

크레인 로프의 신장을 고려한 침몰선체의 인양력 해석

최경식* · 신맹기*

*한국해양대학교 해양개발공학부

Lifting Analysis for a Sunken Ship in Consideration of Elongation of Crane Ropes

KYUNG-SIK CHOI* AND MAENG-KEE SHIN*

*Division of Ocean Development Engineering, Korea Maritime University, Busan, Korea

KEY WORDS: Marine Accidents 해난사고, Sunken Ships 침몰선박, Salvage 구난, Lifting Force Analysis with 4 Cranes 4기 크레인에 의한 인양력 해석

ABSTRACT: This study focuses on an analytical approach to calculate crane-lifting forces for a sunken ship, with consideration to elongation of crane ropes. The method takes into account the relation of lifting forces acting in wire rope slings to the inclination of the ship's hull, including the effect of lug positions. For lifting analysis, the Euler angles are defined to represent the inclination of a sunken ship in developing the static force and moment equations. An additional compatibility condition is introduced in order to solve an indeterminate lifting analysis problem with 4 cranes. A set of lifting forces along the 4 crane ropes is calculated. A 3-dimensional example of the G/T 1500 oil tanker is analyzed. The results show that the information obtained by the method could be useful to engineers when conducting salvage work.

1. 서 론

근래 세계적인 해상 교통량의 증가에 따라 충돌, 좌초와 같은 각종 해난사고가 자주 발생하고 있다. 1989년 알래스카 연안에서 좌초한 유조선 Exxon Valdez호 사건은 엄청난 규모의 적재유를 유출하여 역사상 유례없는 자연환경파괴와 막대한 복구비용을 지출하게 하였던 기록을 남겼다. 근래의 사건으로 1997년 1월 일본의 후쿠이현 해안에서 폭풍으로 노후된 선체가 부러지면서 침몰한 러시아의 유조선 Nakhodka호 사건 (병커C유 19,000톤 유출), 1999년 프랑스 브레스트 연안에서 좌초 후 침몰한 Erika호 사건 (병커C유 14,000톤 유출)이 있었으며, 최근에는 2002년 11월 스페인 북부 해안에서 침몰한 유조선 Prestige호에서 27,000톤의 적재유가 유출되어 Exxon Valdez호 피해 규모의 두 배에 이르는 최악의 해난사고를 기록하였다.

우리 나라에서도 1995년 7월 여수 근해에서 태풍에 대피 중이던 씨프린스호가 좌초되어 5,000톤 규모의 연료유와 적재유가 유출되었으며 이로 인해 남해안에서는 광범위한 지역에 해양오염과 함께 양식어장의 황폐화로 인해 막대한 경제적인 손실이 발생하였다.

그리고 이러한 대형 해난사고 외에도 중소형 선박의 해난사고도 자주 발생하였는데 해양경찰청의 국내 해난사고 통계에 따르면 2000년까지 인명피해는 조금씩 감소 추세를 보이고 있

으나 해난사고 건수는 오히려 증가추세에 있다. 이는 상대적으로 대형 선박의 사고는 줄어들고 있지만 중소형 선박의 해난사고가 증가하고 있음을 암시한다 (Fig. 1 참조; 해양수산부, 2002). 국내에서 2001년에 발생한 해난사고의 종류별 현황을 보면 충돌, 좌초에 의한 사고가 전체의 24%, 기관손상에 의한 사고가 22%에 이른다 (Table 1, 해양경찰청, 2001). 하지만 기관손상에 의한 사고는 대부분 어선에서 발생하고 있으며 비어선의 경우는 충돌, 좌초에 의한 사고가 대부분을 차지한다고 볼 수 있다.

소형 어선이 선종별 해난사고의 절대적인 다수를 차지하고는 있지만 인명보호와 환경오염의 차원에서 볼 때 중소형 유조선이나 여객선 사고에 대한 대응에 더 많은 관심을 가지게 한다. 선박의 해난사고 중 기관고장의 경우를 제외한 좌초, 충돌, 화재, 전복, 침수 등이 실질적으로 사후 신속한 대응이 필요한 급박한 사고유형이라 할 수 있는데 이로 인해 선체가 침몰한 경우 인양작업이 어려워 대체로 선체를 포기하는 경향이였다. 하지만 침몰된 선체에서 유류 유출이 계속 진행되거나 여객선과 같이 많은 승객이 선체와 함께 희생된 경우, 그리고 선박이 항만이나 항로 가운데 침몰하여 타 선박의 운항에 위협이 되는 경우에는 신속하게 선체를 인양할 필요가 있다. 현재 국내외를 막론하고 구난업체나 관련 기관에서는 공학적으로 검증받을 수 있는 구난기술 확보에 관심이 많다 (Milwee, 1992; Yang, 1992).

침몰된 선박의 인양 시 선체의 어느 지점을 끌어 올릴 것인지 결정하고, 인양 중 선체의 경사와 해상 크레인의 인양

제1저자 최경식 연락처: 부산광역시 영도구 동삼동 1번지

051-410-4324 kchoi@hanara.hhu.ac.kr

력 사이의 관계를 고려하여 적절한 인양작업을 수행하는 것이 매우 중요한 문제이다. 본 연구는 국내 해난사고의 주종을 이루는 중소형 침몰선박의 인양 문제를 다루고 있는데 육상에서 크레인 4기를 이용하여 중량물을 들어올리는 방법에 대한 해석법을 제시하고자 한다.

하지만 크레인 로프에 걸리는 적정 하중은 크레인이 3기까지 배치되었을 경우에만 정역학적으로 해석이 가능하기 때문에, 크레인 4기가 조합된 경우에 대해서는 현실적인 설계 가이드라인을 제시할 수 없다. 추가적으로 인양물체와 크레인 로프 사이의 적합조건을 사용하지 않으면 미지수의 개수보다 방정식의 수가 적은 문제가 되어 정역학적인 평형방정식만으로는 해결할 수 없는 부정정(indeterminate) 문제가 되기 때문이다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 크레인 로프의 변형을 생각하지 않았던 선행연구(최경식 등, 2000)를 보완하여 4기 크레인 로프의 신장을 고려한 이론적 해석법을 제시하였다. 그리고 연구의 적용사례로서 G/T 1,500톤급의 침몰 유조선의 인양에 대해 계산하였다.

Table 1 Categories of marine casualties in 2001 (해양경찰청, 2001)

사고유형	비율(%)	사고유형	비율(%)
충돌	24	조난	4
기관손상	22	전복	3
침몰	12	인명사상	3
화재	10	추진기손상	1
좌초	10	기타	11



Fig. 1 Trends of the numbers of marine accidents in Korean waters (해양수산부, 2002)

2. 4기 크레인 조합에 의한 인양력 해석

4기 크레인에 의한 인양력 문제를 해석하기 위하여 본 연구에서는 먼저 정역학적 조건을 이용하여 크레인의 인양력을 추정하는 과정을 설명한 뒤, 나머지 1개의 잉여 미지력을 결정하기 위해 크레인 로프의 신장을 고려하는 계산하는 과정을 설

명하기로 한다. 여기서 인양물체는 자체 변형이 없는 강체(rigid body)로 이상화하였다.

여러 대의 크레인을 이용하여 중량물을 들어올릴 때 바람이나 파도에 의해 크레인 자체나 크레인 붐(boom)이 움직이는 영향을 무시하더라도, 크레인 사이의 상대적인 조종의 차이에 의해 불균형 문제가 발생하게 되며 중량물은 수평상태를 유지하지 못하게 되며 경사가 발생하게 된다. 이러한 경사나 회전으로 인해 애초에 각 크레인 로프에 걸리는 인양력에 불균형이 발생한다.

일반적으로 3차원 직각좌표계에서 좌표계의 회전은 다음 식으로 표현된다 (Fig. 2).

$$x_i' = \alpha_{ij} x_j \tag{1}$$

여기서 α_{ij} 는 9개의 방향여현으로 표현되지만 $\alpha_{ij}\alpha_{ik} = \delta_{jk}$ 으로서 6개의 제약조건이 부여되므로 실제로는 3개의 회전각만 독립적이다. 그리고 δ_{jk} 는 Kronecker delta이다.

물체의 회전을 포함하는 평형방정식을 얻기 위하여 오일러 회전각 ψ , θ , ϕ 를 x , y , z 좌표축에 관한 회전행렬의 곱으로 표현하면 다음과 같다.

$$R = R_x(\psi) R_y(\theta) R_z(\phi) \tag{2}$$

여기서

$$R_x(\psi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & -\sin \psi \\ 0 & \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix}$$

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}$$

$$R_z(\phi) = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

인양물체를 들어올리는 4기 크레인 로프의 인장력 및 그 위치벡터를 각각 \vec{T}_α , \vec{r}_α ($\alpha = 1, 2, 3, 4$), 전체 중량 및 그 위치벡터를 \vec{W} , \vec{r}_c 라 하면 힘과 모멘트의 정역학적인 평형방정식은 다음과 같다.

$$\vec{W} + \sum_\alpha \vec{T}_\alpha = \vec{0} \tag{3}$$

$$\vec{r}_c \times \vec{W} + \sum_\alpha \vec{r}_\alpha \times \vec{T}_\alpha = \vec{0} \tag{4}$$

여기서

$$\vec{W} = -W\hat{j}, \quad \vec{T}_\alpha = T_\alpha\hat{j}$$

$$\vec{r}_c = x_c\hat{i} + y_c\hat{j} + z_c\hat{k}, \quad \vec{r}_\alpha = x_\alpha\hat{i} + y_\alpha\hat{j} + z_\alpha\hat{k}$$

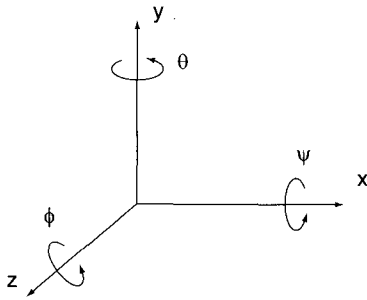


Fig. 2 Rotation of axes

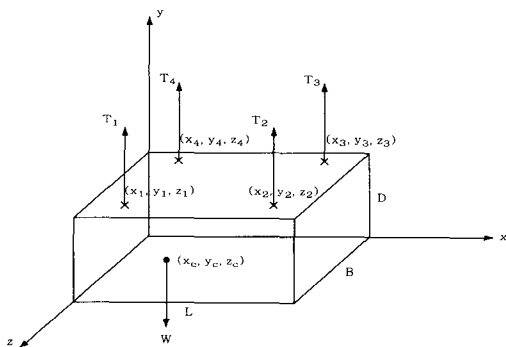


Fig. 3 Three dimensional model for 4 crane lifting ropes

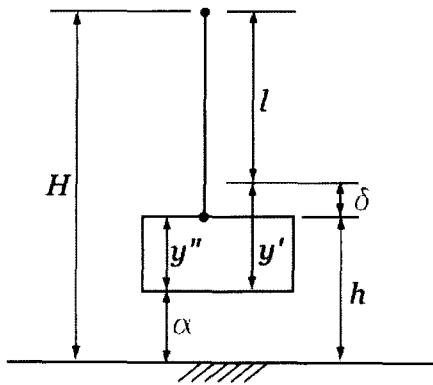


Fig. 4 Model geometry and crane rope elongation

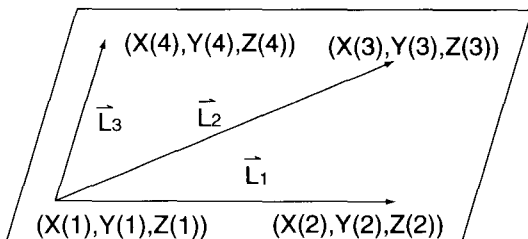


Fig. 5 Position vectors $\vec{L}_1, \vec{L}_2, \vec{L}_3$ on the imaginary plane

언급한 바와 같이 크레인 로프에 걸리는 하중은 크레인이 3기까지 배치되었을 경우만 정역학적으로 해석이 가능하고 4기 크레인이 조합된 경우에 대해서는 추가 조건을 사용하지 않으면 미지수의 개수보다 방정식의 수가 적은 문제가 되어 부정정 문제가 된다. 일반적으로 아주 복잡한 식으로 표현되지만 아주 간단한 경우에 대해서는 T_1, T_2, T_3 를 잉여 미지력 T_4 의 함수로 나타낼 수 있다.

부정정 문제를 해결하기 위해서는 앞서의 힘과 모멘트 평형 조건식 이외에 추가로 조건이 더 필요한데 이것은 크레인 로프의 신장을 고려하는 변형의 적합조건을 도입하여 해결할 수 있다.

크레인 로프의 길이를 l , 로프의 인장력을 T 라 하면 로프의 신장량 δ 는 다음과 같이 계산된다. EA 는 로프의 강성을 나타낸다.

$$\delta = \frac{Tl}{EA} \tag{5}$$

바닥에서 크레인 붐 끝까지의 높이를 H 라 하면 (Fig. 4)

$$\begin{aligned} H &= l + \delta + h \\ h &= a + y'' \\ y'' &= y' - \delta \end{aligned} \tag{6}$$

여기서 h 는 바닥에서 인양물체에 부착된 러그까지 거리이다. 그리고 a 는 물체가 바닥에서 떨어진 높이, y' 는 물체의 밑면에서 러그가 부착된 위치까지의 거리 (로프의 신장 무시), y'' 는 로프의 신장을 고려한 상태에서 물체의 밑면에서 러그가 부착된 위치까지의 거리이다.

$$\text{따라서 } \delta = \frac{T}{EA} (H - a - y') \text{ 로 표현된다.}$$

한편 인양물체는 강체로 보았기 때문에 물체가 공중에 들려 올려진 상태에서도 러그가 위치한 네 지점은 물체가 바닥에 놓여있을 때와 마찬가지로 동일한 평면 (가상평면: 물체가 바닥에 놓인 상태에서 제일 위쪽에 위치한 러그의 좌표를 기준으로 만든 수평면, Fig. 5 참조)상에 놓여 있다고 볼 수 있다. 이 가상평면과 실제 러그가 위치한 지점 사이의 크레인 로프의 길이에 비해 작다고 보아 그 신장량은 무시한다. 따라서 애초에 물체에 부착된 러그는 반드시 같은 평면에 놓일 필요는 없다. 러그 부착위치를 연결하는 직선은 가상평면 상에서 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \vec{L}_1 &= (x_2 - x_1)\hat{i} + (y_2 - y_1)\hat{j} + (z_2 - z_1)\hat{k} \\ \vec{L}_2 &= (x_3 - x_1)\hat{i} + (y_3 - y_1)\hat{j} + (z_3 - z_1)\hat{k} \\ \vec{L}_3 &= (x_4 - x_1)\hat{i} + (y_4 - y_1)\hat{j} + (z_4 - z_1)\hat{k} \end{aligned} \tag{7}$$

벡터 \vec{L}_1, \vec{L}_2 가 만드는 평면에 수직인 벡터를 \vec{n} 이라 하면

$$\vec{n} = \frac{\vec{L}_1 \times \vec{L}_2}{|\vec{L}_1 \times \vec{L}_2|} \quad (8)$$

이고 위치벡터를 이용하여 다시 표현하면 다음과 같다.

$$\vec{n} = \frac{(\vec{r}_2'' - \vec{r}_1'') \times (\vec{r}_3'' - \vec{r}_1'')}{|(\vec{r}_2'' - \vec{r}_1'') \times (\vec{r}_3'' - \vec{r}_1'')|} \quad (9)$$

여기서 \vec{r}_a'' 는 이미 회전된 상태에서 물체에 부착된 러그의 위치벡터로서 로프의 신장을 고려한 상태이며 $\alpha = 1, 2, 3, 4$ 각각에 대하여 $\vec{r}_a'' = \vec{r}_a' + \delta_a$ ($\delta_a = -\delta_a j$) 이다. \vec{r}_a' 는 크레인 로프의 신장이 고려되지 않은 상태의 러그의 위치 벡터이다. 따라서 크레인 로프의 적합조건식은 벡터 $\vec{L}_1, \vec{L}_2, \vec{L}_3$ 가 같은 평면에 놓이기 위한 조건은 다음과 같다.

$$\vec{n} \cdot \vec{L}_3 = 0 \quad (10)$$

이상과 같은 절차를 통하여 크레인 로프 4개에 걸리는 인양 력인 T_1, T_2, T_3, T_4 을 계산할 수 있는데 본 연구에서는 symbolic 수치해석 프로그램 *Mathematica* (Wolfram Research Inc., 2002)를 이용하여 엄밀해를 구하였다. 3차원 공간에서 러 그 4개의 위치와 무게중심의 위치, 물체의 총중량과 크레인 로 프 4개의 길이, 그리고 3개의 축방향의 경사각을 변수로 하는 연립방정식의 해는 대단히 복잡하므로 본 논문에서는 그 전개 된 형태를 모두 수록하지는 않았다 (부록 참조).

하지만 몇 가지 단순화중에 대한 해의 정확성을 확인함으로 써 엄밀해가 올바른 것이라는 점을 확인할 수 있다. 한 예로서 Fig. 6은 좌우대칭이고 무게중심도 한가운데인 직육면체 블록 의 경우에 대한 계산결과를 보여주고 있다. 수평일 때는 정확 히 전체 중량 904톤의 1/4인 226톤이 각 크레인 로프에 걸리 고, 경사 시에는 물체가 대칭 형상인 관계로 경사각 변화에 따 라 대칭인 결과를 보여주고 있다.

3. 침물선박에 대한 해석사례

본 논문에서는 제시한 계산식을 이용한 해석 방법의 유용성 을 검증하기 위하여 G/T 1500톤급 침물선박에 대하여 3차원 의 인양력을 계산하였다. 해석 사례로 사용된 선박은 Fig. 7에 나타나 있듯이 길이 82.05 m, 수선간 길이 74 m, 폭 12 m, 깊 이 6 m, 그리고 만재홀수 5.684 m 이며 중앙부에 종격벽을 가 지고 좌우 각각 4개의 원유저장탱크가 배치되어 있는 연근해 용 소형 유조선이다. 이는 실제 포항 근해에 침몰된 선박으로 서 전체 중량은 904톤이다.

계산은 선체가 좌우대칭으로 해저면에 똑바로 놓여 있는 경 우에 대하여 각각 수행하였다. 모든 구획은 완전히 침수된 경 우를 가정하였다. 여기서 완전침수란 선박 내의 모든 공간을 해수로 채우고 있는 것으로 간주한 것이다.

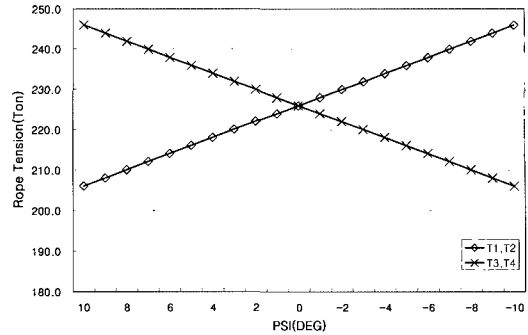


Fig. 6 Lifting rope tension vs. angle ϕ for a symmetric rectangular block

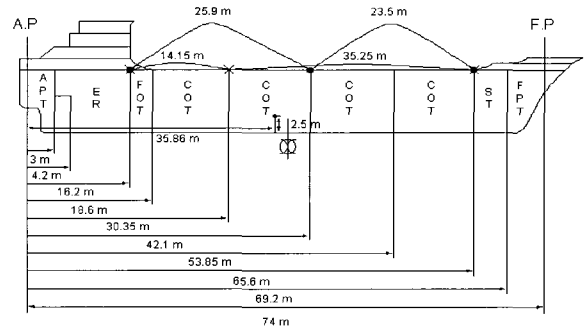


Fig. 7 Ship model for a sample calculation

Fig. 7에서 보는 바와 같이 선체가 놓여 있는 상태는 선수부 가 x축의 양의 방향으로 놓여 있고, 선저부는 x-z평면에 놓여 있으며, 원점의 위치는 크기 L, B, D 로 이루어지는 선박을 둘러싼 직육면체에서 좌현(port side) 후방 아래 꼭지점으로 삼았다.

본 침물선체에 대한 계산결과로 각 크레인 로프에 걸리는 인 양력의 변화를 선체의 경사각에 따라 표시한 것이 Fig. 8과 Fig. 9에 나타나 있다. 인양 중인 선체의 경사각에 따라 크레인 4기에 작용하는 인양력의 크기가 유일하게 결정된다. Fig. 8은 횡경사 가 10° 발생된 상태에서 선체가 전후방향으로 경사지는 경우에 대한 크레인 로프 4개의 인양력을 나타낸 것이고 Fig. 9는 이미 어느 정도 (10°) 종경사가 된 상태에서 선체가 좌우방향으로 횡 경사가 이루어지는 경우에 대한 크레인 로프 4개의 인양력을 나 타낸 것이다. Fig. 9에서 보듯이 횡경사각 변화에 따른 로프 인 양력의 변동이 종경사각 변화시의 그것보다 큰 것을 알 수 있다.

이와 비교하여 Fig. 10은 선행연구에서 수행하였던 결과로서 T_4 인양력 변화에 따른 T_1, T_2 그리고 T_3 인양력의 변화 를 경사각 ϕ 의 함수로 나타낸 그림이다. 크레인 로프의 신장 을 고려하지 않았기 때문에 경사각에 따라 로프의 인양력을 하나의 값으로 결정할 수 없다는 것을 보여주고 있다. T_4 가 증가하면 T_2 가 증가하는 대신 T_1 과 T_3 는 감소하고 있

다. -6° 에서 $+6^\circ$ 까지 12° 정도 선박이 좌우로 경사된다면 약 60톤의 인장력 변화가 나타나기 때문에 특히 ϕ 방향의 경사가 발생하지 않도록 주의를 기울여야 할 것이다. 이에 반해 ϕ 방향의 경사각은 인장력 변화에 거의 영향을 주지 않는다. 이는 무게 중심을 사이에 두고 인장력이 가해지는 지점의 간격이 크면 해당 지점을 포함하는 평면의 회전각 변화가 인장력에 미치는 영향이 작고, 간격이 작으면 그 영향이 크다는 것을 말해 준다. 이 결과는 크레인 로프의 신장을 고려하여 해를 구한 본 연구에서도 다시 확인되고 있다.

한편 침몰선체의 경사각 변화에 따른 로프 인장력의 증분변화를 Table 3에 정리하였다. 이 표를 이용하여 선체를 인양 시 수동으로 조작하는 각 크레인의 인장력 변화를 감지함으로써 선체의 경사 정도를 파악할 수 있고 거꾸로 과도한 선체의 경사를 예방함으로써 크레인 조작의 안전을 확보할 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내 해난사고의 주종을 이루는 중소형 침몰 선박의 인양 문제를 다루고 있으며, 크레인 4기의 인양력을 결정하는 계산법을 제시하였다.

크레인 4기에 의한 인양력 해석은 정역학적인 힘과 모멘트 평형조건 만으로는 해석이 불가능한 부정정 문제이므로 본 논문에서는 크레인 로프의 탄성변형을 적합조건으로 추가하여 해결하였고 이를 이용하여 크레인 로프의 인양력 T_1, T_2, T_3

T_4 를 인양물체의 회전각 변화가 고려된 작업조건에 따라 유일하게 결정할 수 있었다.

본 연구의 적용사례로서 G/T 1500톤급의 침몰 유조선의 인양에 대해 계산해 보았다. 크레인 러그의 부착 지점은 선체구조의 특성상 격벽부위로 결정되었고, 좌우 대칭인 형상 때문에 이 위치에 가해지는 인양력의 변화는 인접한 위치의 인장력은 서로 반비례하고 대각선으로 마주보는 위치의 인장력은 비례적으로 변화한다는 것을 알 수 있었다. 무엇보다도 러그 사이의 간격은 선체가 이루는 경사각과 밀접한 관계가 있음을 파악할 수 있었다. 본 해석을 뒷받침하는 실험이나 현장의 사례를 확보하는 보완 연구가 필요할 것으로 사료된다.

Table 2 Location of lugs and center of gravity

러그의 위치	x(m)	y(m)	z(m)
T_1	16.2	6	12
T_2	65.6	6	12
T_3	65.6	6	0
T_4	16.2	6	0
인양물체의 무게중심	35.86	2.5	6
인양물체의 총중량	$W = 904 \text{ Ton}$		

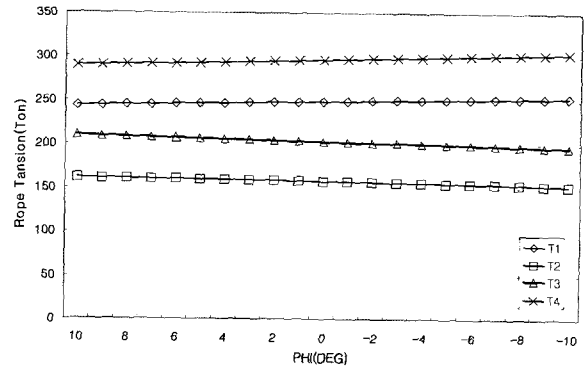


Fig. 8 Lifting rope tension vs. angle ϕ for a lifting body with $\phi = 10^\circ$

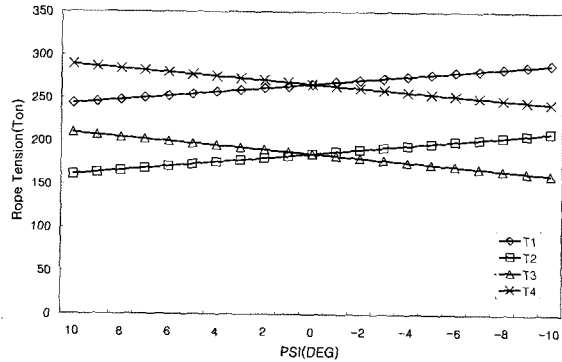


Fig. 9 Lifting rope tension vs. angle ϕ for a lifting body with $\phi = 10^\circ$

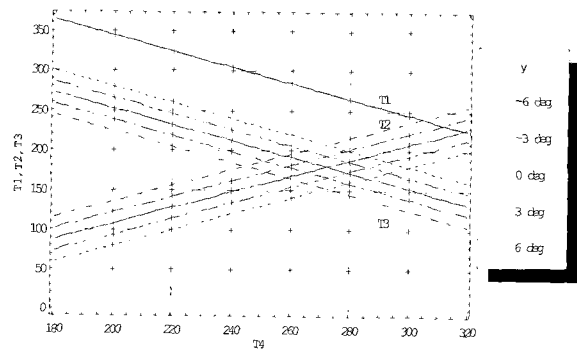


Fig. 10 Lifting rope tension T_1, T_2, T_3 vs. T_4 with the change of angle ϕ in case of zero elongation of crane ropes (최경식 등, 2000)

아울러 본 연구는 침몰 선체의 인양에 관심을 두고 수행되었지만 해석 방법은 육상에서의 중량물 이동에도 사용할 수 있다. 특히 조선소에서 조립된 대형 선체블록을 여러 개의 크레인을 사용하여 운반하고자 할 경우 크레인의 인양력 계산에 본 연구결과를 이용할 수 있을 것이다.

Table 3 Changes in rope tension according to the inclination of a lifting body

ψ		$10^\circ -$	$5^\circ -$	$0^\circ -$	$-5^\circ -$
		5°	0°	5°	-10°
10°	$\Delta T1$	-14.16	-14.27	-14.46	-14.76
	$\Delta T2$	-9.89	-9.34	-8.87	-8.49
	$\Delta T3$	15.58	14.94	14.48	14.18
	$\Delta T4$	8.47	8.66	8.86	9.07
5°	$\Delta T1$	-14.19	-14.35	-14.62	-15.00
	$\Delta T2$	-9.24	-8.80	-8.45	-8.16
	$\Delta T3$	14.93	14.41	14.05	13.85
	$\Delta T4$	8.50	8.75	9.02	9.31
0°	$\Delta T1$	-14.40	-14.63	-14.96	-15.41
	$\Delta T2$	-8.76	-8.44	-8.20	-8.02
	$\Delta T3$	14.45	14.05	13.80	13.71
	$\Delta T4$	8.71	9.02	9.36	9.72
-5°	$\Delta T1$	-14.79	-15.08	-15.47	-16.00
	$\Delta T2$	-8.46	-8.26	-8.13	-8.06
	$\Delta T3$	14.15	13.87	13.73	13.75
	$\Delta T4$	9.10	9.47	9.87	10.31

참 고 문 헌

최경식, 이상갑, 손경호, 신맹기 (2000). "4기 크레인에 의한 침몰 선박의 인양력 계산", 한국해양공학회지, 제14권, 제1호, pp 17-22.

해양경찰청 (2001). 해난사고통계연보.

해양수산부 (2002). 해양수산통계연보.

Milwee, W.I. (1992). Modern Marine Salvage, The Society of Naval Architects and Marine Engineers.

Wolfram Research Inc. (2002) Mathematica for Windows, ver. 4.2.

Yang, G.L. (1992). "Calculations for Refloating Grounded Ships", Marine Technology Society Journal, Vol 26, No 3, pp 39-46.

부 록

크레인의 인양력 계산

$$T_4 = EA [-(x'_4 - x'_1)(y'_2 - y'_1)(z'_3 - z'_1) - (x'_4 - x'_1)(z'_2 - z'_1)(y'_3 - y'_1) + (y'_4 - y'_1)(x'_2 - x'_1)(z'_3 - z'_1) - (y'_4 - y'_1)(z'_2 - z'_1)(x'_3 - x'_1) - (z'_4 - z'_1)(x'_2 - x'_1)(y'_3 - y'_1) + (z'_4 - z'_1)(y'_2 - y'_1)(x'_3 - x'_1) - [(x'_4 - x'_1)(z'_3 - z'_1) - (x'_4 - x'_1)(z'_2 - z'_1) - (x'_2 - x'_1)(z'_3 - z'_1) - (z'_2 - z'_1)(x'_3 - x'_1) - (z'_4 - z'_1)(x'_2 - x'_1) - (z'_4 - z'_1)(x'_3 - x'_1)] \cdot (H_1 - a - y'_1)W \cdot [\frac{(z'_c - z'_3)(x'_2 - x'_3) - (x'_c - x'_3)(z'_2 - z'_3)}{(z'_1 - z'_3)(x'_2 - x'_3) - (x'_1 - x'_3)(z'_2 - z'_3)}] - [-(x'_4 - x'_1)(z'_3 - z'_1) - (z'_4 - z'_1)(x'_3 - x'_1)] \cdot (H_2 - a - y'_2)W \cdot [\frac{(z'_c - z'_1)(x'_3 - x'_1) - (x'_c - x'_1)(z'_3 - z'_1)}{(z'_2 - z'_1)(x'_3 - x'_1) - (x'_2 - x'_1)(z'_3 - z'_1)}] - [(x'_4 - x'_1)(z'_2 - z'_1) - (z'_4 - z'_1)(x'_2 - x'_1)] \cdot (H_3 - a - y'_3)W \cdot [\frac{(z'_c - z'_2)(x'_1 - x'_2) - (x'_c - x'_2)(z'_1 - z'_2)}{(z'_3 - z'_2)(x'_1 - x'_2) - (x'_3 - x'_2)(z'_1 - z'_2)}] - [(x'_4 - x'_1)(z'_3 - z'_1) - (x'_4 - x'_1)(z'_2 - z'_1) - (x'_2 - x'_1)(z'_3 - z'_1) - (z'_2 - z'_1)(x'_3 - x'_1) - (z'_4 - z'_1)(x'_2 - x'_1) - (z'_4 - z'_1)(x'_3 - x'_1)] \cdot (H_1 - a - y'_1)W \cdot [\frac{(z'_4 - z'_3)(x'_2 - x'_3) - (x'_4 - x'_3)(z'_2 - z'_3)}{(z'_1 - z'_3)(x'_2 - x'_3) - (x'_1 - x'_3)(z'_2 - z'_3)}] - [-(x'_4 - x'_1)(z'_3 - z'_1) - (z'_4 - z'_1)(x'_3 - x'_1)] \cdot (H_2 - a - y'_2)W \cdot [\frac{(z'_4 - z'_1)(x'_3 - x'_1) - (x'_4 - x'_1)(z'_3 - z'_1)}{(z'_2 - z'_1)(x'_3 - x'_1) - (x'_2 - x'_1)(z'_3 - z'_1)}] - [(x'_4 - x'_1)(z'_2 - z'_1) - (z'_4 - z'_1)(x'_2 - x'_1)] \cdot (H_3 - a - y'_3)W \cdot [\frac{(z'_4 - z'_2)(x'_1 - x'_2) - (x'_4 - x'_2)(z'_1 - z'_2)}{(z'_3 - z'_2)(x'_1 - x'_2) - (x'_3 - x'_2)(z'_1 - z'_2)}] + [(x'_2 - x'_1)(z'_3 - z'_1) - (z'_2 - z'_1)(x'_3 - x'_1)] \cdot (H_4 - a - y'_4)W$$

그리고 T_1 T_2 T_3 는 T_4 를 (3)식과 (4)식에 대입하여 얻을 수 있다.

2003년 5월 2일 원고 접수
2003년 6월 12일 최종 수정본 채택