

식스 시그마 기반 LCD이송장치의 Gripper부 강건설계에 관한 연구

정원지*, 정동원⁺, 김상부⁺⁺, 윤영민⁺⁺⁺
(논문접수일 2006. 5. 15, 심사완료일 2006. 7. 10)

A Study on Six Sigma Robust Design of Gripper Part for LCD Transfer System

W. J. Chung*, D. W. Jung⁺, S. B. Kim⁺⁺, Y. M. Yoon⁺⁺⁺

Abstract

This paper presents the robust design of gripper part for a high-speed LCD(Liquid Crystal Display) transfer system. In this paper, the 1st DOE(Design of Experiment) is conducted to find out main-effect factors for the design of gripper part. Thirty-six analysis are performed using ANSYS[®] and their results are statistically analyzed using MINITAB[®], which shows that the factors, i.e., First-width, Second-width, Rec-width, and thickness of gripper part, are more important than other factors. The main effect plots shows that the maximum deflection and mass of gripper part are minimized by increasing First-width, Second-width, Rec-width and thickness. The 2nd DOE is conducted to obtain RSM(Response Surface Method) equation. The CCD(Central Composite Design) technique with four factors is used. Optimum design is conducted using the RSM equation. Genetic algorithm is used for optimal design. Six sigma robust design is conducted to find out a guideline for control range of design parameter. To obtain six sigma level quality, the standard deviations of design parameters are shown to be controlled within 5% of average design value.

Key Words : Six Sigma Robust design(식스시그마 강건설계), DOE(실험계획), RSM(반응표면법), Gripper part(그립퍼 부), ANSYS[®], iSIGHT[®], LCD Transfer System(LCD 이송장치), Genetic Algorithms(유전자 알고리즘)

1. 서론

메모리 산업에 이어 LCD는 우리나라 산업의 매우 중요한

부분이 되었다. LCD 산업의 경쟁이 치열해 짐에 따라 열 LCD 원판 유리의 크기는 점점 대형화 되어가고 있다. 하지만 원판의 크기가 클수록 취급이 어렵다. 취급이 가능하게

* 창원대학교 기계설계공학과 (wjchung@sarim.changwon.ac.kr)

주소: 641-773 경남 창원시 사림동 9번지

+ 창원대 기계설계공학과 대학원

++ 창원대 산업시스템공학과

+++ (주) 신성 ENG

되면 하나의 원판에서 많은 LCD를 생산할 수 있어서 생산성을 향상시킬 수 있는 중요한 장점을 가진다. 이처럼 LCD원판이 커짐에 따라 이송장치의 그립퍼부도 대형화 되었다⁽¹⁾. 이러한 그립퍼부에 요구되는 주요한 특징은 경량화와 처짐이 적어야 한다는 것이다. 이것은 생산성 향상과 관계가 있다. 그립퍼부의 경량화로 인해 이송장치에 소모되는 에너지를 절약할 수 있으며 처짐이 적을수록 한 카세트에 장착할 수 있는 원판의 숫자가 증가한다. 따라서 그립퍼부분이 경량화 되면서 강성이 클수록 생산성이 증가하게 되는 것이다. 경량화 되면서 동시에 강성이 높은 LCD 이송장치의 그립퍼부를 설계하기 위해서는 많은 설계변수가 필요하다. 설계변수는 크게 탄성계수, 인장강도 등의 재료변수와 단면형상등의 설계변수로 나눌 수 있는데, 여기서는 재료변수는 일정하다고 가정하고 형상의 설계변수만을 고려하였다. 신뢰도가 높은 그립퍼부를 제작하기 위해서는 설계변수 중 주요한 설계변수가 어떤 값을 가지고 어떻게 관리 되어야 하는지 파악하는 것이 중요하다. 단순히 강성이 높은 그립퍼부를 제작한다면 크고 두껍게 제작하면 되지만 실제 제작에 있어서는 치수 안전성이나 용량에 대한 안전성 등으로 무조건 크고 두껍게 제작하는 것이 타당하지 않다.

본 연구에서는 실험계획법(Design of Experiments, DOE)을 이용하여 LCD이송장치의 그립퍼부 설계에서 주요한 변수를 도출해 내고, 반응 표면법(Response Surface Method, RSM)과 유전자 알고리즘을 사용하여 그립퍼부의 처짐을 최소화 하고 동시에 경량화 할 수 있는 설계변수를 도출하였다. 또한 식스 시그마 강건설계(Six sigma Robust Design)를 이용하여 설계 값이 어느 정도로 관리 되어야 식스 시그마 수준을 달성 할 수 있는지 산출하였다.

2. LCD 이송장치 및 그립퍼 부

2.1 LCD 이송장치 및 그립퍼 부 형상

Fig. 1은 실제 LCD 이송장치와 해석에 사용될 형상과 특성이 반영된 간략화 모델을 나타내고 있다. 이송장치는 약

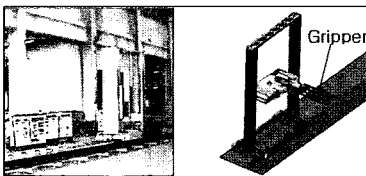


Fig. 1 Real LCD Transfer Crane and its simplified model

4m 높이의 2개의 column 과 dual arm 입·출 로봇을 탑재하고 있다. 여기서 그립퍼부는 입·출 로봇의 arm 끝단에 연결되어 있다. Fig. 2는 그립퍼부의 개략도이다. 형상은 직사각형 형태이며 경량화를 위한 사각형 홀이 있다.

2.2 재료의 물성 및 형상 설계변수

그립퍼부의 제작을 위해 사용될 재질은 알루미늄이며 이 재질이 가지는 탄성계수 및 인장강도, Poisson's rate등의 재료변수는 일정하다고 가정 하였다. 재질이 가지는 재료물성에 관한 값은 Table 1에 나타내었다.

해석 수행 시 Table 1에 나타난 재료물성들은 모두 고정값으로 두었으며 형상변수는 Fig. 2에서 보이는 것과 같이 first-width, second-width, rec-width, middle-width, sup-width, thickness, sup-thickness의 7개의 형상변수로 하여 실험계획을 수행하였다. 각 형상변수의 초기치는 Table 2와 같다.

Table 1 Typical material property of steel

Material property	Value
Mass density(kg/m ³)	2770
Elastic Modulus(Pa)	71e+09
Yield stress(Pa)	2.5e+08
Poisson's ratio	0.33

Table 2 Initial value of geometry parameter

Geometry parameter	Value
First-width(mm)	30
Second-width(mm)	30
Rec-width(mm)	170
Sup-width(mm)	35
Middle-width(mm)	35
Thickness(mm)	55
Sup-thickness(mm)	5

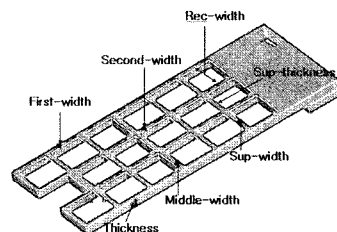


Fig. 2 Schematic diagram of gripper part

3. 실험계획 및 최적설계

3.1 유한요소해석(Finite Element Analysis)

유한요소해석은 상용 FEM 해석 도구인 ANSYS 8.0[®]을 사용하였다. 사용한 요소는 solid 186이다. 이는 20개의 절점을 가지며, 각 절점의 자유도는 6이다. Fig. 3을 통해서 경계조건으로 그림퍼의 한쪽 끝단을 완전히 고정 하였으며, 하중조건은 그림퍼부 전체가 카세트의 하중을 균일하게 받는다 고 가정하였다.

3.2 실험계획

실험계획법(Design of Experiments, DOE)은 통계적 분석 기법으로 최근기업의 경영혁신 도구로 사용되는 식스 시그마의 개선단계에 많이 이용되고 있다. 이러한 실험계획법은 실제 실험을 할 때에도 매우 유용하게 사용될 수 있지만 CAE(Computer Aided Engineering)과 결합할 때도 매우 유용하게 사용된다. 즉, 시간이 많이 소요되는 해석을 수행할 때 실험계획법에 따라 해석을 수행하면 몇 번의 해석으로 인자의 영향을 파악해 주인자가 무엇인지 파악 할 수 있다. 본 연구에서는 7개의 인자에 대해 목적 함수에 대한 요인선정 실험으로 1차 실험계획을 수립하였다. 요인선정을 위해 일반적으로 가장 많이 사용하는 fractional factorial design을 이용하였다. 실험계획은 7개의 인자에 대해 분석도 IV의 1/4 fractional factorial design을 이용하였다⁽³⁾. 따라서 1차 실험계획은 7개의 인자 2수준으로 실험 하였으며 총 32번의 해석을 수행하였다. 실험에서 사용한 변수 값은 Table 3과 같다.

목적함수는 최대 처짐량과 무게이고 해석결과의 최대 응력값을 이용하여 허용안전계수를 설정하였다. 이로써 최대 처짐량과 무게를 동시에 최소로 하는데 중요한 인자를 실험계획을 이용하여 찾아낸 것이다. 이는 다목적함수의 문제로서 최적화 기법을 사용하기 위해서는 식 (1)에서와 같이

weight factor와 scale factor를 적절히 설정하여 여러 목적 함수들이 선형 결합한 하나의 목적함수로 지정하고 그 값을 최소화 하여야 한다.

$$f(t)_{objective} = w_1 \times \frac{f_1(t)}{f_1^*} + w_2 \times \frac{f_2(t)}{f_2^*} \quad (1)$$

여기서 f_1 과 f_2 는 해석모델의 최대 처짐량과 무게를 나타내고 f_1^* 과 f_2^* 는 scale factor를 의미한다. 또한 w_1 과 w_2 는 weight factor를 나타낸다. 여기서 목적함수의 최대 값이 1을 넘어가지 않게 하기 위하여 w_1, w_2 는 0.5로 두었으며 f_1^* 과 f_2^* 는 각각 85와 0.005로 설정하였다.

실험계획에 따라 32회 해석을 수행한 후 결과를 미니맵을 이용하여 분석 하였다. 해석결과를 파레토 차트를 이용하여 나타내면 Fig. 4와 같다.

95%의 신뢰도(alpha=0.05)를 기준으로 할 때 경량화와 최대처짐의 최소화 에 따른 주인자는 first-width, second-

Table 3 Upper and lower values of Design parameter levels for the 1st DOE

Factor	Lower	Upper
First-width(mm)	20	40
Second-width(mm)	20	40
Rec-width(mm)	160	180
Sup-width(mm)	25	45
Middle-width(mm)	25	45
Thickness(mm)	50	60
Sup-thickness(mm)	2	8

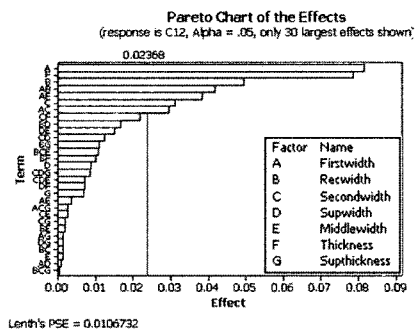


Fig. 4 Pareto chart of the standardized effects(Alpha=0.05)

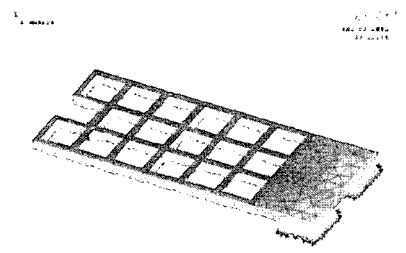


Fig. 3 Loading and boundary condition

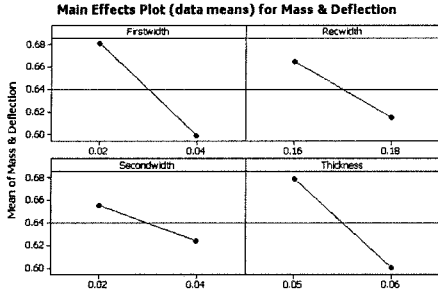


Fig. 5 Main effect plot

width, rec-width and thickness의 총 4개로 나타났다. 이러한 파레토 차트의 결과로 그립퍼부의 무게와 최대 처짐에 지배적인 영향을 주는 인자는 first-width, thickness, rec-width and second-width의 순으로 나타났다. 일반적으로 그립퍼의 최대처짐을 줄이고 경량화를 위하여 전체 두께를 증가시키고 rec-width를 넓히는 것인데 Fig. 4의 결과는 전체 두께와 rec-width를 조절하는 것 보다 first-width를 조절하는 것이 경량화와 처짐을 최소화 하는데 효과적이라는 것을 보여준다.

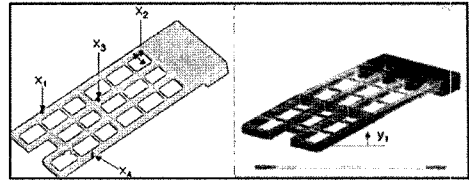
Fig. 4에서 보여진 4개의 주요인자에 대한 주 효과 선도를 나타내면 Fig. 5와 같다. 주 효과선도는 설계의 방향을 결정하는데 도움을 준다. 즉, first-width, thickness, rec-width and second-width 는 무게와 최대 처짐을 동시에 감소시키기 위해 점점 증가되는 방향으로 설계 되어야 한다.

3.3 최적설계

현재까지 개발되어 온 전체 최적화 알고리즘은 통계적 요소가 포함되어있는가의 유무에 따라 크게 결정론적 방법과 통계적 방법의 두 가지로 나눌 수 있다.

최근에는 이러한 결정론적인 방법과 통계적인 방법을 모두 적용 할 수 있는 최적 설계도구들이 개발 되었다. 본 연구에서는 (주)Engineous사의 iSight[®]를 이용하여 최적 설계를 수행하였다. iSight[®]는 13가지의 최적화 알고리즘을 이용하여 최적화를 수행하는데 크게 수리적 기법, 탐색적 기법, 경험적 기법으로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 탐색적 기법이면서 전체 최적화 기법인 유전자 알고리즘을 이용하여 최적 설계를 수행하였다.

일반적으로 최적설계를 수행할 때 FEM의 해석 결과로 나온 값을 직접 이용한다. 이 경우 결과의 타당성은 높지만, 비선형 해석 같은 해석 시간이 긴 해석이나 해석의 횟수가 많이 필요로 하는 경우 최적설계에 많은 시간이 걸리는 단점



(1) 설계변수(Design variables)

x_1 : First-width

x_2 : Rec-width

x_3 : Second-width

x_4 : Thickness

(2) 응답변수(Response variables)

y_1 : maximum deflection

y_2 : mass

y_3 : objective from eq. (1)

Fig. 6 Design variables & Response variables for the 2nd DOE

이 있다. 따라서 본 연구에서는 식 (2)의 회귀 모형을 구하여 이를 이용하여 최적설계를 수행하였다⁽²⁾.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i,j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (2)$$

$$\epsilon \sim N(0, \sigma^2)$$

여기서 회귀계수 β_0 을 절편(intercept), 오차항 ϵ 은 평균이 0 이고 분산이 σ^2 인 정규분포를 따르는 확률변수이다. 또한 k 는 모형에서 고려한 독립변수의 개수이다. 회귀모형을 구하기 위하여 1차 DOE에서 구한 4개의 주 인자를 설계변수로 하고 응답변수 y_1, y_2 는 최대 처짐과 무게로 정하였으며 응답변수 y_3 는 식 (1)에 있는 objective로 정의하여 2차 실험계획을 수립하였다.

실험계획은 중심합성법을 사용하였으며 설계 변수를 3 수준으로 고려하여 2^k 개의 요인 실험점에 $2k$ 개의 축점 및 1개의 중심점을 추가하는 총 25회 ($2^4 + 2 \times 4 + 1$)의 실험을 유한요소 해석을 이용한 전산실험으로 수행하였다. Table 4와 5에 2차 DOE에 사용한 변수와 설계 행렬을 나타내었다⁽³⁾.

전산실험으로부터 구해진 3개의 응답변수의 값에 대한 반응표면분석을 통해서 응답변수에 대한 2차 회귀식을 식 (3)~(5)와 같이 구했다. 각각의 반응 표면식에 대한 분산분석을 수행해 보면 R^2 값이 각각 98.9%, 99.7%, 및 98.5% 이므로

각각의 응답변수에 대해서 정밀한 근사모델이 구해졌고 이를 사용하는데 문제가 없는 것으로 판단되었다⁽²⁾.

Table 4 Variable range of design parameters for the 2nd DOE

Parameter	Lower	Baseline	Upper	Alpha
x_1 (mm)	20	30	40	1.414
x_2 (mm)	160	170	180	1.414
x_3 (mm)	20	30	40	1.414
x_4 (mm)	50	55	60	1.414

Table 5 Design matrix of the 2nd DOE

Experiment Number	x_1 (mm)	x_2 (mm)	x_3 (mm)	x_4 (mm)
1	20	160	20	50
2	20	160	20	60
3	20	160	40	50
4	20	160	40	60
5	20	180	20	50
6	20	180	20	60
7	20	180	40	50
8	20	180	40	60
9	40	160	20	50
10	40	160	20	60
11	40	160	40	50
12	40	160	40	60
13	40	180	20	50
14	40	180	20	60
15	40	180	40	50
16	40	180	40	60
17	30	170	30	55
18	15.86	170	30	55
19	44.14	170	30	55
20	30	155.86	30	55
21	30	184.14	30	55
22	30	170	15.86	55
23	30	170	44.14	55
24	30	170	30	47.93
25	30	170	30	62.07

$$y_1 = 0.00247 - 0.00028x_1 + 7.20956E-06x_2 - 0.00031x_3 - 0.001320x_4 + 0.00012x_1^2 + 8.57012E-05x_2^2 + 0.00012x_3^2 + 0.00060x_4^2 + 4.2786E-06x_1x_2 + 6.4609E-05x_1x_3 + 0.00013x_1x_4 - 1.40603E-06x_2x_3 - 4.92553E-06x_2x_4 + 0.00014x_3x_4 \quad (3)$$

$$y_2 = 72.87570 + 2.00409x_1 - 0.84863x_2 + 2.00409x_3 + 8.03625x_4 + 0.05107x_1^2 + 0.05107x_2^2 + 0.05107x_3^2 + 0.359522x_4^2 + 2.39316E-15x_1x_2 - 2.90668E-15x_1x_3 + 0.26030x_1x_4 + 6.30443E-16x_2x_3 - 0.11077x_2x_4 + 0.26030x_3x_4 \quad (4)$$

$$y_3 = 0.58968 - 0.01859x_1 - 0.0003273x_2 - 0.021249x_3 - 0.09419x_4 + 0.01190x_1^2 + 0.008810x_2^2 + 0.01212x_3^2 + 0.061539x_4^2 + 0.00043x_1x_2 + 0.00646x_1x_3 + 0.01448x_1x_4 - 0.00014x_2x_3 - 0.00101x_2x_4 + 0.01571x_3x_4 \quad (5)$$

최적 설계에 사용한 알고리즘은 iSight[®]에서 제공하고 있는 genetic algorithm 을 이용하였다. 이 때 모집단과 세대수는 각각 10으로 하였다. 염색체는 32이고 교배율과 돌연변이 확률은 각각 0.8과 0.05로 사용하였다⁽⁴⁾. 최적설계에 사용한 식은 반응 표면법에 의해 구해진 회귀식을 이용하였다. Fig. 7에서 최적결과를 나타내었다. 대략 5000번 이후의 실행 수(run count)에서 수렴하는 것을 볼 수 있다. 그립퍼의 처짐과 무게는 first-width, second-width, rec-width and thickness의 길이가 각각 31.686, 175.131, 32.798, 59.749 mm일 때 최소가 되었으며 이 때 최대처짐은 1.7mm 이고 무게는 77.3kg으로 나타났다.

이 값은 회귀식을 이용하여 구한 값이므로 타당성을 확보하

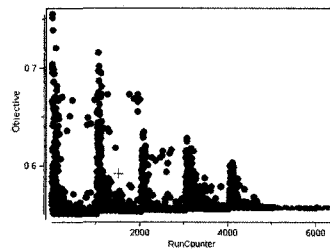


Fig. 7 Optimization result

기 위하여 최적 설계값을 이용하여 유한요소 해석을 직접 수행하는 재현성 해석을 다시 한번 수행하였다. 재현성 해석을 수행한 결과 최대처짐은 약 1.76mm 그리고 무게는 76.8kg의 값으로 나타났다. 재현성 해석의 결과는 회귀식을 이용한 경우와 비교하여 약간의 차이를 보였는데, 이것은 회귀식의 오차항 때문에 발생한 것으로 생각된다.

4. 식스시그마 강건설계

일반적으로 최적설계에 구해진 값들은 하나로 나타나는 결정론적인 값들이지만 실제 현장에서 적용할 때는 설계값이 어느 정도 편차를 가지게 된다⁽⁵⁾. 식스 시그마 강건설계의 개념은 최적설계에서 구한 설계값과 그 설계값들의 편차가 어느 정도 발생하더라도 식스 시그마 수준(100만개 중 3개의 불량)의 품질을 달성하도록 편차관리 또는 설계값을 결정하는 것이다. 식스시그마 강건설계를 수행하기 위해서는 주요인자

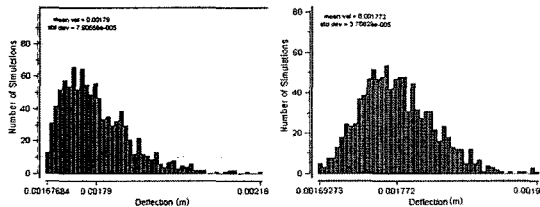
가 선정 되어있어야 하며 선정되어 있는 주인자의 통계적인 표준편차들이 확보되어야 한다. 또한 식스 시그마 수준을 결정하기 위한 기준선(Guideline)이 결정 되어있어야 한다.

본 연구에서는 최적설계에 사용된 4개의 주인자를 강건설계에 이용하였다. 각 설계변수의 표준편차는 평균값의 1~10% 범위에서 변동 시켰으며 어떤 정도로 표준 편차를 관리 할 때 식스 시그마 수준을 달성 할 수 있는지 알아보았다. 여기서는 최대 변형이 2mm 이내로 되는 것을 기준으로 두고 해석을 수행 하였다⁽¹⁾. 이런 기준들은 오랫동안 생산이나 품질 관리를 통해서 결정되는 값이다.

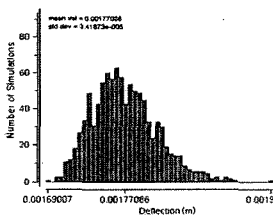
설계변수는 최적 설계점을 기준으로 정규분포를 가진다고 가정하였으며 Monte Carlo Simulation을 통해 1000개의 데이터를 무작위 생성하였다⁽⁶⁾. Fig. 8에서는 강건설계를 수행한 후 최대 처짐의 히스토그램을 나타내었다.

설계변수의 표준편차가 큰 경우 최적 설계에서 구한 평균 값과 차이가 있지만, 표준편차가 줄어들수록 평균값에 근접하는 것을 볼 수 있으며 분포의 형태가 정규분포에 가깝게 가는 것을 볼 수 있다.

허용 최대 처짐의 기준치인 2mm를 기준으로 설계변수의 편차 변동에 따른 시그마 수준을 나타내면 Fig. 9와 같다. Fig. 9에서와 같이 식스 시그마 수준의 신뢰성을 확보하기 위해서는 설계변수의 표준편차가 평균의 5%이내에 관리 되어야 함을 알 수 있다.



(a) Std. De. of design variable(10% Avg., 7% Avg.)



(c) Std. De. of design variable(5% Avg.)

Fig. 8 Histogram of maximum deflection

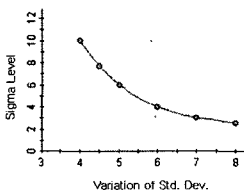


Fig. 9 Sigma level according to variation of Std. Dev.

5. 결론

- (1) 본 연구에 LCD 이송장치 그립퍼부의 처짐을 최소화 하고 경량화 하기 위한 설계인자 중 first-width, thickness, rec-width and second-width 등의 설계변수가 다른 설계변수에 비하여 주요한 인자로 나타났으며 길이가 각각 31.686, 175.131, 32.798, 59.749mm 이었고 이 때 최대 처짐은 1.7mm 이고 무게는 77.3kg으로 나타났다.
- (2) 그립퍼부의 식스 시그마 강건설계 process를 확보하였으며 이를 통해 식스 시그마 수준의 신뢰성을 확보하기 위한 설계변수의 관리 범위 까지 찾아내었다.

후 기

본 연구는 창원대학교 공작기계기술 연구센터, 에너지관리공단의 에너지 절약 기술개발 프로젝트형 사업의 지원 및 ㈜신성이엔지의 지원으로 수행된 연구결과 임을 밝힙니다.

참 고 문 헌

- (1) Nam, H. W., 2005, "Six sigma Robust Design of Composite Hand for LCD Glass Transfer Robot," *Journal of KSME*, Vol. 29, pp. 455~461.
- (2) Myers, R. H, and Montgomery, D. C., 1995, *Response surface Methodology*, John wiley & Sons Inc. New York.
- (3) Park, S. H., 2001, *Design of experiments*, Minyoungsa, pp. 631~646.
- (4) Gen, M. and Cheng, R., 1997, *Genetic Algorithms And Engineering Design*. A Wiley-Interscience Publication JOHN WILEY & SONS, INC.
- (5) Lee, S. B. and Yim, H. C., 2004, "Reliability-Based Optimal Design of Pillar Sections Considering Fundamental Vibration Modes of Vehicle Body Structure," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 13, No. 6, pp. 107~113.
- (6) Saliby, E. J., 1990, *Descriptive Sampling : A Better Approach to Monte Carlo Simulation*, J. Opl. Res.