

## 중량물의 동적 거동에 미치는 크레인 붐(boom)의 탄성 영향 분석

박광필\*, 차주환<sup>†\*\*</sup>, 이규열\*\*\*

대우조선해양 선박해양연구소\*  
서울대학교 공학연구소\*\*  
서울대학교 조선해양공학과 및 해양시스템공학연구소\*\*\*

Analysis of an Elastic Boom Effect on the Dynamic Response of a Cargo

Kwang-Phil Park\*, Ju-Hwan Cha<sup>†\*\*</sup> and Kyu-Yeul Lee\*\*\*

Ship and Ocean Research Institute, Deawoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd.\*  
Engineering Research Institute, Seoul National University\*\*

Department of the Naval Architecture and Ocean Engineering, and Research Institute of  
Marine System Engineering, Seoul National University\*\*\*

### Abstract

In this paper, in order to analyze the dynamic response of a floating crane when it lifts a heavy cargo, the boom of the floating crane is considered as an elastic beam. The boom is divided into elements based on finite element formulation and the floating frame of reference formulation and nodal coordinates are employed to model the boom as a flexible body. As an extension of the previous study, in order to consider spatial motion in waves, the coupled equations of motions of the 6 degree of freedom (DOF) floating crane and 6 DOF cargo are developed based on the flexible multibody system dynamics. The 3 dimensional deformation of the elastic boom is considered with 18 DOF. The dynamic simulation of the floating crane and the cargo is performed under regular wave conditions with various cargo weights. Finally, the effects of the elastic boom on lifting cargo are discussed by comparing the simulation results between the elastic boom and a rigid boom.

※Keywords: Floating crane (해상 크레인), Elastic boom (탄성 붐), Finite element formulation (유한 요소 정식화), Flexible multibody system dynamics (유연 다물체계 동역학), Dynamic response (동적 거동)

---

접수일: 2010년 1월 22일, 승인일: 2010년 4월 8일

†교신저자: jhcha79@snu.ac.kr, 02-880-8378

1. 서론

조선소에서는 최근 생산량 증가에 따라 Fig. 1 과 같은 해상 크레인을 이용하여 대형 블록을 리프팅하는 비중이 급격히 증가하고 있다. 또한 생산성 향상을 위해 블록을 리프팅한 상태에서 이동하여 탑재까지 한 번에 수행하는 공법이 적용되고 있다. 이러한 공법은 해상에서 이루어 지며 대형 중량물을 다루고 있기 때문에, 해상 상태를 고려한 안정성 확보가 매우 중요하다(Cha et al. 2008; Cha et al. 2009; Ku et al. 2009). 따라서 해상 크레인과 중량물의 동적 거동 및 와이어 로프(wire rope)의 장력을 사전에 계산하여 공법 계획에 반영해야 한다. 특히 붐(boom)은 길이가 약 130m 인 구조물로서 대형 블록을 인양하는 경우에는 탄성이 해상 크레인과 블록의 동적 거동에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 본 논문에서는 해양파가 외력으로 작용하는 상태에서 붐의 탄성이 고려된 해상 크레인과 블록의 동적 거동을 해석하고, 강체 붐을 사용한 결과와 비교하였다. 붐은 플로팅 레퍼런스 프레임(floating reference frame)과 절점 좌표(nodal coordinate)를 사용하여 탄성체로 모델링하였다. 외력으로는 규칙파의 유체정역학 힘, 선형화 된 유체동역학 힘, 와이어 로프의 장력, 계류력 그리고 중력이 고려되었다.

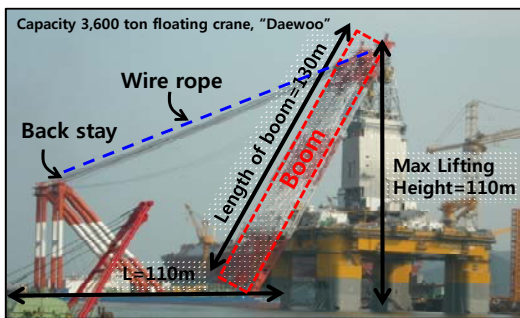


Fig. 1 The floating crane, “ DAEWOO” , focused in this paper (Courtesy Daewoo Shipbuilding & Ocean Engineering)

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 붐의 탄성을 고려한 관련 논문 현황을 분석하고, 3 장에서는 탄성체 모델링 방법과 유연 다물체계 운동방정식 유도 과정을 설명한다. 4 장에서는 해상 크레인과 중량물의 운동방정식을 설명한다. 5 장에서는 동적 거동 및 장력을 계산한 결과를 보이고, 강체 붐을 사용한 결과와 비교한다.

2. 해상 크레인 탄성 붐 관련 연구

해상 크레인을 대상으로 붐의 탄성을 고려한 연구는 Al-Sweiti and Sö ffer(2007), Ren(2008) 그리고 Park et al.(2010)이 있다. Table 1 과 같이 Al-Sweiti and Sö ffer (2007)는 해상 크레인을 1 자유도로 고려하였고, 중량물은 길이가 고정된 와이어 로프에 질점으로 고려하였다. Ren(2008)은 해상 크레인은 수직 평면상의 3 자유도를 가지는 운동으로 고려하였지만 중량물은 Al-Sweiti and Sö ffer (2007)와 동일하게 고려하였다. Park et al.(2010)은 중량물을 3 자유도를 가지는 강체로 고려하고 와이어 로프의 인장을 고려하였다. 본 논문은 Park et al.(2010)의 연구에 Fig. 1 과 같이 back stay 와 연결된 와이어 로프를 추가하여 현실적인 모델을 구성하였으며, 해상크레인과 중량물 각각의 6 자유도 운동을 고려하였다. 또한 붐은 3 개의 요소(element)로 분할하고 공간상의 세 방향의 변위를 갖는 탄성체로 모델링 하여, 다른 관련 연구들과 달리 공간상의 동적 거동을 본격적으로 해석하였다. 적용한 외력에 대한 비교는 Park et al.(2009)을 참조한다.

Table 1 The features in this paper compared with the related works

	This study	Park (2010)	Ren (2008)	Al* (2007)
DOF of floating crane	6	3	3	1
DOF of cargo	6	3	1	1
Cargo model	Rigid body	Rigid body	Point mass	Point mass
Elements	3	1	x	5

(\* Al-Sweiti and Sö ffer)

### 3. 탄성체 모델링

#### 3.1 플로팅 레퍼런스 프레임 (floating reference frame)

탄성체 상의 한 점  $P$  의 관성 좌표계에서 정의된 위치 벡터는 식 (1)과 같다. 여기서  $\mathbf{R}$  은 Fig.2 와 같이 탄성체에 고정되어 있는 물체 고정 좌표계의 원점에 대한 위치 벡터이며,  $\bar{\mathbf{u}}_0$  와  $\mathbf{A}$  는 변형되기 전의 점  $P$  의 물체 고정 좌표계에서 정의된 위치벡터와 좌표계의 회전변환을 각각 나타낸다. 변형 벡터  $\bar{\mathbf{u}}_f$  는 식 (2)와 같이 표현되고, 이때  $\mathbf{S}$  는 형상 행렬,  $\mathbf{q}_f$  는 절점 좌표이다. 물체 고정 좌표계에서 점  $P$  의 위치 벡터  $\bar{\mathbf{u}}$  는  $\bar{\mathbf{u}}_0$  와  $\bar{\mathbf{u}}_f$  의 합으로 표현된다.

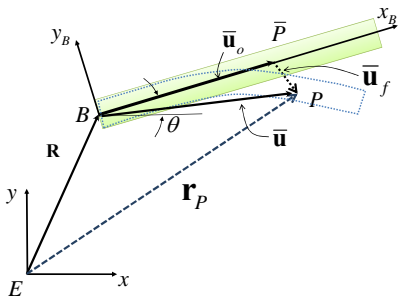


Fig. 2 Position vector of an arbitrary point on a rigid body and a flexible body

$$\mathbf{r}_P = \mathbf{R} + \mathbf{A}(\bar{\mathbf{u}}_0 + \bar{\mathbf{u}}_f) \quad (1)$$

$$\bar{\mathbf{u}}_f = \mathbf{S}\mathbf{q}_f \quad (2)$$

이렇게 탄성체 상의 위치를 물체 고정 좌표계와 변형 벡터로 표현하는 것을 플로팅 레퍼런스 프레임 방법이라고 한다.

#### 3.2 유한 요소 정식화(finite element formulation)

탄성체의 변위를 보다 정확히 계산하기 위해서 유한 요소 정식화 방법에 따라 요소를 분할한다.

관성좌표계에서 정의된 탄성체  $i$  의 요소  $j$  상의 한 점에 대한 위치 벡터는 식 (3)과 같다. 여기서 탄성체에 고정된 좌표계에서 정의된 위치벡터는 식 (4)와 같이 그 요소의 형상 행렬  $\mathbf{N}^{ij}$  과 절점 좌표  $\mathbf{q}_n^i$  로 표현되며, 절점 좌표는 평행 이동에 관련된 절점 좌표  $\mathbf{q}_o^i$  과 변형에 관련된 절점 좌표  $\bar{\mathbf{q}}_f^i$  의 합으로 식 (5)와 같이 정의된다. 변형에 관련된 절점 좌표는 식 (6)과 같이 정의되며  $\mathbf{B}_2^i$  는 고정된 절점을 좌표를 0 으로 변환하는 행렬이다.

$$\mathbf{r}^{ij} = \mathbf{R}^i + \mathbf{A}^i \bar{\mathbf{u}}^{ij} \quad (3)$$

$$\bar{\mathbf{u}}^{ij} = \mathbf{N}^{ij} \mathbf{q}_n^i \quad (4)$$

$$\mathbf{q}_n^i = \mathbf{q}_o^i + \bar{\mathbf{q}}_f^i \quad (5)$$

$$\bar{\mathbf{q}}_f^i = \mathbf{B}_2^i \mathbf{q}_f^i \quad (6)$$

식 (3)의 위치 벡터를 시간에 대해 미분하여 속도 벡터 (7)을 얻는다. 여기서  $\mathbf{q}^i$  는 탄성체의 위치, 자세, 변형을 나타내는 일반화 좌표로 식 (8)과 같고,  $\theta^i$  는 좌표축의 회전 각도이다.  $\mathbf{L}^i$  은 관성좌표와 일반화 좌표로 표현된 속도벡터간 변환 관계를 나타내며 식 (9)과 같고,  $\bar{\mathbf{G}}^i$  는 각속도 벡터와 각 축의 회전 각도의 시간 미분간 변환 관계를 나타내는 행렬이다.  $\tilde{\mathbf{u}}^{ij}$  는  $\bar{\mathbf{u}}^{ij}$  의 교대 행렬 (skew-symmetric matrix)을 나타낸다. 자세한 유도 과정은 Shabana (2005)를 참조한다.

$$\dot{\mathbf{r}}^{ij} = \mathbf{L}^i \dot{\mathbf{q}}^i \quad (7)$$

$$\mathbf{q}^i = [\mathbf{R}^i \ \theta^i \ \mathbf{q}_f^i]^T \quad (8)$$

$$\mathbf{L}^i = [\mathbf{I} \quad -\mathbf{A}^i \tilde{\mathbf{u}}^{ij} \bar{\mathbf{G}}^i \quad \mathbf{A}^i \mathbf{N}^{ij} \mathbf{B}_2^i] \quad (9)$$

#### 3.3 질량 행렬 (mass matrix)

탄성체의 질량 행렬은 식 (10)의 운동 에너지 식과 식 (7)을 이용하여 식 (11)과 같이 유도할 수 있다.  $\rho^{ij}$  는 요소의 밀도이며,  $\mathbf{V}^{ij}$  는 요소의 부피이다. 각 항은 식 (12)와 같다.

$$T^i = \frac{1}{2} \int_{V^{ij}} \rho^{ij} \dot{\mathbf{r}}^{iT} \dot{\mathbf{r}}^i dV^{ij} \quad (10)$$

$$\mathbf{M}^{ij} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{RR}^{ij} & \mathbf{M}_{R\theta}^{ij} & \mathbf{M}_{Rf}^{ij} \\ & \mathbf{M}_{\theta\theta}^{ij} & \mathbf{M}_{\theta f}^{ij} \\ symmetry & & \mathbf{M}_{ff}^{ij} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{RR}^{ij} &= \int_{V^{ij}} \mathbf{I} dV^{ij} \\ \mathbf{M}_{R\theta}^{ij} &= \int_{V^{ij}} \left[ -\mathbf{A}^i \tilde{\mathbf{u}}^{ij} \bar{\mathbf{G}}^i \right] dV^{ij} \\ \mathbf{M}_{Rf}^{ij} &= \int_{V^{ij}} \left[ \mathbf{A}^i \mathbf{N}^{ij} \mathbf{B}_2^i \right] dV^{ij} \\ \mathbf{M}_{\theta\theta}^{ij} &= \int_{V^{ij}} \left[ \bar{\mathbf{G}}^{iT} \tilde{\mathbf{u}}^{ijT} \tilde{\mathbf{u}}^{ij} \bar{\mathbf{G}}^i \right] dV^{ij} \quad (12) \\ \mathbf{M}_{\theta f}^{ij} &= \int_{V^{ij}} \left[ \bar{\mathbf{G}}^{iT} \tilde{\mathbf{u}}^{ijT} \mathbf{N}^{ij} \mathbf{B}_2^i \right] dV^{ij} \\ \mathbf{M}_{ff}^{ij} &= \int_{V^{ij}} \left[ \mathbf{B}_2^{iT} \mathbf{N}^{ijT} \mathbf{N}^{ij} \mathbf{B}_2^i \right] dV^{ij} \end{aligned}$$

탄성체의 전체 질량 행렬은 식 (13)과 같고,  $n_e$  는 요소의 개수를 의미한다.

$$\mathbf{M}^i = \sum_{j=1}^{n_e} \mathbf{M}^{ij} \quad (13)$$

### 3.4 강성 행렬 (stiffness matrix)

탄성체의 강성 행렬은 식 (14)와 같은 탄성력에 의한 가상일(virtual work)과 식 (15), 식 (16)의 응력 벡터 및 변형을 벡터 식으로부터 식 (17)과 같이 유도된다. 여기서  $\mathbf{E}^{ij}$  는 Young's modulus 로 이루어진 행렬이고  $\mathbf{D}^{ij}$  는 미분연산자이며,  $\bar{\mathbf{u}}_f$  는  $\mathbf{N}^{ij} \mathbf{B}_2^i \mathbf{q}_f^i$  이다.

$$\delta W_s^{ij} = \int_{V^{ij}} \sigma^{ij} \delta \varepsilon^{ij} dV^{ij} \quad (14)$$

$$\sigma^{ij} = \mathbf{E}^{ij} \varepsilon^{ij} \quad (15)$$

$$\varepsilon^{ij} = \mathbf{D}^{ij} \bar{\mathbf{u}}_f \quad (16)$$

$$\mathbf{K}_{ff}^{ij} = \int_{V^{ij}} (\mathbf{D}^{ij} \mathbf{N}^{ij} \mathbf{B}_2^i)^T \mathbf{E}^{ij} (\mathbf{D}^{ij} \mathbf{N}^{ij} \mathbf{B}_2^i) dV^{ij} \quad (17)$$

탄성체의 전체 강성 행렬은 식 (18)과 같다.

$$\mathbf{K}_{ff}^i = \sum_{j=1}^{n_e} \mathbf{K}_{ff}^{ij} \quad (18)$$

### 3.5 유연 다물체계 운동 방정식

탄성체를 포함한 다물체계 운동 방정식은 식 (19)와 같다. 여기서  $\mathbf{q}$  는 탄성체와 강체의 일반화 좌표이며,  $\mathbf{M}$  은 탄성체와 강체의 질량행렬이다.  $\mathbf{F}_{constraint}$  는 서로 연결된 물체간의 kinematic constraint,  $\mathbf{C}(\mathbf{q}, t) = \mathbf{0}$ , 에서 유도되는 구속력으로 식 (20)과 같이 정의되며,  $\boldsymbol{\lambda}$  는 Lagrange multiplier 이다. 이 힘은 입력하는 값이 아니고 운동방정식을 풀 때 함께 구해지는 것이다.  $\mathbf{F}_s$  는 탄성력으로 식(21)과 같이 정의되고,  $\mathbf{K}^i$  는 식 (18)을 포함하는 전체 강성 행렬이다.  $\mathbf{Q}_e^i$  는 일반화 좌표로 표현된 외력이며, 식 (22)과 같이 관성 좌표로 표현된 힘  $\mathbf{F}^i$  을 속도 변환 행렬을 이용하여 변환한다.  $\mathbf{Q}_v$  는 회전력과 코리올리 힘(Corioli force)의 성분으로 식 (23)와 같이 정의된다.

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{F}_s + \mathbf{F}_{constraint} + \mathbf{Q}_e + \mathbf{Q}_v \quad (19)$$

$$\mathbf{F}_{constraint}^i = -\mathbf{C}_q^{iT} \boldsymbol{\lambda}^i \quad (20)$$

$$\mathbf{F}_s^i = -\mathbf{K}^i \mathbf{q}^i \quad (21)$$

$$\mathbf{Q}_e^i = \mathbf{L}^{iT} \mathbf{F}^i \quad (22)$$

$$\mathbf{Q}_v^i = -\dot{\mathbf{M}}^i \dot{\mathbf{q}}^i + \left[ \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}^i} \left( \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^{iT} \mathbf{M}^i \dot{\mathbf{q}}^i \right) \right]^T \quad (23)$$

#### 4. 탄성 붐을 고려한 해상크레인과 중량물의 유연 다물체계 운동방정식

본 논문에서는 고려한 해상크레인 및 중량물의 자유도를 Fig.3 에 표현하였다. 또한 탄성 붐도 각 위치에서 3 차원 변위  $u, v, w$  를 갖는 것으로 모델링하였다.

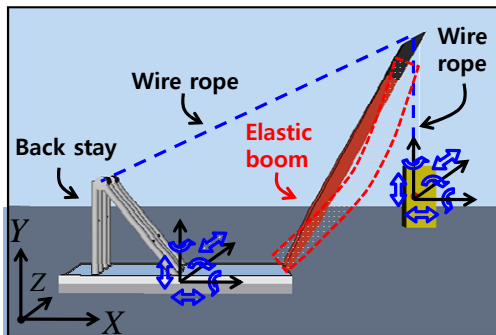


Fig. 3 DOF of the floating crane with the elastic boom and the cargo

각 물체의 좌표계는 Fig. 4 와 같이 정의하였으며, 각 좌표계의 회전에는 Euler angle 을 사용하였다. 3 개의 요소에 대한 절점 좌표는 Fig. 5 와 같다.

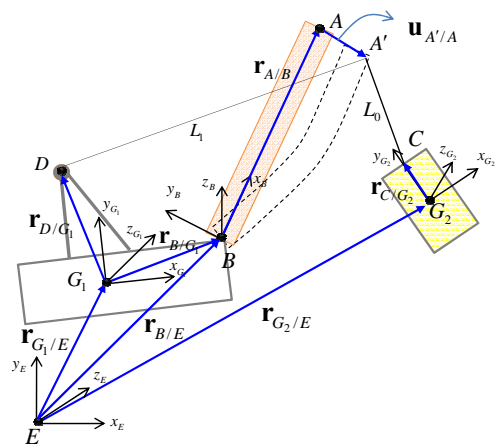


Fig. 4 Coordinate systems of the floating crane, the elastic boom and the cargo

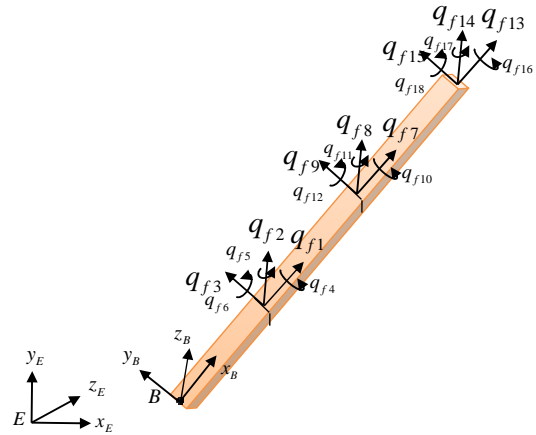


Fig. 5 Nodal coordinates for the deformation vector of the elastic boom with three elements

일반화 좌표는 식 (24)와 같이 정의된다. 여기서  $\mathbf{q}_{G_1}, \mathbf{q}_{G_2}$ , 그리고  $\mathbf{q}_B$  는 해상 크레인, 중량물, 그리고 붐의 일반화 좌표를 각각 의미한다. 일반화 좌표는 식 (25)와 같이 병진 위치와 회전각으로 표현되며,  $\theta_{G_1/E}, \theta_{G_2/E}$ , 그리고  $\theta_{B/E}$  는 Euler 각으로 표현된 각 물체의 회전각이다.  $q_{f1} \cdots q_{f18}$  는 절점 좌표를 의미한다.

$$\mathbf{q} = [\mathbf{q}_{G_1} \quad \mathbf{q}_{G_2} \quad \mathbf{q}_B]^T \quad (24)$$

$$\mathbf{q}_{G_1} = [x_{G_1/E} \quad y_{G_1/E} \quad z_{G_1/E} \quad \theta_{G_1/E}]^T, \quad (25)$$

$$\mathbf{q}_{G_2} = [x_{G_2/E} \quad y_{G_2/E} \quad z_{G_2/E} \quad \theta_{G_2/E}]^T,$$

$$\mathbf{q}_B = [x_{B/E} \quad y_{B/E} \quad z_{B/E} \quad \theta_{B/E} \quad q_{f1} \cdots q_{f18}]^T$$

3.3 절과 같은 과정을 통해 유도된 질량 행렬은 식 (26)와 같다.

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{G_1}^{(6 \times 6)} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{M}_{G_2}^{(6 \times 6)} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{M}_B^{(24 \times 24)} \end{bmatrix} \quad (26)$$

중량물을 인양한 상태에서 해상 크레인이 해양 유체력에 의해 6 자유도 운동을 하기 때문에, 일정

한 각도로 해상 크레인에 고정되어 있는 붐은 와이어 로프에 의한 압축 외에도 굽힘 거동을 나타낼 것으로 예상된다. 따라서 탄성 붐 각 요소의 형상 행렬은 굽힘과, 인장/압축, torsion 에 의한 변위를 나타내는 근사 함수로 구성되며, 자세한 식은 Shabana (2005)를 참조한다. 3.4 절과 같이 유도된 3 차원 빔 요소에 대한 강성 행렬은 Przemieniecki (1968)를 참조한다.

각 물체에 작용하는 힘은 Fig.6 과 같이 고려하였다.

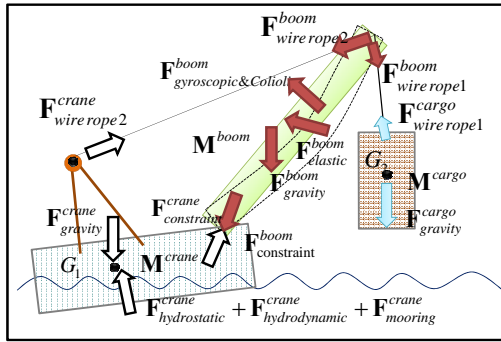


Fig. 6 Applied forces on the floating crane, the elastic boom and the cargo

각 물체의 좌표와 질량 그리고 작용하는 힘을 각각 표시하고 운동방정식으로 구성되는 과정을 나타내면 Fig.7 과 같다. 탄성 붐은 와이어 로프를 통해 해상 크레인과 중량물에 연성되어 있고, 해상 크레인과 탄성 붐에는 구속 조건에 의한 구속력이 작용한다. 또한 구조 감쇠를 고려하기 위해 속도에 비례하는 댐핑 항을 추가하였다.

구성된 운동 방정식을 이용한 수치적 시뮬레이션 과정은 Fig.8 과 같다. 각 물체에 대한 주요 사양을 입력하고, 초기 상태에서 6 자유도 자세를 구한다. 시간을 진행하면서 자세 변화에 따른 외력을 구하고, 구해진 외력에 의해 다음 시간에서의 6 자유도 자세를 구한다. 수치 적분은 4th-order Runge-Kutta 방법을 사용하였으며, 자세한 수치해석의 과정은 Cha et al.(2009)와 Cha et al.(2010)을 참조한다.

Bodies	Crane	Elastic Boom	Cargo	
Mass & Inertia	$M_{crane}$	$M_{boom}$	$M_{cargo}$	$M$
Coordinates	$q_{crane}$	$q_{boom}$	$q_{cargo}$	$q$
Resultant forces	$F_{crane\ hydrostatic}$	$F_{boom\ elastic}$		$-Kq$
	$F_{crane\ hydrodynamic}$	$F_{boom\ gyroscopic\ \&\ Coriolis}$		$Q_v$
coupled	$F_{crane\ mooring}$	$F_{boom\ wire\ rope1}$	$F_{cargo\ wire\ rope1}$	
	$F_{crane\ wire\ rope2}$	$F_{boom\ wire\ rope2}$		$Q_e$
	$F_{crane\ gravity}$	$F_{boom\ gravity}$	$F_{cargo\ gravity}$	
	$F_{crane\ constraint}$	$F_{boom\ constraint}$		$-C_q^T \lambda$
		$F_{boom\ damping}$		$D\dot{q}$
Governing Equation :	$M\ddot{q} = -D\dot{q} - Kq - C_q^T \lambda + Q_e + Q_v$			

Fig. 7 Construction procedure of equation of motion for the floating crane, the elastic boom and the cargo

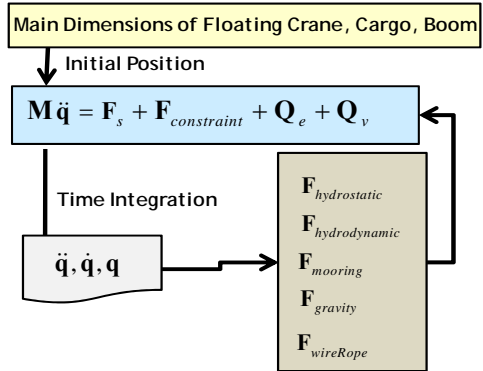


Fig. 8 Procedure of the numerical analysis of equation of motion for the floating crane, the elastic boom and the cargo

해양파에 유체정역학 힘은 매 단위 시간마다 해상 크레인의 자세를 고려한 침수 용적을 적분하여 계산한다. 유체동역학적 힘은 상용 시스템에서 계산한 주파수 영역의 유체동역학 계수를 Cummins equation 을 이용하여 시간 영역으로 계산한다. 이렇게 계산된 유체력은 해상 크레인의 질량 중심에 힘과 모멘트로 작용한다. 자세한 수식은 Cha et al.(2010)를 참조한다.

해상 크레인의 리프팅에 사용되는 와이어 로프의 1 개의 신율(elongation)은 2%, 최대 파괴 하중은

5,000kN 이다. 붐과 중량물 사이의 와이어 로프의 길이가 50m 이고, 실제 64 개의 와이어 로프가 사용되므로 탄성계수는 320,000kN 을 사용한다(Cha et al. 2010). 구속력 그리고 회전력 및 코리올리 힘에 대한 수식은 Park et al.(2010)을 참조한다.

### 5. 동적 거동 분석

동적 거동 분석에 사용된 해상크레인은 Fig.1 과 같은 최대 3,600 ton 의 블록을 리프팅할 수 있는 "대우"호이다. 주요 제원은 길이 110m, 폭 46m, 깊이는 7.5 m 이고, 붐의 길이는 130m, 각도는 60 도로 시뮬레이션 하였다. 중량물의 길이는 15m, 높이는 30m 이고, 질량은 1,000, 1,300, 1,700, 2,000, 2,300, 2,700, 3,000, 3,300 그리고 3,600ton 으로 변경하였다. 해양파는 파고(wave amplitude) 0.5m, 파장(wave length) 156m, 방향은 45 도 선미사파(stern quartering sea)로 고려하였다.

탄성 붐의 진동 거동에 의해 강제 붐을 고려한 경우와 시뮬레이션 결과에서 차이가 발생한다(Park et al. 2009). Fig.9 와 Fig.10 은 붐을 탄성으로 고려한 경우와 강제로 고려한 경우에 대해 중량물의 질량에 따라 중량물의 전후 동요(surge, x 축 병진)와 상하 동요(heave, y 축 병진)의 최대값을 시뮬레이션 한 결과이다. 전후 동요는 붐의 탄성을 고려한 경우가 최대 값이 비교적 크게 발생하는 것으로 나타난다. 상하 동요는 2,700ton 이하에서는 탄성 붐을 고려한 경우가 크지만 그 이상에서는 강제 붐의 경우가 다소 크게 나타난다.

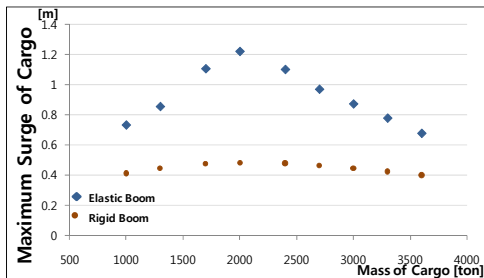


Fig. 9 Comparison of the maximum surge (X-translation) motions of the cargo

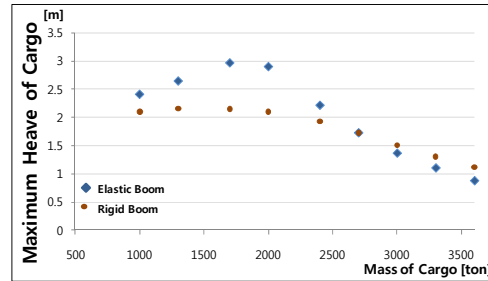


Fig. 10 Comparison of the maximum heave (Y-translation) motions of the cargo

Fig.11 은 붐과 중량물 사이에 연결된 와이어 로프에 작용하는 최대 장력을 나타낸 것이다. 중량물의 질량이 따라 탄성 붐의 동적인 영향 조금 다르게 나타나는데, 이것은 Fig.12 에서 중량물의 하중과 최대 장력의 비율인 동적 가중치(dynamic factor)로 비교하면 그 경향을 볼 수 있다. 2,500ton 이하에서는 탄성 붐이 동적 가중치가 다소 크게 나타나고 그 이상에서는 강제 붐이 조금 더 크게 나타난다.

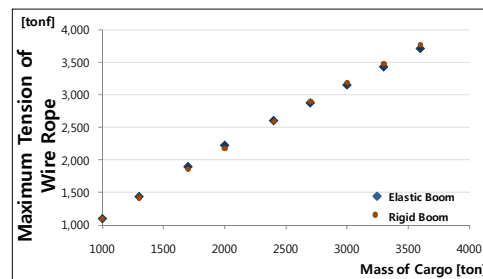


Fig. 11 Comparison of the maximum tension of the wire rope between the boom and the cargo

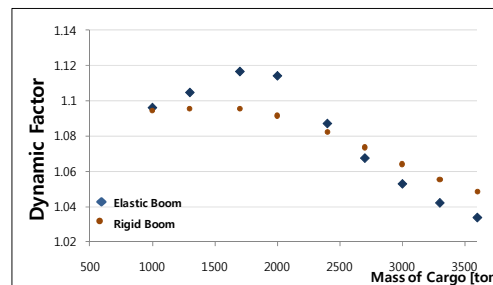


Fig. 12 Comparison of the dynamic factor of the wire rope between the boom and the cargo

동적 가중치에 대한 분석은 와이어 로프에 작용하는 장력에 대한 여유치를 고려하는 데 사용된다. Table 2 와 같이 3,600 ton 의 중량물의 경우에는 탄성 붐은 강체 붐의 해석에 비해 장력 여유치를 54 ton 적게 산정할 수 있다.

Table 2 Comparison of tension margin based on dynamic factor (cargo mass : 3,600 ton)

	Elastic boom	Rigid boom
Dynamic factor	1.035	1.05
Tension margin	126 ton	180 ton

시뮬레이션 결과, 탄성 붐의 경우 강체 붐에 비해 중량물의 동적 거동이 크게 나타나지만, 중량물의 질량이 증가할수록 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 이것은 리프팅 현장에서 무거운 블록을 리프팅 할 때 오히려 흔들림이 적게 나타나는 현상에 부합한다. 또한 붐의 탄성을 고려할 경우, 와이어 로프의 최대 장력이 감소하는 것은 중량물에 의한 에너지가 붐으로 분산되는 효과로 분석된다.

6. 결론

본 논문에서는 붐을 유한 요소 정식화에 따라 3 차원 빔 요소로 모델링 하였고, 유연 다물체계 동역학을 기반으로 해상 크레인과 중량물의 연성된 운동 방정식을 유도하였다. 또한 해양파를 고려하여 중량물의 동적 거동을 해석하고, 와이어 로프의 장력을 계산하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 붐의 탄성을 고려할 경우에 동적 가중치에 대한 현실적인 분석이 가능한 것을 확인하였다. 동적 가중치의 경우 조선 생산성과도 연관이 있으므로, 공법의 안정성 분석에 탄성 붐을 고려하여 그 결과를 평가하는 것이 필요하다.

후 기

본 연구는  
a) 대우조선해양(주)

b) 국방과학연구소 수중운동체기술특화센터 SM-11 과제 “ 수중 운동체의 체계/부체계 기능 및 성능 시뮬레이션을 위한 네트워크 기반의 가상(Virtual) 복합 시스템 모델 구조(Architecture) 연구”

c) 서울대학교 해양시스템공학 연구소

d) 서울대학교 BK 21 해양기술인력양성사업단

f) 한국학술진흥재단(KRF-2008-314-D00494)

의 지원을 받아 연구되었음을 밝히며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

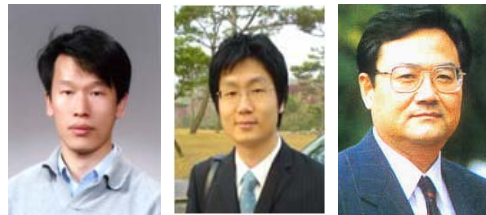
- Al-Sweiti, Y. and Sö ffer, D., 2007, "Cargo Pendulation Suppression of Ship Cranes with Elastic Booms," Mathematical and Computer Modeling of Dynamical Systems, Vol. 13, No. 6, pp. 503-529.
- Cha, J. H., Ham, S. H., Kwon, J. H., Roh, M. I., Lee, K. Y., and Park, K. P., 2008, "Simulation of Dynamic Response of a Heavy Cargo Suspended by Parallel Connected Floating Cranes," Proceeding of the Society of Naval Architecture of Korea Fall Conference , pp.921-930.
- Cha, J. H., Park, K. P., and Lee, K. Y., 2010, "Numerical Analysis for Nonlinear Static and Dynamic Response of a Floating Crane with Elastic Boom," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 34, No. 4, pp. 501-509.
- Cha, J. H., and Roh, M. I., 2010, "Combined Discrete Event and Discrete Time Simulation Framework and Its Application to the Block Erection Process in Shipbuilding," Advances In Engineering Software, Vol. 41, No. 4, pp. 656-665.
- Cha, J. H., Roh, M. I., Cho, D. Y., and Lee, K. Y., 2009, "Block Erection Simulation Using the Integrated System of Combined Discrete Event and Discrete Time Simulation Kernel," Journal



of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 46, No. 3, pp. 303–312.

- Cha, J. H., Roh, M. I., and Lee, K. Y., 2010, "Integrated Simulation Framework for the Process Planning of Ships and Offshore Structures," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing Journal*, Vol. 26, No. 5, pp. 430–453.
- Ku, N. K., Cha, J. H., Kwon, J. H., and Lee, K. Y., 2009, "Suppression of Load Pendulation using Tagline Control System for Floating Crane," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 46, No. 5, pp. 527–535.
- Park, K.P., Cha, J.H., and Lee, K.Y., 2009, "Analysis of an Elastic Boom Effect on the Dynamic Response of a Cargo," *Proceeding of the Society of Naval Architecture of Korea Fall Conference*, pp. 1131–1140.
- Park, K.P., Cha, J.H., and Lee, K.Y., 2010 "Analysis of Dynamic Response of a Floating Crane and a Cargo with Elastic Booms Based on Flexible Multibody System Dynamics," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 47, No. 1, pp. 47–57.

- Przemieniecki, J.S., 1968, *Theory of Matrix Structural Analysis*, McGraw-Hill Book Company, New York.
- Ren, H., Wang, X., Hu, Y., and Li, C., 2008, "Dynamic Response Analysis of a Moored Crane-Ship with a Flexible Boom," *Journal of Zhejiang University Science A*, Vol. 9, No. 1, pp. 29–31.
- Shabana, A.A., 2005, *Dynamics of multibody systems*, Third edition, Cambridge University Press, Cambridge.



< 박 광 필 > < 차 주 환 > < 이 규 열 >