

< 논문 >

LCD 유리 이송용 복합재료 로봇 핸드의 식스 시그마 강건설계

남 현 옥*

(2004년 10월 14일 접수, 2005년 1월 10일 심사완료)

Six Sigma Robust Design of Composite Hand for LCD Glass Transfer Robot

Hyunwook Nam

Key Words : Composite (복합재료), Design of Experiment(실험계획법), Response Surface Method(반응표면법), Robust Design(강건설계), LTR Robot(LCD 유리 이송 로봇)

Abstract

This research studied robust design of composite hand for LTR (LCD glass Transfer Robot). 1st DOE (Design of Experiment) was conducted to find out vital few Xs. 108 experiments were performed and their results were statistically analyzed. Pareto chart analysis shows that the geometric parameters (height and width of composite beam) are more important than material parameters (E_1 , E_2) or stacking sequence angle. Also, the stacking sequence of mid-layer is more important than that of outer-layer. The main effect plots shows that the maximum deflection of LTR hand is minimized with increasing height, width of beam and layer thickness. 2nd DOE was conducted to obtain RSM (Response Surface Method) equation. 25 experiments were conducted. The CCD (Central Composite Design) technique with four factors was used. The coefficient of determination (R^2) for the calculated RSM equation was 0.989. Optimum design was conducted using the RSM equation. Multi-island genetic algorithm was used to optimum design. Optimum values for beam height, beam width, layer thickness and beam length were 24.9mm, 186.6mm, 0.15mm and 2402.4mm, respectively. An approximate value of 0.77mm in deflection was expected to be a maximum under the optimum conditions. Six sigma robust design was conducted to find out guideline for control range of design parameter. To acquire six sigma level reliability, the standard deviation of design parameter should be controlled within 2% of average design value

1. 서 론

메모리 산업에 이어 LCD 는 우리 나라 산업의 매우 중요한 부분이 되었다. LCD 산업의 경쟁이 치열해짐에 따라 LCD 원판 유리의 크기는 점점 대형화되어 가고 있다. 원판이 클수록 취급이 어렵지만, 일단 취급이 가능하면 하나의 원판에서 많은 LCD 를 생산할 수 있으므로 생산성 향상시킬 수 있는 중요한 장점이 있다.

2000 년도에 사용되었던 5 세대 원판 유리의 크기가 1100x1300mm 임에 반해, 7 세대 원판 유리의

크기는 1870x2200mm 으로 면적 기준으로 5 세대 Glass 의 크기의 4 배에 달한다. 이러한 LCD 유리는 크기에 비해 두께가 매우 얇은 (약 0.7mm) 박판이기 때문에 취급하기가 쉽지 않다.

LCD 제작 공정은 크게 전공정 단계와 후공정 단계로 나눌 수 있는데, LTR(LCD Glass Transfer Robot)은 전공정 단계에서 유리를 이송시키는 곳에 사용되는 로봇이다. 이러한 LTR 로봇에서 요구되는 주요한 2 가지 특징은 우수한 감쇠특성을 가져야 한다는 것과 처짐(deflection)이 적어야 한다는 것이다.⁽¹⁾ 이것은 생산성 향상과 관련되어 있다. 원판 유리는 LTR 에 의해 LCD 유리 카세트(Cassette)에 옮겨지는데, 감쇠특성이 좋을수록 원판 유리를 카세트에 옮기는데 소요되는 시간이 줄어들며, 처짐이 적을수록 한 카세트에 장착할

* 회원, 청주교육대학교 실과교육과

E-mail : redhair@cje.ac.kr

TEL : (043)299-0794 FAX : (043)299-0798

수 있는 원판 유리의 숫자가 증가한다. 따라서 LTR 핸드의 강성이 클수록 생산성이 크게 증가한다.

섬유강화복합재료(Fiber Reinforced Plastic)은 비강도와 비강성이 기존 금속재료에 비하여 우수하여⁽²⁾ LTR 핸드에 가장 적합한 소재로 여겨지며 현재 섬유강화복합재료는 강성이 중요한 역할을 하는 로봇 팔 제작에 이용되고 있다.^(1,3)

강성이 높은 LTR 핸드를 설계하기 위해서는 많은 설계변수들이 필요하다. 설계 변수는 크게 탄성계수, 인장강도 등의 재료 변수와 적층각도, 단면형상 등의 설계 변수로 나눌 수 있는데, 신뢰도가 높은 LTR 핸드를 제작하기 위해서는 각 설계 변수 중 주요한 설계 변수가 어떤 값을 가지고 어떻게 관리되어야 하는지 파악하는 것이 중요하다. 단순히 강성이 높은 LTR Hand 만을 제작한다면 복합재료의 방향을 0 도 방향으로 제작하면 되지만 실제 제작에 있어서는 치수 안전성이나 충격에 대한 안전성 등으로 복합재료의 모든 층을 0 도로 하는 것은 현실적으로 타당하지 않다.

본 연구에서는 실험계획법(Design of Experiments, DOE)을 이용하여 LTR 핸드 설계에서 주요한 변수를 도출해 내고, 반응표면법(Response Surface Method, RSM)과 유전자 알고리즘을 사용하여 LTR 핸드의 처짐을 최소화할 수 있는 설계 변수를 도출하였다. 또한 식스 시그마 강건 설계(Six Sigma Robust Design)을 이용하여 설계값이 어느 정도로 관리 되어야 식스 시그마 수준을 달성 할 수 있는지 계산하였다.

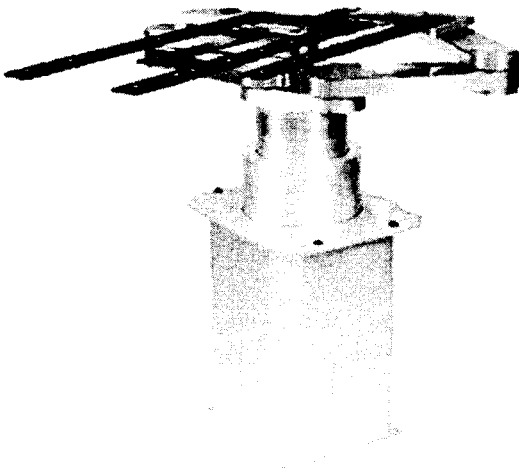


Fig. 1 Dual arm type LCD transfer robot

2. LTR 및 복합재료 핸드

2.1 LTR 및 복합재료 핸드의 형상

Fig. 1 에 LTR 의 사진을 나타내었다. 일반적으로 한 팔(Single Arm)을 가진 형태와 두 팔(Dual Arm)을 가진 형태가 있는데, 아래의 사진은 후자의 형태를 나타낸다. 로봇의 핸드는 수직 운동, 회전 운동, 주행 운동을 한다.

Fig. 2 는 LTR 핸드의 개략도이다. 핸드의 단면은 중공 사각 튜브 형상이며 상부에 원판 유리를 잡기 위한 진공 구멍(Vacuum Hole)이 있으며 보(Beam)의 끝 단은 알루미늄으로 된 로봇 팔(Arm)에 연결되어 있다.

2.2 재료의 물성 및 설계 변수

섬유강화복합재료의 물성은 보강재와 강화재의 종류나 비율에 따라 다양하다. 여기서는 M.W. Hyer 가 사용한 물성을 사용하였다.⁽⁴⁾ 사용한 재료의 물성은 Table 1 과 같다.

Table 1 의 물성 중 LTR 핸드의 강성에 영향을 미치는 주요 물성으로 E_1 , E_2 로 선택하고 나머지 물성 변수들은 실험계획법의 변수로 제외하였다. 형상 변수는 보의 길이, 폭, 높이와 함께 프리프레그(prepreg)의 두께로 선정하였으며, 각 층의 적층 각도를 형상 변수로 두고 실험계획법을 수행

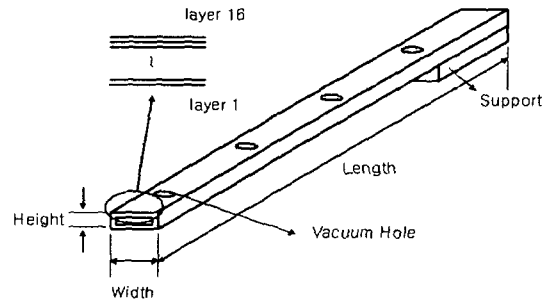


Fig. 2 Schematic diagram of LTR hands

Table 1 Typical material property of CFRP

Material Variable	Initial Value
E_1	150 GPa
E_2	12.1 GPa
E_3	12.1 GPa
ν_{12}	0.458
ν_{13}	0.248
ν_{23}	0.248
G_{23}	3.2 GPa
G_{13}	4.4 GPa
G_{12}	4.4 GPa

Table 2 Initial value of geometry parameter

Geometry Parameter	Initial Value
Length	2500mm
Height	20mm
Width	150mm
Layer thickness	0.125mm
Number of layer	32
Orientation	0 degree

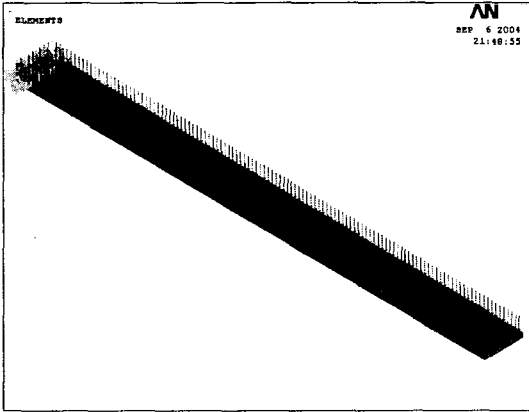


Fig. 3 Loading and boundary conditions

하였다. 총 적층수는 32 층이며, 대칭이므로 적층 각도에 관련된 변수는 16 개이다. 각 형상 변수의 초기값을 나타내면 표 2 와 같다. 총 설계 변수는 1, 2 방향의 강성, 보의 길이, 높이, 폭, 프리프레그의 두께, 16 개의 적층각도를 합한 22 개의 설계 변수를 가진다.

3. 실험계획법 및 최적설계

3.1 유한 요소해석

유한 요소 해석은 상용 FEM 해석도구인 ANSYS 8.0 을 사용하였다. 사용한 요소는 Shell 99 이다. Shell 99 는 비선형물성을 사용할 수 없는 단점이 있지만, Shell 91 에 비하여 계산속도가 빠른 장점이 있다. Shell 99 의 8 개의 절점을 가지며, 각 절점의 자유도는 6 이다.⁽⁹⁾

경계 조건으로 보의 한쪽 끝 단을 완전 고정하였으며, 하중 조건은 보 전체가 원판 유리의 하중을 균일하게 받는다고 가정하였다. 진공 구멍은 변형에 미치는 영향이 적고, 전체적인 경향에는 영향을 미치지 않는다. 또한 진공 구멍의 형상은 본 연구의 관심의 대상이 아니기 때문에 해석에서 진공 구멍은 고려하지 않았다.

Table 3 Variable range of design parameter for 1st DOE

Variable	-1	0	+1
Length(mm)	2400	2500	2600
Height(mm)	15	20	25
Width(mm)	100	150	200
Thickness(mm)	0.1	0.125	0.15
E1(MPa)	135e3	150e3	165e3
E2(MPa)	5e3	12e3	24e3
Angle1~16	0	45	90

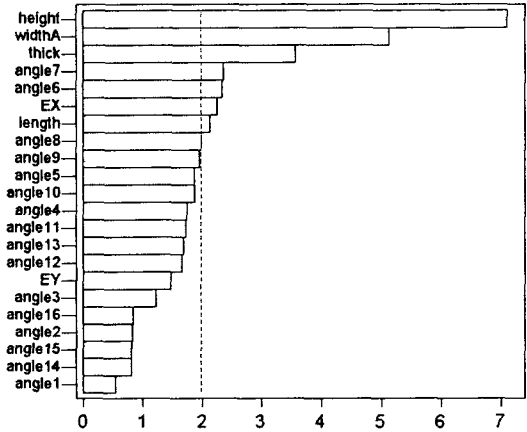


Fig. 4 Pareto chart of the standardized effects (Alpha=0.05)

3.2 실험계획법

실험계획법(Design of Experiments, DOE)은 통계적 분석 기법으로 최근 기업의 경영혁신 도구로 사용되는 식스 시그마의 측정 단계에 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 복잡한 해석을 수행할 때 실험계획법에 따라 해석을 수행하면 몇 번의 해석으로 인자의 영향을 파악해 주인자가 무엇인지 파악할 수 있다.

본 연구에서는 22 개의 인자에 대하여 1 차 실험계획을 수행함으로써 주인자(Vital Few Xs)를 찾아내었다. 1 차 실험계획은 22 인자 3 수준으로 실험하였으며 총 108 회 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 변수 값은 Table 3 과 같다. 목적함수는 최대 처짐량(Maximum deflection)이다. 즉, 최대 처짐량을 최소로 하는데 중요한 인자를 실험계획법을 이용하여 찾아 내는 것이다. 실험계획에 따라 108 회 해석을 수행한 후 결과를 미니맵을 이용하여 분석하였다. 해석 결과를 파레토 차트(Pareto chart)를 이용하여 나타내면 Fig. 4 와 같다.

95%의 신뢰도(alpha=0.05)를 기준으로 할 때 주요 인자는 보의 높이, 넓이, 길이, layer 의 두께, 7 번 layer 의 적층 각도, 6 번 layer 의 적층 각도, 0도 방향 탄성계수의 총 7 개로 나타났다. 이러한 파레토 차트의 결과만으로도 몇 가지 중요한 사실을 찾아낼 수 있다. 첫 번째로 복합재료 로봇 핸드의 강성에 지배적인 영향을 주는 인자는 보의 높이와 너비, 그리고 layer 의 두께라는 것이다. 일반적으로 복합재료 보의 강성을 높이기 위하여 섬유방향 탄성계수(E_x)를 증가시키거나 적층 각도를 조정하는 방법을 사용한다. 하지만 Fig. 4 의 결과는 탄성계수의 증가나 적층 각도를 조절하는 것 보다 보의 높이나 너비를 조절하는 것이 처짐을 최소화하는데 효과적이라는 것을 보여준다.

둘째는 6, 7, 8, 9 번층 등의 중간층의 적층 각도가 1, 2, 14, 15 번 층 등 외각층의 적층각도에 비하여 중요하다는 것이다. 이것은 복합재료를 제조할 때 중요한 정보를 준다. LTR 로봇 핸드용 복합재료를 제작할 때 처짐을 최소화하기 위하여 대부분의 층의 적층 각도를 0 도로 하는데, 안정된 제작이나 제작 후 충격에 대한 신뢰성 문제 때문에 직조형 프리프레그(fabric prepreg)를 사용하거나 몇몇 층의 적층 각도를 90 도로 조절하여 사용한다. 이때 어떤 층의 각도를 조절하는 것이 적합한지에 대한 정보가 필요한데, 본 해석의 결과는 중간에 적층된 layer 보다는 외각에 적층된 layer 의 적층각도를 조절하는 것이 바람직하다는 결과를 보여준다. Fig. 4 에서 구한 7 가지 주요 인자의 주 효과를 나타내면 Fig. 5 와 같다. 이러한 주 효과 선도(main effects plot)는 설계의 방향을 결정하는데 도움을 준다. 즉, 보의 높이, 보의 너비, layer 의 두께, 섬유방향탄성계수는 증가시킬수록 최대 처짐은 감소하며, 6, 7 번 층의 적층 각도는 0 도에 가까울수록 최대 처짐이 감소함을 볼 수 있다. 따라서 이러한 방향으로 설계하는 것이 바람직한 설계라는 것을 알 수 있다.

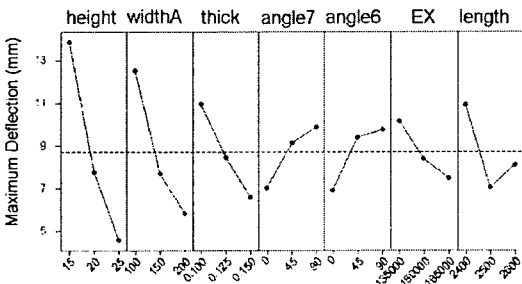


Fig. 5 Main effects plot

3.3 최적설계

복합재료는 적층 각도나 형상에 따라 특성을 다양하게 변화시킬 수 있는 요소들이 존재함으로 좌굴 하중, 변위, 응력, 고유진동수 등을 목적함수나 제한 조건의 대상으로 하여 많은 최적화 연구들이 수행되었다.⁽⁶⁻⁹⁾ 오승환 등은 삼각패치 알고리즘을 이용한 복합재료 설계에 관한 연구에서 복합재료의 최적설계연구에는 국부 최적화가 아닌 전체 최적화가 필요함을 강조하였다.⁽¹⁰⁾

현재까지 개발되어 온 전체 최적화 알고리즘은 통계적 요소가 포함되어 있는가의 유무에 따라 크게 결정론적 방법과 통계적 방법의 두 가지로 나눌 수 있다.⁽¹¹⁾

최근에는 이러한 결정론적인 방법과 통계적인 방법을 모두 적용할 수 있는 최적설계도구들이 개발되었다. 본 연구에서는 (R)Engineous 사의 iSight 를 이용하여 최적설계를 수행하였다. iSight 는 13 가지의 최적화 알고리즘을 이용하여 최적화를 수행하는데 크게 수리적 기법, 탐색적 기법, 경험적 기법으로 나눌 수 있다.⁽¹²⁾ 본 연구에서는 탐색적 기법이면서 전체 최적화 기법인 유전자 알고리즘을 이용하여 최적설계를 수행하였다.

일반적으로 최적설계를 수행할 때 FEM 의 해석 결과로 나온 값을 직접 이용한다. 이 경우 결과의 타당성(validity)는 높지만, 비선형 해석 같은 해석 시간이 긴 해석이나 해석의 횟수가 많이 필요로 하는 경우 최적설계에 많은 시간이 걸리는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 식 (1)의 회귀 모형을 구하였으며 이 모형을 이용하여 최적설계를 수행하였다.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \tag{1}$$

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

여기서 k 는 독립변수의 수이다.

회귀 모형을 구하기 위하여 1 차 DOE 에서 구한 주인자 중 조절(control)하기 힘든 변수인 섬유방향 탄성계수 E_1 과 최적값이 명확한 적층 각도는 제외한 나머지 변수, 즉 보의 길이, 높이, 폭, layer 의 두께를 변수로 하여 4 인자 중심합성법(Central Composite Design)으로 2 차 DOE 를 수행하였다. 총 해석 수는 25 회이다. Table 4 와 5 에 2 차 DOE 에 사용한 변수와 설계 행렬(Design matrix)을 나타내었다.

Table 4 Variable range of design parameter for 2nd DOE

Variable	Lower	Baseline	Upper	Alpha
Length(mm)	2400	2500	2600	1.414
Height(mm)	15	20	25	1.414
Width(mm)	100	150	200	1.414
Thickness(mm)	0.1	0.125	0.15	1.414

Table 5 Design matrix of 2nd DOE

Experiment Number	Length (mm)	Height (mm)	Width (mm)	Thickness(mm)
1	2400	15	100	0.1
2	2400	15	100	0.15
3	2400	15	200	0.1
4	2400	15	200	0.15
5	2400	25	100	0.1
6	2400	25	100	0.15
7	2400	25	200	0.1
8	2400	25	200	0.15
9	2600	15	100	0.1
10	2600	15	100	0.15
11	2600	15	200	0.1
12	2600	15	200	0.15
13	2600	25	100	0.1
14	2600	25	100	0.15
15	2600	25	200	0.1
16	2600	25	200	0.15
17	2500	20	150	0.125
18	2358.6	20	150	0.125
19	2641.4	20	150	0.125
20	2500	12.93	150	0.125
21	2500	27.07	150	0.125
22	2500	20	79.3	0.125
23	2500	20	220.7	0.125
24	2500	20	150	0.08965
25	2500	20	150	0.16035

반응표면법에 의해 구한 회귀식은 iSight 를 이용하여 구하였으며, 이 때 오차항인 R² 값은 0.989로 나타나 사용하는데 문제가 없는 것으로 판단되었다.

최적설계에 사용한 알고리즘은 iSight 에서 제공하고 있는 Multi-island 유전자 알고리즘(Genetic algorithm)을 이용하였다. 이 때 모집단, Island, 세대(generation)의 수는 각각 10 으로 하였다. 탐색체는 32bit 를 사용하였다. 최적설계에 사용한 식은 반응표면법에 의해 구해진 회귀식을 이용하였다. Fig. 6 에 최적설계결과를 나타내었다. 대략 4000 번 이후의 실행 수(Run count)에서 수렴하는 것을 볼 수 있다. 복합재료 로봇 핸드의 처짐은 보의 길이, 높이, 너비, layer 의 두께가 각각 2402.4, 24.9, 186.6, 0.15mm 일 때 최소가 되었으며 이때 최대처짐은 0.77mm 로 나타났다. 이 값은 회귀식을 이용하여 구한 값이므로 타당성을 확보하기 위하여 최적설계값에서 유한요소해석을 직접 수행하는 재현

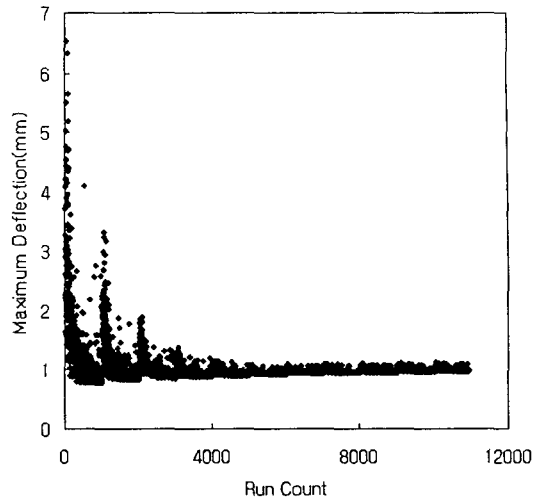


Fig. 6 Optimization result

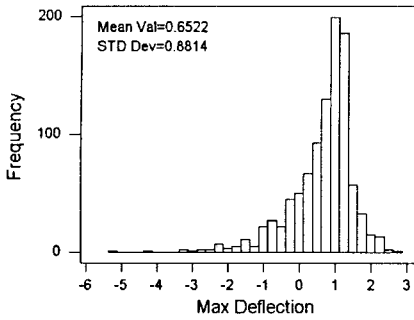
성 해석을 다시 한번 수행하였다. 재현성 해석을 수행한 결과 약 1mm 정도의 값으로 나타났다. 재현성 해석의 결과는 회귀식을 이용한 경우와 비교하여 약간의 차이를 보였는데, 이것은 회귀식의 오차항 때문에 발생하는 것으로 생각된다.

4. 식스 시그마 강건 설계

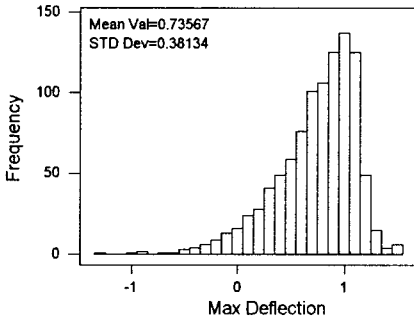
일반적으로 최적설계에 구해진 값들은 하나로 나타나는 결정론적인 값들이지만 실제 현장에서 적용할 때는 설계값에서 어느 정도 편차를 가지게 된다. 식스 시그마 강건 설계의 개념은 최적 설계에서 구한 설계값과 그 설계값들의 편차가 있을 때 사용자가 원하는 합격치를 기준으로 편차가 어느 정도 발생하더라도 식스 시그마 수준(100 만개 중에 1 개의 불량)의 합격률을 달성하도록 편차 관리 또는 설계값의 결정하는 것이다.

식스 시그마 강건 설계(Six Sigma Robust Design)를 수행하기 위해서는 주요 인자가 선정되어 있어야 하며 선정되어 있는 주인자의 통계적인 표준편차들이 확보되어야 한다. 또한, 식스 시그마 수준을 결정하기 위한 기준선(Guideline)이 결정되어 있어야 한다.

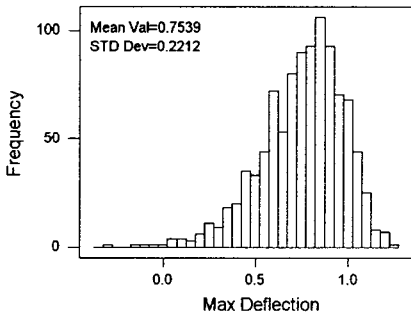
본 연구에서는 최적설계에 사용된 4 개의 주인자를 강건 설계에 이용하였다. 각 설계 변수의 표준편차는 평균값의 1~10% 범위에서 변동시켰으며 어떤 정도로 표준 편차 관리를 할 때 식스 시그마 수준을 달성할 수 있는지 알아보았다. 또한 최대 변형이 2mm 이내로 되는 것을 기준으로 생각하고 해석을 수행하였다. 이런 기준들은 오랫동안 생산



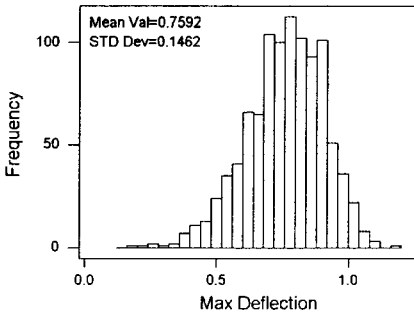
(a) Std. de. of design variable (10% Avg.)



(b) Std. de. of design variable (5% Avg.)



(c) Std. de. of design variable (3% Avg.)



(d) Std. de. of design variable (2% Avg.)

Fig. 7 Histogram of maximum deflection

이나 품질관리를 통해서 결정되는 값이다. 설계

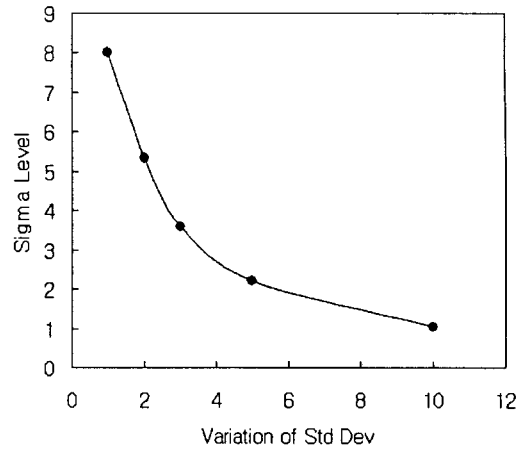


Fig. 8 Sigma level according to variation of Std Dev

변수는 최적 설계점을 기준으로 정규분포를 가진다고 가정하였으며, Monte Carlo Simulation을 통해 1000의 데이터를 무작위 생성하였다. Fig. 7에 강건 설계를 수행한 후 최대 변형량의 히스토그램을 나타내었다.

설계 변수의 표준 편차가 큰 경우 최적설계에서 구한 평균값과 차이가 있지만, 표준 편차가 줄어들수록 평균값에 근접하는 것을 볼 수 있으며 분포의 형태가 정규분포에 가깝게 가는 것을 볼 수 있다.

허용 최대 변형량의 기준치인 2mm를 기준으로 설계 변수의 편차 변동에 따른 시그마 수준을 나타내면 Fig. 8과 같다. Fig. 8에서와 같이 식스 시그마 수준의 신뢰성을 확보하기 위해서는 설계 변수의 표준 편차가 평균의 2%이내에서 관리되어야 함을 알 수 있다.

5. 결론

(1) 복합재료 로봇 핸드의 처짐을 최소화하기 위한 설계 인자 중 보의 높이, 폭, layer의 두께 등의 변수가 재료의 탄성계수나 layer의 적층각도에 비하여 주요한 인자로 나타났다.

(2) 보의 중심층에 위치한 layer의 적층각도가 외각에 위치한 layer의 적층각도에 비하여 중요한 것으로 나타났으므로 제작 측면에서 적층각도를 조절할 경우 외각에 위치한 layer의 적층각도를 조절하는 것이 바람직하다.

(3) 복합재료 로봇 핸드의 식스 시그마 강건 설계 공정(process)를 확보하였으며, 이를 통해 식스 시그마 수준의 신뢰성을 확보하기 위한 설계 변수 관리 범위를 찾아내었다.

참고문헌

- (1) Choi, G. H., Han, C.W. and Lee, S. R., 2002, "The Study on the Development of Composite Robot for TFT-LCD Glass Transport," *Journal of Korean Society of Mechanical Engineering*, Vol. 26, No. 7, pp. 1357~1365.
- (2) Han, K. S., Hwang W. B. and Song J. I., 1991, "Survey of Current Status of Composite Materials in Korea," *Journal of KSCM*, Vol. 4, No. 2, pp. 79~95.
- (3) Lee, D. G., Kim, K. S., Lim, C. Y., Kawk, Y. K., 1988, "Calculation of the optimal winding angle of the composite arm for the SCARA-Type Direct-Drive Robot," *Journal of KSCM*, Vol. 1, No. 1, pp. 43~49.
- (4) Hyer, M.W. 1998, "Stress Analysis of Fiber-Reinforced Composite Materials," McGraw-Hill, p. 58.
- (5) ANSYS Release 8.0 Documentation
- (6) Kang, S. C. and Kim, D. M., 1992, "Structure Design of Composite Windmill Blade," *Journal of KSME*, Vol. 16, No. 1, pp. 162~174.
- (7) Lee, Y. S. and Lee, R. H., 1993, "Design of Thick Composite Laminate for Maximum Thermal Buckling Load," *Journal of KSME*, Vol. 17, No. 7, pp. 1761~1771.
- (8) Kim, C. W. and Hwang, W. B., 1996, "Optimum Design of Cylindrical Composite Structure for Strength," *Journal of KSME*, Vol. 20, No. 3, pp. 968~977.
- (9) Nam, H.W., Hwang, W. and Han, K.S., 2001, "Stacking Sequence Design of Fiber Metal Laminate for Maximum Strength," *Journal of Composite Materials*, Vol. 25, No. 18, pp. 1653~1683.
- (10) Oh, S.H. and Lee, B.C., 2001, "Global Optimization of Composite Structures Using Triangular Patch Algorithm," *Journal of KSME(A)*, Vol. 25, No.4, pp 671~684.
- (11) Arora, J.S., Elwakeil, O.A. and Chahande, A.I., 1995, "Global Optimization Methods for Engineering Application: a Review," *Structural Optimization*, Vol. 9, pp. 137~159.
- (12) iSight 7.1 online help manual.