

# 좌굴, 진동, 강도를 고려한 천장크레인의 경량화에 관한 연구

홍도관\* · 안찬우\*\*

\*동아대학교 생산기술연구소 특별연구원, \*\*동아대학교 기계산업시스템공학부 교수

## A Study on the Reduction of Over Head Crane's Weight Considering Buckling, Vibration and Strength

Do-Kwan Hong\* · Chan-Woo Ahn\*\*

\*Industrial Technology Research Center, Dong-A University, Busan 604-714, Korea

\*\*Division of Mechanical & Industrial Systems Engineering, Dong-A University, Busan 604-714, Korea

**요약** : 본 논문은 마그네트 천장크레인 거더에 대한 경량화를 위한 구조최적설계를 수행하였다. 최적화는 ANSYS 소프트웨어를 사용하여 거더의 중량에 대하여 수행되었으며, 특히 거더의 상판, 하판, 옆판 그리고 보강판의 두께인 치수에 초점을 맞추었다. 마그네트 크레인의 중량은 처짐, 응력, 고유진동수와 좌굴강도의 제한을 만족하며 약 15%까지 감량되었으며 또한, 구조적인 안전성이 거더의 판넬구조물의 좌굴해석에 의해 입증되었다. 구조최적화로 중량감소에 대해 예로부터 경험적으로 설계된 구조물을 설계하는 것에 매우 유용할 것으로 생각된다. 또한, 본 논문에서는 설계변수들이 목적함수와 상태변수에 미치는 민감도를 평가하였다.

**핵심용어** : 마그네트 천장크레인 거더, 민감도해석, 치수최적화, 좌굴해석, 진동해석

**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. Also this paper grasped the sensitivity influenced the design variables upon the objective function and the state variables.

**Key words** : Magnet over head crane girder, Sensitivity analysis, Dimension optimization, Buckling analysis, Vibration analysis

## 1. 서론

천장크레인의 경량화는 경제적인 측면에서 재료의 절감과 비용의 최소화를 추구하는 산업용 크레인에 있어서 매우 중요하고 필수적인 과제이다. 산업현장에서 사용되는 천장크레인 거더의 판 두께는 예전부터 경험적인 치수로 사용되어 왔으며 강도면에서도 강건설계가 되어있다. 따라서 재료를 절감하면서 좌굴, 진동, 강도를 유지하는 경량화된 천장크레인 거더의 판 두께를 선정하는 최적설계에 적용하였다.

본 논문에서는 기존의 논문<sup>(1)</sup>에 비해서 거더와 새들이 모두 포함된 모델이며 또한, 사각박스형 용접구조물 형태인 마그네트 천장크레인의 거더의 좌, 우, 상, 하판과 보강판의 치수가 각각 8 mm인 판의 두께를 설계변수로 하여 중량감소를 위한 치수최적설계<sup>(2)-(4)</sup>를 수행하였다. 그리고, 모든 설계 기준은 크레인강 구조 부분의 계산 기준인 KS A1627 (JIS B8821) 규격으로 하였으며 제약조건으로는 매 반복회의 von-Mises 응력과

최대 변위가 허용응력과 허용변위를 초과하지 않도록 하였고, 천장크레인의 1차 고유진동수<sup>(5)</sup>가 초기모델보다 크게 설계하였으며, 좌굴 임계하중<sup>(6)</sup>이 최대 수평, 수직 동하중보다 크게 설계하였다. 또한 각 판의 두께인 설계변수의 변화에 따른 목적함수와 제약조건에 미치는 민감도를 평가하였다.

## 2. 유한요소해석

### 2.1 유한요소모델

본 논문의 크레인은 W社에서 제작하여 P社에서 실제로 사용되는 모델로서 크레인의 분류에서 IV군에 속하는 마그네트 천장크레인이며, 주행(Traversing) 최고속도는 60 m/min, 횡행(Travelling) 최고속도는 100 m/min이며, 최대권상하중이 20 ton이고 거더와 새들의 내부에 보강판이 각각 13, 11 개인 모델이다. 유한요소해석에 사용된 상용 프로그램은 ANSYS 5.6<sup>(7),(8)</sup>을 이용하였고, 천장크레인의 구조와 명칭은 Fig. 1에 나타내었다.

\* 정회원, vibhong@naver.com, (051)200-6716  
\*\* cwahn@daunet.donga.ac.kr, (051)200-7643

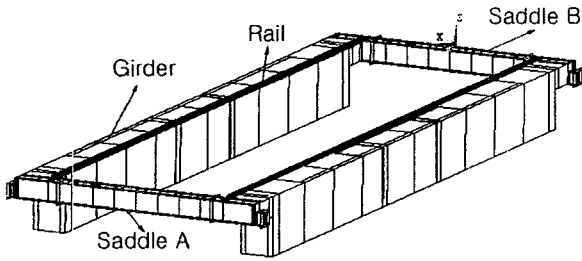


Fig. 1 Schematic diagram of over head crane

천장크레인에 사용된 판은 길이나 넓이에 비하여 두께가 얇아서 4 절점 쉘요소(Shell element)를 사용하여 사각형요소로 분할하였다. 또한 크레인 레일부분은 8 절점 솔리드요소(Solid element)를 사용하여 사각형요소로 분할하였다. 요소는 등방성, 등질성, 선형탄성으로 가정하였으며, 유한요소모델의 절점은 12,665개이고, 요소는 11,767개로 구성되어 있다. 천장크레인에 사용된 재료는 일반 구조용 압연강재인 SS400이며 레일(Rail)은 37A(37 kg/m)를 사용하였고, 거더와 새들의 주요부위 치수와 기계적 성질은 Table 1, 2에 나타내었다.

2.2 경계조건 및 하중조건

천장크레인의 유한요소모델에서는 실제와 같은 완벽한 구속을 하기가 어려우므로 유한요소해석에서는 실제와 비슷한 거동을 하기 위하여 새들의 밑부분과 대차(bogie)가 결합되는 부분에 X, Y, Z 방향의 병진변위는 모두 구속하고 X, Y, Z 방향의 회전변위는 자유롭게 움직일 수 있도록 한다. 천장크레인의 기하학적 형상과 경계조건 및 하중조건을 Fig. 2에 나타내었다.

하중조건은 수직, 수평, 자중, 열, 바람, 지진, 완충기에 대한 충돌하중 등이 있으며 이중에서 휠(Wheel) 반력을 구하는 식(1)에 의하여 얻어진 수직 정하중에 동하중계수(1.4)를 곱한 24.5 ton (240,100 N)을 트롤리(Trolley)의 휠과 레일의 접촉부분에 가한다. 동하중계수는 KS A1627(JIS B881) 규격을 적용한 것이며, 식(1)의 각 재원들은 Table 3에 나타내었다.

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

Table 1 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

Table 2 Mechanical properties of SS400, Rail 37A

Item list	Description
SS400	
Yield strength( $\sigma_y$ )	245(MPa) (t ≤ 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
Rail 37A(37 kg/m)	
Yield strength( $\sigma_y$ )	760 ~ 790(MPa)
Density( $\rho$ )	$8.01 \times 10^{-6}$ (kg/mm <sup>3</sup> )
Elastic modulus(E)	$2.06 \times 10^5$ (MPa)
Poisson's ratio( $\nu$ )	0.3

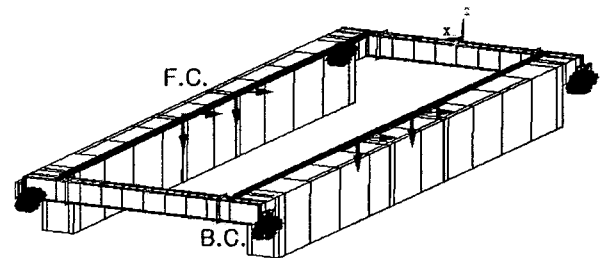


Fig. 2 Loading and boundary condition of over head crane

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)

트롤리의 휠과 레일이 접촉하는 부분의 접촉면적은 KS A1627(JIS B8821) 규격에 의해  $122.24 \times 50 \text{ mm}^2$ 를 구할 수 있고, 수직 동하중을 접촉면으로 나눈 값인  $37.52 \text{ N/mm}^2$ 을 수직 압력으로 가한다.

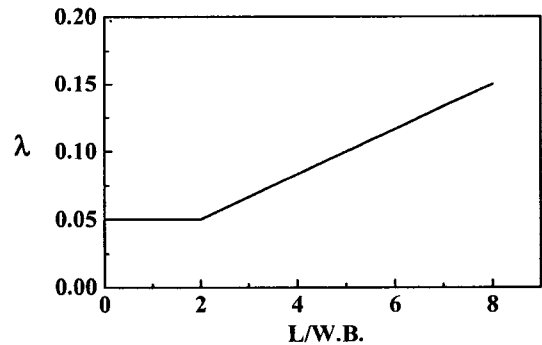


Fig. 3 Wheel side force

KS A1627(JIS B8821) 규격에 의해 차륜의 진행과 직각으로 생기는 차륜 옆쪽 힘인 수평하중은 Fig. 3에서 Girder span과 Wheel base(1 레일상 4 차륜인 경우)의 비율(27,600/4,600=6)에 따라서  $\lambda$ 를 먼저 구한다. 그리고 수평하중은 식 (2)에서 구하면 2.58 ton(25,284 N)이 되며, 트롤리의 휠과 레일이 접촉하는 36.12×50 mm<sup>2</sup>의 접촉면적을 나눠 준 14 N/mm<sup>2</sup>을 수평 압력으로 가한다. 그리고 마지막으로 전체 크레인 모델의 자중을 고려하였다.

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

### 3. 치수최적설계

#### 3.1 최적설계의 정식화

Minimize :

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

Subject to :

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

$$\frac{|u_{max}|}{u_{al}} - 1 \leq 0 \quad (5)$$

$$\frac{f_{al}}{f_{max}} - 1 \leq 0 \quad (6)$$

$$1.1 \times \frac{p_{max}}{p_{al}} - 1 \leq 0 \quad (7)$$

식 (3)의  $F(x)$ 는 최소화 기준이 되는 목적함수로서 계산의 편의상 중량대신 거더의 체적으로 하였고, N은 요소의 개수,  $A_i$ 는  $i$  번째 요소의 면적,  $t_i$ 는  $i$  번째 요소의 두께이다. 식 (4)~(7)은 제약조건을 나타내고 있으며, 상태변수인  $\sigma_{al}$  (허용응력)의 범위는 KS A1627(JIS B8821) 규격에 명시된 하중의 부하상태가 A 조건 [권상하중(=수직동하중) + 자중 + 수평 동하중]일 때 항복강도에 안전계수 1.5를 고려하여 최대 160 MPa까지 제약조건을 설정하였으며, 이때  $\sigma_{max}$ 는 매 반복회의 최대 von-Mises 응력이다. 또한 상태변수인  $u_{al}$  (허용변위)의 범위도 실제 설계 시에 고려되는 거더 Span의 1/800인 34.5 mm까지 제약조건을 설정하였으며  $u_{max}$ 는 매 반복회의 최대변위이다. 그리고, 상태변수인  $p_{al}$  (초기모델의 좌굴강도)의 좌굴강도 범위도 구조물의 안전성등을 고려하여 최대수평, 수직 동하중의 1.1 배 이상이 되도록 제약조건을 설정하였으며  $p_{max}$ 는 매 반복 회에서 계산되어지는 좌굴강도이다.

또한 상태변수인  $f_{al}$ (초기모델의 1차 고유진동수)의 고유진동수 범위도 초기 모델 값의 98% 이상이 되도록 제약조건을 설정하였으며  $f_{max}$ 는 매 반복회에 계산되어지는 1차 고유진동수이다. Table 4는 각 설계변수(D.V.)와 상태변수(S.V.)의 초기

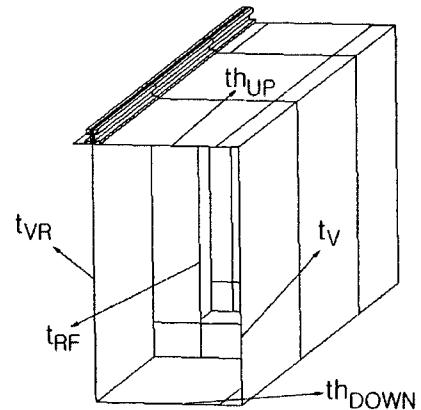


Fig. 4 Design variables of over head crane girder

Table 4 Range of design & state variables

D.V.	Initial	Lower	Upper
t <sub>VR</sub> (mm)	8	4	16
t <sub>V</sub> (mm)	8	4	16
th <sub>UP</sub> (mm)	8	4	16
th <sub>DOWN</sub> (mm)	8	2	16
t <sub>RF</sub> (mm)	8	4	16
S.V.	Initial	Lower	Upper
$\sigma_{max}$ (MPa)	-	-	160
$u_{max}$ (mm)	-	-	34.5
$p_{max}$ (N)	-	1.1 × $p_{max}$	-
$f_{max}$ (Hz)	-	8.2	-

값과 하한, 상한값을 나타내고 있으며, Fig. 4는 천장크레인 거더 모델의 각 부분에 적용된 설계변수를 보여주고 있다.

#### 3.2 최적설계 알고리즘

목적함수와 제약조건을 가진 제약 최적화 문제는 비제약 문제를 논리적으로 확장한 것으로 볼 수 있다. 최급강하법은 목적함수의 경사도를 계산하여 탐색방향을 구하는데 사용하며, 이 경사도 벡터는 점  $x^*$ 에서 함수  $f(x)$ 의 최대 증가율 방향을 나타낸다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\nabla f(x) = \left[ \frac{\partial f(x^k)}{\partial x_i} \right] = c^{(k)}$$

여기서,

i : 설계변수의 수

k : 벡터의 계산단계

이와 같은 경사도 벡터의 성질을 이용하여 제약 최적화 문제에 대해서 반복적 알고리즘을 Flow chart로 Fig. 5에 나타내었다.

### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1 천장크레인 초기모델의 유한요소해석

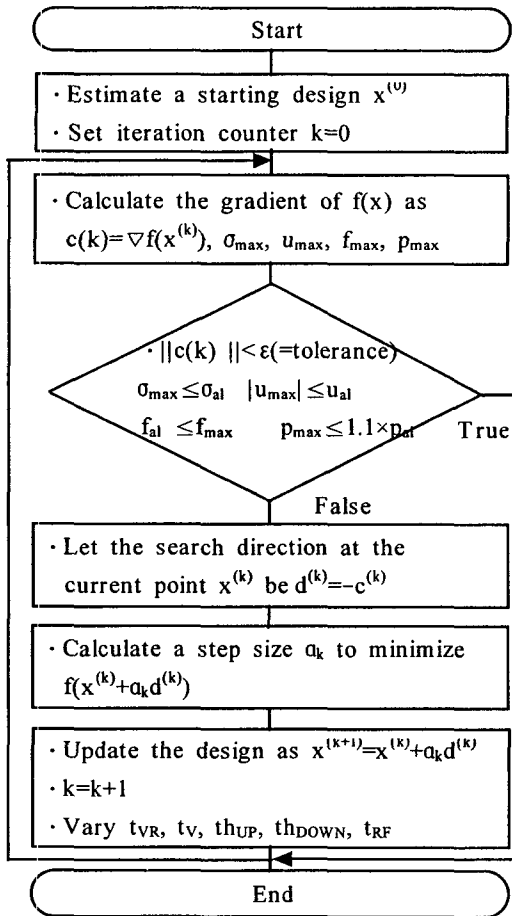


Fig. 5 Flow chart

사각박스형 용접구조물 형태인 천장크레인 초기모델을 유한요소해석 한 결과, 새들 B의 끝부분에 102.27 MPa의 최대응력이 발생하였다. 또한 최대변위는 13.69 mm가 발생하였으며, 최대변위가 발생하는 지점은 거더의 중앙부이다. 천장크레인 초기모델에 대한 고유진동수 해석과 좌굴해석한 결과를 Table 5에 나타내었다.

초기모델에 대한 von-Mises 응력분포와 변위분포를 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었고, Fig. 8은 최대응력이 발생하는 새들 B와 거더의 경계부분을 나타내었다.

Table 5 Result of initial over head crane model

Item List	Description
Max. von-Mises stress(MPa)	102.27
Max. displacement(mm)	13.69
Buckling strength(N)	1.476 × p <sub>max</sub>
1st natural frequency(Hz)	8.2

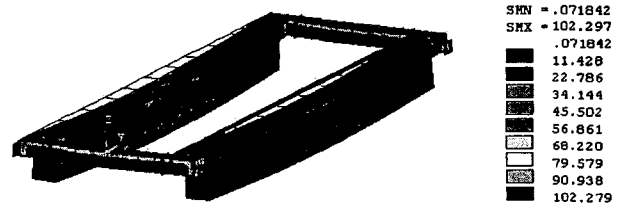


Fig. 6 Stress distribution of an initial model

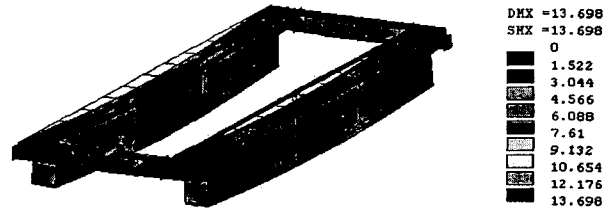


Fig. 7 Displacement distribution of an initial model

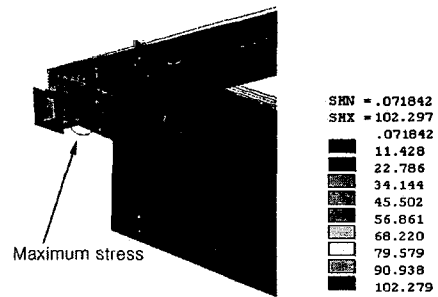


Fig. 8 Maximum stress of an initial model

#### 4.2 천장크레인거더의 치수최적설계

천장크레인 거더의 판 두께를 치수최적화한 결과, 설계변수 t<sub>hDOWN</sub>가 8 mm에서 2.65 mm로 치수가 약 67% 줄어 모든 설계변수 중에서 경량화에 가장 크게 기여한 변수임을 알 수 있었다. 그 이외의 설계변수 t<sub>vr</sub>, t<sub>v</sub>, t<sub>hUP</sub>, t<sub>rf</sub>들은 모두 1~2 mm로 11~21%의 크기가 줄었다. 최적 설계변수에서 발생하는 최대변위는 20.14 mm, 최대응력은 109.9 MPa로 초기 모델보다 각각 33%와 20%가 증가하였다. 또한, 좌굴강도는 1.32 × p<sub>max</sub> N으로 초기 모델보다 각각 37%가 감소하였고, 1차 고유진동수는 8.34 Hz로 0.2%가 증가하였다. 치수최적화를 수행하여 목적함수인 체적은 초기 모델보다 약 15% 감소한 경량화된 모델을 얻었다. Table 6에는 치수최적설계의 설계변수와 상태변수 및 목적함수의 최적결과를 나타내었다.

#### 4.3 민감도 해석

ANSYS 5.6의 Sweep tool을 사용하여 정규화된 설계변수인 t<sub>vr</sub>, t<sub>v</sub>, t<sub>hUP</sub>, t<sub>hDOWN</sub>, t<sub>rf</sub>의 각각의 변화에 따른 목적함수 및 제약조건들의 민감도 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻

Table 6 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
Objective function			
Volume		15 % reduced	

었다. Fig. 9~13은 치수최적화된 최적 결과에서 설계변수인 두께들의 변화에 따른 목적함수와 제약조건들의 민감도를 나타내고 있으며, 모두 최적점 부근과 전후에 민감하게 영향을 받고 있다.

Fig. 9~13에서 횡축인 Normalized design variable은 Table 4의 각 설계변수의 전체범위를 각각 10등분하여 정규화 한 것이며, 다른 설계변수들은 모두 상수로 하고, 하나의 설계변수를 변화시켰을 때 목적함수와 제약조건들이 변화하는 것을 나타낸 것이다. 기울기가 클수록 민감하며, 수평선은 최적값을 나타내고 있다. Fig. 9는 목적함수인 체적에 대한 민감도를 나타내고 있으며 최적점 전후에 모든 설계변수에 대해서 민감한 것을 알 수 있었다.

Fig. 10은 제약함수인 응력에 대한 민감도를 나타내고 있으며 설계변수 중에서 기울기가 가장 큰 거더의 상판두께인  $th_{UP}$ 가 최적점 전후에서 가장 민감하였으며, Fig. 11은 제약함수인 처짐량에 대한 민감도를 나타내고 있으며 설계변수 인자 중에 설계변수 중에서 기울기가 가장 큰 거더의 하판두께인  $th_{DOWN}$ 이 최적점 전후에서 가장 민감하였다. 또한, Fig. 12는 제약함수인 천장크레인의 1차 고유진동수에 대한 민감도를 나타내었고 최적점 전에는 모든 설계변수가 민감하였으며, 최적점 후에는 설계변수 중에서 기울기가 큰 거더의 하판두께인  $th_{DOWN}$ 가 민감하였다. 마지막으로 Fig. 13은 제약함수인 천장크레인의 1차 좌굴계수에 대한 민감도를 나타내었고 최적점 전에는 모든 설계변수가 민감하였으며 최적점 후에는 설계변수 중에서 기울기가 가장 큰 거더의 상판두께인  $th_{UP}$ 가 민감하였다. 이와 같이 판의 두께인 설계변수가 목적함수와 각 제약함수들에 대한 민감도를 파악하여 실제 설계 시에 적용할 수 있다.

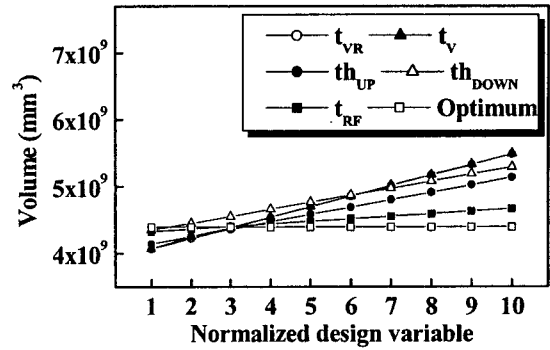


Fig. 9 Sensitivity of volume in dimension optimization

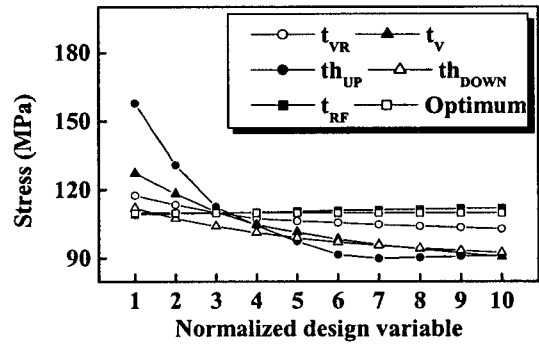


Fig. 10 Sensitivity of stress in dimension optimization

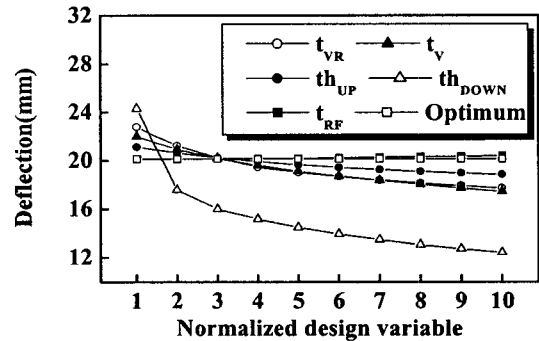


Fig. 11 Sensitivity of deflection in dimension optimization

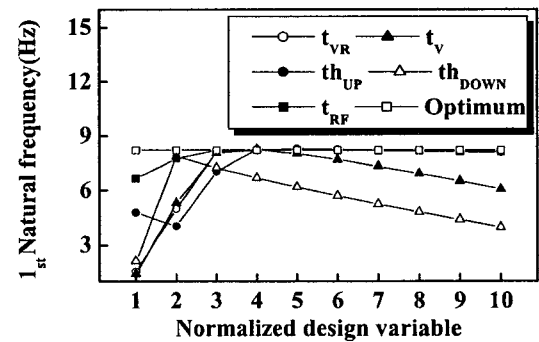


Fig. 12 Sensitivity of 1st natural frequency in dimension optimization

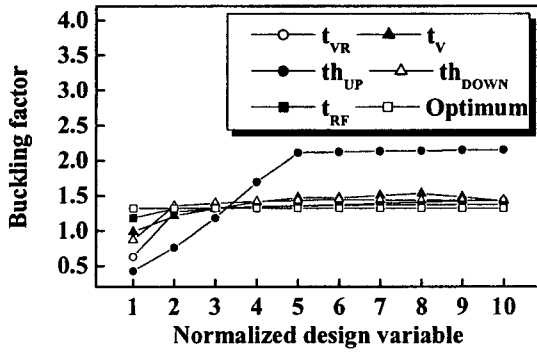


Fig. 13 Sensitivity of buckling factor in dimension optimization

### 5. 결 론

본 연구에서 사각박스형 용접구조물 형태인 마그네트 천장크레인 거더의 좌, 우, 상, 하판 및 보강판의 두께에 대한 치수 최적화를 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 모델보다 15% 중량을 줄인 경량화된 최적 모델을 얻었다.
- (2) 좌, 우, 상, 하판 및 보강판의 두께 중 하판의 두께가 약 67% 줄었으며 경량화에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있었다.
- (3) 좌, 우, 상, 하판 및 보강판의 두께 중 목적함수인 체적은 모든 설계변수가 민감하였으며 제약함수인 응력, 처짐, 진동, 좌굴에 가장 민감한 설계변수는 상판, 하판, 하판, 상판이다.

- (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.

### 참 고 문 헌

- [ 1 ] 안찬우,한근조,홍도관,최석창(2001):천장크레인 거더의 최적 설계에 관한 연구, 한국항만학회지, Vol. 15, No. 2, pp.183-190
- [ 2 ] Jasbir S. Arora(1989):Introduction to Optimum Design, McGraw-hill Book Company
- [ 3 ] 김주태(1996):효율적인 다목적 최적화 기법,한국과학기술원 석사학위논문
- [ 4 ] 류명기(2001):volutionary Structural Optimization 방법을 이용한 콘크리트 박스거더 단면의 형상 최적화,한국과학기술원 석사학위논문
- [ 5 ] 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.
- [ 6 ] Lee, S. C.(1996):Shear buckling coefficients of plate girder web panels, Computers & structures, Vol. 59, No. 5, pp.789-796
- [ 7 ] Ansys Element Reference Release 5.5(1999)
- [ 8 ] Ansys Design Optimization(1999):SAS IP, Inc., canons-burg

원고접수일 : 2002년 03월 25일  
 원고채택일 : 2002년 08월 13일