한국기계가공학회지, 제7권, 제3호, pp.17～24 (2008. 9)
Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 7 No. 3, pp.17～24 (2008. 9)

메타모델을 이용한 크레인 부품 조의 구조설계

송병철*, 방일권**, 한동섭***, 한근조****, 이권희#

Structural Design of a Container Crane Part-Jaw, Using Metamodels

Byoung-Cheol Song*, Il-Kwon Bang**, Dong-Seop Han***, Geun-Jo Han****, Kwon-Hee Lee#

ABSTRACT

Rail clamps are mechanical components installed to fix the container crane to its lower members against wind blast or slip. According to rail clamps should be designed to survive harsh wind loading conditions. In this study, a jaw structure, which is a part of a wedge-typed rail clamp, is optimized with respect to its strength under a severe wind loading condition. According to the classification of structural optimization, the structural optimization of a jaw is included in the category of shape optimization. Conventional structural optimization methods have difficulties in defining complex shape design variables and preventing mesh distortions. To overcome the difficulties, the metamodel using Kriging interpolation method is introduced to replace the true response by an approximate one. This research presents the shape optimization of a jaw using iterative Kriging interpolation models and a simulated annealing algorithm. The new Kriging models are iteratively constructed by refining the former Kriging models. This process is continued until the convergence criteria are satisfied. The optimum results obtained by the suggested method are compared with those obtained by the DOE (design of experiments) and VT (variation technology) methods built in ANSYS WORKBENCH.

Key Words : Container Crane(컨테이너 크레인), Rail Clamp(레일 클램프), Jaw(조), Shape Optimization(형상최적설계), Kriging(크리깅), DOE(실험계획법), VT(변동해석법)

1. 서 론

항만에서는 순간 최대풍속을 기준으로 하역작업이 가능한 작업시(operating mode)와 하역작업이 불가능하여 하역장비를 정해진 위치에 계류시켜야 하는 계류시로 나눠진다. 최근 태풍 '매미'로 인한 붕괴사고 이후 개정된 항만시설 장비관리규정에 따르면 국내에서 설계기준풍속은 작업시 20m/s에서 40m/s로, 계류시 50m/s에서 70m/s로 각각 상향조정되었음을 알 수 있다.[1~2]

작업시 컨테이너 크레인은 선박에서 크레인으로, 또는 트레일러에서 선박으로 컨테이너의 양 · 하역을

* 동아대학교 대학원 기계공학부
** (주)풍산 방산기술연구소
*** 동아대학교 BK21교수
**** 동아대학교 기계공학부
# 교신저자 : 동아대학교 기계공학과
E-mail : leekh@dau.ac.kr

위해 레일을 따라 이동과 정지를 반복하게 된다. 정지해 있던 크레인이 바람에 의해서 레일방향하중을 받게 되면 레일을 따라 밀리는 현상이 발생하게 된다. 이 때 컨테이너 크레인은 한번 밀리기 시작하면 자체의 높은 관성력으로 인해 정지시키기가 매우 어려워 대형사고로 이어질 수 있다. 그래서 돌풍에 의해 컨테이너 크레인이 레일방향으로 밀리지 않도록 작업시에는 레일클램프(rail clamp)를 이용하여 크레인을 고정한다. 그리고 계류시에는 컨테이너 크레인이 레일방향으로 밀리지 않도록 레일클램프를 포함하여 트럭부의 기어장치와 스토위지 핀(stowage pin)을 이용하여 크레인을 고정한다. 동시에 컨테이너 크레인의 전도를 방지하기 위해 타이다운 로드(tie-down rod)를 이용하여 크레인을 고정한다.[3~4]

레일클램프는 작업시 컨테이너 크레인을 정해진 위치에 고정시킬 뿐만 아니라 돌풍으로 인한 컨테이너 크레인의 사고를 방지하기 위한 매우 중요한 장치이다. 레일클램프는 구동방식에 따라 스프링형, 유압형, 쐐기형으로, 압착방식에 따라 상부압착형과 측면압착형으로 나눌 수 있다. 기존에 사용되는 스프링형이나 유압형 레일클램프는 풍속과 관계없이 설정된 압착력으로 항상 구동을 해야 하기 때문에 큰 압착력으로 인해 구조적으로 안정성과 내구성이 떨어지는 문제점을 안고 있다. 그러므로 이를 보완하기 위해서 개발된 방식이 쐐기형이다.

본 연구에서는 강도 기준을 만족하면서 중량이 최소가 되도록 형상 최적 설계를 수행하였다. 최적화를 위한 설계변수로서는 레일클램프의 형상, 제한조건으로서는 최대응력, 목적함수로는 중량을 각각 설정하였다.

조의 구조 최적설계는 분류상 형상 최적설계에 속한다. 전통적인 구조 최적설계방법[5~6]은 형상 설계변수를 정의하고 요소 형상의 찌그러짐을 막기 힘들다.[7] 이러한 어려움들을 극복하기 위해 크리깅 메타모델을 이용하여 실제 반응값을 근사값으로 대체하였다.

본 연구에서는 순차적 크리깅 모델과 시뮬레이티드 어닐링 알고리듬을 이용해 조의 형상 최적설계를 수행한 것을 나타내었다. 새로운 크리깅 모델은 순차적으로 이전 크리깅 모델을 갱신하여 생성된다. 이러한 과정은 수렴조건을 만족할 때까지 계속된다.

본 연구에서 제안한 방법과 ANSYS WORKBENCH[8]의 최적화 방법인 DOE와 VT를 이용해 얻은 최적값과 비교하였다.

2. 쐐기형 레일클램프의 구조와 구동 메커니즘

2.1 쐐기형 레일클램프의 구조

쐐기형 레일클램프의 구동과 관련된 주요 부품은 Fig.1 크게 라커, 조, 조 패드, 롤러, 쐐기 프레임, 인장 봉(extension bar)으로 나눌 수 있다. 라커는 조의 상단부와 핀으로 연결되며, 초기압착력 발휘를 위해 중추에 의해서 구동되는 부품이고, 조는 라커와 레일에 의해 지지되며, 롤러가 장착되어 쐐기 작용시 굽힘 변형을 하면서 지렛대 역할을 한다. 그리고 조 패드는 조의 하단에 부착되어 레일을 압착하고, 롤러는 조에 장착되어 쐐기의 경사면을 따라 구르면서 쐐기 작용을 할 수 있도록 하며, 쐐기는 레일클램프에서 가장 중요한 부품으로서 풍속이 증가함에 따라 압착력을 증가시키는 역할을 담당한다. 쐐기 프레임은 두 개의 인장 봉에 의해서 지지되면서 쐐기를 고정시키며, 인장봉은 인장을 받는 부재로 변형에너지를 이용하여 쐐기 프레임을 압착하는 부품이다.

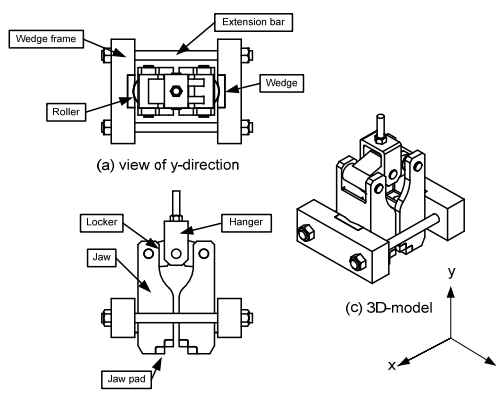


Fig. 1 Parts of the wedge typed rail clamp

2.2 쐐기형 레일클램프의 구동 메커니즘

쐐기형 레일클램프는 초기에는 작은 압착력으로

레일을 압착하다가 풍속이 증가하면 쐐기작용에 의해 압착력이 증가하는 방식을 취함으로서 구조적으로 안정성과 내구성이 높은 장점을 가지고 있다. 따라서 태풍이나 돌풍이 잦은 우리나라 항만에서는 컨테이너 크레인용 레일클램프의 구동방식으로 내구성이 높고, 풍속의 변화에 적절히 대처할 수 있는 쐐기형을 채택하여야 한다. 본 연구에서는 50ton급 컨테이너 크레인용 쐐기형 레일클램프를 모델로 선정하여 연구를 수행하였다.

쐐기형 레일클램프의 작동 메커니즘은 크게 개방단계(open stage), 초기압착단계(initial clamping stage), 쐐기작용단계(wedge working stage)의 3단계로 나눌 수 있다.[9]

3. 조의 유한요소해석

3.1 하중조건

조에 작용하는 하중을 분석하기 위하여 Fig. 2에 레일클램프의 주요부에 대한 자유물체도를 나타내었다. 초기압착단계에서는 라커의 압축력(F_L)이 조의 상단에 작용되고, 롤러에 의해 지지되면서 지렛대원리로 조 패드에 압착하중(F_P)이 발휘된다. 쐐기작용단계에서는 롤러에 의한 하중(F_{Rx})이 조에 작용되고 라커에 의해 지지되어 조 패드에 압착하중이 가해진다. 즉, 두 가지 모두 조의 굽힘에 의해 발휘되므로 조 패드의 압착력(F_P)발휘를 위한 라커의 하중(F_L)은 아래 식 (1)과 같다.

$$F_L = \frac{L_{JL}}{L_{JU}} F_P \tag{1}$$

또한 롤러의 x 방향 하중은 아래 식 (2)와 같다.

$$F_{Rx} = F_P + F_L = \left(1 + \frac{L_{JL}}{L_{JU}}\right) F_P \tag{2}$$

여기서 L_{JU} 는 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 조의 상단부의 길이이고, L_{JL} 은 조 하단부의 길이이다.

유한요소 해석 시 경계조건을 보면 Fig. 3에서 알 수 있듯이 롤러에 의한 하중(F_{Rx})이 조 상단부에 작용하는 라커의 압축력(F_L)과 조 하단부에 작용하는 압착하중(F_P)의 합력과 같다는 것을 알 수 있다. 롤러에 의한 하중(F_{Rx})만 조에 작용하고, 조 상단부에 작용하는 라커의 압축력(F_L)과 조 하단부에 작용하는 압착하중(F_P)는 힘이 작용하지 않는다고 가정한다. 가정에 따라서 경계조건은 조 상단부는 x방향의 자유도만 구속하였고 조 하단부의 조의 패드가 레일측면과 만나는 부분은 x, z방향의 자유도를 구속하였고 조 패드가 레일윗면과 만나는 부분은 y방향의 자유도를 구속하였다. 그리고 롤러에 의한 하중(F_{Rx})은 베어링하중으로 x방향으로 1.11×10^3 kN, z방향으로 1.97×10^2 kN이 작용한다고 설정하였다.[10]

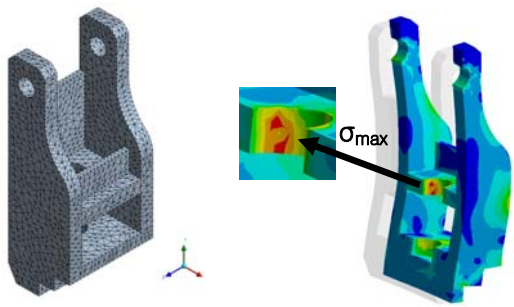


Fig. 3 FE model and Stress contour at the initial design

3.2 유한요소 모델 및 초기 해석 결과

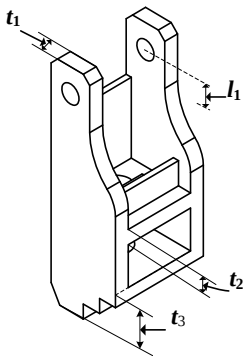


Fig. 4 Design variables of a jaw

설계 시 요구조건인 강도를 검토하기 위하여 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 3자유도를 가지는 솔리드요소를 이용하여 유한요소 모델링을 하였다. 이때 요소의 크기는 수렴해석을 통하여 9mm로 설정하였다.

초기모델의 해석 결과는 Fig. 3에 나타나듯이 롤러 지지부에 533MPa의 최대 등가응력이 작용하는 것을 알 수 있고 이것은 안전율 1.5를 고려한 재료의 항복강도 548MPa을 충분히 만족하고 있다. 따라서 과잉설계된 조의 구조최적화를 수행하였다.

4. 크리깅 메타모델을 이용한 최적화

4.1 설계변수 정의 및 최적설계정식화

설계변수로써 조의 측면부의 두께(t_1), 조의 중간부의 롤러지지부의 두께(t_2), 조의 하단부의 롤러지지부의 두께(t_3), 조의 곡면부의 위치(l_1)로 설정하였으며, 제한조건으로써 안전율이 고려된 강도를 고려하였다. 설계변수에 대한 설명은 Fig. 4에 나타내었다
SCM445의 항복강도는 823MPa이지만 항만시설 장비 관리규정에 따르면 안전율[2] 1.5를 고려한 최적설계 정식화는 식 (3)~(6)과 같다.

$$\textbf{Minimize} \quad W(t_1,t_2,t_3,l_4) \tag{3}$$

$$\textbf{Subject to} \quad \sigma_{\max} \le 548MPa \tag{4}$$

$$25mm \le t_1 \le 35mm \tag{5}$$

$$25mm \le t_2 \le 35mm \tag{6}$$

$$75mm \le t_3 \le 90mm \tag{7}$$

$$50mm \le l_1 \le 60mm \tag{8}$$

여기서 W는 최적화수행 시 조의 무게이고, $\sigma_{\max}$는 조에 발생하는 본 미제스 응력으로 표시되는 최대응력을 표시한다. 즉, 식 (3)의 W 및$\sigma_{\max}$는 근사모델로 대치된다. 그리고 식 (5)~(8)에 설계변수의 상한값과 하한값을 나타낸다. 이 최적화 문제는 구조최적설계(structural optimization)의 분류에서 형상최적설계(shape optimization)에 속한다. 이 최적화문제를 NASTRAN 또는 GENESIS에 내장되어 있는 형상최적설계를 이용할 경우, 최적화 과정 중에 유한요소가 파괴되는 현상이 생긴다.

본 연구에서 제안하는 크리깅으로 메타모델을 생성 후 시뮬레이티드 어닐링 알고리듬으로 최적화를 수행한 하였다. 그리고 ANSYS WORKBENCH에 내장되어있는 최적화 모듈인 DOE 및 VT방법으로 최적화를 수행한 후 그 결과를 비교하였다.

4.2 크리깅 모델

본 연구에서는 식 (3)~(4)에서 W, $\sigma_{\max}$,에 대한 크리깅 추정치 $\widehat{W}$,$\widehat{\sigma_{\max}}$을 이용하여 다음과 같은 최적설계정식화를 해결하고자 한다.

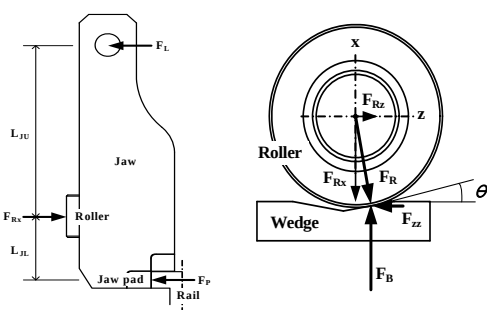
$$\textit{Minimize} \quad \widehat{W}(t_1,t_2,t_3,l_1) \tag{9}$$

$$\textit{Subject to} \quad \widehat{\sigma_{\max}} \le \sigma_a \tag{10}$$

반응함수의 $f(t)$ 근사화 모델은 다음 식 (11)같이 표시될 수 있다.

$$f(t) = \beta + z(t) \tag{11}$$

여기서 β는 상수, $z(t)$는 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 정규분포를 따르는 확률변수이다. $f(t)$ 와 크리깅 근사모델 $\hat{f}(t)$의 평균제곱오차가 최소가 되도록 하면 $\hat{f}(t)$는 다음 식 (12)와 같이 구해진다.



(a) jaw **(b)roller & wedge**

Fig. 2 Free body diagram of a jaw

$$\hat{f}(t) = \hat{\beta} + r^T(t)R^{-1}(f - \hat{\beta}q) \quad (12)$$

여기서 $\hat{\beta}$는 β의 추정치, R^{-1}은 상관행렬 R의 역행렬, r은 상관벡터, f는 n_s개의 표본데이터 벡터이고, q는 n_s개의 성분을 갖는 단위벡터이다. 이때 상관행렬 R은 다음 식 (13)과 같이 정의된다.

$$R(t^j, t^k) = \mathrm{Exp}\left[-\sum_{i=1}^{n}\theta|t^j - t^k|^2\right], (j = 1, n_s), (k = 1, n_s) \quad (13)$$

또한 β, σ^2은 우도함수(likelihood function)로부터 최대우도추정치를 갖게 하는 조건을 이용하면 다음 식 (14),(15)과 같이 구해진다.

$$\hat{\beta} = \left(q^T R^{-1} q\right)^{-1} q^T R^{-1} f \quad (14)$$

$$\widehat{\sigma^2} = \frac{\left(f - \hat{\beta}q\right)^T R^{-1}\left(f - \hat{\beta}q\right)}{n_s} \quad (15)$$

같은 방법으로 R의 파라미터인 θ의 추정치는 다음 식 (16)로부터 구해진다.

$$Maximize \; -\frac{\left[n_s.\ln\left(\widehat{\sigma^2}\right) + \ln(R)\right]}{2} \quad (16)$$

여기서 θ_i (i=1,2,…,n) > 0이다. 본 연구에서는 식 (16)로부터 n=2개의 모수를 결정하기 위해 수정된 유용방향법(modified method of feasible direction)을 이용하였다.

크리깅에 대한 자세한 유도과정과 내용은 참고문헌 [11~14]에 자세히 수록되어 있다.

4.3 최적설계 과정

본 연구에서는 조의 형상최적설계를 위하여 다음과 같은 설계 과정을 제안하였다.

1 단계: 표본점 선택 및 실험의 배치

표본점 생성 방법으로는 해석시간에 따라 전조합실시법, 라틴하이퍼큐브(latin hypercube), 직교배열표(orthogonal array) 등에서 적절한 방법을 선택해야 한다. 본 연구에서는 직교배열표를 표본방법으로 이용하였다.

2 단계: 행렬실험의 실시

1 단계에서 직교배열표에 의해 생성된 표본점의 조합에 대하여 유한요소 해석을 실시하여 반응치인 중량, 응력을 산출한다. 이 때 검토되는 응력은 본 미제스(von-mises)응력에 대한 평균응력이다. 요소의 찌그러짐을 피하기 위해서 각각의 조합마다 메쉬(Mesh)를 다시 수행해야 한다.

3 단계: 크리깅 모델의 구성 및 크리깅 모델 검증

2 단계에서 수행한 유한요소 해석결과를 기초로 중량 및 응력에 대한 크리깅 근사모델을 정의한다. 이때 식 (12)에서 $\hat{f}(t)$ 는 각각 $\widehat{W}$, $\widehat{\sigma_i}$ (i=1,2,…,49)에 대해 전개된다. 즉, 중량 W와 응력에 대한 총 2개의 크리깅 근사모델을 식 (16)에 대하여 θ의 추정치를 구함으로써 각각 구성한다. 식 (16)에서의 추정치를 구하기 위해서는 최적화 알고리듬을 적용해야 한다. 크리깅 모델은 표본점의 반응치를 기초로 구성된 근사모델이므로 실제 모델과는 항상 오차를 갖는다. 이러한 근사모델을 검증하기 위한 몇 가지 지수들이 소개되고 있는데 본 연구에서는 다음 식 (17)의 Cross-Validation지수를 이용하였다.

$$CV = \sqrt{\frac{1}{n_s}\sum_{i=1}^{n_s}\left(f_i - \hat{f}_i\right)^2} \quad (17)$$

여기서 n_s는 실험점의 수이다.

CV는 시간을 많이 소비하는 작업으로 n_s를 많이 만들어야 한다. 이 방법은 크리깅 모델을 만들기 위해서 사용된 설계점과 반응치들을 이용하는 방법으로 사용된 설계점을 순서대로 하나씩 빼고 나머지 설계점과 반응치들로 크리깅 모델을 만들어 크리깅 모델을 만드는데 사용하지 않았던 설계점의 실제해석값에서 크리깅 추정치를 뺀 값들의 평균으로 크리깅 모델의 정확성을 검증 할 수 있다.

4 단계: 시뮬레이티드 어닐링을 이용한 최적화

3 단계에서 확정된 크리깅 근사모델을 가지고 최

적화를 수행한다. 최적해를 찾기 위해 시뮬레이티드 어닐링(SA) 알고리듬을 이용한 Fortran 프로그램을 사용한다.

5 단계: 수렴 조건

반복되는 프로세스는 식 (18)~(19)의 두 가지 수렴 조건을 만족하면 멈추게 된다.

$$CP_1 = \frac{\left|\sigma^*_{\max} - \widehat{\sigma^*_{\max}}\right|}{\sigma^*_{\max}} \times 100 \quad (18)$$

$$CP_2 = CV_{stress} \quad (19)$$

본 연구에서는 CP_1는 3% 이하, CP_2는 30MPa이하로 설정하였다.[14~17]

5. 최적화 결과

5.1 크리깅

첫 번째 단계에서 표본점은 OA(2,7,49,8)[18]을 이용하였다. 괄호안의 첫 번째 숫자는 strength를, 두 번째 숫자는 수준수를, 세 번째 숫자는 행의 개수를, 네 번째 숫자는 열의 개수를 의미한다. 설계변수의 개수가 4개이므로 마지막 4열은 비워둔다. 식 (5)~(8)에서 설계변수의 범위를 가지고 직교배열표로 생성한 실험점을 Table 1에 나타내었다.

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

Exp. No.	t_1 (mm)	t_2 (mm)	t_3 (mm)	l_1 (mm)	W (kg)	$\sigma_{\max}$ (MPa)
1	25.0	25.0	75.0	50.0	36.9	747.9
2	25.0	26.7	77.5	53.3	37.5	655.3
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
48	35.0	33.3	82.5	53.3	48.1	484.0
49	35.0	35.0	80.0	56.7	47.9	509.9

그리고 다음 실험점을 이용해 최대응력과 중량을 산출하여 크리깅 모델을 생성 후 최적화를 수행하였다. 크리깅 모델 생성에 사용된 θ와 CV값을 Table 2에 나타내었고 최적화 결과를 Table 3에 나타내었다. 크리깅 모델을 검증한 Cross - validation의 결과를 보면 46.45MPa의 오차를 가지는 것으로 나타났다. 최적화된 중량과 응력의 오차는 각각 3.28%, 2.14%로 나타났다. 따라서 본 연구에서 제안한 수렴조건에 만족하지 않은 결과 값을 나타낸다. 또한 결과를 고찰해보면 설계변수가 설계범위의 경계 값을 가지므로 전역적 최적해라고 보기 어렵다. 따라서 본 연구에서 제안한 프로세스를 반복 수행한다.

첫 번째 단계에서 얻은 최적해를 초기치로 두고 식 (5)~(8)의 설계변수들의 범위를 식 (20)~(23)으로 설정하고 다시 1단계부터 반복 수행하였다.

$$23.5mm \le t_1 \le 33.3mm \quad (20)$$

$$27.5mm \le t_2 \le 30.5mm \quad (21)$$

$$81mm \le t_3 \le 84mm \quad (22)$$

$$54mm \le l_3 \le 57mm \quad (23)$$

다음의 설계변수 범위를 OA(2,7,49,8) 이용해 실험점을 생성한 것을 Table 4에 나타 내었다. 이 실험점을 이용해 최대 응력과 중량을 산출하고 크리깅 모델을 생성 후 최적화를 수행하였다.

그 결과를 Table 2 와 Table 3에 나타내었다. 크리깅 모델을 검증한 Cross-validation의 결과를 보면 23.8MPa의 오차를 가지는 것으로 나타났다. 산출된 중량과 응력의 오차는 각각 2.96%, 0.58%로 나타났다. Table 5에서 나타낸 것과 같이 2번의 반복된 프로세스를 통해 본 연구에서 제안한 5단계(수렴조건)를 만족 하였다. 초기조건과 비교해 중량은 14.7% 감소되었다.

Table 2 Validation of Kriging models for each iteration

Iteration	Response	Optimum parameters				CV
		θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	
1	W	0.596	1.295	1.278	0.545	
	$\sigma_{\max}$	0.594	1.478	1.465	0.602	46.5
2	W	0.598	1.300	1.281	0.548	
	$\sigma_{\max}$	9.762	1.448	1.437	9.770	23.8

Table 3 Optimum results for each iteration

Iteration	Optimum design variables (mm)				Response (σ_{max}: MPa, W: kg)			
	t_1	t_2	t_3	l_1	$\hat{w}$	w	$\widehat{\sigma_{max}}$	σ_{max}
1	25.0	29.0	82.5	55.0	38.3	39.6	548.0	560.0
2	23.5	28.4	82.5	55.5	38.2	37.1	542.0	545.2

Table 4 OA(2,7,49,8)Experiments for the 2nd iteration

Exp. No.	t_1 (mm)	t_2 (mm)	t_3 (mm)	l_1 (mm)	W (kg)	σ_{max} (MPa)
1	23.5	27.5	81.0	54.0	36.8	602.7
2	23.5	28.0	81.5	55.0	36.9	541.4
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
48	26.5	30.0	82.5	55.0	39.98	556.9
49	26.5	30.5	82.0	56.0	40.0	576.0

Table 5 Convergence parameters for each iteration

Iteration	Convergence parameter	
	CP1	CP2
1	6.9	46.5
2	2.5	23.8

5.2 ANSYS WORKBENCH

조의 최적화를 위해 사용한 WORKBENCH에는 실험계획법에 의한 방법과 변동해석을 이용한 두 가지 방법이 있었고 본 연구에서는 이 두 방법으로 형상최적설계를 수행하였다.[19]

실험계획법(DOE)에 의한 최적화 방법은 최적해를 구하기 위하여 중심합성법(central composite approach)을 이용하여 실험횟수를 정하게 된다. 그리고 반응표면 이용하여 근사화 하는 방법이다. 반면에 변동해석법(VT)는 반응표면을 얻기 위한 입력 파라미터 정보가 필요하게 되고 테일러급수전개(taylor series expansion)의 조합으로 반응표면을 결정하게 된다. 즉 각 반응치에 대하여 특정 설계점을 기초로 하며 테일러 급수는 1차까지 전개함으로써 선형근사식을 생성하는 것이다. 두 가지 방법 모두 선형함수 또는 이차함수를 이용해 근사화를 하기 때문에 컴퓨터 처리시간이 적게 든다는 장점은 있지만 비선형이 강한 함수를 처리하는데 결점을 가지고 있다. 이러한 결점을 보완하기위해 두 가지 방법은 3개의 후보 최적점을 결과로 보여준다. 그러면 사용자는 그 중 제일 적절한 최적점을 선택할 수 있다. 자세한 최적화 절차는 방(2006)에 의해 수행되었다. Table 6에 그 결과를 나타내었다. VT와 DOE의 결과를 본 연구에서 기술한 크리깅 메타모델을 이용하여 도출한 결과와 비교하여 보면 본 연구에서 제안한 방법의 결과가 더 우수함을 알 수 있다.

Table 6 Comparisons of results

Method	Optimum design variables (mm)				Response (W: kg , σ_{max}: MPa)			
	t1	t2	t3	l1	$\widehat{W}$	W	$\widehat{\sigma_{max}}$	σ_{max}
Initial	30.0	30.0	85.0	54.07		43.5		533.0
DOE	27.0	27.6	81.5	59.0	39.8	39.8	537.6	525.0
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	542.0	545.2

6. 결 론

본 연구에서는 크리깅 근사모델과 시뮬레이티드 어닐링 알고리듬을 바탕으로 컨테이너 크레인 구성품인 조의 최적설계 방법을 제안하였다. 일반적으로 최대응력은 설계변수의 변경에 따라 발생위치가 변하기 때문에 비선형성이 강하다. 이러한 최대응력을 근사화 하는데 크리깅 모델은 효과적이다.

극악한 풍하중 조건을 고려한 조의 형상 최적설계를 크리깅과 전역적 알고리듬인 시뮬레이티드 어닐링을 이용해 수행하였다. 그 결과 14.7%의 중량 감소를 보였다. 이는 상용 소프트웨어인 ANSYS WORKBENCH를 이용한 최적화 결과보다 더 좋은 결과를 얻을 수 있다.

본 연구에서 제안한 프로세스를 이용하여 컨테이너 크레인의 다른 부품에도 적용 할 수 있다.

후 기

본 연구는 지식경제부 지정 지역혁신센터사업(RIC)

신소형재가공청정공정개발연구센터 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. Kim, J. R., “Wind Resistance Design Learning from Typhoon Maemi,” J. of WEIK, Vol.7, No.2, pp.150-156, 2003.
2. "Management Regulation for Facilities and Equipment in Port", Ministry of Maritime Affairs & Fisheries, 2004.
3. Han, D. S., Han, G. J., Lee, K. H., Lee, J. M., “Design of the Various Wedge Type Rail Clamp for Quay Crane According to the Design Wind Speed Criteria Changes,” Asia Navigation Conference 2005, pp.291-301, 2005.
4. Lee, S. W., Shim, J. J., Han, D. S., Park, J. S., Han, G. J., Lee, K. S. and Kim, T. H. , “The Effect of Wind Load on the Stability of a Container Crane,” J. of KSPE, Vol. 22, No. 2, pp.148-155, 2005.
5. MSC Software Corporation, MSC NASRAN 2004 Design Sensitivity and Optimization User's Guide, pp.123-124, 2004.
6. VR & D , GENESIS Ver.6.0 Users Manual, 2000.
7. Shim, J.W. and Park, G.J. , “Development of a Structural Shape Optimization Scheme Using Selective Element Method,” Transactions of the KSME A, Vol.27, No.12, pp.2101-2109, 2003.
8. Taesung Software & Engineering Inc., ANSYS WORKBENCH Training Manual , 2005.
9. Han, D. S., Shim, J. J., Han, G. J., Lee, K. , "A Experimental Analysis on the Relation between the Angle of a Locker and the Clamping Force of Wedge Type Rail Clamp," Proceedings of the KINPR 2005 Autumn Annual Meeting, pp.247-252, (2005).
10. Han, G. J., Lee, H., Shim, J. J., Han, D. S., Ahn, C. W. and Jeon, Y. H. , "Study on the Wedge Angle of Wedge Type Rail Clamp for Container Crane," J. of KSPE, Vol.21, No.9, pp.119-126, 2004.
11. Sacks, J., Welch, W. J., Mitchell, T. J. and Wynn, H. P., “Design and Analysis of Computer Experiments,” Statistical Science, Vol.4, No.4, pp.409-435, 1989.
12. Guinta, A. and Watson, L. , “ A Comparison of Approximation Modeling Techniques: Polynomial Versus Interpolating Models,” Proceedings of the 7th AIAA / USAF / NASA / ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, St.Louis,MO, AIAA, Vol.2, Sept.2-4, pp.392-440 (AIAA-98-4758), 1998.
13. Santner, T. J., Williams, B. J. and Notz, W. I., "The Design and Analysis of Computer Experiments,(Springer, New York)", 2003.
14. Lee, K.H., "Optimization of a Driver-Side Airbag Using Kriging Based Approximation Model,” J. of Mechanical Science and Technology, Vol.19, No.1, pp.116-126, 2005.
15. Lee, K. H. and Kang, D. H., “A Robust Optimization Using the Statistics Based on Kriging Metamodel,” Journal of Mechanical Science and Technology, Vol.20,No.8,pp.1169-1182, 2006.
16. Lee, K.H. and Park, G.J., “A Global Robust Optimization Using Kriging Based Approximation Model,” JSME International J., Series C, Vol.49, No.3, Sep., pp. 779-788, 2006.
17. Lee, K. H. and Kang, D. H., “Structural optimization of an automotive door using the kriging interpolation method,” Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, Vol. 221, No. 12, pp. 1525 - 1534, 2007.
18. Sherwood, G, “On the Construction of Orthogonal Arrays and Covering Arrays Using Permutation Groups,” http://home.att.net/~gsherwood/cover.htm, 2006.
19. Bang, I. K., Kang, D. H., Han, D. S., Han, G. J. and Lee, K. H. , “Shape Optimization for a Jaw Using Design of Experiments,” J. of KNIPR, Vol. 30, No. 8, pp. 685-690, 2006.