

순차적 크리깅 근사모델을 이용한 LMTT 이송체의 구조최적설계

박형욱† · 한동섭* · 이권희** · 한근조***

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

Hyung Wook Park, Dong Seop Han, Kwon Hee Lee and Geun Jo Han

요 약 : LMTT(Linear Motor-based Transfer Technology)는 항만 자동화를 위한 수평 이송 시스템이며, 셔틀카(shuttle car)와 격자구조의 레일에 부착된 스테이터 모듈(stator module)로 구성된 PMLSM(Permanent Magnetic Linear Synchronous Motor)에 의해 구동된다. 본 논문에서는 LMTT시스템에서 컨테이너 운반을 담당하는 셔틀카(shuttle car)를 구성하는 부품인 이동체(mover)의 경량화를 위하여 직교배열표 및 크리깅 방법을 이용하여 최적설계를 수행한다. 설계변수로는 가로빔, 세로빔, 휠빔의 두께를 제한조건 함수로는 안전율이 고려된 응력을 넘지 않도록 설정하였다. 목적함수로는 중량을 설정하였다. 본 연구에서 제시된 방법으로 구한 최적해는 크리깅 내삽법(Kriging interpolation)으로 알려진 DACE(Design and Analysis of Computer Experiments) 모델을 엑셀(Excel)로 수식화하고 구했으며, GENESIS를 이용하여 민감도기반 최적설계로 구해진 최적해와 비교 및 검토하였다.

핵심용어 : DACE, 대리모델, 라틴 하이퍼큐브, 크리깅, 최적화

ABSTRACT : LMTT (Linear Motor-based Transfer Technology) is a horizontal transfer system for the yard automation. This system is based on PMLSM (Permanent Magnetic Linear Synchronous Motor) that consists of stator modules on the rail and shuttle car. In this research, the kriging interpolation method with sequential sampling find the optimum design of mover in LMTT. The design variables are considered as the transverse, longitudinal and wheel beam's thicknesses. The objective function is set up as weight, while the constant function are set up as the stresses generated by four loading conditions. The objective function is set up as weight. The optimum results obtained by the suggested method are compared with those by the GENESIS.

KEY WORDS : DACE(Design and Analysis of Computer Experiments), Surrogate model, Latin hypercube, Kriging, Optimization

1. 서 론

본 연구에서는 LMTT의 셔틀카 중 이동체의 경량화를 위한 구조설계 과정을 제시하였다. LMTT의 부

품인 이동체(Mover)의 구조설계를 위한 설계변수로 이동체의 가로 빔, 휠 빔, 세로 빔의 두께를 설정하였으며, 제한조건은 안전율이 고려된 강도로 설정하였다.

각 반응치를 산출하기 위해 상용유한요소 프로그램인 GENESIS(VMA, 1998)를 이용하였으며, 사용된 요소는 절점 당 6자유도를 갖는 셸(Shell)이다. 그리고 하중조건으로는 4개의 운행조건을 모두 포함시켰다(Min, 2004). 그리고 하중조건당 최대응력이 발생할 가능성이 높은 2개의 요소에서 응력을 구해 8개의 응력모델을 구성하였다. 이것을 기초로 크리깅에 의한 근사모델을 생성하여 최적설계를 수행하고자

† 동아대학교 기계공학과 대학원
E-mail : hobang00@naver.com
TEL : (051)200-6981 FAX : (051)200-7656

* 동아대학교 기계공학과 대학원

** 동아대학교 기계공학과

*** 동아대학교 기계공학과

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 최소거리를 최대화시키는 라틴 하이큐브 샘플(Latin hypercube sample)을 이용하였다.

표본점들은 실험계획에 의해 각 하중조건에 대한 중량 및 응력으로 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.

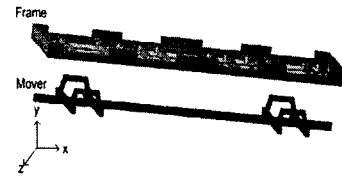
여기서 순차적 크리깅이란 초기 근사모델에서 평균제곱오차(Mean Square Error)를 최대화시키는 점들을 찾아 기존의 표본점에 추가하여 크리깅 모델을 재구성하는 것을 의미한다. 평균제곱오차의 최대점은 초기 크리깅 모델을 개선시킬 가능성이 큰 설계점이기 때문에 표본점에 추가함으로써 보다 신뢰성 있는 함수를 예측하기 위해서이다.

본 연구에서는 제시한 방법에 의한 결과를 GENESIS의 구조최적설계(Structural optimization) 결과와 비교, 검토하였다.

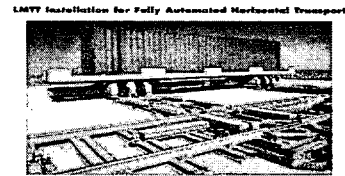
2. 유한요소해석 및 최적설계정식화

2.1 이동체 구조 및 하중조건

LMTT의 구조물중 서틀카는 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.



(a) Frame and mover



(b) Overall view of LMTT

Fig. 1 A structure of LMTT

이동체의 밑 부분은 레일에 장착된 자석의 자기력 변화에 따라 이동하는 스테이터 모듈이 설치되어 있어 이동체가 움직이게 되는 것이다.

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.

이동체는 Fig. 2와 같이 댐퍼의 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

이동체의 유한요소 모델을 Fig. 2(b)에 표시하였다.

Table 1 Points of each sample for the all kriging model

No.	D. V. (0-1)			Stress(MPa) and weight(kg)								
	x1	x2	x3	L.C#1	L.C#2	L.C#3	L.C#4	L.C#5	L.C#6	L.C#7	L.C#8	weight
1	0.1725	0.2366	0.3295	68.034	81.638	142.0271	230.9503	82.7838	48.6252	123.9127	173.9037	2.1669
2	0.017	0.5971	0.1755	90.9306	65.8829	104.6339	181.3126	149.215	37.1575	99.744	132.7032	1.9373
3	0.9155	0.8649	0.7579	32.243	42.9375	71.9579	122.7442	17.0136	24.8449	65.8827	89.6592	4.0332
4	0.2373	0.4458	0.0188	72.9082	69.9757	111.5756	197.7021	66.688	39.1295	102.1378	141.2642	1.8493
5	0.3378	0.7325	0.6205	49.3587	52.0448	86.6954	146.3839	49.9088	30.2034	80.6213	108.0882	3.0909
6	0.8211	0.1744	0.9277	32.5352	70.457	132.6366	203.0023	20.1942	44.0688	108.177	158.1106	3.8300
7	0.3192	0.2878	0.9697	43.6076	69.2094	129.0988	199.6714	53.6506	43.2616	109.7702	154.3041	3.3957
8	0.6107	0.9271	0.7039	38.8597	43.4827	72.398	123.5955	27.5288	25.1411	67.6197	90.3924	3.6371
9	0.0914	0.7976	0.3764	72.0527	54.9529	88.8579	152.4981	108.1058	31.3753	85.4963	112.004	2.4541
10	0.9911	0.3592	0.4564	35.0656	62.3029	106.0563	178.0112	15.7241	36.249	90.6623	131.0889	3.3573
11	0.7862	0.4928	0.0883	44.5339	59.4049	98.5168	175.8383	20.8879	33.7178	86.5478	122.9496	2.6034
12	0.4929	0.9989	0.4867	45.6949	43.4715	71.1738	123.6554	34.5612	24.854	67.644	89.4398	3.1919
13	0.6913	0.1322	0.2182	45.9192	81.7257	144.6897	236.9077	24.8939	48.7298	119.2814	175.9815	2.5128
14	0.442	0.654	0.8348	41.7224	52.3705	89.4991	148.0556	39.1107	30.8866	81.3011	110.5215	3.5125
15	0.5617	0.0275	0.563	43.5488	88.5839	173.2691	259.6353	31.7367	56.8286	137.9977	203.7065	2.8691
16	1	0.4434	0.96	29.5159	55.3623	96.9691	157.0578	15.4884	32.9861	83.3468	118.711	4.2281
17	0.5772	0.1496	0.593	42.4612	77.6246	142.7001	225.343	30.5414	47.7748	117.5719	171.402	3.0009
18	0.0001	0.0475	0.2179	92.8316	107.9924	202.2378	311.7716	166.4271	67.5573	171.2452	241.1579	1.6907

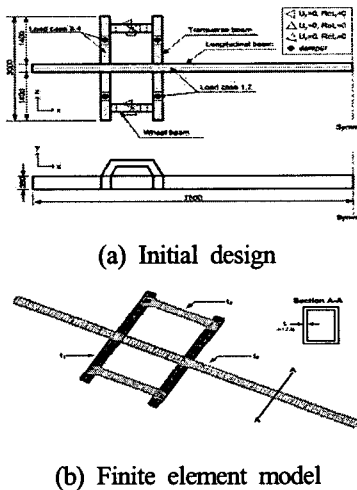


Fig. 2 A mover for shuttle car

2.2 최적설계정식화

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

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

$$\text{Subject to } \sigma_i \leq \sigma_{all} \quad i = 1, \dots, 8 \tag{2}$$

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

여기서 W 는 중량이고 $t = [t_1 \ t_2 \ t_3]^T$ 는 설계변수 벡터로써, t_1, t_2, t_3 는 각각 Fig. 2의 횡빔(Transverse Beam), 휠빔(Wheel Beam), 종빔(Longitudinal Beam)의 두께를 의미한다. 각 설계변수를 Fig. 2(b)에 표시하였다. 그리고 σ_i 는 i 번째 하중조건에 응력, σ_{all} 는 허용응력이다.

허용응력은 통상 하역장비의 구조설계 시 사용되

는 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.

표본점은 제1차 반복과정(case1-case15), 제2차 반복과정(case16), 제3차 반복과정(case17), 제4차 반복과정(case18)으로 나타냈으며, 모든 과정을 통합하여 Table 1에 표시하였다.

3. 크리깅 모델을 이용한 최적화 이론

3.1 DACE 모델

성능함수 $y(t)$ 의 근사화 모델은 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$y(t) = \beta + z(t) \tag{4}$$

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

$$\hat{y}(t) = \hat{\beta} + r^T(t)R^{-1}(y - \hat{\beta}q) \tag{5}$$

여기서 $\hat{\beta}$ 는 β 의 추정치, R^{-1} 은 상관행렬 R 의 역행

렬, \mathbf{r} 은 상관벡터, \mathbf{y} 는 n_s 개의 표본데이터 벡터이고, \mathbf{q} 는 n_s 개 성분을 갖는 단위벡터이다. 또한 β, σ^2 은 우도함수(likelihood function)로부터 최대우도추정치를 갖게 하는 조건을 이용하면 다음과 같이 구해진다.

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

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{(\mathbf{y} - \hat{\beta} \mathbf{q})^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{y} - \hat{\beta} \mathbf{q})}{n_s} \quad (7)$$

같은 방법으로 \mathbf{R} 의 파라미터인 θ 의 추정치는 다음 식으로부터 구해진다.

$$\text{maximize} \quad -\frac{[n_s \cdot \ln(\hat{\sigma}^2) + \ln|\mathbf{R}|]}{2} \quad (8)$$

여기서 $\theta_i (i=1,2,\dots,n) > 0$ 이다. 본 연구에서는 이 정식화를 해결하기 위하여 수정된 유용방향법(modified feasible direction method)을 이용하였다.

그리고 표본점이 아닌 임의의 점에서의 측정오차인 평균제곱오차는 다음과 같이 유도된다.

$$\hat{\epsilon}^2 = \sigma^2 \left[1 - \mathbf{r}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{r} + \frac{(1 - \mathbf{q} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{r})^2}{\mathbf{q}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{q}} \right] \quad (9)$$

크리깅에 대한 자세한 유도과정과 내용은 참고문헌 (7)-(8)에 수록되어 있다. 또한, 메타모델의 순차적 실험계획을 위한 표본점 추가에 대한 여러 가지 방법⁽³⁻⁵⁾들이 소개되고 있는데, 본 연구에서는 식(9)를 최대화시키는 방법을 적용하였다.

3.2 순차적 크리깅 모델을 이용한 최적화법

본 연구에서는 이동체의 구조최적설계를 위하여 다음과 같은 설계 과정을 제안하였다.

1 단계: 라틴하이퍼큐브 선택 및 실험의 배치

식 (3)으로 표시된 설계공간에 표본점을 생성한다. 표본점 생성 방법으로는 전조합실험법, 라틴 하이퍼큐브(Latin Hypercube), 직교배열표 등이 있는데 본 연구에서는 실험점간의 최소거리를 최대화시키는 라틴 하이퍼큐브를 이용하였다.

2 단계: 행렬실험의 실시

라틴 하이퍼큐브에 의해 생성된 표본점에 대하여 유한요소 해석을 실시하여 반응치인 중량, 각 하중 조건 별 응력을 산출한다.

이 때 최대응력은 본미세스(Von-Mises)응력이다.

3 단계: 크리깅 모델의 구성

2 단계에서 수행한 유한요소 해석결과를 기초로 중량 및 각 하중조건별 응력에 대한 크리깅 근사모

델을 정의한다. 이때 식 (4)에서 \mathbf{y} 는 각각 $\hat{W}, \hat{\sigma}_1, \hat{\sigma}_2, \hat{\sigma}_3, \hat{\sigma}_4, \hat{\sigma}_5, \hat{\sigma}_6, \hat{\sigma}_7, \hat{\sigma}_8$ 에 대해 전개될 수 있다. 즉, $\hat{W}, \hat{\sigma}_1, \hat{\sigma}_2, \hat{\sigma}_3, \hat{\sigma}_4, \hat{\sigma}_5, \hat{\sigma}_6, \hat{\sigma}_7, \hat{\sigma}_8$ 에 대한 식 (5)을 구성한다.

4 단계: 크리깅 모델의 검증

크리깅 모델은 표본점의 반응치를 기초로 구성된 근사모델이므로 실제 모델과는 항상 오차를 갖는다.

본 연구에서는 각 오차에 대한 허용치를 응력 반응치에 대하여 $\epsilon < 5.0(\%)$ 로 하였고 $n_t=10$ 으로 하였다.

ϵ 은 제1차 크리깅 모델에서 n_t 개의 임의의 모델에 대한 유한요소해석 값을 대입하여 구해진 임의의 모델의 실제값과 크리깅 근사모델에 대입하여 구해진 근사값과의 차이를 퍼센트(%)로 나타낸 오차이다.

5 단계: 크리깅 모델에 기초한 최적설계 수행

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

$$\text{Minimize} \quad \hat{W}(t) \quad (10)$$

$$\text{Subject to} \quad \sigma_i \leq \sigma_{all} \quad i=1,\dots,8 \quad (11)$$

$$t_L \leq t_j \leq t_U \quad (j=1,2,3) \quad (12)$$

만일 4 단계에서 기준을 만족시키지 못하면 1 단계로 올라가 2, 3, 4 단계의 과정을 반복 수행한다.

이때 5 단계에서는 기존 표본점 중에서 선택한 임의의 점들 중, 평균제곱오차의 값이 가장 큰 표본점을 선택하여 새로운 표본점으로 생성시킨다. 그리고 추가된 표본점을 기준으로 크리깅 근사모델을 만들고 순차적 크리깅을 반복 수행하였다.

이 개념을 Fig. 3에 표시하였다. 반대로 4 단계의 기준을 만족시키면 설계과정을 종료한다. 본 연구에서 제시한 전반적인 설계 흐름도를 Fig. 4에 표시하였다.

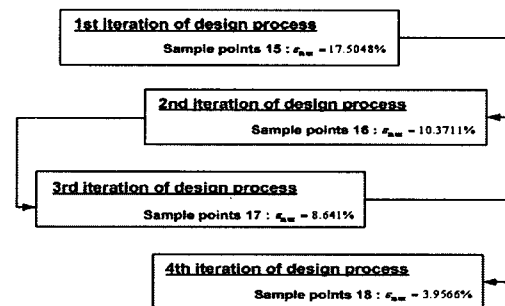


Fig. 3 Addition of sample points

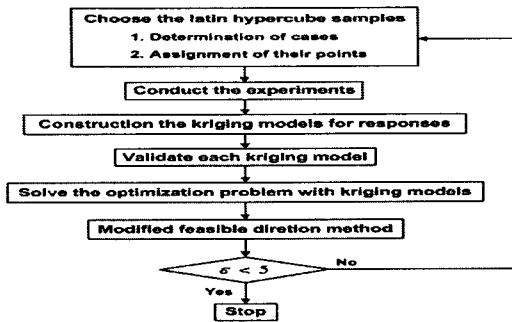


Fig. 4 Flowchart for the suggested design process

4. 최적화 결과

설계과정의 1 단계 과정은 표본점을 정의하기 위한 라틴 하이퍼큐브를 선정하는 것이다. 라틴 하이퍼큐브의 선정기준은 가능하면 유한요소 해석 횟수를 줄여서 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.

이동체의 최적설계 정식화에서 식 (2)는 각 하중조건별 응력으로 표시되고 있다.

그래서 본 연구에서는 라틴 하이퍼큐브를 이용하여 하중조건별 응력을 선형화 시키기로 하였다. 이는 설계변수에 따라 구조물의 두께가 달라지게 되므로 응력의 위치가 변하게 되고, 불연속함수가 되는 성질이 있어 비선형성이 크다고 볼 수 있기 때문이다.

설계변수 수가 3개이므로 식 (3)의 설계변수의 하한값 및 상한값 사이에서 표본점들이 서로 간섭이 일어나지 않도록 최소거리를 최대화시키는 분리거리를 두게 표본 공간을 15 등분하여 표본점을 생성시켰다.

다음 설계과정은 제1차 반복과정에서 배치한 15회의 각 실험을 기준으로하여 유한요소 해석을 수행하는 것이다. 본 연구에서는 유한요소 해석을 위하여 GENESIS(VMA, 1998)를 이용하였다.

제1회 반복과정의 중량 및 8 개의 하중조건에 대한 응력의 크리깅 모델에 대한 식 (6)의 $\hat{\beta}$ 및 식 (8)로부터 구한 $\theta_i(i=1,2,3)$, 10개의 임의 표본점에서 구한 근사모델과 실제모델과의 오차값 중 최대오차값인 ϵ_{max} 값을 Table 2에 표시하였다.

Table 2 Kriging models for 1st iteration

Responses	Optimum parameters				Max. error ϵ (%)
	β	θ_1	θ_2	θ_3	
Weight	2.3692	0.0019	0.0003	0.0006	0.0252
Sress(#1)	62.474	2.1650	0.0003	0.3348	11.3503
Sress(#2)	85.591	0.0603	0.5283	0.1875	14.9784
Sress(#3)	125.86	0.1378	3.6367	0.0008	6.9704
Sress(#4)	243.41	0.0423	0.8000	0.1808	13.9650
Sress(#5)	117.31	5.9163	0.0008	0.0001	1.9639
Sress(#6)	48.817	0.0369	0.7881	0.2464	17.5048
Sress(#7)	174.12	0.1570	0.7221	0.0003	6.5191
Sress(#8)	178.53	0.0323	0.7622	0.2220	16.6472

Table 2의 오차로부터 4단계의 기준을 만족시키지 못하므로 첫 번째 반복과정의 크리깅 모델의 정확도는 충분하지 못하다고 판단된다. 그러나 5 단계에서 이 근사모델을 가지고 식(9)의 과정을 수행하여 다음 단계의 표본점을 정하는 데 이용한다.

그렇게해서 두 번째, 세 번째, 네 번째 설계과정을 유한요소해석한 결과를 바탕으로 새로운 표본점을 추가하여 크리깅 근사모델을 구성한다.

제1 반복과정에서 크리깅 모델을 구성하여 식 (10)-(12)로 최적화를 수행한 결과 최적해는 $[t_1^* \ t_2^* \ t_3^*]^T = [10.000 \ 32.305 \ 10.000]^T$ 의 값을 얻었으며 이때 중량은 1,7933.2kg으로 예측되었다.

4 단계에서 정의한 기준을 만족하지 못했으므로 설계과정 1 단계로 다시 올라가 제2 반복과정의 표본점을 추가하여 실험을 다시 한다.

앞서 말했듯이 추가된 제2차 반복과정, 제3차 반복과정, 제4차 반복과정에서 표본점을 제1차 반복과정과 함께 Table 1에 표시하였다. 그리고 표본점을 추가한 크리깅 모델을 만들어 유한요소 해석을 반복하여 수행하며, 응력 및 중량을 산출한다.

제2차 반복과정, 제3차 반복과정에서 추가한 표본점에 대하여 유한요소해석을 실시하여 얻은 실제값과 크리깅 근사모델을 이용하여 얻은 추정값과의 오차는 $\epsilon < 5.0(\%)$ 를 만족하지 못하였기 때문에 그 과정은 생략하여 쓰고자 한다.

네 번째 반복과정에서 크리깅 모델에 대한 모수의 $\hat{\beta}$ 및 식 (8)로부터 구한 최적의 $\theta_i(i=1,2,3)$, 10개의 임의 표본점에서 구한 근사모델과 실제모델과의 오차값 중 최대오차값인 ϵ_{max} 값을 Table 3에 표시하였다. 다음으로 식 (10)-(12)로 표시되는 최적화를 수행한다.

Table 3 Kriging models for 4th iteration

Responses	Optimum parameters				Max. error ε (%)
	β	θ1	θ2	θ3	
Weight	1.5094	0.0002	0.0008	0.0024	0.1079
Sress(#1)	82.971	2.9816	0.0003	0.0671	2.8366
Sress(#2)	120.93	0.1497	1.4221	0.0307	1.7961
Sress(#3)	330.93	0.0827	0.9230	0.0235	2.4935
Sress(#4)	311.60	0.1257	1.8868	0.0619	3.9566
Sress(#5)	104.52	6.1349	0.0038	0.0001	2.1344
Sress(#6)	96.658	0.1053	1.0753	0.0208	1.3000
Sress(#7)	224.65	0.1534	1.1300	0.0283	1.6760
Sress(#8)	343.10	0.1039	1.0726	0.0252	1.4910

네 번째 반복과정에서의 오차는 Table 3에서 보듯이, 이동체 구조설계문제에서 무시할 만한 정도의 오차이고, 4 단계에서 설정한 기준을 만족시키므로 네 번째 단계에서 설계과정을 종료한다.

이 단계에서의 최적해는 $[t_1^* \ t_2^* \ t_3^*]^T = [10.000 \ 31.280 \ 10.000]^T$ 로써, 중량은 1,767.0kg으로 예측되었다. 이 값을 가지고 유한요소해석을 수행한 결과 제한조건을 모두 만족시키는 결과를 얻었다.

본 연구에서 제시한 설계방법의 유용성을 검증하기 위해서, 최적설계 결과를 기존의 구조최적설계기법에 의한 결과와 비교하였다. 기존의 구조최적설계기법은 GENESIS(VMA, 1998)에 내장되어 있는 방법이며 이 결과를 Table 4에 표시하였다.

두 방법 모두 비슷한 결과를 주고 있으며, GENESIS로부터 얻은 최적해의 중량이 약간 큼을 알 수 있으나 무시할 정도이다. 이는 크리깅 방법은 원래모델을 근사모델로 대치시켜 최적화를 수행하기 때문에 어느 정도의 오차는 발생할 수밖에 없다.

Table 4 Summary of optimization results

Opt. methods	Design variables(mm)			Obj. W*(kg)
	t ₁ *	t ₂ *	t ₃ *	
Kriging(1st iteration)	10.000	32.305	10.000	1793.
Kriging(4th iteration)	10.000	31.280	10.000	1767.
GENESIS	11.368	30.017	10.000	1805.

5. 결 론

크레인 LMTT용 서플카의 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 응력을 제한조건으로 설정하는 것이 불가능하다. 그러나 본 연구를 통해 구조성능에 대한 크리깅 근사모델을 이용하여 최적화를 수행하는 경우, 응력의 제한조건 고려가 가능함을 알 수 있었다.

3. 최적 해에서 하중조건 1-8의 응력은 안전율을 고려한 허용응력인 160MPa 이내에서 발생하고 있다. 순차적 크리깅 방법에 의한 해는 $[t_1^* \ t_2^* \ t_3^*]^T = [10.000 \ 31.280 \ 10.000]^T$ 로써, 중량은 1,767.0kg이다. 반면에 GENESIS로 최적화시킨 결과는 $[t_1^* \ t_2^* \ t_3^*]^T = [11.368 \ 30.017 \ 10.000]^T$ 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.

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", *Journal of Korean Navigation and Port Research*, Vol. 28, No. 2, pp. 311-316
- (2) VMA Engineering, *GENESIS User's Manual 5.0*, 1998.
- (3) Lee, T.H., Jung, J.J., Hwang, I.K. and Lee, C.S., 2004, "Sensitivity Approach of Sequential Sampling for Kriging Model," *Transactions of the KSME A*, Vol. 28, No. 1, pp. 1760-1767.
- (4) Jin, R., Chen, W. and Sudjianto, A., 2002, "On Sequential Sampling for Global Metamodeling in Engineering Design," *Proc. DETC'02 ASME 2002 Design Engineering Technical Conferences and Computer and Information in Engineering*

- Conferences*, (DETC2002/DAC-32092).
- (5) Leary, S.J., Bhaskar, A. and Keane, A.J., 2004, "A Derivative Based Surrogate Model for Approximating and Optimizing the Output of an Expensive Computer Simulations," *Journal of Global Optimization*, Vol. 30, pp.39-58
 - (6) Guinta, 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)
 - (7) 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
 - (8) Santner, T.J., Williams, B.J. and Notz, W.I., 2003, *The Design and Analysis of Computer Experiments*, Springer, New York.