

다점 계류된 원유 저장선에 대한 저주파수 운동 해석 Slow Drift Motion Analyses for a FPSO with Spread Mooring Systems

이호영* · 박종환* · 광영기*

Ho-Young Lee*, Jong-Hwan Park* and Young-Ki Kwak*

要 旨 : 본 논문은 파랑중에 다점 계류된 원유저장선에 대한 저주파수 운동을 수치 모사하였다. 시간영역에서의 운동방정식은 충격응답함수를 포함하여 수평면상의 운동 즉 전후, 좌우 및 선수 운동을 고려하였다. 시간영역의 운동방정식에 나타난 부가질량, 파랑감쇠계수, 1차항 파랑 강제력 그리고 2차항 파랑 강제력을 주파수 영역의 특이점 분포법을 사용하여 계산하였고, 다점 계류된 계류선은 체인이 해저면에 닿는 운동 효과를 포함하여 준 정적 현수선 이론으로 산정되었다. 계산 예로서 장파장 불규칙 파랑 중에 놓인 바이지식 원유저장선에 대한 시간영역 해석을 수행하였다.

핵심용어 : 시간영역, 기억효과 함수, 2차항 파랑 표류력, 다점 계류시스템, 저주파수 운동

Abstract □ The time simulation of slow drift motions of moored FPSO in waves is presented. The equation of motion based on Cummin's theory of impulse responses are employed, and are consisted of horizontal plane motions such as surge, sway and yaw. The added mass, wave damping coefficients, first order wave exciting forces and the second order wave drift forces involved in the equations are obtained from three-dimensional panel method in the frequency domain. The mooring lines are modeled as quasi-static catenary cable. As a numerical example, time domain analyses are carried out for a box-type FPSO in long crest irregular wave condition.

Keywords : time domain, memory effect function, second order wave drift forces, spread mooring system, Slow drift motions

근래에 해저 석유 개발이 천해에서 심해로 옮겨감에 따라 기존의 고정식 구조물이 아닌 이동할 수 있고 생산과 저장 가능한 FPSO(floating production storage and offloading)와 같은 부유식 구조물의 사용이 증가하고 있다. 따라서 해상에서 환경 외력이 부유식 구조물에 중요한 영향을 주기 때문에 현수형 계류시스템을 장착한 FPSO 구조물에 대한 환경 영향 평가가 필수적이다.

인장각식 계류 시스템을 장착한 TLP(tension leg platform) 구조물이나 터렛(turret) 계류된 FPSO 선박에 대한 응답 해석은 국내외에서 많은 연구가 수행되어 왔다(이 등, 1998), (Lee and Choi, 1999). 또한 다점 계류된 FPSO 선박에 대하여 조류 및 파랑 중에서 안정성 해석을 다룬 많은 연구들이 있다(Bernitsas and Kim, 1998).

본 논문은 불규칙파 중에서 다점 계류된 FPSO 구조물에 대하여 저주파수 표류 운동에 대한 수치 모사를 수행하였다. 시간 영역의 운동 방정식은 파도의 기억효과를 포함한 충격 응답함수에 근간을 두고 개발되었다. 부가질량, 조파 감쇠계수, 1차항 파랑 강제력 및 2차항 파랑 강제력은 주파수 영역에서 3차원 패널 방법을 이용하여 계산하였다. 다점 계류된 계류시스템은 현수형 체인의 닿는(touchdown) 효과와 현수형 체인의 모양을 고려하여 모델링 하였다(Bernitsas and Kim, 1998).

본 논문의 계산 예로 길이 300 m, 폭 60 m, 흘수 20 m인 바이지식 FPSO 구조물을 사용하여 수평면의 3가지의 저주파수 표류 운동과 현수형 계류시스템의 계류력을 산정하였다.

*목포대학교 선박해양공학과(School of Naval Architecture and Marine Engineering, Mokpo National University, Mokpo 534-729, Korea)

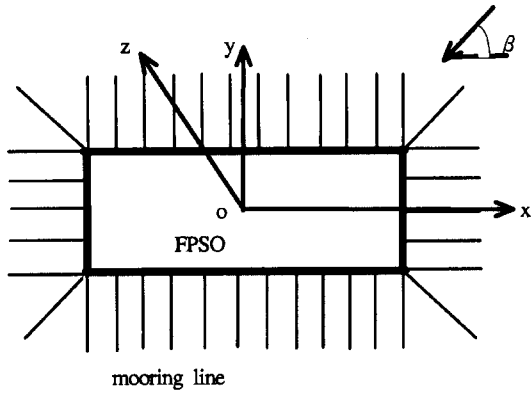


Fig. 1. Coordinate system and configuration of FPSO.

2. 시간영역에서 운동방정식

Fig. 1은 좌표계와 FPSO 구조물과 현수형 계류시스템에 대한 그림을 도시하였다. 시간영역에서의 부유체 운동 방정식은 아래와 같다(Cummins, 1962).

$$\sum_j \left[(M_{ij} + A_{ij}(\infty)) \ddot{x}_j + \int_0^t K_{ij}(t-\tau) \dot{x}_j(\tau) d\tau \right] = F_{Mi} + F_{Wi}^{(1)} + F_{Wi}^{(2)}, i = 1, 2, 6 \quad (1)$$

$$K_{ij}(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty B_{ij}(\omega) \cos(\omega t) d\omega \quad (2)$$

여기서 x_j 는 운동 응답, M 은 질량행렬, $A(\infty)$ 은 무한대 주파수에서 부가질량 행렬, B 는 파랑 감쇠 계수 행렬을 나타낸다. 식 (1)에서 K_{ij} 은 기억효과 함수이고, F_{Mi} , $F_{Wi}^{(1)}$, $F_{Wi}^{(2)}$ 는 각각 계류력, 1차항 파랑 강제력, 2차항 파랑 강제력을 나타낸다. \dot{x} , \ddot{x} 는 각각 dx/dt , d^2x/dt^2 을 의미한다. 식 (1)에서 $i=1, 2, 6$ 은 각각 전후동요, 좌우동요, 선수동요를 나타낸다. 식 (1)에서 주파수(ω)가 무한대 일때 부가질량 계수 $A_{ij}(\infty)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_{ij}(\infty) = A_{ij}(\omega_0) + \frac{1}{\omega_0} \int_0^\infty K_{ij}(t) \sin(\omega_0 t) dt \quad (3)$$

여기서 $A(\omega_0)$ 는 임의의 주파수 ω_0 에서의 부가질량이다. 식 (1)에 주어진 운동방정식을 계산하기 위한 수치적분 방법으로 뉴마크-베타(Newmark- β) 방법을 사용하였다(이 등, 2000).

3. 파강제력 및 계류 모델링

3.1 파강제력

1차항 포텐셜은 입사파, 방사 및 산란 포텐셜로 구성되며 다음과 같이 표현된다.

$$\phi^{(1)} e^{i\omega t} = \left[\zeta(\phi_I^{(1)} + \phi_D^{(1)}) + \sum_{j=1}^6 \phi_j^{(1)} x_j \right] e^{i\omega t} \quad (4)$$

여기서 ω 는 입사하는 파의 원주파수, ζ 는 파 진폭, x_j 는 6자유도 운동에 대한 복소 운동진폭을 나타낸다. $\phi_D^{(1)}$ 는 1차항 산란 포텐셜이며, $\phi_j^{(1)}$ 는 1차항 방사 포텐셜이다. $\phi_I^{(1)}$ 는 입사파 포텐셜이며 유한 수심에서는 다음과 같이 표현된다.

$$\phi_I^{(1)} = \frac{ig \cosh k(z+h)}{\omega \cosh kh} e^{ik(x \cos \beta + y \sin \beta)} \quad (5)$$

여기서 h , β , k 는 각각 수심, 입사각, 파수를 나타낸다. 식 (4)에서 방사 및 산란 포텐셜은 3차원 패널(panel) 방법을 사용하면 계산될 수 있다. 3차원 패널 방법은 자유표면조건, 방사조건, 해저면 조건을 만족하는 유한수심에서 동요하는 그린(Green) 함수를 도입하여 그린 제2정리에 의한 적분 방정식으로 표현된다(Pinkster, 1980). 주파수 영역에서의 부가질량, 파랑 감쇠계수, 1차항 파랑 강제력은 다음과 같다.

$$A_{ij}(\omega) = -\frac{\rho}{\omega^2} Re \left[\iint_{S_B} i\omega \phi^{(1)} n_i ds \right] \quad (6)$$

$$B_{ij}(\omega) = \frac{\rho}{\omega} Im \left[\iint_{S_B} i\omega \phi^{(1)} n_i ds \right] \quad (7)$$

$$f_{Wi}^{(1)}(\omega) = \rho(i\omega) \iint_{S_B} (\phi_I^{(1)} + \phi_D^{(1)}) n_i ds \quad (8)$$

여기서 S_B 는 침수 표면적이며, n_i 는 물체표면의 법선 벡터(vector)이다.

불규칙파 중에서 1차항 파랑 강제력은 규칙파 중에서 파강제력을 식 (8)에서 계산하여 M 개의 규칙파의 합으로 나타내어 다음과 같이 계산하였다.

$$F_{Wi}^{(1)}(t) = Re \left[\sum_{m=1}^M \zeta_m f_{Wi}(\omega_m) e^{i(\omega_m t + \epsilon_m)} \right] \quad (9)$$

여기서 ζ_m 는 입사파의 진폭을 나타내며, ϵ_m 는 입사파의 위상차를 나타낸다.

본 논문에서는 파도 스펙트럼은 ITTC 스펙트럼을 사

용하였다.

2차항 파랑 강제력은 1차항 포텐셜로부터 계산된 유체 압력을 직접 적분함으로써 계산되며, 2차항 파랑 강제력에 대한 시계열은 다음 공식으로 표현된다(Pinkster, 1980).

$$F_{wi}^{(2)} = \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^M \zeta_j \zeta_k \{ P_{jk} \cos[(\omega_j - \omega_k)t + (\epsilon_j - \epsilon_k)] + Q_{jk} \sin[(\omega_j - \omega_k)t + (\epsilon_j - \epsilon_k)] \} \quad (10)$$

여기에서 P_{jk} 와 Q_{jk} 는 차이 주파수(difference frequency)에 대한 2차 전달함수이다(이 등 2000).

3.2 계류력 모델

현수형 체인의 단위 길이당 무게는 체인에 작용하는 항력에 비하여 크며, x - z 평면에서 2차원적인 변형만 일어난다고 가정한다. 본 논문에서는 심해의 현수형 체인에 대하여 해저면과의 닿는(touchdown) 효과를 고려한 준 정적 모델을 사용하였다. Fig. 2는 물에 잠긴 현수형 체인의 기하학적 형상을 도시하였다. 여기에서 (x_m, y_m, z_m) 은 해저면에서의 계류점을 나타내고, (x_T, y_T, z_T) 는 선박에서 현수형 체인의 부착점을 표시한다.

현수형 체인의 총 길이 l_w 는 다음과 같다.

$$l_w = l_{eff} + d = l_{eff} + l' - l \quad (11)$$

여기서 l_{eff} 는 매달린(suspended) 현수형 체인의 총길이, d 는 현수형 체인의 지면에 닿는(touchdown) 길이, l 은 매달린(suspended) 현수형 체인에 대해 수평면에 투영된 길이, l' 은 현수형 체인의 FPSO의 부착점과 계류선의 끝점 사이의 수평면에 투영된 길이를 나타낸다.

구조물의 부착점에서의 수평면 방향의 인장력(T_H)와 현

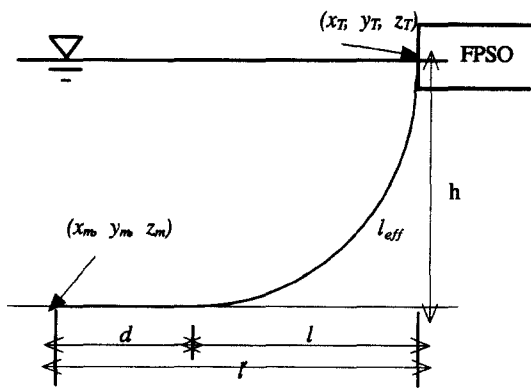


Fig. 2. Geometry of catenary line.

수선의 길이(l_{eff})는 다음 관계식을 만족한다.

$$l_{eff} = \frac{T_H}{P} \sin\left(\frac{Pl}{T_H}\right) = \sqrt{h\left(h + 2\frac{T_H}{P}\right)} \quad (12)$$

여기에서 P 는 체인의 단위 길이 당 수중 중량이다. 식 (11)과 식 (12)를 결합하면 다음과 같이 T_H 에 대한 식을 도출할 수 있다.

$$l_w - \sqrt{h\left(h + 2\frac{T_H}{P}\right)} - l' + \frac{T_H}{P} \sinh^{-1}\left[\frac{P}{T_H} \sqrt{h\left(h + 2\frac{T_H}{P}\right)}\right] = 0 \quad (13)$$

식 (13)에 주어진 비선형 방정식을 푸는 수치방법으로 Bisection 방법을 사용하였다. T_H 을 구하면, l_{eff} 는 식 (12)로부터 구할 수 있고 d 와 l 은 식 (11)로부터 계산이 가능하다. 전후운동, 좌우운동 및 선수운동 방향의 i 번째 현수형 체인의 인장력은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$F_{M1} = \sum_{i=1}^N (T_H^{(i)} \cos\gamma^{(i)} \cos\phi + T_H^{(i)} \sin\gamma^{(i)} \sin\phi) \quad (14)$$

$$F_{M2} = \sum_{i=1}^N (T_H^{(i)} \sin\gamma^{(i)} \cos\phi + T_H^{(i)} \cos\gamma^{(i)} \sin\phi) \quad (15)$$

$$F_{M3} = \sum_{i=1}^N (x_p^{(i)} F_{M1} - y_p^{(i)} F_{M2}) \quad (16)$$

where $x_T^{(i)} = x + x_p^{(i)} \cos\phi - y_p^{(i)} \sin\phi \quad (17)$

$$y_T^{(i)} = y + x_p^{(i)} \sin\phi - y_p^{(i)} \cos\phi \quad (18)$$

$$l'^{(i)} = \sqrt{(x_m^{(i)} - x_T^{(i)})^2 + (y_m^{(i)} - y_T^{(i)})^2} \quad (19)$$

$$\cos\gamma^{(i)} = (x_m^{(i)} - x_T^{(i)}) / l'^{(i)} \quad (20)$$

$$\sin\gamma^{(i)} = (y_m^{(i)} - y_T^{(i)}) / l'^{(i)} \quad (21)$$

여기에서 $(x_p^{(i)}, y_p^{(i)})$ 는 물체 고정 좌표계에서 i 번째 현수형 체인에서 좌표이며, $\gamma^{(i)}$ 는 반시계 방향에서 측정된 i 번째 현수형 체인과 x 축 사이의 각이다.

4. 계산결과 및 고찰

본 계산에 사용된 모델은 바이지 형태의 FPSO이며 기본체원은 다음과 같다. FPSO가 설치될 해역은 Terra-Nova 지역으로 선정하였다(Lever/Kean 2000).

구조물의 저주파수 운동을 해석하기 위해 구조물을 여러 요소로 분할하였는데, 구조물의 밑면은 x 방향으로 40개 y 방향으로 8개로 분할하였고, 옆면은 x 방향으로 40

Table 1. Main particulars of FPSO

| | |
|-------------------------------|-----------|
| L×B×Depth(m) | 300×60×30 |
| Draft(m) | 20 |
| Water depth(m) | 150 |
| Displacement(m ³) | 360,000 |
| KG(m) | 15 |

Table 2. particulars of the mooring line

| | |
|--------------------|-----------------------|
| Length of chain(m) | 360, 480(45deg) |
| Chain diameter(m) | 0.122 |
| Mass in air(kg/m) | 332.0 |
| Breaking load(kN) | 9987.0 |
| EA | 4.676×10 ⁶ |

개 z 방향으로 2개 그리고 y 방향으로 8개 z 방향으로 2개로 분할하였다. 그리고 불규칙파수(irregular frequency) 현상을 제거하기 위해 뒷면에 x 방향으로 5개 y 방향으로 2개의 요소로 분할하였다(Hong, 1987).

시간영역의 방정식은 초기 조건의 영향을 받기 때문에 초기조건에 의한 과도현상을 제거하기 위하여 각각의 파도 성분에 대하여 30주기 동안 직선적으로 파도의 진폭을 서서히 증가 시켰다.

다점 계류된 현수형 시스템은 Fig. 1에서 알 수 있듯이 길이 방향을 따라 양쪽 면에 35개씩 설치하였고, 동시에 폭 방향으로 양쪽 면에 7개씩 설치하였고, 구조물의 모서리 부분에 45도 각도로 4개 설치하여 총 88개의 현수형 체인을 구조물에 부착하였다. 현수형 체인의 기본 제원은 Table 2에 나타내었다.

Fig. 3, 4는 선형이론에 의한 6 자유도 운동을 수평면상의 운동과 수직면상의 운동으로 나누어 도시하였다. 여기서 RAO(response amplitude operator)는 운동응답 진폭을 나타낸다. 그림으로부터 저 주파수에서의 1차 운동

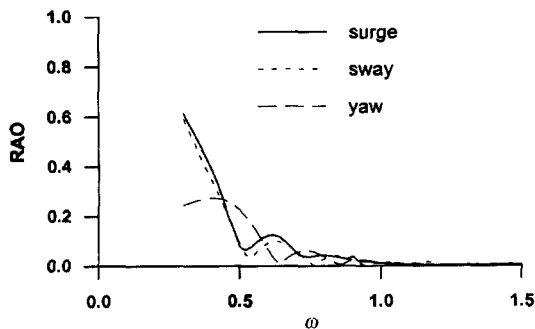


Fig. 3. Horizontal motions of FPSO.

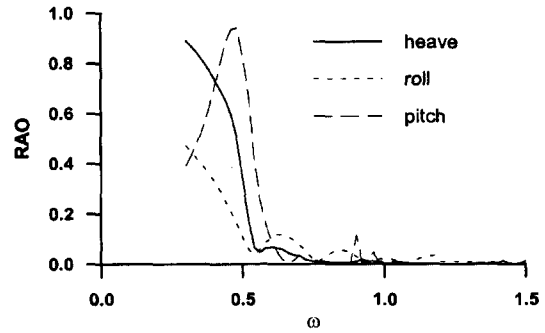


Fig. 4. Vertical motions of FPSO.

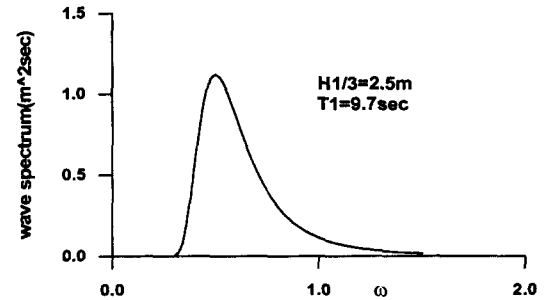


Fig. 5. ITTC wave spectrum.

은 고 주파수에 비하여 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 파랑조건(H_{1/3}=2.5 m, T₁=9.7 sec)인 경우에 ITTC 스펙트럼을 사용하여 파도에 대한 스펙트럼을 주파수 0.3에서 1.5까지 주파수 간격 0.02로 61개의 파도 성분에 대하여 스펙트럼을 분할하여 도시하였다. 여기서 T₁은 불규칙파에 대한 평균 주기를 나타낸다.

Fig. 6은 Fig. 5에 도시된 파랑 스펙트럼에 대하여 불규칙파를 시간에 따라 도시하였다. 본 계산에 사용된 파도의 위상차는 임의로 넣어주었다.

Fig. 7, 8은 전후운동 및 좌우운동을 도시하였다. 그림으로부터 전후운동의 주기가 좌우운동 주기보다 길게 나

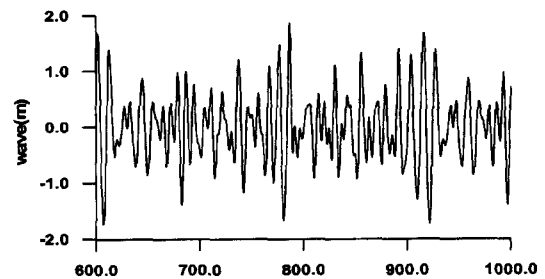


Fig. 6. Time histories of irregular waves(H_{1/3}=2.5 m, T₁=9.7 sec).

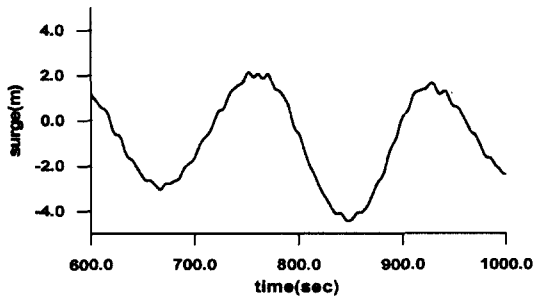


Fig. 7. Time histories of surge motion($\beta=315$ deg).

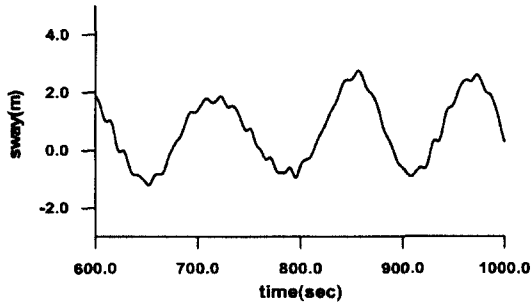


Fig. 8. Time histories of sway motion($\beta=315$ deg).

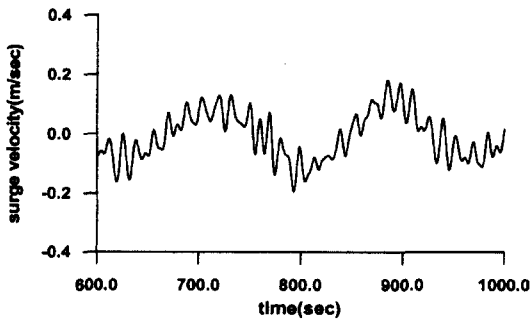


Fig. 9. Time histories of surge velocity($\beta=315$ deg).

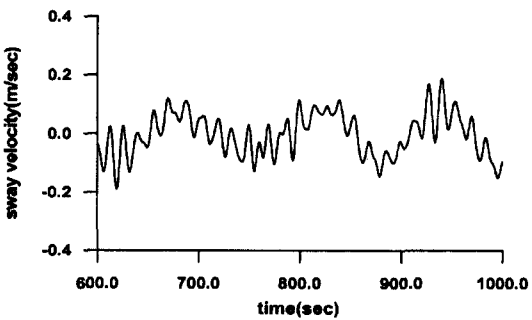


Fig. 10. Time histories of sway velocity($\beta=315$ deg).

타나는 것을 알 수 있고, 이는 횡 방향의 현수형 체인이 길이 방향의 체인보다 많아서 계류력이 커지기 때문이다.

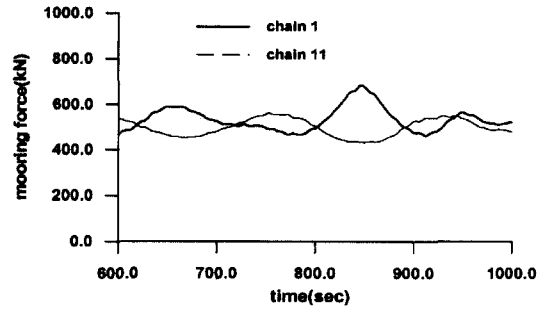


Fig. 11. The predicted time histories of mooring forces($\beta=315$ deg).

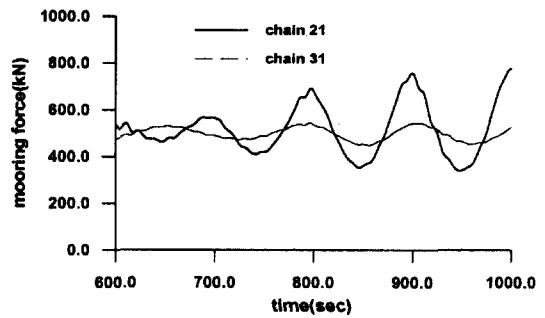


Fig. 12. The predicted time histories of mooring forces($\beta=315$ deg).

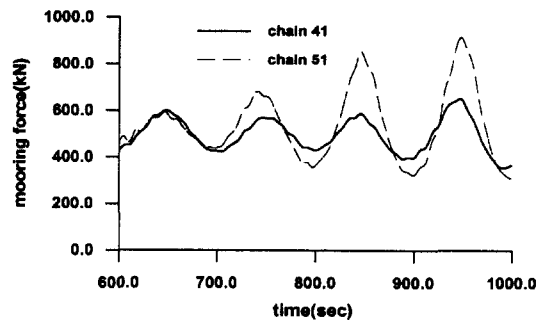


Fig. 13. The predicted time histories of mooring forces($\beta=315$ deg).

Fig. 9, 10은 전후운동 및 좌우운동에 대한 속도를 도시하였다. 속도에 대한 그림은 저주파수 운동에 대한 그림보다 1차 운동 성분이 많이 포함되어 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 11~13은 구조물의 각 지점에 설치된 현수형 계류 시스템의 부착 위치에 따른 계류력을 도시하였다. 그림에서 체인 1의 선체에 부착된 좌표는 (150, 30)이며, 체인 11의 좌표는 (-150, 0)이며, 체인 21의 좌표는 (110, 30)

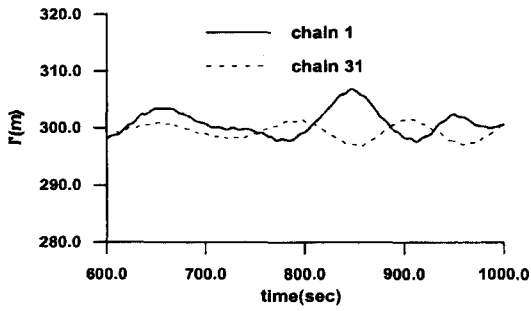


Fig. 14. The predicted time histories of ($\beta=315$ deg).

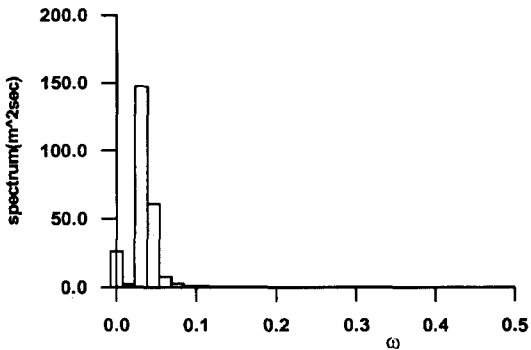


Fig. 15. The spectra of surge motion($\beta=315$ deg).

이며, 체인 31의 좌표는 (10, 30)이며, 체인 41의 좌표는 (-90, 30)이며, 체인 51의 좌표는 (145, -30)이다. 체인에 걸리는 장력은 Table 2를 참조하면 파단력(breaking load) 보다 훨씬 작은 것을 알 수 있다.

Fig. 14는 수평면 상에 투영된 체인의 길이를 시간에 따라 도시하였다. 그림에 도시된 체인의 해저면에 투영된 초기 길이는 300 m이고 그림에서 가장 큰 값이 7 m의 변형을 일으키며 이는 체인의 장력에 의한 결과이다.

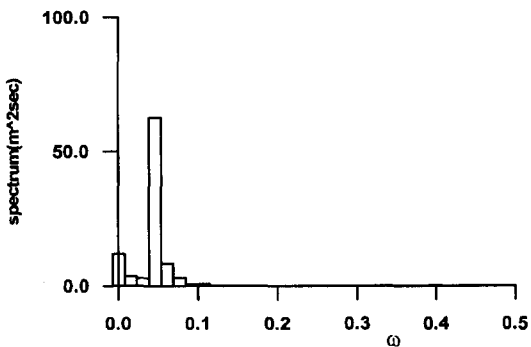


Fig. 16. The spectra of sway motion($\beta=315$ deg).

Fig. 15, 16은 저주파수 운동 신호를 FFT(fast fourier transform) 변환을 이용하여 운동 스펙트럼으로 나타내어 도시하였다. 그림에서 전후운동이 좌우운동보다 주기가 긴 것을 알 수 있고, 이는 좌우방향의 계류 인장력이 선수 방향의 인장력보다 크기 때문이다.

5. 결 론

본 논문은 3차원 패널 방법을 사용하여 불규칙파 중에서 다점 계류된 원유저장선의 저주파수 표류운동을 해석하였다.

수평면의 표류력과 표류 모우먼트는 직접적분법을 사용하여 계산되었고, 충격 응답함수를 도입한 시간영역의 운동방정식을 수치적으로 계산하였다. 계류력은 수직면에서 2차원적인 변형을 가정하여 준 정적인 모델을 사용하고 해저면과의 닿는 효과를 고려하여 산정하였다. 이상의 연구로부터 다음 결론을 도출할 수 있다.

- (1) 시간영역의 운동방정식으로 계산된 저주파수 표류운동을 체계적으로 해석하였고, 현수형 체인의 계류력의 크기를 시간에 따라 계산하였다.
- (2) 바이지식 원유저장선에 사파의 파랑이 입사하는 경우에 표류력이 매우 커져서 많은 계류 체인이 필요하므로 구조물이 항상 선수파를 받는 것이 효율적이라 생각된다. 따라서 해상상태가 거친 해역인 경우에 터렛(Turret) 계류를 시키고 선미에 이지무스 프로펠러를 장착하여 파랑의 입사방향을 항상 선수 방향으로 유지시키는 것이 이상적이다.
- (3) 앞으로 구조물에 작용하는 조류력과 풍력을 표현하여 원유저장선에 대한 저주파수 운동 해석을 수행할 필요가 있다.

참고문헌

이창호, 구자삼, 조효재, 홍봉기, 1998. 규칙파중의 인장계류식 해양구조물의 비선형 응답해석, 한국해양공학회지, 1(2): pp. 33-42.
 이호영, 신현경, 2000. 시간영역에서 초대형 부유식 해양구조물에 대한 유탄성 운동 해석, 한국해양공학회지, 14(3): pp. 29-34.
 이호영, 신현경, 염재선, 2000. 불규칙파 중에서 돌핀계류된 바이지식 해상공장에 대한 비선형 응답 해석, 한국해양공학회지, 14(4): pp. 1-8.
 Bernitsas, M.M. and Kim, B.K., 1998. Effect of slow-drift

- loads on nonlinear dynamics of spread mooring systems, *J. of Offshore Mech. and Arctic Engrg.*, Vol. 120, No. 4, pp. 201-211.
- Cummins, W.E., 1962. The impulse response function and ship motions, *Schifftechnik*, 9: pp. 101-109.
- Hong, D.C., 1987. On the improved Green integral equation applied to the water-wave radiation-diffraction problem, *J. of SNAK*, 24(1): pp. 1-8.
- Lee, D.H. and Choi, H.S., 1998. The motion behavior of the shuttle tanker connected to a turret-moored FPSO, *Proc. of the 3rd Int. Conf. on Hydrodyn.*, pp. 173-178.
- Lever, G.V. and Kean, J.R., 2000. Harsh environment FPSO development for Terra Nova, *Proc. of the 10th ISOPE*, Seattle, USA, pp. 1-9.
- Pinkster, J.A., 1980. Low frequency second order wave exciting forces on floating structure, *Netherland Ship Model Basin*, Publ. No.650.
-
- Received May 2, 2001
Accepted August 2, 2001