

탠덤 배치된 FPSO 와 셔틀탱커의 비선형 운동 해석

임춘규^{†*}, 이호영^{**}, 신현경^{***}

현대미포조선(주) 종합설계부^{*}, 목포대학교 선박해양시스템 전공^{**},
울산대학교 조선해양공학부^{***}

Nonlinear Motion Analysis of FPSO and Shuttle Tanker in a Tandem Configuration

Choon-gyu Lim^{†*}, Ho-young Lee^{**} and Hyungyoung Shin^{***}

Dep' t of Basic Design, Hyundai Mipo Dockyard co., Ltd.^{*}
Major in Naval Architecture and Marine Engineering, Mokpo National University^{**}
School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan^{***}

Abstract

FPSO and shuttle tanker are connected to each other by a mooring hawser and a loading hose through which cargo oil is off-loaded. Even in mild sea-state, environmental loads can cause unstable large drift motions between two vessels in tandem off-loading operations, which may result in collision incidents. Accordingly, the analysis on the relative motion between two vessels due to the environmental loads should be investigated in initial design stage.

In this study, the low speed maneuvering equation is employed to simulate nonlinear motions of FPSO and shuttle tanker. Low frequency wave drift forces including hydrodynamic interactions between two vessels are evaluated by near field approaches. Current loads are determined by mathematical model of MMG and wind loads are calculated by employing the wind spectrum according to the guidelines of API-RP2A. Mooring forces produced by turret mooring lines and a flexible hawser are modeled quasi-statically by catenary equations. The effect of environmental loads that affect nonlinear motion is investigated through variation in their magnitudes and the nonlinear motions between FPSO and shuttle tanker are simulated under wave, current and wind in time domain.

※Keywords: Tandem offloading operation(선미하역 작업), Low speed maneuvering equation(저속 조종 운동 방정식), Low frequency drift forces(저진동 표류력), Sheltering effect(그림자 효과)

1. 서론

심해 유전 개발의 증가로 FPSO 와 같은 부유식 구조물의 건조가 증가하게 되었다. 시추, 정제 및 하역 작업을 복합적으로 수행할 수 있는 FPSO 에서 생산된 석유는 셔틀탱커를 이용하여 육지로 운송된다.

선미하역(Tandem Offloading)방식의 경우 해상 환경의 영향으로 FPSO 와 셔틀탱커의 상호운동에 의해 충돌 확률이 높아진다(Vinnem 1999, Leonhardsen et al. 2001). 특히 해상상태가 양호 하여도 셔틀탱커가 수평면상의 대전폭 운동을 일으켜 FPSO 와 충돌하는 경우가 발생한다. 따라서 구조물 초기설계단계에서 두 부유체의 거동을 반드시 해석해야 된다.

계류된 부유체의 거동을 수치해석적인 방법으로 표현하기 위해 저속조종운동방정식을 이용하는 방법과 항력계수 등을 사용하여 부유체 운동방정식을 기술하는 방법이 주로 이용되고 있다. 부유체 운동방정식을 사용하는 경우 실험을 통한 조류력 및 풍력 계수를 사용하여 비교적 간편하게 운동방정식을 구성할 수 있는 장점이 있다(Lee and Choi 2003, Morishita et al. 2001). 이에 반해 조종운동방정식을 사용하는 경우 PMM 시험 등을 이용하여 유체력 미계수를 결정하고 이를 토대로 운동방정식을 정립하여 계산한다. 이 방법은 PMM 시험을 통해 많은 유체력 미계수를 결정해야 하는 단점이 있으나, 항력계수를 사용하는 부유체 운동방정식에 비해 조류에 의한 환경하중을 더욱 정확히 표현할 수 있는 장점이 있다(임춘규와 이호영 2003, Bernitsas and Papoulias 1990, Spahier and Fernandes 2001).

본 논문에서는 조종운동방정식을 근간으로 파도, 조류, 바람이 공존하는 해상에서 FPSO 와 셔틀탱커의 거동을 시간영역에서 해석하고 각 환경하중의 크기를 변화시켜 가면서 비선형 운동에 미치는

환경하중의 영향을 살펴보고자 한다.

2. 문제의 정식화

해상에 탠덤배치된 FPSO 와 셔틀탱커의 운동을 나타내기 위하여 수직 상방을 양으로 하는 직각 우수좌표계를 사용하여 Fig. 1 에 나타내었다.

FPSO 와 셔틀탱커의 수평면상 운동은 아래의 식(1)을 이용하여 계산하였다(임춘규와 이호영 2004).

$$\sum_{j=1}^3 [\{M_{ij}^n + m_{ii}^n + a_{ij}^n(\infty)\} \ddot{\xi}_j^n + \int_{-\infty}^{\infty} K_{ij}(t-\tau) \dot{\xi}_j^n d\tau] = F(1)_i^n + F(2)_i^n + C_i^n + D_i^n + W_i^n + S_i^n \quad (1)$$

where, $D_1^n = (M_{11}^n + 0.75 m_{22}^n) \dot{\xi}_2^n \dot{\xi}_3^n$

$D_2^n = -(M_{22}^n + m_{11}^n) \dot{\xi}_1^n \dot{\xi}_3^n$

$D_3^n = 0$

$n=1,2$ (FPSO, Shuttle tanker)

$i, j=1,2,3$ (Surge, Sway, Yaw)

위 식(1)에서 M 은 질량이고, ξ 는 수평면상의 운동성분이다. $a(\infty)$ 는 주파수 무한대의 부가질량이며,

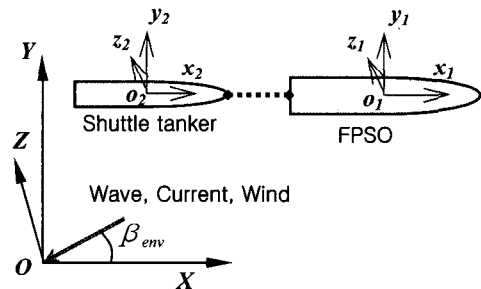


Fig. 1 Coordinates system

$F(1), F(2)$ 는 1, 2 차 파랑제력 성분이다. C 는 조류력 성분, W 는 풍력 성분, S 는 터렛 계류 시스템의 계류력과 호저의 인장력 성분, K_{ij} 는 시간기억 효과 함수이다. 조류력은 저속 조종운동 방정식을 사용하여 표현하였는데 여기서 사용된 부가질량(m) 및 관성모멘트는 구조물의 강제 동요로 인해 생기는 부가질량과 달리 주파수 영(Zero)일 때의 값으로 다음과 같이 나타낼 수 있다(Hoofit and Pieffers 1988).

$$m_{11}^n = \frac{2.7\rho(C_B^n L^n B^n d^n)^{5/3}}{L^2}$$

$$m_{22}^n = \frac{\pi}{2}\rho L^n (d^n)^2 [1 + 0.16 \frac{C_B^n B^n}{d^n} - \frac{5.1}{(L^n/B^n)^2}] \quad (2)$$

$$m_{33}^n = \frac{\pi}{24}\rho(L^n)^3 (d^n)^2 [1 + 0.2 \frac{C_B^n B^n}{d^n} - \frac{4}{(L^n/B^n)}]$$

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

해상에 계류된 선박은 차주파수 표류력으로 인해 대전폭 운동이 발생한다. 차주파수 표류력은 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F(2)_{pq} = \frac{1}{4}\rho g \int_{WL} \zeta_r \zeta_q^* ndl$$

$$- \frac{1}{4}\rho \iint_{S_0} \nabla \phi_p \cdot \nabla \phi_q^* nds$$

$$- \frac{1}{4}i\rho \iint_{S_0} (\omega_q \nabla \phi_q^* \eta_p - \omega_p \nabla \phi_p \eta_q^*) nds \quad (3)$$

$$- \frac{1}{4}m(\omega_q^2 \alpha_p \times \mu_q^* + \omega_p^2 \alpha_q^* \times \mu_p)$$

$$- \frac{1}{4}\rho g A_W \{ \xi_{6p} (\xi_{4q}^* x_f + \xi_{5q}^* y_f) + \xi_{6q}^* (\xi_{4p} x_f + \xi_{5p} y_f) \} k$$

where, $\eta = \xi + \alpha \times r$
 $\mu = \xi + \alpha \times r_G$
 ζ : Relative wave elevation

ξ, α : First order motion vector
 ϕ : First order velocity potential
 S_0 : Mean wetted body surface
 WL : Water line
 $*$: Complex conjugate
 ρ, q : Arbitrary frequency

비선형 파랑하중 해석을 위해 2 차항 포텐셜에 기인하는 성분은 무시하고 1 차항 등의 조합으로 발생되는 비선형항만을 고려하였다(이호영 등 2001, 최윤락 2004). 식(3)에서 주파수 p, q 가 동일한 경우는 시간평균 표류력을 나타낸다.

식(3)에서 FPSO 와 셔틀탱커의 상호작용을 고려할 경우 1 차항 포텐셜(ϕ)은 아래의 식(4)로 나타낼 수 있다.

$$\phi = \phi_I + \phi_D + \sum_{j=1}^{12} \xi_j \phi_j \quad (4)$$

식(4)에서 아래첨자 j 가 1~6은 FPSO 운동 모드를 나타내며, 7~12는 셔틀탱커의 운동모드를 나타낸다. ξ_j 는 각 운동모드의 복소 진폭이며 ϕ_I 는 입사파, ϕ_D 는 산란파 포텐셜을 나타낸다. 방사문제에서 물체경계조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다(Kim and Ha 2002).

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial n} = -i\omega N_j \quad (j=1\sim 6) \text{ on FPSO} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial n} = 0 \quad (j=7\sim 12) \text{ on Shuttle tanker} \quad (6)$$

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial n} = 0 \quad (j=1\sim 6) \text{ on FPSO} \quad (7)$$

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial n} = -i\omega N_j \quad (j=7\sim 12) \text{ on Shuttle tanker} \quad (8)$$

조류에 의한 힘 성분을 계산하기 위해서 저속 조종 모델링을 사용하여 조류에 대한 수평방향의 3 자유도 힘 성분을 표현하였다(손경호 1992, 임춘규와 이호영 2004). 실제 해상에 가까운 풍속을 모델링하기 위해 API-RP2A 에서 추천한 바람 스펙트럼을 사용하고, FPSO 는 터렛계류 시스템으로

계류되며 계류라인은 현수형 체인으로 가정하여 수평방향의 계류력을 계산하였다(임춘규와 이호영 2003).

서플탱커는 FPSO 의 선미부와 호저(Hawser)에 의해 연결된다. FPSO 와 서플탱커 거리(d)와 탄성호저의 장력은 다음 식으로 계산된다(Lee and Choi 2003).

$$d = \frac{TL}{EA} + \frac{2T}{w} \sinh^{-1} \left[\frac{wl}{2T} \right] \quad (9)$$

where, T : Horizontal tension
 w : Weight per unit length
 l : Length of hawser
 E : Young's modulus
 A : Cross section area

3. 계산 결과

계산에 사용된 구조물들은 Esso Osaka 선형으로 기본 제원은 Table 1 에 나타내었다.

계산 수심은 1,000m 이고, 터렛계류 시스템을 구성하는 체인의 단위 길이당 수중 무게는 2,943N/m 이며, 총 길이는 3,000m 이고, 수평길이는 2,500m 이다.

일반적으로 FPSO 용 터렛계류 시스템은 각각의 계류라인 사이각이 동일한 Equally spread mooring pattern 과 각각의 계류라인 묶음으로 구성하는 Coupled mooring pattern 을 사용하는데 본 연구에서는 터렛의 공간이용 측면에서 효율적인 Coupled mooring pattern 을 이용하여 4 개의 체인을 한 묶음으로 구성하였고, Fig. 1 의 FPSO 선수 방향을 기준으로 묶음 별 사이각을 120°로 구성하여 총 12 개의 체인을 사용하였다(Huang 2000). 계류라인의 초기 인장력은 약 1629kN 이다. 터렛은 환경하중이 입사하는 방향으로 선수각을 일치시킴으로 인해 환경하중의 영향을 줄이기 위해 설치된다. 따라서 터렛의 설치 위치별 선수각 및 계류력 변화를 살펴 터렛을 설치해야 된다.

Fig. 2 에 터렛의 위치에 따른 선수각의 변화와 계류력 비교 그림을 나타내었다. 파도는 장파정 불규칙파로 ITTC 스펙트럼을 사용하였다.

Table 1 Main particulars

Vessels	FPSO	Shuttle tanker
Length(m)	325	225.3
Breadth(m)	53	36.8
Draft(m)	21.8	15.1
Displacement volume(m^3)	306,520	102,173
Wind lateral area(m^2)	4,000	3,500
Wind transversal area(m^2)	1,200	900

유의파고 4m, 평균파주기 8 초이며, 조류는 1 m/s, 바람은 20 m/s 로 구조물과 10°의 각도로 입사한다고 가정하였다. Fig. 2 에서 L 은 FPSO 의 길이를 나타내며 T 는 선체중앙부로부터 선수방향으로 떨어진 터렛의 위치를 나타낸다. 터렛이 선수쪽으로 위치할수록 환경하중의 입사방향으로 빠르게 선수각이 유지되나 계류력은 오히려 증가하는 것을 확인할 수 있다.

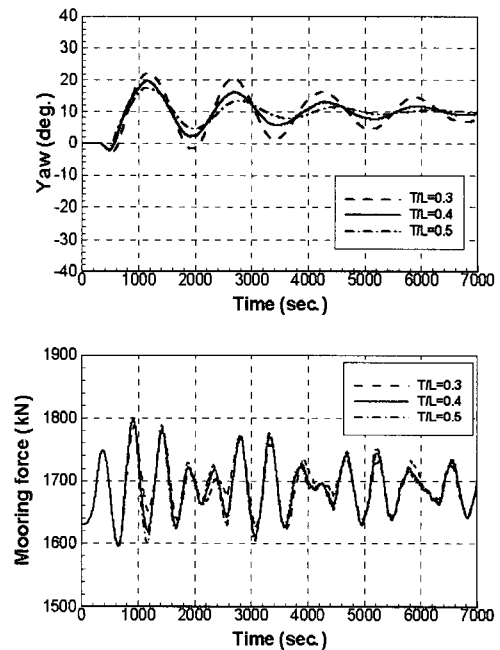


Fig. 2 Comparisons of yaw motions and mooring forces

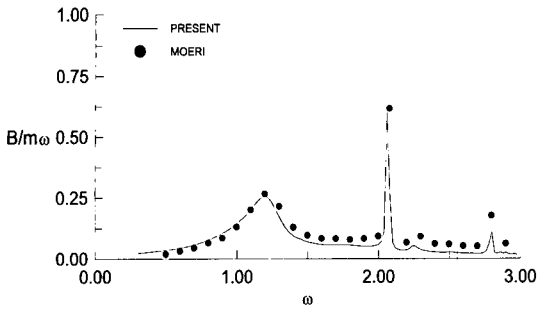


Fig. 3 Damping coefficients of twin barges

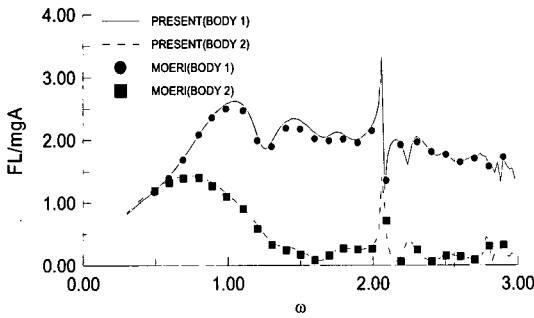


Fig. 4 Wave exciting forces of twin barges

Fig. 2 에 나타난 결과를 토대로 탠덤계류된 구조물 해석을 위해 FPSO 의 터렛 위치는 Weathervaning 과 계류력을 고려해 $T/L=0.4$ 인 지점에 위치시켰다.

탠덤계류된 두 구조물의 거동해석을 위해선 유체역학적 상호작용을 고려한 유체력 해석이 반드시 이루어져야 한다. 두 부유체의 유체역학적 상호작용 해석결과를 해양시스템안전연구소(MOERI)에서 계산한 결과와 비교하여 Fig. 3, 4 에 나타내었다(최윤락과 홍사영 2001).

해석에 사용된 구조물은 길이 30m, 폭 22m, 흘수 1.5m 인 직사각형 바야지 2 척으로 바야지 사이 거리는 8m 이다. 구조물의 상호간섭으로 인한 Standing wave 에 의한 특정한 파의 길이 즉 구조물 사이 거리의 약 2 배인 파장 14m 에서 감소계수와 파 강제력의 심한 변화가 일어나는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4 의 파강제력은 파도가 입사하는 방향에

위치한 Body 1 이 Body 2 보다 크게 나타나며 전체적으로 MOERI 의 결과와 잘 일치한다.

FPSO 와 셔틀탱커의 상호작용 영향을 고려한 표류력을 알아보기 위해 FPSO 와 셔틀탱커 사이의 거리가 50m 이며 구조물과 0°의 각도로 입사하는 경우 Surge 방향의 시간평균 표류력을 Fig. 5 에 나타내었다.

Fig. 6 에 FPSO 와 셔틀탱커 거리에 따른 시간평균 표류력을 나타내었다. 수직축은 FPSO 의 $0.5\rho g A^2 B^2/L$ 로 무차원화 하였다.

그림자 효과(Sheltering effect) 영향으로 셔틀탱커에 작용하는 파강제력은 FPSO 가 존재하지 않는 경우보다 작게 나타난다. 두 부유구조물 사이의 거리가 줄어들수록 표류력이 작게 나타난다. 그러나 거리의 변화에 따른 표류력의 차이는 그다지 크게 나타나지 않는다.

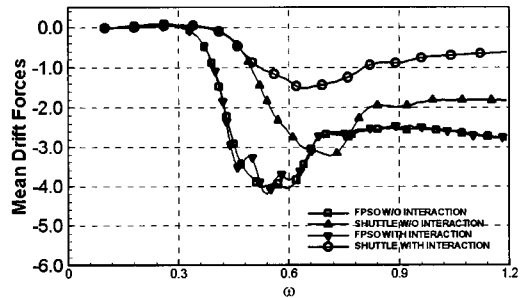


Fig. 5 Comparisons of mean drift surge force depending on hydrodynamic interactions

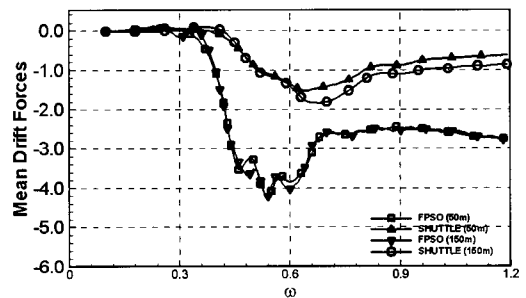


Fig. 6 Comparisons of mean drift surge force depending on distance between two vessels

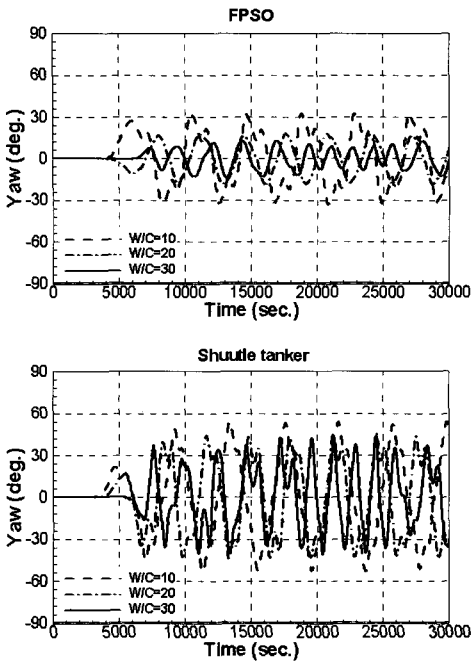


Fig. 7 Yaw motions of FPSO-Shuttle tanker as variation of wind average speed

FPSO와 셔틀탱커의 운동을 수치모사하기 위해 두 선박 사이의 거리가 150m이며 탄성(EA)이 1,000kN이고 길이가 150m인 호저를 택하였다.

탠덤계류된 FPSO와 셔틀탱커의 비선형 운동에 대한 바람의 영향을 살펴 보기 위해 일정한 유속(1m/s)의 조류와 평균풍속(10m/s, 20m/s, 30 m/s)을 변화시켜 가면서 구조물과 0°의 각도로 입사할 때 두 선박의 Yaw 운동을 Fig. 7에 나타내었다.

바람과 조류의 속력비(W/C)가 클수록 대표적 비선형 운동인 Fish Tailing 운동이 줄어든다. 이로써 바람이 선박의 운동 안정성에 좋은 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

1m/s 유속의 조류, 평균풍속 10m/s의 바람, 유의파고 1.5m이고 평균파주기 5초인 장파정 불규칙파가 구조물과 0°의 각도로 입사하는 경우에 나타나는 구조물의 운동 및 계류력을 Fig.8~10에 나타내었다.

Fig. 8의 파도, 조류, 바람을 고려한 경우가 Fig. 7의 조류와 바람을 고려한 경우보다 Yaw 운동의

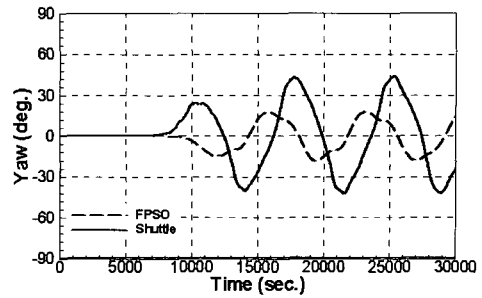


Fig. 8 Yaw motions of FPSO-Shuttle tanker in wave, current and wind

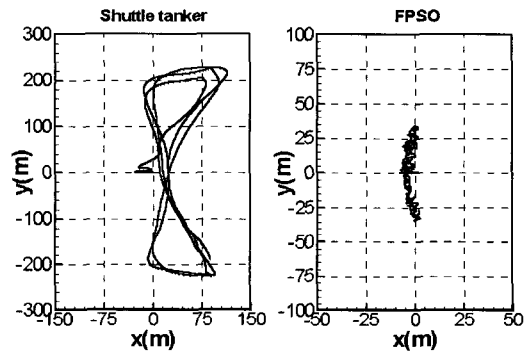


Fig. 9 x-y trajectory of FPSO-shuttle tanker in wave, current and wind

진폭이 작게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이 결과는 Lee and Choi(2003)의 결과와는 상반되나 Bernitsas et al.(2002)의 결과와는 일치되는 경향을 나타낸다. 즉 파랑 표류력의 영향이 바람과 마찬가지로 선박의 운동 안정성에 좋은 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 FPSO와 셔틀탱커의 수평면 상 운동을 나타낸 것이다. 해상상태가 비교적 양호하여도 셔틀탱커는 수평면상의 대전폭 운동을 하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 FPSO의 터렛계류 시스템 총 12개 체인 중 1, 5, 9번 체인에 나타나는 계류력과 호저에 나타나는 인장력을 나타낸 것이다.

약 7,000초까지는 선수의 방향 변화 없이 Surge 방향으로만 운동을 함에 따라 선수방향으

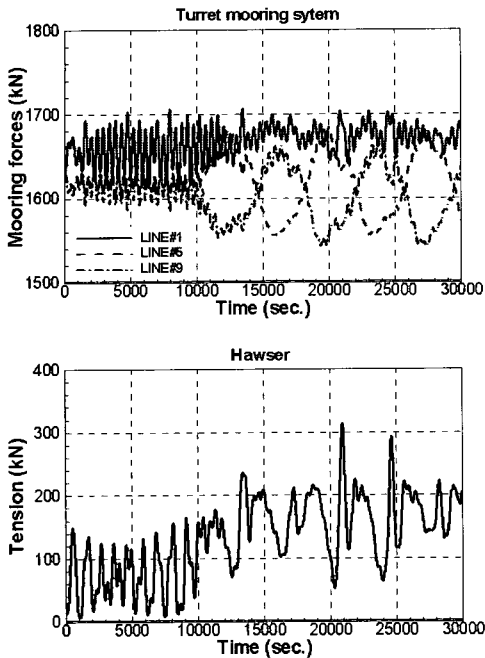


Fig. 10 Mooring forces of turret mooring system and tensions of hawser

로 설치된 체인 1 번에 가장 큰 힘이 걸리며, 7,000 초 이후부터는 FPSO 와 셔틀탱커의 선수각 변화에 따라 체인 5 번과 9 번에 큰 힘이 걸리는 것을 확인할 수 있으며 호저의 인장력은 FPSO 와 셔틀탱커의 선수각이 서로 반대가 되는 순간에 가장 크게 나타난다.

4. 결론

저속조종운동 방정식을 이용하여 FPSO 와 셔틀탱커의 비선형 운동을 수치모사 하였다. 두 선박의 유체역학적 상호 간섭을 고려하여 저진동 표류력과 시간평균 표류력을 포함한 파랑하중을 계산하였고, 저속조종모델을 이용하여 조류력을 계산하였다. 풍력은 바람스펙트럼을 이용하였고 탄성 카테너리 방정식을 이용하여 계류력 및 호저의 인장력을 계산하였다.

계산 결과 탠덤계류된 두 선박의 경우 비교적 양호한 환경하중이 입사하여도 선수각 변화로 인

한 수평면 상의 대전폭 운동이 발생하는 것을 알 수 있었다. 조류는 두 선박의 수평면상 대전폭 운동에 대해 파도와 바람에 비해 상대적으로 큰 영향을 미치는 것을 확인하였고, 바람과 파랑 하중은 수평면 상의 Yaw 운동 진폭을 감소시키는 것으로 확인되었다.

추후 파랑 하중뿐만 아니라 비선형 대전폭 운동에 큰 영향을 미치는 조류력도 두 선박간의 상호 영향이 고려되어 엄밀히 계산될 필요가 있다고 사료된다.

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, 강정문, 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.
- 임춘규, 이호영, 2004, "원유 생산·저장·하역선의 갑판침수에 관한 연구," 대한조선학회 논문집, 제 41 권, 제 1 호, pp. 8-14.
- 최윤락, 홍사영, 2001, "고차경계요소법을 이용한 다수 부체 동유체력 해석," 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 198-203.
- 최윤락, 2004, "유탄성 구조물에 작용하는 파랑 표류력 해석," 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, pp. 162-165.
- Bernitsas, M.M. and Papoulias, F.A., 1990, "Nonlinear Stability and Maneuvering Simulation of Single Point Mooring Systems," Proc. of Offshore Station Keeping Symposium, SNAME, pp. 1-19.
- Bernitsas, M.M., Matsuura, J.P., and Andersen, T., 2002, "Mooring Dynamics Phenomena Due to Slowly-Varying Drift," Proc. of OMAE Conf..

- Hooft, J.P. and Pieffers, J.B.M., 1988, "Maneuverability of Frigates in Waves," Journal of Marine Technology, Vol. 25, No. 4, pp. 262-271.
- Huang, K., 2000, "Mooring system design consideration for FPSOs," Proc. Of ISOPE Conf., pp. 316-319.
- Kim, M.S. and Ha, M.K., 2002, "Prediction of Motion Responses between Two Offshore Floating Structures in Waves," Journal of SOTEC, Vol. 6, No. 3, pp. 13-25.
- Lee, D.H. and Choi, H.S., 2003, "A Nonlinear Stability Analysis of Tandem Offloading System," 24th Symposium on Naval Hydrodynamics., pp. 348-359.
- Leonhardsen R.L., Ersdal G. and Kvitrud, 2001, "Experience and Risk Assessment of FPSOs in Use on the Norwegian Continental Shelf: Description of Events," Proc. Of the 11th ISOPE Conf., Vol. 1, pp. 309-314, Stavanger, Norway.
- Morishita, H.M., Souza Junior, J.R. and Fernandes, C.G., 2001, "Nonlinear Dynamics of a FPSO and Shuttle Vessel in Tandem Configuration," Proc. Of ISOPE Conf., pp. 328-336.
- Sphaier, S.H. and Fernandes, A.C., 2001, "Maneuvering Model for FPSOs and Offloading Analysis," Proc. of OMAE Conf., OFT- 1303.
- Vinnem J.E., 1999, "Offshore Risk Assessment - Principles, Modeling and Applications of QRA Studies," ISBN 0-7923-5860-0, Kluwer Academic Publishers, pp. 393.



< 임 춘 규 >

< 이 호 영 >

< 신 현 경 >