

< 기술논문 >

TFT-LCD 용 유리기관의 강건 최적 지지 위치의 선정에 관한 연구

허재성[†] · 정병창^{*} · 이태윤^{**} · 곽병만^{***}

(2006년 2월 20일 접수, 2006년 5월 11일 심사완료)

A Study on the Robust Optimal Supporting Positions of TFT-LCD Glass Panel

Jae-Sung Huh, Byung-Chang Jung, Tae-Yoon Lee and Byung-Man Kwak

Key Words : TFT-LCD Glass Panel (TFT-LCD 유리 기관), Supporting Positions (지지 위치), Uncertainties (불확실성), Robust Optimal Design (강건 최적설계), Function Approximation Moment Method (함수 근사 모멘트 방법)

Abstract

In this paper we present robust optimal supporting positions for large glass panels used for TFT-LCD monitors when they are stored in a cassette during manufacturing process. The criterion taken is to minimize their maximum deflection. Since they are supported by some supports and have large deformations, contact analysis with a geometrically nonlinear effect is necessary. In addition, the center of a panel can not be positioned exactly as intended and should be considered as uncertainties. To take into account of these effects, the mean and the standard deviation of system response functions, particularly the deflection of the panels, need be calculated. A function approximation moment method (FAMM) is utilized to estimate them. It is a special type of response surface methodology for structural reliability analysis and can be efficiently used to estimate the two stochastic properties, that is, the system performance and the perturbations caused by uncertainties. For a design purpose, they are to be minimized simultaneously by some optimization algorithm to obtain robust optimal supporting positions.

1. 서론

액정디스플레이(LCD: Liquid Crystal Display)는 두 개의 얇은 유리판 사이에 고체와 액체의 성질을 동시에 지니는 액정을 주입하고 상하 유리판 전극의 전압 차로 액정분자의 배열을 변화시킴으로써 명암을 발생시켜 문자나 영상 등을 표시하는 장치

이다. LCD는 구동 방식에 따라 수동 매트릭스 방식(Passive Matrix)과 능동 매트릭스 방식(Active Matrix)으로 나누어진다. 능동 매트릭스 방식의 TFT(Thin Film Transistor)은 다시 Active층 실리콘 종류에 따라 비정질 실리콘(a-Si), 다결정 실리콘(Poly-Si)와 단결정 실리콘(c-Si)로 구분된다. 이 TFT는 각 화소에 공급되는 전압을 조절하는 스위치로서 화질이 깨끗하고 입력신호에 대한 응답속도가 다른 방식보다 훨씬 빠르며 색상표현력에서도 탁월하다. 이러한 장점과 함께 TFT-LCD는 지속적인 기술개발에 의해 가격면에서도 경쟁력을 갖추어 노트북, 데스크탑 PC, 액정 TV 및 자동차, 항공기 등에 폭넓게 사용되는 장치이다. 최근까지도 TFT-LCD의 성능을 개선시키려는 많은 연구⁽¹⁾가 활발히 진행되고 있다. 이와는 별도로 제작 공정의 효율성을 높이기 위한 유리기관 운반용 로봇^(2,3)과

[†] 책임저자, 회원, 한국과학기술원 대학원 기계공학과
E-mail : jshuh@khp.kaist.ac.kr
TEL : (042)869-5004 FAX : (042)869-8270

^{*} 한국타이어 중앙 연구소

^{**} 삼성전자

^{***} 회원, 한국과학기술원 기계공학과

유리기판의 효율적 보관에 관한 연구도 요구되며 진행되고 있다. 본 논문은 후자의 연구에 초점을 맞추었다.

TFT-LCD의 제작 시 액정디스플레이의 재료로 쓰이는 얇은 유리기판은 매우 큰 유리기판을 적절한 크기에 맞춰 잘라서 사용한다. 이 때문에 TFT-LCD의 제작 과정에서 대형 유리기판을 보관하거나 이동시키는 작업은 반드시 필요하다(Fig. 1참조). 이때 유리기판이 전체 크기에 비해 두께가 매우 얇기 때문에 보관하거나 이동하는 과정에서 처짐과 응력이 발생하며, 그 양은 받침대의 지지 위치에 따라 다르게 된다. 그러므로 보관 과정의 효율성과 유리기판의 건전성을 도모하기 위해서는 기판의 처짐량을 최소화하는 받침대의 위치가 파악되어야 한다. 본 연구에서 이러한 유리기판의 처짐을 최소화하려는 문제를 강건 최적설계 문제로 수식화하여 해결하려 한다.

2. 방법론

2.1 강건 (최적)설계

강건설계는 시스템에 악영향을 미치는 변동의 원인을 제거하는 것이 아니라 그 영향을 최소화하여 시스템의 성능을 향상시키는 획기적인 방법이다. 다구찌⁽⁴⁾는 그의 방법에서 시스템의 성능함수에 대한 평균과 표준편차로 표현되는 신호 대비 잡음비(Signal-to-Noise ratio)를 정의하고 활용하였다. 그 이후에 실험계획법을 연구하던 통계학자들에 의해 다구찌 방법에 대한 검증, 비판과 개선을 다루는 많은 연구가 진행되었다.⁽⁴⁻⁶⁾ 이러한 다양한 연구에서도 최종적으로 요구되는 특성치는 불확실성에 대한 성능함수의 평균과 분산이다.

이러한 방법과 함께 강건설계의 개념을 최적설계 수식화에 통합한 강건 최적설계 방법론의 연구

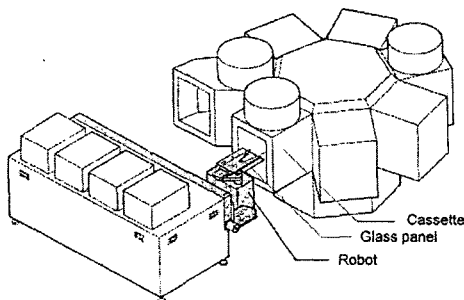


Fig. 1 Manufacturing process for making the TFT-LCD monitor⁽¹⁾

가 진행되고 있다. 이는 기존의 최적설계 수식화에서 시스템의 불확실성에 대한 목적함수의 강건성(sensitivity robustness)과 제한조건의 강건성(feasibility sensitivity)을 확보하기 위한 기법들이 통합되어 있다.⁽⁷⁻⁹⁾ 이 방법들에서도 중요한 요소는 각 강건성을 확보하기 위한 성능함수의 평균과 표준편차 혹은 이에 대응되는 지수들-민감도 지수,⁽¹⁰⁾ 구배지수⁽¹¹⁾ 등-이다. 그러므로 강건 (최적)설계를 위해서 필수불가결한 요소인 성능함수의 평균과 분산을 효율적으로 계산할 필요가 있으며 다음 절에서는 그러한 방법으로 함수근사 모멘트 방법을 이용하고자 한다.

2.2 함수 근사 모멘트 방법⁽¹²⁾

함수 근사 모멘트 방법(FAMM, function approximation moment method)는 일반적으로 음함수로 표현되는 시스템의 성능함수를 2차 다항식으로 근사하여 통계적 모멘트-평균(mean), 표준편차(S.D., standard deviation), 왜도(skewness), 첨도(kurtosis)-를 계산하고, 이들을 피어슨 시스템(Pearson system)⁽¹³⁾이라는 확률 분포 모델링에 관한 기법에 적용하여 손상확률을 계산하는 신뢰도 기법(reliability analysis) 중에 하나로서 저자 등에 의하여 개발되었다.⁽¹²⁾ 이 방법은 신뢰도 해석에 특화된 반응 표면법(response surface methodology)이라 할 수 있다. 전체 절차는 아래의 그림과 같으며, 이 방법의

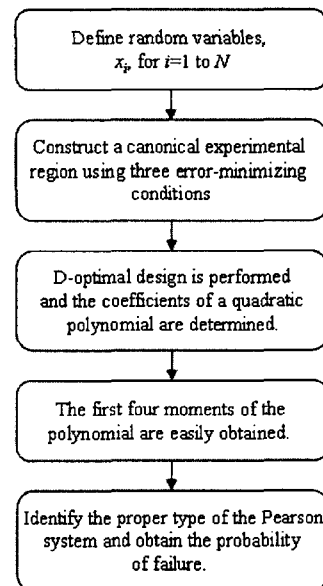


Fig. 2 The overall procedure of Function Approximation Moment Method

핵심은 함수 근사에 필요한 실험영역(canonical experimental region)을 결정하는 것이다. 이를 결정하기 위한 에러 최소화 조건과 자세한 유도 과정은 참고 문헌⁽¹²⁾을 참고하기 바란다.

이 방법이 1차 혹은 2차 신뢰도 방법(FORM/SORM)⁽¹⁴⁾과 비교하여 지니는 장점 중에 하나는 손상확률과 함께 평균과 표준편차와 같은 통계적 모멘트라는 추가적인 정보를 획득할 수 있다는 것이다. 따라서, 본 연구에서 다루고자 하는 강건 최적설계에 유용하게 적용할 수 있다. 즉 성능함수에 대한 평균과 표준 편차를 함수 근사 모멘트 방법으로 계산하고 이들을 최적설계 알고리즘과 연계함으로써 목적함수의 강건성을 확보할 수가 있게 된다.

3. 유한요소 모델 및 최적설계

3.1 유한요소 모델

Fig. 3은 본 연구에서 계산모델로 사용된 TFT-LCD 모니터의 소재로 쓰이는 대형 유리기판이 카세트에 보관된 모습을 개략적으로 묘사하고 있다. 이 그림에서 12개의 점은 기판을 지지하는 받침대로서 자세한 형상은 Fig. 4와 같다. 계산에 사용된 유리기판의 물성치는 'Soda Lime'⁽¹⁵⁾ 타입의 물성치와 유사하다.

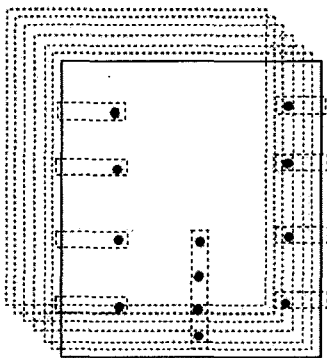


Fig. 3 Glass panels piled up in cassette

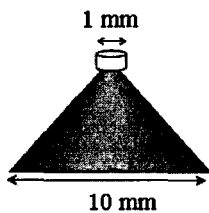
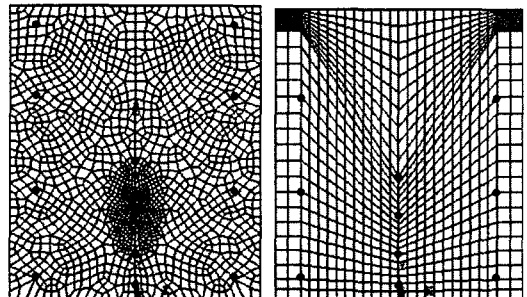


Fig. 4 Shape of support

실제 유리기판이 받침대에 의해 지지되는 것을 해석하기 위한 유한요소 모델로는 해석의 간략화를 위해 받침대에 대응되는 유리기판의 위치에 강제로 절점(node)를 생성하고 그 절점에 변위조건을 부여하는 방법을 생각할 수 있다. 이는 유리기판의 크기가 1m이상이라는 사실과 Fig. 4의 받침대의 크기를 고려하면 타당한 방법으로 보인다. 그러나 이 방법은 2가지 문제를 야기한다. 먼저 주어진 절점을 바탕으로 ANSYS가 제공하는 자유메시(free mesh)와 영역 메시(area mesh) 기능을 활용하여 생성한 유한요소 모델을 살펴보면(Fig. 5 참조), 해석 결과의 신뢰성을 확보하기에는 어려운 것으로 사료된다. 다음으로 받침대는 유리기판을 단순히 지지할 뿐이지 구속하고 있지는 않다는 사실이다. 즉 받침대의 일부는 유리기판을 실제로 지지하고 있지 않는 경우가 발생하게 되나, 변위를 구속하게 되는 제한조건으로는 이를 묘사하는 것은 불가능하다. 그러므로 본 연구에서는 비록 해석 시간이 많이 요구되나 유리기판과 받침대 사이의 접촉 여부를 정확히 표현할 수 있는 접촉 해석(contact analysis)를 도입한다.

앞서 설명하였듯이 전체 유리기판과 받침대의 크기를 비교하면 받침대는 아주 미소한 원형 실린더로 가정하여 모델링이 가능하다. 유리기판의 두께 역시 그 크기에 비해 1mm 이하로 매우 얇으므로 ANSYS가 제공하는 셸(shell) 요소인 Shell63을 사용하여 유한요소 모델을 제작한다(Fig. 6 참조). 그리고 처짐이 유리기판의 두께의 3/4 이상이 될 경우에 반드시 비선형 해석을 사용해야 한다는 "The American and the Canadian design codes for curtain wall and window systems"을 근거로 대변형(large deformation)을 고려한다.⁽¹⁶⁾ 실제로 해석시 선형 해석과 대변형을 고려한 비선형 해석 사이에서 처짐이 거의 2 배 정도 차이가 있음을 확인할 수 있다.



(a) Free-mesh (b) Area-mesh

Fig. 5 Finite element models

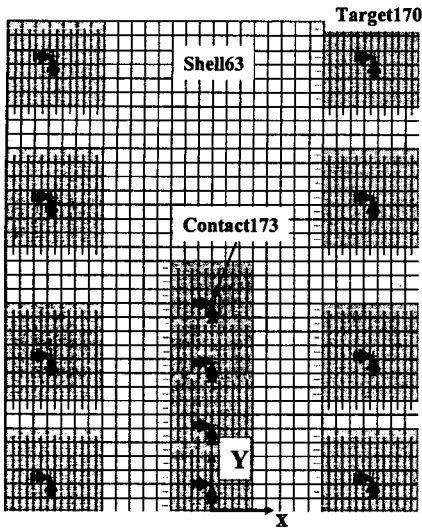


Fig. 6 FE model for contact analysis

이와 함께 유리기판과 받침대 사이의 단순지지를 해석하기 위해 접촉해석을 필요로 한다. 이를 위해 Fig. 6처럼 ANSYS가 제공하는 ‘Target 170’ 요소와 ‘Contat173’ 요소를 사용하여 기판의 일부와 받침대를 모델링한다. ‘Contact173’ 요소는 12개의 받침대를 모델링하며 그 곳에는 변위 경계조건이 부여된다. 이 받침대 주변에 접촉이 발생할 가능성이 있는 영역 즉, Fig. 6에서 회색 부분은 ‘Target170’ 요소를 이용한다. 그러므로 이 영역에서는 ‘Shell63’ 요소와 중첩이 된다.

본 연구에서는 받침대와 유리기판 사이의 마찰계수를 ‘0’으로 가정한다. 실제 마찰계수를 이용한 경우와 ‘0’이라고 가정한 경우에서 성능함수인 처짐량의 차이는 거의 없다. 그리고 최적설계 과정에서 마찰계수가 존재하는 경우는 비선형 해석에서 해의 수렴성이 보장되지 않는 경우가 자주 발생하여 최적화를 진행할 수 없게 되기 때문이다. 이러한 유한요소 모델을 바탕으로 한 초기 해석의 결과는 Fig. 7과 같으며 z축 방향의 변위는 -14.04 ~ +5.75mm이므로 유리기판의 총 처짐량은 19.79mm이다. 이는 각 유리기판 사이에 최소한 20mm의 공간이 요구됨을 의미한다. 이 해석에서 6번 받침대(Fig. 8 참조)의 반력이 ‘0’이며 이는 이 받침대가 실제로 유리기판의 지지에 아무런 역할을 하지 못함을 의미한다.

3.2 최적설계

Fig. 1의 상황에서 동일한 카세트에 유리기판을 효율적으로 보관하기 위해서는 유리기판의 처짐을

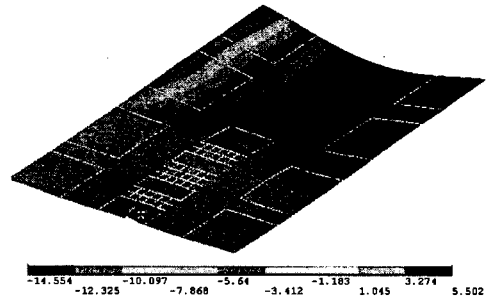


Fig. 7 Deformation shape of glass panel at initial analysis

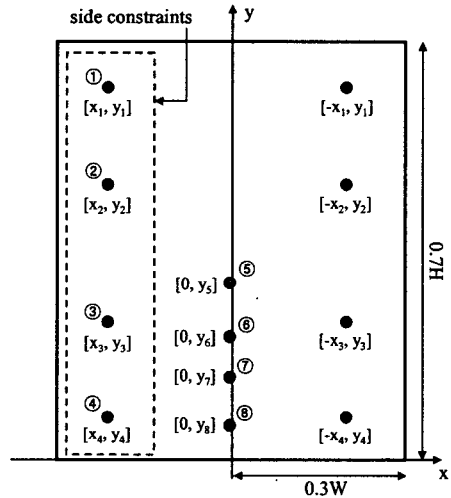


Fig. 8 Definition of design variables

최소화하여야 하고 이는 식 (1)과 같은 최적설계 수식화로 표현이 가능하다. 주어진 제한조건은 각 받침대 사이의 최소 간격을 의미한다. 설계변수는 Fig. 8 처럼 받침대의 x 축과 y 축의 좌표가 된다. 단, 5번 받침대는 설계변수에서 제외하며 모든 치수는 무차원하여 표기한다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize } f = |(d_z)_{\max} - (d_z)_{\min}| \\
 & \text{subject to } y_1 - y_2 \geq 0.05H \\
 & \quad y_2 - y_3 \geq 0.05H \\
 & \quad y_3 - y_4 \geq 0.05H \\
 & \quad y_6 - y_7 \geq 0.05H \\
 & \quad y_7 - y_8 \geq 0.05H
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 d_z 는 z 축 방향의 변위, H 는 유리기판의 치수를 의미한다.

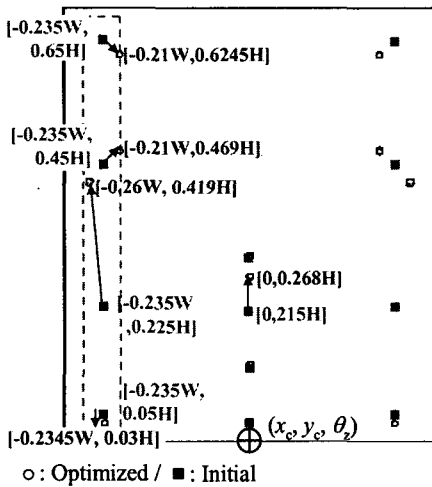


Fig. 9 Supporting positions at initial and optimal design

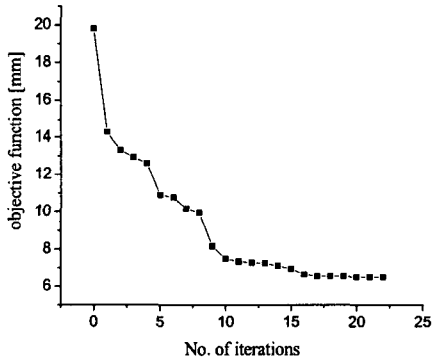


Fig. 10 History of objective function in optimization

최적설계에 필요한 민감도(sensitivity)와 알고리즘은 각각 유한 차분법(finite difference method)과 순차 이차 계획법(sequential quadratic programming)을 이용하였다. 총 22번의 축차 과정과 330번 정도의 접촉해석을 통해 최적설계가 도출되었다(Fig. 10참조). 최적화가 수행된 후 목적함수인 최대 처짐량은 6.498mm로 초기 설계에서의 처짐량과 비교할 때 67%정도로 대폭 감소하고 그때 받침대의 위치 변화는 Fig. 9과 같다. 특히 3번과 6번 받침대의 위치 변화가 두드러짐을 확인할 수 있다. 최적화 이후에 3번 받침대는 식 (1)의 제한조건에서 정의되는 2번 받침대와 최소 간격만을 유지하게 되었다. 그와는 대조적으로 7, 8번의 받침대의 위치는 거의 변화가 없다.

이와 같은 결정론적인 해는 실제로 존재하는 시스템의 불확실성을 반영하지 못하여 기대 이하의 성능이 얻어지는 경우가 자주 발생한다. 그러므로 우선 불확실성에 대한 유리기판 처짐량의 변동량

Table 1 Definition of random variables

	Mean	S.D.	$\phi(\cdot)$
x_c [mm]	0.0	5.0/3	Normal
y_c [mm]	0.0	5.0/3	Normal
θ_c [°]	0.0	1.0/3	Normal

Table 2 Robustness of objective function at initial and optimal design

	Initial	Optimal
Mean [mm]	20.493	9.848 (-52%)
S.D. [mm]	0.459	3.036 (561%)

을 확인하여 보자. 이를 위해 먼저 시스템의 불확실성을 정의하자. 가능한 불확실성은 받침대의 위치와 유리기판의 위치이다. 그러나 이들의 위치는 상대적으로 정의가 되므로 본 연구에서는 유리기판의 위치만을 불확실성으로 가정한다. Fig. 9에서 보여지듯이 하단 중심의 좌표를 (x_c, y_c, θ_c) 로 표현하고, Table 1처럼 평균과 표준편차를 가지는 정규분포를 따르는 독립 확률변수라고 한다. 이러한 불확실성에 대해 유리기판의 처짐량에 대한 강건성을 앞서 얻어진 초기 및 최적설계에 대해 살펴보자. 목적함수에 대한 평균과 표준편차를 함수 근사 모멘트 방법(FAMM)을 활용하여 계산하면 표 2와 같은 결과가 얻어진다. Table 2에서 쉽게 확인되듯이 최적화 과정에서 시스템의 성능을 표현하는 평균이 크게 감소하였지만 그에 상응하게 불확실성에 대한 강건성을 나타내는 표준편차가 폭발적으로 증가하였다. 이는 Fig. 9에서 보여지듯이 2, 3번 받침대와 5, 6번 받침대가 매우 근접하여 유리기판을 균일하게 지지하지 못하기 때문일 것이다. 그러므로 이 불확실성에 대한 강건성 측면에서 결정론적 최적설계의 결과는 상당히 만족스럽지 못하다.

4. 강건 최적설계 .

식 (1)은 식 (2)처럼 강건 최적설계로 재 수식화가 가능하다. 이 수식화를 통해 시스템의 불확실

성으로 야기되는 처짐량의 평균과 분산을 동시에 최소화할 수 있다. 시스템의 불확실성은 Table 2 처럼 유리기판 중심의 위치이며 설계변수는 최적설계와 동일하게 받침대의 위치이다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize } \sqrt{\mu_f^2 + \sigma_f^2} \\
 & \text{subject to } y_1 - y_2 \geq 0.05H \\
 & \quad y_2 - y_3 \geq 0.05H \\
 & \quad y_3 - y_4 \geq 0.05H \\
 & \quad y_6 - y_7 \geq 0.05H \\
 & \quad y_7 - y_8 \geq 0.05H
 \end{aligned} \tag{2}$$

최적설계와 동일한 방법의 민감도와 알고리즘을 이용하여 최적화를 수행하면 Figs. 11, 12와 표 3과 같은 강건 최적설계가 얻어진다. 총 6번의 축차와 1000번 정도의 접촉 해석을 통해 해가 도출되었다. 계산량이 최적설계에 비해 방대해진 이유는 식 (2)의 목적함수를 구성하는 처짐량에 대한 평균과 표준편차를 계산하기 위해서 각 함수계산에서 함수 근사 모멘트 방법이 10번의 접촉해석을 요구하기 때문이다. 얻어진 결과를 최적설계의 받침대의 위치와 비교하면 1, 2, 3, 6번의 좌표 이동이 확연히 다를 수 있다. Fig. 11에서 확인할 수 있듯이 1번 받침대의 이동이 우측 하단으로 크게 이동한 반면에 2번의 경우는 최적설계와 다르게 우측 하단으로 이동한다. 3번 받침대는 최적설계와 같은 방향으로 절반 정도의 이동량을 가진다. 전체적으로 최적설계와 비교하였을 때 받침대의 위치가 Fig. 11에서 점선으로 표현된 설계영역 내부에서 유리기판의 중심부에 대해 골고루 분포하고 있음을 확인할 수 있다.

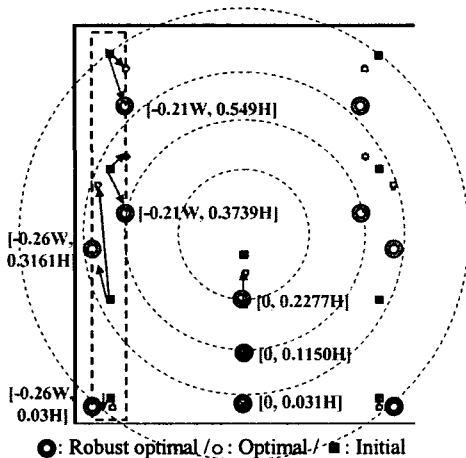


Fig. 11 Robust optimal design of glass panel

Table 3에 강건 최적설계의 해에 대한 평균과 표준편차를 정리하였다. Table 2의 초기설계에서의 평균과 표준편차와 비교할 때 강건 최적설계에서 시스템의 성능은 크게 향상된 것으로 판단된다. 즉 평균과 표준편차 모두가 크게 감소하였다. 그러나 Table 2에 정리된 최적설계와 비교하면 강건 최적설계에서 평균이 1.1mm 정도 증가한 반면에 시스템의 강건성을 묘사하는 표준편차는 2.7mm 정도로 대폭 감소하였다. 즉 불확실성에 대한 시스템의 강건성을 확보하기 위해 성능을 표현하는 평균의 감소량에서 약간의 손해를 감수한 결과이다.

5. 결론

TFT-LCD의 전체 제작과정에서 필연적인 유리기판의 보관과정을 개선하기 위한 연구이다. 특히 대용량의 유리기판을 좀 더 효율적으로 카세트에 저장하기 위한 받침대의 지지위치를 결정론적 최적설계와 강건 최적설계로 수식화하여 그 결과를 비교 검토하였다. 먼저 유리기판이 받침대에 의해 지지되는 현상을 묘사하기 위하여 접촉해석을 위한 유한요소 모델을 생성하였다. 이상적인 제작과정, 즉 시스템의 불확실성이 존재하지 않은 상황에서 유리기판의 처짐량을 최소화하는 받침대의 최적 위치를 결정하였다. 그러나 이 최적 위치는

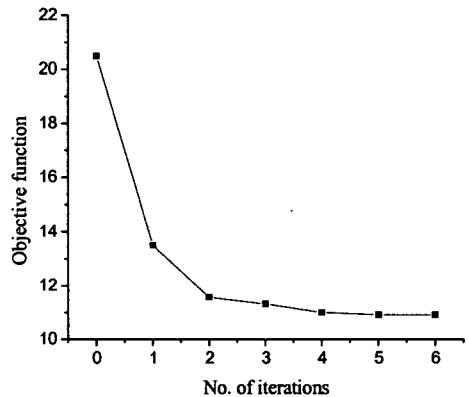


Fig. 12 History of objective function in robust optimization

Table 3 Comparison of results at robust optimal design

	Robust optimal
Mean [mm]	10.912
S.D. [mm]	0.314

현실 상황에서 존재하게 되는 불확실성에 의해 기대 이하의 성능을 줄 수 있음을 처짐량의 표준편차를 통해 확인할 수 있었다. 이러한 현상을 개선하기 위하여 최적화 과정에 불확실성을 통합한 강건 최적설계를 수행하여 처짐량의 평균을 대폭 감소시키고 동시에 변동량도 감소시키는 결과를 얻었다. 이러한 과정에서 필요한 성능함수의 평균과 표준편차는 함수 근사 모멘트 방법(FAMM)을 통해 추정하였다. 그 결과 결정론적 최적설계는 불확실성이 상존함을 고려할 때 적절하지 않음을 보여 주었으며, 강건 설계로 다루는 것이 이에 대한 훌륭한 수단임을 보여 주었다.

그러나, 본 연구가 실제 현장에 더 큰 도움을 제공하기 위해서는 가정한 불확실 변수에 대한 실제 분포와 그 파라미터를 실험을 통해 검증할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 삼성전자의 지원 과제인 “설계자용 I-DEAS 기반 최적 및 강건 설계 툴의 확장개발 및 적용”의 일환으로 수행 되었음을 밝힌다.

참고문헌

- (1) Kim, J. S., 2001, “TFT-LCD 개요 및 연구 개발 동향,” 기계저널, Vol. 41, No. 5, pp. 37~41.
- (2) Choi, G. H., Han, C. W., and Lee, S. R., 2002, “The Study on the Development of Composite Robot Hand for TFT-LCD Glass Transport,” *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 26, No. 7, pp.1357~1365.
- (3) Oh, J. H. and Lee, D. G., 1999, “Composite robot end effector for manipulating large LCD glass panels,” *Composite Structures*, Vol. 47, pp. 497~506.
- (4) Phadke, M. S., 1989, *Quality engineering using robust design*, Prentice-Hall International Inc.
- (5) Kacker, R. N., 1985, “Off-line Quality Control, Parameter Design, and the Taguchi Methods,” *Journal of Quality Technology*, Vol.17, pp.176~188.
- (6) Nair, V. N., 1992, “Taguchi’s Parameter Design: A Panel Discussion,” *Technometrics*, Vol. 34, No. 2, pp.127~161.
- (7) Balling, R. J., Free, J. C., and Parkinson, A. R., 1986, “Consideration of Worst Case Manufacturing Tolerances in Design Optimization,” Vol. 108, pp. 438~441.
- (8) Parkinson, A., Sorensen, C., and Pourhassan, N., 1993, “A General Approach for Robust Optimal Design,” *Journal of Mechanical Design*, Vol. 115, pp. 74~80.
- (9) Lee, K. W., and Park, G. J., 2001, “Robust Optimization Considering Tolerances of Design Variables,” *Computers & Structures*, Vol. 79, pp. 77~86.
- (10) Sundaresan, S., Ishii, K., and Houser, D. R., 1991, “A Procedure Using Manufacturing Variance to Design Gears with Minimum Transmission Error,” *Journal of Mechanical Design*, Vol. 113, pp. 318~324.
- (11) Han, J. S., and Kwak, B. M., 2001, “Robust Optimal Design of a Vibratory Microscope Considering Fabrication Errors,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, pp. 662~671.
- (12) Huh, J. S., Kim, K. H., Kang, D. W., Gweon, D. G., and Kwak, B. M., 2006, “Performance Evaluation of Precision Nanopositioning Devices Caused by Uncertainties Due to Tolerances Using Function Approximation Moment Method,” *Review of Scientific Instruments*, It will be published.
- (13) Johnson, N. L., Kotz, S., and Balakrishnan, 1994, *Continuous Univariate Distributions*, John Wiley & Sons.
- (14) Melchers, R. E., 1999, *Structural Reliability Analysis and Prediction*, John Wiley & Sons.
- (15) <http://www.mindrum.com/tech.html#glassprop>
- (16) So, A. K. W. and Chan, S. L., 1996, “Nonlinear Finite Element Analysis of Glass Panels,” *Engineering Structures*, Vol. 18, No. 8, pp.645~652.