

# 정박된 선박의 운동 및 계류력 분석

조철희\* · 정광식\*  
\*인하대학교 선박해양공학과

## Analysis of Motions and Moorings of a Berthed Ship

CHUL HEE JO\* AND KWANG SIC CHUNG\*  
\*Inha University, Incheon, Korea

**KEY WORDS:** Moored Ship 계류된 선박, Tension of Mooring Lines 계류사 장력, Motion of a Berthed Ship 정박된 선박의 운동

**ABSTRACT:** Mooring is the operation of securing a ship to a wharf or quay by means of ropes or chains. A moored ship need not necessarily be truly stationary. It may be free to rise and fall with the tide or the loading and unloading of cargo or to oscillate in response to the action of the environmental forces. In this respect a moored ship is restricted to a limited amount of movement within well-defined bounds. This study is intended to analyze the tension of mooring lines by a FEM program, as the current velocities and working directions are varied. The motion of a berthed ship is studied concerning with the wave periods and the direction. Also the behavior of the modeled vessel are investigated for a berthed condition.

### 1. 서 론

계류장치는 로프나 체인 등을 이용하여 선박을 부두나 안벽에 안전하게 잡아매는 장치이다. 계류된 선박들은 정확하게 정지될 필요는 없으나 조류와 화물의 적하상태에 따른 상하운동과 환경하중에 의한 영향을 받게 된다. 이러한 점에서 계류된 선박은 운동량이 제한되고 명확한 경계 내의 움직임을 유지하기 위한 필요범위 내로 구속된다.

환경에 의해 작용하는 힘은 바람, 해류, 조석간만의 차, 그리고 파랑의 움직임에 의해 형성된다. 이러한 환경하중에 의해 계류된 선박에는 6자유도 운동과 침수가 나타나게 되고 이러한 침수로 인해 선박은 부력의 분포변화에 따른 복원력을 받게 된다(Natarajan and Ganapathy, 1995). 따라서 선체 운동의 정확한 분석과 이를 제어하는 계류장치의 선택 및 위치설정은 계류 시스템의 초기 설계 단계에서 가장 중요한 문제이다(Bruun, 1973). 본 논문에서는 선체운동을 결정하는 변수들 중 해류의 속도변화와 작용방향에 따른 계류사의 장력과 파주기 변화와 작용방향에 따른 선체의 6자유도 운동을 이론적 연구와 함께 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 분석, 비교하여 효과적인 계류시스템의 개발이 가능하다.

### 2. 안벽계류의 적용이론과 분석방법

#### 2.1 적용이론

계류시스템의 6자유도 운동을 해석하기 위해 유체정역학적 복원력이 선체의 움직임에 대해 선형적으로 변화한다고 가정한다(Natarajan and Ganapathy, 1995). 선체가 평형상태의 위치로부터 길이방향인 x축을 중심으로  $\theta_x$ 의 각을 가지고 회전운동을 할 때 발생하는 횡복원 모멘트  $L_x^{rest}$ 는 식(1)과 같다.

$$L_x^{rest} = W \cdot GM_T \cdot \theta_x \quad (1)$$

선체가 평형상태의 위치로부터 y축을 중심으로  $\theta_y$ 의 각을 가지고 회전운동을 할 때 발생하는 종복원 모멘트  $L_y^{rest}$ 는 식 (2)와 같다.

$$L_y^{rest} = W \cdot GM_L \cdot \theta_y \quad (2)$$

선체가 평형상태의 위치로부터  $U_z$ 의 변위를 가지고 수직방향인 z축을 따라 침하할 경우의 침하력(immerse force)  $F_{rest}$ 는 식 (3)과 같이 계산될 수 있다.

$$F_{rest} = \rho_w \cdot g \cdot A_w \cdot U_z \quad (3)$$

계류사에서 탄성거동은 응력(stress)과 변형(strain)의 관계가 비선형적으로 나타난다. 계류사의 탄성강도(elastic stiffness)는

$$k_i = \left[ \frac{E(T) \cdot A}{l} \right]_i \quad (4)$$

제1저자 조철희 연락처: 인천광역시 남구 용현동 253,  
인하대학교 선박해양공학과  
032-860-7342 chjo@inha.ac.kr

x, y, z축은 선박의 고정된 좌표이고 x', y', z'축은 선박의 운동 변화에 따른 좌표이다. 선박에 외부하중이 가해지면 무게중심이 변하게 되고 x, y, z축 방향으로 식 (5)와 같은 상대적인 변위가 발생한다.

$$U_c = \begin{pmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \end{pmatrix} \quad (5)$$

회전운동에 대한 변위를 벡터로 표현하면 식 (6)과 같다.

$$\theta_c = \begin{pmatrix} \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \end{pmatrix} \quad (6)$$

x, y, z축과 계류라인이 이루는 각도가  $\phi_x, \phi_y, \phi_z$ 일때 계류 쇼크(mooring chock)를 잡아당기는 계류라인의 변위는 식 (7)과 같다.

$$U_i = U_c - C_i \cdot \theta_c \quad (7)$$

$C_i$ 는 i번째 쇼크의 위치를 나타내는 행렬이며 식 (8)과 같다.

$$C_i = \begin{bmatrix} 0 & -C_z & C_y \\ C_z & 0 & -C_x \\ -C_x & C_y & 0 \end{bmatrix}_i \quad (8)$$

$C_x, C_y, C_z$ 는 쇼크의 좌표계를 나타낸다.

선박의 좌표축에 비스듬한 계류선의 강성은 식 (9)에 보인 행렬로 나타낼 수 있다.

$$K_i = k_i \begin{bmatrix} \cos^2 \theta_x & \cos \theta_x \cos \theta_y & \cos \theta_x \cos \theta_z \\ \cos \theta_x \cos \theta_y & \cos^2 \theta_y & \cos \theta_y \cos \theta_z \\ \cos \theta_x \cos \theta_z & \cos \theta_y \cos \theta_z & \cos^2 \theta_z \end{bmatrix}_i \quad (9)$$

계류선의 반력(reactive force)  $f_i$ 를 vector로 표현하면  $f_i = K_i \times U_i$  (10)

계류선의 반작용 모멘트(reactive moment)  $l_i$ 를 vector로 표현하면

$$l_i = C_i \times f_i \quad (11)$$

n개의 계류선이 볼라드 (bollard)와 쇼크에 연결될 때 작용하는 반력  $\bar{F}$ 는

$$\bar{F} = \sum_{i=0}^n (K_i \cdot C_c + A_i \cdot \theta_c) \quad (12)$$

선체의 무게중심에 발생하는 모멘트  $\bar{L}$ 는

$$\bar{L} = \sum_{i=0}^n (A_i^T \cdot U_c + B_i \cdot \theta_c) \quad (13)$$

여기서,  $A_i = -K_i \times C_i, B_i = C_i \times A_i^T$ 는 변환행렬 (transposed matrix)이다.

## 2.2 분석방법

계류 시스템의 해석에서 계류선에 작용하는 장력과 선체의 운동해석은 계류 시스템의 안정성을 파악하는데 매우 중요한 요소이다. 본 논문에서는 상용프로그램인 MOSES를 이용하여 다음과 같이 수행하였다.

(1) 먼저 정박중인 선박과 6개의 계류선을 모델링하고 180°, 225°, 270°의 3가지 환경하중 방향에 대해 해류 속도를 0.5~3.0 knot 로 증가시키며 각 계류선에 작용하는 장력의 변화를 분석하고 기존의 해석 프로그램인 SHIP MOOR에 의한 결과 (Natarajan and Ganapathy, 1995)와 비교하여 그 타당성을 검증한다.

(2) 파주기 3초와 8초의 경우에 대해 환경하중의 작용 방향을 0°~360°까지 변화시켜 가며 선체의 6자유도 운동을 해석하고 파주기와 환경하중의 작용방향이 선체의 운동에 미치는 영향을 분석한다.

## 3. 해석 모델의 설정

본 논문에서는 대표적인 선박으로 50,000 톤급 컨테이너 선을 선정하고 이에 대하여 해석을 수행하였다. Table 1은 대상 선박의 주요 제원이고 Fig. 1은 모델링 된 선박이다.

Table 1 Design factors of model ship

톤수(중량톤)	50,000
전장(m)	280
형폭(m)	35.8
형심(m)	22.6
만재홀수(m)	13.0
수심(m)	20

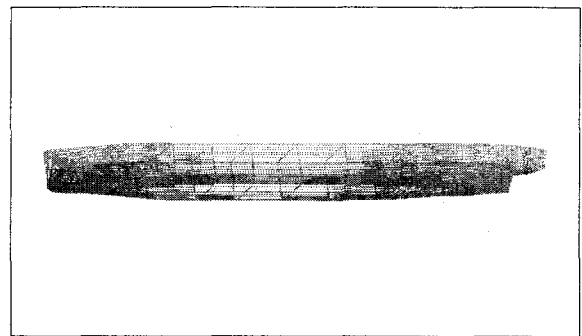


Fig. 1 Model ship

입력된 계류사의 규격, 종류 및 파단강도는 Table 2와 같다. 계류사의 조합은 Fig. 2와 같다. 바람 및 해류의 조건은 Table 3과 같다.

Table 2 Factors of mooring line

로프종류	나일론
로프 직경 (mm)	100
로프 길이 (m)	200
파단 강도 (Ton) (Minimum Breaking Load)	144
초기장력 (Ton)	10
단위길이 당 무게 (kg/m)	6
Young's Modulus (t/m <sup>2</sup> )	181,280

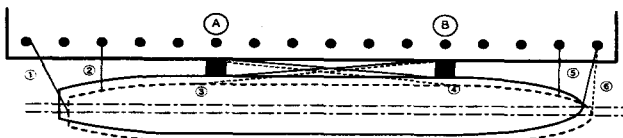


Fig. 2 Arrangement of mooring lines

Table 3 Wind and current

바람 및 해류			작용방향 (degree)
Wind	Velocity (knot)	50	180
Current	Velocity (knot)	0.5	
		1.0	
		1.5	225
		2.0	
		2.5	
		3.0	270

선체의 운동해석에서는 영향을 미치는 인자 중 파랑에 비해 해류는 무시할 만큼 작으므로 고려대상에서 제외됐다. Table 4는 환경하중조건을 나타낸다(Pinkster, 1976, 1977).

Table 4 Environmental condition of ship motion

Load Case No.	바람		파랑			해류	
	풍속 (knot)	방향 (°)	유의 파고 (m)	파주기 (sec)	방향 (°)	해류속 (m/sec)	방향 (°)
1	50	0	0.7	3, 8	0	0	0
2	50	45	0.7	3, 8	45	0	0
3	50	90	0.7	3, 8	90	0	0
4	50	135	0.7	3, 8	135	0	180
5	50	180	0.7	3, 8	180	0	180
6	50	225	0.7	3, 8	180	0	180
7	50	270	0.7	3, 8	0	0	0
8	50	315	0.7	3, 8	0	0	0

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 환경하중의 방향과 해류속도에 따른 계류사의 장력변화

환경하중의 작용방향이 180도일 때 계류사의 장력은 Fig. 3와 같다. 3번, 6번, 5번 계류사는 해류의 속도가 증가할수록 장력이 점점 증가하는 반면 4번, 1번, 2번 계류사의 장력은 점차 감소함을 확인 할 수 있다. 해류속도가 가장 낮은 0.5 knot에서는 4번 계류사에 순간적으로 가장 큰 장력이 발생하고 해류속도가 증가함에 따라 3번, 6번, 5번 계류사의 장력도 점차 증가하여 비로소 다른 계류사보다 큰 장력이 작용하게 된다. 이 경우 최종적으로 3번 계류사에 가장 큰 장력이 작용한다.

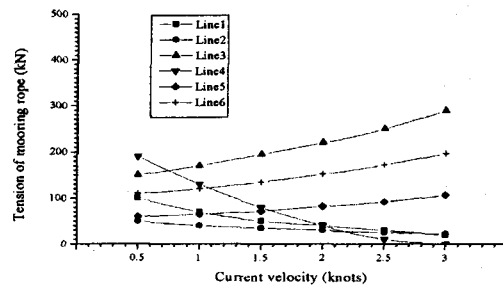


Fig. 3 180 °

환경하중의 작용방향이 225°인 경우의 해석결과는 Fig. 4와 같다. 해류속도의 증가에 따라 5번, 3번, 6번, 4번 계류사의 장력은 점차 증가하고 2번, 1번 계류사의 장력은 점차 감소한다. 이는 선체의 Yaw 운동의 영향이며 이 때 5번 계류사에 가장 큰 장력이 발생한다.

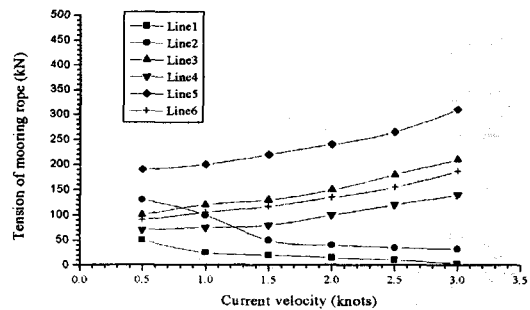


Fig. 4 225 °

환경하중이 270도일 때는 안벽 쪽으로부터 선체에 수직으로 환경하중이 작용하고 선체를 밖으로 밀어내는 것과 같은 현상이다. 따라서 해류속도의 증가에 따라 모든 계류

삭의 장력이 증가함을 알 수 있고 5번과 2번 계류삭에서 가장 큰 장력이 작용한다. Fig. 5는 해석결과를 나타낸다.

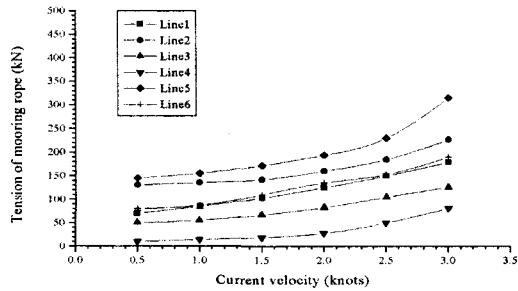


Fig. 5 270°

본 연구를 통해 해석한 환경하중의 방향과 해류속도에 따른 계류삭의 장력변화를 기존의 해석결과(Natarajan and Ganapathy, 1995)와 비교 분석할 때 환경하중의 작용방향에 따른 계류삭의 장력변화는 서로 비슷한 경향을 나타냄을 알 수 있다. 절대적 수치를 비교해 볼 때 약 100~200 kN 정도의 오차를 나타내고 있는데, 이는 선체의 크기와 형상, 외력조건에 차이가 발생된 오차라고 판단된다.

#### 4.2 환경하중의 작용방향과 파주기에 따른 선체의 6자유도 분석

Fig. 6는 파주기 3초일 경우 load case 1에 대한 계류선박의 RAO(Response Amplitude Operator)를 대표적으로 나타낸다. 환경하중의 작용방향에 따라 Fig. 7은 surge, Fig. 8은 sway, Fig. 9은 heave, Fig. 10은 roll, Fig. 11은 pitch, Fig. 12는 yaw의 변화를 각각 보여주고 있다.

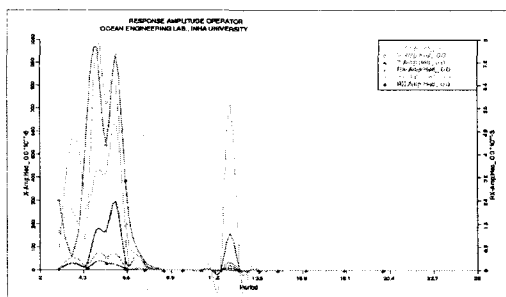


Fig. 6 Wave period 3 sec - load case 1 RAO

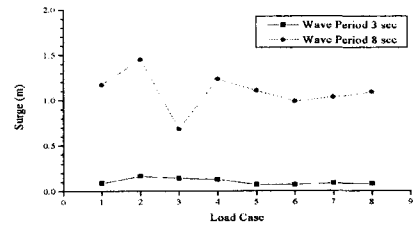


Fig. 7 Surge

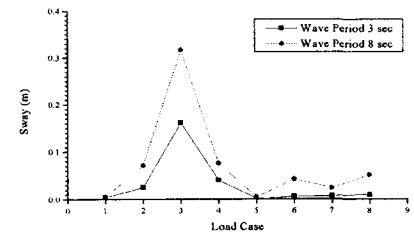


Fig. 8 Sway

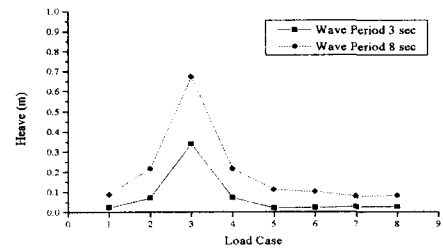


Fig. 9 Heave

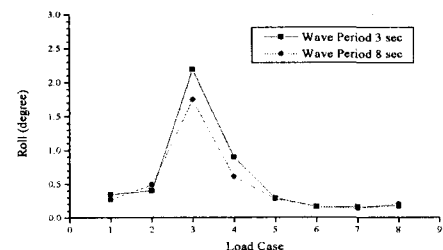


Fig. 10 Roll

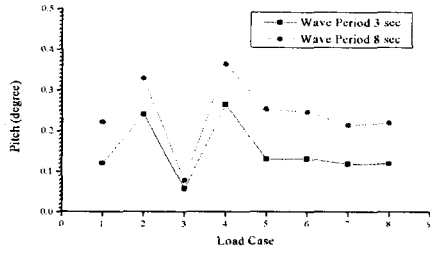
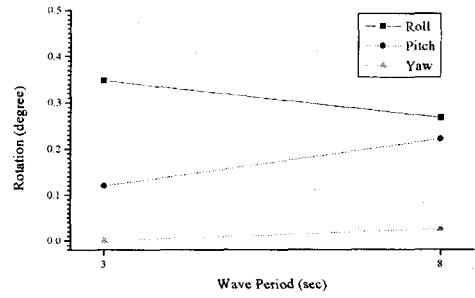


Fig. 11 Pitch



(b) Rotation  
Fig. 13 Load Case 1

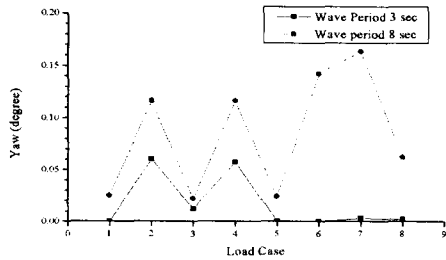
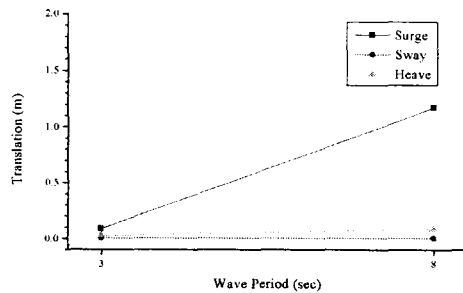


Fig. 12 Yaw

파주기의 변화에 따른 6자유도 운동량의 변화를 운동성 분별로 분석하였다. 병진운동(translation)과 회전운동(rotation)으로 나누어 분석한 결과를 통해 대체적으로 파주기의 증가에 따라 병진운동 역시 증가함을 알 수 있고 특히 surge의 증가가 두드러지게 나타났다. 반면 rolling의 경우 파주기의 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있다. Fig. 13는 load case 1의 경우에 대한 운동량 변화를 대표적으로 나타낸 것이다(Remery and Hermans, 1972).



(a) Translation

## 5. 결론

해류의 속도변화와 작용방향에 따른 계류사의 장력과 파주기 변화와 작용방향에 따른 선체의 6자유도 운동에 대한 연구를 통해 각 변수들간의 다음과 같은 영향을 확인할 수 있다.

- (1) 환경하중의 작용방향에 따라 나타나는 선체의 운동변화로 인하여 계류사에 발생하는 장력은 서로 다른 분포를 나타내게 되고 해류속도의 증가에 따라 초기에 발생하는 장력과는 다른 양상을 나타낼 수 있다.
- (2) 선체의 운동은 환경하중의 작용방향에 따라 일정한 주기적 변화를 나타내며 파주기는 각 운동성분에 대해 서로 다른 영향을 주게 된다.

## 참고 문헌

- Bruun, Per (1973). "Port Engineering", 3rd ed., Gulf Publishing Company, Houston.
- Natarajan, R. and Ganapathy, C. (1995). "Analysis of Moorings of Berthed Ship", Marine Structures, Vol 8, pp 481-499.
- Pinkster, J.A. (1976). "Low Frequency Second Order Wave Forces on vessels Moored at Sea", 11th Symposium on Naval Hydrodynamic, London.
- Pinkster, J.A. and G. van Oortmerssen (1977). "Computation of 1st and 2nd Order Wave Forces on Bodies Oscillating in Regular Waves", 2nd International Conference on Numerical Ship Hydrodynamic, Berkeley.
- Remery, G.F.M. and Hermans, A.J. (1972). "The Slow Drift Oscillations of a Moored Object in Random Seas", Society of Petroleum Engineers Journal.