

# 탄성 붐의 동적 거동을 고려한 해상 크레인의 리프팅 해석

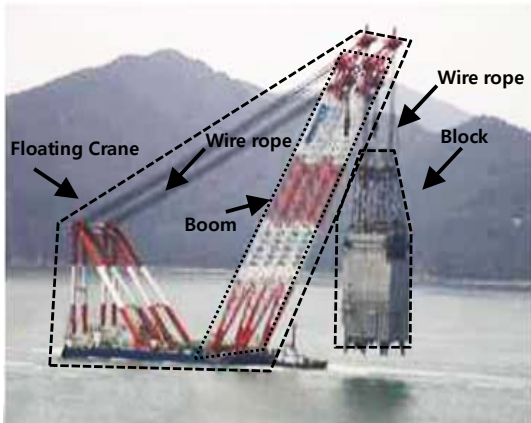
## Lifting Design Analysis of a Floating Crane considering the Dynamic Behavior of Elastic Booms

박광필† · 차주환\* · 이규열\*\*

Kwang-Phil Park, Ju-Hwan Cha and Kyu-Yeul Lee

### 1. 서론

해상 크레인은 크레인을 탑재한 바지 형상(barge type)의 선박으로, Fig.1 과 같이 대형 블록(block)의 리프팅(lifting)과 해상 운송에 사용되고 있다.



**Fig. 1 Block lifting and transportation by a floating crane**

이러한 작업들은 해상에서 이루어지므로, 해상 상태를 고려하여 해상 크레인과 블록의 동적인 안정성을 사전에 평가하는 리프팅 해석(lifting design analysis)이 필요하다. 본 논문에서는 이러한 리프팅 해석에 탄성 붐(boom)의 동적 거동을 고려하였다. 붐은 절점 좌표(nodal coordinates)와 형상 함수(shape function)를 이용하여 탄성체로 모델링하였다. 외력으로는 해양파의 실시간 진폭을 고려한 선박유체정역학 힘, 해양파에 의한 선박유체동역학적 힘, 와이어 로프(wire rope)의 장력, 계류력(mooring)을 고려하였다. 리프팅 해석은 해양파의 방향과 진폭을 변경하면서 비교하였다.

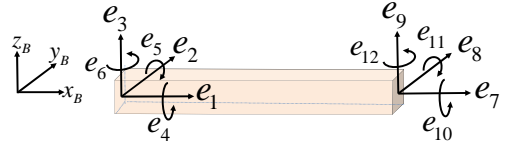
### 2. 탄성 붐 모델링과 운동방정식

#### 2.1 탄성 붐 모델링

탄성 붐의 3 차원 변위는 식 (1)과 같이 정의된다. 여기서  $\bar{\mathbf{u}}_f$  는 변위 벡터,  $\mathbf{S}$  는 형상 행렬,  $\mathbf{q}_f$  는 절점 좌표 벡터이다.

$$\bar{\mathbf{u}}_f = \mathbf{S} \mathbf{q}_f \quad (1)$$

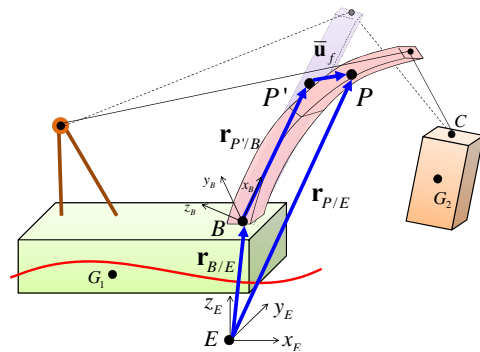
탄성 붐은 Fig. 2 와 같이 12 개의 절점 좌표를 가지는 3 차원의 붐 요소(element)로 모델링 되었다.



**Fig. 2 Beam element with 12 nodal coordinates**

E-frame(Earth-fixed inertial frame)에서 정의된 탄성 붐 상의 한 점  $P$  의 위치 벡터는 식 (2)와 같다. 각 벡터는 Fig. 3 과 같으며,  ${}^E \mathbf{R}_B$  는 회전 변환 행렬이다.

$$\mathbf{r}_{P/E} = \mathbf{r}_{B/E} + {}^E \mathbf{R}_B (\mathbf{r}_{P'/B} + \bar{\mathbf{u}}_f) \quad (2)$$



**Fig. 3 Position vector of  $P$  on the elastic boom with respect to E-frame**

† 교신저자; 대우조선해양 선박해양연구소  
 E-mail : kppark@dsmc.co.kr  
 Tel : (02) 880-8378, Fax : (02) 886-4920  
 \* 서울대학교 공학연구소  
 \*\* 서울대학교 조선해양공학과 및 해양시스템공학연구소

## 2.2 운동 방정식

탄성 붐이 고려된 해상 크레인과 블록의 운동 방정식은 식 (3), (4)와 같다.

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{D}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}(\mathbf{q})\mathbf{q} + \mathbf{C}_q^T(\mathbf{q})\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{Q}_e(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}, t) + \mathbf{Q}_v(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \quad (3)$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{q}) = 0 \quad (4)$$

여기서  $\mathbf{q}$ 는 해상크레인과 블록의 질량 중심 좌표와 탄성 붐의 절점 좌표로 이루어진 일반화 좌표이며,  $\mathbf{M}$ 은 각각의 질량과 관성 모멘트로 구성된 행렬이다.  $\mathbf{D}$ 와  $\mathbf{K}$ 는 각각 탄성 붐의 구조 감쇠 행렬과 강성 행렬이다.  $\mathbf{C}_q^T\boldsymbol{\lambda}$ 는 식(4)와 같이 탄성 붐과 해상 크레인이 점  $B$ 에서 서로 고정된 운동학적 구속조건(kinematic constraint)에 의해 발생하는 구속력이며,  $\boldsymbol{\lambda}$ 는 Lagrange multiplier이다.  $\mathbf{Q}_v$ 는 회전력 및 코리올리 힘(Coriolis force)이고,  $\mathbf{Q}_e$ 는 Fig.4와 같이 해상 크레인 및 중량물에 작용하는 외력이다.

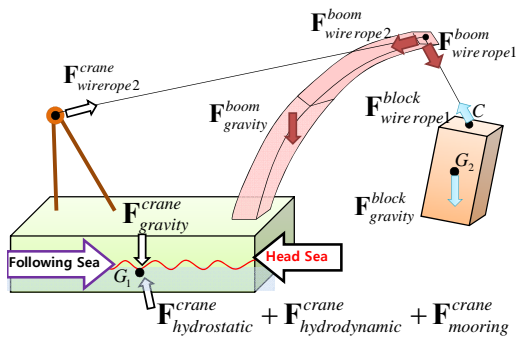


Fig. 4 External forces acting on the floating crane, the block and the elastic boom

## 3. 탄성 붐의 동적 거동과 리프팅 해석

수치적인 방법으로 시간 영역에서 해상 크레인 및 블록의 동적 거동을 시뮬레이션 하였다.

### 3.1 탄성 붐의 동적 거동

탄성 붐의 동적 거동 시뮬레이션 결과는 Fig. 5와 같다. 이것은 붐의 길이 방향으로 각 위치에서 시간에 따른 변위를 나타낸 것이다. 이 때 블록의 질량은 1,500ton이며, 해양파는 0.5m의 진폭과 10초의 주기를 가지는 following sea이다.

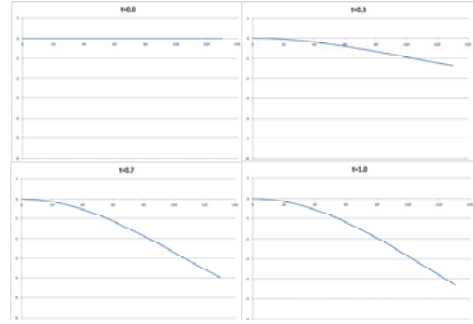


Fig. 5 Dynamic behavior of the elastic boom with respect to time

## 3.2 리프팅 해석

Fig. 6은 동일한 조건에서 해양파의 진폭을 변경할 때, following sea와 head sea에 대한 리프팅 해석 결과이다. 와이어 로프의 한계치 1,800 ton을 고려하면, head sea 상태에서는 0.5m 진폭 이상에서는 작업이 위험하지만, following sea 상태에서는 0.9m까지 작업이 가능한 것을 볼 수 있다.

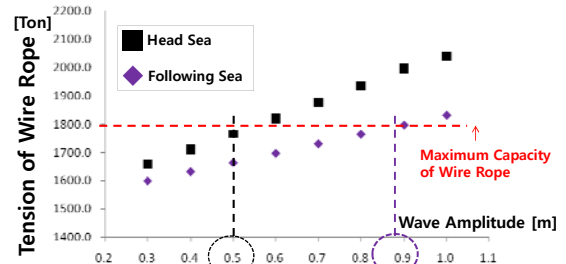


Fig. 6 Lifting design analysis for the following sea and head sea conditions

## 4. 결론

본 논문에서는 탄성 붐을 모델링하여 해상 크레인 및 블록의 동적 거동을 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과를 바탕으로 해상 크레인이 리프팅 해석을 수행하고, 해양파의 방향에 따라 작업이 가능한 조건을 평가하였다.

## 후 기

본 연구는 a) 대우조선해양(주) b) 국방과학연구소 수중운송체기술평화센터 SM-11 과제 "수중 운동체의 체계/부체계 기능 및 성능 시뮬레이션을 위한 네트워크 기반의 가상 복합 시스템 모델 구조 연구" c) 서울대학교 해양시스템공학 연구소 d) 서울대학교 BK 21 해양기술인력양성사업단 f) 한국학술진흥재단 (KRF-2008-314-D00494)의 지원을 받아 연구되었음을 밝히며, 이에 감사 드립니다.