한국해양공학회 2002년도 추계학술대회 논문집 PP.161~166

터렛계류된 FPSO의 비선형 운동 해석

임춘규* · 이호영**
*현대미포조선(주) 생산기획부
**목포대학교 선박해양공학과

Nonlinear Motion Analysis of FPSO with Turret Mooring System

Choon-Gyu LIM*, Ho-Young Lee**
*Hyundai Mipo Dockyard Co. Ltd, Ulsan, Korea
**Mokpo National University, Chonnam, Korea

KEY WORDS: FPSO 부유식 석유시추 저장선, Turret Mooring System 터렛계류시스템, Slow Motion Maneuvering Equation 저속 조종 운동 방정식, Nonlinear Motion 비선형 운동, Direct Integration Method 직접적분법, Wind Spectrum 바람 스펙트럼

ABSTRACT: *As offshore oil fields move towards the deep ocean, the oil production systems such as FPSO are being built these days. Generally, the FPSO is moored by turret mooring lines to keep the position of FPSO. Thus nonlinear motion analysis of moored FPSO must be carried out in the initial design stage because sea environments affect motion of it. In this paper, the mathematical model is based on the slow motion maneuvering equations in the horizontal plane considering wave, current and wind forces. The direct integration method is employed to estimate wave loads. The current forces are calculated by using mathematical model of MMG. The turret mooring forces are quasi-statically evaluated by using the catenary equation. The coefficients of a model for wind forces are calculated from Isherwood's experimental data and the variation of wind speed is estimated by wind spectrum according to the guidelines of API-RP2A. The nonlinear motions of FPSO are simulated under external forces due to wave, current, wind including mooring forces in time domain.*

1. 서 론

석유자원의 고갈로 인해 해상 유전의 경제성이 높아짐에 따라 최근에 Drillship, FPSO와 같은 특수한 구조물의 건조량이 늘어났다. 부유식 구조물은 기존의 고정식 구조물과는 달리 유전을 찾아 이동 가능하며, 특히 FPSO의 경우 시추, 저장 및 정제 기능도 있다. 해상에서 파도, 조류, 바람과 같은 환경 외력이 부유식 구조물의 운동에 중요한 영향을 미치므로 파도, 조류, 바람이 존재하는 해상에서 계류시스템이 장착된 구조물에 대한 운동해석은 필수적이다.

지금까지 각종 환경외력을 고려하여 계류된 선박에 대한 운동해석은 국내외에서 많은 연구가 수행되었다.

Sphair등(1998)은 FPSO의 운동에서 파도와 조류의 영향을 해석하였고, Lee and Choi(2000)는 OCIMF에서 추천한 방법의 조류력 및 풍력 계수를 사용하여 FPSO와 셔틀탱커의 운동을 해석하였다. 그리고, 김부기(1999)는 Abkowitz 조종 방정식을 이용하여 계류된 선박의 안정성 평가에 대한 기억효과 영향을 해석하였다.

본 논문에서는 3차원 패널법을 사용하여 동유체력 계수를 계산하였고, Pinkster(1980)가 제안한 직접적분법으로 비선형 표류력을 계산하였다.

임춘규 연락처 : 울산시 동구 방어동 현대미포조선(주)
052-250-3428 sidon@webmail.hmd.co.kr

조류력은 일본 MMG(Mathematical Modeling Group) 수학모델을 적용하여 손경호(1992)가 제안한 저속 시 선체에 작용하는 조종 유체력 미계수를 이용하였다. 풍하중은 API-RP2A를 근거로 Bobillier등(2000)이 모형실험을 수행한 바람스펙트럼을 이용하여 변동풍속을 계산하였고, Isherwood의 풍동 실험 결과를 이용하여 풍력계수를 구하였다. 계류 시스템은 FPSO등에 일반적으로 많이 사용되는 터렛계류방식(Turret mooring systems)을 채택하였다. 계류라인은 현수형 체인으로 해저면과의 지면효과를 고려한 준정적해석을 하였다. 천이 운동을 해석하기 위해 부가질량과 조파감쇠계수의 퓨리어 역변환을 통한 시간기억효과함수를 계산하였다.

조종운동방정식에 근간을 두고 1,2차 파 강제력, 조류력, 계류력, 풍력 그리고 시간기억효과함수를 조합하여 운동방정식을 구성하였다.

2. 수식의 정식화

2.1 좌표계

선박의 3자유도 운동을 나타내기 위해 지구고정좌표계(OXYZ)와 물체고정좌표계(oxyz)를 사용하였으며 Fig. 1에 나타내었다. 지구고정좌표계와 물체고정좌표계 사의의 관계는 식(1)로부터 얻을 수 있다.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ \Psi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\Psi & -\sin\Psi & 0 \\ \sin\Psi & \cos\Psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ r \end{pmatrix} \quad (1)$$

식(1)에서 X, Y, Ψ는 지구고정좌표계에서 선체의 변위이며, u, v, r은 물체고정좌표계에서 관측된 속도성분이다.

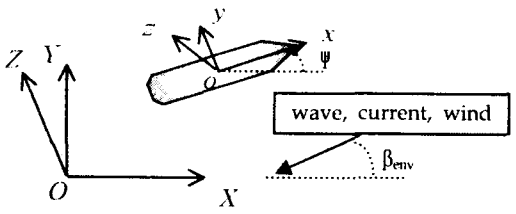

Fig. 1 Coordinate systems

2.2 운동방정식

물체고정좌표계에서 수평방향의 3자유도 운동(Surge, Sway, Yaw)을 나타내기 위해 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$m(\dot{u}-vr)=F_{W1}+F_{W2}+X_H+W_X+F_{XM}-K_X \tag{2}$$

$$m(\dot{v}-ur)=F_{W1}+F_{W2}+Y_H+W_Y+F_{YM}-K_Y \tag{3}$$

$$I_{zz}\dot{r}=F_{W1}+F_{W2}+N_H+W_N+F_{NM}-K_N \tag{4}$$

위 운동 방정식에서 m, I_{zz}는 부가질량을 포함한 질량과 관성모멘트이고, u, v, r은 3자유도 방향의 속도 성분이며, $\dot{u}$, $\dot{v}$, $\dot{r}$는 3자유도 방향의 가속도 성분을 나타낸다. F_{W1}, F_{W2}는 1차, 2차 파강제력 성분이며, X_H, Y_H, N_H는 조류력을 나타낸다. F_{XM}, F_{YM} F_{NM}는 계류력 성분이며, W_X, W_Y, W_N은 풍력 성분이고, K_X, K_Y, K_N는 시간기억효과 함수이다.

2.3 환경하중

3차원 패널법을 이용하여 부가질량, 조파감쇠계수, 1차 파강제력을 계산하였고, 2차 파강제력은 2차항 포텐셜에 기인하는 성분은 무시하고 1차 항들의 조합으로 발생하는 비선형항만을 고려하여 직접적분법으로 계산하였다(Pinkster, 1980).

$$F^{(2)}=-\int_{WL}\frac{1}{2}\rho g\,\zeta_r^{(1)}n\,dl-\int\int_{S}[-\frac{1}{2}\rho\nabla\phi^{(1)}\cdot\nabla\phi^{(1)} -\rho(x^{(1)}\cdot\nabla\phi_i^{(1)})]n\,ds+\ddot{\alpha}^{(1)}\times(m\,\dot{x}_0^{(1)}) \tag{5}$$

$$M^{(2)}=-\int_{WL}\frac{1}{2}\rho g\,\zeta_r^{(1)}(x\times n)\,dl-\int\int_{S}[-\frac{1}{2}\rho\nabla\phi^{(1)}\nabla\phi^{(1)} -\rho(x^{(1)}\cdot\nabla\phi_i^{(1)})](x\times n)\,ds+\ddot{\alpha}^{(1)}\times(I\,\ddot{\alpha}^{(1)}) \tag{6}$$

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

ρ : Density of sea water

ζ_r : Relative wave elevation

$x_0^{(1)}$, α : First order motion vector

$\phi^{(1)}$: First order velocity potential

해상에 계류된 선박에서는 차주파수(ω_j-ω_k)성분의 표류력이 계류계와의 공진에 의해 대진폭 저주파수 운동을 초래하므로 차주파수 성분만을 고려하였고, 차주파수 성분의 표류력은 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$+(\varepsilon_j-\varepsilon_k)+Q_{jk}\sin[(\omega_j-\omega_k)t+(\varepsilon_j-\varepsilon_k)] \tag{7}$$

where, ζ_j, ζ_k : Amplitude of incident wave

P_{jk} : Real part of quadratic transfer function

Q_{jk} : Imaginary part of quadratic transfer function

ε_j, ε_k : Random phase angle

해상에 계류된 선박은 조류에 의해서도 구조물의 표류운동이 발생하게 되므로 조류에 의한 힘 성분도 반드시 고려되어야 한다. 조류에 의한 힘성분은 일본의 MMG에서 제안한 조종운동방정식을 이용하였다. 조류는 일반 선박의 운항속도보다 작기 때문에 저속 모델링을 사용하여 조류에 대한 수평방향의 힘 성분을 표현하였다.

1) Surge 방향

$$X_H=-m_x\dot{u}+(m_y+X_{vr})vr+X(u) \tag{8}$$

2) Sway 방향

$$Y_H=-m_y\dot{v}-m_xur+Y_H(v,r) \tag{9}$$

3) Yaw 방향

$$N_H=-J_{zz}\dot{r}+N_H(v,r)\,Y_H(v,r)x_G \tag{10}$$

위의 식에서 $X(u)$, $Y_H(v,r)$, $N_H(v,r)$는 다음과 같이 표현된다(손경호, 1992).

$$X(u)=1/2\rho LdU^2(X_{uu}\cos^2\beta) \tag{11}$$

$$Y_H(v,r)=1/2\,\rho LdU^2[Y_v'v'+Y_r'u'r'+Y_{vv}'|v'|v' +Y_{vr}'v'|r'|+Yrr'u'r'|r'|] \tag{12}$$

$$N_H(v,r)=1/2\,\rho L^2dU^2[N_v'u'v'+N_r'r'+N_{rr}'r'|r'| +N_{vvr}'v'^2r'+N_{vrr}'u'v'r'^2] \tag{13}$$

where, L : Length of ship, B : Breadth of ship

C_B : Block coefficient, d : Draft

ρ : Density of sea water, β: Drift angle

바람에 의한 환경하중을 추정하기 위해 Isherwood의 추정식을 사용하여 풍력계수를 계산하였고, 실제 해상 상태에 가까운 풍속을 모델링하기 위해 API-RP2A에서 추천한 바람 스펙트럼을 사용하여 변동 풍속을 나타내었다. 식(14)에 바람 스펙트럼을 나타내었다(Bobillier et al., 2000).

$$S_{wind}(f)=\frac{\sigma(z)^2}{f_p[1+\frac{1.5f}{f_p}]^{5.3}} \tag{14}$$

$$\sigma(z)=U_{wind}\times0.15(\frac{z}{z_s})^{-0.125}\qquad \text{if } z\le z_s \tag{15}$$

$$\sigma(z)=U_{wind}\times0.15(\frac{z}{z_s})^{-0.275}\qquad \text{if } z>z_s \tag{16}$$

where, U_{wind} : Average speed of wind

z : Elevation of the wind center of pressure above waterline

z_s : The thickness of the surface layer

f_p : Peak frequency

식(14)의 스펙트럼을 이용하여 바람의 변동풍속을 나타내면 식(17)과 같다.

$$U(t)=\sum_{i=1}^{M}v_i\cos(\omega_i t+\varepsilon_i)+U_{wind} \tag{17}$$

$$v_i=\sqrt{2S_{wind}(f_i)df_i}\ ,\ i=1\cdots M \tag{18}$$

변동풍속과 풍력계수를 이용하여 바람에 의한 외력을 표시하면 아래와 같다.

$$W_X(t) = 0.5\rho C_X(\psi)\, U(t)^2 A_T \quad (19)$$

$$W_Y(t) = 0.5\rho C_Y(\psi)\, U(t)^2 A_L \quad (20)$$

$$W_N(t) = 0.5\rho C_N(\psi)\, U(t)^2 A_L L \quad (21)$$

where, ρ : Density of air

$C_X(\psi)$, $C_Y(\psi)$, $C_N(\psi)$: Coefficients of wind forces

A_T : Projected area in transverse direction

A_L : Projected area in longitudinal direction

L : Length of ship

계류시스템으로 현수형 체인을 선택하여 준정적(Quasi-static) 방법으로 선박의 운동효과를 직접적으로 고려하여 계류시스템의 인장력을 해석하였다. Fig.2 에 수중에 설치된 계류라인의 형상을 도시하였다.

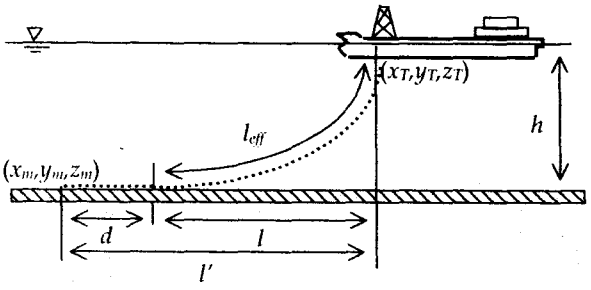

Fig. 2 Geometry of catenary line

식(22)를 이용하여 각각의 계류라인의 수평방향의 인장력을 구할 수 있다(김부기, 1999).

$$-\frac{T_H}{P}\sinh^{-1}\left[\frac{P}{T_H}\sqrt{h\left(h+2\frac{T_H}{P}\right)}\right] = l_w - \sqrt{h\left(h+2\frac{T_H}{P}\right)} - l' \quad (22)$$

식(22)에서 l_w는 $l_{eff}+d$이고, T_H는 터렛부분에서의 수평방향 인장력이다. Surge, Sway, Yaw 방향의 현수형 체인의 인장력은 다음과 같다.

$$F_{XM} = \sum_{i=1}^{N}\left(T_H^{(i)}\cos\gamma^{(i)}\cos\psi + T_H^{(i)}\sin\gamma^{(i)}\sin\psi\right) \quad (23)$$

$$F_{YM} = \sum_{i=1}^{N}\left(T_H^{(i)}\sin\gamma^{(i)}\cos\psi - T_H^{(i)}\cos\gamma^{(i)}\sin\psi\right) \quad (24)$$

$$F_{NM} = \sum_{i=1}^{N}\left(x_p^{(i)}F_{XM} - y_p^{(i)}F_{YM}\right) \quad (25)$$

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

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

여기서, $\gamma^{(i)}$는 반시계 방향으로 측정된 i번째 현수형 체인과 x축 사이의 각이다. 외력에 의해 지구고정좌표계에서 새로이 변화된 현수형 체인의 위치(x_T, y_T)는 다음과 같다.

$$x_T^{(i)} = x + x_p^{(i)}\cos\psi - y_p^{(i)}\sin\psi \quad (26)$$

$$y_T^{(i)} = y + x_p^{(i)}\sin\psi + y_p^{(i)}\cos\psi \quad (27)$$

시간영역에서 유체력 계산법으로 주파수영역에서 계산된 동유체력을 퓨리어(Fourier)변환하여 기억효과함수를 계산한다.

$$K_{ij}(t) = \frac{2}{\pi}\int_0^{\infty} B_{ij}(\omega)\cos(\omega t)\,d\omega \quad (28)$$

where, $B_{ij}(\omega)$: Damping coefficient

주파수 무한대에서의 부가질량은 임의의 주파수를 이용하여 다음 식으로 계산 가능하다.

$$A_{ij}(\infty) = A_{ij}(\omega_0) + \frac{1}{\omega_0}\int_0^{\infty} K_{ij}(t)\sin(\omega_0 t)\,dt \quad (29)$$

where, $A_{ij}(\omega_0)$: Added mass in arbitrary frequency

3. 계산 결과

계산에 사용된 구조물은 Esso Osaka이며 기본제원은 Table 1과 같고, 계산수심은 500m 이다.

Table 1 Main particulars of esso osaka

$L_{pp}(m)$	$B(m)$	$d(m)$	$\nabla(m^3)$	$A_W(m^2)$
325	53	21.8	311900	15600

구조물은 Fig.3과 같이 총 574개의 패널로 분할하였고, 3차원 패널법을 사용하여 동유체력 계수를 계산하였다.

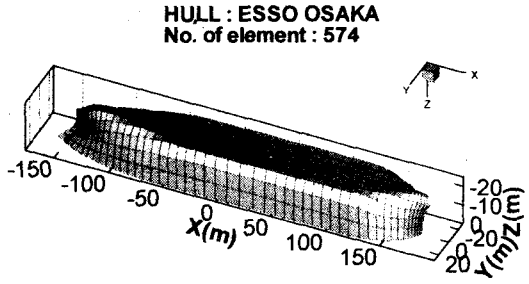

Fig. 3 Panel description of esso osaka

터렛은 선체 중앙부(midship)로부터 선수방향으로 80m 지점에 위치한다. 계류라인은 길이가 1,200m이고, 수평길이(l')는 1,025m이며, 수중질량이 300kg/m이다. 계류라인은 총 12개로 이루어지며, 각 계류라인 사이의 각도는 30°로 동일하다. 환경하중(파도, 조류, 바람)은 구조물 초기의 과도응답을 방지하고자 10배의 평균 파주기동안 직선적으로 증가하는 것으로 가정하였다. 시간영역에서 구조물의 운동은 Runge-Kutta 4차 방법을 사용하여 시적분하였다(Faires and Burden, 1993).

Table 2는 풍력계수 계산을 위한 상부 구조물의 제원을 나타낸 것이다. 상부 구조물의 제원은 Table 2와 같이 임의로 가정하여 나타내었다.

Table 2 Main particulars of upper structure

$A_L(m^2)$	$A_T(m^2)$	*No. of Mast(EA.)*	*Area of superstructure*(m^2)
4,300	1,250	5	1,050

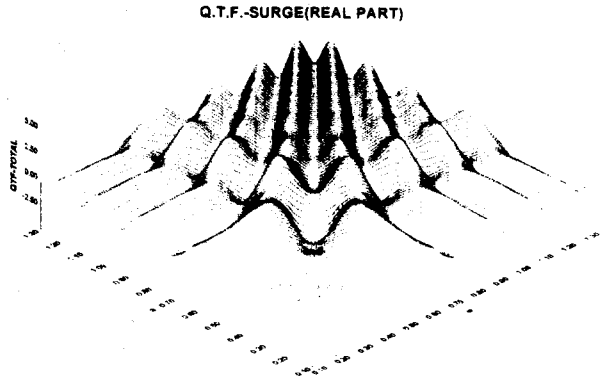

Fig. 4 Amplitude of quadratic transfer function(Surge)

Fig. 4는 입사각 0°일 때 저진동 표류력 중 2차 전달함수의 실수부 합을 $0.5\rho gB^2/L$로 나누어 무차원화하여 나타내었다. x, y 축의 ω가 동일한 경우는 시간평균 표류력(Time mean drift force)이다.

Fig. 5는 천이운동 효과를 고려하기 위해 계산된 시간기억효과 함수를 나타내었다. 약 30초 이후에는 시간기억효과가 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 기억효과 함수를 계산하기 위해서는 부가질량과 감쇠계수가 모든 주파수에서 계산되어야 하나 현실적으로 모든 주파수에서 계산하는 것은 불가능하다. 따라서, 본 논문에서는 고 주파수 영역에서 Spline 함수를 이용하여 외삽하여 부가질량과 조파감쇠계수를 계산하였다(Faires and Burden, 1993).

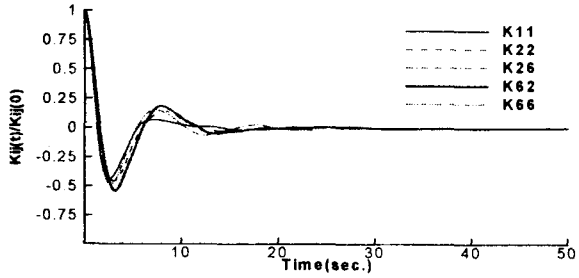

Fig. 5 Time memory effect function

Fig. 6은 파도, 조류, 바람이 구조물에 0°로 입사하는 경우 구조물의 응답을 비교하기 위해 나타내었다. 파도는 유의파고 5m와 평균파주기 12.4초이다. 조류는 2m/s의 속도로 구조물에 입사를 하고, 평균풍속 20m/s로 바람이 입사하는 경우에 대한 결과이다.

파도만 고려한 경우 구조물은 약 6m 이내의 표류운동이 나타난다. 파도와 조류를 고려한 경우 약 9m 이내의 운동이 나타난다. 파도, 조류, 바람을 고려한 경우에는 약 12m 이내로 구조물이 운동함을 알 수 있다. 조류, 바람, 표류력에 의한 운동이 파랑이 입사하는 쪽으로 밀리며, 계류계와 비선형 표류력에 의한 장주기 운동과 선형파랑하중에 의한 단주기 운동이 함께 나타나고 있음을 알 수 있다.

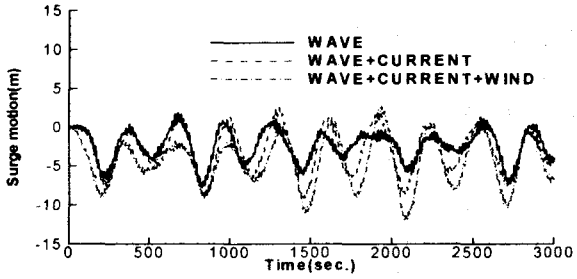

Fig. 6 Comparison of surge motion(β_{env}=0°)

Fig. 7은 파도, 조류, 바람이 구조물에 0°로 입사될 때 각 계류라인에 작용하는 계류력을 도시하였다. 첫 번째 계류라인의 위치가 선수방향으로 향하고 있으므로 가장 큰 계류력이 작용하게 되며 그 크기는 약 2,300kN 정도이다. 네 번째 계류라인은 구조물의 운동과 직각을 이루므로 계류력은 초기선인장력에서 크게 변화하지 않음을 알 수 있다.

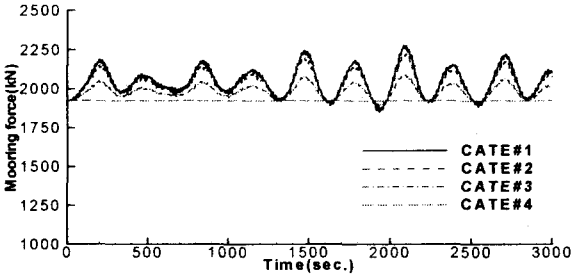

Fig. 7 Mooring forces(β_{env}=0°)

Fig. 8은 파도, 조류, 바람이 0°로 입사될 때 구조물의 Surge 방향의 운동과 속도관계를 나타내었다. 속도는 ±0.3m/s 이내이며, 구조물은 환경외력이 작용하는 방향으로 밀려서 약 12m이내의 Surge운동을 한다.

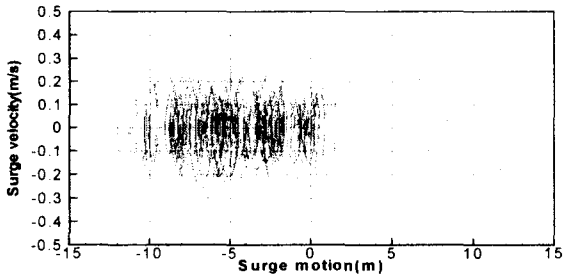

Fig. 8 Phase diagram of surge motion(β_{env}=0°)

Fig. 9는 파도, 조류, 바람이 0°로 입사될 때 평균풍속 20m/s의 바람의 변동풍속을 나타낸 것이다.

z는 35m로 가정하였고, z_0는 20m API-RP2A에서 추천하는 20m로 하여 식(16)을 이용하여 변동풍속을 계산하였다. 변동풍속은 평균풍속(20m/s)을 기준으로 변화하는 것을 확인할 수 있다.

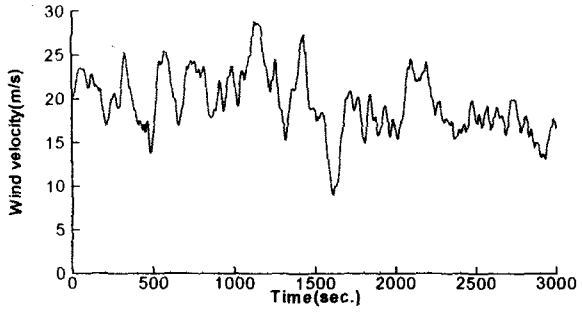

Fig. 9 Variable velocity of wind

Fig. 10은 파도, 조류, 바람이 구조물에 20°로 입사하는 경우 구조물의 Yaw 운동을 나타내었다. 파도는 유의파고 7.5*m*와 평균 파주기 15초이다. 조류의 속도는 2*m/s*이고, 평균풍속은 20*m/s*이다.

약 2,000초 이후부터는 선수각이 환경외력의 방향과 평행하게 20°를 유지하는 것을 확인할 수 있다. 2,000초 이전에는 점성에 의한 감쇠력이 포함되지 않아서 비교적 오랜 시간동안 Fishtailing현상이 나타나는 것으로 사료된다.

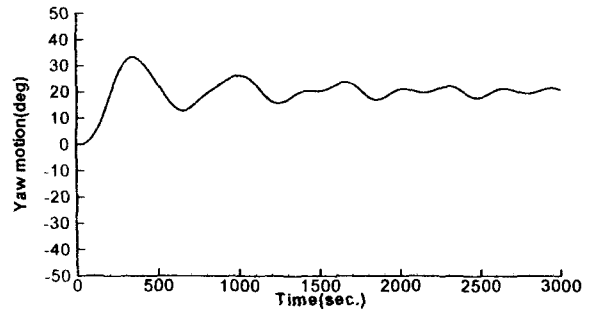

Fig. 10 Simulation of yaw motion(β_{env}=20°)

Fig. 11은 파도, 조류, 바람이 구조물에 20°로 입사될 때 각 계류라인에 작용하는 계류력을 도시하였다. 첫 번째와 두 번째 계류라인에 약 2,700*kN*의 계류력이 작용됨을 확인할 수 있다. 약 2,000초 이후는 구조물이 환경하중을 가장 작게 받는 방향(20°)으로 향하기 때문에 계류력도 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

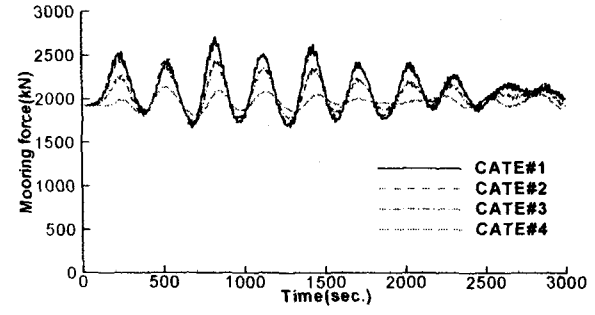

Fig. 11 Mooring forces(β_{env}=20°)

Fig. 12은 파도, 조류, 바람이 구조물에 20°로 입사될 때 구조물의 운동을 나타낸 것이다.

구조물은 선체 중앙부로부터 80*m* 떨어진 터렛을 중심으로 환경하중 방향(20°)으로 선수각을 향하는 Weathervaning현상을 확인할 수 있다.

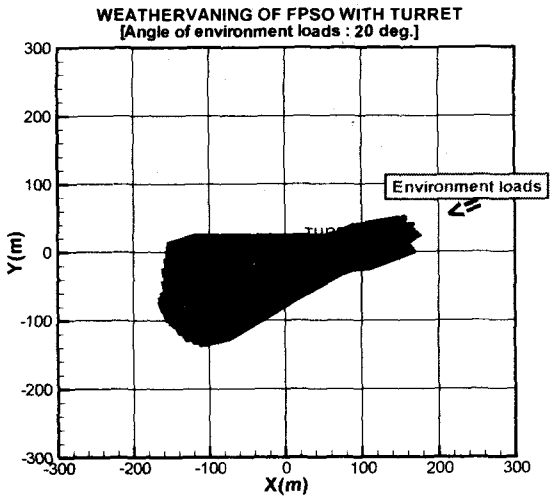

Fig. 12 Simulation of weathervaning(β_{env}=20°)

4. 결론

터렛계류된 FPSO의 비선형 운동특성을 해석하기 위해 파도, 조류, 바람에 의한 환경하중과 계류력을 고려하여 시간영역에서 구조물의 운동을 시뮬레이션 하였다.

파랑하중은 직접적분법을 사용하여 차주파수 표류력을 포함하여 계산하였다. 조류력을 표현하기 위해 저속모델링을 사용하여 선체에 작용되는 조류력을 계산하였고, 바람에 의한 하중은 바람 스펙트럼을 적용하여 변동풍속에 대한 풍력을 계산하였다.

계산결과 각종 환경하중하에 FPSO의 장주기 및 단주기 운동을 수치모사 하였고 환경하중을 최소화하려는 Weathervaning현상을 확인하였다.

본 연구는 부유식 해양 구조물 및 계류라인의 초기설계에 유용하게 사용될 수 있을 것이라 사료된다.

앞으로 환경외력의 추정에 있어서 계류감쇠 및 표류감쇠 등을 고려하여 좀더 실제에 가까운 환경외력을 모델링해야 할 것이다.

참 고 문 헌

김부기 (1999). "Memory Effect on the Stability of Moored Ships", 제38차 KTTC Workshop 논문집.

손경호 (1992). "저속시 선체에 작용하는 조종유체력 및 조종성능에 관한 연구", 대한조선학회 논문집, 제29권 3호.

Lee, D. H. and Choi, H. S. (2000). "A Dynamic Analysis FPSO-Shuttle Tanker System", Proc. of ISOPE Conf., Vol

1, pp 302-308.

Sphaier, S. H., Fernandes, A. C. and Pontes, L. G. S., (1998). "Waves and Current Influence in the FPSO Dynamics", Proc. of ISOPE Conf., Vol. 1, pp 278-283.

Pinkster (1980). "Low Frequency Second Order Wave Exciting Forces on Floating Structures", Publicatin No. 650, Netherlands Ship Model Basin.

Bobillier, B., Chakrabarti, S. and Christiansen, P. (2000). "Generation and Analysis of Wind Load on a Floating Offshore Structure", Proc. of OMAE Conf., pp 1-7.

Faires, J. D. and Burden, R. L. (1993). "Numerical Methods", PWS Publishing, pp 69-83, pp 150-166.