

## 레벨 러핑 지브 크레인의 상부구조의 최적설계

주영우 · 염영진  
기계공학과

### <요 약>

레벨 러핑 지브 크레인의 상부구조의 최적설계를 위한 연구를 하였다. 본 연구에서는 상자형 부재의 단면 선정과 하중 상태를 결정하도록 하였으며 본 프로그램을 보완하면 어떤 형태의 단면을 갖는 부재도 쉽게 다룰 수 있다. 본 연구에서 개발된 최적설계치와 기존 설계를 비교하였으며 최적설계의 결과가 더 경제적인 것으로 나타났다.

---

## Optimal Design of Upper Structure of Level-Luffing Jib Crane

Choo Young-Woo · Yum Young-Jin  
Dept. of Mechanical Engineering

### <Abstract>

Optimal design for the upper structures of the level luffing jib crane has been developed based on crane design standards. This program will cover from the determination of box-type beam section to the loading calculations of each beam sections and can be extended to any type of beam section by revising. A comparison between the existing design and the optimal design that was developed from this study has proved that the optimal design is more economical.

### I. 서 론

산업의 고도화와 물동량의 급증으로 인하여 화물을 운반하기 위한 크레인의 수요가 크게 증가하고 있다. 크레인의 종류에는 여러가지가 있으나 항만하역 및 조선소 등에서 지브 크레인이 많이 사용되고 있다. 본 연구에서 다루려는 레벨 러핑 지브 크레인은 신뢰운동과 인입식 수평운동을 하므로 운전이 매우 용이할 뿐만 아니라 소비동력이 적고 안정성도 높아 다목적용 지브크레인으로 그 수요가 급격히 증가하고 있다.

크레인의 설계 및 제작은 주로 FEM[1], JIS[2],

KSCP[3]와 같은 규정에 따라 행하여지고 있으며 이에 대한 연구도 활발하게 진행되고 있다. 최근에 Cho[4] 등은 천점크레인의 구조설계를 최적화하는 연구결과를 발표하였으며 박창철[5] 등은 레벨 러핑 지브크레인의 정적 예비계산을 위한 연구를 발표하였으며 박만철[6]은 본 크레인의 상부구조 설계를 위한 전산프로그램을 개발하였다.

본 연구에서는 GPM최적화 기법을 이용하여 크레인의 상부 구조의 최적 설계를 위한 프로그램을 개발하여 기존 사용되고 있는 크레인과 비교 검토하고자 한다.

## II. 크레인의 구조

레벨 러핑 지브 크레인의 각부 형상과 명칭은 그림 1. 과 같다.

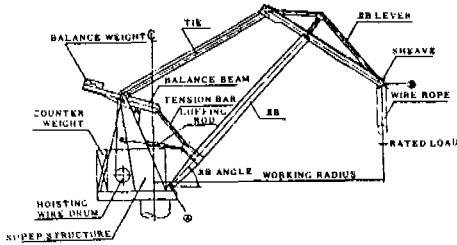


Fig. 1 Level luffing jib crane

레벨러핑 지브크레인은 Luffing Rod로 인입하면 지브의 회전전운동으로 지브레버의 끝점 B가 거의 수평운동을 하는 4절기구이다.

레벨러핑 지브크레인은 기구학적으로 최대작업반경과 제한된 편차내에서의 수평운동이 되고 구조강도면으로는 정격하중, 자중및 풍력 등의 외력을 감당할 수 있어야 한다.

본 크레인의 설계를 위한 수식화를 위하여 그림 1. 을 그림 2. 같이 단순화하여 나타낼 수 있다.

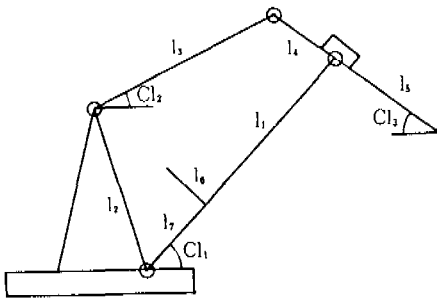


Fig. 2 Schematic diagram

그림 2. 에서 각 부재의 길이와 각도는 기구학적인 제한조건과 설계조건으로부터 최적화기법으로 설정하였으며 [7] 본 연구에서는 각 부재를 그림 3. 과 같이 상자형으로 가정하여 단면의 치수를 설계변수로 하였다.

실제에서 결정하여야할 단면의 위치는 그림 4. 와 같다.

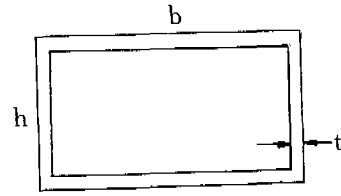


Fig. 3 Section of element

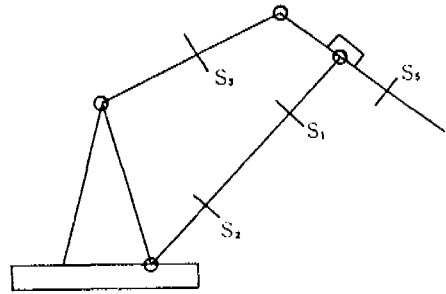


Fig. 4 Location of sections

현재 사용되고 있는 크레인에서 지브레버의 구조는 트러스 구조로 사용되고 있지만 본 연구에서는 상자형으로 가정하였고 단면 각 부 치수는 다음과 같이 가정하였다.

$$b = 2h \tag{1}$$

$$h = 40t \tag{2}$$

식(2)에서 높이 h를 두께t의 40배로 한 것은 II형강의 유효단면적의 제한으로부터 가정하였다. 뒷식에 의하여 단면의 넓이 S와 단면 2차 모멘트 I<sub>xx</sub>는 다음과 같이 근사화 할 수 있다.

$$S = 6th \tag{3}$$

$$I_{xx} = 13/12 th^3 \tag{4}$$

## III. 하중및 허용응력 결정

### 1. 정격하중

정격하중 W<sub>R</sub>은 다음과 같이 결정된다.

$$W_R = M\psi S_L \tag{5}$$

여기서 S<sub>L</sub>은 작업하중을 의미하며 ψ는 감아올리는 속력 V<sub>L</sub>(m/sec)을 고려한 것으로 다음과 같이 결정된다.

$$\psi = 1 + 0.3V_L \tag{6}$$

ψ의 값은 1.15 < ψ < 1.3 으로 되며 M은 크레인의

하중과 사용빈도에 따른 계수로서 Table 1. 과 같이 주어진다.

Table 1. Amplifying coefficient

	Group					
	1	2	3	4	5	6
M	1	1	1	1.06	1.12	1.2

2. 자 중

자중 W는 다음과 같이 결정된다.

$$W = \beta MS l \gamma \tag{7}$$

여기서 S는 단면적이고 l은 길이,  $\gamma$ 는 부재의 비중량이며  $\beta$ 는 굴부좌굴을 막기 위한 보강재를 고려한 최대계수이며 M은 Table 1. 과 같다.

3. 풍력

풍력 P는 다음과 같이 결정된다.

$$P = ACV^2/16 \tag{8}$$

여기서 V는 풍속으로서 단위는 m/sec이고 C는 공기동역학 계수이며 상자형 기둥에서는 Cmax=1.6이 되고 A는 부영면적이다.

본 연구에선 M=1.2,  $\psi=1.3$ ,  $\beta=1.5$ , C=1.6, V=20m/sec로 최대값을 사용한다.

4. 허용응력

허용응력  $\sigma_n$ 은 강에서 탄성한도  $\sigma_E$ 와 인장강도  $\sigma_R$ 의 비가 0.7보다 작은 경우 다음과 같이 결정된다. (Ref. 1)

$$\sigma_n = \sigma_E / \nu_E \tag{9}$$

여기서  $\nu_E$ 는 설계시 고려된 하중종류에 따른 경우에 따라 Table 2. 와 같이 주어진다.

Table 2. Safety factors

	case I	case II	case III
$\nu_E$	1.5	1.33	1.1

탄성한도  $\sigma_E$ 와 인장강도  $\sigma_R$ 의 비가 0.7보다 클 경우에는 다음과 같이 결정된다. [1]

$$\sigma_n = (\sigma_R + \sigma_R) \sigma_{Q,52} / (\sigma_{E,52} + \sigma_{R,52}) \tag{10}$$

여기서  $\sigma_{R,52}$ ,  $\sigma_{E,52}$ ,  $\sigma_{Q,52}$ 는 인장강도가 52 kgf/mm<sup>2</sup>, 비례한도가 36kgf/mm<sup>2</sup>인 강의 인장강도, 비례한도, 허용응력을 의미한다.

IV. 구조해석

구조해석은 정격하중  $W_R$ 와 자중  $W_i$ , 풍력  $P_i$ 에 의해 크레인의 각 부재 연결점에서의 힘을 결정한다. 하중에 대한 표현은 그림 5와 같다.

여기서  $F_{4x'}$ 과  $F_{4y'}$ ,  $F_{5x'}$ 과  $F_{5y'}$ 은 각각 지브레버에 평행한 반력과 수직인 반력이고  $F_{4x}$ 와  $F_{4y}$ 는 타이에 평행한 반력과 수직인 반력이며  $F_{5x}$ 와  $F_{5y}$ 는 지브에 평행한 반력과 수직인 반력을 나타낸다.

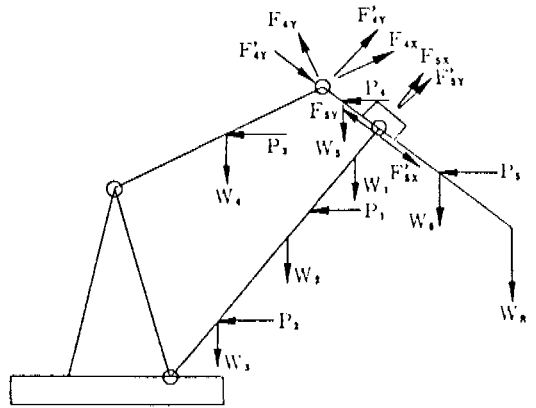


Fig. 5 Description of forces

그림 5. 에서  $F_{4x'}$ ,  $F_{4y'}$ ,  $F_{4x}$ ,  $F_{4y}$ 는 다음의 관계를 갖는다.

$$\begin{pmatrix} F_{4x} \\ F_{4y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos\alpha_4 & -\sin\alpha_4 \\ \sin\alpha_4 & -\cos\alpha_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_{4x'} \\ F_{4y'} \end{pmatrix} \tag{11}$$

그리고  $F_{5x'}$ ,  $F_{5y'}$ 도  $F_{5x}$ ,  $F_{5y}$ 와 다음의 관계를 갖는다.

$$\begin{pmatrix} F_{5x} \\ F_{5y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos\alpha_5 & -\sin\alpha_5 \\ \sin\alpha_5 & -\cos\alpha_5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_{5x'} \\ F_{5y'} \end{pmatrix} \tag{12}$$

여기서  $\alpha_4 = \alpha_2 + \alpha_3$ ,  $\alpha_5 = \alpha_1 + \alpha_3$ 이다.

1. 정격하중  $W_R$ 에 관한 해석

정격하중  $W_R$ 이 작용하는 경우 반력들은 다음과 같이 된다.

$$F_{4x'} = (1/n - 1_5 \cos\alpha_3 / 1_4 \sin\alpha_4) \cos\alpha_4 W_R \tag{13}$$

$$F_{4y'} = (\sin\alpha_4 / n - 1_5 \cos\alpha_3 / 1_4) W_R \tag{14}$$

$$F_{5x'} = (1_5 \cos\alpha_3 \cos\alpha_4 / 1_4 \sin\alpha_4 - \sin\alpha_3) W_R \tag{15}$$

$$F_{5y'} = (1_4 + 1_5) \cos\alpha_3 W_R / 1_4 \tag{16}$$

여기서 n은 후크와 지브레비 사이의 와이어의 감김수이다.

2. 자중 Wi에 관한 해석

자중 Wi가 작용하는 경우 반력들은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} F4x' &= CDx4^4 W4 + CDx5^4 W5 + CDx6^4 W6(17) \\ F4y' &= CDx4^5 W5 + CDy6^4 W6 \quad (18) \\ F5x' &= CDx4^5 W4 + CDx5^5 W5 + CDx6^5 W6(19) \\ F5y' &= CDx5^5 W5 + CDy6^5 W6 \quad (20) \end{aligned}$$

여기서

$$\begin{aligned} CDx4^4 &= \cos\alpha 2 / (2\sin\alpha 4) \\ CDx5^4 &= \cos\alpha 3 \cos\alpha 4 / (2\sin\alpha 4) \\ CDx6^4 &= -\cos\alpha 3 \cos\alpha 4 \cdot 1_5 / (2\sin\alpha 4) \\ CDx5^4 &= \cos\alpha 3 / 2 \\ CDx6^4 &= -1_5 \cos\alpha 3 / (21_4) \\ CDx4^5 &= -\cos\alpha 2 / (2\sin\alpha 4) \\ CDx5^5 &= -\sin\alpha 3 \cdot \cos\alpha 3 \cos\alpha 4 / (2\sin\alpha 4) \\ CDx6^5 &= 1_5 \cos\alpha 3 \cos\alpha 4 / (21_4 \sin\alpha 4) - \sin\alpha 3 \\ CDx5^5 &= \cos\alpha 3 / 2 \\ CDx6^5 &= (1 + 1_5 / (21_4)) \cos\alpha 3 \end{aligned}$$

이다.

3. 풍력 Pi에 관한 해석

풍력 Pi가 작용하는 경우 반력들은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} F4x' &= CWx3^4 P3 + CWx4^4 P4 + CWx5^4 P5(21) \\ F4x' &= CWx4^4 P4 + CWy5^4 P5 \quad (22) \\ F5x' &= CWx3^5 P3 + CWx4^5 P4 + CWx5^5 P5(23) \\ F5y' &= CWx4^5 P4 + CWy5^5 P5 \quad (24) \end{aligned}$$

여기서

$$\begin{aligned} CWx3^4 &= -\sin\alpha 2 / (2\sin\alpha 4) \\ CWx4^4 &= \sin\alpha 3 \cos\alpha 4 / (2\sin\alpha 4) \\ CWx5^4 &= -1_5 \sin\alpha 3 \cos\alpha 4 / (21_4 \sin\alpha 4) \\ CWy4^4 &= \sin\alpha 3 / 2 \\ CWy5^4 &= -1_5 \sin\alpha 3 / (21_4) \end{aligned}$$

Table 3. Comparison of Box-type Elements (Existing Design/Optimal Result)

Elements	Section	Thickness t <sub>1</sub> (mm)	Thickness t <sub>2</sub> (mm)	Height h(mm)	Width b(mm)	Area (mm <sup>2</sup> )	Area (%)
Jib	s <sub>1</sub>	8/8.5	6/8.5	900/340	1200/680	30000/17340	100/57.8
	s <sub>2</sub>	12/12.5	10/12.5	1100/500	1550/1000	59200/37500	100/63.4
Tie	s <sub>3</sub>	8/8.5	8/8.5	450/340	450/680	14400/17340	100/120

$$\begin{aligned} CWx3^5 &= -\sin\alpha 2 / (2\sin\alpha 4) \\ CWx5^5 &= \cos\alpha 3 + 1_5 \sin\alpha 3 \cos\alpha 4 / (21_4 \sin\alpha 4) \\ CWy4^5 &= \sin\alpha 3 / 2 \\ CWy5^5 &= (1 + 1_5 / (21_4)) \sin\alpha 3 \end{aligned}$$

이다.

V. 최적화식

본 크레인에서 목적함수는 각 부재의 체적의 합을 최소화하는 것으로 하였으며 다음 식과 같이 된다.

$$f(b) = S_1 \cdot l_1 / 2 + S_2 \cdot l_2 / 2 + S_3 \cdot l_3 + S_4 \cdot l_4 + S_5 \cdot l_5 \quad (25)$$

여기서 Si와 li는 부재의 단면적과 길이를 나타낸다.

제한식으로는 부재의 단면에서 하중에 의한 응력이 허용응력 내에 있어야 하므로 다음과 같이 표현된다.

$$h_i = F_x / S_i + M_i / Z_i < \sigma_a \quad i=1, 2, 3, 4, 5 \quad (26)$$

여기서 Si와 Zi는 i번째 단면에서 각각의 단면적과 단면계수를 의미한다. 그리고 두께 t가 양이어야 한다는 조건으로부터 다음의 조건식이 얻어진다.

$$t_i > 0 \quad (27)$$

VI. 최적설계의 결과 및 검토

본 연구의 결과를 검토하기 위하여 원재 중공임에서 실제, 제작되고 있는, 기존 모델(30ton 용량)과 비교하여 Table 3. 에 나타내었다.

Table 3. 에서는 Jib과 Tie 부재만을 비교하였는데 그것은 기존하는 크레인의 경우와 본 연구에서 사용된 부재의 단면형상이 동일하기 때문이다. Table 3. 에서 나타난 바와 같이 Jib에서 단면적이 기존의 57.8%와 63.4%로 42.2%와 36.6% 만큼 감소하였으나 Tie에서는 오히려 20% 증가하였다. 따라서 Jib의 단면은 과도하게 설계되었으며 Tie의 경우는 취약하게 설계되었음을 의미한다.

Table 3. 에서 높이와 폭에서 많은 차이를 보여 주고 있는데 기존설계에서는 폭은 길이의 1/12, 높이는 길이의 1/15로 하고 있으나 본 연구에서는 고

든 단면의 폭은 높이의 2배로 하고 높이는 두께의 40배로 하여 H형강의 유효단면으로 가정하였다. 각 부재의 중량을 Table 4. 에 비교하였다.

Table 4. Comparison of Weight

Elements	Weight(kgf)		Reduction(kgf)
	Existing	Optimal	
Jib	14000	9700	4300
Tie	3400	4094	-694
Total	17400	13794	3606

Table 4. 에서 부재별로는 Jib은 중량의 감소가 있는 반면에 Tie는 오히려 증가하는 결과를 보여주고 있으나 전체적으로는 중량의 감소를 나타내고 있다. 본 연구에서는 자중을 고려할 때에 보강재의 자중을 부재하중의 50%로 간주하여 추가하였기 때문에 부분적으로 증가도 있을 수 있으나 전체적으로는 중량의 감소를 얻을 수 있음을 나타낸다.

있는 프로그램으로 개발할 수 있다.

## 후 기

이 논문은 아산사회복지 사업재단 1986년도 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

## VII. 결 론

본 연구에서 레벨 러핑 지브크레인 상부 구조의 최적설계를 하였다. 정역학 해석을 통하여 각 부재에 걸리는 하중을 해석하였으며 FEM크레인 설계규정에 의거하여 응력해석을 하였다. 각 부재의 단면을 상자형으로, 높이와 폭을 각각 두께의 40배와 80배로 가정하였고 지브크레인에서 중요한 부재인 지브, 타이, 지브레머의 두께를 설계변수로 하였다. 최적설계의 결과를 기존설계와 비교하였으며 동일한 단면 형상을 갖는 지브와 타이의 경우에서 타이에서는 본 연구의 결과가 오히려 재료의 증가를 보였으나 지브에서는 재료를 많이 절감할 수 있음을 보였다. 기타 부재에 대한 설계는 간단한 개선으로 수행될 수 있다. 본 프로그램에 다양한 부재와 구조에 대한 해석을 추가한다면 보다 광범위하게 활용할 수

## 참 고 문 헌

1. "Rules for the Design of Hoisting Appliances," FEM. 1962
2. "Specification for the Design of Crane Structure," Japanese Industrial Standard B-8821, Tokyo, 1976
3. "크레인 기술지침," KSCP-B-1003 공업진흥청 1976
4. Cho, S.W. and Kwak, B.M., "Optimal Design of Electric Overhead Crane Girders,"
5. 박상철, et al., "Level Luffing Jib Crane Prestatic 계산에 대한 고찰," 대우조선기술, 84G04-056 pp.54~63
6. 박만철, "레벨러핑 크레인의 상부구조 설계를 위한 전산프로그램 개발 연구," 울산대학교 석사 논문 1984
7. 임영신, 주영우, "레벨 러핑 크레인의 최적설계," 울산대학교 논문집 18권 1호, 1987