

# 선박 안벽 계류에 있어서의 파력 영향 고찰

이진호\* · 김병우\* · 김문성\* · 하문근\*

\*삼성중공업(주) 조선플랜트연구소

## Investigation on the influence of wave forces on the moored ship beside Quay

Lee, Jin Ho\*, Kim, Byung Woo\* Kim, Mung Sung\* And Ha, Mun Keurt\*

\*Shipbuilding and Plant Research Institute, Samsung Heavy Industry Co. Ltd, Geoje, Korea

KEY WORDS: Mooring Analysis 안벽 계류, Wave Forces 파력

ABSTRACT: The influence of wave forces on the moored ship beside quay was investigated based on in-house ship mooring analysis and ship motion program in this paper. The wind and current are the general environmental factors for the mooring analysis beside quay in the mild weather. However, the weather is becoming rough, the wave phenomenon should be included in the mooring analysis. In this paper, as preliminary stages, each moored rope tension was evaluated based on wind and current environmental condition. The results were compared with those from MOSES, commercial program. In addition to this, wave forces of the ship were calculated in order to solve moored ship motion of equation. We will leave to solve this motion equation as future work.

### 1. 서 론

일반적으로 조선소에서는 안벽에 선박을 계류해서 건조 선박 후공정 작업을 수행한다. 이러한 안벽은 바다만에 설치되어져 있기 때문에 기상 상태의 악화에 따라 바람, 파도 등의 외부 환경에 의해서 계류되어진 선박의 손상을 줄 수 있다. 손상 사례로서는 계류되어진 로프의 파단에 의한 선박과 안벽의 충돌, 선박의 표류 등을 들 수 있다. 이러한 손상을 방지하기 위해서는 계류 로프에 걸리는 장력을 추정하여 로프 또는 비트의 허용 하중을 넘지 않게 적절한 계류 배열을 잡아야 할 것이다.

본 논문에서는 당사에서 개발 중인 안벽 계류 해석 프로그램을 소개한다. 이 프로그램에서는 외부 환경으로서는 바람과 조류력만을 고려하는 정적 해석을 수행할 수 있다. 하지만, 기상 상태가 악화됨에 따라, 파도에 의한 계류계에 미치는 영향도 같이 고려해야 할 것이다. 이를 위해 기 개발된 Ship Motion 프로그램으로부터 대상 선박에 걸리는 파력을 입사 포텐셜 및 산란 포텐셜로부터 구해낸다. 구하여진 파력은 계류 선박의 운동 방정식의 외력항으로 치환되어야 할 것이다.

계류 및 Free상태의 선박의 운동 방정식의 차이는 복원력 계수에서 발견할 수 있다. 즉, 계류 상태를 유지하기 위해서는 6

자유도 운동의 구속으로 Surge, Sway, Yaw가 추가적으로 정의 되어진다. 본 논문에서는 계류 선박 운동 방정식의 외력을 계산 하는 단계까지 수행을 했으며, 해법은 차기에 다루도록 할 것이다.

### 2. 안벽 계류 해석 알고리즘

#### 2.1 외부 환경 하중

온화한 기상 조건하에서는 바람 및 조류의 외부 환경만을 고려한 정적 해석을 수행하지만, 기상 상태가 악화됨에 따라 파랑에 의한 영향을 고려하여야 할 것이다. 현재 개발 중인 안벽 해석 프로그램에서는 대상 선박의 OCIMF에서 제공하는 풍동에서의 풍향별 모형 실험 계수 및 조류 계수 값으로부터 풍 하중 및 조류력을 계산하도록 하였다. 파랑에 의한 하중은 3절에 기술되어져 있다. 그림 1에서 대상 선박에 걸리는 바람 및 조류에 의한 계수 값을 나타내고 있다.

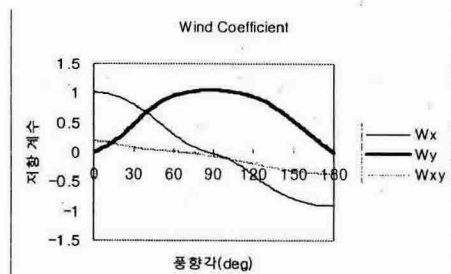


Fig. 1a Wind Coefficient

제1저자 이진호 연락처: 경남 거제시 신현읍 삼성 중공업

055-630-5354 jh1225.lee@samsung.com

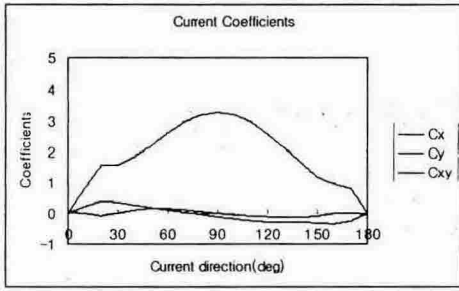


Fig. 1b Current Coefficient

위에서 언급한 계수 값을 이용하여 풍 하중 및 조류력 계산에 사용되어지는 좌표계는 그림 2에서 보는 바와 같이 선체의 무게 중심에 원점이 위치하는 우수 좌표계를 사용하며, 선박의 선수로 작용하는 경우를 0도를 하여 시계 방향으로 증가한다.

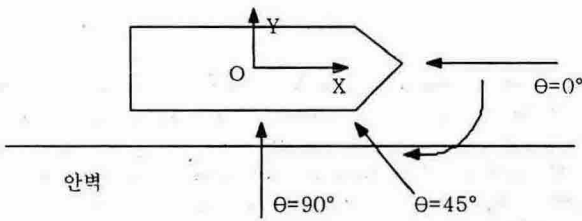


Fig. 2 Definition of wind & current force coordinator

X, Y방향의 풍 하중 및 Z축 방향의 모멘트는 식(1)~(3)에 나타낸 바와 같다.

$$F_{xw} = 0.5 W_x \rho_a V_w^2 A_T \quad (1)$$

$$F_{yw} = 0.5 W_y \rho_a V_w^2 A_T \quad (2)$$

$$M_{zw} = 0.5 W_{xy} \rho_a V_w^2 A_L L_{bp} \quad (3)$$

$W_x, W_y, W_{xy}$ 는 풍하중 계수를 나타내며,  $\rho_a=1.276(\text{kg}/\text{m}^3)$ ,  $V_w$ 는 풍속(m/s),  $A_T$ 는 수선상 횡방향 투영 면적( $\text{m}^2$ ),  $A_L$ 는 수선상 종방향 투영 면적( $\text{m}^2$ )를 나타낸다. 또한,  $L_{bp}$ 는 선박의 수선장 길이이다.

조류에 의한 하중도 그림 2의 좌표 정의를 따르며, 식(4)~(6)에 의해 계산할 수 있다.

$$F_{xc} = 0.5 C_x \rho_w V_c^2 T L_{bp} \quad (4)$$

$$F_{yc} = 0.5 C_y \rho_w V_c^2 T L_{bp} \quad (5)$$

$$M_{zc} = 0.5 C_{xy} \rho_w V_c^2 T L_{bp}^2 \quad (6)$$

여기서,  $C_x, C_y, C_{xy}$ 는 OCIMF의 조류 하중 계수를 나타내며,  $\rho_w=1025(\text{kg}/\text{m}^3)$ ,  $V_c$ 는 조류 속도(m/s),  $T$ 는 흘수(m)이다. 조류 계수의 경우 선박이 계류된 수심과 흘수의 비에 의해 다른 계수 값을 가지며, 이러한 계수의 데이터 저장은 OCIMF에서 찾을 수 있다.

## 2.2 로프의 장력 계산

초기 장력이 주어진 상태에서 외부 하중에 의해 안벽에 계류된 선박은 6자유도의 병진, 회전 변위만큼 움직이게 된다. 이러한 선박의 변위량은 로프의 변위량으로 전환되어 장력 증가분을 가지게 된다. 장력 계산은 로프를 스프링으로 가정하여 초기 장력 하에 발생된 로프의 변위량과 스프링 상수를 이용하여 장력 증가분을 계산할 수 있다.

그림 3에 로프에 걸리는 장력 증분을 계산하기 위한 좌표계를 정의하였다. 여기서, O-XYZ는 정지시 선체 무게 중심을 원점으로 하는 공간 고정 좌표를 나타내며,  $\Phi$  X  $\Psi$ 는 이때의 각 축의 회전 방향을 나타낸다.  $F_o(X_{fo}, Y_{fo}, Z_{fo})$ : 원점 O로부터의 좌표값)는 정지시의 블라드의 위치,  $F(X_i, Y_i, Z_i)$ : 원점 O로부터의 좌표값)는 선체 변위 후 블라드의 위치이며,  $B(X_b, Y_b, Z_b)$ : 원점 O로부터의 좌표값)는 안벽상의 비트 위치를 나타낸다.

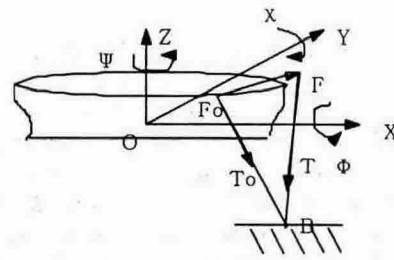


Fig. 3. Definition of tension displacement coordinator

그림 4에서 보는 바와 같이, 기준 좌표점 O로부터 선체상의 작용점  $F_o(X_{fo}, Y_{fo}, Z_{fo})$ 가 외부 하중으로 인하여  $F(X_i, Y_i, Z_i)$ 로 이동하였을 때, 좌표점 O-XYZ가 O-X'Y'Z'로 이동한다. 이때의 회전 변위량은 식 (7)와 같이 구할 수 있다.

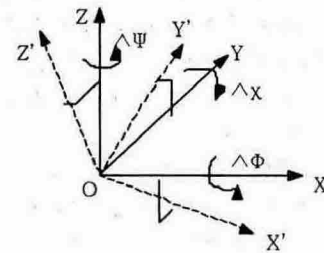


Fig. 4. Translation of displacement coordinator

$$\Delta r = [ X_{fo} \ Y_{fo} \ Z_{fo} ] \begin{bmatrix} 0 & \Delta\Psi & -\Delta X \\ -\Delta\Psi & 0 & \Delta\Phi \\ \Delta X & -\Delta\Phi & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

또한, 병진 변위는 다음과 같다.

$$\Delta l = [\Delta x \ \Delta y \ \Delta z \ \Delta\Phi \ \Delta X \ \Delta\Psi] \quad (8)$$

기준 좌표점 O로부터 변위점 F까지의 좌표는 (7), (8)에 의해 아래와 같다.

$$OF = [X_{fo} + \delta x, Y_{fo} + \delta y, Z_{fo} + \delta z] \quad (9)$$

여기서  $\delta x, \delta y, \delta z$  는 다음과 같이 정의되어 진다.

$$\begin{aligned} \delta x &= -X_{f0} \Delta\psi + Z_{f0} \Delta\lambda + \Delta x \\ \delta y &= X_{f0} \Delta\psi - Z_{f0} \Delta\phi + \Delta y \\ \delta z &= -X_{f0} \Delta\lambda + Y_{f0} \Delta\phi + \Delta z \end{aligned} \quad (10)$$

장력 증분을 구하기 위해서 식(8)의 변위량과 스프링 상수가 필요하다. 스프링 상수는 미리 주어진 값이기 때문에 별도의 계산이 필요 없지만, 변위량을 계산하기 위해서는 바람, 조류, 파랑에 의한 외력항과 계류 선박의 복원력 계수가 필요하다. 식(11)과 같은 외부 하중과 복원력의 힘의 평형을 고려한 선형 대수 방정식을 생성시켜 이 방정식의 해로써 계류 로프의 변위량을 구할 수 있다. 구하여진 변위량과 스프링 상수를 이용한 식(12)에 의해 장력 증가분을 구할 수 있다.

$$F = K \Delta l \quad (11)$$

$$\Delta T = k [(X_b - X_{f0})\delta x, (Y_b - Y_{f0})\delta y, (Z_b - Z_{f0})\delta z] / l_0 \quad (12)$$

여기서,  $l_0$ 는 안벽 비트와 선박위의 초크 사이의 초기 변위를 나타낸다. 로프에 걸리는 장력 계산의 흐름도를 그림 5에 나타내었다.

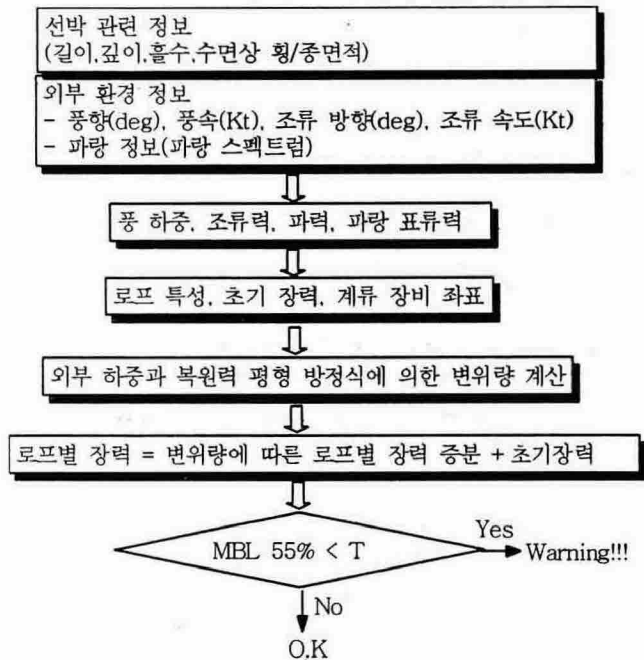


Fig. 5. Flow diagram of rope tension calculation

### 3. 선박의 파력 산정 알고리즘

안벽에 계류된 선박에 파랑이 입사하면 선박은 선형 파력 뿐만 아니라 비선형 파력도 경험하게 된다. 선형 파력은 파고에 비례하며 비선형 파력은 파고의 제곱에 비례한다. 비선형 파력은 계류된 선박의 복원력이 작은 수평방향으로의 표류 운동을

야기시키기에 선형 파력과 함께 안벽에 계류된 선박의 안정성 평가에 포함시켜야 한다.

선형 파력 및 비선형 파력은 포텐셜 이론을 기반으로 평균 침수된 선체 표면의 유체 압력을 직접 적분하는 근장법(near-field method)과 모멘텀 이론을 이용한 원장법(far-field method)으로부터 구할 수 있다. 근장법은 프로그램 작업이 다소 복잡하고 계산 시간이 많이 걸리는 단점이 있지만 표류력을 성분별로 분리하여 물리적인 의미를 파악할 수 있다는 장점이 있다. 선박에 작용하는 유체 압력은 베르누이 방정식을 이용해서 얻을 수 있다.

$$p = -\rho gz + \frac{1}{2}(\nabla\phi)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial t} - U\frac{\partial}{\partial x}\right)\phi \quad (13)$$

또한, 선박에 작용하는 힘과 모멘트는 평균 침수된 부분에 작용하는 유체 압력을 적분 함으로 구할 수 있다.

$$\vec{F} = \int_{S_s} \vec{P} n ds \quad (14)$$

$$\vec{M} = \int_{S_s} \vec{r} \times \vec{n} ds \quad (15)$$

유체 압력, 힘, 모멘트를 섭동법(perturbation method)을 이용하여 저차항 부터 고차항 까지 각각의 항으로 모으면 선형 파력과 비선형 파력을 구분해서 구할 수 있다(Pinkster, 1980).

#### 3.1 선형 파력

선형항 파력은 많이 알려진 바와 같이  $\vec{F}^{(0)}, \vec{F}^{(1)}$ 으로 나뉜다.

$$\vec{F}^{(0)} = -\rho g \int_{S_s} z \vec{n}^{(0)} ds = (0, 0, \rho g V) \quad (16)$$

여기서  $V$ 는 선박의 배수량이다.  $\vec{F}^{(0)}$ 는 선박의 부력에 의한 힘으로 표현 된다.

$$\begin{aligned} \vec{F}^{(1)} &= -\rho \int_{S_s} \left(\frac{\partial}{\partial t} - U\frac{\partial}{\partial x}\right)\phi^{(1)} \vec{n}^{(0)} ds \\ &\quad - \rho g(0, 0, \xi_3 A_w - \xi_5 A_w X_{c,f}) \end{aligned} \quad (17)$$

여기서  $A_w$ 는 수선면적이며  $X_{c,f}$ 는 길이방향 부심의 중심이다.

#### 3.2 비선형 파력

평균된 비선형 파력은 (14), (15)식을 시간 평균함으로써 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
\vec{F}^{(2)} = & \frac{1}{4} \rho g \oint_{L_n} |\xi_n|^2 \vec{n}_2^{(0)} dl \\
& - \frac{1}{4} \int_{S_n} |\nabla \phi^{(1)}|^2 \vec{n}^{(0)} ds \\
& + \frac{1}{2} \text{Re}[\vec{R}_1 \vec{F}^{(1)}] \\
& - \frac{1}{2} \rho w_e \int_{S_n} \text{Im}[\vec{a}^* \cdot \nabla \phi^{(1)}] \vec{n}^{(0)} ds \\
& + \frac{1}{2} \rho U \int_{S_n} \text{Re}[\vec{a}^{(1)*} \cdot \nabla \phi_x^{(1)}] \vec{n}^{(0)} ds \\
& + \frac{1}{2} \rho g A_w X_{c,r} \text{Re}[\xi_4 \xi_6] \vec{k}
\end{aligned} \tag{18}$$

여기서 ~ 기호는 변수의 복소 진폭을 나타내며, \* 는 켈레 복소수를 나타낸다.

$$\vec{n}_2^{(0)} = (\vec{n}_1^{(0)}, \vec{n}_2^{(0)}, \vec{n}_3^{(0)}) / \sqrt{n_1^{(0)2} + n_2^{(0)2}} \tag{19}$$

이와 비슷하게, 평균된 비선형 모멘트는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
\vec{M}^{(2)} = & \frac{1}{4} \rho g \oint_{L_n} |\xi_n|^2 (\vec{r} \times \vec{n}_2^{(0)}) dl \\
& - \frac{1}{4} \int_{S_n} |\nabla \phi^{(1)}|^2 (\vec{r} \times \vec{n}^{(0)}) ds \\
& + \frac{1}{2} \text{Re}[\vec{R}_1 \vec{M}^{(1)}] \\
& - \frac{1}{2} \rho w_e \int_{S_n} \text{Im}[\vec{a}^* \cdot \nabla \phi^{(1)}] (\vec{r} \times \vec{n}^{(0)}) ds \\
& + \frac{1}{2} \rho U \int_{S_n} \text{Re}[\vec{a}^{(1)*} \cdot \nabla \phi_x^{(1)}] (\vec{r} \times \vec{n}^{(0)}) ds
\end{aligned} \tag{20}$$

여기서  $\vec{M}^{(1)}$  는 1차 모멘트이다.

#### 4. 해석 및 비교 검토

표 1의 선박 제원으로 안벽 계류 해석을 수행하였다. 외부 환경으로 바람, 조류, 파랑에 의한 하중을 고려하였으며, 표 2에 외부 환경 조건을 나타내었다. Rough한 기상 상태를 고려한 환경 조건으로서 모든 외부 환경의 입사 방향은 90도로 가정하였다. 파랑 조건은 거제 고현만의 10년 반복 주기를 적용하였다.

표 1. 선박 제원

Lbp(m)	Breadth(m)	Depth(m)	Draft(m)
266.0	42.6	15.0	5.8

표 2 외부 환경 조건

바람		조류		파랑(ISSC)	
속도(Kt)	방향(도)	속도(Kt)	방향(도)	파고(m)	주기(s)
80.0	90.	3.0	90.	0.84	2.5

파랑에 의한 영향을 고려하기 위해 본 논문에서는 대상 선박의 입사 및 산란 포텐셜을 이용한 1차 강제력 및 2차 표류력을 계산

하였다. 계산 결과는 각각 Fig. 6~9, Fig. 10~12에 주었다. 2차 표류력의 결과는 각각의 성분별로 그림을 도시하였다.

선형 파력은 입사파(incident wave)와 산란파(diffract wave)가 합쳐진 전체 파력이다. 비선형 파력은 상대수위로 인한 영향이 가장 크며 베르누이 방정식에서의 1차 속도 분포에 기인한 압력 저하도 큰 영향을 미치는 것을 결과로부터 알 수 있다.

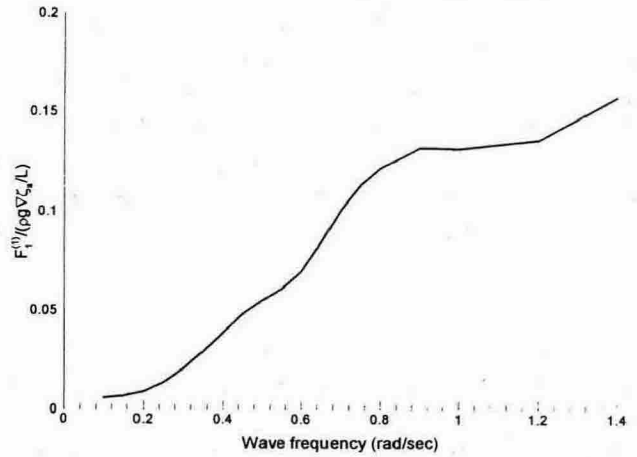


Fig. 6. Surge exciting force in Beam seas

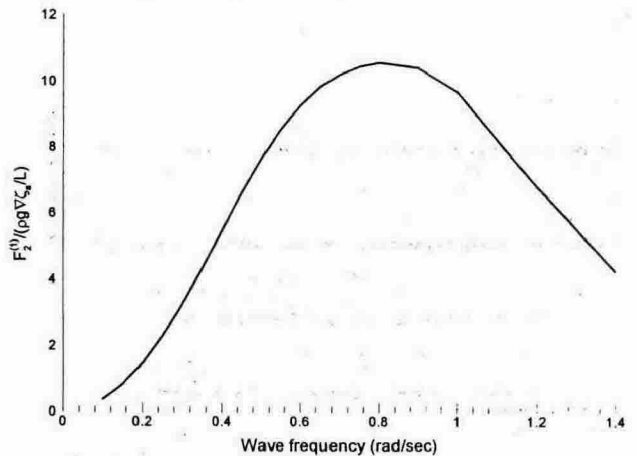


Fig. 7. Sway exciting force in Beam seas

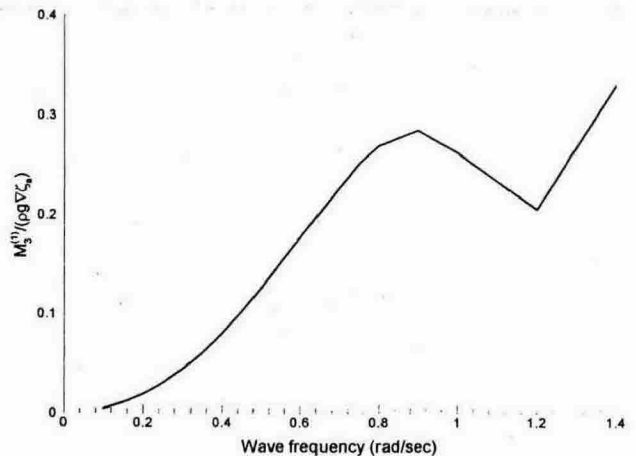


Fig. 8. Yaw exciting force in Beam seas

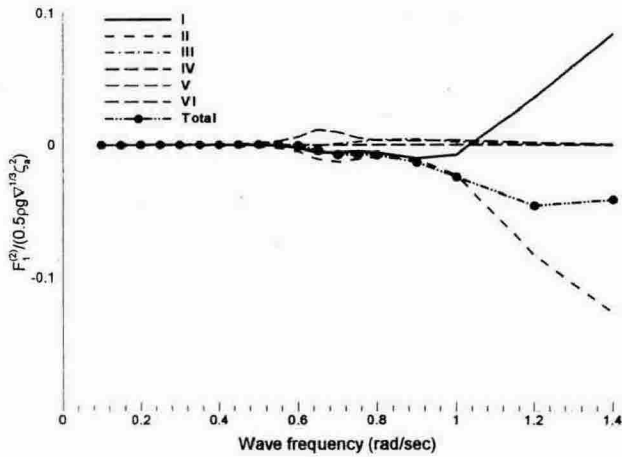


Fig. 10. Surge drift force in Beam seas

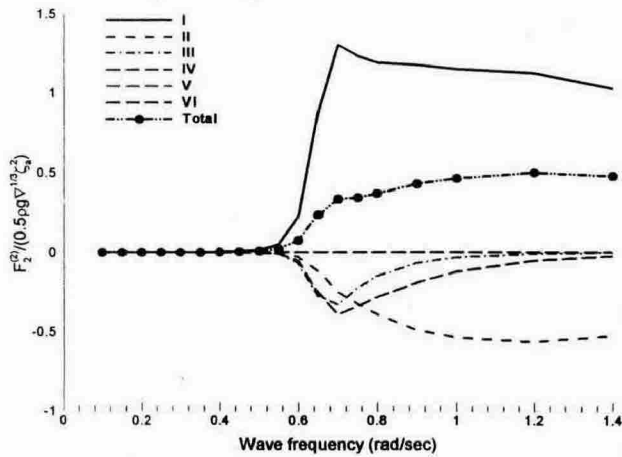


Fig. 11. Sway drift force in Beam seas

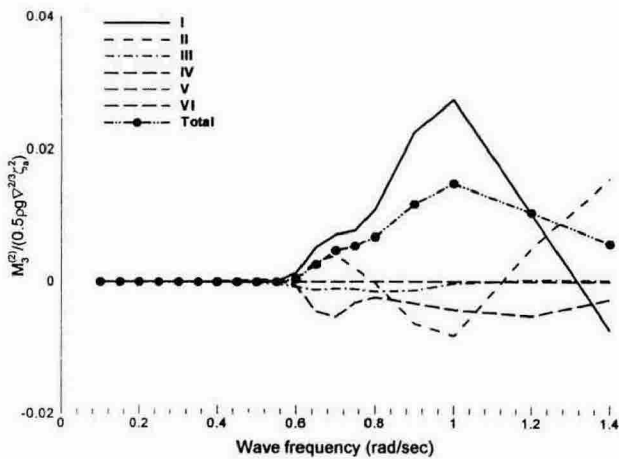


Fig. 12. Yaw drift moment in Beam seas

그림 13에서는 해석에 사용한 선박의 안벽 계류 배열을 나타내고 있다.

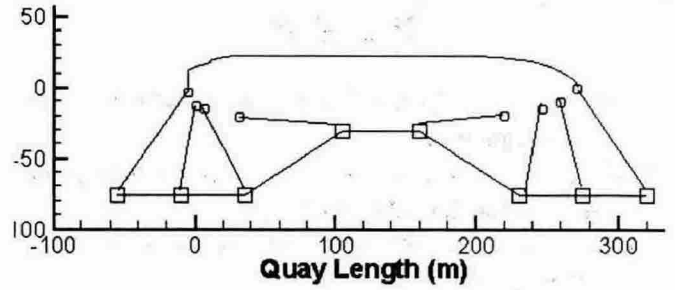


Fig. 13. Ship Mooring Arrangement

그림 14에서는 바람 및 조류만을 이용한 로프별 장력 계산과 파랑 조건을 포함한 MOSES에 의한 계산 결과를 비교하였다. 정적 해석에서는 약간의 차이는 보이지만, MOSES의 결과에 잘 따라 가고 있음을 알 수 있다.

MOSES에 의한 파랑 중 로프별 장력은 정적 해석에 비해서 로프별 장력이 증가함을 알 수 있다. 이는 계류된 선박의 운동에 의한 Radiation Force의 영향까지 포함되어서 계산되어진 결과라고 사료되어진다.

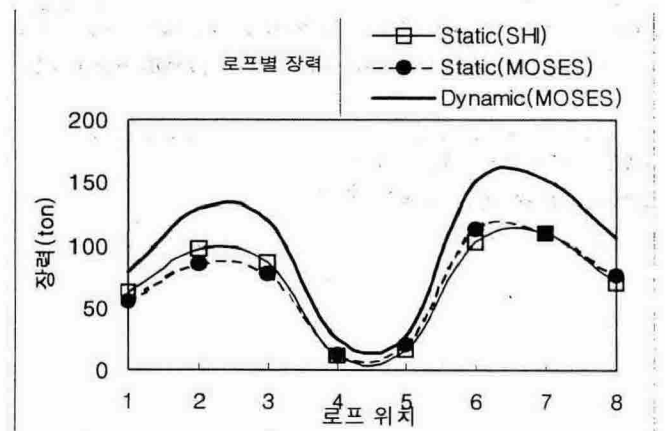


Fig. 14 Results of each rope tension

## 5. 결 론

당사에서 개발 중인 안벽 계류 해석 프로그램을 이용하여 계류 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

바람 및 조류만을 이용한 로프별 장력 계산에서는 약간의 차이는 보이지만, MOSES의 결과에 잘 따라 가고 있음을 알 수 있다. MOSES에 의한 파랑 중 로프별 장력은 정적 해석에 비해서 로프별 장력이 증가함을 알 수 있다. 이는 계류된 선박의 운동에 의한 Radiation Force의 영향까지 포함되어서 계산되어진 결과라고 사료되어진다. 당사 안벽 계류 해석 프로그램에서는 정적 하중 해석만을 수행했지만, 향후에 앞서 계산되어진 1차, 2차 파력 및 정적 하중을 외력으로 한 계류 운동 방정식의 해석을 수행토록 할 것이다.

## 참 고 문 헌

- "人形船係船의 動力學的 解析法", 西部造船會技術研究會研究報告, 제17호, pp 1-46.
- " Mooring Equipment Guidelines", Oil Companies International Marine Forum, Bermulda (1997)
- 오탈명, 염덕준 (1990), "안벽 계류 해석", 대한조선학회지, 제27권 제3호, pp 47-55
- 이호영, 임춘규, 유재문, 전인식 (2003), "안벽에 계류된 선박의 비선형 운동 응답", 한국 해양 공학회지 제17권 제4호, pp 8-15, 2003
- Kim, M. S. and Ha, M. K. (2003) "Relative motions between LNG-FPSO and Side-by-Side positioned LNG carrier in Waves" Proc. of 13th ISOPE conf. Hawaii, USA, pp. 210-217.
- Ha, M. K, Kim, M. S., Paik, B. K. and Park, C. H. (2002), "Motion and Sloshing Analysis for New Concept of Offshore Storage Unit", 한국해양공학회지 제 16권 제1호, pp 1-7, 2002.
- Pinkster, J.A. (1980) "Low frequency second order wave exciting forces on floating structures", NSMB report 650

---

2003년 10월 13일 원고 접수

2003년 월 일 최종 수정본 채택