

선박 블록의 이동 및 반전 시뮬레이션 프로그램 개발

이수범* · 신상범** · 곽병만***

A CAD-based Software for the Simulation of Lifting and Turnover of Ship Block

Soo Beom Lee, Sang Beom Shin and Byung Man Kwak

Key Words : simulation, CAD, turnover, ship block, Pro/ENGINEER

Abstract

In this paper, an application program is made to simulate the behavior of a ship block under various crane works and to generate data of lug reactions and wire tensions. The program is based on a CAD program, Pro/ENGINEER. A ship is composed of more than 100 ship blocks. In order to lift, move, turn, or put a ship block at a convenient location for assembling, workers in a shipyard use cranes, wires, and lugs temporarily attached to the block. In the procedure of lifting and turning a ship block with a crane, it is important to find suitable lug points and wires to do the handling efficiently and prevent accidents. Evaluation of forces in lugs and wires is necessary, but the problem is rather complex due to nonlinearity and nonuniqueness. In the present development, the nonlinear system of equations for quasi-static equilibriums is derived and a Newton type solution method is adopted to solve the system. The importance of initial estimates to the solution is illustrated and two approaches are utilized and compared. With the program developed, users can assign lug points on the CAD model by mouse and choose various linking devices at each crane point. Users can try to simulate the motion for any prescribed conditions, compare the motion of the block and the reactions and choose appropriate lug points and the type of wires and lugs.

기호설명

- fm : Tension of main wire
- fs : Tension of sling wire
- pc : Crane point
- pe : End point of main wire
- pb : Point on the block loader where sling wire hangs
- pl : Lug point
- lm : Length of main wire
- ls : Length of sling wire
- α : Rotation angle of block loader

1. 서론

선박은 블록이라는 구조물의 집합이다. 또한

블록에 와이어를 걸기 위해 부착하는 구조물을 러그라고 한다. 조선소에서는 블록을 조립 및 용접이 용이한 위치에 놓기 위해서 러그에 와이어를 걸고 크레인을 이용하여 블록들을 운반 또는 회전시키는 작업을 한다. 특히 최근에는 생산성 향상의 방안으로 블록이 대형화 되는 추세에 따라 구조가 복잡하고 크기가 매우 큰 블록의 크레인 작업 빈도가 높아지는데, 이때 내부에 탑재된 의장재의 추가에 따라 블록 전체의 정확한 중량과 무게중심을 예측하지 못하면 작업에 사용될 러그나 와이어의 용량을 결정하기 어려워진다. 구조에 비해 상대적으로 강성이 취약한 부위나 응력 집중이 일어나는 곳에 러그가 부착되는 경우에는 러그 부근에 굽힘이나 비틀림에 의해 심한 국부 변형이 발생하며, 러그나 와이어가 결정된 이후에도 블록을 회전시키는 경우 각 러그에서 반력의 크기와 방향이 변함에 따라 하중이 편중되어 예상치 못한

* 한국과학기술원 기계공학과 박사과정

** 현대중공업 산업기술 연구소

*** 한국과학기술원 기계공학과 교수

사고를 유발하고 많은 사상자가 발생하기도 한다. 따라서 크레인을 이용한 선박 블록 작업시 생산성을 향상시키고 안전 사고를 예방하기 위해서는 전체 블록의 중량이나 무게 중심을 정확히 계산하여 이에 맞는 와이어나 러그의 용량을 결정하고 블록이 회전시 하중의 변화 양상을 정확히 계산하며 필요에 따라서는 러그의 위치나 개수 등을 적절히 변경하여야 한다.

그러나 실제 조선소에서 작업은 와이어의 연결 상태가 복잡하므로 이동 및 회전에 따른 하중의 변화 양상을 설계자가 계산하기에는 한계가 있다. 본 논문은 크레인을 이용한 선박 블록 작업 중 러그 배치 설계자가 계산하기 힘든 수치 정보를 정확히 계산하고 러그 배치 설계가 적합한지를 판단하여 주는 전산 프로그램을 개발하여, 기존의 경험에 의존한 작업보다 신뢰도를 기하고 수작업으로 인한 단점들을 보완함을 목적으로 한다.

2. 문제 정의 및 수식화

2.1 문제 정의

조선소에서는 러그에 와이어를 걸고 크레인을 이용하여 블록들을 운반 또는 회전시킴으로써 조립 및 용접이 용이한 위치에 놓는데, 이 작업을 블록의 이동 및 반전(turnover)이라고 한다. 조선소의 크레인은 이송 속도가 대략 0.5m/s 이하의 수준을 유지하므로 동역학적인 요소를 배제하고 정역학 문제로 접근이 가능하다. 작업 시나리오와 환경에 따라 다양한 체결 방식이 사용되는데 이들을 일반화하고 수식화한 후 블록이 매달린 최종 평형 위치와 장력 및 반력에 대한 해를 구하여 화면상에 시뮬레이션 하는 일련의 작업을 전산 프로그램화 한다.

2.2 작업시 제한조건

현장 작업 지침에 의하면, 크레인 지지점을 3점 이하로 하는 경우 외부조건이 변해도 하중이 작용되지 않는 와이어는 없으므로 반드시 3점 이하 지지하여 작업하도록 규정하고 있다[3]. 따라서 4점 이상으로 지지할 경우 다음의 작업 기준에 따라 지지수를 3점으로 줄여야 한다.

- 4점 러그의 경우 어느 2점의 와이어를 중간 체결하여 1점 지지화 한다.
- 골리아스 크레인(Goliath crane)을 이용한 병렬 작업시 3점 지지를 위하여 블록 로더(block loader)를 적용한다.

2.3 1점 지지화하는 와이어 체결 방식

크레인 지지점에 직접 연결되는 와이어를 주와

이어(main wire)라 하고 중간 체결 및 블록 로더로부터 러그점까지 체결하는 와이어를 부와이어(sling wire)라고 한다. 1점 지지라 함은 부와이어를 쓰지 않고 주와이어 자체로 지지하거나 혹은 부와이어에 걸리는 장력의 크기를 모두 일정하게 유지하도록 하여 힘의 편중을 방지하는 체결 방식이다.

2.3.1 블록 로더(Block loader, B/L)

블록 로더는 몇 개의 러그들이 열을 지어 위치한 경우 이들을 모두 1점 지지화 하기 위한 장치이다. 블록 로더는 내부의 고정 도르래들과 블록 로더 양단에 고정된 와이어에 의해 외부의 움직 도르래들이 매달려 있는 형상을 보인다. 그림 2.1은 블록 로더의 실제 형상 및 정면도이다.

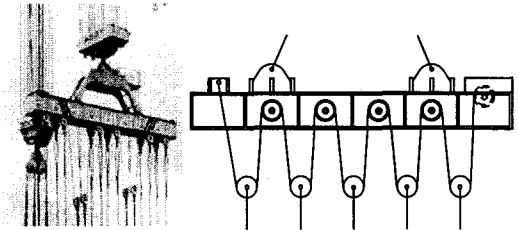


Fig. 2.1 Block loader(B/L)

그림 2.2는 블록 로더의 국부 좌표계(local coordinate system)와 모델링을 위해 단순화된 블록 로더를 나타낸다.

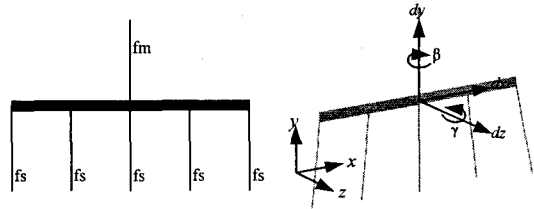


Fig. 2.2 Wire tensions and degree of freedom of B/L

블록 로더는 일직선으로 가정하여 이 직선 상에 주와이어 및 부와이어가 모두 달려 있도록 모델링하였다. 블록을 들어올린 이후 평형 상태를 찾을 때까지 블록 로더의 자세 변화량은, 길이 방향에 해당하는 국부 좌표계 x 방향의 회전자유도를 무시하여 나머지 5 자유도가 변하는 것으로 가정하였다.

2.3.2 중간 체결

중간 체결은 2개 혹은 4개의 러그를 1점 지지화하기 위한 체결 방식이다. 그림 2.3은 중간 체결의 형상을 나타내며 그림 2.4는 국부 좌표계와 모델링을 위한 단순화된 중간 체결을 나타낸다.

그림 2.4와 같이 부와이어에 걸리는 장력의 크기들은 같으며, 모든 회전 자유도가 없고 병진 자유도만 3개 존재한다.



Fig. 2.3 Hook

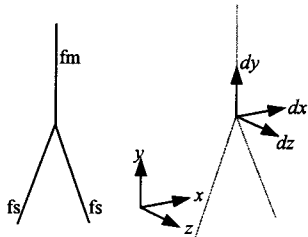


Fig. 2.4 Wire tensions and degree of freedom of hook

2.4 일반화

지금까지 제시한 가정과 3 점 지지의 제한 조건을 토대로 일반적인 경우에 대해 미지수들을 정의하였다. 그림 2.5 와 그림 2.6, 그림 2.7 에 전체 시스템, 중간 체결 및 블록 로더 등의 각 체결 시스템에서 정의된 미지수들을 나타내었다. 이들 각 체결 시스템들에 대하여 정역학 평형식을 세운다.

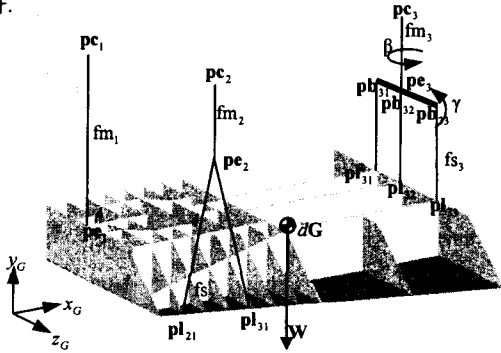


Fig. 2.5 Variables in block system

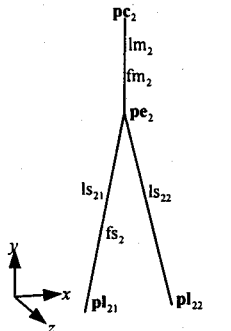


Fig. 2.6 Variables in hook

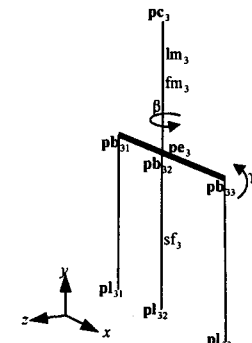


Fig. 2.7 Variables in B/L

2.4.1 미지수

그림 2.5 에서 주와이어와 블록만을 고려하면 주와이어의 장력(fm) 3 개와 블록의 무게중심의 이동 및 회전(dG)에 해당하는 6 개의 미지수를 지정할 수 있다.

그림 2.6 의 중간 체결 시스템에서는 부와이어의 장력과 중간 체결 위치의 좌표 등 총 4 개의 미지수가 지정되었다.

그림 2.7 의 블록 로더 시스템에서는 중간 체결 시스템과 비교할 때 회전 자유도가 2 개 추가되어 총 6 개의 미지수가 지정되었다. 결론적으로 블록의 경우 9 개, 중간 체결의 경우 4 개, 블록 로더의 경우 6 개가 미지수로 지정되었다.

2.4.2 수식

전체 시스템에서 정역학 힘 평형식과 모멘트 평형식을 더하여 6 개, 블록 로더인 경우 각 방향의 힘 평형식 3 개와 국부 좌표계의 x 방향 모멘트 식을 제외한 모멘트 평형식 2 개, 중간 체결의 경우 국부 좌표계의 각 방향의 힘 평형식 3 개가 세워진다. 이 외에 전체 시스템에서 주와이어의 길이 제한 조건 3 개, 블록 로더와 중간 체결의 경우 부와이어의 길이 제한 조건이 1 개씩 추가된다. 결국 블록에서 9 개, 중간 체결의 경우 4 개, 블록 로더의 경우 6 개의 비선형 연립방정식이 세워지고 이는 미지수의 수와 일치함을 알 수 있다.

이상의 내용을 정리하면 표 2.1 과 같다.

Table 2.1 Variables and formulations

Variables and formulations		Number	
Input variables	Crane points	pc_1, pc_2, pc_3	9
	Lengths of main wire	lm_1, lm_2, lm_3	3
	B/L* information	d_{d} : Relative position among points where wire is hanging	
	Sum of sling wires	$\sum_i ls_{2i}, \sum_i ls_{3i}$	$n_B + n_M$
	Weight / center of mass	$W, G(x, y, z)$	4
	Lug points	$lpt_{11}, lpt_{21}, lpt_{22}, \dots$	$3n_L$
Unknown variables	Tension of main wire	fm_1, fm_2, fm_3	3
	Tension of sling wire	fs_2, fs_3	$n_B + n_M$
	End point of main wire / B/L rotation	$pe_2, pe_3 / \beta, \gamma$	$5n_B + 3n_M$
	Equilibrium position of block	$dG(x_G, y_G, z_G, \beta_c, \beta_c, \beta_c)$	6
Formulations	Static equivalent conditions	$\sum F_i = 0, i = x_G, y_G, z_G$ $\sum M_i = 0, i = x_G, y_G, z_G$	6
	Static equivalent conditions in sub-system	$\sum F_i = 0, i = x, y, z$ $(\sum M_i = 0, i = x, y)**$	$5n_B + 3n_M$
	Length of main wire	$ pc_c - pe_c = lm_c, c = 1, 2, 3$	3
	Length of sling wire	$\sum_i pb_{ci} - pl_{ci} = \sum_i ls_{ci} \dots$ $\sum_i pe_c - pl_{ci} = \sum_i ls_{ci} \dots$	$n_B + n_M$

* block loader

**moment equation is added in case of block loader

3. 프로그래밍 및 적용

3.1 초기값 설정

앞서 표 2.1의 비선형 연립방정식의 해를 뉴턴-랩슨 방법(Newton-Raphson method)을 이용하여 구하는 데에는, 해에 충분히 가깝게 초기값을 설정하는 것이 중요하다[5,6]. 일반적으로 이 초기값을 근과 가깝게 설정하는 방법은 없지만 본 논문에서는 특정한 물리 문제를 해결하는데 뉴턴-랩슨 방법이 쓰이므로 합리적인 초기값의 근사가 가능하다.

3.1.1 블록의 평행 이동거리 및 회전각

그림 3.1과 같이 각 크레인 지지점을 pc_c ($c=1,2,3$), 주와이어의 반대편 끝점을 pe_c , 그리고 블록 로더나 중간 체결의 부와이어들이 러그와 연결된 점들을 lpt_{ci} ($i=1, \dots, \text{각 크레인에 연결된 러그의 개수}$)로 정의한다. 특히 주와이어로만 지지하는 경우 한 개의 러그에만 연결이 되므로 pe_c 는 pl_{ci} 과 같아지게 된다. 이 때 lpt_{ci} 의 평균을 구하여 각 크레인에 연결된 러그의 대표점으로 정한 후 이들 세 점을 연결하여 이를 대표 평면(representative plane)으로 정의한다. 블록의 평행 이동거리 및 회전각의 초기값을 정하기 위해서 두 개의 대표 평면을 이용한다. 그림 3.1에 두 개의 대표 평면을 블록과 와이어 쪽에 표시하였다.

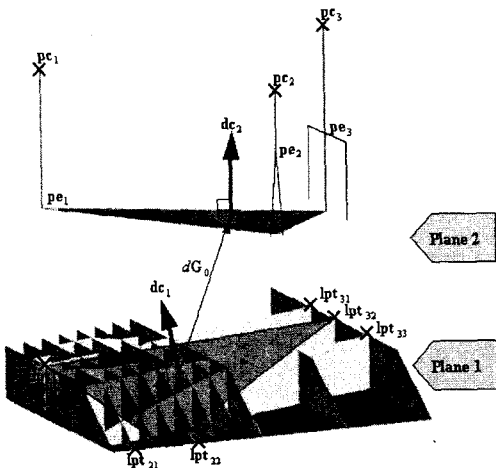


Fig. 3.1 Definition of representative plane

즉, 블록에서 대표 평면 1을 구한다. 또한 부와이어 길이의 평균과 주와이어를 더한 값만큼 각 크레인 지지점으로부터 수직 좌표(y_G)값을 차감하여 이들 세 점을 잇는 대표 평면 2를 구한다. 이제 이렇게 구한 두 대표 평면의 법선 벡터들을 방향 코사인인 dc_1, dc_2 로 바꾸어 y_Gz_G, z_Gx_G, x_Gy_G 평면에 투영(projection)시켜서 각도의 차이를 계산하면 전

체 좌표계의 x_G, y_G, z_G 축에 대한 회전각의 초기값을 합리적으로 예측할 수 있다. 또한 이동 거리의 초기값은 두 대표 평면의 무게 중심의 차이(dG_0)로 선택한다.

3.1.2 주와이어 장력

주와이어 장력은 전체 블록 자중의 3분의 1에 해당하는 값을 초기값으로 각각 지정하였다.

3.1.3 주와이어의 끝점 좌표

그림 2.5에서 pe_c 에 해당하는 점으로서 크레인 지지점 pc_c 에서 y_G 좌표값만 주와이어의 길이 lm_c 만큼 차감하였다.

3.1.4 블록 로더의 회전각

그림 2.7에서 부와이어와 블록 로더가 만나는 점들 pb_{ci} 중 최외곽 두 점을 잇는 벡터를 zx 평면으로 투영시켜 y 축을 중심으로 회전하는 각 β 의 초기값으로 정하였다. 또한 z 축을 중심으로 회전하는 각 γ 는 블록 로더가 거의 지면에 수평한 상태를 유지하므로, 초기값을 0으로 정하였다.

3.1.5 반전 시뮬레이션시 초기값

블록을 반전시키기 이전의 상태에 근거하여 초기값을 정하였으므로 블록의 기운 각도가 커질 경우 해의 양상은 일반적으로 앞서 정한 초기값으로부터 멀어지는 경향이 있다. 특히 블록 로더의 경우 정역학 평형식을 만족하여도 블록 로더가 y 축을 중심으로 회전하여 꼬이는 형태의 답을 산출하기도 하였다.

따라서 반전 시뮬레이션시 애니메이션에 필요한 프레임 수 만큼 뉴턴-랩슨 방법을 이용하여 해를 구하되, 첫번째 프레임은 앞서 정한 초기값을 사용하며 이후의 프레임들은 바로 이전 프레임의 해로 산출된 값들을 초기값으로 정하는 방법을 택하였다. 이후의 개선된 점들은 다음과 같다.

- 블록 로더의 부와이어의 꼬임이 없어졌다.
- 뉴턴-랩슨 방법의 시행 횟수가 감소하였다.

3.2 프로그램 구성

블록의 반전 시뮬레이션을 위해서 본 논문에서 작성한 프로그램은 설계자가 반전의 초기 상태와 최종 상태에 대한 정보, 애니메이션 프레임 수 등을 입력하도록 하였다.

본 논문에서 구현한 전산 프로그램은 기본적으로 Pro/ENGINEER®를 기반으로 하며 추가적인 기능은 PTC에서 제공하는 API(Application Program Interface)인 Pro/TOOLKIT™을 이용하여 프로그래밍하였다. 구체적인 개발 환경은 다음과 같다.

- 작동환경 : UNIX 혹은 Windows NT
- 프로그래밍 언어 : C

■ 상용 소프트웨어 : Pro/ENGINEER® Release 20, Pro/TOOLKIT™ Release 18

주 메뉴(main menu)의 기능을 설명하면 다음과 같다(그림 3.2 참조).

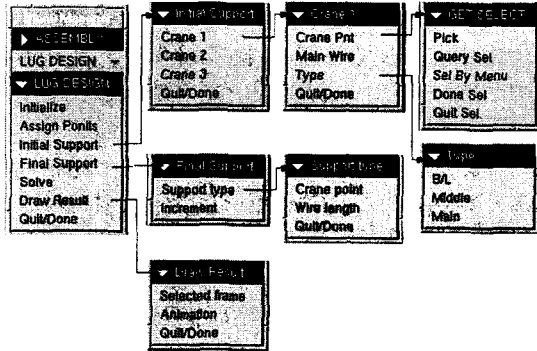


Fig. 3.2 Menu structure

- Initialize : 모든 변수들의 값을 초기화한다.
- Assign Points : CAD 모델상에서 좌표 입력시 필요한 크레인점과 러그점을 지정한다.
- Initial Support : 블록을 반전시키기 전 초기에 들어올린 상태를 입력한다.
- Final Support : 블록을 반전시킨 후의 최종 상태를 입력한다.
- Solve : 뉴턴-랩슨 방법으로 비선형 연립방정식을 풀고 결과를 텍스트 파일 형태로 저장한다.
- Draw Result : 계산 결과를 화면에 보여주고 애니메이션한다.

3.3 적용 예제

3.3.1 러그점의 변경 해석

러그점의 위치를 변경하여 하중의 변화 양상을 분석해야 할 필요가 있는 경우 사용자가 변경하고자 하는 러그점을 마우스로 클릭하여 즉시 그 결과를 볼 수 있다.

이 예제에 사용된 블록은 A220 으로 선미(After) 부분에 해당하는 블록으로 모델의 제원은 표 3.1 과 같다.

Table 3.1 Information of the block used in example 1

Block	Size (mm ³)	Weight (kg)
A220×2(P)	12440×15000×3000	95,139

블록 로더를 이용하여 2 개의 러그점을 지지한 경우 크레인 지지점의 변화 없이 1 번 주와이어의 길이를 1500mm 에서 2000mm 으로 감소시켜 반전 시뮬레이션을 한 것으로 크레인점의 변화가 없는 폴리라스 크레인 작업을 반영한 것이다. 러그점의 위치 및 시뮬레이션 결과는 그림 3.3 과 같다.

또한 1 번 주와이어의 블록 로더에 연결된 러그점 하나를 무게중심 쪽으로 변경시켜 시뮬레이션

한 결과는 그림 3.4 과 같다.

그림 3.5 는 러그점의 변경 이전과 이후의 주와이어의 장력 변화 양상을 전체 좌표계의 zG 축 방향으로의 반전 각도와 함께 표시한 것이다. 3 번 주와이어에 편중되었던 장력이 2 번과 3 번 주와이어에 고루 걸려 장력 변화 양상이 거의 비슷해지는 효과를 확인할 수 있었다.

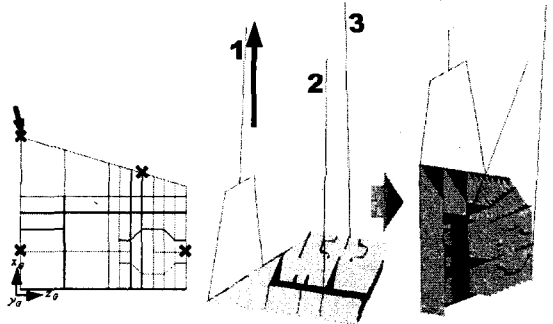


Fig. 3.3 Turnover scenario before changing lug point

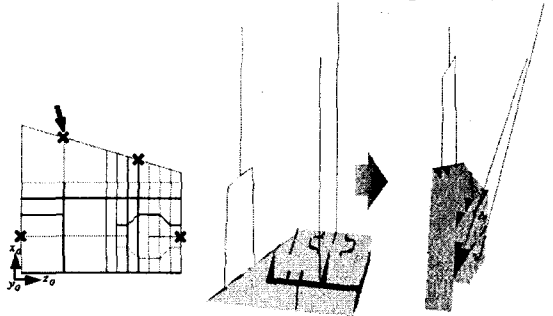
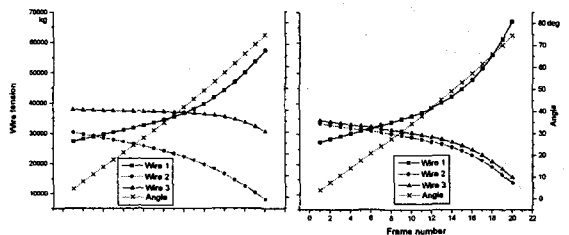


Fig. 3.4 Turnover scenario after changing lug point

또한 그림 3.3 의 경우 2 번 주와이어가 3 번 주와이어에 비해 다소 많이 기울어 블록의 거동이 불안했으나 그림 3.4 의 경우 이러한 주와이어의 기울기 편중 현상이 감소되어 크레인 블록의 자세 제어가 수월해진 효과를 확인하였다.



(a) before (b) after changing lug point

Fig. 3.5 History of tension of main wires

3.3.2 크레인 지지점을 변경하는 시뮬레이션

이 예제는 첫번째 예제와는 달리 주와이어의

길이를 변경하지 않고 크레인 지지점의 좌표를 변경하는 시뮬레이션이다. 따라서 집 크레인(Jib crane)을 이용한 반전 작업과 같이 크레인이 움직여 블록을 반전시키는 작업에 적용한 예이다.

이 예제에 사용된 블록은 E420 으로 엔진 블록으로서 모델의 체원은 표 3.2 과 같다.

Table 3.2 Information of the block used in example 3

Block	Size (mm ³)	Weight (kg)
E420×2(P)	20000×18000×9000	126,574

그림 3.6 은 이 모델을 1 번 크레인 점의 좌표를 지면과 수직인 y_G 방향으로 20000mm 만큼 감소, x_G 방향으로 3000mm 만큼 증가시켜 20 개의 프레임을 사용한 반전 시뮬레이션 모습이다.

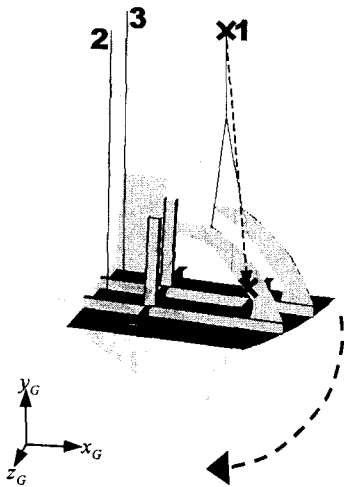


Fig. 3.6 Simulation of moving crane point

그림 3.7 은 각 주와이어에 작용하는 장력의 변화 양상을 전체 좌표계의 z_G 축 방향 반전 각도에 따라 표시한 것으로, 1 번 주와이어를 내리면 이 와이어의 장력은 감소하나 나머지 2 번, 3 번 주와이어의 장력은 증가하는 양상을 관찰할 수 있다. 특히 이 예제는 1 번 크레인 지지점의 위치를 임의로 이동시킬 수 있으므로 크레인의 개선된 조종 방법을 제시해 줄 수 있다.

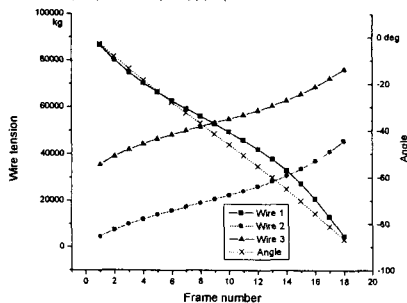


Fig. 3.7 History of tension of main wires

4. 결론

조선소의 특별한 환경이나 크레인의 제한 조건을 반영하여 일반적인 블록의 이동 및 반전 시뮬레이션이 가능한 전산 프로그램을 개발하였다.

기본적으로 정역학의 개념으로 문제에 접근하였으나, 다양한 작업 방법에 적용할 수 있도록 일반화하고 비선형 연립방정식으로 수식화한 후 뉴턴-랩슨 방법의 약점을 보완키 위해 초기값 설정 과정을 프로그램 내에 추가하였다. 보통의 시뮬레이션과는 달리 평형 상태를 추적하여야 하므로 애니메이션에 필요한 프레임을 정의, 각각의 프레임에 대하여 해를 산출하고 이들을 연결시켜 화면상에 애니메이션을 구현하였다.

작업 과정중의 각 와이어와 러그점에서 장력 및 반력을 산출함으로써 과적 여부를 판단할 수 있으며, 러그점에서의 반력 방향(각도)을 산출하여 부착 가능한 러그를 선택할 수 있도록 하였다.

힘의 편중이 발생할 때 크레인이나 러그점을 변경하여 재해석이 수월하도록 사용자 편의를 고려하였으며 장력의 변화 양상을 화면상에 시뮬레이션하고 텍스트 파일로 출력할 수 있도록 하였는데, 특히 CAD 프로그램인 Pro/ENGINEER®를 기반으로 작성되었으므로 유한 요소 해석의 입력자료로써 곧바로 활용할 수 있다.

후 기

본 연구는 “블록의 반전 및 이동시 변형 제어를 위한 최적 설계 시스템 개발” 과제의 일환으로 현대 중공업으로부터 지원 받았음을 밝힙니다.

참고문헌

- (1) 대우중공업 설계기술연구팀, "Goliath Crane Lifting 계산 프로그램 개발 보고서", 1998
- (2) Toshiharu Nomoto, Shoji Takechi, Kazuhiro Aoyama, "Development of Simulation System for Erection Stage in Product Definition System", 일본 조선학회논문집 제 176 호 pp. 575~586, 1994
- (3) 현대중공업 기술개발부, "Block lifting 작업 기준", 1998
- (4) William H. Press, Saul A. Teokolsky, *Numerical Recipes in C*, 2nd Edition, Cambridge University Press, 1998
- (5) Steven C. Chapra, Raymond P. Conale, *Numerical Methods for Engineers*, McGrawHill, 1988
- (6) 송만석, 장건수, *수치해석학*, 도서출판 생능, 1986