

## 마그네트 천장크레인의 최적설계와 직교배열을 이용한 민감도 분석

노영희\*, 홍도관(동아대 대학원 기계공학과), 최석창(창원전문대학 기계설계과)  
안찬우, 한근조(동아대 기계산업 시스템공학부)

### The Optimum Design of Magnet Over Head Crane and the Sensitivity Analysis for Orthogonal Array

Y. H. Noh, D. K. Hong (Mech. Eng. Dept., Dong-A Univ.), S. C. Choi (Mech. Design Dept., Chang-Won College), C. W. Ahn, G. J. Han (Mech. & Ind. Syst. Eng. Div., Dong-A Univ.)

#### ABSTRACT

In this study, structural optimum design was applied to the girder of magnet over head crane. The optimization was carried out using ANSYS Code for the deadweight of girder, especially focused on the thickness of its upper, lower, side and reinforced plates. The weight could be reduced up to around 15 % with constraints of its deformation, stress, natural frequency and buckling strength. The structural safety was also verified by the buckling analysis of its panel structure. It might be thought to be very useful to design the conventional structures for the weight save through the structural optimization. The objective function and restricted function were estimated by the orthogonal array, and the sensitivity analysis of design variable for that was operated.

**Key Words** : Dimension optimization(치수최적화), Sensitivity analysis(민감도해석), Magnet over head crane (마그네트 천장크레인), Buckling analysis(좌굴해석), Vibration analysis(진동해석), Girder(거더), 직교배열(Orthogonal array), S/N ratio(신호대 잡음 비), Level number(수준수)

#### 1. 서론

천장크레인의 경량화는 경제적인 측면에서 재료의 절감과 비용경비의 최소화를 추구하는 산업용 크레인에 있어서 매우 중요하고 필수적인 과제이다. 산업현장에서 사용되는 천장크레인 거더의 판 두께는 예전부터 경험적인 치수로 사용되어 왔으며 강도 면에서도 강건설계가 되어있다. 따라서 재료의 비용을 줄이면서 강도를 유지하는 천장크레인 거더와 새들의 판 두께를 선정하는 최적설계를 수행하였다.

본 논문에서는 천장크레인의 경량화를 위해 사각박스형 용접구조물 형태인 거더와 새들의 좌, 우, 상, 하판 및 보강판의 판두께를 설계변수로 하여 중량감소를 위한 치수최적설계<sup>(1)-(3)</sup>를 수행하였다. 모든 설

계는 JIS B8821(KS A1627) 규격을 기준으로 하였으며 제약조건으로는 매 반복회의 von-Mises 응력과 최대변위가 허용응력과 허용변위를 초과하지 않도록 하였고, 천장크레인의 1차 고유진동수<sup>(4)</sup>가 초기모델의 값보다 크게 설계하였으며, 좌굴 임계하중<sup>(5)</sup>이 최대수평, 수직 동하중보다 크게 설계하였다. 또한 직교배열의 S/N을 이용하여 목적함수와 제약함수에 관한 각 설계변수의 민감도를 나타내었다.

#### 2. 천장크레인의 구조해석

##### 2.1 유한요소모델

유한요소는 등방성, 등질성, 선형탄성으로 가정하고, 유한요소모델의 절점은 13,155개이고, 요소는 12,483개로 구성되어 있으며, 천장 크레인에 사용된

재료는 일반 구조용 압연 강재인 SS400이며 레일(Rail)은 37A(37 kg/m)를 사용하였고, 기계적 성질과 천장크레인의 거더와 새들의 주요부위 치수는 Table 1, 2에 나타내었다.

Table 1 Mechanical properties of SS400, Rail 37A

Item list	Description
<b>SS400</b>	
Yield strength( $\sigma_y$ )	245 (MPa) ( $t \leq 16$ )
Density( $\rho$ )	$7.959 \times 10^{-6}$ (kg/mm <sup>3</sup> )
Elastic modulus(E)	$2.0 \times 10^5$ (MPa)
Poisson's ratio( $\nu$ )	0.3
<b>Rail 37A(37 kg/m)</b>	
Yield strength( $\sigma_y$ )	760 ~ 790 (MPa)
Density( $\rho$ )	$7.959 \times 10^{-6}$ (kg/mm <sup>3</sup> )
Elastic modulus(E)	$2.06 \times 10^5$ (MPa)
Poisson's ratio( $\nu$ )	0.3

Table 2 Dimension of over head crane

Item list	Dimension (unit : mm)
Girder span	27,600
Saddle span	10,788
Distance between wheel of trolley	4,600
Girder height	2,300
Girder width	1,350
Saddle height	800
Saddle width	750

## 2.2 경계조건 및 하중조건

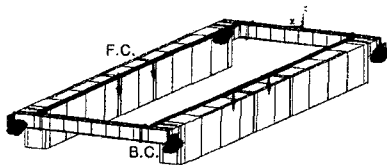


Fig. 1 Loading and boundary condition of magnet over head crane

경계조건은 새들의 밑부분과 대차(bogie)가 결합되는 부분에 X, Y, Z 방향의 병진변위를 모두 구속하고 X, Y, Z 방향의 회전변위는 자유롭게 움직일 수 있도록 한다. 천장크레인의 기하학적 형상과 경계조건 및 하중조건을 Fig. 1에 나타내었다.

하중조건은 수직, 수평, 자중, 열, 바람, 지진, 완

충기에 의한 충돌에 의한 하중등이 있으며, 이 중에서 휠(Wheel) 반력을 구하는 식(1)에 의하여 얻어진 수직 정하중에 동하중계수(1.25)을 곱한 23.4 ton (229,320 N)을 트롤리(Trolley)의 휠과 레일의 접촉부분에 가한다. 동하중계수는 JIS B8821 (KS A1627) 규격을 적용한 것이며, 식(1)의 각 제원은 Table 3에 나타내었다.

$$R_{\max} = \frac{\Sigma PH}{N} + 2 \times P1 \times (W.B. - a) \quad (1)$$

Table 3 Resource of over head crane

Item list	Description
Trolley self weight (PH)	27.5(ton)
Main hoisting load (P1)	40(ton)
Trolley wheel base (W.B.)	4,600(mm)
Number of T/S wheel (N)	4(ea.)
Trolley hook approach (a)	2,150(mm)
Girder span (L)	27,600(mm)

트롤리의 휠과 레일이 접촉하는 부분의 접촉면적은 JIS B8821(KS A1627) 규격에 의해  $122.24 \times 50 \text{ mm}^2$ 를 구할 수 있고, 수직 동하중을 접촉면적으로 나눈 값인 트롤리의 휠과 레일이 접촉하는 부분에 접촉면적을 나눠 준  $37.52 \text{ N/mm}^2$ 을 수직 압력으로 가한다. 또한, 차륜의 진행과 직각으로 생기는 차륜 옆쪽 힘인 수평 하중은 Span과 Wheel base(1 레일상 4차륜인 경우)의 비율에 따라서  $L/a$ 를 먼저 구하고, 그리고  $\lambda$ 를 구한다. 그리고 수평 하중은 식(2)와 같이 구하면 2.58 ton (25,284 N)이 되며, 트롤리의 휠과 레일이 접촉하는  $36.12 \times 50 \text{ mm}^2$ 의 접촉면적을 나눠 준  $14 \text{ N/mm}^2$ 을 수평 압력으로 가한다.

$$S_F = \lambda \cdot R_{\max} \quad (2)$$

## 3. 천장크레인의 최적설계

### 3.1 최적설계의 정식화

Minimize :

$$F(x) = \sum_{i=1}^N A_i \cdot t_i \quad (3)$$

Subject to :

$$\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{al}} - 1 \leq 0, \frac{|u_{\max}|}{u_{al}} - 1 \leq 0 \quad (4)$$

$$f_{al} - f_{max} \leq 0, \frac{p_{max}}{p_{al}} - 1.1 \leq 0 \quad (5)$$

식 (3)의  $F(x)$ 는 최소화 기준이 되는 목적함수로서 계산의 편의상 거더의 체적으로 선정하였고, N은 요소의 개수이고,  $A_i$ 는  $i$  번째 요소의 면적,  $t_i$ 는  $i$  번째 요소의 두께이다. 식 (4)~(5)는 제약조건을 나타내고 있으며, 상태변수인  $\sigma_a$ (허용응력)의 범위는 JIS B8821(KS A1627) 규격에 명시된 하중의 부하상태가 A(권상 하중(=수직 동하중) + 자중 + 수평 동하중)일 때 항복강도에 안전계수 1.5를 고려하여 최대 160 MPa까지 제약조건을 설정하였고  $\sigma_{max}$ 는 매 반복회의 최대 von-Mises 응력이다. 또한 상태변수인  $u_a$ (허용변위)의 범위도 실제 설계 시에 고려되는 거더 Span의 1/800인 34.5 mm까지 제약조건을 설정하였으며  $u_{max}$ 는 매 반복회의 최대변위이다. 그리고 상태변수인  $p_a$ (초기모델의 좌굴강도)의 좌굴강도 범위도 구조물의 안전성등을 고려하여 최대수직 동하중의 1.1배 이상이 되도록 제약조건을 설정하였으며  $p_{max}$ 는 매 반복회에서 계산되어지는 좌굴강도이다. 또한 상태변수인  $f_a$ (초기모델의 1차 고유진동수)의 고유진동수 범위도 초기 모델의 값 이상이 되도록 제약조건을 설정하였으며  $f_{max}$ 는 매 반복회에 계산되어지는 1차 고유진동수이다. Table 4는 각 설계변수(D.V.)와 상태변수(S.V.)의 초기값과 하한, 상한값을 나타내었다.

Table 4 Range of design & state variables

D.V.		Initial	Lower	Upper
Girder	$t_{VR}$ (mm)	8	4	16
	$t_V$ (mm)	8	4	16
	$th_{UP}$ (mm)	8	4	16
	$th_{DOWN}$ (mm)	8	2	16
	$t_{RF}$ (mm)	8	4	16
S.V.		Initial	Lower	Upper
$\sigma_{max}$ (MPa)		-	-	160
$u_{max}$ (mm)		-	-	34.5
$p_{cr}$ (N)		-	$1.1 \times p_{max}$	-
$f_{1st}$ (Hz)		-	8.2	-

#### 4. 직교배열을 이용한 실험계획

일반적으로 직교배열<sup>(6),(7)</sup>은 적은 실험의 횟수로도 평균분석(ANOM)과 분산분석(ANOVA)을 이용하여 각 설계변수의 효과와 최적수준 조합을 찾아낼

수 있다. 기본적으로 S/N 비의 2차식으로 주어지는 품질손실함수로부터 유도된 값을 성능의 평균과 산포를 동시에 고려하는 척도를 사용하는데 본 연구에서는 망소특성(Smaller-the-better-type)문제인 중량과 응력 및 처짐량과 망대특성(Larger-the-better-type)문제인 좌굴강도와 고유진동수의 민감도를 평가하였다. 따라서 직교배열의 S/N을 이용하여 목적함수와 제약함수에 관한 각 설계변수의 민감도를 구하였다. 이러한 평가과정을 통하여 목적함수와 제약함수에 관한 각 설계변수의 상대적인 중요도계수(Important factor)를 정량화 하였다. 설계변수의 수준은 Table 5와 같이 설정하고, Table 8의  $L_{16} 4^5$  직교배열표에 분배하여 해석을 수행하였다.

Table 5 Factors and levels

	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4
$t_{VR}$	4	8	12	16
$t_V$	6	10	14	16
$th_{up}$	6	10	14	16
$th_{down}$	2	6	10	14
$t_{RF}$	2.5	5	7.5	10

#### 5. 결과 및 고찰

##### 5.1 초기천장크레인모델의 유한요소해석

사각박스형 용접구조물 형태인 초기천장크레인 모델을 유한요소해석 한 결과, 새들 B의 끝부분에 88.27 MPa의 최대응력이 발생하였다. 또한 최대변위는 13.66 mm가 발생하였으며, 최대변위가 발생하는 지점은 거더의 중앙부이다. 초기 천장크레인모델을 유한요소해석한 결과를 Table 6에 나타내었다.

Table 6 Result of initial over head crane model

Item List	Description
Max. von-Mises stress (MPa)	88.27
Max. displacement (mm)	13.66
Buckling strength (N)	$2.02 \times p_{max}$
1st natural frequency (Hz)	8.31

##### 5.2 천장크레인 거더의 치수최적설계

천장크레인 거더의 판 두께를 치수최적화한 결과, 설계변수  $th_{DOWN}$ 가 8 mm에서 2.65 mm로 크기가 약 67% 줄어 모든 설계변수 중에서 경량화에 가장 민감한 변수임을 알 수 있었다. 그 이외의 설계변수  $t_{VR}$ ,  $th_{UP}$ ,  $t_{RF}$ ,  $th_{DOWN}$ ,  $t_V$  들은 모두 1~2 mm로 11~21%의 크기가 줄었다. 최적 설계 변수에서 발생하는 최대변위는 20.14 mm, 최대응력은 109.9MPa로 초기 모델보다 각각 33%와 20%가 증가하였다. 또한, 좌굴

강도는  $1.32 \times p_{max}$  N으로 초기 모델보다 각각 37%가 감소하였고, 1차 고유진동수는 8.34Hz로 0.2%가 증가하였다. 치수최적화를 수행하여 목적함수인 체적은 초기 모델보다 약 15% 감소한 경량화 된 모델을 얻었다. Table 7에는 치수최적설계의 설계변수와 상태변수 및 목적함수의 최적결과를 나타내었다.

Table 7 Optimum result of thickness of plates

D.V.	Optimum	S.V.	Optimum
$t_{VR}$	6.79(mm)	Optimum von-Mises stress(MPa)	109.92
$t_V$	6.76(mm)		
$th_{UP}$	7.06(mm)	Optimum buckling strength	$1.32 \times p_{max}$
$th_{DOWN}$	2.65(mm)	Optimum displacement(mm)	20.14
$t_{RF}$	6.32(mm)	1st Natural frequency(Hz)	8.19
<b>Objective function</b>			
Volume		15 % reduced	

### 5.3 민감도 해석

Fig. 2는 응력에 대한 설계변수의 기여도가 가장 큰 것은  $t_{VR}$ ,  $t_{RF}$ ,  $t_V$ ,  $th_{DOWN}$ ,  $th_{UP}$ 의 순으로 나타났다.

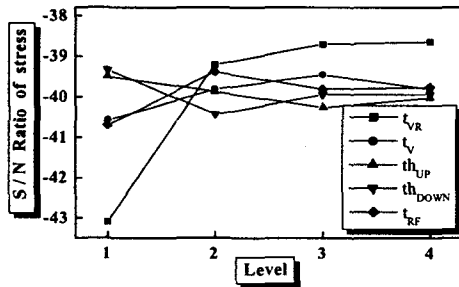


Fig. 2 Level average graph of stress

Fig. 3은 처짐에 대한 설계변수의 기여도가 가장 큰 것은  $th_{DOWN}$ ,  $t_{VR}$ ,  $t_V$ ,  $th_{UP}$ ,  $t_{RF}$ 의 순으로 나타났다.

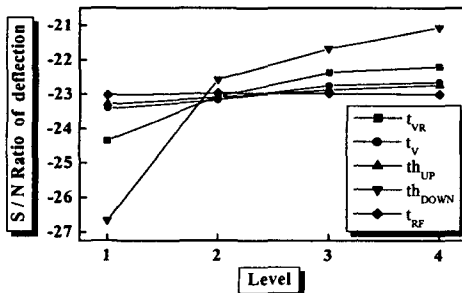


Fig. 3 Level average graph of deflection

Fig. 4는 좌굴강도에 대한 설계변수의 기여도가 가장 큰 것은  $t_V$ ,  $t_{VR}$ ,  $t_{RF}$ ,  $th_{DOWN}$ ,  $th_{UP}$ 의 순으로 나타났다.

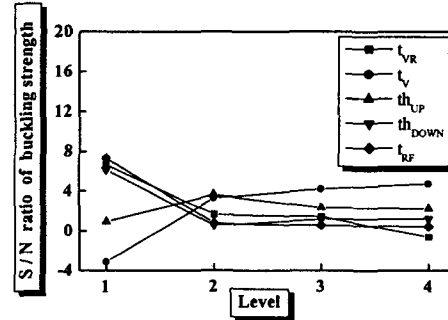


Fig. 4 Level average graph of buckling strength

Fig. 5는 1차 고유진동수에 대한 설계변수의 기여도가 가장 큰 것은  $t_{VR}$ ,  $t_V$ ,  $th_{UP}$ ,  $t_{RF}$ ,  $th_{DOWN}$ 의 순으로 나타났다.

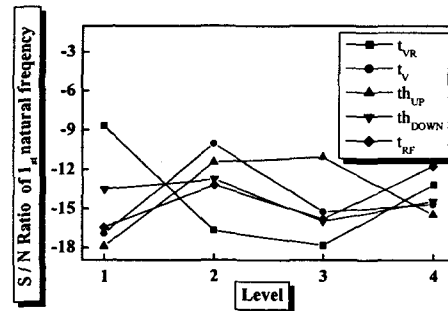


Fig. 5 Level average graph of 1st natural frequency

Fig. 6은 체적에 대한 설계변수의 기여도가 가장 큰 것은  $t_{VR}$ ,  $t_V$ ,  $th_{UP}$ ,  $th_{DOWN}$ ,  $t_{RF}$  순으로 나타났다.

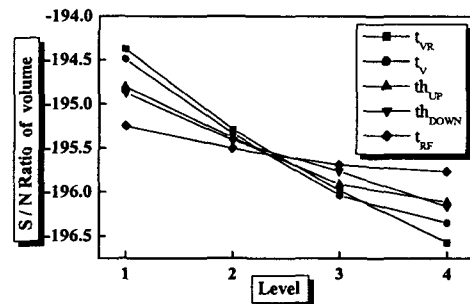


Fig. 6 Level average graph of volume

Table 8  $L_{16} (4^5)$ orthogonal array

Analysis number	$t_{VR}$	$t_V$	$th_{UP}$	$th_{DOWN}$	$t_{RF}$	Stress (MPa)	Deflection (mm)	Buckling (N)	1st Natural Frequency (Hz)	Volume ( $m^3$ )
1	1	1	1	1	1	150.15	27.45	$0.36 \times p_{max}$	3.54	3.79e9
2	1	2	2	2	2	140.18	16.13	$0.51 \times p_{max}$	1.02	4.9e9
3	1	3	3	3	3	139.87	13.58	$0.51 \times p_{max}$	3.12	6.0e9
4	1	4	4	4	4	141.06	12.36	$0.49 \times p_{max}$	2.62	6.72e9
5	2	1	2	3	4	96.65	12.98	$1.85 \times p_{max}$	6.95	5.30e9
6	2	2	1	4	3	85.32	11.99	$1.18 \times p_{max}$	8.12	5.67e9
7	2	3	4	1	2	77.157	20.411	$0.506 \times p_{max}$	7.3	6.03e9
8	2	4	3	2	1	109.09	12.87	$0.42 \times p_{max}$	5.28	6.31e9
9	3	1	3	4	2	91.31	10.86	$2.11 \times p_{max}$	6.91	6.19e9
10	3	2	4	3	1	94.83	11.22	$0.48 \times p_{max}$	8.51	6.48e9
11	3	3	1	2	4	81.29	12.60	$1.19 \times p_{max}$	8.52	6.16e9
12	3	4	2	1	3	78.29	19.44	$0.426 \times p_{max}$	7.4	6.36e9
13	4	1	4	2	3	98.11	12.5	$3 \times p_{max}$	7.72	6.36e9
14	4	2	3	1	4	80.84	19.8	$0.75 \times p_{max}$	1.448	6.49e9
15	4	3	2	4	1	88.74	10.17	$0.463 \times p_{max}$	0	7.247e9
16	4	4	1	3	2	76.02	10.97	$1.28 \times p_{max}$	8.48	6.99e9

## 5. 결론

사각박스형 용접구조물 형태인 마그네트 천장크레인 거더의 좌, 우, 상, 하판 및 보강판의 두께에 대한 치수최적화 및 직교배열을 이용하여 평가된 목적함수와 제약함수에 대한 설계변수의 민감도해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 마그네트 천장크레인 거더의 경량화를 위해 거더의 좌, 우, 상, 하판 및 보강판의 두께에 대한 치수 최적화를 수행하여 초기 거더 보다 약 15% 중량을 줄인 경량화된 최적모델을 얻었다.

2. 좌, 우, 상, 하판 및 보강판의 두께 중 하판의 두께가 약 67% 줄었으며 경량화에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있었다.

3. 직교배열을 이용하여 평가된 목적함수와 제약함수에 대한 설계변수의 민감도해석 결과, 응력, 처짐, 좌굴강도, 1차고유진동수, 체적에 대한 가장 민감한 설계변수는  $t_{VR}$ ,  $th_{DOWN}$ ,  $t_V$ ,  $t_{VR}$ ,  $t_{VR}$ 이다.

4. 마그네트 천장크레인 거더의 경량화는 거더의 좌, 우, 상, 하판 및 보강판의 두께 변화에 영향이 크게 작용하기 때문에 현장에서 고려하여 설계하면 비용을 절감할 수 있다.

## 참고문헌

1. Jasbir S. Arora, 1989, "Introduction to Optimum Design", McGraw-hill Book Company.
2. 김주태, 1996, "효율적인 다목적 최적화 기법", 한국과학기술원 석사학위논문.
3. 류명기, 2001, "Evolutionary Structural Optimization 방법을 이용한 콘크리트 박스거더 단면의 형상최적화", 한국과학기술원 석사학위논문.
4. Zhu, L. D., 2000, "Triple-girder model for modal analysis of cable-stayed bridges with warping effect", Thin-walled structures, Vol. 22, No. 1, pp. 25-38.
5. Lee, S. C., 1996, "Shear buckling coefficients of plate girder web panels", Computers & structures, Vol. 59, No. 5, pp. 789-796.
6. 김명업, 이두호, 1999, "다구찌 직교배열을 이용한 승용차의 실내소음 분석 및 개선", 한국소음진동 공학회, 제9권, 제5호, pp. 998-1004
7. 박성현, 1984, "현대실협계획법", 민영사