

이단계 크리깅 모델을 이용한 조(Jaw)의 구조최적설계

방일권* · 강동헌* · 한동섭** · 한근조*** · 이권희***

*동아대학교 기계공학과 대학원, **동아대학교 BK21 총괄사업단, 동아대학교 기계공학과 교수

Structural Optimization for a Jaw Using the Kriging model

Il-Kwon Bang · Dong-Hun Kang* · Dong-Seop Han** · Geun-Jo Han*** · Kwon-Hee Lee****

**Department of Mechanical Engineering, Graduate school of Dong-A University, Busan 604-714, Korea*

***Institute of BK21, Dong-A University, Busan 604-714, Korea*

****Division of Mechanical Engineering, Dong-A University, Busan 604-714, Korea*

요 약 : 컨테이너의 양·하역 작업 시 크레인을 정 위치에 고정시키고, 돌풍으로 인해 크레인이 레일방향으로 미끄러지는 것을 방지하는 장치가 레일클램프이다. 쐐기형 레일클램프는 풍속이 증가하면 쐐기작용에 의해 압착력이 증가하므로 구조적으로 안정성과 내구성이 있게 설계해야한다. 따라서 본 연구에서는 순차적 표본방법을 기반으로 하는 크리깅 모델을 이용하여 조 형상최적설계를 수행하였다. 크리깅은 표본점의 반응치를 기초로 내삽법에 의해 임의의 점에서의 반응치를 예측하는 근사기법의 하나이다. 이것은 최적설계 분야에서 자주 사용되는 근사기법인 반응표면법에 비해 반응치의 보다 정확한 예측이 가능하며 특히 비선형성이 강한 함수의 예측에 적합하다고 알려져 있다. 순차적 크리깅 모델에 의하여 구해진 최적해를 상용프로그램을 이용하여 구한 최적해와 비교하고 제안된 방법의 유용성을 검토하였다.

핵심용어 : 컨테이너 크레인, 레일클램프, 조, 크리깅, 형상최적설계

ABSTRACT : *The rail clamp is the device to prevent that a crane slips along rails due to the wind blast as well as to locate the crane in the set position for loading and unloading containers. The wedge type rail clamp should be designed to consider the structural stability and the durability because it compresses both rail side with large clamping force by the wedge working as the wind speed increases. In this research, the kriging interpolation method using sequential sampling is utilized to find the optimum shape of the jaw in the rail clamp. The suggested method predicts more accurate response value than the response surface method. The optimum results obtained by the proposal method are compared with those by the commercial software.*

KEY WORDS : *Container crane, Rail clamp, Jaw, Kriging, Shape Optimization*

* 정회원, denver21@donga.ac.kr 051)200-6981

* 정회원, rkdehdgjsrjs79@hotmail.com 051)200-6981

** 정회원, dshan@donga.ac.kr 051)200-6989

*** 종신회원, gihan@daumnet.donga.ac.kr 051)200-7650

**** 종신회원(대표저자), leekh@donga.ac.kr 051)200-7638

이단계 크리깅 모델을 이용한
조의 구조최적설계
Structural Optimization for a Jaw
Using Iterative Kriging Models

발표자 : 방일권

1/20

Optimal Design Laboratory

1. Introduction

- 컨테이너 크레인의 역할
양·하역 작업을 위해 레일따라 움직임.
- 레일클램프의 역할
크레인을 정위치에 고정시키기위해 사용.
레일클램프가 제 역할을 하지 못하면 큰 사고 발생.



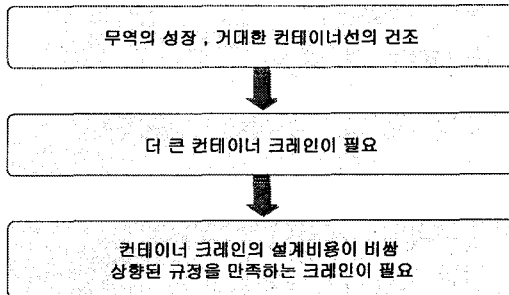
레일클램프의 한 부분인 조에 대해 설계
하중상태는 작업시의 풍하중 고려

4/20

Optimal Design Laboratory

1. Introduction

■연구의 필요성



3/20

Optimal Design Laboratory

■연구의 방법

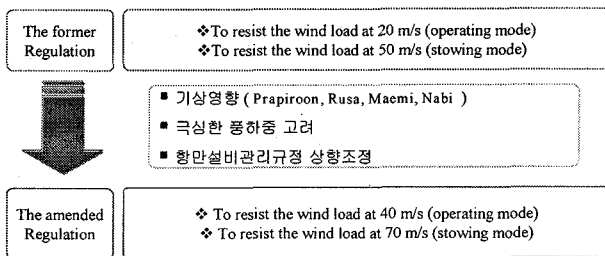
1. 유한요소해석을 통한 조의 구조해석
2. 크리깅 메타모델을 이용한 조의 구조최적설계
3. ANSYS WORKBENCH를 이용한 조의 구조최적설계
4. 두 방법간의 결과 비교

5/20

Optimal Design Laboratory

1. Introduction

■연구의 배경



2/20

Optimal Design Laboratory

2. 조의 유한요소 해석

2.1 쉐기형 레일클램프의 메카니즘

- 레일클램프는 돌풍과 미끄러짐으로부터 크레인을 고정시키기 위해 설치.
- 컨테이너 크레인에는 2개의 레일클램프가 설치됨.

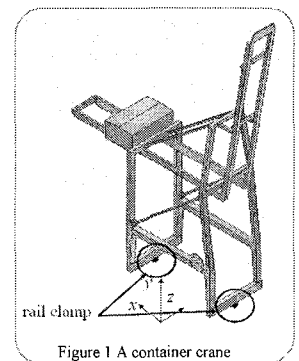


Figure 1 A container crane

6/20

Optimal Design Laboratory

이단계 크리깅 모델을 이용한 조의 구조최적설계

- 쇄기형 레일클램은 조, 췌기, 라커, 행거, 조 패드, 롤러, 그리고 췌기프레임으로 구성

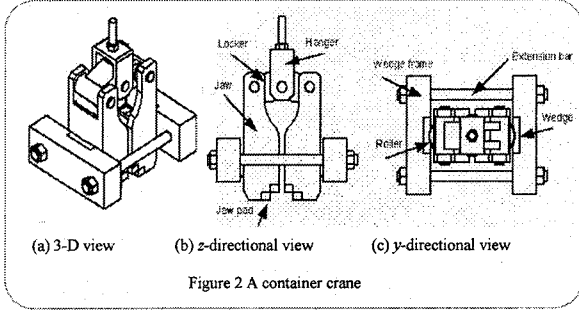


Figure 2 A container crane

7/20

Optimal Design Laboratory

이단계 크리깅 모델을 이용한 조의 구조최적설계

$$F_L = \frac{L_{JU}}{L_{JU}} \cdot F_p \quad (4)$$

$$F_{RX} = F_p + F_L = \left(1 + \frac{L_{JU}}{L_{JU}}\right) \cdot F_p \quad (5)$$

- 췌기작용단계에서 롤러에 의해 발생하는 힘 F_{RX} 가 조의 중간에 작용하고 라커가 조의 상단부를 지지할 때 조패드에 F_p 가 발생됨.
- F_{RX} 는 1,110 kN.
- F_{RZ} 는 197 kN.

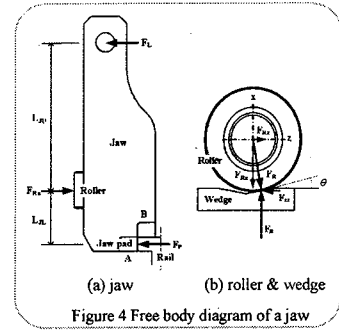


Figure 4 Free body diagram of a jaw

10/20

Optimal Design Laboratory

이단계 크리깅 모델을 이용한 조의 구조최적설계

- 개방단계(The opening stage)

라커가 들어올러질 때, 두 개의 조 사의 각이 커지고 레일클램프와 레일이 분리됨

- 초기압착단계(The initial clamping stage)

작은 압착력으로 레일의 옆면을 압착하게 되며, 컨테이너 크레인을 작업위치에 고정시킴.

- 췌기작용단계(The wedge-working stage)

풍속이 증가함에 따라 양쪽의 조 패드의 압착력을 증가시켜 컨테이너 크레인이 레일방향으로 미끄러지는 것을 방지.

- 본 연구에서는 조가 가장 큰 하중을 받는 단계인 췌기작용단계에서의 조에 대해 구조해석 및 최적설계를 수행하였음.

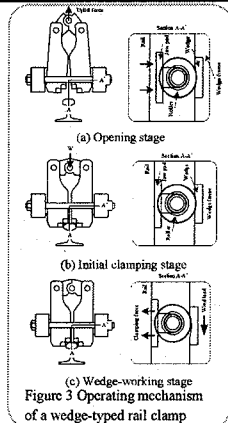


Figure 3 Operating mechanism of a wedge-typed rail clamp

8/20

Optimal Design Laboratory

이단계 크리깅 모델을 이용한 조의 구조최적설계

- 솔리드 요소를 이용한 유한요소 모델과 초기설계에 대한 응력분포

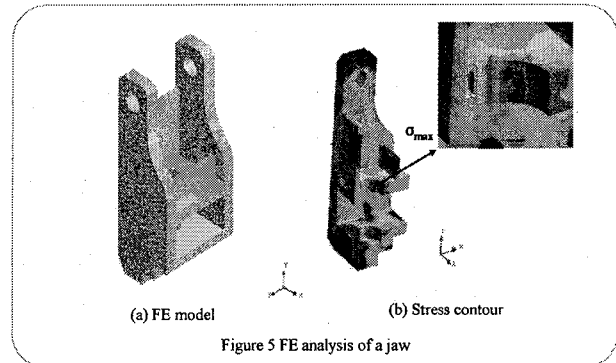


Figure 5 FE analysis of a jaw

11/20

Optimal Design Laboratory

이단계 크리깅 모델을 이용한 조의 구조최적설계

2.2 FE model and loading and boundary conditions

- BS 2573을 따른, 바람에 의해 컨테이너 크레인에 발생되는 레일방향 하중 F_z

$$F_z = C_{tr} \times q_h \times A_{unit} \times L \quad (1)$$

- 식 (1)의 간략화

$$F_z = 1.107 \times v_0^2 \quad (2)$$

- C_{tr} : 2방향 풍력계수
- q_h : 고도(h)에 따른 풍압계수
- A_{unit} : 단위길이당 부재의 수평면적
- L: 부재의 길이

v_0 : 풍속, 40m/s설정

- 컨테이너 크레인은 2개의 레일클램프가 장착

- 1개의 레일클램프 2개의 압착면이 존재.

$$F_p = \frac{F_z}{4\mu_p} \quad (3)$$

- F_p : 조패드 1개가 부담하는 압착력
- μ_p : 조패드와 레일사이의 마찰계수

9/20

Optimal Design Laboratory

이단계 크리깅 모델을 이용한 조의 구조최적설계

3. 크리깅 메타모델을 이용한 최적화

3.1 설계변수와 최적설계 정식화

- 조와 롤러사이의 접촉부분에 533MPa의 최대응력이 발생
- 조의 재료는 SCM445
- 극한강도는 823MPa
- 안전율 1.5 고려
- 허용응력은 548MPa

- 설계변수

- 구조물의 두께 (t_1, t_2 and t_3)
- 원과 곡면부의 중심간의 거리 (l_1).
- 초기설계값: $t_1=30.0\text{mm}, t_2=30.0\text{mm}, t_3=85.0\text{mm}$ and $l_1=54.1\text{mm}$,
- 무게: 43.5kg.

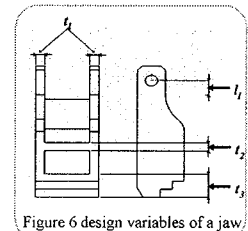


Figure 6 design variables of a jaw

12/20

Optimal Design Laboratory

최적설계 정식화

■ 조의 최적설계 정식화

$$\begin{aligned} & \text{minimize } w(t_1, t_2, t_3, l_1) \quad (6) \\ & \text{subject to } \sigma_1 - \sigma_a \leq 0 \quad (7) \end{aligned}$$

■ 설계변수 범위

$$\begin{aligned} 25\text{mm} \leq t_1 &\leq 35\text{mm} \quad (8) \\ 25\text{mm} \leq t_2 &\leq 35\text{mm} \quad (9) \\ 75\text{mm} \leq t_3 &\leq 90\text{mm} \quad (10) \\ 50\text{mm} \leq l_1 &\leq 60\text{mm} \quad (11) \end{aligned}$$

■ 크리깅 메타모델

$$\begin{aligned} & \text{minimize } \hat{W}(t_1, t_2, t_3, l_1) \quad (12) \\ & \text{subject to } \hat{\sigma}_{\max} - \sigma_a \leq 0 \quad (13) \end{aligned}$$

w : 조의 무게
 σ_i : i번째 요소의 응력
 σ_a : 허용응력
 ne : 유한요소모델 수
 \wedge : 반응 추정치
 σ_{\max} : 조에 발생하는 최대응력

3.2 크리깅 방법

■ 크리깅모델

$$\hat{y}(x) = \hat{\beta} + r^T(x)R^{-1}(y - \hat{\beta}q) \quad (14)$$

$$r(x) = [R(x, x^{(1)}), R(x, x^{(2)}), \dots, R(x, x^{(n)})]^T \quad (16)$$

$$\hat{\beta} = (q^T R^{-1} q)^{-1} q^T R^{-1} y \quad (17)$$

$$\hat{\sigma}_i^2 = \frac{(y - \hat{\beta}q)^T R^{-1} (y - \hat{\beta}q)}{n_i} \quad (18)$$

■ 식 (14)-(18)에서, R, r, $\hat{\beta}$ 와 $\hat{\sigma}_i^2$ 은 Q_i 의 함수 ($i=1, 2, \dots, n$).

x : 설계변수 벡터, ($x = [t_1, t_2, t_3, l_1]^T$)
 $\hat{\beta}$: β 의 추정치,
 R^{-1} : 상관행렬 R의 역행렬
 r : 상관벡터
 y : n_i 개의 표본데이터 벡터 (조의 무게와 최대응력)
 q : n_i 개의 성분을 갖는 단위벡터
 n : 설계변수의 수

3.2 크리깅 방법

■ 크리깅모델

미지의 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ 값들은 다음 식으로 구해진다

$$\text{maximize } -\frac{[n_i \ln(\hat{\sigma}_i^2) + \ln|R|]}{2} \quad (19)$$

$$R(x^j, x^k) = \text{Exp} \left[-\sum_{i=1}^n \theta_i |x_i^j - x_i^k|^2 \right] \quad (j=1, \dots, n_p, k=1, \dots, n_p) \quad (15)$$

3.3 Design procedures

Step 1: DOE strategy

무게와 최대응력에 대한 크리깅 메타모델을 얻기위한 표본점 설정.

설계 공간의 표본점을 얻기위해 사용

Step 2: Matrix experiment

적교배열표의 각각의 표본점에 대한 무게와 최대응력 산출.

실정수는 적교배열표의 행수와 같고, 실정의 의미는 유한요소해석을 뜻함.

Step 3: Building and validation of kriging models

표본점들의 각 반응치를 가지고 크리깅모델을 생성.

$$CV = \sqrt{\frac{1}{n_i} \sum_{m=1}^{n_i} (f_i - \hat{f}_i)^2} \quad (20)$$

n_i : 검증용 위한 표본점의 개수

f_i : i번째 표본의 실험값이 구성된 크리깅 모델의 i번째 표본의 추정치

3.3 Design procedures

Step 4: Optimization using simulated annealing algorithm

$$\text{minimize } \phi(t_1, t_2, t_3, l_1) = \hat{W} + \alpha \cdot \text{Max} [0, (\hat{\sigma}_{\max} - \sigma_a)] \quad (21)$$

α : a positive large number to consider the constraint feasibility of Eq. (13).

Step 5: Convergence criteria

이런 과정은 두개의 수렴기준을 만족할때까지 반복된다

두개의 수렴기준은 다음과 같다

$$CP_1 = \frac{|\hat{\sigma}_{\max} - \sigma_{\max}^{\wedge}|}{\sigma_{\max}^{\wedge}} \times 100 \quad (22)$$

$$CP_2 = CV_{\text{design}} \quad (23)$$

3.3 Design procedures

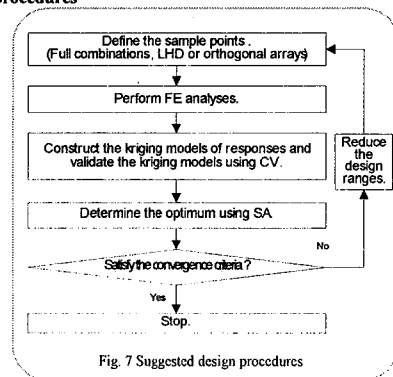


Fig. 7 Suggested design procedures

4. 결과

4.1 Kriging method

식(22)-(23)이 수렴기준을 만족하지 않았기 때문에 다음과 같은 설계범위를 가지고 다시 반복한다.

$$23.5\text{mm} \leq t_1 \leq 26.5\text{mm} \quad (24)$$

$$27.5\text{mm} \leq t_2 \leq 30.5\text{mm} \quad (25)$$

$$81.0\text{mm} \leq t_3 \leq 84.0\text{mm} \quad (26)$$

$$54.0\text{mm} \leq l_1 \leq 57.0\text{mm} \quad (27)$$

Table 1 OA(2,7,49,8) experiments for the 1st iteration

Exp. no.	Optimum design variables (mm)				w (kg)	↑ _{max} (MPa)
	t ₁	t ₂	t ₃	l ₁		
1	25	25	75	50	36.9	747.9
2	25	26.7	77.5	53.3	37.5	655.3
.
.
48	35	33.3	82.5	53.3	48.1	484
49	35	35	80	56.7	47.9	509.9

4.2 ANSYS WORKBENCH

- ANSYS WORKBENCH에는 두 개의 최적화 방법이 있음.
- DOE방법은 중심합성법을 이용하여 수렴. $n = 2^k + 2k + n_0$
- VT 방법은 테일러 급수 전개로 조합으로 반응표면결정

Table 6 Comparisons of results

Methods	Optimum design variables (mm)				Response (/: MPa, w: kg)			
	t ₁	t ₂	t ₃	l ₁	w	↑	↓	f _{max}
DOE	27	27.6	81.5	59	39.8	39.8	537.6	525
VT	28.5	28.5	80.8	51.4	41.5	41.5	535.5	526.9
Suggested method	23.5	28.4	82.5	55.5	38.2	37.1	531.7	545.2

4.1 Kriging method

Table 2 Validations of kriging models for each iteration

Iteration	Response	Optimum parameters				CV
		f ₁	f ₂	f ₃	f ₄	
1	w	0.596	1.295	1.278	0.545	46.5
	f _{max}	0.594	1.478	1.465	0.602	
2	w	0.598	1.3	1.281	0.548	23.8
	f _{max}	9.762	1.448	1.437	9.77	

Table 3 Optimum results for each iteration

Iter.	Optimum design variables (mm)				Response (/: MPa, w: kg)			
	t ₁	t ₂	t ₃	l ₁	w	↑	↓	f _{max}
1	25	29	82.5	55	38.3	39.6	548	560
2	23.5	28.4	82.5	55.5	38.2	37.1	542	545.2

5. 결론

- 최대응력은 최대응력이 나타나는 위치가 변하기 때문에 비선형성이 강하다. 그래서 크리깅 모델을 최대응력을 대체하는 것이 효율적이다. 근사최대응력은 시뮬레이티드 어닐링 알고리즘과 함께 형상최적설계 문제를 풀 수 있게 한다.
- 조의 형상최적설계는 극심한 풍하중이 상대가 고려된 크리깅기법과 전역적 최적화 알고리즘을 통해 달성된다. 무게는 전의 연구보다 약 17% 감소한 결과를 얻었다. 본 연구에서 제시된 최적화 결과는 컨테이너 크레인의 다른 구성요소들의 설계에 적용될 수 있다.

4.1 Kriging method

Table 4 Convergence parameters for each iteration

Iteration	Convergence parameter	
	CP ₁	CP ₂
1	6.9	46.5
2	2.5	23.8

Table 5 OA(2,7,49,8) experiments for the 2nd iteration

Exp.No.	Optimum design variables (mm)				w (kg)	↑ _{max} (MPa)
	t ₁	t ₂	t ₃	l ₁		
1	23.5	27.5	81	54	36.8	602.7
2	23.5	28	81.5	55	36.9	541.4
.
.
48	26.5	30	82.5	55	39.98	556.9
49	26.5	30.5	82	56	40	576