

# 다점 계류된 원유 저장선에 대한 표류 운동 해석

이호영 · 임춘규 · 신현경  
 울산대학교 수송시스템공학부

## Drift Motion Analyses for a FPSO with Spread Mooring Systems

HO-YOUNG LEE, Choon-Kyu Lim AND Hyunkyong SHIN  
 School of Transportation Systems Engineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea

**KEY WORDS:** Time domain 시간영역, Memory effect function 기억효과 함수, Newmark  $\beta$  method, 뉴마크 베타 방법, second order wave drift forces 2차항 파표류력, Spread mooring system 다점 계류 시스템, Drift Motions 표류 운동, FPSO 원유 저장선

**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 -surge, sway and yaw. The added mass coefficients, wave damping coefficients, first order wave exciting forces and the second order wave drift forces involved in the equations are obtained from a three-dimensional panel method in the frequency domain. The mooring lines are modeled quasistatically as catenary for chains and touchdown. As for numerical example, time domain analyses are carried out for a box-type FPSO in long crest irregular wave condition.

### 1. 서 론

근래에 해저 석유 개발이 심해로 옮겨감에 따라 기존의 고정식 구조물이 아닌 이동할 수 있고 생산과 저장이 가능한 FPSO와 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 구조물이나 Turret 계류된 FPSO 선박에 대한 응답해석은 국내외에서 많은 연구가 수행되어 왔다(이창호외 1998, Lee/Choi 1999). 또한 다점 계류된 FPSO 선박에 대하여 조류 및 파랑 중에서 안정성 해석을 한 연구도 많이 진행되고 있다(Bernitsas/Kim 1998).

본 논문은 불규칙파 중에서 다점 계류된 FPSO 구조물에 대하여 저주파수 표류 운동 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 touchdown 효과와 현수형 체인의 모양을 고려하여 모델링 하였다(Bernitsas/Kim 1998).

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

### 2. 시간영역에서 운동방정식

Fig.1은 좌표계와 FPSO 구조물과 현수형 계류시스템에 대한 그림을 도시하였다. 시간영역에서 운동방정식은 아래와 같이 부유체에 대한 6자유도 운동방정식을 확장하여 사용한다 (Cummins, 1962).

$$\sum_j (M_{ij} + A_{ij}(\infty)) \dot{x}_j + \int_0^t K_{ij}(t-\tau) x_j(\tau) d\tau = F_{Mi} + F_{wi}^{(1)} + F_{wi}^{(2)}, \quad i=1,2,6 \quad (1)$$

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

where  $x_j$ ; the response amplitudes  
 $M$ ; mass matrix,  
 $A(\infty)$ ; added mass matrix of infinite frequency  
 $B$ ; wave damping matrix

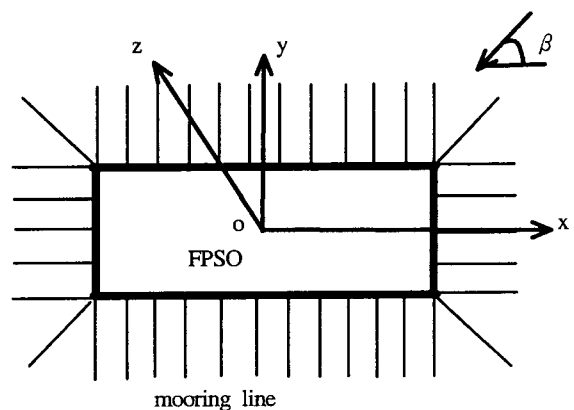


Fig.1 Coordinate system and configuration of FPSO

위에서  $K_{ij}$ 은 기억효과 함수이고,  $F_{M_i}$ ,  $F_{W_i}^{(1)}$ ,  $F_{W_i}^{(2)}$ 는 계류력, 1차항 파랑 강제력 및 2차항 파랑 강제력을 나타낸다. (1)에서  $i=1, 2, 6$ 은 전후동요, 좌우동요 및 선수동요를 나타낸다. (1)에서 주파수 무한대에서 부가질량 계수  $A_{ij}(\infty)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기에서  $A(\omega_0)$ 은 임의의 주파수  $\omega_0$ 에서 부가질량이다.

(1)에서 운동방정식을 계산하기 위하여 뉴마크-베타(Newmark- $\beta$ ) 방법을 사용하였다(이호영/신현경, 2000).

### 3. 파랑제력 및 계류 모델링

#### 3.1 파랑제력

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

$$\varphi^{(1)} e^{i\omega t} = [\zeta(\varphi^{(1)}_I + \varphi^{(1)}_D) + \sum_{j=1}^6 \varphi^{(1)}_j x_j] e^{i\omega t} \quad (4)$$

where  $\omega$  ; wave angular frequency

$\zeta$  ; wave amplitude

$x_j$  ; complex amplitude of 6-degree motions

$\varphi^{(1)}_D$ 는 1차항 산란 포텐셜이며,  $\varphi^{(1)}_I$ 는 1차항 방사 포텐셜이다.  $\varphi^{(1)}_I$ 는 입사파 포텐셜이며 유한 수심에서는 다음과 같이 표현된다.

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

여기에서  $h$ ,  $\beta$  및  $k$ 는 각각 수심, 파입사각 및 파수를 나타낸다. (4)에서 방사 및 산란 포텐셜은 3차원 패널 방법을 사용하면 계산될 수 있고, 선형 베르누이(Bernoulli) 방정식으로부터 부가질량, 파랑 감쇠계수 및 1차항 파랑 강제력은 다음과 같이 도출된다.

$$A_{ij}(\omega) = -\frac{\rho}{\omega^2} \text{Re} \left[ \int \int_{S_B} i\omega \varphi^{(1)}_j n_i ds \right] \quad (6)$$

$$B_{ij}(\omega) = \frac{\rho}{\omega} \text{Im} \left[ \int \int_{S_B} i\omega \varphi^{(1)}_j n_i ds \right] \quad (7)$$

$$f^{(1)}_{W_i}(\omega) = \rho(i\omega) \int \int_{S_B} (\varphi^{(1)}_I + \varphi^{(1)}_D) n_i ds \quad (8)$$

where  $S_B$  ; body surface

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

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

where  $\zeta_m$  ; wave amplitudes

$\epsilon_m$  ; phase angles of incident waves

본 논문에서는 파도 스펙트럼은 ITTC 스펙트럼을 사용하였다. 2차항 파랑 강제력은 1차항 포텐셜로부터 계산된 유체 압력을 직접 적분함으로써 계산되며, 2차항 파랑 강제력에 대한 시계열은 다음 공식으로 표현된다(Pinkster 1980).

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

여기에서  $P_{jk}$  와  $Q_{jk}$  는 차이 주파수에 대한 2차 전달함수이다 (이호영 등 2000).

#### 3.2 계류력 모델링

현수형 체인은 무게가 커서 물에 완전히 잠기며 x-z 평면에서 2차원적인 변형을 일으킨다고 가정한다. 본 논문에서는 심수의 현수형 체인에 대하여 해저면과의 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,  $(x_r, y_r, z_r)$ 는 선박에서 현수형 체인의 부착점을 표시한다.

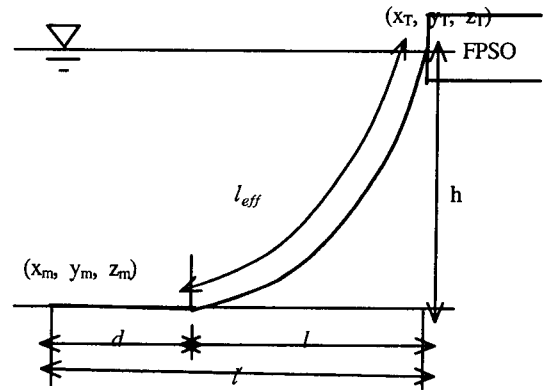


Fig.2 Geometry of catenary line

현수형 체인의 총 길이  $l_w$ 는 다음과 같다.

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

where  $l_{eff}$  ; the length of suspended catenary

$d$  ; the touchdown length of the suspended catenary

$l$  ; the horizontal projected length of the suspended catenary

$l$  ; the horizontal projected length of the mooring line

between the attachment point and mooring terminal

구조물의 부착점에서 수평면 방향의 인장력은 다음 관계식을 만족한다.

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

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

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

(13)으로부터 비선형 해를 구하는 Bi-section 방법을 사용하여  $T_H$ 를 개선하면,  $l_{eff}$ 는 (12)로부터 구할 수 있고  $d$ 와  $l$ 은 (11)로부터 계산이 가능하다. 전후운동, 좌우운동 및 선수운동 방향의  $i$  번째 현수형 체인의 인장력은 다음과 같은 식으로 표현된다.

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

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

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

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

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

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

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

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

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 바아저 형태의 FPSO이며 기본제원은 다음과 같다. FPSO가 설치될 해역은 Terra-Nova 지역으로 선정하였다(Lever/Kean 2000).

Table 1 Main particulars of FPSO

L×B×Depth(m)	300×60×30
Draft(m)	20
Water depth(m)	150
Displacement(m <sup>3</sup> )	360,000
KG(m)	15

구조물의 저주파수 운동을 해석하기 위해 요소의 분할은 구조물의 밑면은 x 방향으로 40개 y 방향으로 8개로 분할하였고, 옆면은 x 방향으로 40개 z 방향으로 2개 그리고 y 방향으로 8개 z 방향으로 2개로 분할하였다. 그리고 불규칙파수 현상을

제거하기 위해 윗면에 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 증가시켰다.

다점계류된 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.

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 <sup>9</sup>

Fig.3, 4는 선형이론에 의한 6 자유도 운동을 수평면상의 운동과 수직면상의 운동으로 나누어 도시하였다. 그림으로부터 저주파수에서의 1차 운동은 고주파수에 비하여 큰 것을 알 수 있다.

Fig.5는 파랑조건( $H_{1/3}=2.5m$ ,  $T_1=9.7sec$ )인 경우에 IITC 스펙트럼을 사용하여 파도에 대한 스펙트럼을 주파수 0.3에서 1.5까지 주파수 간격 0.02로 61개의 파도 성분에 대하여 스펙트럼을 분할하여 도시하였다.

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

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. 체인에 걸리는 장력은 Table 2를 참조하면 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 300m이고 그림에서 가장 큰 값이 7m의 변형을 일으키며 이는 수평면상의 3 자유도 운동이 연성하여 나타난 결과이다.

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. 이는 FPSO의 운동은 계류 시스템의 계류력과 공진

하며 운동하는 것을 단적으로 보여준다.

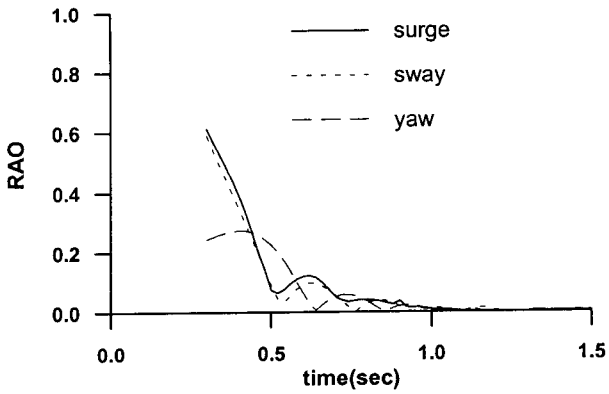


Fig.3 Horizontal motions of FPSO

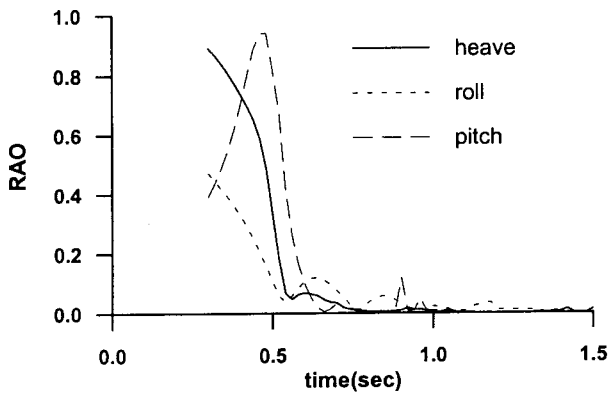


Fig.4 Vertical motions of FPSO

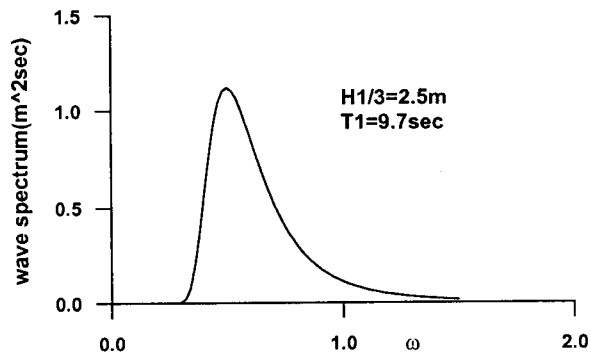


Fig.5 ITTC wave spectrum

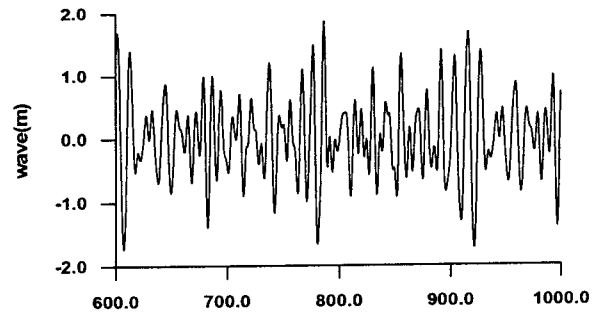


Fig.6 Time histories of irregular waves( $H_{1/3}=2.5m$ ,  $T_1=9.7sec$ )

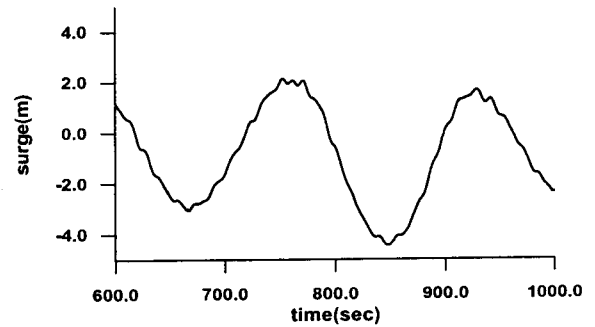


Fig.7 Time histories of surge motion( $\beta=315deg$ )

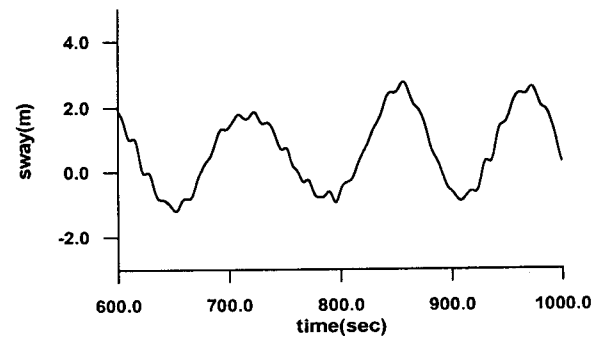


Fig.8 Time histories of sway motion( $\beta=315deg$ )

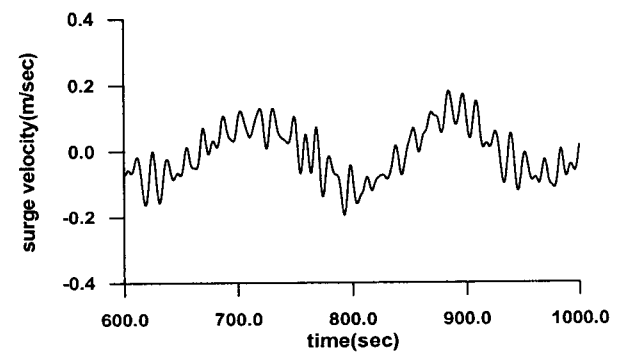


Fig.9 Time histories of surge velocity( $\beta=315deg$ )

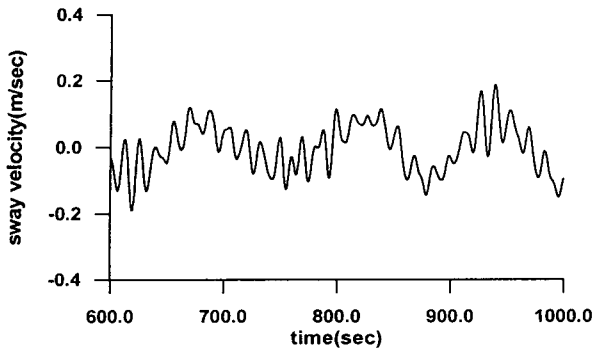


Fig.10 Time histories of sway velocity( $\beta=315\text{deg}$ )

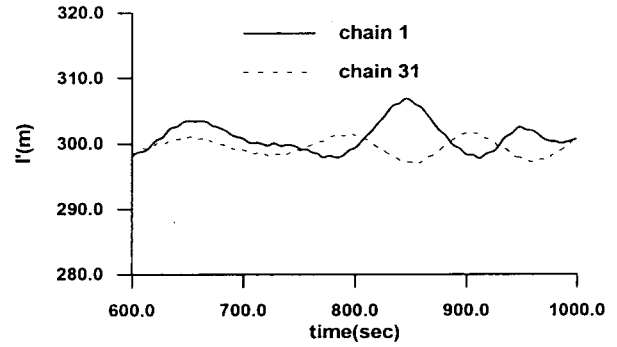


Fig.14 The predicted time histories of  $l$  ( $\beta=315\text{deg}$ )

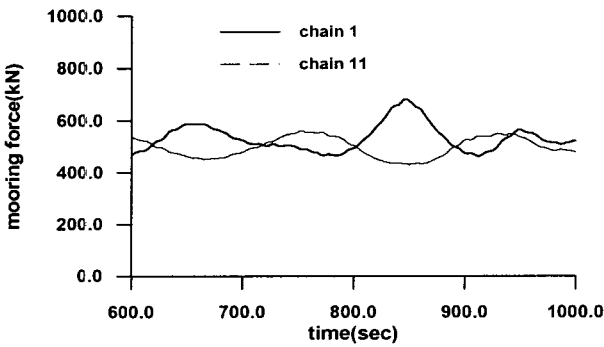


Fig.11 The predicted time histories of mooring forces( $\beta=315\text{deg}$ )

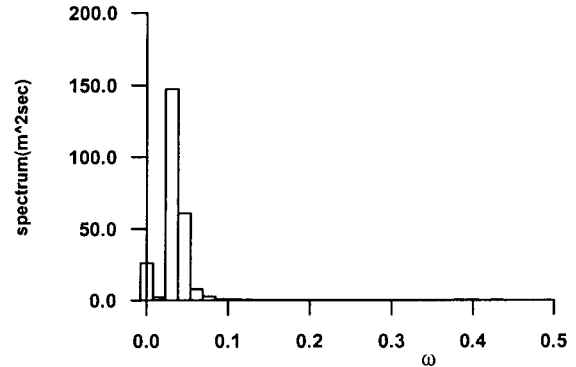


Fig.15 The spectra of surge motion( $\beta=315\text{deg}$ )

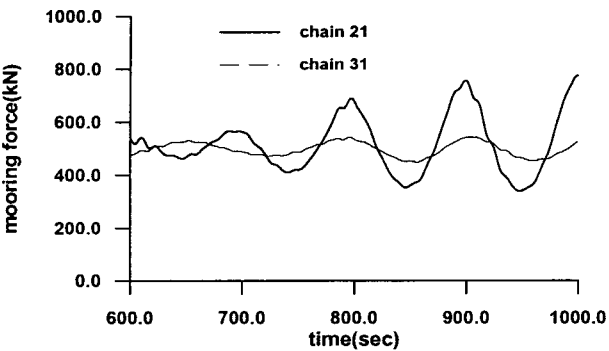


Fig.12 The predicted time histories of mooring forces( $\beta=315\text{deg}$ )

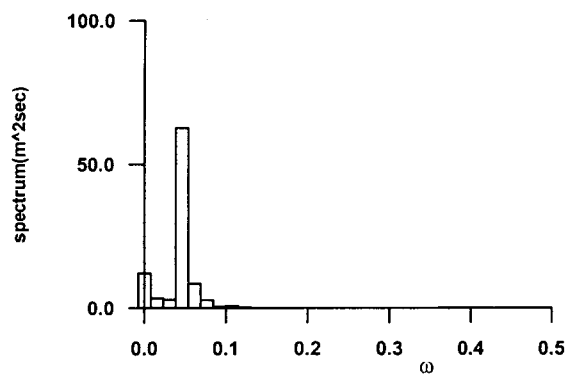


Fig.16 The spectra of sway motion( $\beta=315\text{deg}$ )

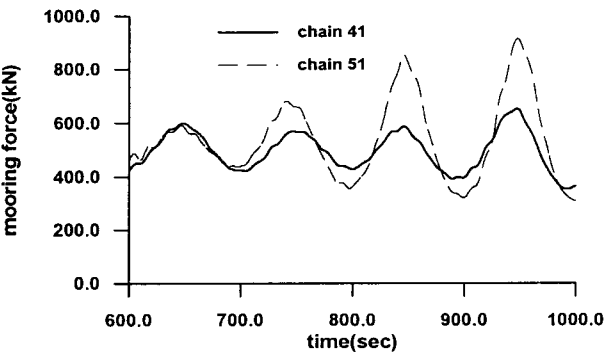


Fig.13 The predicted time histories of mooring forces( $\beta=315\text{deg}$ )

## 5. 결 론

본 논문은 3차원 패널 방법을 사용하여 불규칙파 중에서 다 점 계류된 원유저장선의 저주파수 표류운동을 해석하였다. 수평면의 표류력과 표류 모우멘트는 직접적분법을 사용하여 계산되었고, 충격 응답함수를 도입한 시간영역의 운동방정식을 사용하여 수치적으로 계산하였다. 계류력은 수직면에서 2차원적인 변형을 가정하여 준 정적인 모델을 사용하고 해저면과의 부착효과를 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 원유저장선이 사파의 파랑이 입사하는 경우에 표류력이 매우 커져서 많은 계류 체인이 필요하므로 파랑이 항상 선수파를 받는 것이 효율적이라 생각된다. 그래서 해상상태가 거친 해역인 경우에 터렛(Turret) 계류를 시키고 선미에 이지무스 프로펠러를 장착하여 파랑의 입사방향을 항상 선수방향으로 유지시키는 것이 이상적이다.
- (3) 앞으로 구조물에 작용하는 조류력은 선박 조종성 유체력 미계수를 이용하여 계산하고, 풍력은 바람에 대한 스펙트럼 모델을 정립하여 원유저장선에 대한 저주파수 운동 해석을 수행할 필요가 있다.

## 참 고 문 헌

- 이창호, 구자삼, 조효제, 홍봉기(1998).“불규칙파중의 인장계류식 해양구조물의 비선형 응답해석”, 한국해양공학회지 제 12권 제 2호, pp 33~42.
- 이호영, 신현경(2000). “시간영역에서 초대형 부유식 해양구조물에 대한 유탄성 운동 해석”, 한국해양공학회지 제13권 제 3호, pp 29~34.
- 이호영, 신현경, 염재선(2000). “불규칙파 중에서 돌핀계류된 바이지식 해상공장에 대한 비선형 응답 해석”, 한국해양공학회지 제 13권 제 2호, pp 91~99.
- Bernitsas, M.M. and Kim, B.K.(1998).“Effect of Slow-Drift Loads on Nonlinear Dynamics of Spread Mooring Systems”, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol.120, No.4, pp 201~211.
- Cummins, W.E.(1962). “The Impulse Response Function and Ship Motions”, Schifftechnik, Vol.9, pp 101~109.
- Hong, D.C.(1987).“On the Improved Green Integral Equation Applied to the Water-wave Radiation-Diffraction Problem”, Journal of SNAK, Vol.24, No.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 Third International Conference on Hydrodynamics, pp 173~178.
- Lever, G.V. and Kean, J.R.(2000).“Harsh Environment FPSO Development for Terra Nova”, Proc. of the Tenth 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.