

블록의 탑재 안전성을 위한 초기 평형 자세 탐색 방법 연구

전도현¹·노명일^{2,†}·함승호¹·이혜원¹
서울대학교 조선해양공학과¹
서울대학교 조선해양공학과 및 해양시스템공학연구소²

A Study on the Methods for Finding Initial Equilibrium Position of a Lifting Block for the Safe Erection

Do-Hyun Chun¹·Myung-Il Roh^{2,†}·Seung-Ho Ham¹·Hye-Won Lee¹
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University¹
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, and Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul National University²

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

In a shipyard, block lifting is an important process in the production of ships and offshore structures. Block lifting is a sensitive process because lifting blocks have to be erected with exact positions and orientations. If we use a numerical method for the process, it is important to find tensions of wires and positions of equalizers to maintain the initial equilibrium position of the block. At this time, equations of motion of the block should be solved to calculate the initial equilibrium position of the block. Because the solving technique changes according to the number of equalizers, a suitable equation for the corresponding problem is required. In this study, three types of equations are proposed to find the initial equilibrium position of the block according to the number of equalizers. The Newton-Raphson's method is used to solve nonlinear simultaneous equations and the optimization method is used to determine the appropriate solution to the undetermined problem. To evaluate the applicability of the proposed methods, the dynamic simulations are performed using the tensions calculated from the proposed methods, and the results are discussed. The results show that the proposed methods can be effectively used to determine initial equilibrium position of the block for the block lifting.

Keywords : Block lifting(블록 리프팅), Initial equilibrium position(초기 평형 자세), Equations of motion(운동 방정식), Optimization(최적화)

1. 서론

선박 및 해양구조물은 여러 개의 작은 단위의 블록으로 나뉘어 이들을 하나씩 탑재하는 방식으로 건조된다. 블록의 탑재는 주로 크레인을 이용하여 이루어지는데, 이 과정에서 블록의 yaw 운동(z축 회전)이 발생하면, 블록 간 간섭이 일어날 수 있다. 따라서 사전에 리프팅 블록의 yaw 운동 발생 여부를 파악하는 것이 중요하다. 하지만 기존의 정적인 방법에서는 주로 힘의 평형만을 고려하였기 때문에 yaw 운동의 발생 여부를 확인하는 데에는 한계가 있었으며, 어느 정도의 yaw 운동이 발생하는지도 확인이 불가능했다.

한편, 동역학 시뮬레이션을 수행하는데 있어서도 블록의 초기 평형 자세(블록의 움직임이 없으며, 회전 각도가 모두 0인 상태)를 잡는 것은 매우 중요하다. 만약 블록의 초기 평형 자세를 맞추지 못한 상태에서 시뮬레이션을 수행하면, 그 영향이 이후 시뮬레이션 중 블록의 운동이나 장력의 변화에 영향을 미치게 된다. 기존에는 초기 평형 자세를 잡기 위해 긴 시간 동안 큰 감쇠(damping)를 적용하였으나, 시뮬레이션 시간이 오래 걸리고, 블록의 움직임은 줄일 수 있지만 수평 자세를 맞추지는 못하였다. 또한, 블록의 자세 탐색 시 이퀄라이저(equalizer, 와이어 로프에 작용하는 장력을 동일하게 분산시켜주는 특수 장치)를 고려해야 하는 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서는 이퀄라이저를 고려하여 블록의 평형 자세를 탐색하는 연구를 수행하였다. 다시 말해, 조선소에서 사용 중인 크레인의 종류에 따라, 블록의 평형 자세를 유지하기 위한 이퀄라이저의 위치, 이퀄라이저와 블록 사이에 연결된 슬링 와이어(sling wire)의 장력, 이퀄라이저와 크레인 사이에 연결된 크레인 와이어(crane wire)의 장력을 계산하는 방법을 제안하였다. 이를 통해 사전에 yaw 운동의 발생 여부와 발생 각도를 예측할 수 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 블록의 초기 평형 자세 탐색과 관련된 연구 현황에 대해 살펴본다. 3장에서는 조선소에서 많이 활용되는 3가지 종류의 크레인에 따른 블록의 초기 평형 자세 탐색 방법을 서술한다. 4장에서는 3장에서 제안한 블록의 초기 평형 자세 탐색 방법을 적용하고, 그 결과를 동역학 시뮬레이션 프로그램의 입력으로 활용하여 제안 방법의 적용 전후의 움직임 결과를 비교한다. 마지막으로 5장에서는 결론 및 향후 계획에 대해서 설명한다.

2. 관련 연구 현황

Lee et al. (2016)은 갠트리 크레인(gantry crane)을 이용한 블록 턴오버(turn-over, 블록을 뒤집는 것) 과정을 수행하였다. 또한, Ham et al. (2015; 2016; 2017)은 동역학 해석을 기반으로 파도나 바람 등 외력이 작용할 때 각각 갠트리 크레인, 중대형 해상 크레인, 초대형 해상 크레인을 이용한 블록 리프팅 과정의 안정성 평가를 수행하였다. 하지만 앞의 두 연구에서는 블록의 초기 평형 자세를 탐색하지 않고 그것을 수작업으로 입력하였다. Jung (2016)은 초기 평형 자세에 대한 장력 계산은 수행하였지만, 이퀄라이저는 고려하지 않았고, 매 시간 간격마다 와이어 로프의 장력을 계산하여 블록의 초기 평형 자세를 탐색하였다. Liu et al. (2017)은 안정적인 러그(lug, 크레인의 와이어 로프와 블록을 연결하기 위한 부재) 배치를 위해 블록을 격자 구조로 이상화 하여 해석하였다. 그러나 블록의 초기 평형 자세 탐색을 수행하지 않았기 때문에, 블록 리프팅 과정에서 블록 움직임이 발생하였다. Lee et al. (2018)은 장력 계산 과정에서 블록의 초기 평형 자세를 탐색하기 위한 설계 변수로서 러그 위치를 포함시켜 다양한 목적 함수에 대해 최적화를 수행하였다. 그러나 초기 평형 자세 탐색 과정에서의 제약 조건들이 실제 블록의 움직임을 전부 반영하지 않기 때문에 블록의 움직임이 완벽하게 제어되지 않았다. 본 연구에서는 와이어 로프의 장력과 이퀄라이저의 위치 등을 변수들로 설정하여 블록의 초기 평형 자세를 탐색하였고, 동역학 시뮬레이션 프로그램을 이용해 그 효과를 확인해 보았다. Table 1은 이상의 관련 연구들을 요약하여 정리한 것이다.

3. 블록의 초기 평형 자세 탐색 방법

본 장에서는 블록의 초기 평형 자세를 탐색하기 위한 변수들과 관련 방정식을 도출하였다. 그리고 크레인의 종류에 따라 블록의 초기 평형 자세 탐색 방법을 분류하였다.

Table 1 Comparison of this study with related works

Study	Stable block lifting	Consideration of cranes			Application
		Gantry crane	Floating crane	Mega-floating crane	
Lee et al. (2016)	X	O	X	X	Turn-over operation
Ham et al. (2015)	X	O	X	X	Lifting operation
Ham et al. (2016)	X	O	O	X	Lifting operation
Ham et al. (2017)	X	X	X	O	Lifting operation
Jung (2016)	O	O	X	X	Lifting operation
Liu et al. (2017)	X	O	X	X	Lifting operation
Lee et al. (2018)	X	O	X	X	Lifting operation
This study	O	O	O	O	Lifting operation

3.1 초기 평형 자세 탐색을 위한 문제 정의

블록의 평형 자세를 유지하기 위해서는 3개의 축(x, y, z)에 대한 힘과 모멘트가 모두 0이 되어야 하므로, 이로부터 식 (1)과 같은 6개의 운동 방정식을 얻을 수 있다.

$$F_x = F_y = F_z = M_x = M_y = M_z = 0 \tag{1}$$

여기서 F_x, F_y, F_z 는 블록의 3 방향 힘, M_x, M_y, M_z 는 블록의 3 방향 모멘트를 의미한다.

또한 이퀄라이저 역시 평형 자세를 유지해야 한다. Ham et al. (2016)에 따르면 이퀄라이저는 여러 개의 도르래가 하나의 와이어로 연결 되어있는 장치이다. Fig. 1에 나타나 있듯이, 이퀄라이저는 내부 와이어의 장력에 따라 움직 도르래가 위아래로 움직이면서 각 슬링 와이어의 장력이 같아지도록 조정하는 역할을 한다. 하지만 실제 이퀄라이저를 모사하기 위해 도르래를 포함한 모든 물체를 고려하여 운동 해석을 수행하기에는 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 이퀄라이저를 하나의 질점으로 간략화 하였다. 실제로 와이어 로프와 이퀄라이저 사이의 거리가 이퀄라이저의 폭에 비해 길기 때문에 Fig. 1에 나타난 것처럼 해석 결과에 큰 영향을 미치지 않았음을 확인하였다.

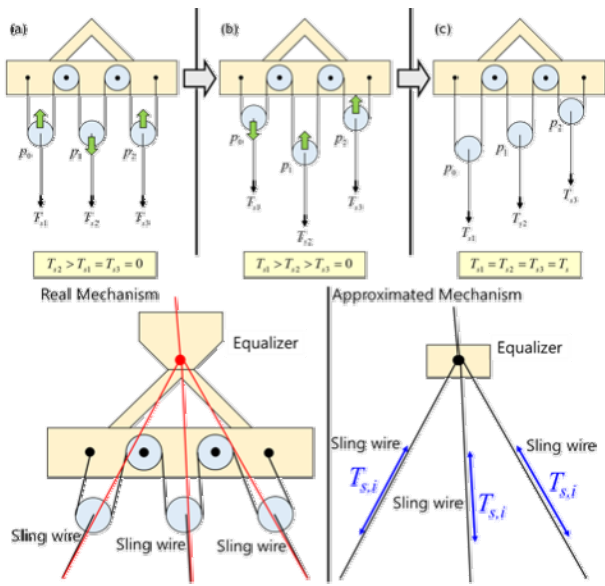


Fig. 1 Modeling and principle of equalizer

본 연구에서는 이퀄라이저를 질점으로 가정하였기 때문에 이퀄라이저의 회전 운동은 존재하지 않는다. 따라서 각각의 이퀄라이저는 3개의 축 방향에 대해 병진 운동만을 가지게 되어 식 (2)와 같이 3개의 운동 방정식을 만들 수 있다.

$$\begin{aligned} f_{i,x} &= 0 \\ f_{i,y} &= 0 \\ f_{i,z} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $f_{i,x}$, $f_{i,y}$, $f_{i,z}$ 는 i 번째 이퀄라이저의 3 방향 힘을 의미한다. 따라서 방정식의 개수 (n_c)는 식 (3)과 같다. 여기서 n 은 이퀄라이저의 개수이다.

$$n_c = 3n + 6 \quad (3)$$

다음으로 변수들에 대한 정의이다. 블록의 z 방향 위치가 일정하다고 가정하면 블록의 x , y 방향 위치 (x_b , y_b)만을 변수로 정의할 수 있다.

또한, 이퀄라이저와 각 러그를 연결하는 슬링 와이어의 장력과 이퀄라이저와 크레인을 연결하는 크레인 와이어의 장력 (T_{ci})을 변수로 설정할 수 있다.

하나의 이퀄라이저에 연결된 슬링 와이어들은 모두 같은 장력을 가지므로, 슬링 와이어들의 장력은 하나의 변수 ($T_{s,i}$)로 정의할 수 있다. 또한, i 번째 이퀄라이저의 초기 x , y 방향 위치 (x_i , y_i)가 변수로 설정될 수 있으며, 블록과 이퀄라이저 사이의 거리는 일정한 값으로 가정한다. 따라서 하나의 이퀄라이저가 가지는 변수는 총 4개 (T_{ci} , $T_{s,i}$, x_i , y_i)이다.

요약하면, 블록에 대하여 2개의 변수와 각 이퀄라이저에 대하여 4개의 변수가 존재하므로 변수의 총 개수 (n_v)는 다음 식 (4)와 같다.

$$n_v = 4n + 2 \quad (4)$$

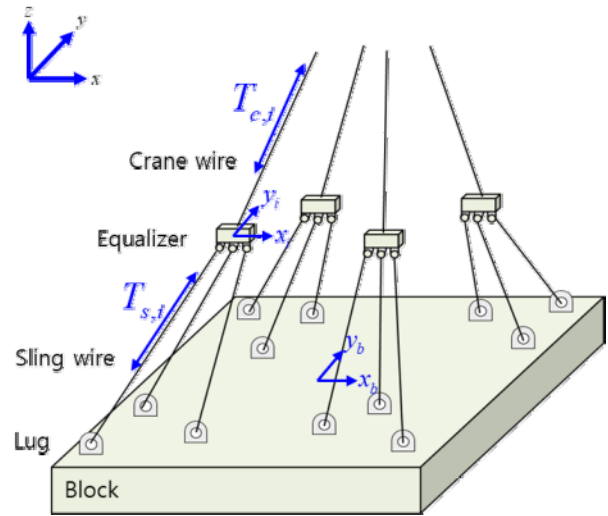


Fig. 2 Block, wire ropes, equalizers, and variables for the block lifting

Fig. 2는 블록, 와이어 로프, 이퀄라이저, 그리고 정의된 변수들을 나타낸 그림이다. 이 변수들을 이용해 블록과 각 이퀄라이저의 운동 방정식을 구성할 수 있다. 먼저, 식 (1)에서 표기된 블록의 운동 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_x = \sum_i T_{x,i} \sum_j \cos \alpha_{i,j} = 0 \quad (5)$$

$$F_y = \sum_i T_{x,i} \sum_j \cos \beta_{i,j} = 0 \quad (6)$$

$$F_z = -M_B g + \sum_i T_{s,i} \sum_j \cos \gamma_{i,j} = 0 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} M_x &= \sum_i (y_{i,j} - y_g) \cdot T_{s,i} \sum_j \cos \gamma_{i,j} \\ &+ \sum_i (z_{i,j} - z_g) \cdot T_{s,i} \sum_j \cos \beta_{i,j} = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} M_y &= \sum_i (z_{i,j} - z_g) \cdot T_{s,j} \sum_j \cos \alpha_{i,j} \\ &+ \sum_i (x_{i,j} - x_g) \cdot T_{s,i} \sum_j \cos \gamma_{i,j} = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} M_z &= \sum_i (x_{i,j} - x_g) \cdot T_{s,i} \sum_j \cos \beta_{i,j} \\ &+ \sum_i (y_{i,j} - y_g) \cdot T_{s,i} \sum_j \cos \alpha_{i,j} = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

이때 (α_{ij} , β_{jj} , γ_{ij})는 각각 i 번째 이퀄라이저에 연결된 j 번째 슬링 와이어가 x , y , z 축과 이루는 각도이며, 이에 대한 방향 코사인 값은 식 (11)-(13)과 같이 정의된다. (x_{ij} , y_{ij} , z_{ij})는 각 슬

링 와이어와 연결된 리그의 좌표이며, M_b 는 블록의 질량을 의미한다.

$$\cos\alpha_{i,j} = \frac{(x_{i,j} - x_i)}{\sqrt{(x_{i,j} - x_i)^2 + (y_{i,j} - y_i)^2 + (z_{i,j} - z_i)^2}} \quad (11)$$

$$\cos\beta_{i,j} = \frac{(y_{i,j} - y_i)}{\sqrt{(x_{i,j} - x_i)^2 + (y_{i,j} - y_i)^2 + (z_{i,j} - z_i)^2}} \quad (12)$$

$$\cos\gamma_{i,j} = \frac{(z_{i,j} - z_i)}{\sqrt{(x_{i,j} - x_i)^2 + (y_{i,j} - y_i)^2 + (z_{i,j} - z_i)^2}} \quad (13)$$

다음으로 각 이퀄라이저에 작용하는 운동 방정식 (식 (2)) 역시 식 (1)과 마찬가지로 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{i,x} = T_{x,i} \sum_j \cos\alpha_{i,j} = 0 \quad (14)$$

$$f_{i,y} = T_{x,i} \sum_j \cos\beta_{i,j} = 0 \quad (15)$$

$$f_{i,z} = -m_{x,i}g + \sum_i T_{x,i} \sum_j \cos\gamma_{i,j} = 0 \quad (16)$$

이때 $m_{x,i}$ 는 i 번째 이퀄라이저의 질량을 의미한다.

3.2 크레인 종류에 따른 초기 평형 자세 탐색 방법

앞서 계산한 식 (3), (4)에 따르면 방정식과 변수의 개수는 이퀄라이저의 개수에 따라 달라진다. Fig. 3에는 조선소에서 대표적으로 이용되는 크레인과 각 크레인의 이퀄라이저 개수를 표시하였다. 각 크레인의 이퀄라이저의 개수에 따른 방정식과 변수의 개수, 그리고 이에 따른 방정식의 분류 방법을 Table 2와 같이 정리할 수 있다.

Table 2 Problem type according to the crane type

Crane type	n	n_c	n_v	Problem type
Gantry crane	3	15	14	Inconsistent
Floating crane	4	18	18	Determined
Mega-floating crane	8	30	34	Undetermined

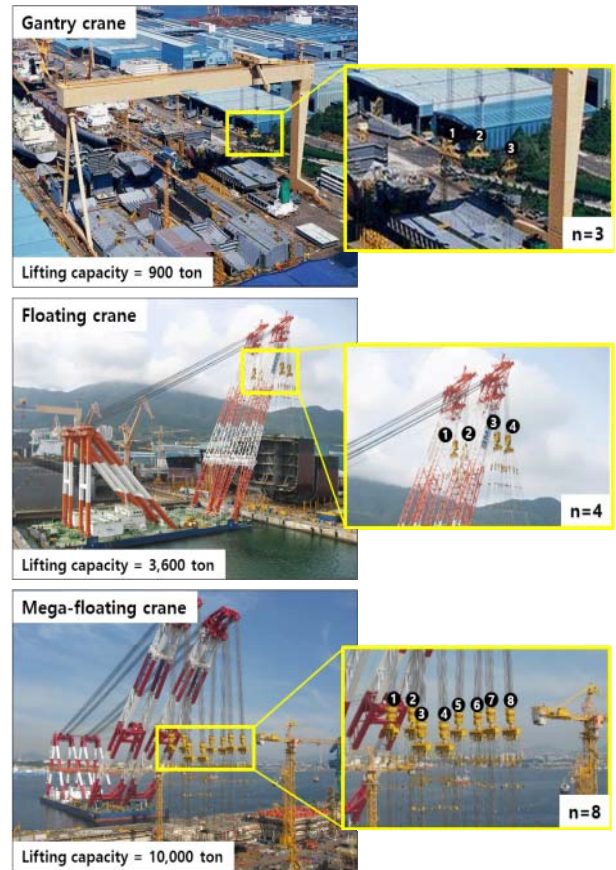


Fig. 3 Number of equalizers according to the crane type

(1) 이퀄라이저의 개수가 3개인 경우 ($n = 3$)

갠트리 크레인은 3개의 이퀄라이저를 가지므로, 변수의 개수는 14개이고, 방정식의 개수는 15개이다. 따라서 이 문제는 변수의 개수가 방정식의 개수보다 작은 불능 (inconsistent) 문제이다. 불능 문제를 풀기 위해서는 하나의 제약 조건을 제외하여 변수와 방정식의 개수를 일치시켜야 한다. 실제 크레인의 와이어가 블록에 거의 수직으로 연결되기 때문에, roll 운동과 pitch 운동은 제어가 쉬운 반면 yaw 운동에 대한 직접적인 제어는 거의 불가능하다. 따라서 블록의 yaw 운동에 대한 모멘트 평형 방정식 하나를 제외하면 본 문제를 풀 수 있다. 이러한 풀이를 통해 주어진 리그의 배치에 대한 yaw 운동 발생 여부와 각도를 계산할 수 있다. 따라서 갠트리 크레인의 경우 블록에 발생하는 모든 운동을 제어할 수는 없지만 리그 배치 등 입력 조건에 따라 발생하는 블록의 yaw 운동의 크기 예측 할 수 있고, 이를 통해 리그 배치의 적합성을 평가할 수 있고, 블록의 yaw 운동의 크기가 최소화 되는 리그 배치를 찾을 수 있다. 이에 따라 이 문제는 아래와 같이 정식화될 수 있다.

- 변수 (= $2+3*4 = 14$ 개): $x_b, y_b, T_{c,i}, T_{s,i}, x_i, y_i$
- 방정식 (= $5+3*3 = 14$ 개):

$$F_x = F_y = F_z = M_x = M_y = f_{i,x} = f_{i,y} = f_{i,z} = 0$$

여기서, 각 이퀄라이저의 번호를 나타내는 $i = 1, 2, 3$ 이다.

(2) 이퀄라이저의 개수가 4개인 경우 ($n = 4$)

중대형 해상 크레인은 4개의 이퀄라이저를 가지므로, 변수의 개수는 18개이고, 방정식의 개수 역시 18개이다. 따라서 이 문제는 변수의 개수와 방정식의 개수가 같은 비선형 연립 방정식이 된다. 이때, 비선형 연립 방정식의 해는 뉴턴-랩슨 (Newton-Raphson) 방법을 이용해 구할 수 있다. 이 문제는 아래와 같이 정식화될 수 있다.

- 변수 (= $2+4*4 = 18$ 개): $x_b, y_b, T_{ci}, T_{si}, x_i, y_i$

- 방정식 (= $6+4*3 = 18$ 개):

$$F_x = F_y = F_z = M_x = M_y = M_z = f_{i,x} = f_{i,y} = f_{i,z} = 0$$

여기서, 각 이퀄라이저의 번호를 나타내는 $i = 1, 2, 3, 4$ 이다.

(3) 이퀄라이저의 개수가 8개인 경우 ($n = 8$)

초대형 해상 크레인은 8개의 이퀄라이저를 가지므로, 변수의 개수는 34개이고, 방정식의 개수는 30개이다. 따라서 이 문제는 변수의 개수가 방정식의 개수보다 더 많은 부정 (undetermined) 문제가 된다. 이러한 부정 비선형 연립 방정식의 경우 방정식을 만족하는 무수히 많은 해가 존재한다. 따라서 부정 비선형 연립 방정식의 해를 구하기 위해 최적화 방법을 이용할 수 있다. 하지만 이러한 방법을 통해 방정식의 해를 계산할 경우 복잡한 계산 과정으로 인해 최적해를 찾지 못하는 경우가 발생할 수 있다. 따라서 원래의 문제를 상대적으로 작은 크기의 문제로 변환하기로 한다. 먼저, 앞서 언급하였듯이 하나의 이퀄라이저는 총 4개의 변수 (T_{ci}, T_{si}, x_i, y_i)와 3개의 축 방향에 대한 병진 운동 방정식을 가지고, 블록은 총 2개의 변수 (x_b, y_b)와 3개의 축 방향에 대한 병진 및 회전 운동 방정식 (총 6개)을 가진다. 만일 총 8개인 이퀄라이저들의 운동 방정식 24개 (= $8*3$)를 이용해 24개 (= $8*3$)의 변수 (T_{si}, x_i, y_i)들을 구해 소거한다면, 최종적으로 크레인 와이어의 장력 변수 (T_{ci} 의 8개)와 블록의 변수 (x_b, y_b 의 2개), 블록의 운동 방정식 (6개)만을 가지는 간단한 문제로 축소될 수 있다. 그러나 이 문제는 역시 다수의 해를 가지는 부정 비선형 연립 방정식이므로 하나의 해를 구하기 위해 목적 함수를 선정할 수 있다. 본 연구에서는 각 이퀄라이저에 작용하는 크레인 와이어의 장력 (T_{ci})이 균일하도록 하는 것을 목적 함수로 가정하였다. 따라서 이 문제는 아래와 같은 최적화 문제로 정식화할 수 있다.

- 변수 (설계 변수, $8+2 = 10$ 개): T_{ci}, x_b, y_b

- 방정식 (제약 조건, 6개):

$$F_x = F_y = F_z = M_x = M_y = M_z = 0$$

- 목적 함수: Minimize $\sum_{i=1}^8 T_{c,i}^2$

여기서, 각 이퀄라이저의 번호를 나타내는 $i = 1, \dots, 8$ 이다.

요약하면, 이 문제는 10개의 설계 변수, 6개의 등호 제약 조건, 1개의 목적 함수를 가진 최적화 문제이며, 본 연구에서는 이를 풀기 위해 유전 알고리즘 (genetic algorithm) (Goldberg, 1989; Davis, 1991)을 이용하였고, 유전 알고리즘 중 그 효율성으로 인해 유명한 NSGA-II (Deb et al., 2002)를 이용하였다.

4. 초기 평형 자세 탐색 방법의 적용

본 장에서는 3장에서 설명한 블록의 초기 자세 탐색 방법의 유효성을 검증하기 위해 3가지 크레인의 블록 리프팅 예제에 적용하였다.

4.1 크레인 종류에 따른 적용 예

주어진 조건에서 블록과 이퀄라이저의 위치, 슬링 와이어와 크레인 와이어의 장력을 제안된 방법으로 계산하였고, 그 결과를 동역학 시뮬레이션 프로그램에 입력하여 블록의 움직임을 살펴 보았다. 이때 와이어 로프의 개수를 블록의 무게로 나누어 초기 장력으로 가정하여 입력한 것 (기존의 일반적인 수작업 방법)과 결과를 비교해 보았다.

(1) 갠트리 크레인

갠트리 크레인의 한계 용량은 900 ton이고, Fig. 4와 같은 300 ton의 블록을 가정하였다.

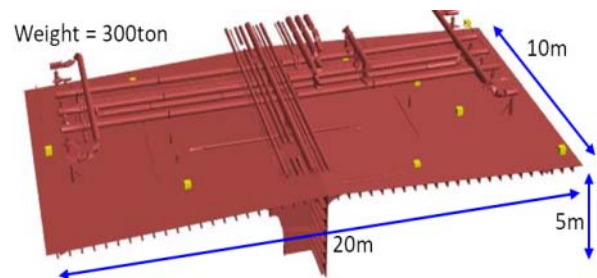


Fig. 4 Principal dimensions of the block for the gantry crane

모든 와이어 로프에 작용하는 장력을 같도록 하여 블록 리프팅을 수행한 결과 (기존의 일반적인 수작업 방법)와 본 연구에서 제시된 방법을 사용하여 블록 리프팅을 수행한 결과 (Fig. 5 참조)를 비교하였다.

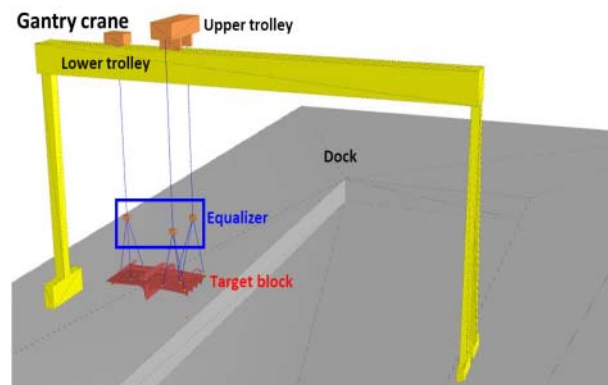


Fig. 5 Simulation result of the block lifting using the gantry crane

모든 장력을 같도록 분포하여 블록 리프팅을 수행했을 때는 장력과 블록의 움직임에 큰 변화가 있었으나 본 연구에서 제안된 방법을 이용하여 블록 리프팅을 수행한 경우 변화가 현저히 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 이때 발생한 블록의 움직임을 Table 3와 Fig. 6에 나타내었다.

Table 3 Movement of the block using the gantry crane

Direction	Using existing method (A)	Using proposed method (B)	Ratio (B/A)
Surge	1.3 m	0.022 m	1.69%
Sway	0.5 m	0.006 m	1.13%
Heave	0.5 m	0.007 m	1.37%
Roll	2.5°	0.027°	1.09%
Pitch	6.5°	0.100°	1.54%
Yaw	4.2°	1.760°	41.61%

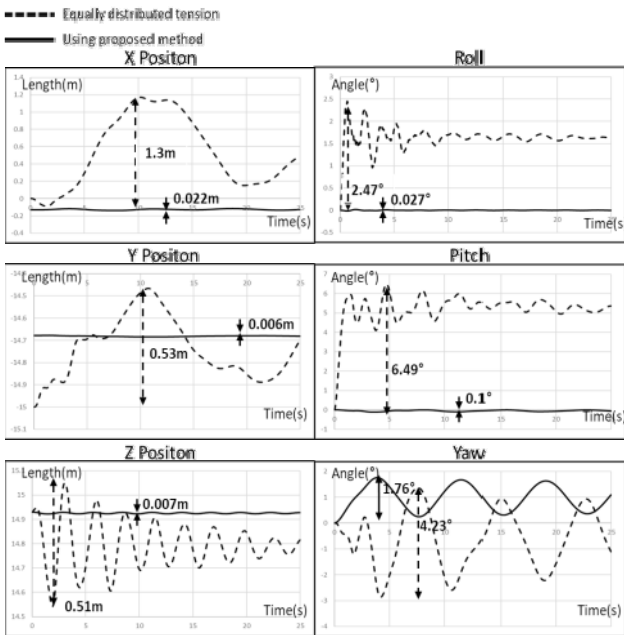


Fig. 6 Movement of the block using the gantry crane

이때, 블록의 yaw 운동에 대한 모멘트를 제외하고 문제를 풀었기 때문에 일정한 수준의 yaw 운동이 발생하는 것을 확인하였다. 이는 3개의 이퀄라이저를 사용하는 갠트리 크레인의 경우, 러그 배치에 따라 블록의 yaw 운동이 필연적으로 발생할 수 있으며 이렇게 발생한 yaw 운동의 값을 예측할 수 있음을 의미한다. 이를 통해 yaw 운동의 크기에 따라 주어진 러그 배치에 대한 적합성 평가가 가능함을 알 수 있다.

(2) 중대형 해상 크레인

본 예제의 중대형 해상 크레인의 한계 용량은 3,600 ton 이고, 1,000 ton의 무게를 가지는 블록을 가정하였다. 블록의 제원은 Fig. 7과 같다.

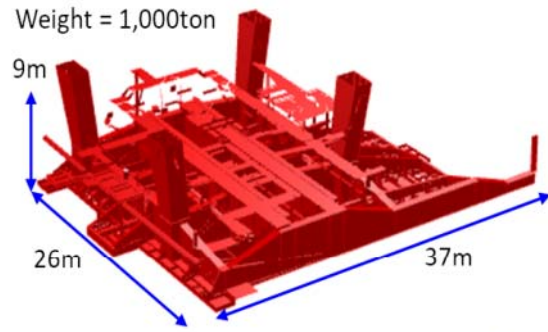


Fig. 7 Principal dimensions of the block for the floating crane

와이어에 걸리는 장력을 같도록 하여 블록 리프팅을 수행했을 때와 본 연구에서 제안된 방법을 이용하여 블록 리프팅을 수행한 결과 (Fig. 8 참조)를 비교하였다.

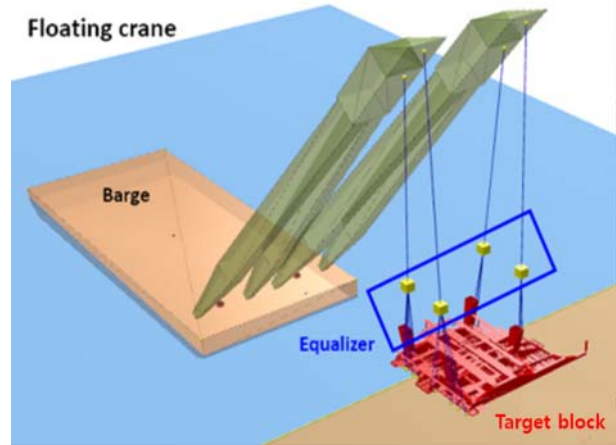


Fig. 8 Simulation result of the block lifting using the floating crane

해상 크레인의 경우, 운동 방정식에 대한 제약 조건을 만족하였기 때문에, 모든 방향에 대해 움직임이 전혀 나타나지 않는 것을 확인할 수 있었고, 이를 Table 4과 Fig. 9에 정리하였다.

Table 4 Movement of the block using the floating crane

Direction	Using existing method (A)	Using proposed method (B)	Ratio (B/A)
Surge	1.8 m	0.000 m	0.00%
Sway	4.2 m	0.000 m	0.00%
Heave	0.6 m	0.000 m	0.00%
Roll	4.1°	0.000°	0.00%
Pitch	1.1°	0.000°	0.00%
Yaw	2.7°	0.000°	0.00%

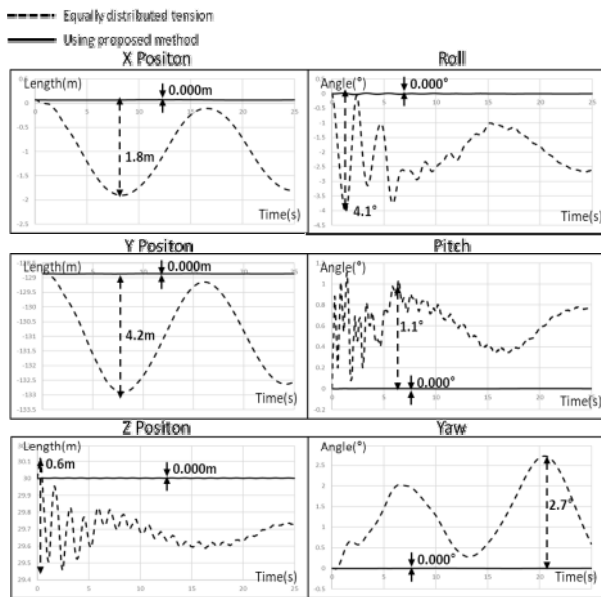


Fig. 9 Movement of the block using the floating crane

(3) 초대형 해상 크레인

본 예제의 초대형 해상 크레인의 한계 용량은 10,000 ton 이고, 블록의 무게는 6,000 ton이라고 가정하였다. 블록의 상세한 제원은 Fig. 10과 같다.

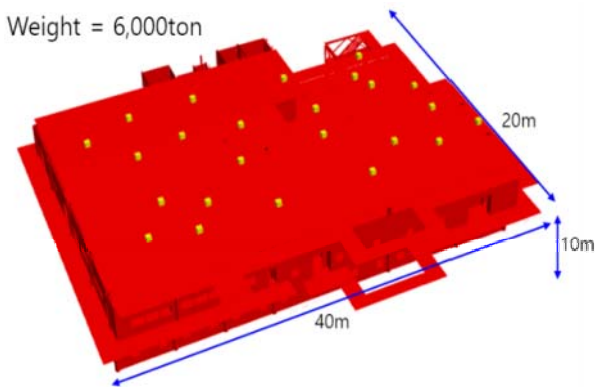


Fig. 10 Principal dimensions of the block for the mega-floating crane

초대형 해상 크레인에서 최적화 방법을 통해 블록 리프팅을 수행한 결과를 장력을 같도록 분포하여 블록 리프팅을 수행 했을 때와 비교하였다 (Fig. 11 참조).

초대형 해상 크레인의 경우 역시 중대형 해상크레인과의 마찬가지로 장력을 같도록 분포 시킨 결과와 비교하여 블록의 움직임이 현저히 줄어든 것을 확인할 수 있었다. 최적화를 수행할 때 제약 조건에 대해 일정 수준의 허용 오차를 설정하였고, 따라서 약간의 움직임이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 본 예제에 대한 결과는 Table 5와 Fig. 12에 정리되어 있다.

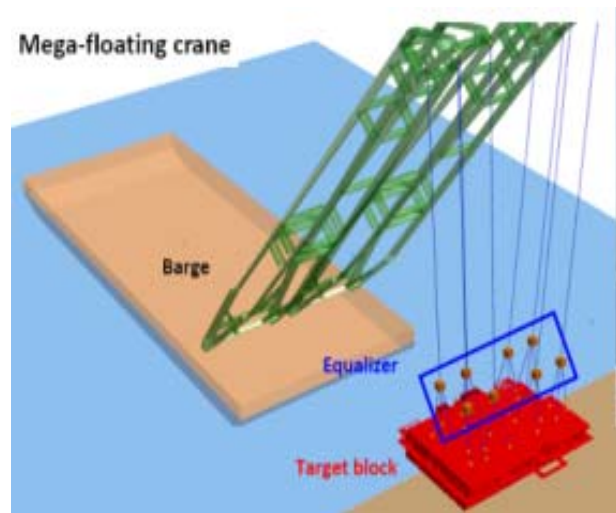


Fig. 11 Simulation result of the block lifting using the mega-floating crane

Table 5 Movement of the block using the mega-floating crane

Direction	Using existing method (A)	Using proposed method (B)	Ratio (B/A)
Surge	0.26 m	0.001 m	0.38%
Sway	0.52 m	0.001 m	0.19%
Heave	1.91 m	0.001 m	0.05%
Roll	6.23°	0.009°	0.14%
Pitch	2.11°	0.004°	0.19%
Yaw	0.91°	0.010°	1.10%

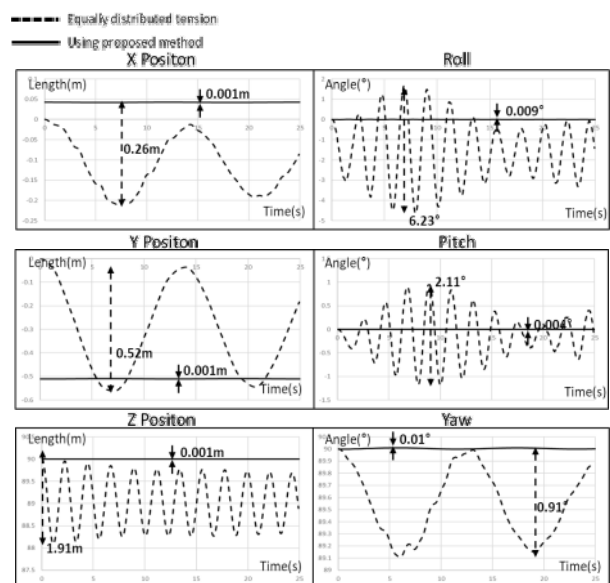


Fig. 12 Movement of the block using the mega-floating crane

4.2 블록의 무게 중심 변화에 따른 적용 예

일반적으로, 블록의 무게 중심은 블록의 형상에 의해 결정되는 고유한 값이다. 하지만 블록이 복잡해지고 그 크기가 커질수록 실제 블록을 리프팅하는 시점에 블록의 무게 중심을 정확하게 계산하지 못하는 경우가 발생한다. 따라서 본 연구에서는 갠트리 크레인을 이용해 블록을 리프팅하는 경우, 블록의 무게 중심의 위치를 변경했을 경우 블록의 yaw 운동이 어떻게 변화하는지를 확인하였다. 이를 통해, 실제 블록 리프팅 시 yaw 운동의 크기에 따라 블록의 무게 중심을 반대로 예측할 수 있으며, 또한 블록을 안전하게 탑재할 수 있는 블록의 무게 중심의 범위 역시 확인할 수 있으리라 판단된다.

Fig. 13은 초기에 (0, 0, 0)이었던 블록의 무게 중심이 x, y축 방향으로 이동함에 따라 yaw 운동의 크기를 나타낸 것이다. 이 그림에 나타나 있듯이, 블록의 무게 중심이 변화에 따라, 블록의 yaw 운동의 크기가 변화함을 알 수 있다. 특히, 무게 중심의 위치가 (1, -1, 0)으로 변한 경우 블록의 yaw 운동이 거의 발생하지 않는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 갠트리 크레인에서도 블록의 무게 중심 또는 러그 배치 등 입력 조건의 변화에 따라 블록의 yaw 운동의 크기가 변화하게 되고, 특정 경우에는 갠트리 크레인을 이용하더라도 블록의 운동이 나타나지 않고 블록의 초기 평형 자세를 유지하며 안정적으로 블록 리프팅을 수행할 수 있음을 알 수 있다. 이를 통해 실제 블록 리프팅 시 주어진 러그 배치 하에서 블록의 yaw 운동이 거의 발생하지 않는 블록의 무게 중심의 범위를 구할 수 있다. 또한, 블록을 안전하게 리프팅할 수 있는 무게 중심의 위치가 한쪽으로 크게 치우친 경우, 블록의 러그 배치를 바꾸는 등 여러 가지 방법을 적용해 블록 리프팅을 안전하게 수행할 수 있을 것이다.

5. 결론 및 향후 계획

본 연구에서는 블록의 초기 평형 자세 탐색 방법을 제안하고 동역학 시뮬레이션을 이용하여 그 효용성을 검증하였다. 블록과 이퀄라이저의 운동 방정식을 운동 방정식에 영향을 주는 요소들을 변수로 도입하여 계산하였다. 제약 조건의 개수와 변수의 개수가 이퀄라이저의 개수에 따라 변화하는 것을 확인하였고, 이퀄라이저의 개수를 기준으로 크레인의 종류를 분류하여 블록의 초기 평형 자세를 탐색하였다. 동역학 시뮬레이션 프로그램을 통해 검증한 결과, 갠트리 크레인에서는 블록의 yaw 운동을 제외한 다른 방향의 운동이 나타나지 않는 것을 확인하였고, 중대형 해상 크레인과 초대형 해상 크레인에서는 블록의 운동이 나타나지 않는 것을 확인하였다. 또한, 블록의 무게 중심 또는 러그 배치 등의 입력 정보가 바뀔 때 따라 블록의 움직임, 와이어 로프의 장력 분포 등이 변화함을 확인하였으며, 러그 배치의 변화를 통해 더욱 안정적으로 블록 리프팅을 수행할 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 블록에 배치된 러그 정보가 입력 정보로 주어

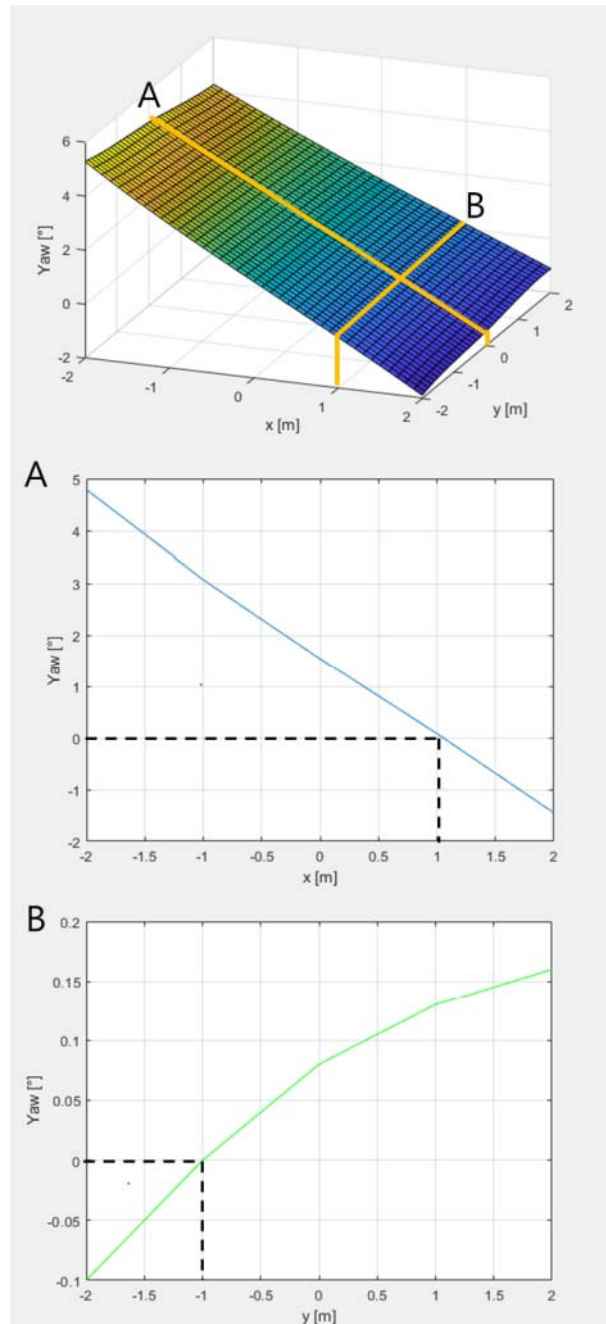


Fig. 13 Yaw movement of the block by the change of the center of gravity for gantry crane

지게 된다. 따라서 향후 연구로서, Lee et al. (2018)의 연구 등에서 제안된 방법을 확장하여 보다 안정적으로 블록 리프팅을 수행할 수 있는 러그 배치 방법을 고안할 예정이다.

후기

본 연구는 (a) BK21+ 해양플랜트창의인재양성사업단, (b) 서울대학교 해양시스템공학연구소의 지원으로 이루어진 연구 결과의 일부임을 밝히며, 이에 감사드립니다.

References

- Davis, L., 1991. *Handbook of genetic algorithms*. Van Nostrand-Reinhold: New York, NY, USA.
- Deb, K. Pratap, A. Agarwal, S. & Meyarivan, T., 2002. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), pp.182-197.
- Goldberg, D.E., 1989. *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Addison-Wesley: Boston, MA, USA.
- Ham, S.H., Roh, M.I., Lee, H.W. & Ha, S., 2015. Multibody dynamic analysis of a heavy load suspended by a floating crane with constraint-based wire rope. *Ocean Engineering*, 109, pp.145-160
- Ham, S.H., Roh, M.I. & Lee, H.W., 2016. Simulation of load lifting with equalizers used in shipyards. *Automation in Construction*, 61, pp.98-111
- Ham, S.H. et al., 2017. Development and validation of a simulation-based safety evaluation program for a mega floating crane. *Advances in Engineering Software*, 112, pp.101-116
- Jung, D.W., 2016. *Dynamic analysis of block lifting simulation with flexible body and development of user interface*. Master's Thesis. Mokpo National University.
- Lee, H., Roh, M.I. & Ham, S.H., 2016. Block turnover simulation considering the interferences between the block and wire ropes in shipbuilding. *Automation in Construction*, 67, pp.60-75.
- Lee, S.M., Roh, M.I., Kim, K.S. & Ham, S.H., 2018. Optimum design of lug arrangement based on static and dynamic analyses for block lifting. *Journal of Ship Production and Design*, 34(2), pp.119-133.
- Liu, Y. et al., 2017. Automatic design method and application in complex ship block lifting. *Journal of Ship Production and Design*, 33(4), pp.283-290.

