

## 수치해석 기법을 이용한 안벽계류의 동력학적 고찰

### Dynamic Analysis of Berthed Mooring by Numerical Method

조 철 회\*      김 두 홍\*\*      김 병 환\*\*      나 인 삼\*\*  
Jo, Chul-Hee   Kim, Doo-Hong   Kim, Byoung-Hwan   Na, Ihn-Sam

---

#### ABSTRACT

It is very important to secure the marine vessels during entire loading and off-loading operations. The environment influences on loading conditions. the western coastal area of Korea is characterized as a strong current due to a high tidal range. The tension of mooring lines varies as per the current and wave changing its magnitude during the day. A proper mooring arrangement and design of mooring line should be determined as per environment conditions. In this study, a 50,000 DWT container ship being moored is investigated numerically. The dynamic tension of mooring lines is estimated by MORA (Mooring Response Analysis) software. Environmental conditions of selected offshore terminal site are plugged as input data. The mooring line tensions are obtained for various wave frequencies per wave directions. The results demonstrate the change of tensions of lines and the allowable range of safe conditions in berthed mooring.

---

#### 1. 서 론

인천은 육로, 해로, 항로를 동시에 이용한 물류의 수송연계로 중국연안과 동남아 시장의 물동량을 효율적으로 처리할 수 있는 지리적으로 세계적인 항구로써 손색이 없는 위치에 있다. 그러나 유리한 지리적 장점에도 불구하고 높은 간만의 차로 대형선박의 출입에 한계를 가지고 있어 대형 항구로 발전하는데 한계를 갖고 있었다. 이러한 한계를 극복하기 위해 인천지역에 해상 컨테이너 터미널이 제안되었다.

본 논문에서는 인천의 여러 지역을 조사하여 가장 적합한 해상 컨테이너 터미널 지역을 선정하였고, 이 지역의 환경조건을 적용하여 선박의 접안 시 선박의 계류 안정성과 계류라인의 장력을 수치해석으로 조사하였다. 본 연구를 통해서 해상컨테이너 터미널의 설계와 시공시 안정성 확보를 위한 계류라인의 장력을 분석하였다. 안벽에 계류되어 있는 선박이 외부 자연환경에 대한 안정성 여부나 해상 구조물의 Load-Out시 계류계의 설계, 안벽 및 해상 인공섬 등과 같은 터미널 설계 시 계류계의 안정성 해석은 매우 중요하다.<sup>(1)</sup> 선박을 외력에 대해 안전하게 계류시키기 위해서는 적합한 계류계가 설치되어야 하며 요구되는 범위를 벗어나지 않아야 한다. 또한 계류계(계류삭, Ship Bollard, Yard Bitt, Mooring Winch 등)의 허용장력이 초과되지 않도록 설계 되어야 한다.

---

\* 정회원 · 인하대학교 선박해양공학과 교수

\*\* 인하대학교 선박해양공학과 석사과정

일반적인 안벽계류에 대한 해석은 준정적(Quasi-Static)계류해석 방법이 정식화되어 있으며 구조물의 비선형적인 현상을 고려할 수 있는 하중증가법을 이용하여 해석을 수행하였다.<sup>(1)</sup> 본 논문에서 MORA(Mooring Response Analysis)라는 수치해석 프로그램을 이용하여 외력에 대한 각각의 계류라인에 작용하는 장력을 해석하였다.

## 2. 지역선정 및 환경특성

### 2.1 지역선정

해상컨테이너 터미널 건설 예상 후보지는 그림 1에 나타나 있으며 인천지역 북항 근방(A구역), 용유도 북측(B구역), 영종도 근방(C구역)의 세 곳을 예상후보지로 선정하여 자연환경조사, 물류 연계성, 경인운하와의 연계성 등의 조사를 실시하고 그 결과 최적의 위치로써 신공항 부지의 북측 방파제에서 북쪽으로 1.3km 떨어진 A지역을 선정하였다.<sup>(2)</sup> 그림 2는 지역 A에 적합한 해상컨테이너 터미널의 개념설계도이다. 이 해상터미널은 허브(hub)항으로 계획되었고 50,000WT급 컨테이너선박 5대가 동시에 하역이 가능하며 소형 컨테이너선박의 하역 및 선적이 가능한 접안시설도 갖추어져 있다.

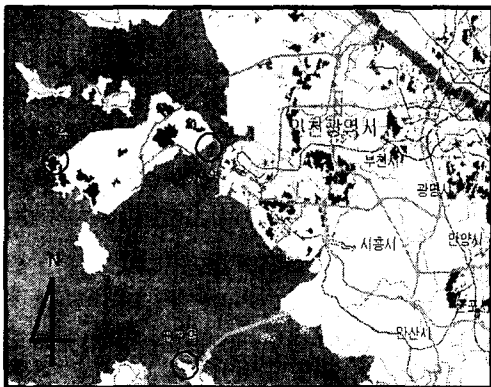


그림 1 해상터미널 건설 예상 후보지

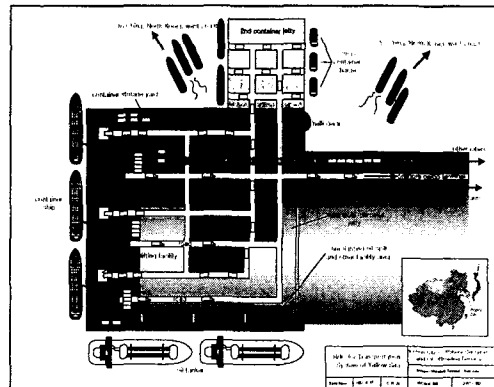


그림 2 인천지역의 차세대 해상터미널

### 2.2 환경특성

안벽계류의 분석에 포함되는 환경하중인자는 풍력, 조류력, 파력이다. 해상컨테이너 터미널 건설 예상 후보지의 연 최대 풍력은 25.7 m/sec 이고 선체의 수면 위 노출된 부분에 작용하는 풍력은 안벽 및 터미널 등에 계류된 선박이 대부분 경하상태로 있으므로 풍력도 무시 못할 하중이다. 인천지역의 특징으로 강한 조류가 작용하고 계류되어 있는 선박에 작용하는 조류력은 풍력보다 지배적인 환경하중인자로서 작용한다. 계류된 구조물에 작용하는 파력은 1차 선형 파력 및 2차 비선형 표류력으로 나누어진다.<sup>(3)</sup> 비선형 표류력은 시간 평균 표류력 및 시간에 따라 서서히 변하는 저진동 표류력으로 나누어진다. 저진동 표류력은 1차 선형 파력에 비해 크기는 적지만 비교적 낮은 고유진동수를 가진 구조물에 공진현상을 유발할 수 있으므로 계류해석에 중요한 인자로서 작용하나 일반적인 계류해석에서는 선형계류계의 운동값을 사용한다. 건설될 해상컨테이너 터미널 후보지의 간만의 차는 8.61m 이상으로 계류해석에 많은 영향을 미치므로 필히 고려해야 한다.

선체는 강제운동을 하며 안벽과 인접하여 계류되어 있고 선체에 작용하는 외력들에 의하여 발생한 변위는

정적 복원력에 의해 평형상태를 유지하며 다음과 같은 식으로 나타낸다<sup>(4)</sup>

$$\text{횡경사: } L^x_{rest} = W \cdot GM_T \cdot \theta_1 \quad (1)$$

$$\text{종경사: } L^y_{rest} = W \cdot GM_L \cdot \theta_2 \quad (2)$$

$$\text{침하: } F^z_{rest} = \rho \cdot g \cdot A \cdot U_3 \quad (3)$$

여기서,  $W$  = 배의 배수량(tonnes)  
 $GM_T$  = 횡방향 메타센터 높이(  $m$  )  
 $GM_L$  = 종방향 메타센터 높이(  $m$  )  
 $\rho$  = 해수의 밀도(  $t/m^3$  )  
 $g$  = 중력 가속도(  $m/sec^2$  )  
 $A$  = 배의 수선 면적(  $m^2$  )

### 3. 안벽 계류 해석

계류로프의 파단에 영향을 미치는 요소에는 로프자체의 재질 및 특성뿐 아니라 계류방법, 환경조건, 외력에 의한 선체운동특성이 있다. 이러한 모든 요소가 계류로프의 파단을 유발하므로 동일한 로프를 사용하였다 라도 계류로프 각각의 내구연한 및 잔여강도가 동일하다고 할 수 없다. 주어진 하중을 견디기 위해서 로프의 재질, 인장률, 내구성등을 분석해야한다. 계류라인(mooring line)의 종류와 기능은 Table. 1과 그림 3에 나타내었다.

그림 3에서 ①과②는 선박이 부두를 이탈하는 것과 선박의 전·후방 이동을 방지한다. 또한 x축 45° 방향으로 선박과 안벽을 연결한다. ⑤와⑥은 선박의 속도를 조절하고 선박의 전·후방 이동을 방지하는 계류라인이며 상호교차하며 선박과 안벽을 연결한다. ③과④는 ①과②를 이용하여 부두에 안정된 위치를 고정시킨 후 안벽에 안전하게 계류시키는 역할을 한다.<sup>(5)(6)</sup>

Table. 1 Name of Gears

Line 1	Head Line
Line 2	Stern Sine
Line 3	Aft Breast Line
Line 4	Forward Breast Line
Line 5	Forward Spring
Line 6	Aft Spring

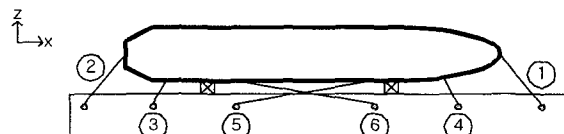


그림 3 Mooring Arrangement

일반적인 계류 해석과정은 다음과 같고<sup>(7)</sup> 그림 4는 해석과정의 흐름도(flow chart)이다.

- 1) 설계 환경조건에 의한 외력 산정
- 2) 계류방법, 계류라인의 결정
- 3) 설계조건에 대한 최대 선체 동요 결정

- 4) 계류 시스템 배치를 고려한 하중 접근 방향 결정
- 5) 계류 시스템의 강성을 고려한 선체의 운동 결정
- 6) 선체의 최대 이동량과 계류로프의 장력 결정
- 7) 계류로프의 장력과 선체 이동량을 계류 시스템 설계기준과 비교, 검토

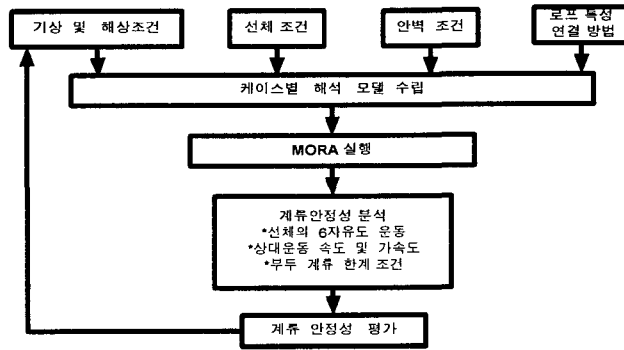


그림 4 Flowchart of Mooring Analysis

#### 4. MORA(MOoring Response Analysis)를 이용한 해석

##### 4.1 MORA 프로그램

해상컨테이너 터미널을 위한 접안 방식으로써 제시된 안벽계류의 계류 해석은 MORA(Mooring Response Analysis)를 이용하여 해석을 실시하였다. MORA는 파도, 조류의 영향을 받는 선박이나 해양구조물에 작용하는 하중과 운동을 해석하기 위한 계류 전용해석 프로그램으로 다양한 시스템의 시뮬레이션 및 동적 해석이 가능하다. 수면아래에 잠겨있는 surface panel (large displacement hull) 과 작은 반경을 가지는 종속부재에 대한 구조물에 대해서도 해석이 가능하다.<sup>(7)</sup>

##### 4.2 MORA 해석 과정

MORA는 여러개의 모듈(module)로 구성되어 있고 각각의 모듈 기능과 해석 순서도는 그림 5와 같다.

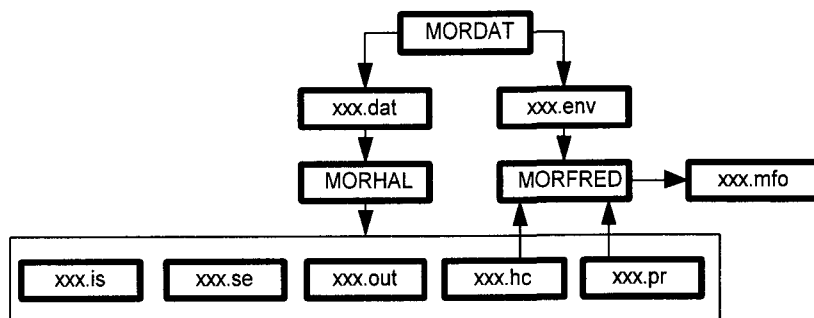


그림 5 MORA Flow Chart

MORDAT(Mooring Response Analysis)을 이용하여 선박을 모델링(modelling)하고 MORHAL(Mooring Response Analysis)과 MORFRED(Mooring Response Analysis)의 실행에 필요한 입력정보파일(input data file)을 작성한다. MORHAL의 실행에 의해 유체 동력학적 계수(hydrodynamic coefficients)가 계산되고 이들 정보를 MORFRED에 입력시켜 프로그램을 실행하면 최종적으로 xxx.mfo 파일(file)이 생성된다. mfo 파일에는 본 논문에서 분석하고자 하는 계류라인 장력과 변위에 관한 내용이 포함되어 있다.

## 5. 모델링(Modelling)

본 논문은 MORA 프로그램의 모듈인 MORDAT을 이용하여 컨테이너선을 모델링 한 후 해상컨테이너 터미널 후보지의 해상 하중 조건을 적용하였다. 모델은 해상컨테이너 터미널에 계류될 대상 선박을 50,000WT 급으로 선정하였으며 대상 건설 후보지에 예상되는 환경 하중은 과거에 발생한 최대 값을 적용하였다. 계류 해석에 있어서 환경하중은 풍력, 조력, 파력 등이 고려되나 MORA는 수면하 부분만 다루므로 풍력이 무시된다.

본 논문에서는 최대 파력을 선박에 30 °씩 변화시켜 가면서 선박 최대 변위를 해석하였다. 선박의 6자유도 운동으로 인하여 발생된 변위를 복원시키기 위한 계류라인의 장력을 동역학적 해석으로 수행하였고 선박이 안전하게 계류될 수 있는 위치를 제시하였다. 모델의 재원과 하중조건은 Table. 2와 같으며 MORA를 이용한 컨테이너선 모델링과 좌표계는 그림 6과 그림 7에 나타내었다. 파도는 x축을 기준으로 z방향으로 움직이므로 0~180 ° 까지는 선박이 안쪽에 계류된 좌표이고 180~360 ° 까지는 파도가 작용하는 방향이다.

Table. 2 Environmental Condition & Dimension

wave height( <i>m</i> )	3	length( <i>m</i> )	280
surface current velocity ( <i>m/sec</i> )	1.70	breadth( <i>m</i> )	36
elevation of body axes above MWL( <i>m</i> )	0	depth( <i>m</i> )	25
water depth( <i>m</i> )	20	draft( <i>m</i> )	15
elevation of C.G axes above body axes( <i>m</i> )	-3	block coefficient	0.8
forward speed ( <i>Kts</i> )	0.00		

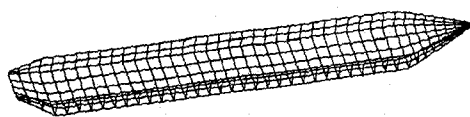


그림 6 Modelling of Container Ship

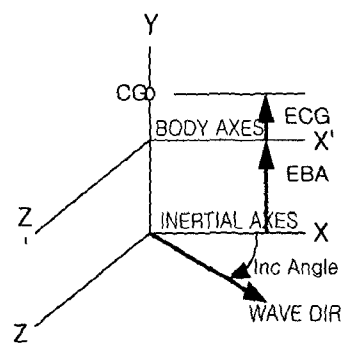


그림 7 Coordination

MORDAT에는 선박의 수면하 부분만이 모델링이 된다. 일반적인 유한요소해석(F.E.M)프로그램은 모델을 노드(node)와 엘리먼트(element)로 형성한 후 모델에 대한 정보를 입력하고 해석을 수행하는 반면 MORA는 4개의 노드(node)를 형성한 후 각 노드를 연결하여 하나의 패널(panel)을 형성한다. 이 패널에 모델에 대한 정보를 입력하고 해석한다. 계류라인은 원하는 계류방식 따라 선박과 안벽의 접지점을 지정하고 선(line)으로 처리하면 된다. 계류라인의 종류는 영스모듈러스(young's modulus)와 초기 장력값을 입력하여 특성화한다.

## 6. 해석 결과

본 논문에서는 파도의 주파수영역 별로 해석을 수행하였으며 파도의 작용 방향을  $180^\circ \sim 360^\circ$  범위 내에서  $30^\circ$  씩 변화시켜 가면서 각각의 계류라인에 작용하는 장력을 해석하였다. 그 결과는 그림8 ~ 그림11과 같다. 그림 8과 그림 11에서는 파도가 안벽을 따라 선체에 평행하게 작용할 때 선체가 파도에 영향을 받는 면적이 감소하므로 선체의 거동은 적어지고 계류라인의 장력은 감소하는 경향을 나타낸다. 그림 9에서 파도 방향  $240^\circ$ 로 작용하고 주파수가  $0.05 H_2$ 일 때 ①번(Head Line)과 ②번(Stern Line)에서 가장 큰 장력이 발생함을 보여준다. 이러한 현상은 장주기의 파도가 선박에 작용함에 따라 계류라인의 장력이 증가함을 알 수 있었다.

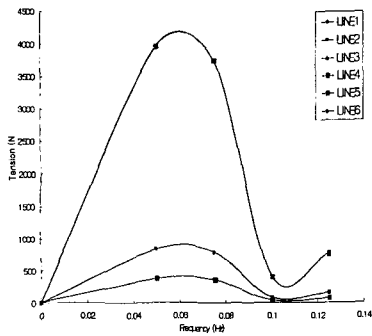


그림 8 Wave Direction (  $180^\circ$  )

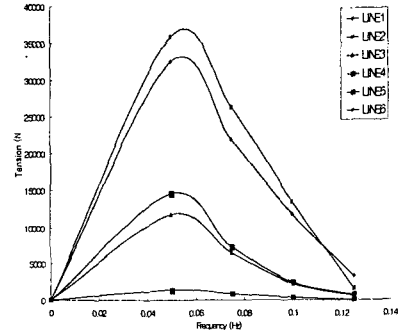


그림 9 Wave Direction (  $240^\circ$  )

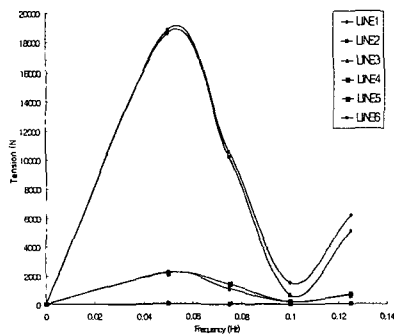


그림 10 Wave Direction (  $270^\circ$  )

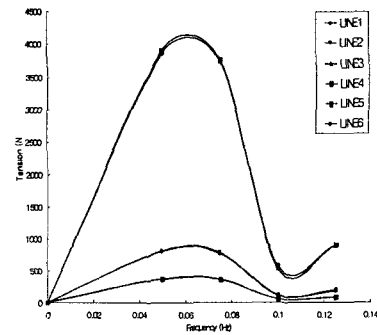


그림 11 Wave Direction (  $360^\circ$  )

그림 10에서는 파도가 선체에 직각(perpendicular)으로 작용할 때 상호 대응하는 계류라인의 장력이 균형을 이루고 있음을 볼 수 있다. 일반적으로 ③번(Aft Breast Line)과 ④번(Forward Breast Line)에서의 장력이 ①번, ②번보다 현저히 작게 나옴을 알 수 있으며, ⑤번(Forward Spring)과 ⑥번(Aft Spring)은 선박의 계류에는 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 해석된다.

## 7. 결 론

본 논문에서는 인천 지역의 해상 컨테이너 터미널 조성 시 예상되는 50,000WT급 컨테이너선의 안벽계류를 수치 해석하였으며 파도 방향별, 주파수별로 계류되어 있는 선박에 미치는 계류라인 장력을 해석하였다.

해석 결과, 파도가 선체에 240 °로 작용하고 파도의 주파수가 0.05  $H_z$ 일 때 계류라인의 장력이 가장 크게 작용하므로 계류계의 구성요소(Ship Bollard, Yard Bitt, Mooring Winch 등)도 최대 장력값에 상응하도록 설계하고 선박의 계류 시 안정성을 위하여 최대 장력을 견딜 수 있는 계류라인을 전체에 동일하게 적용해야 한다. 안벽 계류 시 Head Line과 Stern Line에 대부분의 응력이 걸리므로 이 두 계류라인이 선박 운동의 대부분을 통제함을 알 수 있다.

대부분의 선박은 항만내 천수해역에서 비선형 운동을 하므로 계류계 해석은 필수적이며 정확한 해석을 위해 동적하중을 고려한 수치해석이 요구된다.

## 참고 문헌

1. 오태명, 이상곤, "안벽 계류 해석", 대한조선학회지, 제27권 제3호, 1990
2. 황해권 수송시스템 연구센터, "황해 북부권의 최적 해상 컨테이너 터미널 조성에 관한 기초 연구", 1999
3. Gregory P. Tsinker, "Marine Structures Engineering," Chapman & Hall, 1994
4. H. O. Berteaux, "Buoy Engineering," John Wiley & Sons, INC., 1976
5. Michael Chernjowski, "Mooring of Surface Vessels to Piers," Marine Technology, Vol.17, No. 1, Jan. 1980
6. Per Bruun, "Port Engineering," Gulf Publishing Company, 1976
7. C.J. Garrison, "Numerical Method in Offshore Engineering, Chapt. 3-Hydrodynamic Loading of Large Offshore Structures: Three-Dimensional Source Distribution Methods," John Willy & Sons, 1978