

크리깅 근사모델 모델을 이용한 LMTT 이동체의 구조최적설계

박형욱* · 한동섭* · 이권희** · 한근조***

*동아대학교 대학원, **동아대학교 기계공학과 조교수, ***동아대학교 기계공학과 교수

Structural Optimization for LMTT-Mover Using the Kriging Based Approximation Model

H. W. Park* · D. S. Han* · K.-H. Lee** · G. J. Han***

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

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

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

요약 : LMTT(Linear Motor-based Transfer Technology)는 항만 자동화를 위한 수평 이송 시스템이며, 셔틀카(shuttle car)와 격자 구조의 레일에 부착된 스테이터 모듈(stator module)로 구성된 PMLSM(Permanent Magnetic Linear Synchronous Motor)에 의해 구동된다. 본 논문에서는 LMTT 시스템 부품인 이동체(mover)의 경량화를 위하여 직교배열표 및 크리깅 방법을 이용하여 최적설계를 수행한다. 설계변수로는 가로빔, 세로빔, 휠빔의 두께와 높이 방향의 치수를 결정하는 형상변수를 포함시켰다. 목적함수로는 중량, 제한조건 함수로는 안전율이 고려된 응력으로 설정하였다. 본 연구에서 제시된 방법으로 구한 최적해를 민감도기반 최적설계로 구해진 최적해와 비교, 검토하였다.

핵심용어 : LMTT, 셔틀카, 이동체, 크리깅, 직교배열표

ABSTRACT : LMTT (Linear Motor-based Transfer Techno-logy) is a horizontal transfer system for the yard automation, which has been proposed to take the place of AGV (Automated Guided Vehicle) in the maritime container terminal. The system is based on PMLSM (Permanent Magnetic Linear Synchronous Motor) that consists of stator modules on the rail and shuttle car. It is desirable to reduce the weight of LMTT in order to control the electronic devices with minimum energy. In this research, the DACE modeling, known as the one of Kriging interpolation, is introduced to obtain the surrogate approximation model of the structural responses. Then, the GRG(Generalized Reduced Gradient) method built in Excel is adopted to determine the optimum. The objective function is set up as weight. On the contrary, the design variables are considered as transverse, longitudinal and wheel beam's thicknesses, and the constraints are the maximum stresses generated by four loading conditions.

KEY WORDS : LMTT, Shuttle Car, Mover, Kriging, Optimization

1. 서 론

무역규모의 확대로 인한 초대형 컨테이너선의 등장으로 급속히 증가하는 컨테이너 화물의 신속한 처리가 필요하다. 기존의 컨테이너 이송장치인 AGV(Automated Guided Vehicle)는 저속도, 제어의 어려움, 많은 유지보수비 등과 같은 문제점들을 가지고 있다. 물류의 신속하고 체계적인 처리를 위해서는 기존의

문제점을 보완하는 항만 자동화가 이루어져야 한다. 새로운 기술인 LMTT(Leaner Motor-based Transfer Technology)라는 것이 그 해결책으로 제안되고 있다(Min, 2004).

본 연구에서는 LMTT의 셔틀카 중 이동체의 경량화를 위한 구조설계 과정을 제시하였다. LMTT의 부품인 이동체(Mover)의 구조설계를 위한 설계변수로 이동체의 가로빔, 세로빔, 휠빔의 두께를 설정하였으며, 제한조건은 안전율이 고려된 강도로 설정하였다. 각 반응치를 산출하기 위해 상용유한요소 프로그램인 GENESIS(VMA, 1998)를 이용하였으며, 사용된 요소는 절점 당 6자유도를 갖는 셀(Shell)이다. 그리고 하중조건으로는

* 정희원, hobang00@naver.com, dshan@donga.ac.kr 051)200-6981

** 정희원(대표저자), leckh@donga.ac.kr 051)200-7638

*** 종신희원, gjhan@daunet.donga.ac.kr 051)200-7650

4개의 운행조건을 모두 포함시켰다. 이것을 기초로 크리깅에 의한 근사모델을 생성하여 최적설계를 수행하고자 한다. 크리깅은 표본점의 반응치를 기초로 내삽법(Interpolation)에 의해 함수를 예측하는 근사기법의 하나이다. 최적설계 분야에서 자주 사용되는 근사기법인 반응표면법(Response Surface Method)에 비해 반응치의 보다 정확한 예측이 가능하며 특히 비선형성이 강한 함수의 예측에 적합하다고 알려져 있다 (Guinta, 1998).

크리깅 모델을 생성하기 위한 표본점은 직교배열표(Orthogonal Array)(Sherwood, 2004)를 이용하였다. 직교배열표의 실험계획에 의해 각 하중조건에 대한 중량 및 최대응력을 산출한다. 다음으로 중량 및 각 하중조건에 대한 크리깅 근사모델을 생성한 후 최적화 과정을 수행한다. 이 단계에서 크리깅 근사모델에 대한 타당성을 평가한 후, 만족스럽지 못할 경우 순차적 크리깅(Sequential Kriging Model) 모델을 구성하여 최적화를 재수행한다. 이 과정을 크리깅 근사모델의 타당성이 만족될 때까지 반복한다. 여기서 순차적 크리깅이란 초기 근사모델에 의해 구해진 최적해 근처에서 설계변수의 범위를 축소하여 크리깅 모델을 재구성하는 것을 의미한다.

본 연구에서는 제시한 방법에 의한 결과를 GENESIS의 구조 최적설계(Structural Optimization) 결과와 비교, 검토하였다.

2. 유한요소해석 및 최적설계정식화

2.1 이동체 구조 및 하중조건

LMTT의 구조물중 셔틀카는 Fig. 1(a)과 같이 크게 프레임과 이동체로 구성되어 있다. LMTT의 전체적인 구조는 Fig. 1(b)와 같이 프레임이 이동체 위에 고정되고 프레임 위에 컨테이너가 놓여진다. 그러므로 이동체는 프레임과 컨테이너의 하중을 동시에 받는다. 이동체의 밑 부분은 레일에 장착된 자석의 자기력 변화에 따라 이동하는 스테이터 모듈이 설치되어 있어 이동체가 움직이게 되는 것이다.

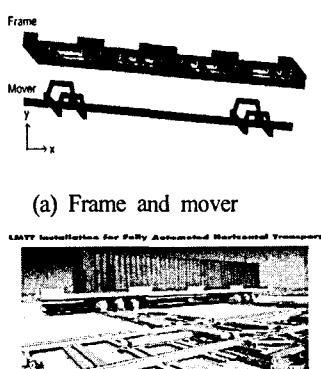
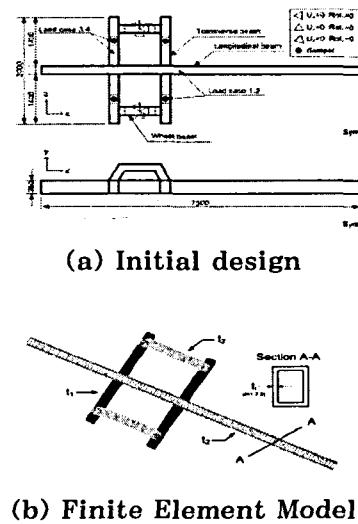


Fig. 1 A Structure of LMTT

이동체의 재료는 강(Steel)이며 이때의 물성치는 참고문헌 (Min, 2004)에 있는 값들을 이용하였다. 개념설계 단계에서 구조성능의 검토 없이 결정된 치수를 Fig. 2에 표시하였다. 따라서 이동체의 초기 두께는 큰 의미를 갖지 않는다.



(b) Finite Element Model

Fig. 2 A Mover for shuttle car

이동체는 Fig. 2와 같이 템퍼의 4부분에서 프레임과 컨테이너의 무게 50ton을 받고 있다. 동시에 신속한 제어를 위해서 정지나 이동시에 가로 빔과 세로 빔의 밑 부분에 부착된 자석과 레일에 부착된 자석에 의해서 자기력으로 이동 방향에 따라 가로 빔과 세로 빔의 밑 부분에 30ton의 힘이 들어 올려지거나 잡아당겨 진다. 최적화과정 중에 고려된 각각의 하중별 조건은 다음과 같다.

하중조건 1. 프레임과 컨테이너가 위에서 누르는 무게 50ton+ 가로 빔 방향으로 움직일 때 가로 빔에 작용하는 부상력 30ton

하중조건 2. 프레임과 컨테이너가 위에서 누르는 무게 50ton+ 가로 빔 방향으로 정지할 때 가로 빔에 작용하는 흡착력 30ton

하중조건 3. 프레임과 컨테이너가 위에서 누르는 무게 50ton+ 세로 빔 방향으로 움직일 때 세로 빔에 작용하는 부상력 30ton

하중조건 4. 프레임과 컨테이너가 위에서 누르는 무게 50ton+ 세로 빔 방향으로 정지할 때 세로 빔에 작용하는 흡착력 30ton

2.2 최적설계정식화

이동체의 최적설계를 위한 정식화는 식 (1)-(3)과 같이 표시 할 수 있다.

$$\text{Minimize} \quad W(t) \quad (1)$$

$$\text{Subj ect to} \quad \sigma_{\max} \leq \sigma_{all} \quad (2)=1,$$

$$t_L \leq t_j \leq t_U \quad (j=1,2,3) \quad (3)$$

여기서 W 는 중량이고 $\mathbf{t}=[t_1 \ t_2 \ t_3]^T$ 는 설계변수벡터로써, t_1, t_2, t_3 은 각각 Fig. 2의 횡빔(Transverse Beam), 종빔(Longitudinal Beam), 휠빔(Wheel Beam)의 두께를 의미한다. 각 설계변수를 Fig. 2(b)에 표시하였다. 그리고 a_{maxi} 는 i 번째 하중조건의 최대응력을, a_{all} 는 허용응력이다. 허용응력은 통상 하역장비의 구조설계 시 사용되는 안전계수인 1.5를 이용하여 160MPa로 설정되었다.

일반적으로 최대응력은 설계변수에 대하여 연속함수가 아니므로 민감도기반최적설계(Gradient-Based Optimization)에서는 정의될 수 없는 제한조건이다. 그러나 본 연구에서는 각 하중조건에 대한 크리깅 모델을 구성한 후 최적화를 수행하므로 설정 가능한 제한조건이다. 그리고 t_L, t_U 는 설계변수의 하한값, 상한값으로써 각각 10mm, 35mm로 설정되었다.

3. 크리깅 모델을 이용한 최적화 이론

3.1 DACE 모델

본 연구에서는 목적함수인 중량, 제한조건함수인 각 하중조건에 대한 최대응력에 대한 대리모델(Surrogate Model)을 정의하기 위해 크리깅 기법의 하나인 DACE 방법(Lee, 2005)을 이용하였다. DACE 모델에서는 전역적 근사화 모델이 다음과 같이 구성된다.

$$y(t)=g(t)+z(t) \quad (4)$$

여기서 $y(t)$ 는 반응치를 의미하고 본 연구에서는 중량 및 각 하중조건에 대한 최대응력에 대응된다. 그리고 $g(t)$ 는 알고 있는 함수이며 $z(t)$ 는 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 정규분포를 따르는 확률변수이다. 이때 $g(t)$ 는 식 (5)와 같이 상수 β 로 대치할 수 있다.

$$y(t)=\beta z(t) \quad (5)$$

$\hat{y}(t)$ 를 근사모델이라고 하면 $y(t)$ 와 $\hat{y}(t)$ 의 평균제곱오차(mean squared error)가 최소가 되도록 하면 $\hat{y}(t)$ 는 다음과 같이 예측된다.

$$\hat{y}(t)=\hat{\beta}+\mathbf{r}^T(\mathbf{t})\mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y}-\hat{\beta}\mathbf{q}) \quad (6)$$

여기서 $\hat{\beta}$ 는 β 의 추정치, \mathbf{R}^{-1} 은 상관행렬 \mathbf{R} 의 역행렬, \mathbf{r} 은 상관벡터, \mathbf{y} 는 n_s 개의 표본데이터 벡터이고, \mathbf{q} 는 n_s 개 성분을 갖는 단위벡터이다. 상관행렬 및 상관벡터는 다음 식과 같이 정의된다.

$$R(\mathbf{t}^j, \mathbf{t}^k)=\text{Exp}\left[-\sum_{i=1}^n \theta_i |t_i^j - t_i^k|^2\right], (j=1,..,n_s), (k=1,..,n_s) \quad (7)$$

$$\mathbf{r}(\mathbf{t})=[R(\mathbf{t}, \mathbf{t}^{(1)}), R(\mathbf{t}, \mathbf{t}^{(2)}), \dots, R(\mathbf{t}, \mathbf{t}^{(n_s)})]^T \quad (8)$$

여기서 n_s 는 표본점 수, θ_i 는 i 번째 설계변수에 대응하는 i 번째 모수(parameter)이다. 이때 우도함수(likelihood function), L 은 다음과 같이 정의된다.

$$L(\mathbf{y}; \boldsymbol{\theta}, \beta, \sigma^2) = \frac{(2\pi\sigma^2)^{-n_s/2}}{\sqrt{|\mathbf{R}|}} \cdot \text{Exp}\left[-\frac{(\mathbf{y}-\beta\mathbf{q})^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{y}-\beta\mathbf{q})}{2\sigma^2}\right] \quad (9)$$

식 (9)로부터 로그우도함수를 β 및 σ^2 에 대해 미분하고 값을 0으로 놓으면, β 와 σ^2 의 최대우도 추정치는 다음과 같이 구해진다.

$$\hat{\beta} = (\mathbf{q}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{q})^{-1} \mathbf{q}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{y} \quad (10)$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{(\mathbf{y} - \hat{\beta} \mathbf{q})^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{y} - \hat{\beta} \mathbf{q})}{n_s} \quad (11)$$

그리고 미지의 모수 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ 는 다음 식으로부터 구해진다.

$$\text{maximize} \quad -\frac{[n_s \cdot \ln(\hat{\sigma}^2) + \ln|\mathbf{R}|]}{2} \quad (12)$$

여기서 $\theta_i (i=1,2,\dots,n) > 0$ 이다. 본 연구에서는 식 (12)으로부터 n 개의 모수를 결정하기 위해 GRG(Generalized Reduced Gradient) 알고리듬을 이용하였다. 근사화 된 모델의 타당성은 식(13) 또는 식(14)로 평가할 수 있다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n_s} \sum_{i=1}^{n_s} (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (13)$$

$$MAXERR = MAX[|y_i - \hat{y}_i|, i=1, 2, \dots, n_s] \quad (14)$$

여기서 n_s 는 근사모델의 평가를 위한 시험설계점의 수이다.

3.2 순차적 크리깅 모델을 이용한 최적화법

본 연구에서는 이동체의 구조최적설계를 위하여 다음과 같은 설계 과정을 제안하였다.

1 단계: 직교배열표 선택 및 실험의 배치

식 (3)으로 표시된 설계공간에 표본점을 생성한다. 표본점 생성 방법으로는 전조합실시법, 라틴하이퍼큐브(Latin Hypercube), 직교배열표 등이 있는데 본 연구에서는 직교배열표를 이용하였다.

2 단계: 헤럴실험의 실시

직교배열표의 각 실험에 대하여 유한요소 해석을 실시하여 반응치인 중량, 각 하중조건 별 최대응력을 산출한다. 이 때 최대응력은 본미제스(Von-Mises)응력이다.

3 단계: 크리깅 모델의 구성

2 단계에서 수행한 유한요소 해석결과를 기초로 중량 및 각 하중조건별 최대응력에 대한 크리깅 근사모델을 정의한다. 이 때 식 (4)에서 y 는 각각 $\hat{W}, \hat{\sigma}_{max1}, \hat{\sigma}_{max2}, \hat{\sigma}_{max3}, \hat{\sigma}_{max4}$ 에 대해 전개될 수 있다. 즉, $\hat{W}, \hat{\sigma}_{max1}, \hat{\sigma}_{max2}, \hat{\sigma}_{max3}, \hat{\sigma}_{max4}$ 에 대한 식 (6)을 구성한다.

4 단계: 크리깅 모델의 검증

크리깅 모델은 표본점의 반응치를 기초로 구성된 근사모델이

므로 실제 모델과는 항상 오차를 갖는다. 이에 대한 오차정도는 식 (13) 및 (14)로 평가될 수 있으며, 식 (13)은 모델의 전역적인 오차이고 식 (14)는 모델의 국부적인 오차를 나타내는 것이다. 본 연구에서는 각 오차에 대한 허용치를 최대응력 반응치에 대하여 $\varepsilon_1=3.0$ $\varepsilon_2=5.0$ 으로 하였고 $n_k=10$ 으로 하였다.

5 단계: 크리깅 모델에 기초한 최적설계 수행

이 단계에서는 3 단계에서 정의한 각 반응치에 대한 크리깅 모델을 가지고 최적화를 수행한다. 이 때 식 (1)-(3)의 정식화는 다음과 같이 수정된다.

$$\text{Minimize } \hat{W}(t) \quad (15)$$

$$\text{Subject to } \sigma_{\max,i} \leq \sigma_{all} \quad (i=1,\dots,4) \quad (16)$$

$$t_L \leq t_j \leq t_U \quad (j=1,2,3) \quad (17)$$

만일 4 단계에서 기준을 만족시키지 못하면 1 단계로 올라가 다음의 과정을 수행한다. 즉, 5 단계의 최적화 과정에서 구해진 최적해 주변에서 직교배열표 실험을 다시 수행한다. 이때는 최적해 주변에서 수준들이 결정된다. 그리고 설계변수의 하한값 t_L 과 상한값 t_U 역시 축소된다. 여기서 새로운 상한값 및 하한값의 차이 $t_U - t_L$ 은 초기 $t_U - t_L$ 의 20%로 설정하였다. 이 개념을 Fig. 3에 표시하였다. 반대로 4 단계의 기준을 만족시키면 설계과정을 종료한다. 본 연구에서 제시한 전반적인 설계 흐름도를 Fig. 4에 표시하였다.

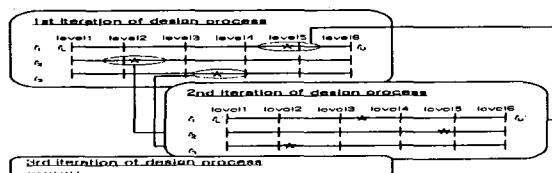


Fig. 3 Reduction of design variables' levels

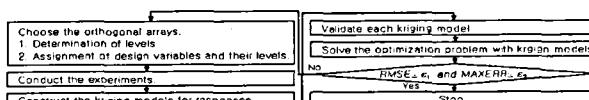


Fig. 4 Flowchart for the suggested design process

4. 최적화 결과

설계과정의 1 단계 과정은 표본점을 정의하기 위한 직교배열표를 선정하는 것이다. 직교배열표의 선정기준은 가능하면 유한요소 해석 횟수를 줄이고 반응치를 정확히 예측해 낼 수 있어야 한다는 것이다. 일반적인 구조성능의 반응치 중, 중량 및 일정 위치에서 응력 및 변위는 2차 함수로 근사화시켜도 충분히 정확한 예측이 가능하다. 이 경우에는 3수준을 갖는 직교배열표가 유용하다. 그러나 이동체의 최적설계 정식화에서 식 (2)는 각 하중조건별 최대응력으로 표시되고 있다. 이는 설계변수가 변하면 최대응력의 위치도 변하게 되고, 불연속함수가 되는 성질이 있어 비선형성이 크다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에

서는 3 인자 6수준을 배치할 수 있는 직교배열표 OA(36, 6, 3)(Sherwood, 2004)을 이용하였다. 수준 수는 6이므로 식 (3)의 설계변수의 하한값 및 상한값 사이를 5 등분하여 각각을 해당하는 수준에 대응시킨다. 설계변수의 각 수준을 제1차 반복과정, 제2차 반복과정으로 분류하여 Table 1에 표시하였다.

Table 1 Levels of each design variable

levels	1	2	3	4	5	6
1st iteration(mm)	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0
2nd iteration(mm)	t_1	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0
	t_2	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0
	t_3	28.0	29.0	30.0	31.0	32.0

다음 설계과정은 앞에서 배치한 36회의 각 실험에 대하여 유한요소 해석을 수행하는 것이다. 본 연구에서는 유한요소 해석을 위하여 GENESIS(VMA, 1998)를 이용하였다. 제1회 반복과정의 직교배열표 및 유한요소 해석결과를 Table 2에 표시하였다. 세 번째 설계과정은 유한요소해석 결과를 기초로 크리깅근사모델을 구성하는 것이다.

Table 2 OA(36, 6, 3) for 1st iteration

No.	D.V.			Max. stress(MPa) and weight(kg)				
	A	B	C	L.C.#1	L.C.#2	L.C.#3	L.C.#4	Weight
1	1	1	1	168.9	346.0	167.4	264.5	1312.2
2	1	2	2	165.5	257.9	164.4	194.5	1743.8
3	1	3	3	163.7	208.6	162.8	165.6	2175.5
4	1	4	4	162.6	190.4	163.8	173.5	2607.1
5	1	5	5	165.0	194.4	167.3	177.6	3038.7
6	1	6	6	167.0	196.7	169.4	179.9	3470.3
7	2	1	2	106.4	310.7	77.2	240.1	1860.6
8	2	2	3	82.9	236.0	76.0	179.2	2292.2
9	2	3	4	76.5	192.5	74.9	145.1	2723.8
10	2	4	5	75.7	163.2	74.2	122.7	3155.4
11	2	5	6	75.1	141.9	73.7	106.7	3587.0
12	2	6	1	105.5	138.7	73.4	97.8	2075.7
13	3	1	3	96.9	284.9	62.2	222.8	2408.9
14	3	2	4	76.6	219.2	46.9	167.7	2840.5
15	3	3	5	63.3	179.9	43.6	136.3	3272.1
16	3	4	6	53.9	153.1	43.2	115.5	3703.7
17	3	5	1	102.9	151.6	42.8	105.3	2192.4
18	3	6	2	66.8	130.0	42.5	92.3	2624.0
19	4	1	4	90.3	266.6	58.9	211.0	2967.2
20	4	2	5	72.0	206.7	44.5	159.5	3388.8
21	4	3	6	59.8	170.4	36.3	129.9	3820.4
22	4	4	1	101.7	169.5	32.0	116.9	2309.2
23	4	5	2	66.3	141.9	28.2	100.1	2740.8
24	4	6	3	48.9	123.0	28.0	88.0	3172.4
25	5	1	5	85.4	253.2	56.6	202.7	3505.5
26	5	2	6	68.5	197.2	42.8	153.6	3937.1
27	5	3	1	102.4	194.4	36.7	134.5	2425.9
28	5	4	2	66.4	158.3	30.7	111.8	2857.5
29	5	5	3	48.9	134.5	26.6	96.2	3289.1
30	6	6	4	41.5	117.4	23.5	84.7	3720.7
31	6	1	6	81.6	242.8	54.8	196.6	4053.8
32	6	2	1	104.8	230.2	44.3	161.8	2542.6
33	6	3	2	67.3	180.9	35.4	128.9	2974.2
34	6	4	3	53.3	150.1	29.8	107.9	3405.8
35	6	5	4	45.7	128.7	25.7	93.1	3837.4
36	6	6	5	40.0	112.8	22.7	82.1	4269.0

중량 및 4 개의 하중조건에 대한 최대응력의 크리깅 모델에 대한 식 (6)의 β 및 식 (12)로부터 구한 $\theta(i=1,...,3)$ 를 Table 3에 표시하였다. Table 3의 오차로부터 4단계의 기준을 만족시키지 못하므로 첫 번째 반복과정의 크리깅 모델의 정확도는 충분하지 못하다고 판단된다.

Table 3 Kriging models for 1st iteration

Responses	Optimum parameters				Error	
	β	θ_1	θ_2	θ_3	RMSE	MAXERR
Weight	4.1	0.007	0.002	0.749	0.003	0.006
Max. stress(#1)	138.8	1.525	0.060	0.547	3.390	6.955
Max. stress(#2)	311.1	0.552	0.356	0.002	6.439	17.504
Max. stress(#3)	85.5	6.000	0.374	0.001	9.039	21.422
Max. stress(#4)	180.8	1.719	0.867	0.022	5.267	12.422

Table 4 OA(36, 6, 3) for 2nd iteration

No.	D.V.			Max. stress(MPa) and weight(kg)				
	A	B	C	L.C.#1	L.C.#1	L.C.#1	L.C.#1	Weight
1	1	1	1	137.4	169.1	135.6	146.7	1745.2
2	1	2	2	137.0	167.8	136.3	147.4	1831.5
3	1	3	3	136.7	168.0	136.9	148.0	1917.8
4	1	4	4	136.5	168.2	137.9	148.6	2004.2
5	1	5	5	136.2	168.4	137.9	149.1	2090.5
6	1	6	6	136.3	168.6	138.3	149.5	2176.8
7	2	1	2	111.6	166.6	113.5	123.6	1854.9
8	2	2	3	116.3	161.4	113.4	124.3	1941.2
9	2	3	4	116.0	157.6	113.7	124.9	2027.5
10	2	4	5	115.8	152.1	114.2	125.5	2113.8
11	2	5	6	115.5	147.9	114.7	126.0	2200.2
12	2	6	1	116.6	148.1	115.1	127.0	1897.9
13	3	1	3	100.4	164.2	97.2	118.1	1964.5
14	3	2	4	100.1	159.1	97.1	114.7	2050.9
15	3	3	5	99.8	154.4	97.0	116.6	2137.2
16	3	4	6	99.6	150.0	97.0	108.7	2223.5
17	3	5	1	106.7	150.5	96.9	108.5	1921.2
18	3	6	2	100.4	146.0	97.0	108.9	2007.6
19	4	1	4	87.5	161.8	84.3	116.5	2074.2
20	4	2	5	87.2	156.9	84.2	113.2	2160.5
21	4	3	6	87.0	152.2	84.1	110.2	2246.8
22	4	4	1	106.2	153.0	84.0	108.5	1944.6
23	4	5	2	95.6	148.3	84.0	105.6	2030.9
24	4	6	3	87.5	144.0	83.9	102.9	2117.2
25	5	1	5	77.1	159.5	73.9	114.9	2183.9
26	5	2	6	76.8	154.7	73.8	117.7	2270.2
27	5	3	1	105.6	155.8	73.7	110.1	1967.9
28	5	4	2	95.2	150.8	73.6	107.1	2054.2
29	5	5	3	86.6	146.3	73.5	104.3	2140.6
30	5	6	4	79.3	142.1	73.5	101.6	2226.9
31	6	1	6	68.5	157.4	65.3	113.5	2293.5
32	6	2	1	105.1	158.7	65.3	118.8	1991.3
33	6	3	2	94.8	153.5	65.2	108.7	2077.6
34	6	4	3	86.2	148.8	65.1	105.7	2163.9
35	6	5	4	79.0	144.3	65.0	103.0	2250.2
36	6	6	5	72.9	140.2	64.9	100.4	2336.6

그러나 5 단계에서 이 근사모델을 가지고 최적화를 수행하여 다음 단계의 설계변수의 범위와 수준을 정하는 데 이용한다. 식

(15)-(17)의 최적화를 수행한 결과 최적해는 $[t_1^* \ t_2^* \ t_3^*]^T = [13.464 \ 10.000 \ 30.484]^T$ 의 값을 얻었으며 이때 중량은 1,906.1kg으로 예측되었다.

4 단계에서 정의한 기준을 만족하지 못했으므로 설계과정 1 단계로 다시 올라가 직교배열표에 실험을 다시 배치한다. 이 수준들을 Table 4와 같이 직교배열표 OA(36, 6, 3)(Sherwood, 2004)에 배치하고 다시 36회의 유한요소 해석을 수행한다. 이 반응치를 가지고 크리깅 근사모델을 다시 구성한다. 두 번째 반복과정에서 크리깅 모델에 대한 모수의 β 및 식 (12)로부터 구한 최적의 $\theta(i=1,...,3)$ 를 Table 5에 표시하였다. 다음으로 식 (15)-(17)로 표시되는 최적화를 수행한다.

두 번째 반복과정에서의 오차는 Table 4에 표시되어 있는데, 이동체 구조설계문제에서는 무시할 만한 정도의 오차이고, 4 단계에서 설정한 기준을 만족시키므로 두 번째 단계에서 설계과정을 종료한다.

이 단계에서의 최적해는 $[t_1^* \ t_2^* \ t_3^*]^T = [11.890 \ 10.000 \ 30.082]^T$ 로써, 중량은 1,828.5kg으로 예측되었다. 이 값을 가지고 유한요소해석을 수행한 결과 제한조건을 모두 만족시키는 결과를 얻었다.

Table 5 Kriging models for 2nd iteration

Responses	Optimum parameters				Error	
	β	θ_1	θ_2	θ_3	RMSE	MAXERR
Weight	2.043	0.070	0.005	0.090	0.0004	0.0006
Max. stress(#1)	107.7	2.770	0.013	0.986	1.516	2.670
Max. stress(#2)	157.8	3.162	0.710	0.036	2.077	4.592
Max. stress(#3)	110.0	0.440	0.926	0.001	0.151	0.238
Max. stress(#4)	120.7	7.692	0.285	0.745	2.072	4.363

본 연구에서 제시한 설계방법의 유용성을 검증하기 위해서, 최적설계 결과를 기존의 구조최적설계기법에 의한 결과와 비교하였다. 기존의 구조최적설계기법은 GENESIS(VMA, 1998)에 내장되어 있는 방법이며 이것을 Table 6에 표시하였다. 두 방법 모두 비슷한 결과를 주고 있으며, GENESIS로부터 얻은 최적해의 중량이 약간 차음을 알 수 있으나 무시할 정도이다. 이는 크리깅 방법은 원래모델을 근사모델로 대치시켜 최적화를 수행하기 때문에 어느 정도의 오차는 발생할 수밖에 없다.

Table 6 Summary of optimization results

Opt. methods	Design variables(mm)			Obj. $W^*(kg)$
	t_1^*	t_2^*	t_3^*	
Kriging(1st iteration)	13.464	10.000	30.484	1906.
Kriging(2nd iteration)	11.890	10.000	30.082	1829.
GENESIS	11.368	10.000	30.016	1805.

5. 결 론

크레인 LMTT용 셔틀카의 부품인 이동체의 구조설계를 위하여 최적설계를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 연구에서는 이동체 구조최적설계를 위하여 크리깅 기법에 기초한 근사기법을 개발, 적용한 결과 기존의 최적설계방법과 근사한 결과를 얻었다. 순차적 크리깅 모델에 의한 최적화 방법도 LMTT 이동체의 구조설계를 위한 도구가 될 수 있음을 알 수 있었다.
2. 기존의 최적설계 기법에서는 최대응력을 제한조건으로 설정하는 것이 불가능하다. 그러나 본 연구를 통해 구조성능에 대한 크리깅 근사모델을 이용하여 최적화를 수행하는 경우, 최대응력의 제한조건 고려가 가능함을 알 수 있었다.
3. 최적 해에서 하중조건 1~4의 최대응력은 안전율을 고려한 허용응력인 160MPa 이내에서 발생하고 있다. 순차적 크리깅 방법에 의한 해는 $[t_1^* \ t_2^* \ t_3^*]^T = [11.890 \ 10.000 \ 30.082]^T$ 로써, 중량은 1,828.5kg이다. 반면에 GENESIS로 최적화시킨 결과는 $[t_1^* \ t_2^* \ t_3^*]^T = [11.368 \ 10.000 \ 30.016]^T$ 로써, 중량은 1,805kg로 두 방법의 결과가 큰 차이를 보이지 않는다.
4. 다음 연구에서는 본 연구에서 제외한 변위의 변화량에 따른 구조최적설계를 시행할 예정이다. 변위의 제한값은 1/800을 고려하여 구조최적설계를 시행할 예정이다.

116-126

- [6] Sacks, J., Welch, W. J., Mitchell, T. J. and Wynn, H. P., 1989, "Design and Analysis of Computer Experiments," *Statistical Science*, Vol. 4, No. 4, pp.409-435
- [7] Lee, K. H., Yi, J. W., Park, J.S and Park, G. J., 2003, "An Optimization Algorithm Using Orthogonal Arrays in Discrete Design Space for Structure," *Finite Elements in Analysis and design*, Vol. 40, pp. 121-135

후 기

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] Min, K. A., Han, D. S., Lee, K. H and Han, G. J., 2004. 11, "Structural Optimization for LMTT-mover of a Crane", 한국항해항만학회 제28권 제2호 추계학술대회 논문집 pp. 311-316
- [2] VMA Engineering, *GENESIS User's Manual 5.0*, 1998.
- [3] Quinta, A. and Watson, L., 1998, "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, Sep. 2-4, pp. 392-440.(AIAA-98-4758)
- [4] Sherwood, G., 2004, "<http://home.att.net/~gsherwood/cover.htm>"
- [5] Lee, K. H., 2005, "Optimization of a Driver-Side Airbag Using Kriging Based Approximation Model," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.19, No. 1, pp.