

순차적 크리깅 근사모형을 이용한 LMTT 이동체의 구조최적설계

이권희* · 박형욱** · 한동섭** · 한근조***

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

Structural Optimization for LMTT-Mover Using Sequential Kriging Approximation Model

Kwon-Hee Lee* · Hyung-Wook Park** · Dong-Seop Han** · Geun-Jo Han***

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

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

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

요 약 : LMTT는 항만 자동화를 위한 수평 이송이 가능하도록 설계된 셔틀카와 격자구조의 레일에 부착된 스테이터 모듈(stator module)로 구성된 PMLSM(Permanent Magnetic Linear Synchronous Motor)에 의해 구동된다. 본 연구에서는 순차적 표본방법에 기초하여 구성된 크리깅 근사모형을 이용하여 이동체의 구조최적설계를 수행하였다. 본 논문에서는 셀 요소로 유한요소 모델링된 이동체(mover)의 경량화 설계를 위하여 강도기준을 고려하고, 설계변수로는 가로빔, 세로빔, 휠 빔의 두께로 설정하였다. 순차적 크리깅모델에 의하여 구해진 최적해를 상용프로그램인 GENESIS를 이용하여 구해진 최적해와 비교, 검토하였다.

핵심용어 : LMTT, 이동체, 크리깅, 순차적표본, 구조최적설계

Abstract : A 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 using sequential sampling is utilized to find the optimum design of a 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 functions are set up as the stresses generated by four loading conditions. The optimum results obtained by the suggested method are compared with those determined by the GENESIS.

Key words : LMTT, Mover, Kriging, Sequential sampling, Structural optimization

1. 서 론

항만자동화를 위한 수평 이송시스템인 LMTT의 부품 중 하나인 이동체는 이것과 레일 사이에 일정한 간격으로 설치된 모듈에 의해 구동된다. 이에 대한 효율적인 전기적 제어를 위해서는 이동체 구조의 경량화 설계가 요구된다(Lee et al., 2004b). 본 연구에서는 LMTT의 셔틀카 중 이동체의 경량화를 위하여 순차적 크리깅모델에 의한 최적설계 기법을 제시하고자 한다. 이를 위하여, 설계변수로서 이동체의 가로 빔, 휠 빔, 세로 빔의 두께로 설정하였으며, 제한조건으로써 안전율이 고려된 강도를 고려하였다.

크리깅은 표본점의 반응치를 기초로 내삽법(interpolation)에 의해 임의점에서의 반응치를 예측하는 근사기법의 하나이다. 최적설계 분야에서 자주 사용되는 근사기법인 반응표면법(response surface method)에 비해 반응치의 보다 정확한 예

측이 가능하며 특히 비선형성이 강한 함수의 예측에 적합하다고 알려져 있다 (Jin et al., 2003). 크리깅 모델을 구성하기 위해서는 해석 시간에 따라, 전조합실시법, 라틴하이퍼큐브(Latin hypercube) 또는 직교배열표(orthogonal array)등이 사용될 수 있는데 본 연구에서는 표본점 간의 최소거리를 최대화시키는 라틴하이퍼큐브 방법을 이용하였다(Lee and Park, 2005).

기존의 표본점을 가지고 정의한 크리깅 모델의 정확도가 만족스럽지 못할 경우, 한단계(one stage) 표본방법에서는 더 많은 표본점 갖고 크리깅을 재구성해야하는 단점이 있다. 그러나 순차적 실험계획을 이용하면 기존의 표본점을 버리지 않고 일부 표본점을 추가함으로써 보다 정확도 높은 크리깅 근사모형을 구할 수 있다. 순차적 실험계획에 대한 여러 가지 방법들(Jin et al., 2002; Lee et al., 2004a)이 소개되고 있는데 본 연구에서는 크리깅 근사모델의 평균제곱오차(mean square

* 대표저자 : 이권희(정회원), leekh@donga.ac.kr 051)200-7638

** 정회원, hobang00@naver.com 051)200-6981

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

*** 중신회원, gihan@daunet.donga.ac.kr 051)200-7650

error)를 최대화시키는 점을 찾아 기존의 표본점에 추가하는 방법을 선택하였다. 본 연구에서 크리깅 방법을 이용하여 최적화를 수행하는 이유는 향후 연구인 신뢰성기반 해석 및 최적설계(reliability based design optimization)를 위해서이다. 이동체 구조물에 대한 신뢰성해석 및 이를 고려한 최적화가 요구되지만 유한요소법과 직접 연계하기에는 계산시간에 대한 제약이 따른다. 따라서 강도를 고려한 최적설계에 크리깅 기법이 성공적으로 적용된다면 이에 대한 연구도 가능하게 될 것이다.

이동체의 경량화 설계를 위하여 설정된 목적함수인 중량, 제한조건함수인 응력에 대한 크리깅 근사모델을 구성한 후, 이에 대한 최적화 알고리즘을 적용하였다. 이때 응력은 모든 요소에 대하여 크리깅 근사모델을 구성하는 것은 불가능하므로 각 하중조건에서 최대응력이 주로 나타나는 2 개의 요소를 선정하여 크리깅 근사모델을 구성하였다. 따라서 응력에 대한 크리깅 근사모델의 개수는 하중조건수×2이다. 크리깅 및 최적화의 모든 과정은 MSOFFICE/EXCEL을 이용하였다.

각 표본점에 대하여 중량, 응력, 변위 등의 반응치를 산출하기 위해 상용유한요소 프로그램인 GENESIS(VMA, 1998)를 이용하였다. 유한요소 모델은 절점 당 6자유도를 갖는 셸(shell)로 구성하였으며 하중조건으로는 4개의 운행조건을 모두 포함시켰다(Lee et al., 2004b). 본 연구에서는 제시한 방법에 의한 최적설계 결과를 GENESIS의 구조최적설계(structural optimization) 결과와 비교, 검토하였다.

2. 유한요소해석 및 최적설계정식화

2.1 이동체 구조 및 하중조건

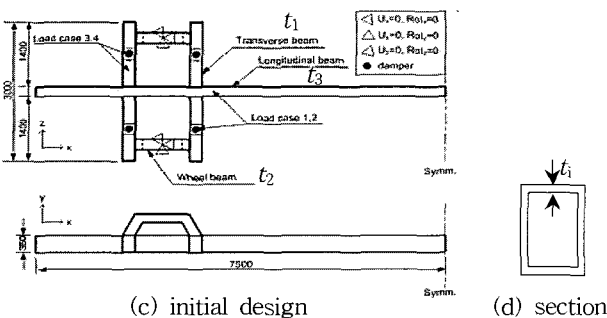
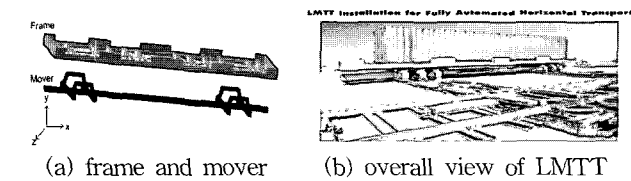


Fig. 1 A structure of LMTT

LMTT의 구조물중 서틀카는 Fig. 1(a)과 같이 크게 프레임과 이동체로 구성되어 있다. Fig. 1(a)의 아래 그림은 이동체의 유한요소 모델을 표시하고 있다. LMTT의 전체적인 구조

는 Fig. 1(b)와 같이 프레임이 이동체 위에 고정되고 프레임 위에 컨테이너가 놓여진다. 그러므로 이동체는 프레임과 컨테이너의 하중을 동시에 받는다. Fig. 1(c)는 초기설계에서의 각 부분의 치수를 표시하고 있으며 Fig. 1(d)는 이동체의 단면 형상을 표시하고 있다. 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 (Lee et al., 2004b)에 있는 값들을 이용하였다.

이동체는 Fig. 1(c)와 같이 댐퍼의 4부분에서 프레임과 컨테이너의 무게 50ton을 받고 있다. 동시에 신속한 제어를 위해서 정지나 이동시에 가로빔(longitudinal beam)과 세로빔(transverse beam)의 밑 부분에 부착된 자석과 레일에 부착된 자석에 의해서 자기력으로 이동 방향에 따라 가로 빔과 세로빔의 밑 부분에 30ton의 힘이 들어 올려지거나 잡아당겨 진다. 최적화과정 중에 고려된 각각의 하중별 조건은 다음과 같다.

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

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

하중조건 3. 프레임과 컨테이너가 위에서 누르는 무게 50ton+세로빔 방향으로 움직일 때 세로빔에 작용하는 부상력 30ton

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

경계조건으로는 Fig. 1(c)에 표시한 것과 같이 댐퍼가 장착되는 부분의 자유도를 모두 고정시켰고 하중은 가로빔 또는 세로빔 밑면에 분포하중으로 작용시켰다.

2.2 최적설계정식화

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

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize } W(t_1, t_2, t_3) \\
 & \text{Subject to } \sigma_i \leq \sigma_{all}, \quad (i=1, \dots, n_e) \\
 & \delta_j \leq \delta_{all} \\
 & t_L \leq t_1, t_2, t_3 \leq t_U
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 W 는 중량이고 t_1, t_2, t_3 는 각각 Fig. 1의 세로빔, 휠빔, 가로빔의 두께를 의미한다. 각 설계변수를 Fig. 1(c)에 표시하였다. 그리고 σ_i 는 i 번째 요소의 응력을, δ_j 는 모든 하중조건에서 최대처짐이 발생하는 가로빔의 중앙부의 절점을 표시하고, n_e 는 요소수, σ_{all} 및 δ_{all} 는 각각 허용응력 및 허용변위이다. 허용응력은 통상 하역장비의 구조설계 시 사용되는 안전계수인 1.5를 고려하여 160MPa로 설정하였다. 반면에 최대허

용변위는 구조물의 각 빔의 전체길이에 대하여 1/800이하가 되도록 규정하고 있으므로 이것을 고려하면 가로빔의 경우 9.75mm가 된다. 그리고 t_b, t_o 는 설계변수의 하한값, 상한값으로써 각각 5mm, 30mm로 설정하였다.

최대응력은 설계변수에 대하여 연속함수가 아니므로 최대응력에 대한 근사모델은 부정확하다. 그런데 식 (1)에서 요소수만큼의 크리깅 근사모델을 구성하는 것은 불가능하므로 본 연구에서는 각 하중조건에서 최대응력이 발생하기 쉬운 요소 2개씩을 선택하여 크리깅 모델을 구성하였다. 최대응력은 주로 월빔에서 경계조건을 부여한 부분과 세로빔의 중앙부위에서 나타나고 있다. 그리고 강성에 대한 조건은 설계변수의 범위내에서 충분히 만족되므로 크리깅 근사모델을 구성하지 않았다. 따라서 기존의 최적화 과정을 위한 정식화인 식 (1)에서 제한조건은 8개로 축소된다.

3. 크리깅 모델을 이용한 최적화 이론

3.1 크리깅 모델

반응함수 $f(\mathbf{t})$ 의 근사화 모델은 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$f(\mathbf{t}) = \beta + z(\mathbf{t}) \quad (2)$$

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

$$\hat{f}(\mathbf{t}) = \hat{\beta} + \mathbf{r}^T(\mathbf{t})\mathbf{R}^{-1}(\mathbf{f} - \hat{\beta}\mathbf{q}) \quad (3)$$

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

$$R(\mathbf{t}^j, \mathbf{t}^k) = \text{Exp} \left[-\sum_{i=1}^n \theta_i |t_i^j - t_i^k|^2 \right], \quad (j=1, n_s, k=1, n_s) \quad (4)$$

또한 β, σ^2 은 우도함수(likelihood function)로부터 최대우도 추정치를 갖게 하는 조건을 이용하면 다음과 같이 구해진다.

$$\hat{\beta} = (\mathbf{q}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{q})^{-1} \mathbf{q}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{f} \quad (5)$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{(\mathbf{f} - \hat{\beta}\mathbf{q})^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{f} - \hat{\beta}\mathbf{q})}{n_s} \quad (6)$$

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

$$\text{maximize} \quad -\frac{[n_s \cdot \ln(\hat{\sigma}^2) + \ln|\mathbf{R}|]}{2} \quad (7)$$

여기서 $\theta_i (i=1, 2, \dots, n) > 0$ 이다. 그리고 표본점이 아닌 임의 점에서의 측정오차인 평균제곱오차는 다음과 같이 유도된다.

$$s^2 = \hat{\sigma}^2 \left[1 - \mathbf{r}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{r} + \frac{[(1 - \mathbf{1}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{r})^2]}{\mathbf{1}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{1}} \right] \quad (8)$$

크리깅에 대한 자세한 유도과정과 내용은 참고문헌(Sacks, 1989; Guinta, 1998; Santner, 2003; Lee, 2005)에 자세히 수록되어 있다. 또한, 메타모델의 순차적 실험계획을 위한 표본점 추가에 대한 여러 가지 방법들(Jin et al., 2002, Lee et al., 2004a)이 소개되고 있는데, 본 연구에서는 식 (10)를 최대화시키는 방법을 적용하였다.

3.2 순차적 크리깅 모델을 이용한 최적화

본 연구에서는 이동체의 구조최적설계를 위하여 다음과 같은 설계 과정을 제안하였다.

1 단계 : 표본점 선택 및 실험의 배치

표본점 생성 방법으로는 해석시간에 따라 전조합실험법, 라틴하이퍼큐브(latin hypercube), 직교배열표(orthogonal array) 등에서 적절한 방법을 선택해야 한다. 본 연구에서는 실험점간의 최소거리를 최대화시키는 라틴 하이퍼큐브 표본방법(Leary et al., 2004)을 이용하였다. 이것을 수식화하면 다음과 같이 표시된다.

$$\text{Minimize} \quad \sum_{i=1}^{n_s} \sum_{j=i+1}^{n_s} \frac{1}{d_{ij}} \quad (9)$$

d_{ij} 는 i, j 표본점 사이의 거리를 의미한다.

2 단계 : 행렬실험의 실시

1 단계에서 라틴 하이퍼큐브에 의해 생성된 표본점의 조합에 대하여 유한요소 해석을 실시하여 반응치인 중량, 각 하중조건 별 응력을 산출한다. 이 때 검토되는 응력은 본미세스(von-mises)응력이다.

3 단계: 크리깅 모델의 구성

2 단계에서 수행한 유한요소 해석결과를 기초로 중량 및 각 하중조건별 응력에 대한 크리깅 근사모델을 정의한다. 이때 식 (3)에서 $\hat{f}(\mathbf{t})$ 는 각각 $\hat{W}, \hat{\sigma}_i (i=1, \dots, 8)$ 에 대해 전개된다. 즉, 중량 W 와 각 하중조건 별 요소응력 2개씩에 대한 총 9개의 크리깅 근사모델을 식 (7)에 대하여 Θ 의 추정치를 구함으로써 각각 구성한다. 식 (7)에서 Θ 의 추정치를 구하기 위해서는 최적화 알고리즘을 적용해야 한다.

Table 1 Design of experiments using latin hypercube design (LHD)

No.	design variables			responses(stress(MPa) and weight(kg))								
	t_1	t_2	t_3	loading condition #1		loading condition #2		loading condition #3		loading condition #4		weight
				stress #1	stress #2	stress #3	stress #4	stress #5	stress #6	stress #7	stress #8	
1	29.79	17.72	29.81	21.08	61.92	112.78	174.68	38.07	36.77	21.30	135.95	3,947.4
2	8.19	27.82	18.87	237.34	59.53	99.15	164.03	35.00	35.02	234.11	123.20	2,334.7
3	15.58	8.65	9.31	72.48	116.76	225.55	342.28	74.33	72.55	72.63	265.92	1,608.1
4	13.52	16.52	21.39	91.81	77.15	140.38	218.08	47.70	47.18	91.51	168.96	2,530.1
5	23.26	26.46	28.19	32.71	50.70	86.75	141.17	30.05	29.28	32.42	106.96	3,701.9
6	19.45	5.77	5.47	48.82	141.74	301.20	448.37	95.52	92.17	48.66	344.27	1,463.7
7	12.64	9.59	22.66	106.61	103.45	222.61	310.84	71.47	70.83	107.13	253.54	2,427
8	5.14	13.86	14.07	598.73	99.80	184.05	285.13	62.56	62.78	592.20	220.10	1,544.6
9	21.91	10.84	27.13	37.67	84.82	175.36	250.03	56.86	55.51	38.29	202.36	3,224.1
10	11.04	23.11	16.12	133.50	66.78	109.89	182.94	38.79	38.57	131.87	137.20	2,178.9
11	16.36	15.38	25.02	64.28	76.02	143.11	217.17	48.00	47.23	64.47	170.28	2,901.3
12	20.75	12.11	15.52	41.84	87.92	161.83	251.01	54.31	52.68	42.04	194.05	2,374.2
13	26.74	7.53	12.61	26.50	107.90	222.89	324.06	71.75	69.20	26.95	257.30	2,364.1
14	18.48	24.47	7.31	51.40	61.97	96.97	175.66	34.20	33.22	49.46	123.62	1,950
15	7.30	21.29	8.56	298.96	78.62	121.23	210.35	43.82	43.79	294.76	155.08	1,421.9
16	9.81	29.65	24.13	166.76	54.32	92.74	151.19	32.49	32.47	164.51	114.41	2,824.8
17	27.66	21.84	11.14	24.78	60.90	98.76	173.69	34.34	32.86	23.84	124.17	2,609.8
18	25.40	19.25	19.22	28.36	64.02	108.69	178.53	37.53	36.22	28.20	134.31	3,017.6
19	30.0	30.0	5.0	22.49	47.52	82.99	155.47	27.40	26.15	19.49	101.78	2,469.5
20	30.0	5.0	30.0	21.35	111.84	300.25	367.33	90.17	88.64	22.24	321.21	3,696.8

4 단계: 크리깅 모델의 검증

크리깅 모델은 표본점의 반응치를 기초로 구성된 근사모델이므로 실제 모델과는 항상 오차를 갖는다. 이러한 근사모델을 검증하기 위한 몇가지 지수들이 소개되고 있는데 본 연구에서는 다음의 지수를 이용하였다.

$$Ave. error = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\hat{f}_i - f_i}{f_i} \right| \times 100 \quad (10)$$

$$MAX = MAX \left[\left| \frac{f_i - \hat{f}_i}{f_i} \right| \times 100 \right], \quad i = 1, 2, \dots, n_i \quad (11)$$

여기서 n_i 는 실험점의 수이다.

5 단계 : 순차적 실험계획(sequential sampling)의 적용

크리깅 근사모델의 정확도가 만족스럽지 못할 때, 순차적 실험계획을 이용하여 표본점을 추가한다. 본 연구에서는 다음의 방법으로 한 개의 표본점을 추가한다.

$$Maximize \hat{s}^2 = \hat{\sigma}^2 \left[1 - \mathbf{r}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{r} + \frac{[(1 - \mathbf{1}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{r})^2]}{\mathbf{1}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{1}} \right] \quad (12)$$

$$t_L \leq t_1, t_2, t_3 \leq t_U$$

그 다음, 다시 3 단계로 올라가 각 반응치에 대한 크리깅 근사모델을 재구성한 후, 4 단계에서 재구성한 크리깅 근사모델에 대한 타당성을 검토한다. 이 과정을 기준치가 만족될 때까지 반복한다.

6 단계 : 크리깅 모델에 기초한 최적설계 수행

5 단계에서 확정된 크리깅 근사모델을 가지고 최적화를 수

행한다. 즉, 일반최적설계의 정식화인 식 (1)을 크리깅 근사모델을 이용하여 다음과 같이 수정할 수 있다.

$$\begin{aligned} & Minimize \hat{W}(t_1, t_2, t_3) \\ & Subject to \hat{\sigma}_i \leq \sigma_{all}, \quad (i = 1, \dots, 8) \\ & t_L \leq t_1, t_2, t_3 \leq t_U \end{aligned} \quad (13)$$

식 (13), 식 (7), 식 (12)의 정식화를 해결하기 위해 EXCEL에 내장되어 있는 GRG(generalized reduced gradient) 알고리즘이 적용된다.

지금까지 설명한 설계과정을 Fig. 2에 표시하였다.

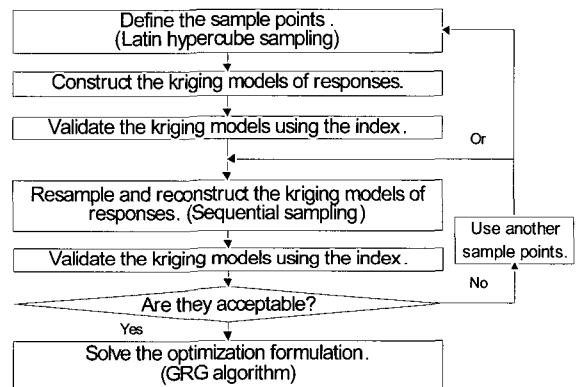


Fig. 2 Suggested design procedures

4. 최적화 결과

설계과정의 1 단계는 라틴하이퍼큐브 표본방법에 의하여 표본점을 선정하는 것이다. 라틴 하이퍼큐브 표본법은 실험횟수를 원하는 대로 결정할 수 있지만 가능하면 유한요소 해석

횡수를 줄여서 반응치를 정확히 예측해 낼 수 있도록 효율적으로 실험횡수를 선택해야 한다. 함수의 비선형성에 따라 선택되어야 하는 표본점 수가 달라질 수 있으므로, 초기 실험점수에 대한 명확한 제한은 없다. 그런데 참고문헌(Jin et al., 2002)에 의하면 설계변수의 수 n 이 6보다 작은 경우에는 초기 실험점의 수는 $4n$, 그리고 최대표본점 수는 $12n$ 으로 제안하고 있다. 본 연구에서는 초기실험점 수를 18로 결정하여 표본점을 산출하였다. 즉, 설계변수의 수가 3 개이므로 식 (9)를 이용하여, 설계변수의 하한값 및 상한값 사이에서 표본점들의 최소거리를 최대화시키도록 하여 설계공간안에 18개의 표본점을 정의한 것이다. 이것을 Table 1의 1~18번째 실험으로써 표시한 것이다.

다음 2 번째 단계는 Table 1의 1~18번의 각각의 실험에 대하여 유한요소해석을 수행하는 것이다. 이 단계에서 총 18회의 유한요소 해석을 필요로 한다. 본 연구에서는 유한요소 해석을 위하여 GENESIS(VMA, 1998)를 이용하였다. Table 1에 각 하중조건 별 2개의 요소에 대한 응력과 중량을 표시하였다.

세 번째 단계는 18회의 유한요소해석 결과로부터 산출된 중량 및 응력의 반응치에 대하여 각각의 크리깅 모델을 구성하는 것이다. 각 반응치에 대하여 식 (7)의 정식화를 해결하여 구한 θ 의 추정치를 Table 2에 표시하였다. 그리고 9 개의 각 크리깅 모델에 대하여 식 (10), (11)의 오차지수를 산출하였다. Table 2에서 식 (10)의 평균오차는 0.06~2.18%, 최대오차는 3.97~10.40%의 값을 보이고 있는데, 평균오차는 비교적 작은 반면에 stress #4에서는 국부오차인 최대오차가 가장 크게 나타나고 있다. 크리깅 모델에서 국부적으로 큰 오차가 발생할 수 있는데 보다 신뢰성 있는 모델을 위해서는 표본점을 추가하여 크리깅 모델을 재구성하는 것이 바람직하다.

Table 2 Kriging models for 1st stage

responses	optimum parameters				MAX	Ave. error
	β	θ_1	θ_2	θ_3		
weight	2.2413	0.0001	0.0002	0.0003	6.8274	2.1847
stress #1	503.286	9.2526	0.0001	0.0002	5.7537	0.5429
stress #2	198.842	0.0277	2.3939	0.0229	3.9687	0.2527
stress #3	264.608	0.0813	6.6562	0.0147	9.7469	0.0626
stress #4	426.584	0.0772	4.3983	0.0051	10.3996	0.3341
stress #5	106.76	0.0688	4.0019	0.0014	6.6772	0.2359
stress #6	98.295	0.0942	4.0449	0.0022	6.0830	0.3165
stress #7	491.852	9.5364	0.0001	0.0002	5.8667	1.4747
stress #8	368.686	0.0714	4.1201	0.0012	7.3487	0.1811

Table 3 Kriging models for 3rd stage

responses	optimum parameters				MAX	Ave. error
	β	θ_1	θ_2	θ_3		
weight	5.322	0.0007	0.0001	0.0356	0.1088	0.0340
stress #1	564.217	8.6545	0.0001	0.0001	5.2498	0.3015
stress #2	186.832	0.0329	2.4357	0.0245	2.2126	0.0635
stress #3	225.749	0.1262	7.7442	0.0236	6.6937	0.3091
stress #4	362.616	0.0980	5.8117	0.0236	6.0856	0.6176
stress #5	91.963	0.1076	4.1269	0.0028	5.5652	0.2948
stress #6	97.890	0.1062	3.6978	0.0024	5.1555	0.3760
stress #7	534.459	9.1147	0.0001	0.0001	5.2000	0.9199
stress #8	330.033	0.1050	4.0331	0.0025	6.1879	0.2491

Table 4 Summary of optimization results

optimization method	design variables(mm)			obj.
	t_1^*	t_2^*	t_3^*	$W'(kg)$
kriging(1st iteration)	10.000	29.303	13.661	2,030.0
kriging(3rd iteration)	19.542	29.704	6.5474	2,060.2
GENESIS	11.277	29.591	7.2902	1,705.4

Table 5 Maximum displacements and stress at optimum

L.C.	kriging		GENESIS	
	$\delta_{max}(mm)$	$\sigma_{max}(MPa)$	$\delta_{max}(mm)$	$\sigma_{max}(MPa)$
1	7.71	142.64	7.40	134.66
2	8.91	160.00	8.48	160.00
3	0.26	44.88	0.59	103.08
4	1.19	106.48	1.14	140.42

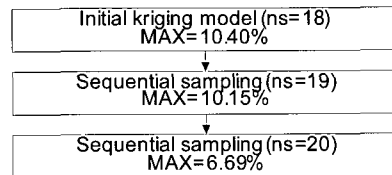


Fig. 3 Sequential sampling

다섯 번째 단계로써 식 (12)를 이용하여 추가될 표본점을 선택하였다. 이 때 반응치는 9 개이므로, 식 (12)를 적용하기 위해서는 하나의 반응치를 선택하여야 한다. 이것을 위해 중량의 반응치를 선정하였다. 이 과정을 Fig. 3에 표시하였다. 18 개의 표본점으로부터 한 개의 표본점을 추가한 후, 9 개의 반응치에 대하여 각각의 크리깅 모델을 재구성하였다. 그 결과 초기 크리깅 모델에 비해 정확도는 크게 향상되지 않아 다시 한 개의 표본점을 식 (12)를 적용하여 추가시켰다. 그 결과 최대오차는 6.69%로 감소하였고 평균오차도 전반적으로 감소하는 결과를 보이고 있다. Table 3은 초기 18개의 표본점에 2 개의 표본점을 추가한 후 결정된 9 개의 크리깅 근사모델 및 각각의 최대오차 및 평균오차를 표시하고 있다. 본 연구에서는 순차적실험계획의 종료조건을 Ave. error=1.0%로 하였다.

다음 단계는 앞에서 구해진 크리깅 근사모델을 가지고 최적화를 수행하는 것이다. 즉 식 (13)을 GRG 알고리즘을 이용하여 최적화를 수행한 결과, $t^*=[19.542mm \ 29.704mm \ 6.547mm]^T$ 가 산출되었으며 이 값에서의 크리깅 근사모델을 이용한 중량 및 최대응력의 2,062.2 kg 및 160 MPa이다. 산출된 최적해의 값을 갖고 유한요소 해석을 수행한 결과 응력제한조건을 만족하였으며 실제 중량은 2,050.5 kg으로 산출되었다.

Table 4는 본 연구에서 제시한 방법에 의한 최적해와 상용 프로그램인 GENESIS(VMA, 1998)에 의해 산출된 최적해를 비교한 것이다. 이때 GENESIS를 이용한 경우, 식 (1)을 적용하여 최적해가 산출되었다. 그 결과 t_2, t_3 의 해는 비슷하나 t_1 의 값이 크리깅에 의한 최적해가 크게 나타나고 있어 이에 따

른 중량도 증가하는 결과를 보이고 있다. 이것은 크리깅에 의한 방법은 표본점의 반응치를 기초로 해서 근사모델을 구성한 후 최적해를 산출하기 때문에 이론적으로 정확한 최적해를 산출하는데는 한계가 있음을 보여준다. 이 오차는 표본방법, 표본점의 수, 설계변수의 범위, 함수의 비선형성에 의존한다. 그러나 본 연구에서 순차적 실험계획의 종료조건을 Ave. error=1.0%으로 설정하였으므로 안전계수 등을 고려하면 적절한 기준이다.

Table 5는 크리깅 방법과 기존의 구조최적화 방법에 의해 구해진 최적해에서의 하중조건별 최대변위 및 최대응력을 표시한 것이다. 하중조건 1과 2의 경우, 크리깅 및 GENESIS에 의한 최적해에서 비슷한 최대변위 및 최대응력이 발생하고 있다. 반면에 하중조건 3과 4에서는 두 방법에 의한 해가 비교적 큰 차이를 보이고 있다. 그 이유는 하중조건 1, 2에서는 세로빔에 작용하는 하중이 크지 않는 반면, 하중조건 3, 4에서는 세로빔에 작용하는 휨좌력 및 부상력이 존재하기 때문이다. 세로빔의 최적두께 t_1 이 크리깅에 의한 값이 GENESIS에 의한 값보다 상대적으로 크기 때문에 하중조건 3, 4에서 변위 및 응력이 작게 나타나고 있다.

5. 결 론

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

(1) 본 연구에서는 이동체 구조최적설계를 위하여 크리깅 기법에 기초한 근사기법을 개발, 적용하였다. 기존의 구조최적설계 방법은 민감도기반최적설계 알고리즘과 민감도해석 등의 고려로 인해 크리깅 근사모델에 의한 방법과 비교할 때, 보다 우수한 해를 산출하고 있다. 반면에 순차적 크리깅 모델에 의한 최적화 방법 역시, LMTT 이동체의 구조설계를 위한 도구가 될 수 있음을 알 수 있었다.

(2) 제시한 방법을 이용해 구해진 최적해에서, 하중조건 1-4에서의 최대응력은 안전율을 고려한 허용응력인 160MPa 이하로 발생하였으며, 변위는 제한값인 스펠길이의 1/800이내에서 발생하였다.

(3) 본 연구에서 제시한 방법은 LMTT 이동체의 신뢰성기반해석 및 최적설계의 적용을 위한 기초연구이다. 신뢰성해석에서 신뢰성지수는 다음의 정식화로부터 구해진다.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } d \\ & \text{Subject to } g_L(\mathbf{x}) = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

여기서 d 는 원점에서 MPP(most probable point)점까지의 거리이며, $g_L(\mathbf{x})$ 는 한계상태방정식(limit state equation)이다. 또한 식 (14)로부터 구해진 신뢰도지수를 최대화 시키는 설계를 고려할 경우, 이의 계산을 위해 유한요소해석과 연계된다면 신뢰도 지수가 한계상태방정식의 민감도로 표시가 되기 때문에 이의 정보를 구하는 것이 어렵다. 또한 민감도기반 최적

화 알고리즘을 적용하면, 이계미분정보가 필요하게 되어 최적설계가 불가능할 수도 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 크리깅 근사모델을 이용하면 이에 대한 민감도가 명시적으로 구해지므로 신뢰성기반 최적설계가 가능하게 될 것이다.

(4) 보다 적극적인 경량화 설계를 위해서는 단면의 형상도 설계변수로 설정하여 최적설계를 수행하는 것이 필요하다. 그러나 이 경우에는 프레임, 휠등의 다른 부품과의 간섭여부에 대한 제약을 필요로 한다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] Guinta, A. and Watson, L.(1998), "A Comparison of Approximation Modeling Techniques: Polynomial Versus Interpolating Models," *Proc. of the 7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multi-disciplinary Analysis and Optimization*, St. Louis, Mo, AIAA, Vol. 2., (AIAA-98-4758).
- [2] 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).
- [3] Jin, R., Du, X. and Chen, W.(2003), "The Use of Metamodeling Techniques for Optimization under Uncertainty," *Structural Multidisciplinary Optimization*, Vol. 25, No. 2, pp. 99-116.
- [4] 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.
- [5] Lee, K. H.(2005), "Optimization of a Driver-Side Aribag Using Kriging Based Approximation Model," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 19, No. 1, pp. 116-126.
- [6] Lee, K. H. and Park, G. J.(2005), "A Global Robust Optimization Using the Kriging Based Approximation Model," *Transactions of the KSME A(in Korean)*, Vol. 29, No. 9, pp. 1243-1252.
- [7] Lee, T. H., Jung, J. J., Hwang, I. K. and Lee, C. S., (2004a), "Sensitivity Approach of Sequential Sampling for Kriging Model," *Transactions of the KSME A(in*

- Korean*), Vol. 28, No. 1, pp. 1760-1767.
- [8] Lee, K. H., Min, K. A., Park, H. W., Han, D. S. and Han, G. J.(2004b), "Structural Optimization for LMTT-mover of a Crane", *Journal of Korean Navigation and Port Research(in Korean)*, Vol. 28, No. 2, pp. 311-316.
- [9] 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.
- [10] Santner, T. J., Williams, B. J. and Notz, W. I.(2003), "*The Design and Analysis of Computer Experiments*", Springer, New York.
- [11] VMA Engineering(1998), GENESIS User's Manual 5.0.

원고접수일 : 2006년 1월 19일
원고채택일 : 2006년 2월 23일