘트

x, z, θ : x, z, 방향의 변위 성분 및

중 운동 각 성분

C : 정 복원력 및 모멘트 성분

X_m, Z_m, M_m : 계류력 및 계류 모멘트

K : 기억효과항수

계류시스템은 현수형 체인으로 준정적(Quasi-static)인 방법으로 선박의 운동효과를 직접적으로 고려하여 해석하였다. 식(12)을 이용하여 각 계류라인의 수평방향 인장력(T_H)을 계산할 수 있다.

$$-\frac{T_H}{P} \sinh^{-1}\left[-\frac{P}{T_H} \sqrt{h\left(h+2\frac{T_H}{P}\right)}\right] = l_w - l - \sqrt{h\left(h+2\frac{T_H}{P}\right)} \quad (12)$$

식(12)에서 l_w 는 계류라인의 총 길이이며 l 은 수평방향의 계류라인 길이이다. P 는 단위길이 당 수중 질량이다. 수직 방향의 인장력(T_V)은 (12)에서 구한 수평방향의 인장력을 이용해 다음 식에서 구할 수 있다.

$$T_V = T_H \sinh\left(\frac{Pl}{T_H}\right) \quad (13)$$

식(12), (13)을 이용하여 전후, 상하 및 종동요 방향의 계류력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$X_m = \sum_{i=1}^N T_H^{(i)} \cos \gamma^{(i)} \quad (14)$$

$$Z_m = \sum_{i=1}^N (T_V^{(i)} - T_V(0)) \quad (15)$$

$$M_m = \sum_{i=1}^N [-x_p^{(i)} Z_m + (z_p^{(i)} - z_G) X_m] \quad (16)$$

$$\text{여기서, } \cos \gamma^{(i)} = (x_m^{(i)} - x_T^{(i)})/l \quad (17)$$

식(14)~(17)에서 $\gamma^{(i)}$ 는 i 번째 계류라인과 x 축의 반시계 방향 각도이며, $T_V(0)$ 는 선 인장력이며 Ph 이다. x_p, y_p 는 물체고정좌표계에서 선박에 고정된 계류라인의 좌표이다.

3. 결과 및 고찰

계산에 사용된 스파 플랫폼의 형상은 Fig.2와 같다. 기본제원은 Table 1에 나타내었고, 여기서 D 는 스파 플랫폼의 직경이며 d 는 흡수를 나타낸다. 메타센터 높이(GM)은 4.4m이며, 계산 수심은 2000m로 하였다. Fig. 2에서 보듯이 요소의 분할은 원기둥 형태의 구조물에 대해 총 478개로 하였다. 불규칙파수를 제거하기 위해 정수면 위치의 구조물 내 원에도 요소를 분할하였다.

구조물에 고정된 계류라인은 총 16개를 원의 원

주방향으로 균일하게 CG 높이에 위치시켰다. 계류라인은 총 길이가 3300m이고 수평길이는 2000m이며, 수중무게가 2943N/m이다. 환경하중은 초기의 구조물 과도응답을 방지하고자 30배의 평균 파주기 동안 직선적으로 증가하는 것으로 가정하였다(임춘규/이호영 2003).

Table 1 Main particulars of Spar

Diameter(m)	Draft(m)	KG(m)	Radius of Gyration(m)
37.5	202.5	105.25	80.

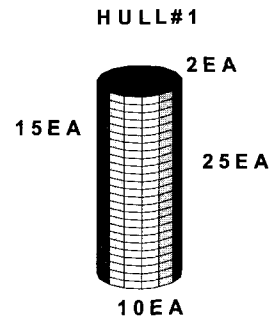


Fig. 2 Panel discription of Spar

Fig. 3은 주파수 영역에서 전후운동, 상하운동 및 종운동을 도시하였다. 그림에서 상하운동의 고유주기는 30sec 정도이며 종 운동의 고유주기는 125.6sec로 계산되었고, 공진 점에서는 종 운동이 상하운동 값보다 훨씬 크다. 전후운동에서 주파수 0.05rad/sec에서 약간의 공진이 발생하는 것은 종 운동과의 연성 효과 때문이다.

Fig. 4는 전후, 상하 및 종 방향의 시간 평균된 표류력 값을 도시하였다. 시간 평균된 표류력은 $0.5\rho g(\pi D^2 d/4)^{1/3}$ 로 무차원화 하였다. 상하운동의 시간 평균 표류력은 0.05rad/sec에서 상대파고 향에 종 방향의 공진 운동 영향이 포함되어 있어 상당히 큰 값을 보여주고 있다.

Fig. 5는 파랑조건 $H_{1/3}=14.8m$, $T_{mean}=16.1$ sec 인 경우에 ISSC 스펙트럼을 사용하여 파랑에 대한 스펙트럼을 나타내었다. 위의 파랑조건은 북해에서 100년 반복주기에 해당하는 조건이다(Jha 1997).

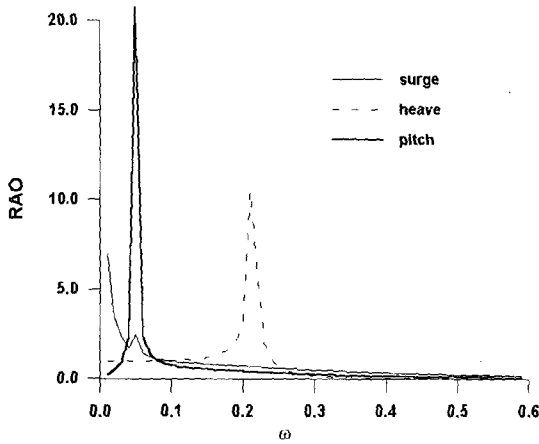


Fig. 3 Motion responses

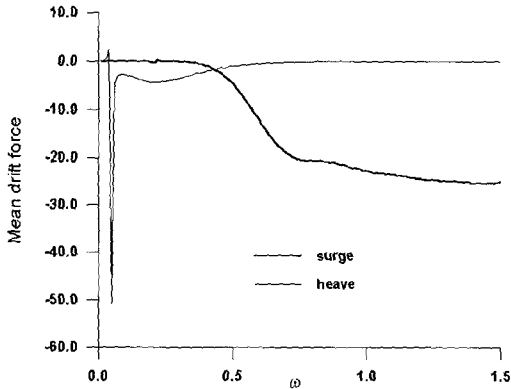


Fig. 4 Mean drift forces

임의의 파랑 주파수에서 스파 플랫폼은 큰 운동을 일으키며 이것을 Mathieu 불안정 현상으로 설명된다. Mathieu형 불안정성에 대한 파랑의 주기는 상하동요 및 종동요 고유 주기에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$T_{wave} = \frac{1}{\frac{1}{T_{N,3}} + \frac{1}{T_{N,5}}} \quad (18)$$

여기서 $T_{N,3}$; 상하동요 고유주기

$T_{N,5}$; 종동요 고유주기

(18)에 주어진 파랑의 주기가 구조물에 입사될 때 상하운동은 고유주파수와 파랑주파수로 운동되고, 이 과정은 변조과정을 생성시킨다. 임의의 파

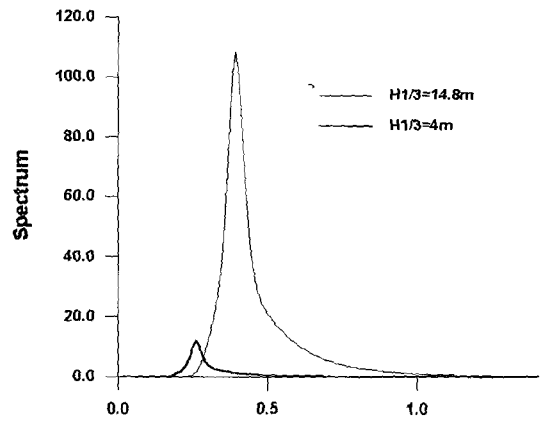


Fig. 5 ISSC wave spectrum

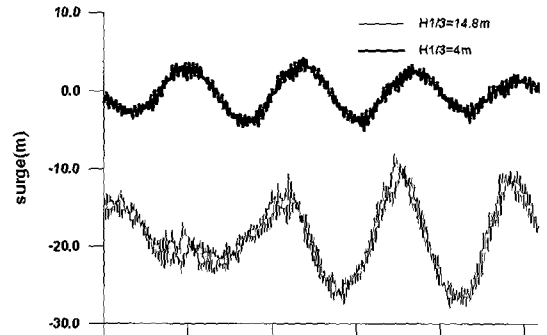


Fig. 6 Time histories of surge motion

랑 주기에 대하여 변조 주기는 종동요 고유주기와 일치한다. 본 계산에서 T_{wave} 는 24.2sec이며, Fig. 5에서 파랑 조건 $H_{1/3}=4m$, $T_{mean}=24.2sec$ 을 계산에 포함시켰다.

Fig. 6은 시간에 따른 전후운동을 도시하였다. 파랑조건 $H_{1/3}=14.8m$ 인 경우가 파랑 조건 $H_{1/3}=4m$ 경우보다 높은 파고로 인해 많이 밀리며, 또한 저 진동 운동 진폭도 크며 전후운동은 저주파수 운동 주기가 대략 700sec 정도 이며, 1차항 운동성분도 뚜렷하게 보인다.

Fig. 7은 시간에 따른 상하운동을 도시하였다. 파랑조건 $H_{1/3}=4m$ 인 경우가 파랑 조건 $H_{1/3}=14.8m$ 경우보다 파고는 적으나 파랑 주기가 상하운동의 고유주기와 가깝기 때문에 운동이 현저히 증가하며 운동이 시간에 따라 변조되는 것을 알 수 있다. 또한 운동 주기는 대부분 고유주기

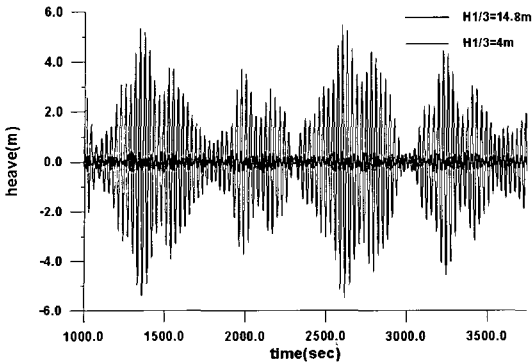


Fig. 7 Time histories of heave motion

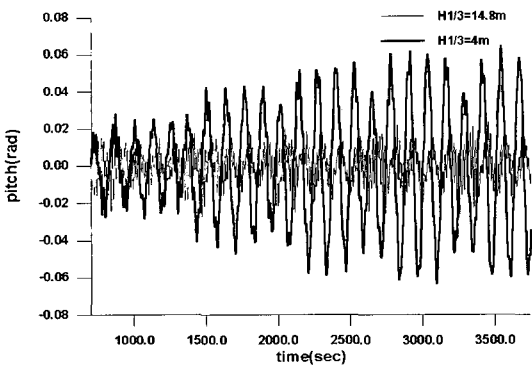


Fig. 8 Time histories of pitch motion

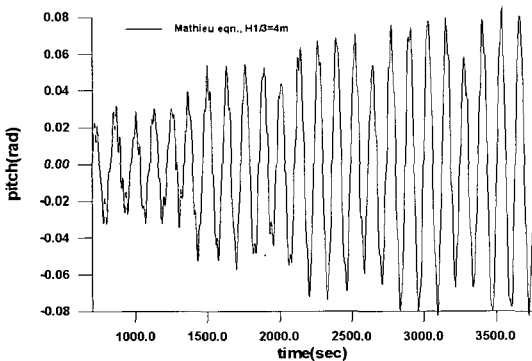


Fig. 9 Time histories of pitch motion(Mathieu equation)

성분으로 운동하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 8은 종 운동을 시간에 따라 도시하였다. 파랑조건 $H_{1/3}=4m$ 인 경우가 파랑 조건 $H_{1/3}=14.8m$ 경우보다 파고는 작으나 주기의 영향

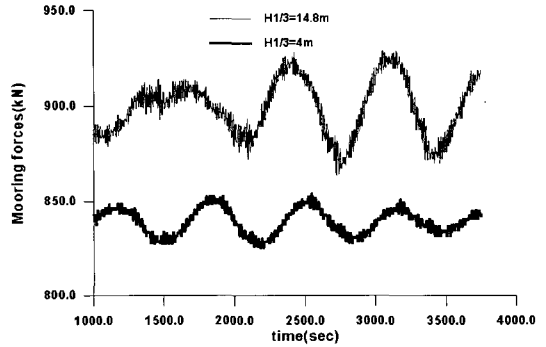


Fig. 10 Time histories of horizontal mooring forces(line 1)

으로 운동이 훨씬 더 크며, 파랑조건 $H_{1/3}=4m$ 인 경우 1400sec까지는 운동이 작다가 그 이후 운동은 좀더 커지게 되는데 이는 상하운동과 입사파랑과의 간섭에 의한 변조파의 영향으로 생각된다. 또한 파랑조건 $H_{1/3}=4m$ 인 경우는 고유주파수만 운동하며 파랑 조건 $H_{1/3}=14.8m$ 경우는 여러 주파수 성분이 보인다.

Fig. 9는 파랑 조건 $H_{1/3}=4m$ 인 경우에 식 (11)의 종 운동 방정식에서 Mathieu 항을 첨가하여 해석한 그림을 도시하였다. Fig.8과 비교해 보면 0.02 rad 정도가 더 크며 상하운동에 의한 연성 효과가 종 운동을 크게 한 것으로 생각된다.

Fig. 10은 구조물의 원주방향으로 설치된 현수형 계류시스템의 라인 1(0 deg)에서 수평방향의 계류력을 도시하였다. 계류력은 파랑 조건 $H_{1/3}=14.8m$ 인 경우가 크며, 시간에 따른 계류력의 형태는 전후운동과 같으며 주기도 같다.

4. 결론

본 논문은 불규칙파랑 중에서 계류된 스파 플랫폼에 대한 비선형 운동 해석을 수행하였다. 표류력과 표류 모멘트는 직접적분법을 사용하여 구하여 차주파수 성분을 고려하였으며, 운동 방정식에서 시간 기억효과 항을 포함하였다. 구조물의 계류계는 현수선 계류 시스템을 채택하여 준 정적 모델을 사용하여 해저면과의 지면 효과를 고려하였다.

깊은 흘수를 갖는 스파 플랫폼의 시간영역 계산을 통하여 전후운동에 대한 표류 및 저주파수 운동을 수치 해석하였고, 상하운동 및 종 운동은 복원력이 존재하기 때문에 1차항 운동이 강하게 나타났고 상대적으로 비선형 영향이 약하게 나타났다. 또한 종운동에 Mathieu 방정식을 계산하여 상하운동에 대한 연성 효과를 계산하였다.

추후의 연구에서 감쇠판의 감쇠계수에 대한 수학적 모델링, 전후운동 방향에 대한 표류 감쇠계수, 2차 산란 포텐셜에 대한 계산 및 Mathieu형 불안정성에 대하여 좀 더 구체적으로 연구될 필요가 있다.

참 고 문 헌

- 노준범, 최항순, 2003, “스파 플랫폼의 Mathieu 형 불안정성에 미치는 감쇠판의 영향,” 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 313-317.
- 노준범, 최항순, 박인규, 신현수, 2002, “SPAR 플랫폼의 상하운동 감쇠장치,” 대한조선학회 춘계 학술대회 논문집, pp. 250-253.
- 이호영, 임춘규, 유재문, 전인식, 2003, “안벽에 계류된 선박의 비선형 운동응답,” 한국해양공학회지, 제 17권, 제 4호, pp. 8-15.
- 임춘규, 이호영, 2003, “터렛 계류된 FPSO의 비선형 운동 해석,” 대한조선학회 논문집, 제 40권, 제 1호, pp. 20-27.

- Glanville, R.S., Pauling, J.R., Halkyard, J.E. and Lehtinen, T.J., 1991, “Analysis of the Spar Floating: Drilling Production and Storage,” Proc. Offshore Tech. Conf., Houston, Paper OTC-6701, pp. 57-68.
- Jha, A.K., 1997, Nonlinear Stochastic Models for Ocean Wave Loads and Responses of Offshore Structures and Vessels, Ph.D. thesis, Civil Eng. Dept., Stanford University.
- Jha, A.K., de Jong, P.R. and Winterstein, S.R., 1997, “Motions of a Spar Buoy in Random Seas : Comparing Prediction and Model Test Results,” Proc. of BOSS-97, Vol.2, pp. 333-347.
- Ran, Z., Kim, M.H., Niedzwecki, J.M. and Johnson, R.P. 1996 “Responses of a Spar Platform in Random Waves and Currents (Experiment vs. Theory),” Int. Journal of Offshore and Polar Eng., Vol.6(1), pp. 27-34.



< 이 호 영 >



< 임 춘 규 >