韓國航海港灣學會 第1卷 第1號, pp.241~247. 2002.

論 文

마그네트 천장크레인 거더의 최적설계

노영희* · 홍도관* · 최석창** · 안찬우*** · 한근조***

Optimum Design of Magnet Over Head Crane Girder

Y. H. Noh · D. K. Hong · S. C. Choi · C. W. Ahn · G. J. Han

Key Words : 마그네트 천장크레인 거더(Magnet over head crane girder), 좌굴해석(Buckling analysis), 치수최적화(Dimension optimization), 진동해석(Vibration analysis)

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.

1. 서 론

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 강도면에서도 강건설계가 되어있다. 따라서 재료의 비용을 줄이면서 강도를 유지하는 천장크레인 거더의 판 두께를 선정하는 최적설계에 적용하였다.

본 논문에서는 마그네트 천장크레인의 경량화를 위해 사각박스형 용접구조물 형태인 거더의 좌, 우, 상, 하판과 보강판이 각각 8 mm인 판의 두께를 설계변수로 하여 중량감소를 위한 치수최적설계[1]~[3]를 수행하였다. 모든 설계는 JIS B8821(KS A1627) 규격을 기준으로 수행하였으며 제약조건으로는 매 반복회의 von-Mises 응력과 최대 변위가 허용응력과 허용변위를 초과하지 않도록 하였고, 천장크레인의 1차 고유진동수[4]가 초기모델보다 크게 설계하였으며, 좌굴 임계하중[5]이 최대 수평, 수직 동하중

* 동아대학교 대학원
** 창원전문대학 기계설계과
*** 동아대학교 기계산업시스템공학부

보다 크게 설계하였다. 또한 설계변수의 변화에 따른 목적함수와 제약조건의 변화양상을 살펴봄으로써 각 판의 두께 변화가 중량과 제약조건에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 천장크레인의 구조해석

2.1 유한요소모델

본 논문의 크레인은 분류 중에서 Ⅳ군에 속하는 마그네트 천장크레인이며, 주행(Traversing) 최고속도는 60 m/min, 횡행(Travelling) 최고속도는 100 m/min이며, 최대권상하중이 20 ton인 모델이며 거더와 새들의 내부에 보강판이 각각 13, 11 개가 있다. 유한요소해석[6]에 사용된 상용 프로그램은 ANSYS 5.6[7],[8]을 이용하였고, 천장크레인의 구조와 명칭은 Fig. 1에 나타내었다.

천장크레인에 사용된 판은 길이나 넓이에 비하여 두께가 얇기 때문에 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 가정하고, 유한요소모델의 절점은 12,665 개이고, 요소는 11,767 개로 구성되어 있다.

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

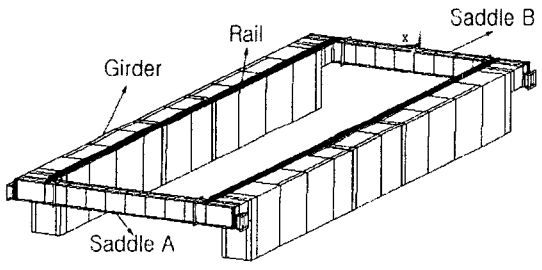

Fig. 1 Schematic diagram of over head crane

Table 1 Mechanical properties of SS400, Rail 37A

Item list	Description
SS400	
Yield strength (σ_y)	235 (MPa)
Density (ρ)	7.959×10^{-6} (kg/mm^3)
Elastic modulus (E)	2.0×10^5 (MPa)
Poisson's ratio (ν)	0.3
Rail 37A(37 kg/m)	
Yield strength (σ_y)	760 ~ 790 (MPa)
Density (ρ)	8.01×10^{-6} (kg/mm^3)
Elastic modulus (E)	2.06×10^5 (MPa)
Poisson's ratio (ν)	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 trolly	4,600
Girder height	2,300
Girder width	1,350
Saddle height	800
Saddle width	750

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 의한 충돌등이 있으며 이중에서 휠(Wheel) 반력을 구하는 식 (1)에 의하여 얻어진 수직 정하중에 동하중계수(1.25)를 곱한 23.4 ton (229,320 N)을

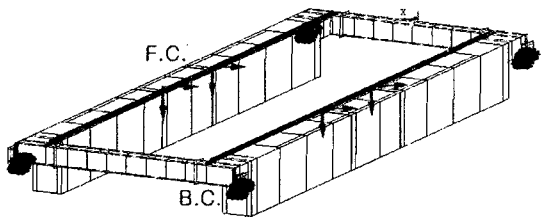

Fig. 2 Loading and boundary condition of over head crane

트롤리(Trolly)의 휠과 레일의 접촉부분에 가한다. 동하중계수는 JIS B881 (KS A1627) 규격에 따른 것이며 각 재원들은 Table 3에 나타내었다.

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

트롤리의 휠과 레일이 접촉하는 부분의 접촉면적은 JIS B8821(KS A1627) 규격에 의해 122.24×50 mm^2이며, 수직 동하중을 접촉면으로 나눈 값인 37.52 N/mm^2을 수직 압력으로 가한다.

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)

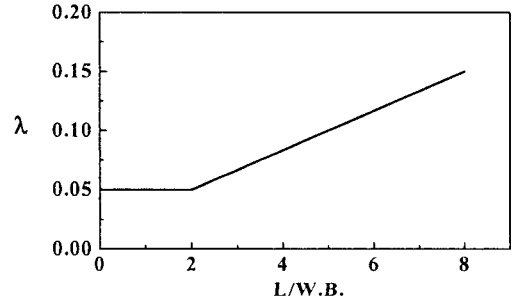

Fig. 3 Wheel side force

차륜의 진행과 직각으로 생기는 차륜 옆쪽 힘인 수평하중은 Fig. 3에서 Span과 Wheel base(1 레일상 4 차륜인 경우)의 비율에 따라서 λ를 먼저 구한다. 그리고 수평하중은 식(2)에서 구하면 2.58 ton(25,284 N)이 되며, 트롤리의 휠과 레일이 접촉하는 36.12×50 mm^2의 접촉면적을 나눠 준 14 N/mm^2을 수평 압력으로 가한다. 그리고 마지막으로 전체 크레인 모델의 자중을 고려하였다.

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

3. 천장크레인 거더의 최적설계

3.1 최적설계의 정식화

Minimize :

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

Subject to :

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

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

$$f_{al} - f_{\max} \le 0 \quad \cdots\cdots (6)$$

$$\frac{p_{\max}}{p_{al}} - 1.1 \le 0 \quad \cdots\cdots (7)$$

식(3)의 $F(x)$는 최소화의 기준이 되는 목적함수로서 계산의 편의상 중량대신 거더의 체적으로 하였고, N은 요소의 개수, A_i는 i 번째 요소의 면적, t_i는 i 번째 요소의 두께이다. 식(4)~(7)은 제약조건을 나타내고 있으며, 상태변수인 σ_{al} (허용응력)의 범위는 JIS B8821(KS A1627) 규격에 명시된 하중의 부하상태가 A(권상하중(=수직동하중) + 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_{al} (허용변위)의 범위도 실제 설계 시에 고려되는 거더 Span의 1/800인 34.5 mm까지 제약

조건을 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 반복회에서 계산되어지는 좌굴강도이다. 또한 상태변수인 f_{al}(초기모델의 1차 고유진동수)의 고유진동수 범위도 초기 모델의 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 초기값과 하한, 상한값을 나타내고 있으며, Fig 4는 천장크레인 거더 모델의 각 부분에 적용된 설계변수를 보여주고 있다.

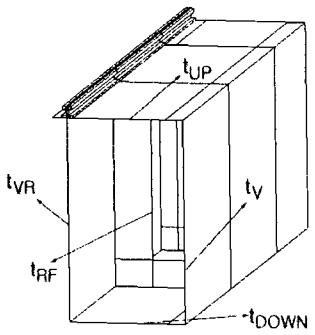

Fig. 4 Design variables of over head crane girder

Table 4 Range of design & state variables

D.V.	Initial	Lower	Upper
t_{VR}(mm)	8	4	16
t_V(mm)	8	4	16
t_{UP}(mm)	8	4	16
t_{DOWN}(mm)	8	2	16
t_{RF}(mm)	8	4	16
S.V.	Initial	Lower	Upper
σ_{max} (MPa)	-	-	175
u_{max} (mm)	-	-	34.5
p_{cr} (N)	-	1.1× p_{Max}	-
f_{1st} (Hz)	-	8.1	-

3.2 최적설계 알고리즘

목적함수와 제약조건을 가진 제약 최적화 문제는 비제약 문제를 논리적으로 확장한 것으로 볼 수 있다. 최속강하법은 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.

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

여기서,

I : 설계변수의 수

k : 백터의 계산단계

이러한 경사도 벡터의 성질을 이용하여 제약 최적화 문제에 대해 반복적 알고리즘을 flow chart로 Fig. 5에 나타내었다.

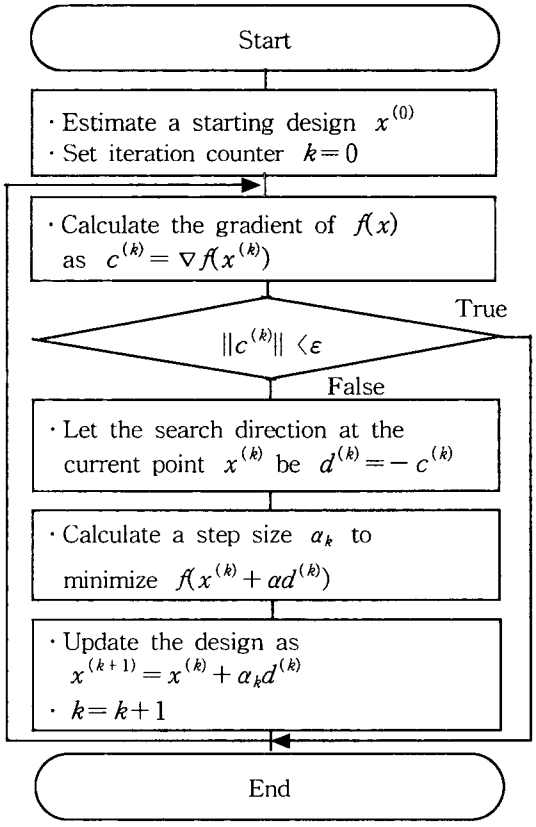

Fig. 5 Flow chart

5. 결과 및 고찰

5.1 초기천장크레인모델의 유한요소해석

사각박스형 용접구조물 형태인 초기 천장크레인 모델을 유한요소해석 한 결과, 새들 B의 끝부분에 88.27 MPa의 최대응력이 발생하였다. 또한 최대변위는 13.66 mm가 발생하였으며, 최대변위가 발생하는 지점은 거더의 중앙부이다. 초기천장크레인모델을 유한요소해석한 결과를 Table 5에 나타내었으며, 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)	88.27
Max. displacement (mm)	13.66
Buckling strength (N)	2.02× p_{Max}
1st natural frequency (Hz)	8.31

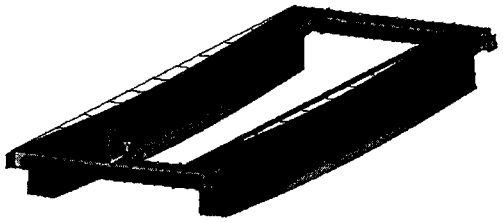

Fig. 6 Stress distribution of an initial over head crane model

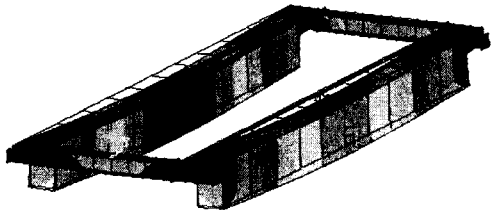

Fig. 7 Displacement distribution of an initial over ahed crane model

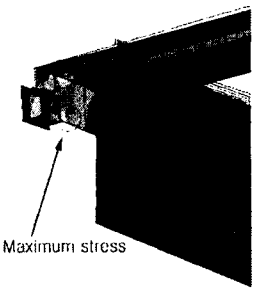

Fig. 8 Matimum Stress of an initial over head crane model

5.2 천장크레인 거더의 치수최적설계

Table 6에는 치수최적설계인 설계변수와 상태변수 및 목적함수를 나타내었다.

천장크레인 거더의 판 두께를 치수최적화한 결과, 설계변수 t_{DOWN}가 8 mm에서 2.65 mm로 크기가 약 67 % 줄어 모든 설계변수중에서 경량화에 가장 기여가 큰 민감한 변수임을 알 수 있었다. 그 이외의 설계변수 t_{RV}, t_V, t_{UP}, t_{RF}들은 모두 1~2 mm로 11~21 %의 크기가 줄었다.

최적설계가 수행되는 총 반복횟수는 8 회이며, Fig. 9~13에서는 반복횟수에 대한 목적함수의 변화와 제약함수인 최대응력, 좌굴계수, 처짐량 및 1차 고유진동수의 변화를 나타내었다. Fig. 10~13은

Table 6 Optimum result of thickness of plates

D.V.	Optimum	S.V.	Optimum
t_{RV}	6.79 (mm)	Optimum von-Mises stress (MPa)	109.92
t_V	6.76 (mm)		
t_{UP}	7.06 (mm)	Optimum buckling strength	1.32× p_{Max}
t_{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	

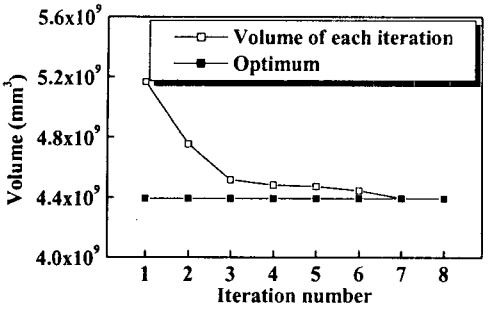

Fig. 9 Volume history of optimum process

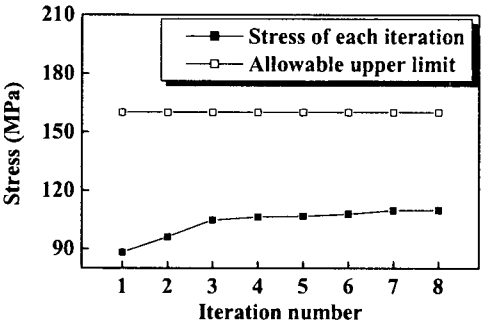

Fig. 10 Stress history of optimum process

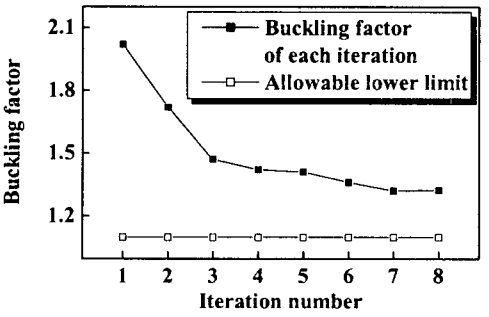

Fig. 11 Buckling factor history of optimum process

제약함수의 변화로써 상한과 하한의 범위 한계값 내에서 반복됨을 알 수 있었다.

최적 설계변수에서 발생하는 최대변위는 20.14 mm, 최대응력은 109.9 MPa로 초기 모델보다 각각 33 %와 20 %가 증가하였다. 또한, 좌굴강도는 1.32

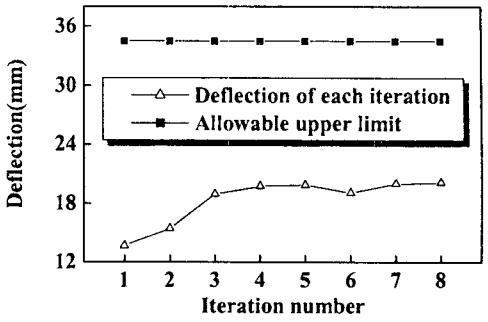

Fig. 12 Deflection history of optimum process

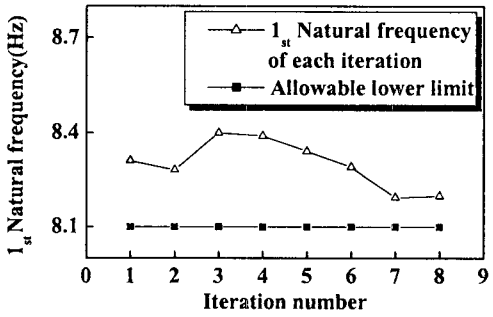

Fig. 13 1st natural frequency history of optimum process

× p_{Max} N으로 초기 모델보다 각각 37 %가 감소하였한고, 1차 고유진동수는 8.34 Hz로 0.2 %가 증가하였다. 치수최적화를 수행하여 목적함수인 체적은 초기 모델보다 약 15 % 감소한 경량화된 모델을 얻었다.

Fig. 9~12는 목적함수인 체적, 응력, 처짐량, 좌굴계수의 경우는 모두 반복횟수가 1회에서 3회까지 급격히 감소하거나 증가함을 알 수 있으며, 1차 고유진동수의 경우 반복횟수가 3회부터 7회까지 크게 감소함을 알수 있었다.

6. 결 론

사각박스형 용접구조물 형태인 마그네트 천장크레인 거더의 좌, 우, 상, 하판 및 보강판의 두께에 대한 치수최적화를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 마그네트 천장크레인 거더의 경량화를 위해 거더의 좌, 우, 상, 하판 및 보강판의 두께에 대한 치수최적화를 수행하여 초기 모델보다 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) 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) Jasbir S. Arora, "Introduction to Optimum Design", McGraw-hill Book Company, 1989.
2) 김주태, "효율적인 다목적 최적화 기법", 한국과학기술원 석사학위논문, 1996.
3) 류명기, "Evolutionary Structural Optimization 방법을 이용한 콘크리트 박스거더 단면의 형상최적화", 한국과학기술원 석사학위논문, 2001.
4) Zhu, L. D., "Triple-girder model for modal analysis of cable-stayed bridges with warping effect", Thin-walled structures, Vol. 22, No. 1, pp. 25~38, 2000.
5) Lee, S. C., "Shear buckling coefficients of plate girder web panels", Computers & structures, Vol. 59, No. 5, pp.789~796, 1996.
6) Megson. T. H. G., "Finite Element Modelling of Box Girder Diaphragms at Supports", Engineering structures, Vol. 22, No. 10, pp. 1313~1323, 2000.
7) "ANSYS Element Reference Release 5.5", 1999.
8) "ANSYS Design Optimization", SAS IP, Inc., Canonsburg, 1999.