한국해양공학회지 제18권 제3호, pp 8~12, 2004 (ISSN 1225-0767)

2점 계류된 선박에 대한 수평면상 표류운동 해석

이호영* · 임춘규**
*목포대학교 선박해양시스템 공학과
**현대미포조선(주)

Drift Motion Analysis on Horizontal Plane of a Two-Point Moored Oil Tanker

HO-YOUNG LEE* AND CHOON-GYU LIM**
*Dept. of Naval Architecture and Marine System Engineering, Mokpo National University, Mokpo, Korea
**Hyundai Mipo Dockyard Co. Ltd., Ulsan, Korea

KEY WORDS: 3-Dimensional Panel Method 3차원 패널법, Two Point Mooring System 2점 계류 장치, Slow Maneuvering Equation 저속 조종 운동방정식, Wind Spectrum 바람 스펙트럼, Slow Drift Motion 저속 표류운동

ABSTRACT: *The anchor is laid on the seabed, and the main engine is working against incident environmental loads in a typhoon. As the main engine is broken down in the storm, the anchor chain is cut and the vessel drifts. Although a ship is moored by two-point mooring lines to maintain her position, it has crashed into a rock because of a typhoon, resulting in a possible accidental oil spillage. In this paper, we studied maintenance of a ship's position, which is analyzed based on the slow motion maneuvering equations considering wave, current, and wind. To estimate wave loads, the direct integration method is employed. The current forces are calculated, using MMG (Mathematical Modeling Group). The two-point mooring forces are quasi-statistically evaluated, using the catenary equation. The coefficients of wind forces are modeled from Isherwood's empirical data, and the variation of wind speed is estimated by wind spectrum. The nonlinear motions of a two-point moored ship are simulated, considering wave, current, and wind load, in specific domain of time.*

1. 서 론

선박 파손에 의한 기름 유출로 인해 심각한 해양 환경오염 문제를 일으키며, 이로 인해 국제적인 문제까지 확대되고 있다. 국내에도 씨프린스호가 기관 고장으로 인해 육지로 밀려와 암초에 부딪혀 기름을 유출한 바 있고 국내 연안의 양식장 및 바다에 심각한 피해를 준 바 있다.

태풍시 원유운반선이 항내로 대피하지 못하면 파랑, 조류, 바람에 대한 외력을 견디기 위해 2점 계류를 한 후 기관을 작동시킨다. 그러나 엔진이 무리하게 장시간 작동하면 기관에 과부하가 걸려 기관 고장이 발생하고 이로 인해 선박은 표류하게 되어 다른 구조물이나 암초에 부딪힐 가능성이 높아진다. 결과적으로 선박이 육지로 밀려와서 암초 등에 부딪히면 적재중인 원유나 엔진 오일류 등을 바다에 유출하게 되어 심각한 환경 피해를 주게 된다.

지금까지 각종 환경외력을 고려하여 계류된 선박 및 해양구조물에 대한 비선형 운동 해석은 국내외에서 많은 연구가 수행되었다. 대표적인 연구로는 Pinkster(1980)가 3차원 패널법에 의한 직접 적분법으로 파랑 표류력을 계산하였고, Sphair et al.(2000)은 조종 수학모델을 근간으로 FPSO의 운동에 대한 파도와 조류의 영향을 해석하였다. 이창호 등(1998)은 인장각식 계류 시스템을 장착한 TLP(Tension Leg Plaform)에 대하여 직접적분법을 사용한 비선형 파랑 표류력을 계산하여 운동해석을 수행하였다. 또한 이호영 등(2000)은 불규칙 파 중에서 돌핀 계류된 BMP(Barg-Mounted Plant) 구조물에 대한 비선형 운동해석을 수행하였다.

본 논문은 이와 같이 선박이 표류되는 물리적인 현상을 수치 해석하고, 해상 환경외력이 선박의 표류효과에 미치는 영향을 알아보고자 한다.

적용 예로 파도, 조류, 바람이 공존하는 해상에서 2점 계류된 원유운반선에 대한 수평면상에서 비선형 운동 해석을 수행하였다. 파랑에 의한 유체력을 해석하기 위해 3차원 패널법을 사용하여 부가질량, 파랑감쇠계수, 파강제력을 계산하였고 조류에 의한 힘은 저속조종수학 모델링을 사용하였다(임춘규와 이호영, 2003). 바람에 의한 힘은 Isherwood 식을 사용하여 풍력계수를 계산하였고(Isherwood, 1972), 바람속도는 스펙트럼으로부터 변동 성분을 고려하였다(Bobillier et al., 2000). 그리고 프로펠러의 추진력을 운동방정식에 적용하여 환경외력과 추진력이 공존하는 경우 계류된 선박의 운동을 살펴보았다.

2. 수학적 정식화

선박의 운동을 표현하기 위해 정수면을 원점으로 하고 수직

제1저자 이호영 연락처: 전라남도 무안군 청계면 도림리 61
061-781-4916 ocean-ship@hanmail.net

수평방향을 양의 Z축으로 한 지구 고정 좌표계(O-XYZ)와 물체 고정 좌표계(o-xyz)을 사용한다. Fig.1에서 βenv 는 파도, 조류, 바람의 입사각을 나타낸다. u, v는 물체 고정 좌표계에서 x, y축 방향의 속도 성분이고 Ψ는 선수각을 나타내며, r은 z축 방향의 각속도를 나타낸다. 물체 고정좌표계에서의 속도 성분은 다음과 같은 관계로 지구 고정좌표계의 속도 성분으로 변환된다.

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

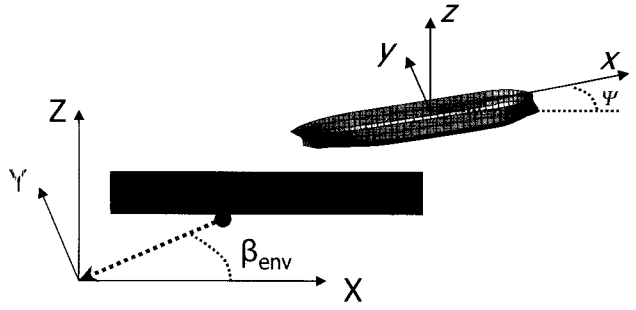

Fig. 1 Coordinate systems

계류된 선박에 작용하는 각종 환경외력을 고려한 수평면 상의 3자유도(Surge, Sway, Yaw) 방향의 운동방정식은 아래와 같이 나타낼 수 있다(임춘규와 이호영, 2003).

$$\{m_x + M + a_{11}(\infty)\}\dot{u} + \int_0^t K_{11}(t-\tau)v(\tau)d\tau = (M + m_y + X_{vr})vr + F_{w1}^{(1)} + F_{w1}^{(2)} + X_c + X_w + X_m \tag{2}$$

$$\{m_y + M + a_{22}(\infty) + a_{26}(\infty)\}\dot{v} + \int_0^t K_{22}(t-\tau)v(\tau)d\tau + \int_0^t K_{26}(t-\tau)r(\tau)d\tau = -(M + m_x)ur + F_{w2}^{(1)} + F_{w2}^{(2)} + Y_c + X_w + Y_m \tag{3}$$

$$\{J_z + I_z + a_{66}(\infty) + a_{62}(\infty)\}\dot{r} + \int_0^t K_{66}(t-\tau)r(\tau)d\tau + \int_0^t K_{62}(t-\tau)v(\tau)d\tau = F_{w6}^{(1)} + M_w^{(2)} + \Psi_c + \Psi_w + \Psi_m \tag{4}$$

where, M : Mass of vessel
Iz : Moment of inertia for z axis
$a(\infty)$: Added mass at infinite frequency
$Fw^{(1)}$, $Fw^{(2)}$: 1st & 2nd order wave force
Xc, Yc, Ψc : Current force
Xw, Yw, Ψw : Wind force
Xm, Ym, Ψm : Mooring force
K : Time memory effect function

식(2)~(4)의 m_x, m_y, J_z는 조류력 계산 시 필요한 부가질량이며 다음과 같이 나타낼 수 있다(Hooft and Pieffers, 1988).

$$m_x = \frac{2.7\rho(C_B LBd)^{5/3}}{L^2} \tag{5}$$

$$m_y = \frac{\pi}{2}\rho L d^2\left[1 + 0.16\frac{C_B B}{d} - \frac{5.1}{(L/B)^2}\right] \tag{6}$$

$$J_z = \frac{\pi}{24}\rho L^3 d^2\left[1 + 0.2\frac{C_B B}{d} - \frac{4}{(L/B)}\right] \tag{7}$$

where, ρ : Density of sea water
L : Length of vessel
B : Breadth of vessel
d : Draft of vessel
C_B : Block coefficient

식(2)~(4)의 조류력은 다음과 같이 나타낼 수 있으며, U는 조류의 속도이다.

$$X_c = -0.5\rho LdU^2(X_{uu}'\cos^2\beta_{env}) \tag{8}$$

$$Y_c = 0.5\rho LdU^2[Y_v'v' + Y_r'u'r' + Y_{vv}'|v'|v' + Y_{vr}'v'|r'| + Y_{rr}'u'r'|r'|] \tag{9}$$

$$\Psi_c = Y_c x_G + 0.5\rho LdU^2[N_v'u'v' + N_r'r' + N_{rr}'|r'|r' + N_{vvr}'v'^2r' + N_{vrr}'v'r'^2] \tag{10}$$

식(8), (9), (10)에서 X_{uu}', Y_v', Y_r', N_v', N_r'등은 조류에 의한 저항, 좌우운동, 선수요 운동과 관련된 조종 유체력 미계수를 나타내며 구체적인 미계수에 대한 식은 손경호(1992)를 참조하였다. 1차, 2차 파강제력은 다음과 같이 나타낼 수 있다(Pinkster, 1980; 이호영 등, 2003).

$$f_w^{(1)}(\omega) = -\rho i\omega\int\int_{S_0}(\phi_0 + \phi_7)n_i ds \tag{11}$$

$$F_w^{(2)} = -\int_{WL}\frac{1}{2}\rho g\,\zeta_r^{(1)}ndl - \int\int_{S_0}[-\frac{1}{2}\rho\nabla\phi^{(1)}\cdot\nabla\phi^{(1)} - \rho(x^{(1)}\cdot\nabla\phi_t^{(1)})]nds + \bar{a}^{(1)}\times(m\ddot{x}_0^{(1)}) \tag{12}$$

$$M_w^{(2)} = -\int_{WL}\frac{1}{2}\rho g\,\zeta_r^{(1)}(x\times n)dl - \int\int_{S_0}[-\frac{1}{2}\rho\nabla\phi^{(1)}\nabla\phi^{(1)} - \rho(x^{(1)}\cdot\nabla\phi_t^{(1)})](x\times n)ds + \bar{x}_0^{(1)}\times(m\ddot{x}_0^{(1)}) + \bar{a}^{(1)}\times(I\ddot{a}^{(1)}) \tag{13}$$

where, ρ : Density of sea water
ϕ_0 : Incident wave potential
ϕ_7 : Diffraction potential
ζ_r : Relative wave elevation

해상에 계류된 선박에서는 차주파수(Difference frequency) 성분의 표류력이 계류계와 공진을 일으켜 대진폭 저주파수 운동을 초래하므로 차주파수 성분을 고려하였다. 차주파수 표류력은 식(14)와 같이 나타낼 수 있다(Pinkster, 1980).

$$F_w^{(2)}(t) = \sum_{j=1}^{M}\sum_{k=1}^{M}\zeta_j\zeta_k\{P_{jk}\cos[(\omega_j - \omega_k)t + (\varepsilon_j - \varepsilon_k)] + Q_{jk}\sin[(\omega_j - \omega_k)t + (\varepsilon_j - \varepsilon_k)]\} \tag{14}$$

식(14)의 P, Q는 2차항 전달함수의 실수부와 허수부이며 ζ는 입사파 진폭이다. ε은 위상차를 나타낸 것이다.

바람하중을 계산하기 위해 Isherwood의 추정식을 사용하여 풍력계수를 계산하였고, 실제 해상 상태에 가까운 풍속을 모델링하기 위해 API-RP2A에서 추천한 스펙트럼을 사용하였다. 바람스펙트럼은 다음과 같다(Bobillier et al., 2000).

$$S_{wind}(f)=\frac{\sigma(z)^2}{f_p[1+\frac{1.5f}{f_p}]^{5.3}} \tag{15}$$

$$\sigma(z)=U_{wind}\times 0.15(\frac{z}{z_s})^{-0.125} \quad (z\le z_s) \tag{16}$$

$$\sigma(z)=U_{wind}\times 0.15(\frac{z}{z_s})^{-0.125} \quad (z> z_s) \tag{17}$$

위 식에서 U_{wind}는 평균풍속을 나타내며 z는 풍하중이 작용되는 수선면 상부구조물의 중심이고 z_s는 풍하중이 작용하는 표면층의 높이를 의미한다.

계류시스템은 현수형 체인으로 준정적(Quasi-static)인 방법으로 선박의 운동효과를 직접적으로 고려하여 해석하였다. 식(18)을 이용하여 각 계류라인의 수평방향 인장력(T_H)을 계산할 수 있다.

$$-\frac{T_H}{P}\sinh^{-1}[\frac{P}{T_H}\sqrt{h(h+2\frac{T_H}{P})}] = l_w - l' - \sqrt{h(h+2\frac{T_H}{P})} \tag{18}$$

식(18)에서 l_w는 계류라인의 총 길이이며 l'은 수평방향의 계류라인 길이이다. P는 단위길이 당 수중 질량이다. 식(18)을 이용하여 수평면상의 3자유도 방향의 계류력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$X_m=\sum_{i=1}^{N}(T_H^{(i)}\cos\gamma^{(i)}\cos\psi+T_H^{(i)}\sin\gamma^{(i)}\sin\psi) \tag{19}$$

$$Y_m=\sum_{i=1}^{N}(T_H^{(i)}\sin\gamma^{(i)}\cos\psi+T_H^{(i)}\cos\gamma^{(i)}\sin\psi) \tag{20}$$

$$\Psi_m=\sum_{i=1}^{N}(x_p^{(i)}X_m-y_p^{(i)}Y_m) \tag{21}$$

where, $$\cos\gamma^{(i)}=(x_m^{(i)}-x_T^{(i)})/l' \tag{22}$$

$$\sin\gamma^{(i)}=(y_m^{(i)}-y_T^{(i)})/l' \tag{23}$$

식(19)~(20)에서 $\gamma(i)$는 i번째 계류라인과 지구조정좌표계 X축의 반시계 방향 각도이며 x_p, y_p 는 물체고정좌표계에서 선박에 고정된 계류라인의 좌표이다.

3. 계산 결과

계산에 사용된 선박은 Esso Osaka호이며, 수선면 아래의 형상은 Fig.1과 같다. 기본제원은 Table 1에 나타내었고, 계산 수심은 연안에 계류된 선박을 고려하여 100m로 하였고, 식(16), (17)에서 z는 35m 이며, z_S 는 API-RP2A에서 추천하는 20m로 하였다.

Table 1 Main particulars of Esso Osaka

L(m)	B(m)	d(m)	▽(m³)
325	53	21.8	306,520

선체에 고정된 계류라인은 선체중앙부로부터 선수방향으로 160m, 폭 방향으로 ±8m에 위치한다. 계류라인은 총 길이가 300m이고 수평길이는 220m이며, 수중 무게가 2943N/m이다. 환경하중은 초기의 구조물 과도응답을 방지하고자 20배의 평균 파주기 동안 직선적으로 증가하는 것으로 가정하였고 환경하중의 입사각이 0°가 아닌 경우 30배의 평균 파주기가 도달한 후 입사각이 0°가 아닌 환경하중이 구조물에 입사를 시작하는 것으로 가정하였다(임춘규와 이호영, 2003).

장파정 불규칙파를 표현하기 위해 ITTC 스펙트럼을 사용하였다. Table 2는 계산에 적용된 해상환경 상태를 나타내며, 파랑 조건은 수많은 반복계산을 통하여 선박이 표류하지 않는 조건을 찾아내었다. 만약 Table 2의 파랑조건보다 파고가 커지면 선박은 한없이 밀리게 된다. 표에서 파고는 유의파고, 주기는 평균파 주기, 조류 및 바람은 평균 속도를 나타낸다.

Table 2 Environmental conditions

Wave	Current	Wind
5m, 12sec.	1.0m/s	10m/s

Fig. 2는 계류라인의 Excursion에 대한 수평방향의 인장력을 나타낸 것이다. 계류라인의 Excursion이 50m가 넘을 경우 강한 비선형성이 나타남을 확인할 수 있다.

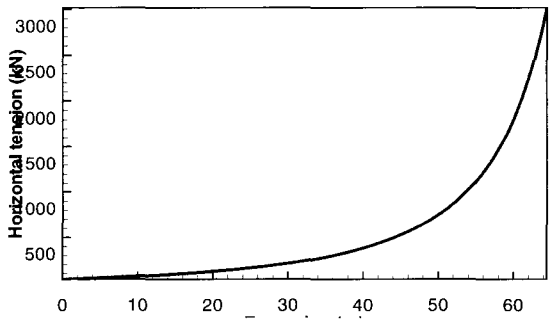

Fig. 2 Excursion curve

Fig.3은 Table 2의 파도, 조류, 바람이 0°로 선박에 입사할 경우 프로펠러의 추력에 따른 전후방향의 운동을 나타낸 것이다. 프로펠러의 추력이 없는 경우의 운동이 가장 크게 나타나며

추력이 작용됨에 따라 선박의 전후방향 운동도 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 추력을 적절히 조절하면 표류운동을 상당히 감소시킬 수 있을 것이다.

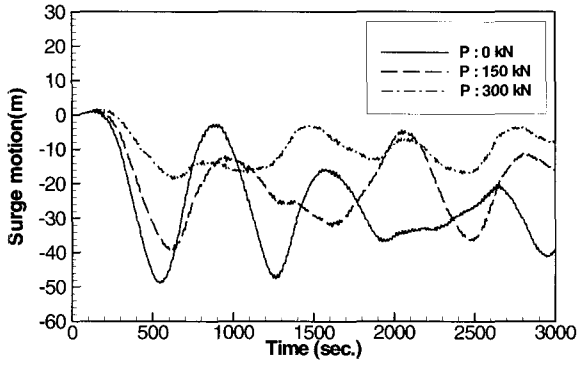

Fig. 3 Comparison of surge motions

Fig.4는 환경하중이 0°로 선박에 입사할 경우 하나의 계류라인에 작용하는 계류력을 나타낸 것이다. 추력이 작용함에 따라 계류력 또한 감소하는 것을 확인할 수 있다. 저진동 표류력과 계류계와의 공진으로 비선형 운동이 나타나고 선박의 운동이 커짐에 따라 계류력도 크게 나타난다. 추력이 300kN 작용되면 계류력은 100kN 내외로 추력이 작용하지 않을 경우에 비해 상대적으로 작게 나타난다.

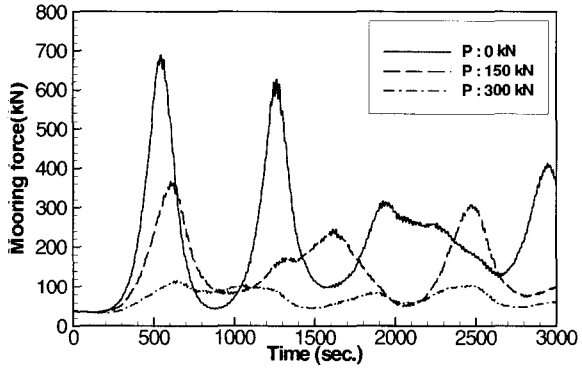

Fig. 4 Comparison of mooring forces

Fig.5는 프로펠러 추력이 0, 파도와 바람이 선박에 10°로 입사할 경우 각 환경하중에 따른 선박의 운동을 확인하기 위해 수평면상의 운동을 나타낸 것이다. 파도만 고려한 경우보다 파도와 바람을 고려한 경우에 시간이 지남에 따라 선수각은 환경하중과 계류라인의 영향으로 급격히 변화함을 확인할 수 있다.

환경하중의 입사각이 선수각과 다른 경우 파도에 의한 외력뿐만 아니라 바람에 의한 외력도 계류된 선박의 비선형 표류운동에 중요한 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다.

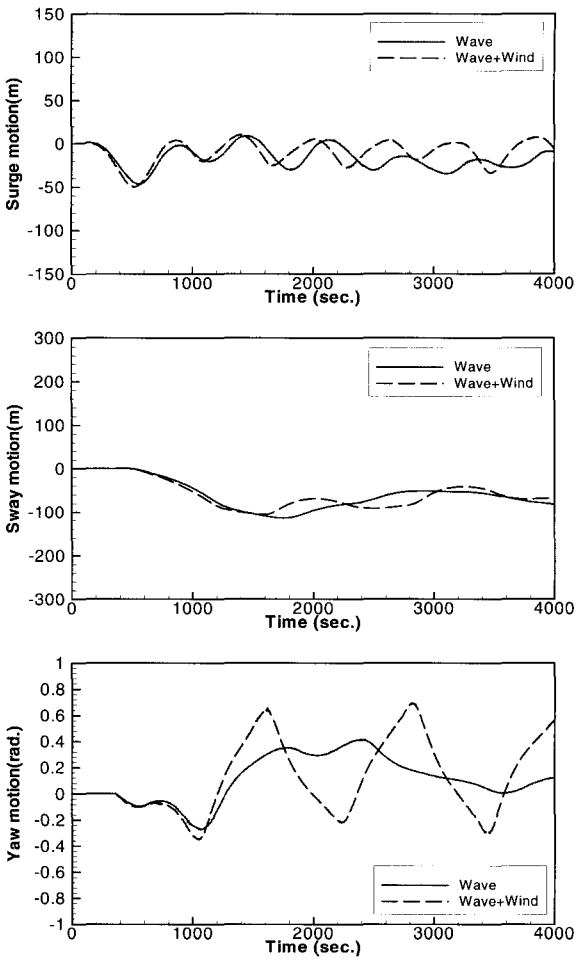

Fig. 5 Comparisons of horizontal motions

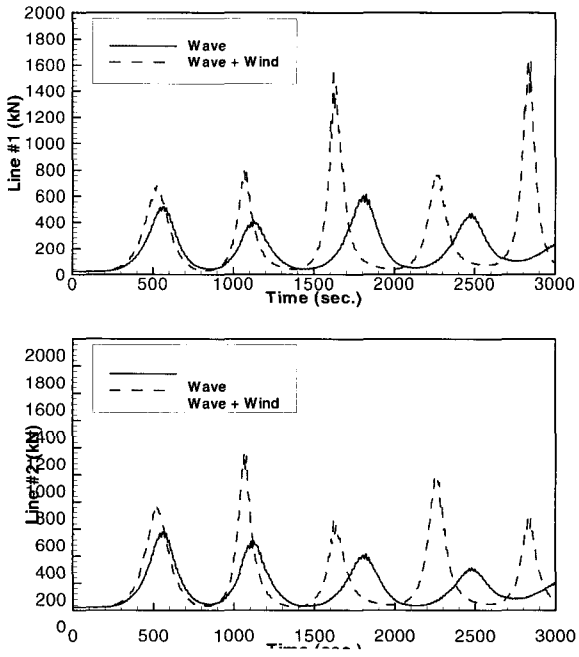

Fig. 6 Comparisons of mooring forces

Fig.6은 파도와 바람이 선박에 10°로 입사할 경우 계류라인의 계류력을 나타낸 것이다. Line #1은 좌현으로 8m 지점에 위치하고 Line #2는 우현으로 8m 지점에 위치한다. 파도만 고려한 경우보다 파도, 바람을 고려한 경우 계류력도 훨씬 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 Fig.4에서 확인하였듯이 파도와 바람을 고려한 경우 선박의 운동이 더욱 크게 나타나기 때문이다. 그리고 환경하중의 입사 방향이 10°이기 때문에 좌현에 위치한 Line #1의 계류력이 더욱 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

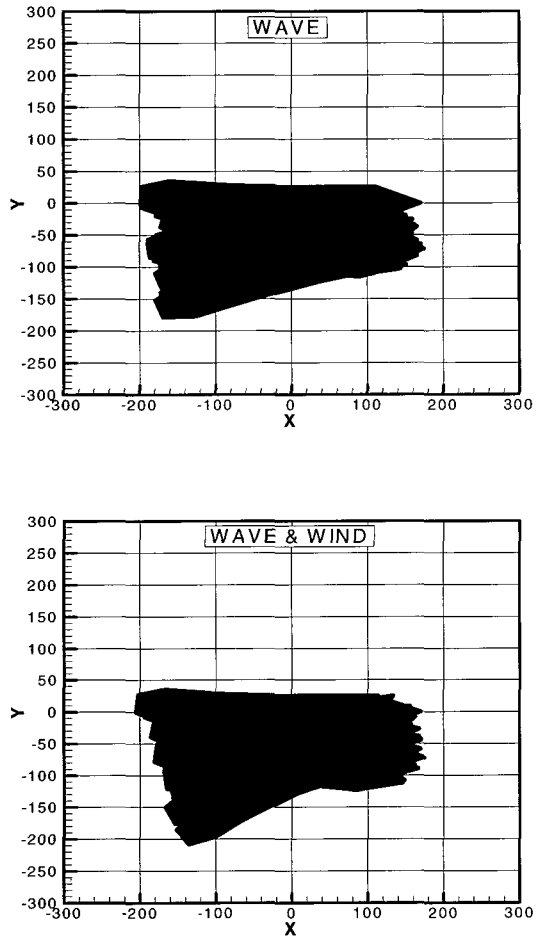

Fig. 7 *Horizontal motion of the two point moored vessel*

Fig.7은 파도와 바람에 의한 수평면 상 선박의 전체 운동을 나타낸 것이다. 그림에서 좌표축은 수평면상의 위치를 나타내며 단위는 m 이다. 파도와 바람이 동시에 작용할 때 전체적으로 선박의 운동이 더욱 크게 나타나며, 환경외력이 작용하는 초기에는 환경하중의 영향으로 선수부분이 우현으로 향하다가 시간이 흐르면서 계류력의 영향으로 좌현으로 선수각을 변화하는 8자 모양의 뒤틀림(Slew)운동을 하는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 파도, 조류, 바람이 공존하는 해상에서 이점 계류된 원유운반선에 대한 비선형 운동을 해석하였다. 파랑하중은 직접적분법을 사용하여 차주파수 표류력을 계산하였으며, 조류력은 저속조종운동 모델을 사용하여 계산하였고, 바람에 의한 하중은 스펙트림을 적용하여 변동풍속에 대해 계산하였다.

계산결과 계류된 선박의 비선형 운동은 파도뿐만 아니라 조류와 바람도 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었고, 주어진 수심 조건에서 선박이 안정한 운동을 할 수 있는 파랑 조건을 찾아내었다. 환경하중이 입사하는 방향과 반대방향으로 구조물의 추력을 적절히 작용시키면 구조물의 운동과 계류력이 훨씬 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 자동제어 이론을 도입하여 타를 이용해서 구조물의 Slew운동을 줄이고 추력을 적절히 조절하면 구조물의 표류운동을 감소시킬수 있으리라 사료된다.

참 고 문 헌

손경호 (1992). "저속시 선체에 작용하는 조종유체력 및 조종성능에 관한 연구", 대한조선학회논문집, 제29권, 제3호, pp 90-102.

임춘규, 이호영 (2003). "터렛 계류된 FPSO의 비선형 운동 해석", 대한조선학회논문집, 제40권, 제1호, pp 20-27.

이창호, 구자삼, 조효제, 홍봉기 (1998). "불규칙파중의 인장계류식 해양구조물의 비선형 응답 해석", 한국해양공학회지, 제12권, 제2호, pp 43-56.

이호영, 신현경, 염재선 (2000). "불규칙파 중에서 돌핀 계류된 바아지식 해상공장에 대한 비선형 응답 해석", 한국해양공학회지, 제14권, 제4호, pp 1-8.

이호영, 임춘규, 유재문, 전인식 (2003). "안벽에 계류된 선박의 비선형 운동응답", 한국해양공학회지, 제17권, 제4호, pp 8-15.

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.

Hooft, J.P. and Pieffers, J. B. M. (1988). "Maneuverability of Frigates in Waves", Journal of Marine Technology, Vol 25.

Isherwood, R.M. (1972). Wind Resistance of Merchant Ship, RINA.

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

Sphaier, S.H., Fernandes, A.C. and Pontes, L.G.S. (2000). "Waves and Current Influence in the FPSO Dynamics", Proc. of ISOPE Conf., Vol 1.

2003년 11월 28일 원고 접수
2004년 3월 11일 최종 수정본 채택