

# Wire Rope Dynamics 기반의 조선용 탑재 크레인 동역학 시뮬레이션

## Dynamic Simulation of a Shipbuilding Erection Crane based on Wire Rope Dynamics

차 주 환\*      구 남 국\*\*      노 명 일†      이 규 열\*\*\*  
Cha, Ju-Hwan      Ku, Nam-Kug      Roh, Myung-Il      Lee, Kyu-Yeul

### 요 지

와이어 로프(wire rope)는 여러 가닥의 얇고 긴 철사를 감아서 밧줄과 같이 만든 것으로 굽힘과 비틀림 하중에 비해 축 하중에 더 크게 저항할 수 있는 특징을 가지고 있다. 해상 크레인, 갠트리 크레인, 크롤러 크레인 등과 같이 선박 또는 해양 구조물의 탑재를 위해 사용되는 조선용 탑재 크레인은 이러한 와이어 로프를 이용해 큰 중량의 블록들을 들거나 내리고 있다. 따라서 블록의 안전한 탑재를 위해서는 와이어 로프에 대한 동역학적 특성을 잘 파악해야 한다. 본 연구에서는 블록 탑재 시 크레인의 와이어 로프에 작용하는 장력과 비틀림 모멘트에 대한 계산식을 유도하고, 이를 기반으로 한 조선용 탑재 크레인의 동역학 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과, 개발된 시뮬레이션 방법이 실제 조선소의 안전한 블록 탑재 과정에 충분히 적용할 수 있음을 확인하였다.

**핵심용어** : 와이어 로프, 동역학 시뮬레이션, 탑재 크레인, 블록 탑재, 조선

### Abstract

A wire rope is comprised of several metal wires which are wound together like a helix and it can resist relatively large axial loads, as compared with bending and torsional loads. A shipbuilding crane for erection such as a floating crane, a gantry crane, and a crawler crane hoists up and down heavy blocks by using these wire ropes. Thus, it is necessary to find dynamic properties of a wire rope in order to safely lift the blocks using the crane. In this study, a formula for calculating the tension and torsional moment acting on wire ropes of the crane was derived based on the existing study, and then dynamic simulation of the crane was performed based on the formula. The result shows that the dynamic simulation can be applied to find the safe method for block erection of shipyards.

**Keywords** : wire rope, dynamic simulation, erection crane, block erection, shipbuilding

### 1. 서 론

와이어 로프(wire rope)란 여러 가닥의 얇고 긴 철사(wire)를 감아서 밧줄(rope)과 같이 만든 것이다. 여러 가닥의 와이어를 감아서 하나의 스트랜드(strand)를 만들고, 여러 개의 스트랜드를 코어(core) 주위로 감아 와이어 로프를 만든다(그림 1 참조). 스트랜드는 단면 형상에 따라 그림 2와 분류할 수 있다. 또한 스트랜드 종류와 개수, 하나의 스

트랜드를 구성하는 와이어의 개수에 따라 그림 3과 같이 와이어 로프를 분류할 수 있다. 그리고 코어의 종류에 따라 서로 다른 와이어 로프를 그림 4와 같이 분류하고, 그 외에 스트랜드와 와이어의 방향에 따라 와이어 로프를 분류할 수 있다.

조선소에서는 선박 및 해양 구조물을 여러 개의 블록으로 나누어 제작한 후 최종적으로 각 블록들을 쌓아 올려 용접함으로써 건조하는 방법을 사용하는데, 이 과정을 블록 탑재(block erection)라고 한다. 이러한 탑재 공정 중에 블록을

† 책임저자, 정회원 · 울산대학교 조선해양공학부 교수  
Tel: 052-259-2165 ; Fax: 052-259-2836  
E-mail: miroh@ulsan.ac.kr

\* 목포대학교 해양시스템공학과 교수

\*\* 서울대학교 조선해양공학과 대학원 박사

\*\*\* 서울대학교 조선해양공학과 및 해양시스템공학연구소 교수

• 이 논문에 대한 토론을 2012년 6월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2012년 8월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

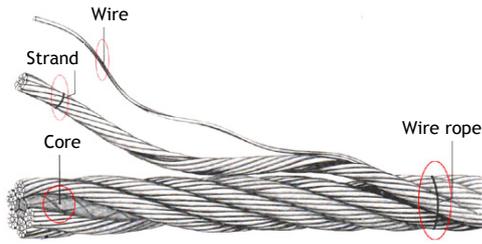


그림 1 와이어 로프의 구성

Strand 단면의 모양	이름	특징
	Single Size	- 가장 기본적인 strand 구성으로 같은 굵기의 외각 wire들이 내부 wire를 감는 형태.
	Seale	- 굵은 wire와 같은 수의 보다 작은 wire가 내부wire를 따라 감싸지는 형태. - 강한 마모저항력을 제공하지만 상대적으로 약한 피로저항력을 가짐. - 드럼에 감기는 작업에 주로 사용되는 IWRC등의 로프에 많이 적용되는 구성임.
	Filler Wire	- 작은 wire들이 큰 wire 공간에 채워서 강도, 유연성, 마모저항력에 대해 우수함.
	Warrington	- 굵고 얇은 wire들이 엇갈리며 만들어지고, 유연성과 강도에는 강하나 마모에 약함.

그림 2 단면 형상에 따른 스트랜드의 분류

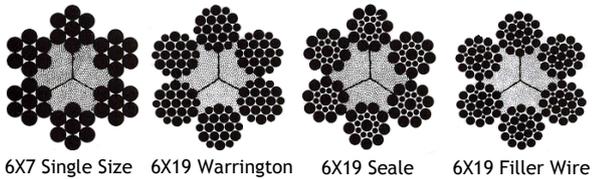


그림 3 스트랜드의 단면 형상과 와이어 구성에 따른 와이어 로프의 분류

① Fiber Core(F.C)	② Wire Strand Core(W.S)	③ IWRC
- 섬유 Core는 강한 섬유질 즉, 마닐라, 대마, 플라스틱, 특수 종이류, 사이잘 상(Sisal hemp) 등의 종류가 원료가 됨. - 다른 wire rope에 비해 유연성을 가짐. - 갑작스런 충격으로부터 완충의 역할을 하며 부식방지를 위해 일종의 오일저장소 역할을 함.	- Wire strand core는 열에 강하고 섬유 core에 비해 15%정도 강도가 강함.	- Wire로 만들어진 core들은 보통 작은 wire rope이며 Independent wire rope core(IWRC)라고 불림. - 외곽을 감싸는 strand로부터 완전히 독립적인 별도의 wire rope 임. - 열에 대한 강한 방어력을 제공함.

그림 4 코어의 종류에 따른 와이어 로프의 분류

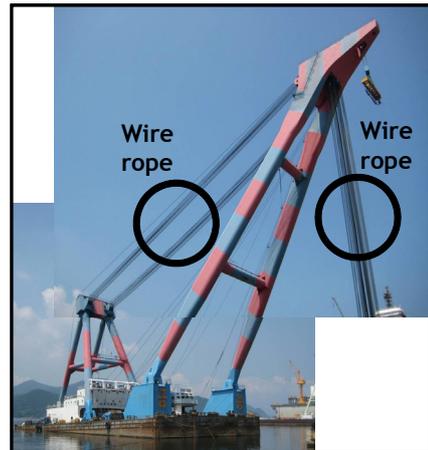


그림 5 3,600ton급 해상 크레인의 예



그림 6 900ton급 갠트리 크레인의 예

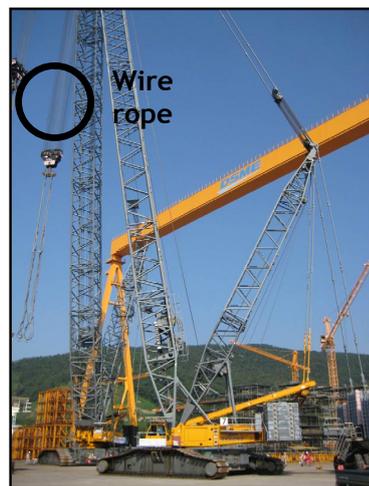


그림 7 300~800ton급 크롤러 크레인의 예

들기 위해 크레인을 사용하는데 대표적인 조선용 탑재 크레인으로는 해상 크레인(floating crane), 갠트리 크레인(goliath crane), 크롤러 크레인(crawler crane) 등이 있다. 해상 크레인은 바다 위에 떠서 부력의 도움을 받아 아주 무거운 블록도 들 수 있는 크레인으로서 그림 5와 같은 것은 약 3,600ton

의 블록까지도 들어 올릴 수 있다. 갠트리 크레인도 그 크기의 거대함으로 인해 골리앗 크레인(goliath crane)이라고도 불리고 있으며, 육상에서 안전하게 작업을 수행할 수 있다는 장점이 있고, 그림 6과 같은 것은 약 900ton의 블록을 들어 올릴 수 있다. 크롤러 크레인은 육상에서 자유롭게 이동할 수 있다는 장점이 있으나 자세에 따라 들어 올릴 수 있는 무게가 크게 변한다는 한계점이 있다. 그림 7과 같은 것은 약 300ton에서 800ton 정도의 블록을 들어 올릴 수 있다.

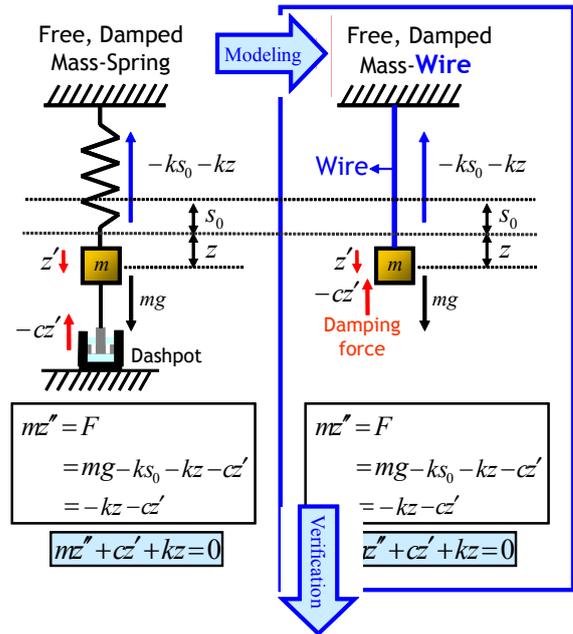
이러한 조선용 탑재 크레인은 블록을 들기 위해 와이어 로프를 연결하여 사용한다. 특히 조선용 탑재 크레인은 수백에서 수천 ton에 이르는 블록을 들기 때문에 작업 중 와이어 로프에 작용하는 동적인 하중이 매우 중요하다. 블록 탑재 공정 계획 시 정적 하중을 예측하여 리그 배치를 수행하는데, 블록의 움직임으로 인한 추가 하중, 바람에 의한 영향 등으로 인해 동적인 하중이 발생하게 되면 리그가 파손되거나 심지어는 블록이 전복되는 사고가 발생하기도 한다. 따라서 안전한 작업을 위해 작업 전 와이어 로프에 작용하는 동적 하중을 미리 계산하고 확인해야 한다. 이러한 동적 하중은 조선용 탑재 크레인에 설치되는 와이어 로프에 작용하는 장력과 비틀림 모멘트를 계산하는 것이다. 물론 와이어 로프에 작용하는 장력만으로 간단히 동적 하중을 예측할 수는 있으나 탑재 시 블록은 미세하게 회전할 수 있기 때문에 비틀림 모멘트 역시 예측해야 한다. 그러나 이러한 와이어 로프의 장력, 비틀림 모멘트 등의 동적 하중을 미리 계산하는 것은 어렵기에 지금까지는 이러한 계산없이 작업을 수행해 왔다.

본 연구에서는 탑재 작업의 안전성을 위해 조선용 탑재 크레인에 설치되는 와이어 로프에 작용하는 장력과 비틀림 모멘트에 대한 계산식을 유도하였고, 이를 조선용 탑재 크레인의 동역학 시뮬레이션에 적용하였다. 와이어 로프에 작용하는 장력과 비틀림 모멘트에 대한 계산식은 Costello(1997)의 식을 참고하였고, 조선용 탑재 크레인의 동역학 시뮬레이션은 서울대학교와 ㈜대우조선해양이 함께 개발한 시뮬레이션 프레임워크(Cha 등, 2010)를 기반으로 개발하였다.

## 2. 관련 연구 현황

와이어 로프는 탄성체로서 변형이 일어나면 원래대로 돌아 가려는 복원력 또는 복원 모멘트가 발생하게 된다. 와이어 로프에는 일반적으로 장력과 비틀림 모멘트에 대한 복원력 또는 복원 모멘트가 주로 작용한다.

기존 연구에서는 와이어 로프의 탄성 계수를 개략적으로 추정하였고, 이를 Hooke's law에 적용하여 와이어 로프에 작용하는 장력을 계산하는 방법을 사용하였다(차주환 등,

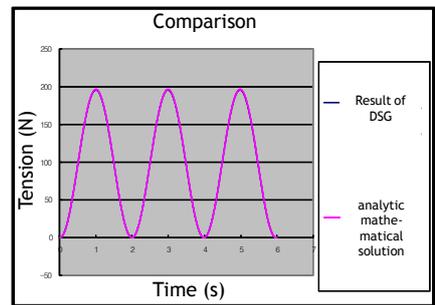


### Analytic mathematical solution (Free, Damped Mass-Spring oscillation)

$$y(t) = A \cos\left(\frac{k}{m} t\right)$$

$$F(t) = k \cdot y(t) = kA \cos\left(\frac{k}{m} t\right)$$

$k = 100(N/m)$   
 $m = 10.0329(kg)$   
 $A = 0.98423(m)$



Maximum error : 0.3%

그림 8 기존 연구(차주환 등, 2009a)에서 수행된 자유 진동 감쇠 질량-용수철 시스템을 적용한 와이어 로프의 동적인 계산

2009a; 박광필 등, 2010). 여기에서 탄성 계수는 신율(elongation)과 유사한 개념인데, 와이어 로프의 신율은 대체로 잘 알려져 있지 않다. Shuto 등(2004)은 정확한 사양이 공개되지 않은 6X37 와이어 로프에 대해 실험을 수행하였고, 그 결과 파괴 응력 293kN에 대한 신율이 약 4.3%라는 것을 측정하였다. 따라서 기존 연구에서는 Shuto 등(2004)이 계산한 신율, 즉 탄성 계수를 사용하여 그림 8과 같이 Hooke's law를 적용하여 복원력에 해당하는 장력을 계산하였고, 이를 자유 진동 감쇠 질량-용수철(free, damped mass-spring) 시스템을 통해 동적인 계산을 수행한 후, 해석적인 수학 해와 비교 검증하였다. 그러나 이 연구의 한계점은 와이어 로프의 형상과 물성치를 적용하지 못 했다는 점과 복원

모멘트를 고려하지 못 했다는 점이다.

이러한 한계점을 해결하기 위해, 본 연구에서는 와이어 로프의 형상에 기반한 재료역학적인 특성부터 고찰해 보았다. 일반적인 탄성체에 대한 응력이나 모멘트의 계산은 정역학과 재료역학, 탄성학 등에서 다루고 있고, 대표적으로 Gere (2004)는 빔(beam)에 대한 응력과 변형률, 굽힘 모멘트 등에 대해 자세하게 설명하고 있다. 이러한 내용은 와이어 로프에도 확장될 수 있다.

한편 Love 등(1927)은 이러한 개념을 확장하여 얇고 긴 막대(thin rod)에 대한 내용을 정리하였으며, 이는 와이어 로프를 구성하는 와이어 하나에 대한 응력 및 모멘트 계산의 기반이 된다. Costello(1997)은 와이어, 스트랜드, 코어로 구성되어 있는 본격적인 와이어 로프에 대해 힘과 모멘트의 평형 방정식을 유도하였으며 이를 실험적으로 검증하였다. 본 연구에서는 Costello가 유도한 와이어 로프의 힘과 모멘트에 대한 평형 방정식을 재정리하고, 이를 조선용 탑재 크레인에서 사용하는 와이어 로프에 적용하였다. 자세한 내용은 3장에서 다루도록 하겠다. 조진래 등(2010)은 케이블과 탄성보로 지지되는 모바일 하버 크레인의 끝단 처짐량 분석에 대한 연구를 수행하였고, 구남국 등(2011)은 선체 블록의 리그 최적 배치를 위해 콜리엇 크레인의 와이어 로프와 블록간의 동적 접촉력을 계산하는 연구를 수행한 바 있다.

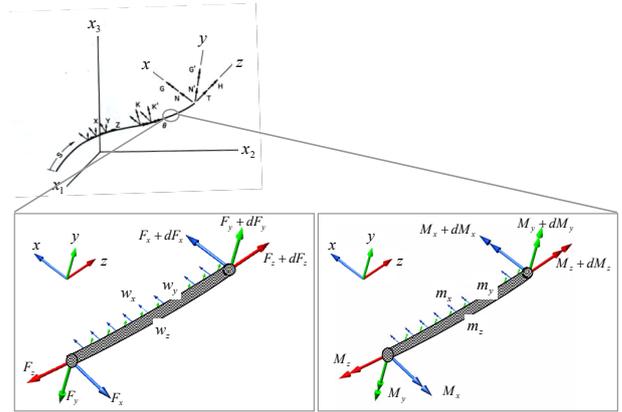


그림 9 기존 연구(차주환 등, 2004)에서 수행된 자유 진동 감쇠 질량-용수철 시스템을 적용한 와이어 로프의 동적인 계산

$$\frac{dF_z}{ds} - F_x \kappa_y + F_y \kappa_x + w_z = 0$$

$$\frac{dM_x}{ds} - M_y \kappa_z + M_z \kappa_y - F_y + m_x = 0$$

$$\frac{dM_y}{ds} - M_z \kappa_x + M_x \kappa_z + F_x + m_y = 0$$

$$\frac{dM_z}{ds} - M_x \kappa_y + M_y \kappa_x + m_z = 0$$

한편, 간단한 직선 스트랜드에서  $m_{x,2} = m_{y,2} = 0$ 이라고 가정하면 6개의 방정식은 식 (2)와 같이 두 개의 1계 연립 상미분 방정식으로 정리된다.

$$-F_{y,2} \kappa_{z,2} + F_{z,2} \kappa_{y,2} + w_{x,2} = 0 \tag{2}$$

$$-M_{y,2} \kappa_{z,2} + M_{z,2} \kappa_{y,2} - F_{y,2} = 0$$

여기서, 아래 첨자 2는 스트랜드 안의 외곽 와이어를 의미한다. 스트랜드는 중심 와이어 한 개와  $m_2$ 개의 외곽 와이어로 구성되어 있다(그림 1 참조). 따라서  $m_2$ 개의 외곽 와이어에 대하여 장력과 비틀림 모멘트를 구하고 한 개의 중심 와이어에 대한 장력과 비틀림 모멘트를 구하여 둘을 더하면 스트랜드의 장력과 비틀림 모멘트를 구할 수 있다. 외곽 와이어의 힘과 모멘트 성분에서 스트랜드의 장력과 비틀림 모멘트를 다음의 식 (3)과 같이 유도할 수 있다.

$$\frac{F_2}{ER_2^2} = m_2 \left[ \frac{F_{z,2}}{ER_2^2} \sin \alpha_2 + \frac{F_{y,2}}{ER_2^2} \cos \alpha_2 \right] \tag{3}$$

$$\frac{M_2}{ER_2^3} = m_2 \left[ \frac{M_{z,2}}{ER_2^3} \sin \alpha_2 + \frac{M_{y,2}}{ER_2^3} \cos \alpha_2 + \frac{F_{z,2}}{ER_2^2} \frac{r_2}{R_2} \cos \alpha_2 - \frac{F_{y,2}}{ER_2^2} \frac{r_2}{R_2} \sin \alpha_2 \right]$$

### 3. 와이어 로프에 작용하는 장력과 비틀림 모멘트 계산

앞서 언급하였듯이, 본 연구에서는 본 연구에서는 Costello (1997)가 유도한 와이어 로프의 장력과 비틀림 모멘트의 계산 방법을 기반으로 하여 조선용 탑재 크레인에서 사용하는 와이어 로프에 적용하였다. 그 내용을 상세히 설명하면 다음과 같다.

#### 3.1 와이어와 스트랜드 및 와이어 로프의 장력과 비틀림 모멘트의 계산

임의의 곡선에 작용하는 단위 길이당 분포 하중과 모멘트 및 내부 응력과 모멘트는 그림 9와 같이 정리할 수 있다.

$x, y, z$  축 방향의 힘과 모멘트를 정리하면 식 (1)과 같은 6개의 1계 연립 상미분 방정식을 유도할 수 있다.

$$\frac{dF_x}{ds} + F_z \kappa_y - F_y \kappa_z + w_x = 0 \tag{1}$$

$$\frac{dF_y}{ds} - F_z \kappa_x + F_x \kappa_z + w_y = 0$$

여기서,  $E$ 는 와이어의 탄성 계수이며,  $r_2$ 는 중심 와이어와 외곽 와이어의 반지름의 합이고,  $R_2$ 는 외곽 와이어의 반지름이다.  $\alpha_2$ 는 외곽 와이어에서 수직 단면과 이루는 각도이다.

한편, 중심 와이어의 장력과 비틀림 모멘트는 다음의 식 (4)와 같이 유도할 수 있다.

$$\frac{F_1}{ER_1^2} = \pi \epsilon_1 \quad (4)$$

$$\frac{M_1}{ER_1^3} = \frac{\pi}{4(1+\nu)} R_1 \tau_s$$

여기서, 아래 첨자 1은 중심 와이어를 나타낸다. 그리고  $R_1$ 은 중심 와이어의 반지름이며,  $\epsilon_1$ 은 중심 와이어의 변형률이다.  $\nu$ 는 poisson's ratio이고,  $\tau_s$ 는 단위 길이당 스트랜드의 비틀림이다.

따라서 스트랜드에 작용하는 장력과 비틀림 모멘트는 식 (5)와 같이 중심 와이어에 작용하는 장력 및 비틀림 모멘트와 외곽 와이어에 작용하는 장력과 비틀림 모멘트의 합으로 정리할 수 있다.

$$F = F_1 + F_2 \quad (5)$$

$$M = M_1 + M_2$$

식 (5)는 다음의 식 (6)과 같이 정리할 수 있다.

$$F = C_1 \epsilon + C_2 \beta \quad (6)$$

$$M = C_3 \epsilon + C_4 \beta$$

여기서,  $C_1 \sim C_4$ 는 상수이며,  $\epsilon$ 는 strain이고,  $\beta$ 는 rotational strain이다(Costello, 1997).

여러 개의 스트랜드가 모여 있는 와이어 로프에서는 각각의 스트랜드에 해당하는 장력과 비틀림 모멘트를 구한 후, 나선형으로 감아져 있는 상태를 고려하면 와이어 로프에서의 장력과 비틀림 모멘트를 구할 수 있다. 이는 3.2절에서 다시 설명하기로 한다.

이상을 정리하면, 와이어 로프가 늘어나거나(strain), 비틀림이 발생하면(rotational strain), 장력과 비틀림 모멘트가 발생한다.

### 3.2 조선용 탑재 크레인에 사용되는 대표적인 와이어 로프에 대한 적용

조선용 탑재 크레인에 사용되는 대표적인 와이어 로프는 D77mm-6×49WS-IWRC라고 불리는 것이다. 즉, 와이어 로프의 전체 지름은 77mm이고, 6개의 Warrington Seal 형태의 스트랜드로 구성되어 있으며, 하나의 스트랜드는 49개의 와이어로 구성되어 있고, 코어는 IWRC 형태이다. 와이어 로프의 장력과 비틀림 모멘트를 구하기 위해서는 와이어 각각의 반지름과 한 바퀴 감았을 때의 진행된 길이를 나타내는 피치(pitch)를 알아야 한다. 하지만 각각의 와이어에 대한 반지름과 피치는 제조사의 지적 재산이므로 공개되어 있지 않다. 따라서 실제 해상 크레인에 사용하는 와이어 로프의 장력과 비틀림 모멘트를 구하는 것은 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 사양이 알려져 있는 일반적인 6×19 Seale-IWRC 와이어 로프를 조선용 탑재 크레인에 사용하는 와이어 로프의 전체 지름으로 가정하여 장력과 비틀림 모멘트를 구하였다.

그림 10은 세 종류(코어에 두 종류, 외곽 스트랜드에 한 종류)의 스트랜드를 포함하고 있는 지름이 33mm인 6×19 Seale-IWRC 와이어 로프의 단면 형상을 나타낸 것이다. 조선용 탑재 크레인에 사용되는 와이어 로프의 지름은 77mm이고 6×19 Seale-IWRC의 지름은 33mm이므로 해상 크레인의 반지름이 약 2.33배 더 크다. 따라서 6×19 Seale-IWRC에서 각각의 와이어의 반지름과 피치(pitch)가 2.33배 더 크다고 가정하여 장력과 비틀림 모멘트를 구한다. 따라서 세 종류의 스트랜드에 작용하는 장력과 비틀림 모멘트를 계산하면 식 (7)과 같다.

$$\frac{F}{EA} = 0.8864\epsilon + 0.1436\beta \quad (7)$$

$$\frac{M}{ER^3} = 0.3189\epsilon + 0.1182\beta \text{ for strand 1}$$

$$\frac{F}{EA} = 0.9642\epsilon + 0.0853\beta$$

$$\frac{M}{ER^3} = 0.1928\epsilon + 0.0721\beta \text{ for strand 2}$$

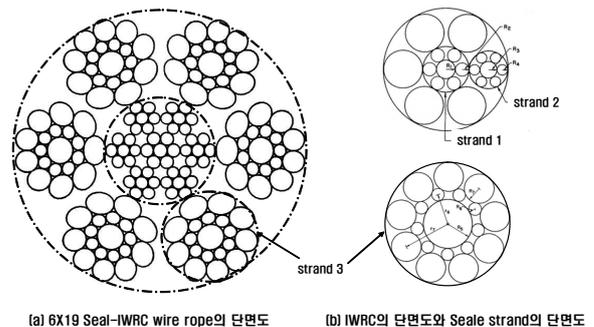


그림 10 6X19 Seale-IWRC 와이어 로프의 단면 형상

$$\frac{F}{EA} = 0.8295\varepsilon - 0.1765\beta$$

$$\frac{M}{ER^3} = -0.4240\varepsilon + 0.1480\beta \text{ for strand 3}$$

여기서,  $A$ 는 각각의 스트랜드의 단면적이고,  $R$ 은 각각의 스트랜드의 반지름이다. 이제 스트랜드가 함께 감겨 있는 상태를 고려한 6×19 Seale-IWRC에 대하여 장력과 비틀림 모멘트를 구해보면 식 (8)과 같다.

$$\frac{F}{EA} = 0.7020\varepsilon + 0.1232\beta \quad (8)$$

$$\frac{M}{ER^3} = 0.2060\varepsilon + 0.0403\beta$$

여기서,  $A$ 는 와이어 로프의 단면적이고,  $R$ 은 와이어 로프의 반지름이다. 와이어 로프 안의 모든 와이어는 steel 재질이며 탄성 계수는 같다고 가정한다. Steel의 탄성 계수는 210GPa이고, 와이어 로프의 단면적은 0.001848566m<sup>2</sup>, 와이어 로프의 반지름은 16.5mm이므로 다시 정리하면 식 (9)와 같다.

$$F = 272\varepsilon + 47\beta \text{ [MN]} \quad (9)$$

$$M = 194\varepsilon + 38\beta \text{ [MN - m]}$$

참고로, 와이어 로프의 특성에 따라 장력과 비틀림 모멘트는 strain과 rotational strain을 발생시킨다. 또한 역으로 strain과 rotational strain은 장력과 비틀림 모멘트를 발생시킨다.

#### 4. 조선용 탑재 크레인의 동역학 시뮬레이션에의 적용

##### 4.1 기존 연구의 동역학 시뮬레이션과의 차이점

기존 연구(차주환 등, 2009b)의 조선용 탑재 크레인의 동역학 시뮬레이션에서는 2장에서 언급한 바와 같이 Hooke's law에 의한 복원력만을 계산하였다. 즉, 와이어 로프에 어떤 물체가 매달리게 되면 와이어 로프에는 strain이 발생할 것이고, 이 strain에 비례하는 복원력, 즉 장력이 발생한다는 것이다. 와이어 로프의 strain은 장력뿐만 아니라 비틀림 모멘트도 발생시킨다는 것을 기존 연구에서 확인하였으나 이를 고려할 수는 없었다. 따라서 본 연구의 조선용 탑재 크레인의 동역학 시뮬레이션에서는 와이어 로프에 작용하는 장력 외에 비틀림 모멘트에 대한 계산도 추가적으로 고려하였다.

또한, 기존 연구에서는 와이어의 비틀림, 즉 rotational strain에 대해 고려할 수 없었는데, 본 연구에서는 이를 추가적으로 고려하여, 와이어 로프에 비틀림이 발생했을 때 비틀림 모멘트를 계산하여 반영하였다.

##### 4.2 해양 구조물 블록의 Turn-Over 시뮬레이션

본 연구에서는 조선용 탑재 크레인의 동역학 시뮬레이션의 예로서 해양 구조물 블록의 Turn-Over(편의상 뒤집어서 만들었던 블록을 탑재 시 원래 상태로 뒤집는 것) 시뮬레이션을 수행하였다. 해양 구조물 블록의 Turn-Over 시뮬레이션의 개요는 다음과 같다.

우선 그림 11과 같이 해상 크레인 1기와 크롤러 크레인 2기가 놓여 있고 Turn-Over할 블록(중량 약 600ton)이 있다고 가정한다. 해상 크레인에는 4개의 블록 로더(block loader)가 연결되어 있고, 각 블록 로더에는 1~4번의 번호가 할당되어 있다. 여기에서 블록 로더란 크레인과 블록을 원활하게 연결해 주기 위한 장치이다. 해상 크레인과 4개의 블록 로더 사이에는 각각 16개씩 총 64개의 와이어 로프가 연결되어 있고, 각 블록 로더와 블록 사이에도 다수의 와이어 로프가 연결되어 있다. 크롤러 크레인과 후크(hook)는 1개의 와이어 로프로 연결되어 있고, 후크와 블록 사이에는 4개의 와이어 로프가 연결되어 있다.

- 이제 시뮬레이션을 위해 다음과 같은 시나리오를 가정하였다.
- ① 해상 크레인만으로 블록을 들어 올린다(그림 12 참조).
  - ② 해상 크레인의 1, 2번 블록 로더를 계속 감아 올려 블록을 수직하게 든다(그림 13 참조).
  - ③ 해상 크레인의 3, 4번 블록 로더를 해제하여 블록을 수직하게 들고 있는다(그림 14 참조).
  - ④ 크롤러 크레인의 후크와 블록을 연결한 후 해상 크레인과 함께 블록을 Turn-Over 시킨다(그림 15 참조).

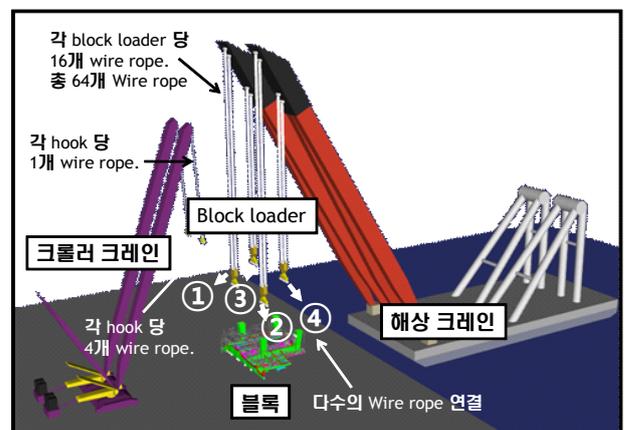


그림 11 해양 구조물 블록의 Turn-Over 시뮬레이션의 초기 상태

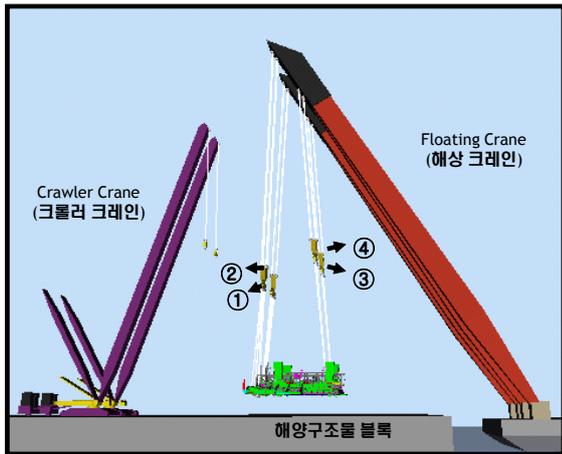


그림 12 해상 크레인만으로 블록을 들어 올림

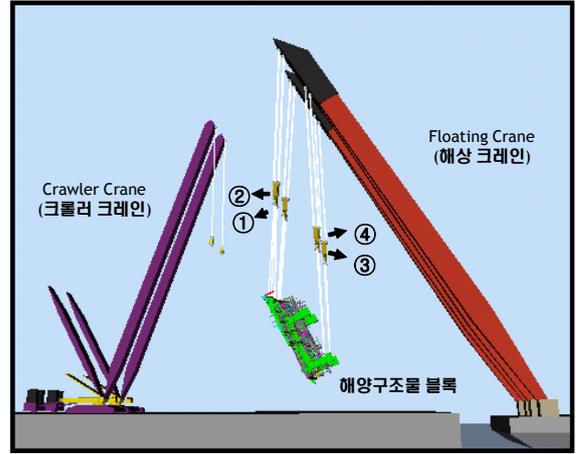


그림 13 해상 크레인으로 블록을 세움

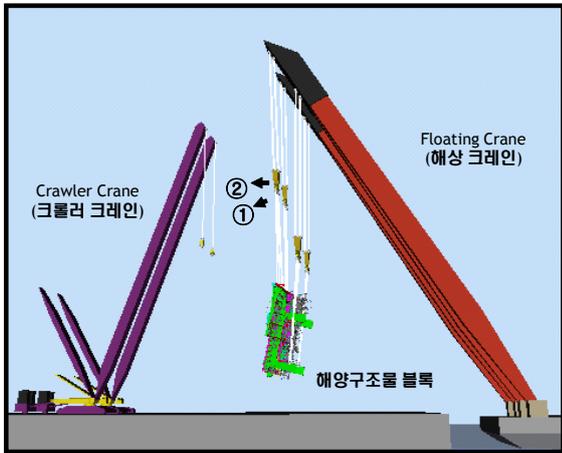


그림 14 해상 크레인만으로 블록을 들고 있음

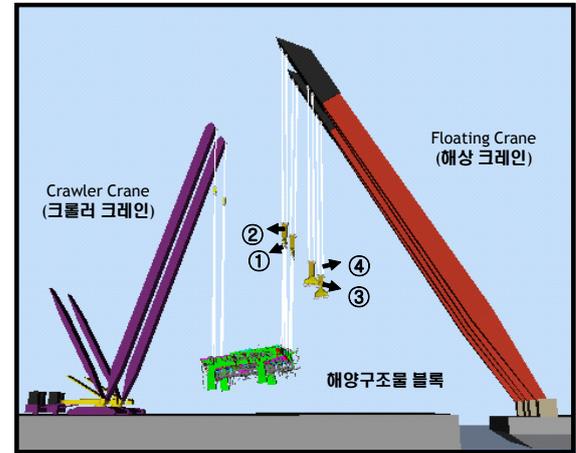


그림 15 해상 크레인과 크롤러 크레인을 이용하여 블록을 Turn-Over 함

이상의 시나리오에 따라 해상 크레인 및 크롤러 크레인의 동역학 시뮬레이션을 자체 개발한 프로그램을 통해 수행하였고, 그 결과 중 해상 크레인에 연결된 전체 와이어 로프에 작용하는 장력을 계산하여 현장 데이터와 비교하였다(그림 16 참조).

그림 16에서 기존 연구(차주환 등, 2009a; 2009b)의 방식대로 인장에 의한 장력만을 고려하여 계산한 결과는 실선으로 표시하였고, 본 연구에서 비틀림을 고려한 장력을 계산한 결과는 짧은 점선으로 표시하였으며, 실제 현장 작업 데이터는 긴 점선으로 표시하였다. 또한, 작업 시간은 시뮬레이션 시간에 맞추어 나타내었다. 약 70초에서 150초 사이는 해상 크레인이 블록을 수직하게 들고 있는 상태로서 와이어 로프에 가장 큰 장력이 작용하는 것을 확인할 수 있다. 약 100초에서 150초 사이에 현장작업 데이터의 장력이 약 40ton정도 작아진 이유는 블록의 위치 변경에 따른 계측 장비의 오차가 발생한 것이다.

그림 16에서 알 수 있듯이, Turn-Over 대상 블록은 중

량이 약 600ton이지만 작업 중 최대 621ton의 장력이 걸리는 것을 알 수 있다. 따라서 Turn-Over 시 발생하는 최대 동적 하중이 정적 하중(블록의 중량)의 약 104%임을 알 수 있다. 특히, 기존 연구(차주환 등, 2009b)에서는 와이어 로프의 장력만을 고려한 경우 최대 608ton의 동적 하중이 예측되었는데, 이와 비교하면 비틀림 모멘트까지 고려했을 경우 약 2%의 동적 하중 증가가 예측됨을 확인할 수 있었다. 만일 바람 등의 추가 하중이 작용될 경우 와이어 로프에 작용하는 최대 동적 하중은 더 증가할 것이다. 이상과 같이 Turn-Over 등의 블록 탑재 시 정적 하중만을 고려할 경우, 와이어 로프에 걸리는 장력 및 비틀림 모멘트가 허용 값을 초과하여 블록 낙하 등의 사고가 발생할 수 있다. 하지만 본 연구에서와 같이 동적 하중을 고려할 수 있다면 와이어 로프의 추가 및 보강 등을 통해 그러한 사고를 미연에 방지할 수 있을 것이다. 그림 17에는 시뮬레이션 시 해상 크레인에 연결된 전체 와이어 로프에 작용하는 비틀림 모멘트를 나타내고 있다.

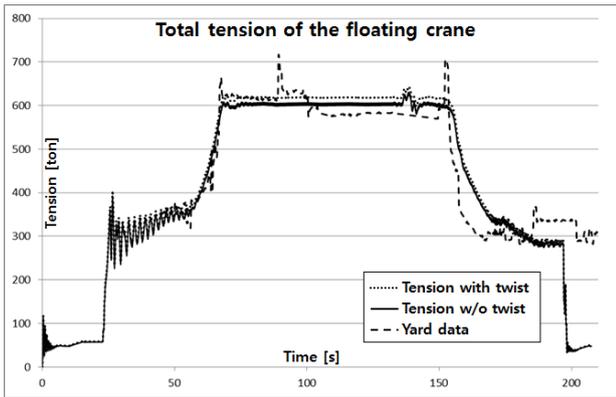


그림 16 Turn-Over 시 해상 크레인에 연결된 전체 와이어 로프에 작용하는 장력 비교

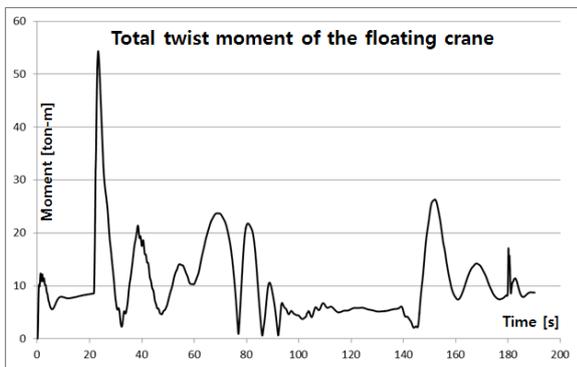


그림 17 Turn-Over 시 해상 크레인에 연결된 전체 와이어 로프에 작용하는 비틀림 모멘트

표 1 본 연구에서의 동역학 시뮬레이션 결과와 기존 연구 및 실제 현장 작업 데이터와의 비교

	와이어 로프에 작용하는 장력 (ton)	와이어 로프에 작용하는 비틀림 모멘트 (ton·m)
기존 연구 (차주환 등, 2009b)	608	- (계산 불가)
본 연구	621	54
현장 작업	626	(현장 작업 시 비틀림 모멘트는 계측하지 못 함)

표 1은 본 연구에서의 동역학 시뮬레이션 결과와 기존 연구(차주환 등, 2009a) 및 실제 현장 작업 데이터를 비교한 것이다. 표 1에 나타나 있듯이, 본 연구에서의 결과와 현장 작업 데이터 사이에 약 1%의 미만의 오차가 존재함을 알 수 있다. 이러한 오차는 현장 작업과 시뮬레이션 시 와이어 로프의 속성(탄성 계수, 신율 등) 등의 차이에서 기인한다고 예상된다.

### 5. 결론 및 향후 연구 계획

본 연구에서는 탑재 작업의 안전성을 위해 조선용 탑재 크

레인에 설치되는 와이어 로프에 작용하는 장력과 비틀림 모멘트에 대한 계산식을 유도하였고, 이를 조선용 탑재 크레인 동역학 시뮬레이션에 적용하였다. 기존에는 와이어 로프의 길이 변형에 의한 장력만을 고려한 반면에 본 연구에서는 길이와 각도 변형에 의한 장력과 비틀림 모멘트를 모두 고려할 수 있었다.

향후에는 조선용 탑재 크레인에 사용되는 와이어 로프의 정확한 정보를 획득하여 정확한 계산식을 유도할 예정이다. 또한 와이어 로프의 꺾임 및 쓸림과 바람 등 동적 하중에 영향을 미치는 추가 요소에 대한 연구도 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 복합 시스템 모델 구조 연구”
- (c) 서울대학교 해양시스템공학연구소 및 BK21 해양기술 인력양성사업단
- (d) 한국연구재단(KRF-2009-0086033, R33-2008-000-10150-0)
- (e) 한국에너지기술평가원 에너지인력양성사업 미래형 해상 풍력 발전 시스템 GET-Future 연구실(No. 20114030200050)
- (f) (주)대우조선해양

의 지원으로 이루어진 연구 결과의 일부임을 밝히며, 이에 감사드립니다.

### 참고 문헌

구남국, 차주환, 조아라, 이규열 (2011) 선체 블록 러그 최적 배치를 위한 콜러트 크레인의 와이어로프와 블록 간의 동적 접촉력 계산, 한국전산구조공학회 학술대회,  
 박광필, 차주환, 이규열 (2010) 유한 요소 정식화를 위한 해상 크레인 붐(boom)의 탄성체 모델링, 한국전산구조공학회 학술대회,  
 조진래, 임오강 (2010) 케이블과 탄성보로 지지되는 모바일 하버 크레인의 끝단 처짐량 분석, 한국전산구조공학회 논문집, 23(3), pp.283~288.  
 차주환, 노명일, 이규열 (2009a) 범용 동역학 모듈과 가시화 모듈을 이용한 조선 블록 탑재 시뮬레이션, 한국CAD/CAM

학회 논문집, 14(2), pp.69~76.

**차주환, 노명일, 조두연, 이규열** (2009b) 이산 사건 및 이산 시간 혼합형 시뮬레이션 커널의 통합 시스템을 이용한 블록 탑재 시뮬레이션, 대한조선학회 논문집, 46(3), pp.303~312.

**Cha, J.H., Roh, M.I., Lee, K.Y.** (2010) Integrated Simulation Framework for the Process Planning of Ships and Offshore Structures, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing Journal*, 26(5), pp.430~453.

**Costello, G.A.** (1997) Theory of Wire Rope, 2nd Edition, *Springer*, New York.

**Gere, J.M.** (2004) Mechanics of Materials, 6th Edition, *Thomson*, Toronto, Canada.

**Love, A.E.H.** (2011) A Treatise on the Mathematical

Theory of Elasticity, 4th Edition, Dover Publications, New York.

**Shuto, Y., Tokunaga, Y., Mriya, T., Kagoyama, T., Hara, S., Yamakawa, K.** (2004) Abrasion Degradation of Wire Rope and Synthetic Fiber Rope, *OCEANS 2004. MTS/IEEE TECHNO-OCEAN 2004*, 4, pp.1918~1922.

- 논문접수일 2011년 8월 8일
- 논문심사일  
1차 2011년 8월 16일  
2차 2012년 1월 4일
- 게재확정일 2012년 1월 16일