

## 다물체계 동역학을 기반으로 한 와이어로프와 조선용 블록 외판 사이의 간섭 시뮬레이션

조아라<sup>1</sup> · 구남국<sup>2†</sup> · 차주환<sup>3</sup> · 박광필<sup>4</sup> · 이규열<sup>5</sup>

<sup>1</sup>대우조선해양 중앙연구소, <sup>2</sup>서울대학교 해양기술인력양성사업단, <sup>3</sup>목포대학교 해양시스템공학과,  
<sup>4</sup>대우조선해양 중앙연구소, <sup>5</sup>서울대학교 조선해양공학과

### Simulation of Contacts Between Wire Rope and Shell Plate of a Block for Shipbuilding Industry based on Multibody Dynamics

A Ra Jo<sup>1</sup>, Nam Kug Ku<sup>2†</sup>, Ju Hwan Cha<sup>3</sup>, Kwang Phil Park<sup>4</sup>, and Kyu Yeul Lee<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Central Research Institute of Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd.

<sup>2</sup>Marine Technology Education and Research Center, Seoul Nat'l University

<sup>3</sup>Department of Ocean Engineering, Mokpo Nat'l University

<sup>4</sup>Central Research Institute of Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd.

<sup>5</sup>Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul Nat'l University

Received 12 October 2011; received in revised form 9 July 2012; accepted 31 July 2012

#### ABSTRACT

In this paper, a method for calculating the contact force and the frictional force caused by contacts between the wire rope and the rigid body is introduced based on multibody dynamics. And the method is applied to a simulation of contacts between the wire rope and the shell plate of a block that can occur during shipbuilding. The wire rope is composed of a number of lumped masses and the wire rope segments that connect the masses. After calculating the position of interference, we inserted a contact node into the wire rope. We then derived the equations of motion of the wire rope and the rigid body using augmented formulation based on multibody dynamics taking into account the constraints between the contact node and the rigid body. Using the equations, we were able to obtain the constraint force between the contact node and the rigid body, and calculate the contact force and the frictional force, based on which the position of the contact node was corrected. Finally, we applied our results to perform simulation of contacts between the wire rope and the shell plate of a block in order to verify the efficacy of the method proposed in this paper.

**Key words:** Augmented formulation, Contact force, Multibody dynamics, Wire rope

## 1. 서 론

조선소에서 사용하는 탑재 크레인들은 수백에

서 수천 ton에 이르는 블록을 들기 위해 와이어 로프를 연결하여 사용한다. 따라서 와이어 로프에 작용하는 동적인 하중을 미리 계산하고 확인하는 시뮬레이션이 요구된다. 특히 블록 탑재과정 중에서 블록 턴오버(Turn/Over) 공정은 와이어 로프와 블록간에 접촉이 자주 발생하게 된다. 이 접촉으로

<sup>†</sup>Corresponding Author, knk80@snu.ac.kr  
©2012 Society of CAD/CAM Engineers

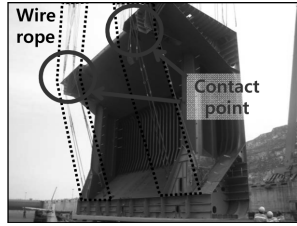


Fig. 1 Contacts between the wire rope and shell plate of a block for shipbuilding industry

인해 블록 외판에는 접촉력(contact force)과 와이어 로프가 쓸리면서 발생하는 마찰력(frictional force)이 작용하게 된다. 또한 와이어 로프가 휘어지면서 로프에 걸리는 장력(tension)이 변하게 된다.

따라서 안전한 작업을 위해 와이어 로프와 블록 간의 접촉현상을 고려하여 와이어 로프에 걸리는 장력 및 블록 외판에 작용하는 하중을 미리 계산하고 확인해 보아야 한다.

본 논문에서는 다물체계 동역학을 기반으로 와이어로프와 강체간의 간섭 시 발생하는 접촉력과 마찰력을 계산하고, 이를 선박 및 해양구조물의 블록 탑재시 발생할 수 있는 와이어 로프와 조선용 블록 외판 사이의 간섭 시뮬레이션에 적용하기 위한 방법론을 제시하였다.

## 2. 관련 연구 현황

### 2.1 조선용 탑재 크레인에 설치되는 wire rope의 관련 연구 현황

Cha 등<sup>[1]</sup>은 George A. Costello<sup>[2]</sup>의 식을 참고하여 조선용 탑재 크레인에 설치되는 와이어 로프에 작용하는 장력과 비틀림 모멘트에 대한 계산식을 유도 하였으며, 이를 조선용 탑재 크레인의 동역학 시뮬레이션에 적용하였다. 그러나 와이어 로프와 블록간의 접촉 현상은 고려하지 않았다.

### 2.2 Wire rope의 접촉력 및 쓸림힘에 대한 관련 연구 현황

Choi<sup>[3]</sup>는 강체간의 접촉력 뿐만 아니라 탄성체에도 적용 가능한 접촉력 계산 알고리즘을 개발하고 이를 범용 Multi-flexible-body dynamics(MFBD) 프로그램에 적용하였다. 접촉력 모델(contact force model)로는 Hertz<sup>[4]</sup>가 처음 제안한 Compliance contact force model을 사용하였다.

Pai 등<sup>[5]</sup>은 Cosserat Theory를 도입하여 와이어

로프를 연속체로 모델링 하였다. Lugris 등<sup>[6]</sup>은 Shabana<sup>[7]</sup>의 Absolute nodal coordinate formulation (ANCF) 방법을 이용하여 와이어 로프를 수치적으로 모델링하고, 이를 해석적 방법(analytical method)을 이용한 결과와 비교하였다.

와이어 로프를 연속체로 모델링 하는 방법은 와이어 로프의 다양한 형상을 모델링 하기에 적합하며, ANCF방법 등을 이용하여 와이어를 탄성체로 가정하면 물리적으로 실제에 가까운 표현이 가능하다. 그러나 시스템의 복잡성을 증가시키고, 계산 효율이 감소하며 수치적으로 불안정하다는 단점이 있다. 특히 와이어 로프는 자중에 비해 몇 백 배 무거운 하중을 지지하는 물체이므로 이러한 구조를 시뮬레이션 하면 높은 주파수의 진동으로 인해 수치적으로 불안정하다. 이 하중-자중의 비율이 증가할수록 안정적인 시뮬레이션을 위해 요구되는 Time step은 감소한다(Servin 등<sup>[8]</sup>).

이러한 한계점을 보완하기 위해 Servin 등<sup>[8]</sup>은 와이어 로프를 다수의 집중 질량(lumped mass)과 이를 연결하는 질량이 없는 빔(Beam)으로 모델링 하였다. 와이어 로프와 강체간의 간섭 시에는 질량이 없는 접촉 절점을 삽입하고 이 절점이 강체와 고정되어 있다고 가정하여 augmented formulation을 사용해 다물체계 운동방정식을 구성하였다. 빔으로 모델링 한 와이어 로프 조각에 작용하는 구속력으로 와이어 로프의 장력을 계산하며, 접촉 절점에서의 구속력으로 강체에 작용하는 접촉력 및 마찰력을 계산한다. 정지마찰력은 접촉 절점에 대한 구속조건을 추가하는 것으로 고려하고, 운동마찰력은 접촉 절점의 위치 변화를 가상 마찰계수(pseudo frictional coefficient)를 이용해 보정함으로써 반영하였다.

그러나 와이어 로프를 빔으로 모델링 하면, 조선용 탑재 크레인과 같이 다수의 와이어 로프가 사용되는 경우에 각 와이어 로프들의 장력이 서로 균형을 이루도록 조절하기에 어렵다는 단점이 있다. 또한 집중 질량, 와이어 로프 조각, 강체, 그리고 접촉 절점의 관계를 모두 구속조건으로써 고려하였기 때문에 augmented formulation에서 매트릭스(matrix)의 크기가 커지는 단점이 있다.

이러한 한계점을 보완하기 위해 본 논문에서는 와이어 로프를 다수의 집중 질량을 이용해 모델링 하되, 와이어 로프 조각은 Cha 등<sup>[1]</sup>이 제안한 방법을 사용하여 탄성체로 고려한다. 와이어 로프와 강

체간 접촉 지점에는 질량이 있는 접촉 절점을 삽입한다. 이와 같은 방법을 사용하면 강체와 접촉 절점간의 구속조건만 고려하면 되므로 구속조건이 개수가 감소한다. 와이어 로프와 강체간의 마찰력은 Servin 등<sup>[8]</sup>의 방법을 사용하되, 마찰력 및 구속력의 크기와 와이어 로프의 장력 분배를 고려하도록 수정하였다.

### 3. 간섭을 고려한 와이어 로프와 강체 모델링

#### 3.1 와이어 로프와 강체의 구성

와이어 로프는 다수의 집중 질량(lumped mass)과 탄성체인 와이어 로프 조각(wire rope segment)로 구성한다.

물체의 접촉면은 스플라인(spline)으로 모델링하는 것이 삼각형 등의 메쉬(mesh)로 표현하는 방법보다 더 정확하고 편리하지만, 물체의 형상이 복잡한 경우에는 마찰력 계산 방법을 적용하기에 더 복잡하다(Choi<sup>[3]</sup>). 따라서 본 논문에서는 강체를 다각형(polygon)의 집합으로 고려한다.

#### 3.2 와이어 로프와 강체간의 간섭 위치에 접촉 절점 삽입

강체를 다각형의 집합으로 고려하고 와이어 로프를 직선으로 고려할 때, 와이어 로프와 강체간의 간섭은 다각형과 직선간의 교차계산 문제로 정의할 수 있다.

간단한 예로, Fig. 2와 같이 직육면체 형태의 질량  $m_B$ 인 강체  $B$ 와 집중 질량  $P_1, P_2$ 점을 연결한 와이어 로프가 있다. 이 때, 직육면체를 이루는 6개의 사각형 들과 와이어 로프를 구성하는 와이어 로프 조각들간의 교차점을 매 시간마다 계산할 수 있다. 교차계산 문제는 Cho<sup>[9]</sup>를 참고한다.

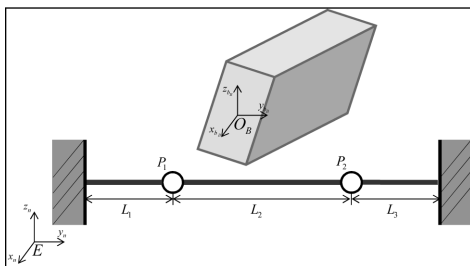


Fig. 2 Rigid body, two lumped masses and wire rope

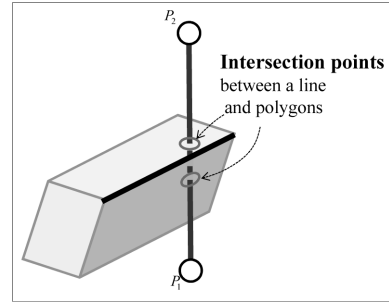


Fig. 3 Calculation of the intersection points between line and polygons

본 논문에서 사용하는 마찰력 계산 방법에서, 와이어 로프는 강체의 모서리 부분에서 꺾인다고 가정한다. 예를 들어, 특정 시간에서 Fig. 3과 같이 2개의 교차점이 계산되면 그 두 개의 교차점과 가장 인접한 모서리를 와이어 로프가 꺾이는 곳으로 고려한다.

해당 모서리에 접촉 절점(contact node)  $Q_1$ 을 삽입하고  $P_1, P_2$ 점을 연결한 와이어 로프 조각을 2개의 조각으로 나누어 접촉 절점과 연결한다. 접촉 절점  $Q_1$ 의 질량은 이 절점에 인접한  $P_1, P_2$ 점의 질량을 다음 조건에 따라 분배시킨다. 질량 분배 방법은 Servin 등<sup>[8]</sup>을 참고한다.

$$m_{Q_1} = \frac{1}{2} \text{Minimum}(m_{P_1}, m_{P_2})$$

$$m_{P_1}' = m_{P_1} - \frac{l_1}{l_1 + l_2} m_{Q_1}$$

$$m_{P_2}' = m_{P_2} - \frac{l_2}{l_1 + l_2} m_{Q_1}$$
(1)

여기서 접촉 절점  $Q_1$ 의 질량  $m_{Q_1}$ 는 인접 집중질량  $P_1, P_2$  중 그 크기가 작은 값의 절반으로 정한다.

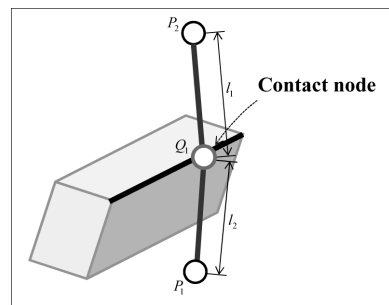


Fig. 4 Contact node inserted on the edge of the rigid body

다.  $m_{P_1}, m_{P_2}$  는 접촉 절점이 삽입되기 전의 집중 질량  $P_1, P_2$ 의 크기,  $m_{P_1}', m_{P_2}'$  는 접촉 절점이 삽입된 후의 집중 질량  $P_1, P_2$ 의 크기,  $l_1, l_2$ 는 접촉 절점  $Q$ 와 집중질량  $P_1, P_2$ 간의 거리를 나타낸다. 접촉 절점이 삽입된 결과는 Fig. 4와 같다.

#### 4. 와이어 로프와 강체의 운동방정식 구성

##### 4.1 와이어 로프와 강체의 운동방정식 구성 단계

와이어 로프와 강체의 운동방정식을 구성할 때, 와이어 로프와 강체간의 간섭을 고려하기 위해 다음의 단계로 운동방정식을 구성한다.

- ① 와이어 로프와 강체가 접하지 않는 경우, 와이어 로프와 강체가 서로 연성되어 있지 않은 운동방정식을 구성한다.
- ② 와이어 로프와 강체가 접하는 경우, 해당 부분에 간섭 절점(contact node)를 추가한다. 이 간섭 절점과 강체간에 구속조건(joint)을 추가하고 이를 고려하여 다물체계 동역학(multibody dynamics)를 기반으로 augmented formulation을 이용하여 와이어 로프와 강체가 구속력으로 연성되어 있는 운동방정식을 구성한다.
- ③ 운동방정식을 통해 계산한 와이어 로프와 접촉 절점간의 구속력을 이용해 강체에 작용하는 수직항력과 마찰력을 계산한다. 이를 통해 접촉 절점의 위치와 절점에 의해 나뉜 와이어 로프 조각의 장력 분배를 보정한다.
- ④ 수정한 접촉 절점의 위치와 와이어 로프 조각의 장력 분배를 운동방정식의 초기 조건으로 입력한 후, 다음 시간에서의 운동방정식의 해를 구한다.

##### 4.2 와이어 로프와 강체가 접하지 않은 경우, 와이어로프와 강체의 운동방정식 구성

와이어 로프와 강체가 접하지 않은 경우, 와이어 로프의 집중 질량들과 강체의 운동은 서로 연성되어 있지 않다. 이 때, 와이어 로프와 강체의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{r}} = \mathbf{F}^e \quad (2)$$

여기서  $\mathbf{M}$ 은 전체 시스템의 질량 및 관성 모멘트 행렬이고  $\ddot{\mathbf{r}}$ 은 각 물체의 위치와 자세를 나타내는

좌표다.  $\mathbf{F}^e$ 는 시스템에 작용하는 외력이다.

Fig. 2의 경우, 외력은 중력 및 와이어 로프에 의한 장력이 고려되며 질량 및 가속도 항은 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{P_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{P_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_B & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{I}_B \end{bmatrix}, \quad \ddot{\mathbf{r}} = \begin{bmatrix} {}^n\mathbf{r}_{P_1/E} \\ {}^n\mathbf{r}_{P_2/E} \\ {}^n\mathbf{r}_{B/E} \\ {}^n\boldsymbol{\theta}_{b_B/n} \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기에서  $\mathbf{M}$ 은 강체 B의 관성 모멘트 행렬이며  $\ddot{\mathbf{r}}$ 은 관성 좌표계(n-frame)에서 정의된 점  $P_1, P_2$ 의 위치, 점 B의 위치 및 자세를 나타낸다. 회전각은 오일러 각(Euler angle)을 사용한다.

##### 4.3 접촉 절점과 강체간의 구속조건을 고려한 다물체계 기반의 운동방정식 구성

와이어 로프와 강체가 접하는 경우, 와이어 로프에 접촉 절점이 추가되며, 인접한 두 개 점의 질량 중 일부를 이 절점에 분배하게 된다. 이 때, 추가한 접촉 절점을 통해 구하고자 하는 것은 강체에 작용하는 접촉력이다.

다물체계는 두 개 이상의 물체들이 서로 운동학적(kinematic) 구속 관계로 연결된 계를 말한다. 구속 관계로 연결된 물체들은 연결 지점에서 작용 반작용의 법칙에 의해 구속력을 주고 받는다. 따라서 이 경우 절점과 강체 사이에 고정 연결(fixed joint)을 하고, 이를 다물체계 동역학을 기반으로 운동방정식을 구성하면 연결 지점에서의 구속력을 구할 수 있다.

Augmented formulation을 사용하여 구성한 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}' & \mathbf{C}_r^T \\ \mathbf{C}_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{r}}' \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}^{e'} \\ \mathbf{F}^d \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기에서  $\mathbf{M}'$ 은 접촉 절점에 해당하는 항을 추가 및 인접 절점들의 질량항을 수정한 전체 시스템의 질량 및 관성 모멘트 행렬이다.  $\ddot{\mathbf{r}}'$  및  $\mathbf{F}^{e'}$  항 또한 접촉 절점을 고려하여 수정한 항이다.  $\mathbf{C}_r^T$ 은 운동학적 구속조건(kinematic constraints)를 절대 좌표로 편미분 한 것이다.  $\lambda$ 는 Lagrange multiplier이다.  $\mathbf{F}^{e'}$ 는  $-(\mathbf{C}_r \dot{\mathbf{r}})'_r \dot{\mathbf{r}}$ 이다.

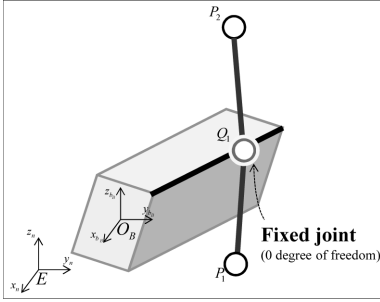


Fig. 5 Fixed joint that connects the rigid body to the contact node

Fig. 5의 구속조건인 접촉 절점  $Q_1$ 과 강체  $B$ 의 고정 연결을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$C_1 = ({}^n\mathbf{r}_{O_B/E} + {}^n\mathbf{R}_b \cdot {}^b\mathbf{r}_{Q_1/O_B}) - {}^n\mathbf{r}_{Q_1/E} = 0 \quad (5)$$

이 때  $O_B$ 는 강체  $B$ 에 고정된 좌표계의 원점이며,  ${}^n\mathbf{R}_b$ 는 관성 좌표계와 강체  $B$  고정 좌표계 사이의 회전 변환 행렬이다.  ${}^b\mathbf{r}_{Q_1/O_B}$ 는 강체  $B$  고정 좌표계에서 정의된 점  $Q_1$ 의 위치 벡터이다.

#### 4.4 강체와 와이어 로프간에 작용하는 마찰력 계산을 통한 접촉 절점의 위치 및 와이어 로프의 장력 분배 보정

운동방정식 (4)의 해를 수치적으로 계산하면 다음 시간에서의 각 물체의 위치, 속도, 가속도 및 구속력을 구할 수 있다.

Fig. 6의 해는 강체와 와이어 로프간에 작용하는 마찰력을 고려하지 않은 결과이다. 예를 들어, Fig. 6의 상태에서 강체와 와이어 로프간에 마찰력이 작용하지 않는다면 접촉 절점  $Q_1$ 은 모서리 위에서

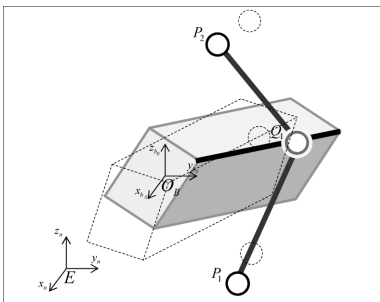


Fig. 6 Positions and orientations of the rigid body and the contact nodes obtained by the equation of motion

강체 및 와이어  $l_1, l_2$ 로부터 받는 힘이 평형을 이루는 곳으로 이동할 것이다.

강체와 와이어 로프간에 작용하는 마찰력은 와이어 로프의 운동에 영향을 준다. 와이어 로프에 작용하는 마찰력은 물체의 모서리 방향으로 작용한다고 가정하였다. 모서리 방향으로 작용하는 힘이 다음 조건을 만족하면 강체에는 정지 마찰력이 작용하며, 이 한계를 넘으면 운동 마찰력이 작용한다.

$$|\mathbf{F}_i| \leq \mu |\mathbf{N}| \quad (6)$$

식 (6)는 쿨롱의 마찰법칙(Coulomb's law of friction)을 나타낸 식이다. 해당 방향에 작용하는 힘이 위의 조건을 만족하여 강체에 정지 마찰력이 작용하면, 접촉 절점은 강체와 함께 움직인다. 이 한계를 넘어 강체에 운동마찰력이 작용하게 되면, 접촉 절점은 강체와 상대운동을 한다.

이를 준 정적(quasi-static)으로 고려하기 위해 Servin 등<sup>[5]</sup>은 다음의 방법을 제시했다.

$${}^b\mathbf{r}_{P_k/O_B}' = {}^b\mathbf{r}_{P_k/O_B} + (1-\mu)\Delta {}^b\mathbf{r}_{P_k/O_B} \quad (7)$$

이 때  $\mu$ 는 가상 마찰 계수(pseudo friction coefficient)이다. 정지 마찰력이 작용할 경우  $\mu$ 는 1이며 운동 마찰력이 작용할 경우  $\mu$ 는 0과 1 사이의 값이다.

- ① 본 논문에서는 이 방법을 사용하되, 다음의 조건을 추가하여 고려하였다. 가상 마찰 계수( $\mu$ ) 값은 다음과 같이 계산한다.

$$|\mathbf{F}_i| \leq \mu |\mathbf{N}| \rightarrow \mu = 1$$

$$|\mathbf{F}_i| \geq \mu |\mathbf{N}| \rightarrow \mu = \frac{\mu |\mathbf{N}|}{|\mathbf{F}_i|} \quad (8)$$

- ② 접촉 절점의 이동량  $\Delta {}^b\mathbf{r}_{P_k/O_B}$ 은 강체의 모서리 방향, 와이어 로프의 길이방향으로 나누어 고려한다.
- ③ 접촉 절점은 강체 모서리 위에서 접촉 절점과 연결된 두 와이어 로프 조각 길이의 총 합이 최소화 되는 곳으로 이동한다.

$${}^b\mathbf{r}_{Q_1/B}^* = \text{Minimize}(l_1^2 + l_2^2) \quad (9)$$

여기에서 이동 후의 두 와이어 로프 조각 길이를  $l_1', l_2'$ 라고 한다.

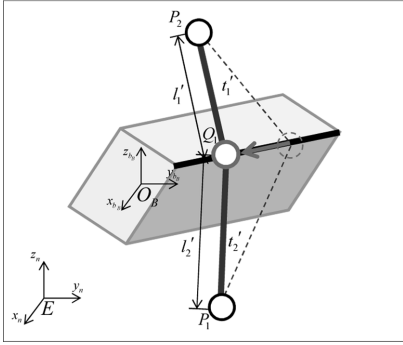


Fig. 7 Movement of the contact node along the edge of the rigid body

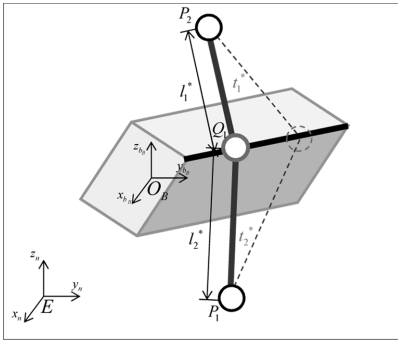


Fig. 8 Movement of the contact node along the wire rope

접촉 절점은 접촉 절점과 연결된 두 와이어 로프 조각에 작용하는 장력의 크기가 같아지는 방향으로 이동한다. 이 때, 강체에 상대적인 접촉 절점의 위치는 변하지 않는다.

$$t'_1 \neq t'_2 \rightarrow t_1^* = t_2^* \tag{10}$$

여기에서  $t'_1, t'_2$ 는  $l'_1, l'_2$ 에 작용하는 장력의 크기이며,  $t_1^*, t_2^*$ 를 이동 후의 장력의 크기라고 한다. 이 때, 두 와이어 로프 조각의 길이는 변하지 않지만 장력의 크기가 변하였으므로 이를  $t_1^*, t_2^*$ 로 나타낸다.

### 5. 조선용 탑재 공정의 동역학 시뮬레이션 적용

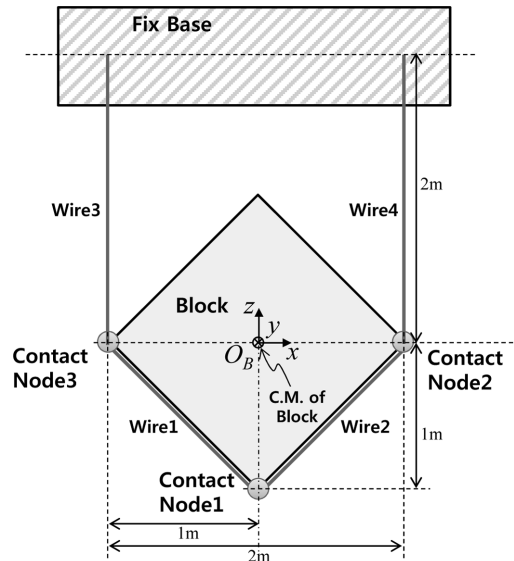
본 논문에서 제안한 방법론을 검증 및 조선용 탑재 공정에 적용하기 위해 두 가지 예제에 대해 시뮬레이션을 수행하였다.

#### 5.1 강체와 와이어 로프 사이에 작용하는 접촉력 검증용 예제

선박 블록이 와이어 로프에 의해 매달려 있는 예제에 본 논문에서 제안한 방법론을 적용하였으며, 그 제원은 다음과 같다.

- Total weight of the block: 100 kg
- C.O.G(center of gravity): 0 m, 0 m, 0 m

Fig. 9에서 와이어 로프가 블록의 무게를 지지하기 위해서는, 세 개의 접촉 지점(contact node)에서 작용하는 접촉력의 z축 방향 성분이 블록의 무게와 같아야 한다.



\*C.M.: center of mass

Fig. 9 Example of the contacts between the rigid body and the wire ropes

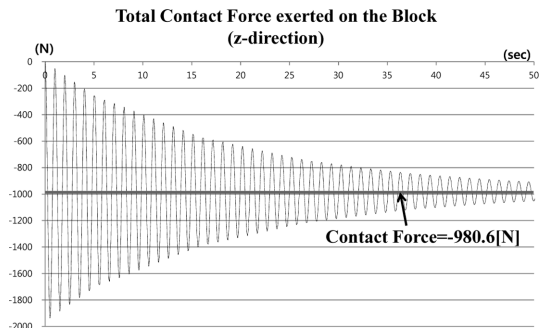


Fig. 10 Total contact force exerted on the block(z-direction)

세 접촉 지점에서 접촉력의 수렴값을 확인하기 위해 임의로 감쇄력을 입력하였다. 접촉력의 계산 결과는 Fig. 10과 같이 980.6[N]으로, 블록의 무게와 같은 것을 확인할 수 있었다.

**5.2 선박 블록 외판과 와이어 로프 사이에 작용하는 접촉력 계산 예제**

본 논문에서 제안한 방법론을 적용해 블록 외판과 와이어로프 사이에 발생하는 접촉력과 마찰력을 시뮬레이션 하기 위해서, 실제 선박 블록을 단순화 한 블록 모델을 사용하였으며 그 제원은 다음과 같다.

- Total weight of the block: 828.5ton
- Length: 36m, Breadth: 13m, Depth: 25m
- C.O.G(center of gravity): 18m, 10m, 3.5m

작업 내용은 다음과 같다. 위 시뮬레이션 대상 선박블록에 4개의 wire rope를 연결한다. 블록이 lifting 후 turn-over가 되었을 때, 블록의 모서리가 Fig. 12와 같이 2개의 wire rope와 접촉한다.

이 때, 접촉한 wire rope와 연결된 트롤리(trolley,

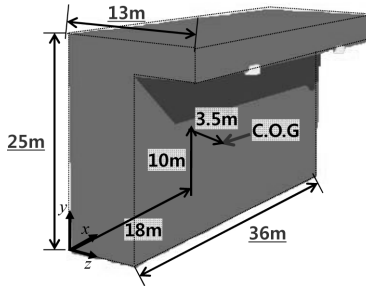


Fig. 11 Example of a block for shipbuilding industry

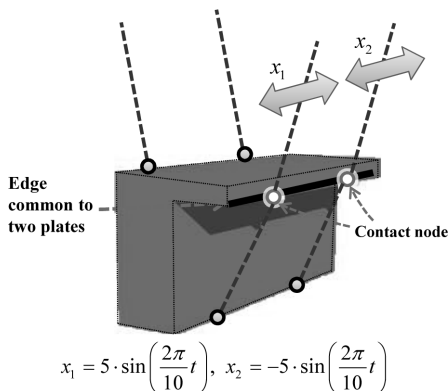


Fig. 12 Contacts between the block and the wire ropes

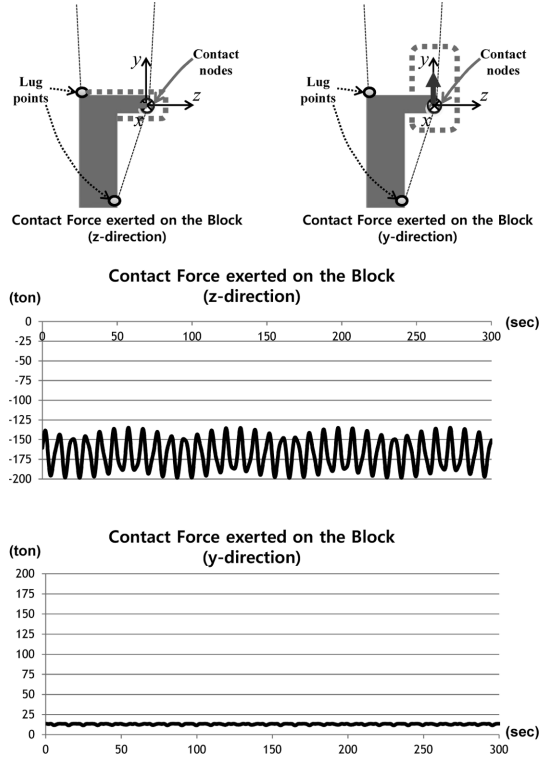


Fig. 13 Contact force exerted on the block

골리앗 크레인과 와이어 로프가 연결되는 지점)가 블록의 모서리 방향으로 움직인다고 가정하고 접촉 지점(contact node)에 작용하는 접촉력을 계산한 결과는 Fig. 13과 같다.

Fig. 13에서 접촉력의 진동은 트롤리(trolley)의 움직임으로 인해 발생하였다. 이 결과를 통해 블록 외판과 와이어로프 사이에 발생하는 접촉력과 마찰력을 확인할 수 있었다.

**6. 결론 및 향후 연구 계획**

본 논문에서는 조선용 탑재 크레인에 설치되는 와이어 로프와 블록 간의 간섭 현상을 고려하기 위해 다물체계 동역학을 기반으로 와이어 로프와 강체간의 간섭 시 발생하는 접촉력과 마찰력을 계산하고, 이를 블록 탑재 시뮬레이션에 적용하기 위한 방법론을 제시하였으며, 선박 블록 모델을 이용해 블록 외판과 와이어로프 사이에 발생하는 접촉력과 마찰력을 시뮬레이션 하여 그 효율성을 검증하였다.

향후에는 시뮬레이션 결과를 실제 현장데이터

와 비교 검증 및 wire rope의 변형을 고려하는 연구를 수행하고자 한다.

## 감사의 글

본 연구는 (a) 지식경제부 산업원천기술개발사업(10035331, 시뮬레이션 기반의 선박 및 해양플랜트 생산기술 개발), (b) 국방과학연구소 수중운동체기술특화센터 SM-11과제 “수중 운동체의 체계/부체계 기능 및 성능 시뮬레이션을 위한 네트워크 기반의 가상(Virtual) 복합 시스템 모델 구조(Architecture) 연구”, (c) 서울대학교 BK21 해양기술인력양성사업단, (d) 서울대학교 해양시스템공학연구소, (e) 서울대학교 공학연구소의 지원으로 이루어진 연구 결과의 일부임을 밝히며, 이에 감사 드립니다.

## 참고문헌

1. Cha, J.H., Ham, S.H., Roh, M.I., Lee, K.Y., Park, K.P., and Suh, H.W., 2008, Dynamic Simulation of a Shipbuilding Erection Crane based on Wire Rope Dynamics, *Proceedings of the Society of CAD/CAM Engineers Conference*, pp. 122-128.
2. Geroge A. Castello, 1997, *Theory of Wire Rope*, 2<sup>nd</sup> Edition, Springer.
3. Choi, J.H., 2009, *Study on the Analysis of Rigid and Flexible Body Dynamics with Contact*, Ph.D. Thesis, Seoul National University.
4. Hertz, H., 1882, On the Contact of Elastic Solids, *Journal fur die reine und angewandte Mathematik*, 92, pp. 156-171.
5. Pai, D.K., 2002, STRANDS: Interactive Simulation of Thin Solids Using Cosserat Models, *Computer Graphics Forum*, 21(3), pp. 347-352.
6. Ligris, U., Escalona, J.L., Dopico, D. and Cuadrado, J., 2010, Efficient and Accurate Simulation of the Cable-Pulley Interaction in Weight-Lifting Machine, *Proceedings of the 1st Joint International Conference on Multibody System Dynamics*, Lappeenranta, Finland.
7. Shabana, A.A., 1998, *Dynamics of Multibody Systems*, Cambridge University Press, New York, NY, USA.
8. Servin, M., Lacoursière, C., Nordfelth, F. and Bodin, K., 2011, Hybrid, Multiresolution Wires with Massless Frictional Contacts, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 17(7), pp. 970-982.
9. Cho, D.Y., 1999, *Improved Marching Method for Surface/Surface Intersection and Its Implementation*, M.Sc. Thesis, Seoul National University.





### 조 아 라

2010년 서울대학교 조선해양공학과 학사  
 2012년 서울대학교 조선해양공학과 석사  
 2012년~현재 대우조선해양 중앙연구소 정보기술팀 IT융합연구그룹 사원  
 관심분야: 모델링 및 시뮬레이션, 다물체계 동역학, 유공압



### 구 남 국

2004년 서울대학교 조선해양공학과 학사  
 2012년 서울대학교 조선해양공학과 박사  
 2012년~현재 서울대학교 해양기술인력양성사업단 연구원  
 관심분야: 모델링 및 시뮬레이션, 자동화 로봇



### 차 주 환

2002년 서울대학교 조선해양공학과 학사  
 2004년 서울대학교 조선해양공학과 석사  
 2008년 서울대학교 조선해양공학과 박사  
 2008년~2011년 서울대학교 공학연구소 연구원  
 2011년~현재 목포대학교 해양시스템공학과 전임강사  
 관심분야: 모델링 및 시뮬레이션, 시뮬레이션 기반 설계, 다물체계 동역학, CAD, 음향수 모델링



### 박 광 필

1997년 서울대학교 공과대학 조선해양공학과 학사  
 1999년 서울대학교 공과대학 조선해양공학과 석사  
 2011년 서울대학교 공과대학 조선해양공학과 박사  
 1999년~현재 대우조선해양 중앙연구소 정보기술팀 IT융합연구그룹 차장  
 관심분야: 다물체계 동역학, 모델링 및 시뮬레이션, 탄성학



### 이 규 열

1971년 서울대학교 공과대학 조선해양공학과 학사  
 1975년 독일 하노버 공과대학 조선공학 석사  
 1982년 독일 하노버 공과대학 조선공학 박사  
 1975년~1983년 독일 하노버 공과대학 선박설계 및 이론연구소, 주정부 연구원  
 1983년~1994년 한국기계연구원 선박해양공학연구센터, 선박설계, 생산자동화 연구사업(CSDP) 단장  
 1994년~현재 서울대학교 공과대학 조선해양공학과 교수  
 관심분야: 선박 설계, 시뮬레이션, CAD, CAGD, CALS