대 한 조 선 학 회 논 문 집
제 41 권 제 1 호 2004 년 2 월

Journal of the Society of Naval Architects of Korea
Vol. 41, No. 1, pp. 8-14, February 2004

원유 생산• 저장• 하역선의 갑판침수에 관한 연구

임춘규†**, 이호영**

현대미포조선㈜ 사업기획부*, 목포대학교 선박해양시스템 전공**

A Study on the Deck Wetness of the FPSO

Choon-Gyu Lim†** and Ho-Young Lee**

DEP' T OF PROJECT & PRODUCTION PLANNING, HYUNDAI MIPO DOCKYARD CO., LTD*
MAJOR IN NAVAL ARCHITECTURE & MARINE ENGINEERING, MOKPO NATIONAL UNIVERSITY**

Abstract

As the number of offshore structure is growing in deep waters, there have been increased damages of it. These floating structures in offshore locations exposed to harsh environmental conditions. In recent years, there has been a growing attention around damages on bow and deck on FPSO caused by waves in steep storm condition. This paper describes a study of the water on deck due to the dynamic behavior of a FPSO with turret mooring system. The nonlinear motions of the FPSO are simulated under external forces due to wave, current, wind, and mooring forces in the time domain. The direct integration method is employed to estimate low frequency drift wave forces. The current forces are calculated by using slow motion maneuvering equations in the horizontal plane. 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.

※Key words : FPSO(원유 생산·저장·하역선), Deck-wetness(갑판침수), Nonlinear motion(비선형운동), Radiation potential(방사포텐셜), Diffraction potential(산란포텐셜), Relative motion(상대운동)

1. 서론

해상유전 개발이 점점 심해로 옮겨감에 따라 고정식 구조물에 비해 부유식 구조물의 건조가 증가되고 있다. 부유식 구조물은 안정적인 작업성이 요구되는데 이를 위해 계류되거나 위치제어 시스템을 장착하기도 한다. 계류라인이나 위치 제어 시스템의 경우 수평면 상의 구조물 비선형 운동을 제어하기 위한 것이다. 그러나 수평면 상의 비선형 운동뿐만 아니라 심각한 해상조건일 경우 수

접수일:2003 년 7 월 26 일,승인일:2003 년 11 월 24 일
†주저자, E-mail: sidon@hmd.co.kr
Tel: 052-250-3383

직 대진폭 운동에 의해 구조물에 심각한 피해가 발생하기 때문에 수평 비선형 운동과 함께 수직운동도 부유 구조물 운동 해석에 반드시 고려되어야 한다. 파고가 높을 경우 구조물의 상대운동에 의해 갑판상에 녹수(Green water)가 발생하여 석유 시추 및 정제를 위한 설비에 큰 피해가 일어난다. 따라서 수직 비선형 운동의 영향을 고려한 보다 정확한 운동해석이 필요하다. 녹수의 방지를 위하여 건현을 보다 높게 해야 되나 건조비 측면에서 불리하므로 선측과 선수부에 보호벽을 설치하여 녹수에 의한 피해를 줄이기도 한다. FPSO 등의 부유식 구조물 건조 시 정확한 운동해석을 통한 녹수 발생 여부에 대한 해석은 초기 설계 단계에서 반드시 필요하다.

본 논문에서는 터렛계류된 FPSO 의 파도에 의한 녹수 발생 현상을 해석하기 위해 선형 산란파와 방사파를 고려하여 파고를 계산하였고 시간영역에서 구조물의 수직 상대운동을 계산하였다. Chan(1990)이 적용한 직접적분법을 이용하여 비선형 표류력을 계산하였고, 저속조종 수학 모델을 적용하여 조류력을 계산하였다. 바람에 의한 외력은 Bobillier et al.(2000)이 모형실험을 수행한 스펙트럼을 이용하여 계산하였다.

2. 문제의 정식화

해상에 계류된 FPSO 의 운동을 나타내기 위하여 수직 상방을 양으로 하는 직각 우수좌표계를 사용하였으며, Fig. 1 에 나타내었다.

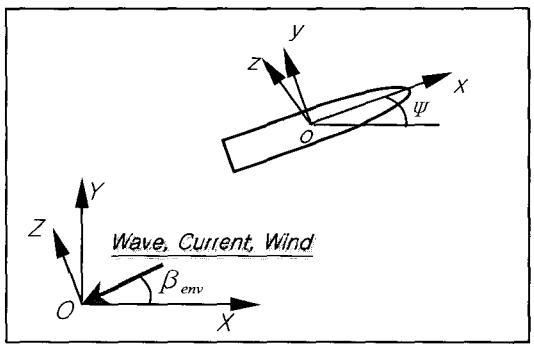

Fig. 1 Coordinates systems

FPSO 의 6 자유도 운동은 아래의 식을 이용하여 계산하였다(임춘규/이호영 2003).

$$\{m_{11}+\sum_{j=1}^{6}[M_{1j}+a_{1j}(\infty)]\}\ddot{\xi}_1-(M_{11}+0.75m_{22})\dot{\xi}_2\dot{\xi}_6 = F_{w1}^{(1)}+F_{w1}^{(2)}+X_c+X_w+X_m-\sum_{j=1}^{6}\int^{\infty}K_{1j}(t-\tau)\dot{\xi}_j d\tau \quad (1)$$

$$\{m_{22}+\sum_{j=1}^{6}[M_{2j}+a_{2j}(\infty)]\}\ddot{\xi}_2+(M_{22}+m_{11})\dot{\xi}_1\dot{\xi}_6 = F_{w2}^{(1)}+F_{w2}^{(2)}+Y_c+Y_w+Y_m-\sum_{j=1}^{6}\int^{\infty}K_{2j}(t-\tau)\dot{\xi}_j d\tau \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^{6}[M_{3j}+a_{3j}(\infty)]\ddot{\xi}_3 = F_{w3}^{(1)}+F_{w3}^{(2)}-C_{33}\xi_3-C_{35}\xi_5-\sum_{j=1}^{6}\int^{\infty}K_{3j}(t-\tau)\dot{\xi}_j d\tau \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^{6}[M_{4j}+a_{4j}(\infty)]\ddot{\xi}_4 = F_{w4}^{(1)}+F_{w4}^{(2)}-C_{44}\xi_4-\sum_{j=1}^{6}\int^{\infty}K_{4j}(t-\tau)\dot{\xi}_j d\tau \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^{6}[M_{5j}+a_{5j}(\infty)]\ddot{\xi}_5 = F_{w5}^{(1)}+F_{w5}^{(2)}-C_{53}\xi_3-C_{55}\xi_5-\sum_{j=1}^{6}\int^{\infty}K_{5j}(t-\tau)\dot{\xi}_j d\tau \quad (5)$$

$$\{m_{66}+\sum_{j=1}^{6}[M_{6j}+a_{6j}(\infty)]\}\ddot{\xi}_6 = F_{w6}^{(1)}+F_{w6}^{(2)}+\psi_c+\psi_w+\psi_m-\sum_{j=1}^{6}\int^{\infty}K_{6j}(t-\tau)\dot{\xi}_j d\tau \quad (6)$$

위 식에서 M 은 질량과 관성모멘트이고, ξ 는 6 자유도 방향의 운동성분이다. $a_{ij}(\infty)$는 주파수 무한대의 부가질량이며, $F_w^{(1)}$, $F_w^{(2)}$는 1, 2 차 파강제력 성분이다. X_c, Y_c, ψ_c는 조류력 성분이다. X_w, Y_w, ψ_w는 풍력 성분이며, X_m, Y_m, ψ_m은 계류력 성분이고, K_{ij}는 시간기억효과 함수이다. C_{33}, C_{35}, C_{44}, C_{53}, C_{55} 는 정 복원력 및 모멘트 성분이다. 조류력은 저속 조종운동 방정식을 사용하여 표현하였는데 여기서 사용된 부가질량 및 관성모멘트(m_{11}, m_{22}, m_{66})는 구조물의 강제 동요로 인해 생기는 부가질량과 달리 주파수 영(Zero)일 때의 값으로 다음과 같이 나타낼 수 있다(Hooft /Pieffers 1988).

$$m_{11}=\frac{2.7\rho(C_BLBd)^{5/3}}{L^2}$$
$$m_{22}=\frac{\pi}{2}\rho Ld^2[1+0.16\frac{C_BB}{d}-\frac{5.1}{(L/B)^2}] \quad (7)$$
$$m_{66}=\frac{\pi}{24}\rho L^3d^2[1+0.2\frac{C_BB}{d}-\frac{4}{(L/B)}]$$

where, ρ : Density of sea water

C_B : Block coefficient

L : Length of a vessel

B : Breadth of a vessel

d : Draft of a vessel

2 차 파강제력은 2 차항 포텐셜에 기인하는 성분은 무시하고 1 차 항들의 조합으로 발생하는 비선형항만을 고려하여 계산하였다(이호영 등 2001; Chan 1990).

$$F^{(2)} = -\int_{WL}\frac{1}{2}\rho g\zeta_r^{(1)2}ndl - \iint_{S_0}[-\frac{1}{2}\rho\nabla\varphi^{(1)}\cdot\nabla\varphi^{(1)} - \rho(x^{(1)}\cdot\nabla\varphi_t^{(1)})]nds + \alpha^{(1)}\times F^{(1)} - \rho g x_4^{(1)}x_6^{(1)}S_{10}k \tag{8}$$

$$M^{(2)} = -\int_{WL}\frac{1}{2}\rho g\zeta_r^{(1)2}(x\times n)dl - \int_{S_0}\iint[-\frac{1}{2}\rho\nabla\varphi^{(1)}\cdot\nabla\varphi^{(1)} - \rho(x^{(1)}\cdot\nabla\varphi_t^{(1)})](x\times n)ds + \alpha^{(1)}\times M^{(1)} - \rho g\begin{pmatrix} x_2^{(1)}(x_3^{(1)}S_{00} - x_5^{(1)}S_{10}) + x_3^{(1)}x_6^{(1)}S_{10} \\ + x_5^{(1)}x_6^{(1)}(S_{02} - S_{20}) - x_1^{(1)}(x_3^{(1)}S_{00} - x_5^{(1)}S_{10}) \\ + x_4^{(1)}x_6^{(1)}(S_{02} - S_{20}) \end{pmatrix} \tag{9}$$

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

$$S_{ij} = \iint_A x^i y^j dxdy \qquad at\ \ z = 0$$

$\zeta_r^{(1)}$: Relative wave elevation

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

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

S_0 : Mean wetted body surface

WL : Water line

해상에 계류된 선박에서는 차주파수(ω_j-ω_k)성분의 표류력이 계류계와의 공진에 의해 대진폭 저주파수 운동을 초래하므로 차주파수 성분만을 고려하였고, 차주파수 성분의 표류력은 식(10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_w^{(2)}(t) = \sum_{j=1}^{M}\sum_{k=1}^{M}\zeta_j\zeta_k\{P_{jk}\cos[(\omega_j - \omega_k)t + (\varepsilon_j - \varepsilon_k)] + Q_{jk}\sin[(\omega_j - \omega_k)t + (\varepsilon_j - \varepsilon_k)]\} \tag{10}$$

식(10)의 ζ_j, ζ_k 는 입사파 진폭이며, P_{jk}, Q_{jk} 는 2 차항 전달함수의 실수부와 허수부이다. ε_j, ε_k 는 위상차를 나타낸다.

조류에 의한 힘 성분을 계산하기 위해서 저속조종 모델링을 사용하여 조류에 대한 수평방향의 3 자유도 힘 성분을 표현하였다(손경호 1992).

$$\begin{aligned} X_c &= -0.5\rho LdU^2(X_{uu}\cos^2\beta) \\ Y_c &= 0.5\rho LdU^2[Y_v'v' + Y_r'u'r' + Y_{vv}'|v'|v' + Y_{vr}'v'|r'| + Y_{rr}'u'r'|r'|] \\ \Psi_c &= 0.5\rho LdU^2[N_v'u'v' + N_r'r' + N_{rr}'|r'|r' + N_{vvr}'v'v'r' + N_{vrr}'v'r'r' \\ &\quad + \{0.5\rho LdU^2[Y_v'v' + Y_r'u'r' + Y_{vv}'|v'|v' + Y_{vr}'v'|r'| + Y_{rr}'u'r'|r'|]\}x_G \end{aligned} \tag{11}$$

실제 해상에 가까운 풍속을 모델링하기 위해 API-RP2A 에서 추천한 바람 스펙트럼을 사용하였고, 바람 스펙트럼은 식(12)와 같다(Bobillier et al. 2000). 식(12)에서 z 는 풍하중이 작용되는 수선면 상부의 중심이고 z_s 는 풍하중이 작용하는 표면층의 높이를 나타낸다. 풍력계수는 Isherwood 의 풍동실험 결과를 이용하였다.

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

$$\sigma(z) = U_{wind}\times 0.15(\frac{z}{z_s})^{-0.125} \quad (z \le z_s) \tag{12}$$

$$\sigma(z) = U_{wind}\times 0.15(\frac{z}{z_s})^{-0.275} \quad (z > z_s)$$

Fig. 2 에 수중에 설치된 계류라인의 형상을 도시하였다.

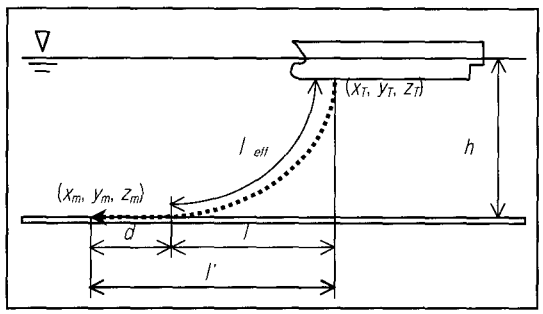

Fig. 2 Geometry of catenary line

식(13)을 이용하여 각 계류라인의 수평방향 인장력(T_H)을 계산할 수 있다(Kim 1999).

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

식(13)에서 $l_w = l_{eff} + d$ 이며, P는 단위 길이당 수중 질량을 나타낸다. 수평면상의 계류력은 식(14)로부터 계산할 수 있다.

$$F_{mx} = \sum_{i=1}^{N}(T_H^{(i)}\cos\gamma^{(i)}\cos\psi + T_H^{(i)}\sin\gamma^{(i)}\sin\psi)$$
$$F_{my} = \sum_{i=1}^{N}(T_H^{(i)}\sin\gamma^{(i)}\cos\psi - T_H^{(i)}\cos\gamma^{(i)}\sin\psi) \quad (14)$$
$$F_{mr} = \sum_{i=1}^{N}(x_P^{(i)}F_{YM} - y_P^{(i)}F_{XM})$$

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

식(14)에서 $\gamma^{(i)}$는 i번째 현수형 계류라인과 지구고정 좌표계 X축의 반시계 방향 각도이며 x_P, y_P는 FPSO에 고정된 계류라인의 좌표이다.

구조물의 비선형 운동을 표현하기 위해서는 시간영역에서의 해석이 필수적이다. 시간영역에서 유체력 계산법으로 주파수영역에서 계산된 동유체력을 퓨리어(Fourier) 변환하여 기억효과함수와 무한 주파수 부가질량을 계산할 수 있다.

$$K_{ij}(t) = \frac{2}{\pi}\int_0^\infty B_{ij}(\omega)\cos(\omega t)d\omega \quad (15)$$

$$A_{ij}(\infty) = A_{ij}(\omega_0) + \frac{1}{\omega_0}\int_0^\infty K_{ij}(t)\sin(\omega_0 t)dt \quad (16)$$

where, $B_{ij}(\omega)$: Damping coefficients
ω_0 : Arbitrary frequency

구조물의 갑판침수는 파고와 구조물의 수직운동과 관계가 있다. 구조물의 운동에 의한 상대파고는 식(17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\zeta_r(t) = \zeta(t) - (\mu_3 + \mu_4 y - \mu_5 x)e^{i\omega t + \varepsilon} \quad (17)$$

$$\zeta(t) = \sum_{k=1}^{N}\{\frac{i\omega_k}{g}[\zeta(\phi_I(\omega_k) + \phi_D(\omega_k)) + \sum_{j=1}^{6}\xi_j(\omega_k)\phi_j(\omega_k)]e^{i\omega_k t + \varepsilon}\} \quad (18)$$

where, ϕ_I : Incident wave potential
ϕ_D : Diffraction potential
ϕ_j : Radiation potential
ξ : Motion

식(18)의 N 은 계산에 사용된 주파수 갯수로, 시뮬레이션 시간 동안 신호의 반복을 피하기 위해 다음과 같이 정의하였다.

$$\Delta\omega = \frac{2\pi}{T_{\max}}, \quad N = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\Delta\omega} \quad (19)$$

식(19)의 주파수 개수(N)만큼 포텐셜을 계산하기는 많은 시간이 필요하므로 Spline 함수를 이용하여 내삽을 하여 N 개의 주파수에 대한 포텐셜을 계산하였다(Faires/Burden 1993).

3. 계산 결과

계산에 사용된 구조물은 Esso Osaka 이다(임춘규/이호영 2003). 계산 수심은 1,000m 이다. 시간영역에서 구조물의 운동을 나타내기 위해 Runge-Kutta 4 차 방법을 사용하여 시적분 하였다(Faires/Burden 1993).

터렛계류시스템은 단위 길이당 수중 질량이 350kg/m 인 체인을 12 개 사용하였다. 계류라인의 총 길이는 3,300m 이고, 수평길이(l')는 2,800m 이며, 각 계류라인의 사이 각도는 30°로 동일하다. 터렛은 선체중앙부로부터 선수방향으로 130m 지점에 위치한다.

장파정 불규칙파를 표현하기 위해 JONSWAP 스펙트럼을 사용하였다(HR Wallingford Limited 2002). 본 계산에 사용된 해상환경 조건은 Table 1 과 같다.

Table 1 Environmental condition

Wave		Current speed	Average wind speed
Significant height	Peak Period		
13 m	16 $sec.$	2.0 m/s	20 m/s

환경하중은 초기의 구조물 과도응답을 방지하기 위해 30 배의 파주기 동안 직선적으로 증가하는 것으로 가정하였다.

Fig. 3 은 산란파와 방사파의 영향을 살펴보기 위해 장파정 불규칙 파도가 0°로 입사할 때 구조물 주위의 파고형태를 나타낸 것이다. 윗부분의 입사파, 산란파, 방사파를 고려한 경우 구조물의 현측과 선미 부분의 파도 형태가 많은 변

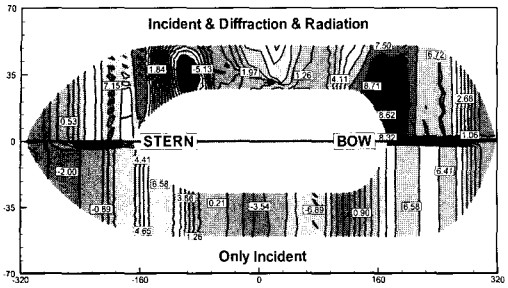

Fig. 3 Comparison of wave elevation around the body

형이 나타남을 확인할 수 있다.

Fig. 4 는 선수부의 파고형태를 나타낸 것이다. 산란파와 방사파를 고려한 경우 입사파만 고려한 경우보다 파고가 더욱 크게 나타남을 확인할 수 있다. 따라서 파고와 구조물의 운동에 좌우되는 갑판침수현상을 해석하기 위해서는 입사파와 더불어 산란파, 방사파를 함께 고려해야 더욱 정확한 결과를 얻을 수 있을 것이다.

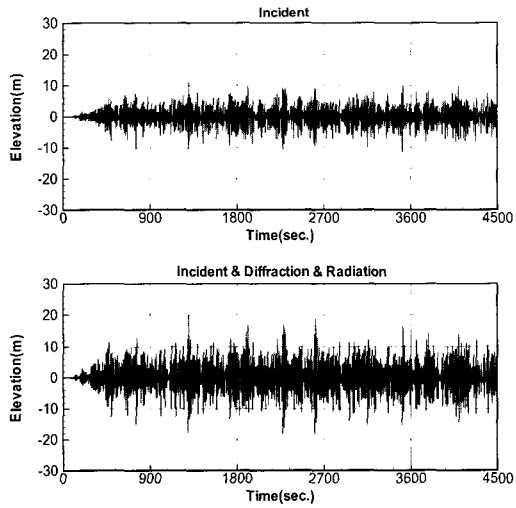

Fig. 4 Comparison of wave elevation at the bow

Fig. 5 는 환경외력이 0°로 입사하는 경우 구조물의 운동을 나타낸 것이다. 구조물의 전후운동(Surge)은 선형파랑 하중에 의한 단주기 운동과 계류계와 비선형 표류력에 의한 장주기 운동이

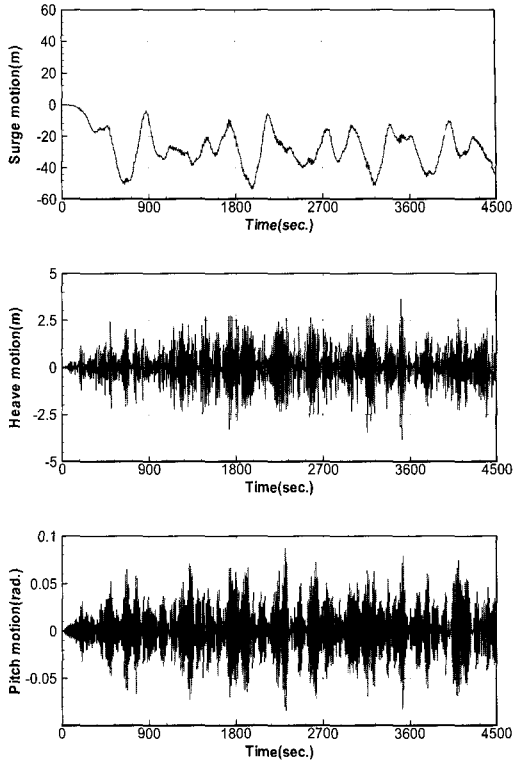

Fig. 5 Motion of FPSO

함께 나타난다.

파고와 구조물의 수직운동에 관계 있는 상대파고($\zeta_r(t)$)가 구조물의 건현(Freeboard)을 초과하면 녹수(Green water)발생으로 갑판침수 현상이 발생한다. Fig. 6 은 갑판 침수 현상을 확인하기 위한 세 지점을 나타낸 것이다.

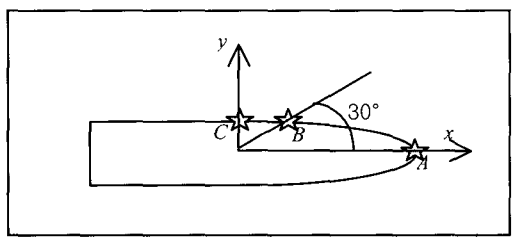

Fig. 6 The locations for measurement of deck wetness

Fig. 7 은 환경외력이 0°로 입사하는 경우 구조물의 상대운동을 위치 별로 나타낸 것이다. 구조

물의 깊이는 35m, 흘수는 21.8m 일 경우, 그림에서 13.2m 부근의 선은 건현의 위치로 구조물의 상대운동이 이 선을 초과할 경우 갑판 침수가 발생한다. 반대로 구조물의 상대운동이 흘수 보다 낮을 경우 수선면 위로 선저 노출이 발생하여 슬래밍(Slamming)이 발생된다. 그림을 살펴보면 선수부에 갑판 침수 현상뿐만 아니라 선저 노출도 발생되는 것을 확인할 수 있다.

선수부(Position A)에서 다수의 갑판 침수현상이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

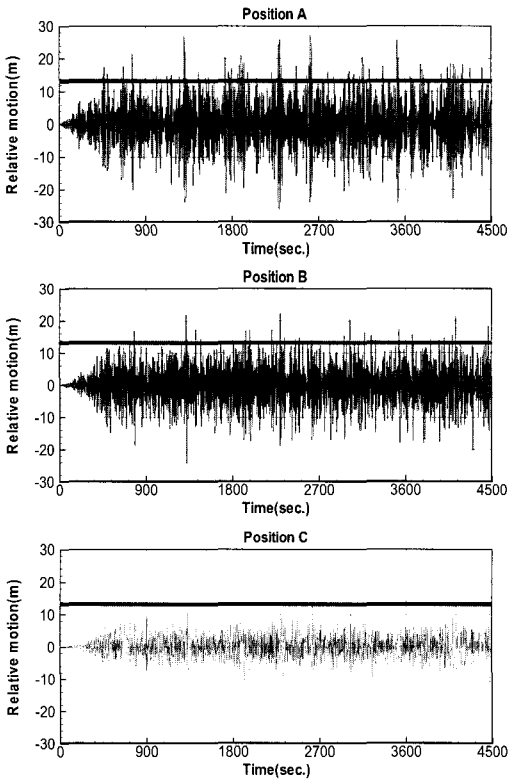

Fig. 7 Relative motion

Fig. 7 에서 900 초에서 4,500 초까지 1 시간 동안 각 위치에서 발생되는 갑판침수 횟수는 Table 2 와 같다.

다른 위치에 비해 선수부에서 다수의 갑판 침수 현상이 발생되므로 선수부의 갑판 침수 방지를 위해 선수부에 건현 높이거나 보호벽을 설치하는 등의 방안을 강구해야 할 것이다.

Table 2 The number of deck wetness for 1 hour

Position A	Position B	Position C
55	25	0

4. 결론

파도, 조류, 바람이 공존하는 해상에서 터렛계류된 FPSO 의 비선형 운동을 시간영역에서 수치시뮬레이션하여, 구조물의 동적응답에 의한 갑판 침수 현상을 확인하였다.

비선형 파랑하중은 직접적분법을 사용하여 6 자유도 방향의 비선형 파랑하중을 계산하였고, 조류력은 저속 조종 운동 방정식을 이용하여 모델링하였다. 바람에 의한 하중은 스펙트럼을 적용하여 변동풍속에 대한 운동을 계산하였다. 입사파, 산란파, 방사파를 고려한 파고 성분을 계산하여 갑판 침수 현상을 계산하였다.

수치해석 결과 갑판침수 현상은 구조물의 수직운동(Heave, Pitch)에 의해 선수부에서 가장 많이 발생된다. FPSO 같은 구조물은 갑판상에 고가의 장비들이 위치하므로 갑판침수에 의한 피해를 방지하기 위해 선수부의 건현을 높이거나 보호벽을 설치하여 녹수 발생에 따른 피해를 최소화해야 된다.

본 연구는 갑판침수의 발생을 수치 시뮬레이션을 통해 확인해봄으로써 초기 설계 단계에서 FPSO 의 적절한 건현을 결정하기 위한 한가지 요소를 제공할 수 있으리라 사료되며, 추후 여러 다른 각도의 파도를 고려한 연구와 실험과의 비교를 통해 보다 정도 높은 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- 손경호, 1992, " 저속시 선체에 작용하는 조종유체력 및 조종성능에 관한 연구, " 대한조선학회 논문집, 제 29 권, 제 3 호, pp.90-101.
- 이호영, 신현경, 임춘규, 김외현, 강점문, 윤명철, 2001, " 불규칙파 중에서 돌핀 계류된 해상공항에 대한 운동, " 대한조선학회 논문집, 제 38 권,

제 2 호, pp.10-18.
- 임춘규, 이호영, 2003, " 터렛계류된 FPSO 의 비선형 운동 해석, " 대한조선학회 논문집, 제 40 권, 제 2 호, pp. 20-27.
- 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.
- Chan, H. S., 1990, " A Three-dimensional Technique for Predicting First and Second Order Hydrodynamic Forces on a Marine Vehicle Advancing in Waves," Ph. D. Thesis, University of Glasgow, pp. 255-266.
- Faires, J. D. and Burden, R. L., 1993, " Numerical methods, " PWS Publishing, Boston.
- Hooft, J. P. and Pieffers, J. B. M., 1988, " Maneuverability of Frigates in Waves," Journal of Marine Technology, Vol . 25, No. 4.
- HR Wallingford Limited, 2002, " FPSO Response in Long and Short Crested Seas," Offshore Technology Report, HSE Books, pp. 3-10.
- Kim, B. K., 1999, " Memory effect on the stability of moored ships," 제 38 차 KTTC Workshop 논문집.

< 임 춘 규 > < 이 호 영 >