

직교배열표와 유한요소해석을 이용한 크레인의 치수최적설계

홍도관*(동아대 대학원 기계공학과), 최석창(창원전문대학 컴퓨터응용설계과),
안찬우(동아대 기계산업 시스템공학부)

The Size Optimization Design of Crane using the Table of Orthogonal Array and Finite Element Analysis

D. K. Hong* (Mech. Eng. Dept., Dong-A Univ.), S. C. Choi (Computer Aided Design Dept.,
Chang-Won College), C. W. Ahn(Mech. & Ind. Syst. Eng. Div., Dong-A Univ.)

ABSTRACT

The correlation between the object function and the design parameter is shown on this paper by using the characteristic function for the mixed result of the structure analysis, the buckling analysis and the table of orthogonal array according to the original crane's dimensional change. About the above two object functions, the effective of design change according to the change of design parameters could be estimated. Also, the crane's weight is reduced up to 20.58 percent maintaining the structural stability according to the thickness of plate.

Key Words : Dimension optimization(치수최적화), Buckling analysis(좌굴해석), Characteristic function(특성함수), S/N ratio(신호 대 잡음 비), Finite element analysis(유한요소해석), Girder & Saddle(거더와 새들), Crane(크레인), Table of orthogonal array(직교배열표), Analysis of means(평균분석)

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 강도 면에서도 과도설계(redundant design)가 되어있다. 따라서 재료를 절감하면서 좌굴, 강도를 유지하는 경량화된 천장크레인 거더와 새들의 판 두께를 선정하는 최적설계가 요구되고 있다.

본 논문에서는 천장크레인의 경량화를 위해 사각 박스형 용접구조물 형태인 거더와 새들의 좌, 우, 상, 하판의 판 두께를 설계변수로 하여 중량감소를 위한 치수최적설계를 수행하였다. 크레인의 모든 설계는 KS A1627(JIS B8821) 규격^(1,2)을 기준으로 하였으며, 제약조건으로는 대 반복회의 von-Mises 응력과 최대 변위가 허용응력과 허용변위를 초과하지 않도록 하였고, 좌굴 임계하중이 최대수평, 수직 동하중보다

크게 설계하였다. 크레인 모델은 P사의 모델이며 구조 및 좌굴해석과 실험계획법⁽³⁾의 일종인 직교배열표를 적용하였다. 그러나, 직교배열표는 최적설계에서 정의되는 제한조건함수를 고려할 수 없으므로 특성함수를 사용하였다.^(4,5) 이 특성함수는 중량, 응력, 처짐량 및 좌굴강도를 동시에 고려한 특성치를 평균 분석을 통하여 정량적으로 평가하였다.

2. 특성함수를 이용한 제한조건의 문제

2.1 특성함수

제한조건이 있는 문제의 경우 제한조건을 고려하기 위하여 벌칙함수 $F(x)$ 를 고려하여 원래 반응치와 제한조건의 위배량을 포함하는 벌칙함수로서 새로운 목적함수인 특성함수 $\Psi(x)_{new}$ 가 정의된다.

직교배열표의 실험으로부터 얻어지는 특성치는 최적설계에 취급되는 제한조건을 포함하고 있지 않다. 크레인의 최적설계의 문제를 정식화로 표시하면 다음과 같다.

$$\text{Minimize : } W(t_{vr}, \dots, sth_{down}) \quad (1)$$

Subject to :

$$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{al}} - 1 \leq 0, \frac{|u_{max}|}{u_{al}} - 1 \leq 0, \frac{p_{al}}{p_{max}} - \frac{1}{2} \leq 0 \quad (2)$$

여기서, $W(t_{vr}, \dots, sth_{down})$ 는 크레인의 중량을 표시하며, σ_{al} , u_{al} , p_{al} 은 허용응력, 허용처짐량, 허용좌굴하중을 나타낸다. 직교배열표의 각 실험에서 제한조건의 유용성(feasibility)이 포함될 수 있도록 특성함수를 정의한다.

먼저 식 (3)과 같이 제한조건함수의 유용성을 처리할 수 있는 벌칙함수를 정의한다.

$$\begin{aligned} P_1(t_{vr}, \dots, sth_{down}) &= \alpha \cdot \text{Max} \left[0, \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{al}} - 1 \right] \\ P_2(t_{vr}, \dots, sth_{down}) &= \beta \cdot \text{Max} \left[0, \frac{|u_{max}|}{u_{al}} - 1 \right] \\ P_3(t_{vr}, \dots, sth_{down}) &= \gamma \cdot \text{Max} \left[0, \frac{p_{al}}{\sigma_{max}} - \frac{1}{2} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, α , β , γ 는 제한조건에 대한 목적함수 및 벌칙함수의 영향도를 조절하는 계수를 의미한다. 즉, 식(3)에서 응력을 예로 들면, 제한조건을 만족시킬 경우에는 벌칙함수가 최대값인 0을 가지게 되며 만족시키지 못할 경우 $\alpha(\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{al}} - 1)$ 만큼의 최대값을 갖게 된다. 이 값이 너무 크게 되면 반응치의 최소화가 의미가 없고, 반대로 너무 작게 되면 구한 최적수준이 불용영역에 있을 확률이 높다. 이것으로부터 특성함수는 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Psi(t_{vr}, \dots, sth_{down})_{new} &= \frac{W(t_{vr}, \dots, sth_{down})}{W_0} \\ &+ P_1(t_{vr}, \dots, sth_{down}) + P_2(t_{vr}, \dots, sth_{down}) \\ &+ P_3(t_{vr}, \dots, sth_{down}) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, W_0 는 크레인의 초기중량을 나타낸다.

2.2 S/N비를 이용한 민감도해석

다구찌는 성능 특성의 종류에 따라 여러 가지의 신호 대 잡음비를 정의하였다. 신호 대 잡음비는 이차식인 품질손실함수(quality loss function)로부터 유도된 값으로서 성능의 평균과 산포를 동시에 고려하는 척도라고 할 수 있다. von-Mises 응력과 최대처짐량은 작으면 작을수록 좋은 망소특성이며, 최대좌굴

계수는 크면 클수록 좋은 망대특성이다. 각각 신호 대 잡음비는 다음과 같다.

·망소특성(smaller-the-better type)

$$\eta_s = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n y_i^2 \right) \quad (5)$$

·망대특성(larger-the-better type)

$$\eta_l = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (6)$$

여기서, n은 동일한 제어인자(control factor) 수준 조합에서의 반복측정 회수이며, y_i 는 그 때의 각각의 측정치이다.

3. 크레인의 유한요소해석

유한요소는 등방성, 등질성, 선형탄성으로 가정하고, Fig. 1의 유한요소모델의 절점은 13,155개이고, 요소는 12,483개로 구성되어 있다. 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

Table 1 Mechanical properties of SS400, Rail 37A

| Item list | Description |
|------------------------------|---|
| SS400 | |
| Yield strength(σ_y) | 245 (MPa) ($t \leq 16$) |
| 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) | 7.959×10^{-6} (kg/mm ³) |
| Elastic modulus(E) | 2.06×10^5 (MPa) |
| Poisson's ratio(ν) | 0.3 |

Table 2 Dimension of 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 3 Load condition & allowed conditions

| Load condition (KS A1627 / JIS B8821 : Class 4) | Unit |
|---|------------------------|
| Wheel reaction force (R_{max}) $\ast R_{max} = \frac{\sum PH}{N} + \frac{2 \times P_1 \times (W_B - a)}{W_B \times N}$ ※Crab self weight (PH) : 27.5 ton ※Main hoisting load (P_1) : 40 ton ※Crab wheel base (W_B) : 4,600 mm ※Number of wheel (N) : 4 ea. ※Crab wheel approach (a) : 2,150 mm | 18 ton |
| Vertical dynamic load ($V = R_{max} \times M \times \Phi$) ※Working coefficient (M) : 1.2 ※Impact coefficient (Φ) : 1.6 | 30.24 ton |
| Horizontal load (S_F) A ※ $S_F = \lambda \times R_{max}$ ※ $\lambda = 0.12$ | 2.58 ton |
| Applied 3D self weight Applied gravity ($G = g \times \theta$) ※acceleration of gravity (g) : 9.814 ※Seismic coefficient (θ) : 1.2 | 11.78 m/s ² |
| Allowed condition | Unit |
| Allowed stress ($\sigma_{al} \leq \sigma_y \times S_s$) ※Safety factor (S_s) : 1.5 KS A1627(load condition A) ※Yield stress (σ_y) : 245 MPa | 163.3 MPa |
| Allowed displacement ($u_{al} \leq u_{max} \times S_u$) ※Safety factor (S_u) : 1.23 ※Max. displacement (u_{max}) : 34.5 mm [girder span(=27,600)×1/800] | 28 mm |
| Allowed buckling strength ($p_{al} \geq p_{max} \times S_b$) ※Safety factor (S_b) : 2 ※Max working force (p_{max}) | $2 \times p_{max}$ |

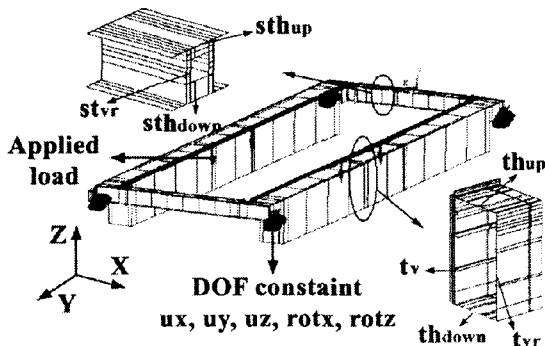


Fig. 1 Load and boundary condition design variables of crane

1, 2에 나타내었다.

경계조건은 새들과 대차(bogie)가 결합되는 부분에 X, Y, Z 방향의 병진변위와 X, Z 방향의 회전변위를 모두 구속하고, Y방향(=주행방향)의 회전변위만 구속하지 않았다. 천장크레인의 기하학적 형상과 경계조건 및 하중조건을 Fig. 1에 나타내었으며, Table 3에는 하중조건과 허용조건을 나타내었다.

4. 직교배열표를 이용한 크레인의 최적설계

4.1 설계변수의 설정 및 수준수

Table 4는 각 설계변수의 수준을 나타내며, 모든 설계변수의 3수준 값이 기준에 사용되는 크레인의 조건이다. 직교배열표는 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 의 혼합 직교배열표에 분배하여 구조해석 및 좌굴해석은 수행하였다.

Table 4 Factors and levels

| Factor | | | | | | | |
|--------|-----|---|--------|------|----|--------------|----|
| Level | t | | th_a | st | | sth_{down} | |
| 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 6 | 6 | 6 |
| 2 | 6 | 6 | 6 | 6 | 8 | 8 | 8 |
| 3 | 8 | 8 | 8 | 8 | 10 | 10 | 10 |

4.2 제한조건 문제를 위한 특성함수

제한조건이 있는 문제에서 직교배열표의 사용은 제한조건이 없는 문제와 동일하게 직교배열표에 의한 해석법이 사용되지만 제한조건이 유용성이 포함될 수 있도록 평가추정식의 작성이 요구된다.

Table 5는 실험결과를 바탕으로 설계변수에 대한 수준을 대응시켜 제한조건을 문제를 고려하기 위한 특성함수로써 나타낸 것이다. 이 결과를 기초로 특성함수를 이용하여 평가특성치에 대한 제한조건을 고려한 설계변수의 최적수준을 결정하였다.

4.3 크레인의 치수최적설계

실험결과를 살펴보면, 기여율이 가장 높은 것은 새들의 좌판 두께 st_{vr} 임을 알 수 있으며, 각 인자별 수준수의 효과를 비교하여 최적수준을 Table 6에 *표시로 나타내었다. Fig 2는 특성함수에 대한 S/N 비의 영향도 분석을 한 것이며, 통계프로그램으로 MINITAB R13⁽⁶⁾을 사용하였다.

Table 7에서는 초기 모델과 제한조건이 있는 특성함수를 고려한 최적조건 모델의 해석 값을 나타내었다. $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 직교배열표에서 18번의 실험결과와 제한조건이 있는 특성함수를 고려한 최적조건 모델의 결과를 비교하였으며 보다 더 좋은 후자의 실험결과를 최적해로 선정하였다.⁽⁴⁾

Table 5 Characteristic function & S/N ratio

| Exp. | Characteristic function | S/N ratio |
|------|-------------------------|-----------|
| 1 | 1.09746 | -0.80774 |
| 2 | 0.93771 | 0.55859 |
| 3 | 1.02768 | -0.23716 |
| 4 | 0.93216 | 0.61018 |
| 5 | 0.91058 | 0.81367 |
| 6 | 1.02869 | -0.24573 |
| 7 | 0.87370 | 1.17278 |
| 8 | 1.03160 | -0.27025 |
| 9 | 1.00907 | -0.07845 |
| 10 | 0.93987 | 0.53861 |
| 11 | 0.95527 | 0.39750 |
| 12 | 1.05947 | -0.50173 |
| 13 | 0.93816 | 0.55444 |
| 14 | 0.94663 | 0.47640 |
| 15 | 0.91124 | 0.80733 |
| 16 | 0.92270 | 0.69882 |
| 17 | 1.03175 | -0.27148 |
| 18 | 0.97237 | 0.24339 |

Table 6 Factors affecting the characteristic function

| Factor | Effect | | | Deviation | PC(%) |
|--------------|--------|--------|--------|-----------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | | |
| t_{vr} | -0.008 | 0.503* | 0.249 | 0.511 | 18.78 |
| t_v | 0.461* | 0.284 | -0.002 | 0.463 | 17.02 |
| th_{up} | 0.110 | 0.474* | 0.160 | 0.364 | 13.38 |
| th_{down} | 0.206 | 0.317* | 0.220 | 0.111 | 4.08 |
| st_{vr} | -0.257 | 0.391 | 0.609* | 0.866 | 31.83 |
| sth_{up} | 0.100 | 0.427* | 0.216 | 0.327 | 12.02 |
| sth_{down} | 0.221 | 0.314* | 0.208 | 0.106 | 3.9 |
| Total | | | | 2.721 | 100 |

PC : Percentage Contribution, * : Optimum level⁽³⁾

Table 7 Results of initial model & optimum model

| Item List | | Description |
|----------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| Initial model | Max. von-Mises stress (MPa) | 154.42 |
| | Max. displacement (mm) | 21.24 |
| | Buckling strength (N) | $7.01 \times p_{max}$ |
| | Weight(kg) | 41.518 ton |
| Optimum model | Max. von-Mises stress (MPa) | 161.89 |
| | Max. displacement (mm) | 25.95 |
| | Buckling strength (N) | $3.22 \times p_{max}$ |
| | Weight(kg) | 32.974 ton |
| Weight reduction(%) | | 20.58 |

초기 모델에 비하여 응력과 처짐량은 다소 크고 좌굴강도는 다소 작게 발생하였으나 허용조건을 만

족하였다. 중량의 경우 초기 모델에 비하여 최적조건 모델이 20.58 % 감소한 경량화 된 모델을 얻을 수 있었다.

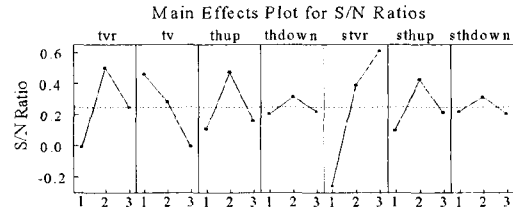


Fig. 2 Illustration of factor effect for the characteristic function

5. 결론

본 연구에서는 직교배열표와 유한요소해석을 이용하여 실제 현장에서 사용할 수 있는 최적설계방법을 제안하여 그 결과를 크레인에 적용한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 기존 사용되고 있는 크레인의 치수변경에 따라 구조해석과 좌굴해석 및 직교배열표를 조합한 결과에 대한 목적함수와 설계변수 사이의 상관관계를 특성함수를 이용함으로써 2가지 이상의 목적함수에 대해 설계변수의 변화에 따른 설계변경의 효과를 평가할 수 있었다.
2. 크레인의 경량화를 위하여 판의 두께에 따라서 구조적인 안전성을 유지하면서 중량은 20.58%의 감량한 결과를 도출할 수 있었다.

참고문헌

1. 한국표준협회, "크레인강 구조 부분 계산 기준," 1994.
2. 한국표준협회, "크레인 제작기준 안전기준 및 검사고시," 1997.
3. 박성현, "현대실험계획법," 민영사, 1995.
4. 이권희, 박경진, "제한조건이 있는 문제의 이산설계공간에서의 강건최적설계," 대한기계학회논문집 A권, 제22권, 제5호, pp. 728-737, 1998.
5. 이성욱, 박준성, 이권희, 박경진, "직교배열표를 이용한 이산공간에서의 최적화 알고리즘 개발," 대한기계학회논문집 A권, 제25권, 제10호, pp.1621-1626, 2001.
6. MINITAB User's Guide #2, "Data Analysis and Quality Tool," Minitab Inc, 2000.