

## 안벽에 계류된 선박에 대한 비선형 운동응답

이호영\* · 임춘규\*\* · 유재문\*\*\* · 전인식\*\*\*\*

\*목포대학교 선박해양시스템전공

\*\*현대미포조선(주) 생산기획부

\*\*\*충남대학교 공과대학 선박해양공학과

\*\*\*\*건국대학교 공과대학 토목공학과

## Nonlinear Motion Responses for A Moored Ship beside Quay

Ho-Yooung Lee\*, Choon-Gyu Lim\*\*, Jae-Moon Lew\*\*\*, AND In-Sik Chun\*\*\*\*

\*Major in Naval Architecture and Marine Engineering, Mokpo National University, Chunnam, Korea

\*\*Department of Production Planning, Hyundai Mipo Dockyard Co. Ltd., Ulsan, Korea

\*\*\*Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea

\*\*\*\*Department of Civil Engineering, Konkuk University, Seoul, Korea

**KEY WORDS:** Source and dipole Distribution Method(소오스-다이폴 분포법), Drift Force(표류력), Time Domain Analysis(시간영역 해석), Quay(안벽), Rope Mooring(로우프 계류)

**ABSTRACT:** As a typhoon gets into harbour, a moored ships shows erratic motions and even mooring line failures is occurred. Such troubles may be caused by harbour resonance phenomena, result in large motion amplitudes at low frequency, which is closed to the natural frequency of the moored ship. The nonlinear motions of a moored ship beside quay are simulated under external forces due to wave, current including mooring forces in time domain. The forces due to waves are obtained from source and dipole distribution method in the frequency domain. The current forces are calculated by using slow motion maneuvering equation in the horizontal plane. The wind forces are calculated from empirical formula of ABS and the mooring forces of ropes and fenders are modeled as linear spring.

### 1. 서 론

항만 내에서 선박 및 구조물의 안전성을 확보하기 위해 방파제를 설치한다. 특히 태풍이 내습할 경우에 방파제가 있다 하더라도 파랑이 항만내로 침투하여 선박에 커다란 운동을 야기시킨다. 선박을 항만의 안벽에 로우프(ropes)와 펜더(fenders)로 고정시키더라도 태풍 내습시 파랑에 의해 공진 운동을 하며 심지어 어떤 경우에는 선박이 안벽위로 올라오기도 하며 이로 인해 선박에 커다란 손상을 주게 된다.

이와 같은 이유로 구조물의 태풍으로부터의 안전성 여부와 대형 철구조물의 설치시 사용되는 계류계의 설계, 안벽이나 해상섬과 같은 터미널의 설계 등에 있어서 계류계의 안전성 해석은 매우 중요하다(오태명과 염덕준, 1990).

계류 시스템이 장착된 구조물은 선형 파랑하중 뿐만 아니라 비선형 표류력을 받게 되는데, 계류된 구조물의 고유진동수와 저진동 표류력의 진동수가 비슷한 경우 대진폭 운동에 의하여 구조물과 계류계에 심각한 손상을 줄 수 있으므로 비선형 표류력은 반드시 고려 되어야 한다. 그리고 조류 및 바람이 선수와와 각을 이루며 진행할 경우 이들에 의한 외력도 파력과 더불어

구조물의 운동에 중요한 외력이므로 반드시 고려되어야 한다(최윤락 등, 1994).

본 연구에서는 불규칙 파랑중의 안벽이 있는 해상에 계류된 선박의 거동을 해석하기 위해 우선 안벽 효과를 고려한 유체력을 계산하였고, 선형 및 비선형 파랑 강제력을 그리고 계류계를 고려하여 조류력, 풍력 및 계류력과 시간기억효과를 고려하여 구조물의 운동을 수치모사하였다.

동유체력은 3차원 패널법을 사용하여 계산하였고 이를 이용하여 선형 운동응답을 추정하였다. 비선형 표류력은 직접 적분법을 이용하여 계산하였고, 조류력은 선박조종성능 해석을 위해 사용된 저속 조종수학모델을 사용하였다. 바람에 의한 외력은 ABS에서 제한한 경험식을 사용하여 계산하였다.

천이 운동을 해석하기 위해 시간 기억효과 함수를 고려하고 파력, 조류력, 풍력 및 계류력을 모델링하여 최종 운동방정식을 완성하였고 시간에 따른 구조물의 6자유도 운동을 수치모사 하였다.

### 2. 수학적 정식화

#### 2.1 환경외력

선박의 운동을 표현하기 위해 정수면을 원점으로 하고 수직 방향을 양의 Z축으로 한 지구 고정 좌표계(O-XYZ)와 물체 고정

제1저자 이호영 연락처: 전남 무안군 청계면 도림리 61  
011-9539-9930 ocean-ship@hanmail.net

좌표계(o-xyz)을 사용한다. Fig.1에서  $\beta$ 는 파랑의 입사각,  $\beta_c$ 는 조류의 입사각  $\beta_w$ 는 바람의 입사각을 나타낸다.  $u, v$ 는 물체 고정 좌표계에서  $x, y$ 축 방향의 속도 성분이고  $\Psi$ 는 선수각을 나타낸다. 수평면상의 운동은 물체 고정좌표계에서의 속도 성분은 다음과 같은 관계로 지구 고정좌표계의 속도 성분으로 변환된다.

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

여기서,  $u_c$  ;  $x$  방향의 조류의 속도  
 $v_c$  ;  $y$  방향의 조류의 속도  
 $r$  ; yaw 방향의 각속도

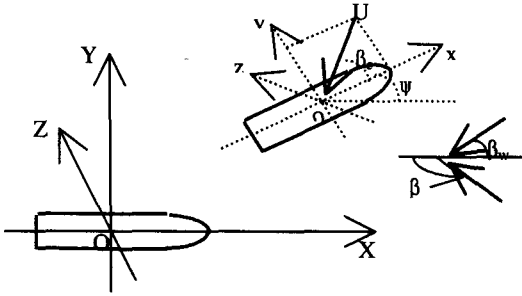


Fig.1 Coordinate system

유체는 비압축성, 비점성이고 유동은 비회전적인 포텐셜 운동이라 하면 지배 방정식은 라플라스 방정식이고, 자유표면, 해저면, 물체표면, 무한원방 경계조건을 만족한다. 입사파의 기울기와 운동이 작다고 하면 모든 경계조건과 포텐셜을 선형화시킬 수 있다. 1차항 포텐셜은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi^{(1)} = \phi^{(1)} e^{-i\omega t} = -i\omega [\zeta_0 (\phi_0^{(1)} + \phi_1^{(1)}) + \sum_{j=1}^6 \phi_j^{(1)}] e^{-i\omega t} \quad (2)$$

여기서,  $\zeta_0$  : 입사파 진폭,  $\omega$  : 진동수

유한 수심에서 입사파 포텐셜은 다음과 같이 표현된다.

$$\phi_0^{(1)} = \frac{1}{\nu} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} [e^{ik(x\cos\beta + y\sin\beta)} + e^{ik(x\cos\beta + (2d-y)\sin\beta)}] \quad (3)$$

여기서,  $h$ ; 수심,  
 $k$ ; 파수

여기서  $\nu = \omega^2/g$ 이다. 1차항 포텐셜을 구하기 위해 그린 함수를 도입하여야 한다. 그린 함수는 라플라스 방정식, 자유표면 조건, 해저면 경계조건, 방사조건을 만족하며 다음 문헌을 참고하였다(Wehausen and Laitone, 1964). 또한 안벽 효과를 고려하기 위해 유한수심 그린함수에다 이미지를 더하여 안벽에 대한 대칭조건을 만족시켰다(Oortmerssen, 1976 ; 최윤락등, 1994).

$$G(x, y, z, \xi, \eta, \zeta) = g(x, y, z, \xi, \eta, \zeta) + g(x, y, z, \xi, 2d - \eta, \zeta) \quad (4)$$

3차원 소스-다이폴 분포법을 사용하여 속도 포텐셜을 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} -2\pi\phi(x) + \iint_{S_0} \phi(\xi) \frac{\partial G(x, \xi)}{\partial n_\xi} ds(\xi) \\ = \iint_{S_0} \frac{\partial \phi(\xi)}{\partial n_\xi} G(x, \xi) ds(\xi) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,  $x$  : 관측점(Field point)

$\xi$  : 용출점(Source point)

$S_0$  : 표면파와 물체의 운동에 의한 접수면

여기서  $\Phi(x)$ 는 관측점  $x$ 에서 구조물 운동에 기인하는 방사파 및 산란파 포텐셜이다. 부유체가  $j$  모드의 동요를 할 때  $i$  방향의 부가질량 및 조파감쇠계수는 다음과 같다.

$$\omega^2 a_{ij} + i\omega b_{ij} = -\rho\omega^2 \iint_{S_0} \phi_j^{(1)} n_i ds \quad (6)$$

1차항 파강제력의  $i$  방향 성분은 입사파 포텐셜과 산란파 포텐셜의 합으로 계산된다.

$$f_{wi}^{(1)}(\omega) = -\rho i\omega \iint_{S_0} (\phi_0^{(1)} + \phi_1^{(1)}) n_i ds \quad (7)$$

부가질량, 조파감쇠계수 및 1차항 파강제력을 이용하여 주파수 영역에서 파랑 중 부유구조물의 선형 운동 방정식을 표시하면 다음과 같다.

$$\sum_{j=1}^6 [-\omega^2 (M_{ij} + a_{ij}) - i\omega b_{ij} + (C_{ij} + R_{ij})] x_j = f_{wi}^{(1)} \quad (8)$$

여기서,  $M_{ij}$  : 구조물의 질량 또는 관성 모멘트

$a_{ij}$  : 부가 질량

$b_{ij}$  : 조파감쇠 계수

$C_{ij}$  : 정적 복원력 계수

$R_{ij}$  : 계류력 계수

$f_{wi}^{(1)}$  : 1차항 파강제력

2차항 표류력 계산시 1차항들의 조합으로 발생하는 비선형 항만 고려하여 계산하면 다음과 같다(Chan, 1990).

$$F^{(2)} = - \int_{S_0} \frac{1}{2} \rho g \zeta_r^{(1)} n dl - \int \int_{S_0} [-\frac{1}{2} \rho \nabla \phi^{(1)} \cdot \nabla \phi^{(1)} - \rho (x^{(1)} \cdot \nabla \phi_i^{(1)})] n ds + \bar{a}^{(1)} \times (m \dot{x}_0^{(1)}) - \rho g x_4^{(1)} x_6^{(1)} S_{10} \bar{k} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} M^{(2)} = - \int_{S_0} \frac{1}{2} \rho g \zeta_r^{(1)} (x \times n) dl - \int \int_{S_0} [-\frac{1}{2} \rho \nabla \phi^{(1)} \cdot \nabla \phi^{(1)} - \rho (x^{(1)} \cdot \nabla \phi_i^{(1)})] (x \times n) ds + \bar{x}_0^{(1)} \times (m \dot{x}_0^{(1)}) + \bar{a}^{(1)} \times (I \ddot{\alpha}^{(1)}) \\ - \rho g \begin{pmatrix} x_2^{(1)} (x_3^{(1)} S_{00} - x_5^{(1)} S_{10}) + x_3^{(1)} x_6^{(1)} S_{10} + x_5^{(1)} x_6^{(1)} (S_{02} - S_{20}) \\ -x_1^{(1)} (x_3^{(1)} S_{00} - x_5^{(1)} S_{10}) + x_4^{(1)} x_6^{(1)} (S_{02} - S_{20}) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

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

$x_0^{(1)}$  : 선형 직선 운동,  $\alpha^{(1)}$  : 선형 회전 운동

$\zeta_r$  : 상대파고,  $\phi^{(1)}$  : 1차항 포텐셜

$\rho$  : 유체 밀도,  $g$  : 중력 가속도

$n$  : 법선 벡터,  $I$  : 관성 모멘트

$WL$  : 정수면에 대한 접수 표면적

$S_0$  : 표면파와 물체의 운동에 의한 접수면

식(9), (10)을 이용하고, 해상에 계류된 선박에서는 차주파수 성분의 표류력이 계류계와 공진에 의한 대진폭 운동을 발생시키므로 차주파수 성분만을 고려하였다(임준규와 이호영, 2003).

해상에 계류된 선박에는 조류에 대한 외력도 구조물의 표류 운동에 영향을 주므로 조류력은 선박저속 조종 수학모델을 이용하였다(임춘규와 이호영, 2003). 선체에 작용하는 저항은 다음 경험식을 사용하였다.

$$X_{uu} = \frac{0.066(1+k)}{(\log_{10} Rn - 2.03)} \left[ \frac{1}{2} \rho S \right] \quad (11)$$

$$\text{여기서, } S = 1.05LB(1.22 \frac{d}{B} + 0.46)(C_B + 0.765) \quad (12)$$

$$k = \left( \frac{\nabla^{1/3}}{L} \right) (0.5C_B + \frac{2r^{1.3}}{C_B}) \quad (13)$$

$$r = (B/L) / (1.3(1 - C_B) - 0.03 \cdot lcb) \quad (14)$$

풍력에 대한 표현식으로 다음과 같이 ABS 식을 사용하였다(이재신, 1989).

$$W_x = 0.0623 V_w^2 C_s C_r A_r \cos^2(\beta_w - \psi) \quad (15)$$

$$W_y = 0.0623 V_w^2 C_s C_r A_r \sin^2(\beta_w - \psi) \quad (16)$$

여기서  $V_w$  ; 바람의 입사속도

$A_r$  ; 바람에 노출된 횡방향의 투영면적

$A_L$  ; 바람에 노출된 종방향의 투영면적

Fig.2는 계류력을 계산하기 위한 좌표를 도시하였다. 그림에서 계류삭 n을 나타내기 위해 공간고정 좌표계 G-XYZ에서 각각의 방향으로  $C_1, C_2, C_3$  만큼 위치한 지점에 윈점이 있으며 계류삭의 좌표는  $C-x_1, x_2, x_3$  으로 나타내었다. 계류삭 n의 위치의 변위는 다음과 같다.

$$d_i = x_{0i} - C_{ij} \alpha_j, \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (17)$$

여기서,  $d_i$  = 선박 초오크 n의 i방향 병진운동 변위

$x_{0i}$  = 무게중심의 i방향 병진운동( $i=1,2,3$ )

$\alpha_j$  = j축에 대한 무게 중심의 회전운동( $j=1,2,3$ )

$C_{ij}$  = 선박 초오크 n의 위치를 나타내는 위치 행렬

$$= \begin{pmatrix} 0 & -C_3 & C_2 \\ C_3 & 0 & -C_1 \\ -C_2 & C_1 & 0 \end{pmatrix}$$

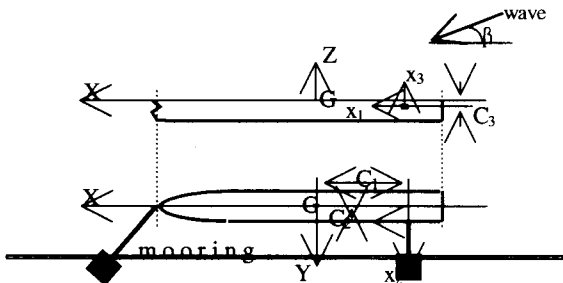


Fig.2 Coordinate systems of spread mooring layout

공간에 고정된 좌표계 G-XYZ와  $\phi_x, \phi_y, \phi_z$  각을 가지는 계류삭 n의 탄성계수는 다음과 같다.

$$K_{ij} = k_n \begin{pmatrix} a_x^2 & a_x a_y & a_x a_z \\ a_y a_x & a_y^2 & a_y a_z \\ a_z a_x & a_z a_y & a_z^2 \end{pmatrix} \quad (18)$$

여기서, a = 계류삭 n의 방향 여현

k = 계류삭 n의 길이방향의 탄성 계수 =  $E(T) \cdot A/l_0$

A = 계류삭의 총 단면적(계류삭의 개수 × 각 단면적)

l = Yard bitt에서 ship bollard까지의 계류삭의 길이

만일 계류계가 N 개의 계류삭으로 구성되어 있다면, 선박의 무게 중심을 지나는 복원력과 모멘트는 다음과 같이 된다.

$$F_i = \sum_{n=1}^N (K_{ij} x_{0j} + A_{ij} \alpha_j) \quad (19)$$

$$M_i = \sum_{n=1}^N C_{ij} K_{jk} (x_{0k} - C_{kj} \alpha_j) \quad (20)$$

$$\text{여기서, } A_{ij} = -K_{ik} C_{kj} \quad (21)$$

## 2.2 운동 방정식

1차항, 2차항 파강제력, 조류력, 계류력을 계산하여 기억효과 함수를 고려한 수평면상의 3자유도(surge, sway, yaw) 운동방정식은 다음과 같다.

$$m(\dot{u} - vr) = F_W^{(1)} + F_W^{(2)} + X_H + \sum_{i=1}^N F_X^{(i)} - K_X + W_x \quad (22)$$

$$m(\dot{v} - ur) = F_W^{(1)} + F_W^{(2)} + Y_H + \sum_{i=1}^N F_Y^{(i)} - K_Y + W_y \quad (23)$$

$$I_{zz} \dot{r} = F_W^{(1)} + F_W^{(2)} + N_H + \sum_{i=1}^N F_Z^{(i)} - K_{NZ} + W_N \quad (24)$$

여기서,  $m, I_{zz}$  : 부가질량을 포함한 구조물의 질량

및 z축에 관한 질량관성모멘트

$u, v, r$  : x, y 방향의 속도 및 yaw 방향의 각속도 성분

$\dot{u}, \dot{v}, \dot{r}$  : x, y 방향의 속도 및 yaw 방향의 각속도 성분

$F_W^{(1)}, F_W^{(2)}$  : 1차항, 2차항 파강제력 성분

$X_H, Y_H, N_H$  : 조류력

$F_x, F_y, F_N$  : 계류력

$K_X, K_Y, K_{NZ}$  : 기억효과함수

$W_x, W_y, W_N$  : 풍력

여기서 기억효과 함수는 임춘규 와 이호영(2003)에 자세히 나타나 있다. 수직면 상의 3자유도(heave, roll, pitch)운동방정식은 움직임이 작기 때문에 선박중심에 고정된 공간고정 좌표계에서 문제를 정식화 하였으며 다음과 같이 표현된다.

$$m \ddot{z} + C_{33} z + C_{35} \theta = F_W^{(1)} + F_W^{(2)} + \sum_{i=1}^N F_Z^{(i)} - K_Z \quad (25)$$

$$I_{xx} \ddot{\phi} + C_{44} \phi = F_W^{(1)} + F_W^{(2)} + \sum_{i=1}^N F_{NX}^{(i)} - K_{NX} \quad (26)$$

$$I_{yy} \ddot{\theta} + C_{53} z + C_{55} \theta = F_W^{(1)} + F_W^{(2)} + \sum_{i=1}^N F_{NY}^{(i)} - K_{NY} \quad (27)$$

여기서,  $I_{xx}, I_{yy}$  : 부가질량을 포함한 x, y축에 관한 질량관성모멘트

$z, \phi, \theta$  :  $z$ , 방향의 변위 성분 및 roll, pitch 방향의 각 성분  
 $C$  : 정 복원력 및 모멘트 성분  
 $F_z, F_{Mx}, F_{My}$  : 계류력 및 계류 모멘트  
 $K_z, K_{Nx}, K_{My}$  : 기억효과함수

### 3. 계산 결과 및 고찰

계산 모델로 현재 많이 건조되고 있고 고가의 선박인 LNG 선박을 대상으로 하여 유체력은 안벽의 효과를 고려하여 해석하였고, 계류계는 rope와 fender를 첨가하여 다점계류방식을 택하여 계산하였다. Table 1은 계산에 사용된 LNG 선박의 기본제원을 나타낸다(최윤락 등 1994). 그린함수 해법을 사용하여 경계치 문제를 해석하려면 수면 하 선체를 여러 개의 요소로 분할하여야 하는데 본 논문에서는 총 446개의 요소로 분할하여 계산하였다.

또한 불규칙 파수 현상(홍도천, 1990)을 제거하기 위해 수선면을 12개의 요소로 분할 하였다. 안벽은 선박의 좌현쪽에 위치하며 선박의 중심선에서 27.4m 떨어져 있다. 안벽의 구체적인 모습은 Fig.3에 도시하였다. 수심(h)이 11m일 때 진동수 0.01에서 시작하여 진동수 간격( $\Delta\omega$ )을 0.015로 하여 총 71개의 진동수에 대해 계산을 수행하였다. 계산된 부가질량과 조파감쇠계수를 Fig.5와 Fig.6에 나타내었다. 안벽이 있는 경우가 안벽이 없는 경우보다 진동수에 따른 변화가 심하게 나타나고 있다. 이러한 진동수 부근에서 부가질량은 음의 값으로 변하고 동유체력 계수에 급격한 변화를 준다. 이러한 국부진동은 고 주파수에서도 마찬가지인데 이는 안벽의 존재에 의한 제한 유체장의 효과로 보이며, 이는 최윤락등(1994)의 결과와 일치하고 있다.

Fig.7은 구조물에 145°(선수사파)의 각도로 입사할 때 1차항 파강제력을 도시하였다. 역시 안벽에 의해 안벽이 없는 경우보다 파강제력이 심하게 변하고 있으며 안벽의 존재에 의한 standing 파의 영향에 의해 최대값이 증가함을 볼 수 있다. 특히 낮은 주파수에서 안벽이 있는 경우에 파강제력의 증가가 두드러진다.

입사파가 145°로 입사하는 경우 부가질량, 조파감쇠계수, 1차항 파강제력을 이용하여 식 (8)로부터 계산된 선형운동응답을 Fig.8에 나타내었다. 이 그림에서는 4가지 경우에 대해서 계산 결과를 비교하였다. 안벽이 없는 경우, 안벽이 있는 경우, 안벽에 계류계를 설치한 경우 2가지에 대해 도시하였다. 안벽에 계류계를 설치한 2가지 경우 중에 나머지 한가지는 첫 번째 경우보다 강성을 3배 증가시킨 경우이다. 안벽에 계류계가 설치되지 않는 경우 전반적으로 보아 안벽 반사파로 인해 운동응답이 증가되었음을 알 수 있다. 그러나 안벽의 영향을 받는 좌우동요와 선수동요는 저 주파수에서 줄어든다. 상하동요, 종동요, 횡동요의 경우 1 rad/sec에서 보이는 최대치는 정복원력과 모멘트에 의한 공진이며 횡동요의 경우 정적 복원 모멘트에 의한 공진 주파수는 0.35rad/sec 인데 이곳에서 최대치를 보이지 않고 1 rad/sec 근처에서 최대치를 보여주는 것은 다른 운동이 영향을 주는 연성 효과 때문이다.

계류계는 좌현에 6개, 우현에 3개를 설치하였고 설치된 모습은 Fig.4에 도시하였다. 펜더의 영향은 주파수 영역 해석 특성상

고려할 수 없어서 무시하였다. 왜냐하면 펜더는 구조물이 압축할 때는 반력이 작용하지만 구조물이 펜더에 떨어지면 slack 되기 때문에 반력이 작용되지 않는다. 로우프도 펜더와 특성이 같지만 slack 되는 현상은 고려할 수 없고 주파수 영역의 해석에서는 비선형 로우프를 선형 스프링으로 치환하여 해석하였다.

안벽에 선박을 계류하기 위해 설치한 로우프의 설치 위치와 강성 등은 Table.2에 표시하였다. 계류계의 강성에 대한 정확한 특성치는 식 (18)에 의해 계산되며 본 연구에서는 적절히 가정하였다.

안벽에 계류계를 설치한 경우에 운동응답 특성은 전후동요, 좌우동요 및 선수동요의 저 주파수의 운동을 확연히 줄여주는 것을 알 수 있고, 계류계의 강성과의 공진 운동을 보여주고 있다. 이는 태풍시 주파수는 저 주파수이므로 적절한 계류계를 설치하면 수평면의 운동을 억제시키는 메카니즘을 직접적으로 설명해 주고 있다. 전후 동요에서 계류계와의 공진 주파수는 계류계의 강성이 작을 때에는 0.3 rad/sec 이지만 계류계의 강성이 큰 경우에는 0.4 rad/sec 정도 됨을 알 수 있고, 좌우동요는 뚜렷한 봉우리가 보이지 않으며, 선수동요는 계류계의 강성이 작은 경우에 공진 주파수가 0.3 rad/sec 이며 강성이 큰 경우는 대략 0.4 rad/sec가 된다. 그림으로부터 전체적으로 계류계를 설치하면 전후운동, 좌우운동 및 선수동요값은 현저히 줄어들며, 계류계의 강성이 크면 운동을 줄이는 효과가 증대되는 것을 알 수 있다. 그러나 수직면상의 운동 즉 정적 복원력이 작용하는 운동은 계류력보다 복원력이 워낙 크기 때문에 정적인 힘이 주된 힘이므로 계류계의 설치 유무가 운동 특성을 크게 변화 시키지 않음을 알 수 있다.

Table 1 Main particulars of LNG Carrier

Ship	LNG
L (m)	249
B (m)	42.
T (m)	4.338
$\nabla (m^3)$	31369.5
$A_w (m^2)$	7976
Longitudinal wind area ( $m^2$ )	8840.
Transverse wind area ( $m^2$ )	1947
Center of buoyancy (m)	(6.748, 0.0, -2.053)
Center of gravity (m)	(6.748, 0.0, 12.47)
$k_{xx} (m)$	0.35B
$k_{yy} (m), k_{zz} (m)$	0.25L

Table 2 Characteristics of mooring ropes

Rope number	C <sub>1</sub> (m)	C <sub>2</sub> (m)	C <sub>3</sub> (m)	cos φ <sub>x</sub>	cos φ <sub>y</sub>	cos φ <sub>z</sub>	k(ton/m)
1	130.27	0.0	13.08	0.6124	0.6124	-0.5	100
2	130.27	0.0	13.08	0.0	0.866	-0.5	100
3	50.	20.95	13.08	-0.6124	0.6124	-0.5	100
4	-50.	20.95	13.08	0.6124	0.6124	-0.5	100
5	-119.0	0.0	13.08	0.0	0.8660	-0.5	100
6	-119.0	0.0	13.08	-0.6124	0.6124	-0.5	100
7	105.0	-3.5	13.08	0.0	-0.866	-0.5	100
8	0.0	-20.95	13.08	0.0	-0.866	-0.5	100
9	-105.0	-3.5	13.08	0.0	-0.866	-0.5	100

Table 3 Characteristics of mooring ropes

Rope number	C <sub>1</sub> (m)	C <sub>2</sub> (m)	C <sub>3</sub> (m)	cos φ <sub>x</sub>	cos φ <sub>y</sub>	cos φ <sub>z</sub>	Case 1 ton/m	Case 2 ton/m
1	130.27	0.0	5.08	0.6124	0.6124	-0.5	100	300
2	130.27	0.0	5.08	0.0	0.866	-0.5	100	300
3	50.	20.95	5.08	-0.6124	0.6124	-0.5	100	300
4	-50.	20.95	5.08	0.6124	0.6124	-0.5	100	300
5	-119.	0.0	5.08	0.0	0.866	-0.5	100	300
6	-119.	0.0	5.08	-0.6124	0.6124	-0.5	100	300
7	105.	-3.5	5.08	0.0	-0.866	-0.5	100	300
8	0.0	-20.95	5.08	0.0	-0.866	-0.5	100	300
9	-105.0	-3.5	5.08	0.0	-0.866	-0.5	200	600
10	130.27	0.0	5.08	0.814	0.2962	-0.5	200	600
11	-105.	-3.5	5.08	-0.814	0.2962	-0.5	200	600

Table 4 Characteristics of fenders

Fender number	C <sub>1</sub> (m)	C <sub>2</sub> (m)	C <sub>3</sub> (m)	cos φ <sub>x</sub>	cos φ <sub>y</sub>	cos φ <sub>z</sub>	Case 1 ton/m	Case 2 ton/m
1	70.	27.	-5.5	0	1.	0	300	500
2	0.	27.	-5.5	0	1.	0	300	500
3	-70.	27.	-5.5	0	1.	0	300	500

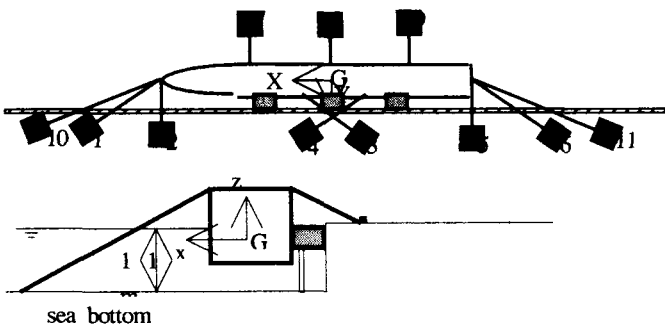


Fig.3 Mooring arrangements for LNG carrier

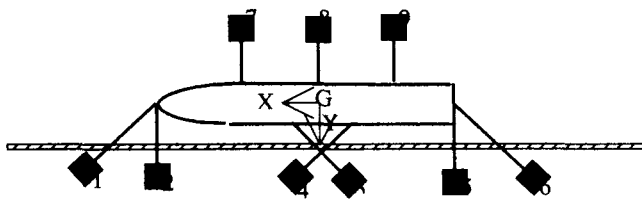


Fig.4 Arrangement of mooring ropes

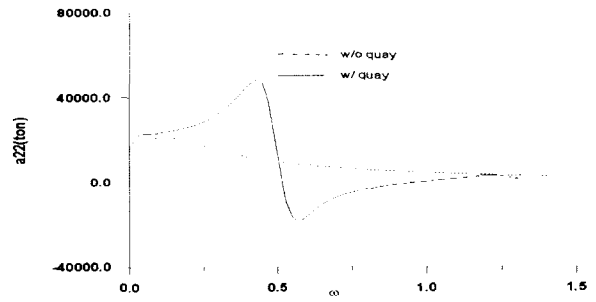


Fig.5 sway added mass

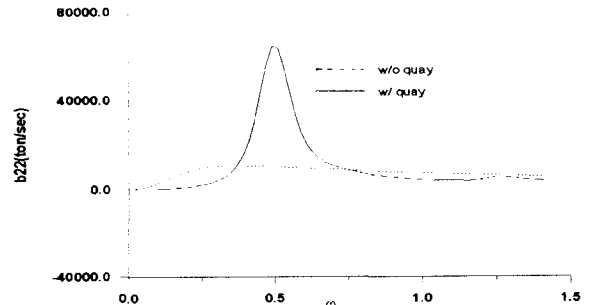


Fig.6 sway damping coefficient

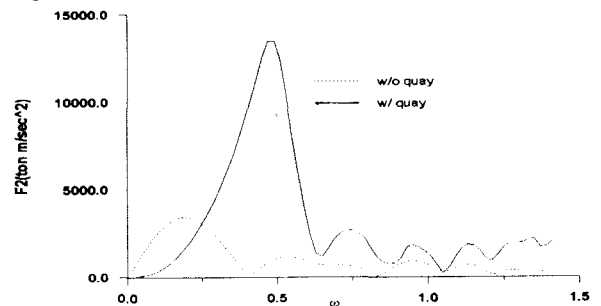
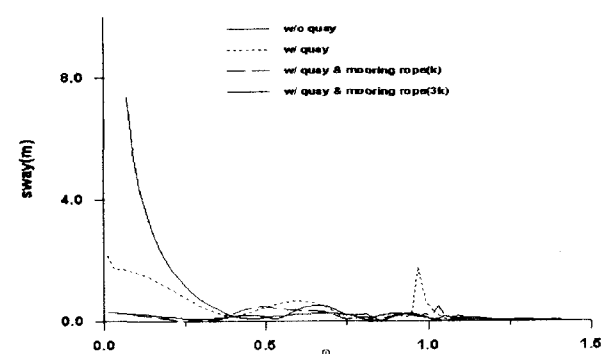
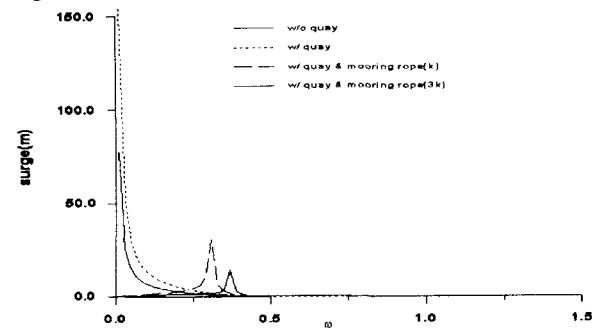


Fig.7 first order wave exciting force for sway mode



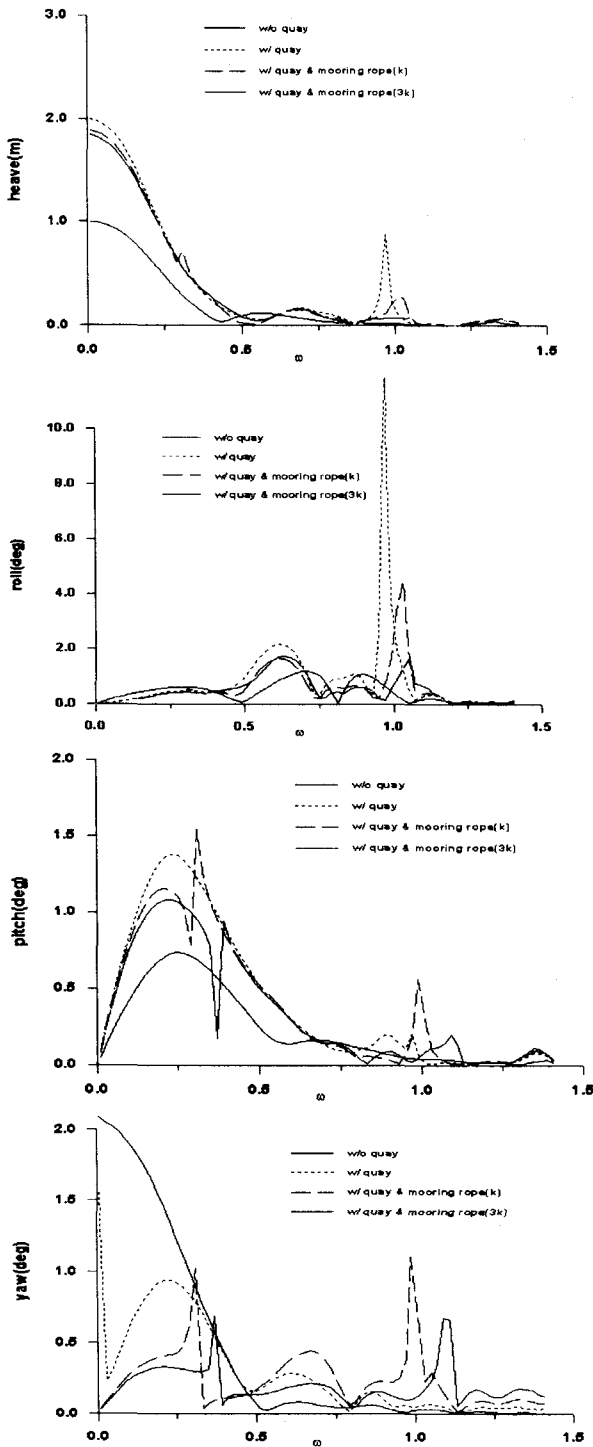
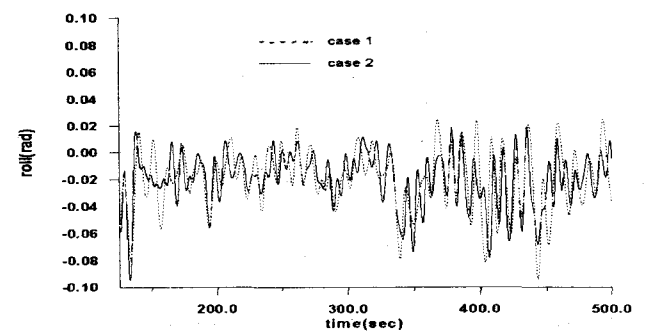
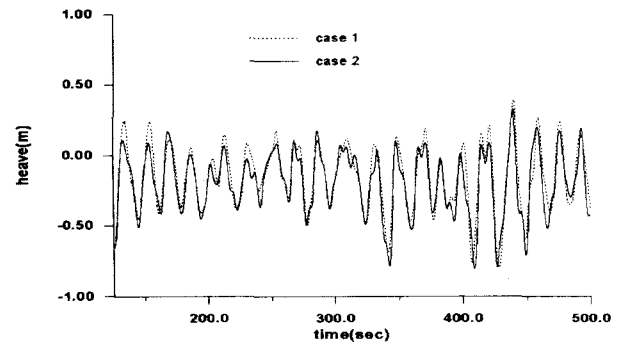
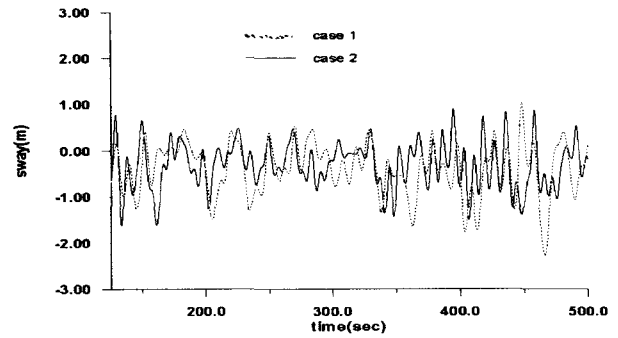
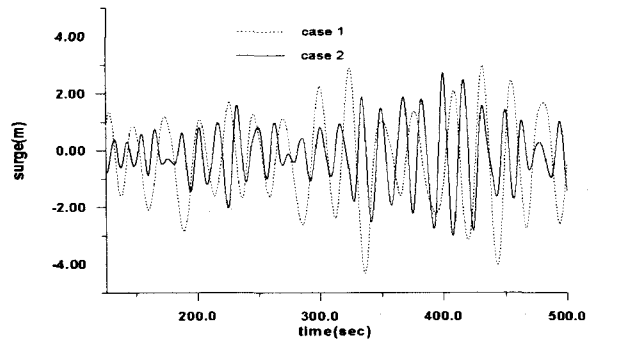


Fig.8 Linear motion responses( $\beta=145\text{deg}$ )

Fig.9에는 파입사각, 바람입사각  $145^\circ$ , 조류입사각  $20^\circ$ 인 경우 파랑조건 유의파고  $3.25\text{m}$  평균파주기  $12.4\text{sec}$ , 조류속도  $1\text{m/sec}$  바람속도  $15\text{m/sec}$ 인 경우에 대해 선박의 6 자유도 운동을 시간에 따라 도시하였다. Surge 운동은 Case 1의 경우 계류계의 강성이 작기 때문에 운동이 선미 쪽으로 최대  $4\text{m}$  운동하기 때문에, 강성을 키워서 Case 2의 경우를 선택하여 계산한 결과 최대  $-2.9\text{m}$  정도로 줄었고 고유주기도 줄어들었다. Sway 운동은 Case 1의 경우 안벽 쪽으로 최대  $-2.3\text{m}$  정도로 움직이

나 Case 2의 경우  $-1.5\text{m}$  정도로 줄어들었다. Heave, Pitch 운동은 계류계의 강성에 따라 운동이 변하지 않고, 그 이유는 정복원력이 크기 때문이다. Roll 운동은 정복원력이 작기 때문에 계류계의 강성에 영향을 받는 것을 알 수 있다. Roll 각이 안벽쪽으로 약간 표류되어 운동하는 것을 보여 주며 순간 Roll 각도는  $-5.2^\circ$  정도이다. Yaw 운동은 계류계의 강성이 Case 2의 경우가 마찬가지로 Case 1보다 운동이 작으며 최대 선수각은  $1^\circ$  내외이다. 그러나 선박의 길이가 길어지면 Yaw 운동에 의한 Sway 운동이 커지기 때문에 이 운동을 적절히 제어하여야 한다.



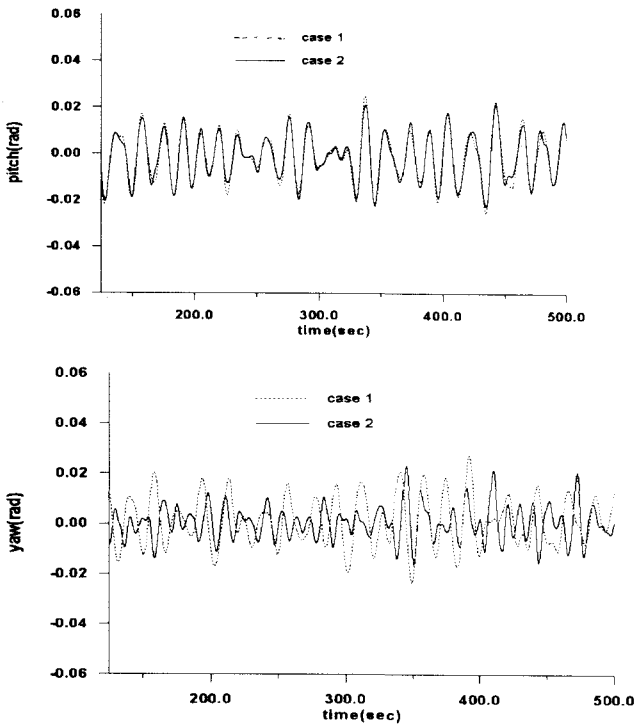


Fig.9 6-degree motion( $\beta=145^\circ$ ,  $\beta_c=20^\circ$ ,  $\beta_w=145^\circ$ )

#### 4. 결 론

태풍이 내습할 시 안벽에 계류된 선박(FPSO, LNG, 크루저선 등)은 파도와 조류, 바람 등에 의해 심한 운동을 하게 된다. 보통 해상에 계류된 선박은 2차항 파강제력에 의한 표류운동과 저주 파수 운동이 중요하게 되지만, 안벽에 계류된 선박은 1차항 파강 제력에 의한 운동도 선박에 커다란 영향을 준다. 그러므로 해상에 계류된 선박보다 안벽에 계류된 선박은 1차 운동을 줄여야 하기 때문에 계류력을 훨씬 크게 하여야 한다. 이와같은 이유로 태풍이 내습할 시 항구에 정박한 선박이나 조선소의 의장작업 중의 선박에 계류라인의 파괴 등으로 인한 커다란 손실이 발생 하게 된다. 따라서 안벽, 파도, 바람 과 조류를 고려한 계류된 선박의 비선형 운동해석은 중요하다.

안벽에 다점계류된 선박에 대하여 파도, 조류 및 바람을 고려 하여 시간영역에서 선박의 비선형 운동을 해석하였다. 안벽에 위치하는 해역의 정확한 해상 환경이 파악되면 파도, 조류 및 바람의 세기와 각도에 따라 적합한 계류라인의 특성(길이, 위치, 강성 등)을 초기 설계 단계에서 예측할 수 있을 것이다.

파도, 조류 및 바람 등의 복합환경외력을 수치 해석적인 방법으로 계산하여 안벽에 계류된 선박에 대한 비선형 운동을 해석 할 수 있었으며 이러한 결과는 태풍 내습시 안벽에 계류된 선박의 안전성 평가에 매우 유용할 것이다.

#### 참 고 문 헌

이재신(1989). "해양 구조물 설계 개요", 광문출판사.

오태명, 염덕준 (1990). "안벽계류해석", 대한조선학회지 제27권 제3호, pp 47-55.  
 최윤락등 (1994). "안벽에 계류된 선박의 운동응답 해석", 대한 조선학회 추계학술대회 발표회, pp 238-243.  
 임춘규, 이호영 (2003). "터렛계류된 FPSO 의 비선형 운동해석", 대한조선학회논문집 제40권 제1호, pp 20-27.  
 Wehausen, J.V. and Laitone, E.V. "Handbuch der Physik", Springer Verlag, Berlin, Vol.9.  
 Oortmerssen, G. Van (1976). "The Motions of A Moored Ship in Waves", Netherlands Ship Model Basin Wageningen, The Netherlands, Publication No.510.  
 Hong, D.C. (1987). "On the Improved Green Function Integral Equation Applied to the Water Wave Radiation-Diffraction Problem", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol.24, No.1.  
 Chan, H.S. (1990). "A Three-Dimensional Technique for Predicting First- and Second-Order Hydrodynamic Forces on a Marine Vehicle Advancing in Waves", Phd Dissertation, University of Glasgow.