

휴대폰 카메라용 렌즈 시스템의 강건최적설계

정상진*, 민준홍*, 최동훈**, 김주호***

Robust Optimization of a Lens System for a Mobile Phone Camera

Sangjin Jung*, Junhong Min*, Dong-Hoon Choi** and Ju Ho Kim***

ABSTRACT

A lens system for mobile phone cameras is comprised of various lenses and designed so as to satisfy design requirements for responses such as a modular transfer function (MTF). However, it is difficult to manufacture and assemble camera modules to maintain the same performance compared with the designed camera modules, because of uncertainty. We should always design a lens system by considering uncertainty that can be caused by errors in the manufacturing and assembly process of mobile phone cameras. The robust optimization offers tools of making robust decisions with the consideration of design parameters, uncontrollable parameters, and the variance of the system. Using an efficient reliability analysis method and an optimization algorithm, we obtained robust optimization results that maximize the mean of MTF and minimize the standard deviation and proposed a new robust design process for a lens system.

Key words : Lens, Mobile Phone Camera, Reliability Analysis, Robust Optimization

1. 서 론

휴대폰용 카메라 모듈의 렌즈 시스템은 다양한 형상을 가진 여러 렌즈의 조합으로 이루어져 있으며, 일반적으로 변조전달함수(modular transfer function; MTF)^[1]와 같은 광학 성능지수가 최대화되도록 설계된다. 그러나, 제품의 실제를 통해 목표로 한 카메라 모듈의 성능과 실제 생산된 카메라 모듈의 성능이 정확히 일치하기는 현실적으로 불가능하다. 즉, 기존의 전통적인 설계 기법을 통해 얻어진 설계안은 설계요구조건을 모두 만족시키지만 이를 토대로 제작한 제품의 불량률은 높은 경우가 빈번하였다. 그 원인은 실제 시스템을 구성하고 있는 설계인자와 미세어인자 및 시스템이 모두 불확실성(uncertainty)을 갖고 있지만 설계단계에서 이를 고려하지 못했기 때문이다.

제품 성능의 변동을 줄이기 위한 방법으로서 주로

변동의 원인을 제거하기 위해 많은 노력을 기울인다. 그러나 변동의 모든 원인에 대한 파악이 매우 어려우며, 변동의 원인이 제어 불가능한 경우도 많다. 또한 변동의 원인을 제거하는 작업 자체가 엄청난 비용을 유발하게 된다. 따라서, 굳이 성능 변동의 원인을 제거하지 않고, 제어가 가능한 원인들의 영향이 최소화 되도록 설계하여 제품 성능의 변동을 줄이려는 강건설계 개념이 등장하게 되었다^[2,3].

가장 대표적인 강건설계 기법으로는 다구찌법(Taguchi method)^[3,5]이 있다. 다구찌법은 제품의 성능 특성이 노이즈에 민감하도록 설계변수의 최적 수준을 구하는 방법이다. 다구찌법은 통계적 지식이 없어도 사용이 가능하며 실제 실험을 기반으로 하는 설계에서 쉽게 적용할 수 있는 장점이 있다. 그러나 설계 제한조건을 직접 처리할 수 없고, 성능함수의 평균과 분산을 분리해서 다루기 어렵다. 또한 직교배열표(orthogonal array)를 이용하기 때문에 설계변수를 이 산공간에서만 정의가 가능하며, 사용자가 미리 정한 수준내에서의 최적 조합 밖에 갖지 못한다.

이와 같은 다구찌법의 한계를 극복하면서 수학적으로 잘 발달된 기존의 최적설계 기법을 이용할 수 있는 강건최적설계(robust optimization)^[6,7] 기법이 최근 개

*한양대학교 대학원 기계공학과

**교신저자, 정회원, 한양대학교 최적설계신기술연구센터(iDOT)

***삼성전기(주) OMS 사업부

- 논문투고일: 2010. 03. 24

- 논문수정일: 2010. 08. 19

- 심사완료일: 2010. 08. 20

발되었다. 초기 강건최적설계에 관한 연구는 목적함수의 강건성만을 고려하는 한계를 가지고 있었으나, 이후 제한조건에 대한 강건성을 함께 고려한 이론체계가 확립되었다. 강건최적설계에서는 목표 성능을 향상시키면서 목표 성능의 강건성을 동시에 확보하기 위해 성능에 관한 평균과 변동을 모두 목적함수로 고려한다. 즉, 두 개의 목적함수를 함께 다루기 위해 다중목적함수 최적화(multi-objective optimization) 형태로 정식화하여 최적화를 수행한다.

강건최적설계에서 변동은 일반적으로 표준편차를 나타내며, 시스템의 응답에 대한 평균과 표준편차는 신뢰도 해석(reliability analysis; RA)을 통해 구할 수 있다. 신뢰도 해석 기법에는 추출법(sampling method), 전개 방법(expansion method), 최대가능손상점(most probable failure point; MPP) 기반 방법, 근사적분법(approximate integration-based method) 등이 존재한다⁸⁾. 신뢰도 해석을 하기 위해서는 시스템의 응답 함수와 각 확률 변수들에 대한 결합확률밀도함수(joint probability density function; Joint PDF)를 신뢰영역에서 다중 적분해야 한다. 그러나, 다중 적분을 직접 계산하는 것은 현실적으로 불가능하기 때문에, 이 값을 근사적으로 추정하는 근사적분법에 관한 연구가 최근 활발히 진행되고 있다. 특히 근사적분법 중에서 가법 분해법(additive decomposition)을 사용하여 신뢰도 해석의 정확성과 효율성을 높인 차원 감소법(dimension reduction method; DRM)^{9,10)}과 이를 개선한 기법들^{11,12)}이 개발되어 다양한 분야에서 응용되고 있다.

본 연구에서는 기존의 렌즈 시스템 설계 방법에서 발생하는 제품의 불량률을 줄이기 위해 강건최적설계 방법을 도입하고자 한다. 이를 위해 렌즈 시스템의 설계 인자와 비제어 인자 및 시스템의 변동을 정량화하여 설계 과정에 포함시킬 것이다. 그리고 효율성과 정확성을 높인 신뢰도 해석 기법으로 알려진 개선된 차원 감소법과 강건최적설계에 적합한 최적화 알고리즘을 적용하여 렌즈 시스템의 성능을 최대화하면서 동시에 성능의 변동을 최소화하고 궁극적으로 카메라 모듈의 품질을 향상시킬 수 있는 강건최적설계 방법을 제시하고자 한다.

2. 휴대폰 카메라용 렌즈 시스템

2.1 렌즈 시스템의 구조

본 연구에서 이용된 휴대폰용 카메라 모듈은 Fig. 1과 같이 4개의 렌즈와 1개의 적외선 필터(IR filter),

이미지 센서(image sensor)로 이루어져 있다. 즉, 첫 번째 렌즈인 L1부터 적외선 필터까지 빛이 순차적으로 통과한 후, 이미지 센서 면에 상이 맺히게 된다.

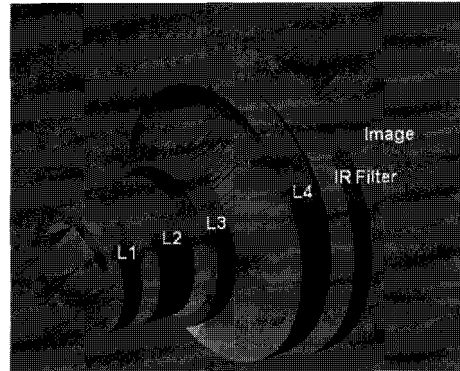


Fig. 1. 3D configuration of the lens system.

이미지 센서는 휴대폰용 카메라 모듈에서 상의 저장을 담당하는 부분으로써 필름 카메라의 필름에 해당하는 부분이라 할 수 있다.

2.2 설계변수

일반적으로 렌즈 시스템을 설계할 때, 렌즈의 두께와 렌즈 사이의 거리를 어떻게 조정하느냐에 따라 렌즈 시스템의 광학 성능이 크게 변화한다. 따라서 본 연구에서는 초기 설계안 대비 각 렌즈 두께의 변화량과 각 렌즈 사이 거리의 변화량을 설계 변수로 설정하였다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 렌즈 두께와 렌즈 사이의 거리의 초기값은 각각 $t_1^0, t_2^0, t_3^0, t_4^0$ 와 $d_1^0, d_2^0, d_3^0, d_4^0$ 로 정의하였으며, 실제 설계변수인 렌즈 두께의 변화량과 각 렌즈 사이의 거리의 변화량은 $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, \Delta t_4$ 와 $\Delta d_1, \Delta d_2, \Delta d_3, \Delta d_4$ 와 같이 나타내었다. 그리고 각 설계변수는 모두 정규분포를 갖는 확률 변수이다.

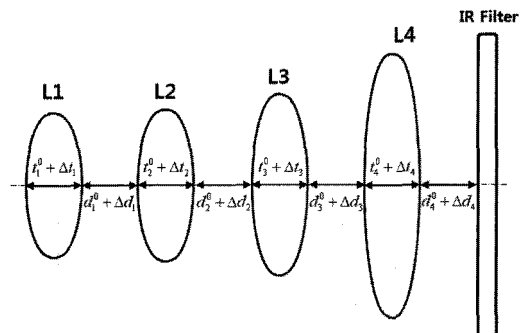


Fig. 2. Design variables of the lens system.

2.3 비제어 인자

렌즈 시스템에는 설계자의 제어가 가능한 설계 인자 외에도 설계 시 제어가 불가능한 여러 가지 오차들이 존재한다. 이러한 오차들은 렌즈의 가공 및 조립 시 언제든지 발생할 수 있으며, 본 연구에서는 이러한 오차와 관련된 인자들을 비제어 인자로서 정의하였다. 렌즈 시스템의 성능에 민감한 영향을 미치는 비제어 인자의 종류에는 렌즈의 디센터(decenter), 틸트(tilt), 디센터와 틸트의 발생 방향에 대한 노이즈(noise) 등이 있다.

렌즈의 가공 및 조립 시 발생하는 디센터, 틸트 등의 오차는 Fig. 3과 같이 렌즈의 한 면에서 발생하거나 Fig. 4와 같이 렌즈 전체에 대해서 발생할 수도 있다. 렌즈 시스템에 대한 정확한 광학 해석 및 설계를 위해서는 이 오차들에 대해 적절한 공차를 부여해야 한다^[13]. 공차는 불확실성을 포함하는 확률 변수이기 때문에 확률 분포 형태로 정의된다. 렌즈 시스템의 비제어 인자들인 공차의 종류와 확률 분포의 형태를 Table 1과 같이 정의하였다.

Surface tilt는 Fig. 3과 같이 렌즈의 앞, 뒷면에서 발생할 수 있기 때문에 각 렌즈 당 두 군데씩 총 8개의 공차가 존재한다. Surface decenter 역시 8개가 존재한다. Element tilt와 element decenter는 렌즈 전체에 대해서 발생하는 오차이기 때문에 각각 4개씩 존재한다. Image tilt라고 표기한 부분은 이미지 센서 면에서 발생하는 틸트를 말한다. 디센터와 틸트에 관한 총 25개의 공차는 모두 정규 분포를 갖는다.

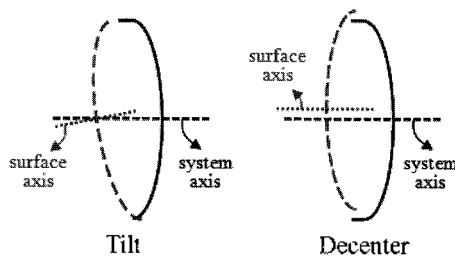


Fig. 3. Types of surface tolerances.

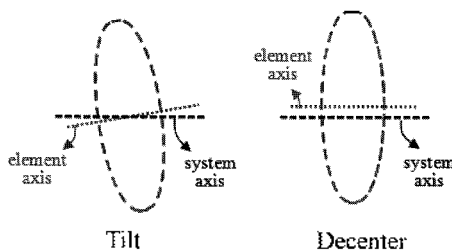


Fig. 4. Types of element tolerances.

Table 1. Uncontrollable parameters of the lens system

Tolerance type	Distribution	No. of tolerances
Surface decenter	Normal	8
Surface tilt	Normal	8
Element decenter	Normal	4
Element tilt	Normal	4
Image tilt	Normal	1
Noise	Uniform	24

한편, 렌즈 시스템에서는 디센터나 틸트가 0°와 360° 사이에서 어느 방향으로 발생할지 알 수 없기 때문에, 본 연구에서는 이러한 노이즈를 비제어 인자로 설정하였고 모두 균일 분포로 정의하였다. 센서 면에서는 틸트 발생방향에 따른 노이즈를 고려하지 않으므로 노이즈 인자는 Table 1에서와 같이 총 24개가 존재한다.

2.4 관심 응답

일반적으로 렌즈 시스템의 광학 성능을 평가하기 위해 Fig. 5와 같이 흰 선과 검은 선이 교대로 배열된 판을 주로 이용한다. 이러한 판을 렌즈 시스템을 통해 결상시켰을 때, 상에 대한 가시도를 정의한 함수를 바로 MTF라고 한다. MTF는 렌즈 시스템 설계 시 광학 성능을 평가하기 위한 가장 대표적인 성능지수로 주로 이용된다. MTF는 0과 1사이의 값을 가지며 값이 클수록 광학 성능이 좋음을 나타낸다.

본 연구에서는 상용 광학 해석 프로그램인 Code-V를 이용하여 Fig. 1과 같은 렌즈 시스템의 광학 해석을 수행한 후 Fig. 6과 같이 이미지 센서의 네 군데 필드(field)에서 MTF를 측정하였다. 각 렌즈에 존재하는 틸트나 디센터 등으로 인해 각 필드에서의 MTF 값은 각각 다르게 측정된다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 6과 같이 각 필드의 0.75 지점에서 측정된 MTF 값 중에서 가장 작은 값을 관심 응답 R로 이용하였다.

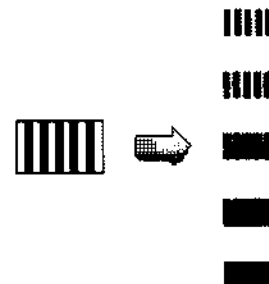


Fig. 5. Modular transfer function (MTF).

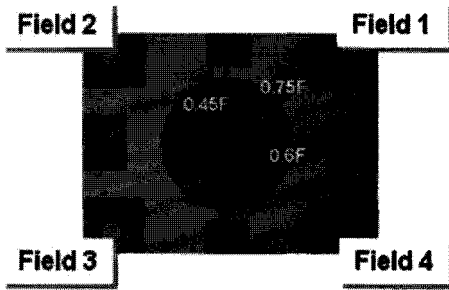


Fig. 6. 0.75 field of the lens system.

3. Process Integration

설계변수, 비제어 인자, 관심 응답이 정의된 렌즈 시스템에 대한 해석 및 설계를 위해 본 연구에서는 2가지 상용 프로그램을 이용하였다. 먼저, 렌즈 시스템의 광학 해석을 위해 상용 광학 해석 프로그램인 Code-V를 이용하였다. 그리고 Code-V를 통해 모델링된 렌즈 시스템의 광학 해석 과정을 자동화하고, 여러 설계 기법들을 적용하여 설계 개선을 하기 위해 상용 PIDO(process integration and design optimization) 툴인 PIANO 3.0을 이용하였다.

렌즈 시스템의 설계를 위해서는 반복적인 광학 해석이 가능하도록 해석 과정의 자동화가 필수적으로 이루어져야 한다. 본 연구에서는 PIANO의 mapping wizard를 이용하여 렌즈 시스템의 입력, 해석, 출력 과정을 자동화하였고, Fig. 7과 같이 광학 해석을 위해 필요한 여러 해석 컴포넌트 사이의 data flow를 설정하여 설계변수의 변경에 따라 자동화된 광학 해석을 반복적으로 수행할 수 있도록 하였다.

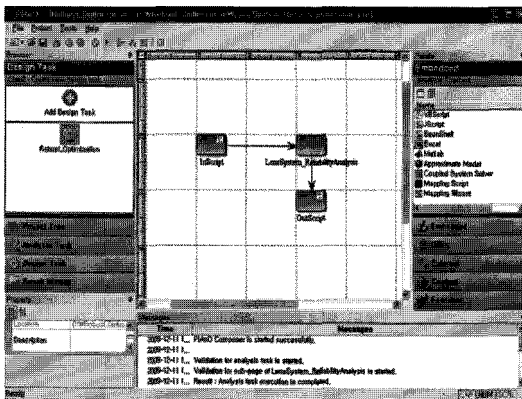


Fig. 7. Process Integration using PIANO 3.0.

4. 설계 기법

4.1 강건최적설계의 정식화

일반적인 최적설계 문제는 설계변수 \mathbf{x} , 목적함수 f 와 제한조건 \mathbf{g} 로 구성되며, 다음과 같이 정식화된 형태로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 &\text{Find} && \mathbf{x} \\
 &\text{to minimize} && f(\mathbf{x}) \\
 &\text{subject to} && g_j(\mathbf{x}) \leq 0, \quad j = 1, \dots, m \\
 &&& x_i^L \leq x_i \leq x_i^U, \quad i = 1, \dots, n
 \end{aligned} \tag{1}$$

식 (1)과 같은 정식화를 이용하는 기존의 최적설계 기법은 시스템의 해석 시 고려되는 여러 입력변수들이 미세한 변동 없이 항상 일정한 값으로 입출력 된다고 가정하는 확정론적 접근법(deterministic approach)이다. 그러나 렌즈 시스템과 같은 설계 공학 시스템은 설계변수, 비제어 인자, 시스템의 응답 등에 항상 변동이 존재하기 때문에 설계자가 처음 의도한 제품의 성능과 실제 생산된 제품의 성능이 일치하지 않는 경우가 대부분이며, 성능의 변동을 줄여 제품의 품질을 향상시키기 위해서는 많은 노력과 비용이 소요된다.

이와 같은 제품 성능의 변동을 효과적으로 줄이기 위해서 성능 변동의 원인을 제거하지 않고 원인의 영향을 최소화하는 강건설계 개념이 등장하게 되었다. 가장 대표적인 강건설계 기법에는 다구찌법이 있다. 다구찌법은 제품의 성능 특성이 노이즈에 둔감하도록 설계변수의 최적 수준을 구하는 방법이다. 그러나 다구찌법은 다양한 설계 제한조건을 처리할 수 없고, 성능함수의 평균과 분산을 분리해서 다룰 수 없다. 또한 직교배열표를 이용하기 때문에 설계변수를 이산공간에서만 정의할 수 있는 문제가 존재한다.

다구찌법의 한계를 극복하면서 수학적으로 잘 발달된 기존의 최적설계 기법을 이용하기 위해 강건최적설계 기법이 개발되었다. 본 연구에서는 강건최적설계를 적용하여 렌즈 시스템의 관심 응답 R 의 평균은 최대화하고 R 의 표준편차는 최소화하여, 목표 성능의 향상과 변동발생 요인에 대한 목표 성능의 강건성을 동시에 확보하고자 한다. 앞에서 설명한 바와 같이 관심 응답 R 은 각 필드의 0.75 지점에서 측정된 MTF 값 중에서 가장 작은 값이다. 이와 같은 설계 요구사항을 반영하여 정식화하면 다음과 같다.

Find $\mu_{\Delta i}, \mu_{\Delta j}$

to minimize
$$F = -\frac{\mu_R}{\sigma_R} + \frac{\sigma_R}{\mu_R} \quad (2)$$

subject to $-0.05 \leq \mu_{\Delta i} \leq 0.05, \quad i = 1, \dots, 4$
 $-0.05 \leq \mu_{\Delta j} \leq 0.05, \quad j = 1, \dots, 4$

식 (2)에서 $\mu_{\Delta i}$ 는 설계 인자인 렌즈 두께의 변화량에 대한 각각의 평균 벡터이며, $\mu_{\Delta j}$ 는 렌즈 사이의 거리의 변화량에 대한 각각의 평균 벡터를 의미한다. 목적함수 F 는 μ_R 과 σ_R 을 동시에 최소화하도록 구성된 다중 목적함수이다. μ_R^* 과 σ_R^* 은 μ_R 과 σ_R 을 정규화하기 위해 이용된 기준치이며, 일반적으로 초기 설계전에서의 μ_R 과 σ_R 이 이용된다. 본 연구에서는 다중 목적함수 최적화를 위해 식 (2)와 같이 평균과 표준편차에 대한 가중치 합을 목적함수로 설정한 가중치법(weighting method)을 적용하였고, 가중치는 각각 동일하게 설정하였다.

4.2 차원 감소법을 이용한 신뢰도 해석

강건최적설계를 수행하기 위해서는 설계변수의 확률 분포가 시스템의 입력인 때 시스템의 불확실성을 고려하여 관심 응답에 대한 확률 분포를 정량화할 수 있어야 한다. 이를 위해 확률 및 통계적인 기법을 이용하여 설계변수의 불확실성을 고려하고 시스템의 불확실성을 파괴 확률(probability of failure; PF)로 정량화할 수 있는 신뢰도 해석 기법이 필요하다.

본 연구에서는 정확하면서도 효율적인 신뢰도 해석을 위해 PIANO 3.0에 탑재된 기법 중에 하나인 개선된 차원 감소법(enhanced dimension reduction method; eDR)^[11]을 이용하였다. cDR은 근사 적분법 중에 하나로서 가법 분해법(additive decomposition)을 사용하여 다중 적분식을 다변수 일차 적분으로 바꾸어 계산하는 방법으로 정확성과 효율성 측면에서 기존의 신뢰도 해석 기법에 비해 향상된 기법으로 알려져 있다.

시스템의 응답에 대한 통계적 모멘트를 계산하기 위해 수치 적분을 수행해야 하며, 기존의 방법들이 비선형 시스템에서 수치적으로 불안정해지는 단점을 극복하기 위해 eDR에서는 적응 심슨 구적법(adaptive Simson rule)을 사용한다. 그리고, 실험점 이외의 응답 값은 추가 해석없이 이동 최소 자승법(moving least square; MLS)을 통해 근사하여 예측한다.

cDR의 장점은 단지 $2n+1$ 또는 $4n+1$ 의 실험점만으로 신뢰도 해석이 가능하다는 점이다. 여기서 n

은 확률 변수의 개수를 나타낸다. 일반적으로 $2n+1$ 을 주로 이용하며, 비선형성이 큰 공학 문제에서는 $4n+1$ 샘플링을 수행한다. 이런 형태의 샘플링을 축설험계획법(axial design of experiments; ADOE)이라 한다. eDR은 이와 같은 수치 적분 과정을 통해 시스템의 통계적 모멘트를 4차 항까지 구한 뒤 시스템의 응답에 대한 PDF를 피어슨 시스템(Pearson system)을 이용하여 구하고 신뢰도를 계산한다.

본 연구에서는 정확한 신뢰도 해석을 수행하기 위해 $4n+1$ 샘플링을 적용하였으며, 다음 절에서 cDR을 이용하여 강건최적설계를 수행한 결과와 eDR의 정확성 및 효율성을 분석한 결과에 대해 알아보려고 한다.

4.3 최적화 알고리즘

본 연구에서는 식 (2)와 같이 정식화된 강건최적설계 문제의 최적해를 얻기 위한 알고리즘으로 PIANO 3.0의 최적화 알고리즘 중에 하나인 점진적 이차 반응표면법(progressive quadratic response surface modeling; PQRSM)^[14,15]을 이용하였다. 이 기법은 순차적 근사 최적설계(sequential approximate optimization; SAO) 기법 중에 하나로서 해석 모델의 민감도를 계산하지 않고도 최적화가 가능한 함수 기반 최적화(function-based optimization) 기법이다.

렌즈 시스템의 강건최적설계 문제의 경우 최적설계 시 반복적으로 신뢰도 해석을 수행해야 하는데, 이때 신뢰도 해석을 수행하여 얻어지는 민감도는 부정확할 수 밖에 없다. 따라서, 일반적인 국부 최적화(local optimization)에서 자주 이용되는 구배 기반 최적화(gradient-based optimization) 기법을 사용할 경우, 부정확한 민감도로 인해 효율성이나 정확성이 떨어지거나 엉뚱한 설계 결과를 얻는 문제가 발생한다.

이에 반해 PQRSM은 다른 최적화 기법에 비해 효율적이면서 정확한 최적해를 얻을 수 있는 장점이 있다. 설계변수의 개수가 N 개일 때 기존의 근사 최적화 기법에 비해 상당히 적은 $2N+1$ 개의 실험점만으로 설계변수간의 교호작용을 고려한 항까지 근사적으로 계산하여 full quadratic polynomial 모델을 생성할 수 있으므로 정확하면서도 효율적으로 근사모형을 만들 수 있다. 따라서 PQRSM을 본 연구의 강건최적설계를 위해 적합한 최적화 알고리즘으로 판단하였다.

5. 강건최적설계 결과

본 절에서는 신뢰도 해석 기법인 eDR과 최적화 알고리즘인 PQRSM을 이용하여 강건최적설계를 수행

한 결과에 대해 살펴보고자 한다. 또한 최적해를 얻은 후, eDR을 이용한 신뢰도 해석 결과의 검증을 위해 샘플 사이즈를 매우 크게 설정한 라틴방격추출법(Latin hypercube sampling; LHS)^[6]을 이용하여 다시 한번 신뢰도 해석을 수행한 결과와 비교해 보았다.

설계변수로 설정한 렌즈 두께의 변화량에 대한 각각의 평균과 렌즈 사이의 거리의 변화량에 대한 각각의 평균에 대한 강건최적설계 결과를 Table 2와 Fig. 8과 같이 정리하였다. 결과를 통해 확인할 수 있듯이 첫 번째부터 세 번째 렌즈까지에 관련된 설계변수들이 상대적으로 큰 변화를 보이며, 네 번째 렌즈와 관련된 두께의 변화량과 거리의 변화량은 거의 변화가 없음을 파악할 수 있었다.

Table 2와 Fig. 9에서는 목적함수로 설정한 관심 응답 R 의 평균과 표준편차에 대한 결과를 보여주고 있다. 이 결과는 eDR을 이용하여 최적해를 얻은 후, 정확한 해석 결과 도출을 위해 LHS의 샘플을 10000개로 설정하여 초기점과 최적점에서 다시 한번 신뢰도 해석을 수행하여 얻은 결과이다.

Table 2. Robust optimization results of the lens system

Design Variables	Initial	Optimal
μ_{Δ_1}	0.000	0.008
μ_{Δ_1}	0.000	-0.004
μ_{Δ_2}	0.000	0.016
μ_{Δ_2}	0.000	0.009
μ_{N_3}	0.000	0.008
μ_{N_3}	0.000	-0.001
μ_{Δ_4}	0.000	0.000
μ_{Δ_4}	0.000	0.000
Objective Function	Initial	Optimal
Mean of R	0.519	0.544
Standard deviation of R	0.042	0.036

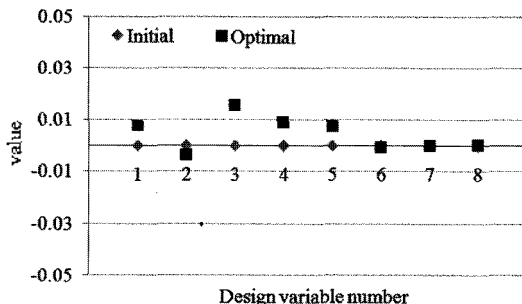


Fig. 8. Optimum values for design variables.

R 의 평균의 경우 초기값에 비해 약 5% 증가하였으며, 표준편차는 초기값 대비 약 14% 감소한 결과를 얻었다. 즉, 초기 설계안에 비해 렌즈 시스템의 광학 성능은 좋아졌으며 성능의 변동은 오히려 줄어든 강건한 최적해를 얻었음을 알 수 있다.

Table 3에서는 초기점과 최적해에서의 eDR과 LHS의 결과 비교를 통해, 최적화 과정에서 반복적인 신뢰도 해석을 수행하는데 이용된 eDR이 어느 정도의 정확성을 보이는지 알아보았다. Table 3에서 eDR의 데이터는 최적화 과정에서 초기점에서의 신뢰도 해석과 강건최적설계 수렴 후 얻은 결과이다. LHS는 Table 2에서 신뢰도 해석의 정확성을 위해 재해석 후 얻었던 결과이다. 비교 결과, 초기점과 최적해에서 eDR이 LHS와 거의 유사한 신뢰도 해석 결과를 보였다.

본 연구에서 확률 변수의 개수 n 은 설계변수와 비제어 인자를 포함한 57개이며 eDR은 신뢰도 해석을 위해 $4n+1$ 샘플링을 수행하였다. 따라서 eDR을 이용할 경우 단지 229번의 광학 해석(Intel Core2 CPU @ 1.86GHz, 2GB RAM 기준, 약 23분 소요)만으로 1회의 신뢰도 해석이 완료되는데 반해, LHS는 1회의 정확한 신뢰도 해석을 위해 10000번의 광학 해석(Intel Core2 CPU @ 1.86GHz, 2GB RAM 기준, 약 17시간 소요)이 요구된다. 즉, eDR을 이용하여 매우 효율적이면서도 정확한 신뢰도 해석을 수행할 수 있었음을 알 수 있다.

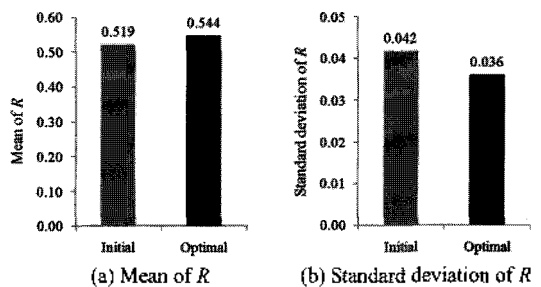


Fig. 9. Optimization results for objective functions.

Table 3. Comparison between eDR and LHS

Objective function		eDR (4n+1)	LHS (10000)
Initial	Mean of R	0.522	0.519
	Standard deviation of R	0.047	0.042
Optimal	Mean of R	0.537	0.544
	Standard deviation of R	0.037	0.036

한편, 최적해에서 렌즈 시스템의 성능이 실제로 초기 설계와 비교할 때 얼마나 향상되었는지 알아보기 위해 Fig. 10, 11과 같이 R 에 대한 확률밀도함수 히스토그램을 그려보았다. Fig. 10은 초기 설계안에서 R 의 확률밀도함수를 도식화한 것이고, Fig. 11은 강건 최적설계를 통해 얻은 최적해에서의 R 의 확률밀도함수를 히스토그램을 이용하여 도식화한 그래프이다. 확률밀도함수 히스토그램은 LHS의 샘플 사이즈를 10000개로 설정하여 매우 정확한 신뢰도 해석을 수행하여 얻은 결과를 비교한 것이다.

Fig. 10과 11에서 볼 수 있듯이 초기 설계안에 비해 최적해에서의 R 의 확률밀도함수가 평균이 더 커지면서 변동은 줄어들었음을 알 수 있다. 즉, 지금까지 수행한 강건최적설계를 통해 렌즈 시스템의 광학 성능치는 더 향상되면서 변동은 최소화된 강건한 설계 결과를 얻을 수 있었다.

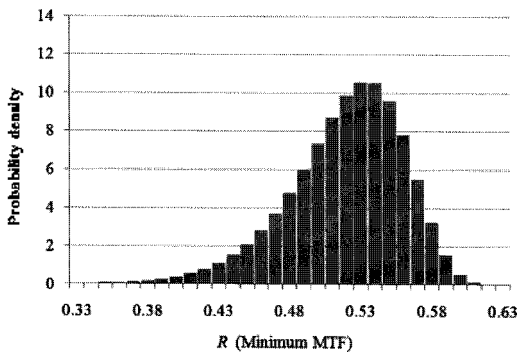


Fig. 10. PDF of R for the initial design.

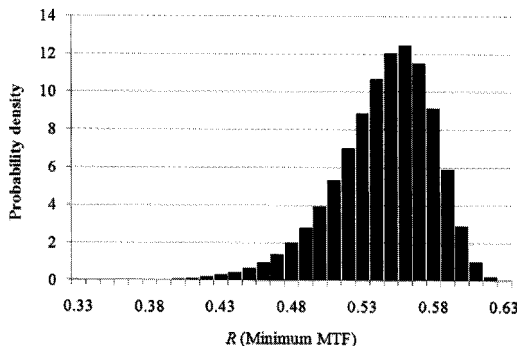


Fig. 11. PDF of R for the optimum.

6. 결 론

본 연구에서는 설계변수, 비제어 인자, 성능지수의 변동들을 정량화하여 설계 과정에 포함시킴으로써 제품

의 성능과 품질을 동시에 향상시킬 수 있는 강건최적설계 기법을 렌즈 시스템 설계에 도입하였다.

이를 위해 휴대폰 카메라용 렌즈 시스템의 광학 해석 과정을 자동화하였고, 다양한 설계 기법을 적용할 수 있도록 process integration을 수행하였다. 또한 신뢰도 해석 기법인 eDR과 최적화 알고리즘인 PQRSM을 도입하여 정확하면서도 효율적으로 강건최적설계를 수행할 수 있었다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 새로운 신뢰도 해석 기법인 eDR을 이용하여 기존의 방법에 비해 효율적이면서 정확한 신뢰도 해석을 수행할 수 있었다.
- 렌즈 시스템 설계를 위해 강건최적설계 기법을 도입하여 초기 설계안에 비해 광학 성능지수인 MTF의 평균은 약 5% 증가하고 변동은 약 14% 줄어든 강건한 최적해를 얻었다.

지금까지 휴대폰 카메라용 렌즈 시스템의 강건최적설계를 통해 목표 성능의 향상과 변동 발생요인에 대한 목표 성능의 강건성을 동시에 확보할 수 있었다. 향후 연구에서는 렌즈 시스템의 설계변수와 설계 요구사항을 좀 더 구체화하여 보다 다양화된 강건최적설계를 수행하고자 한다.

감사의 글

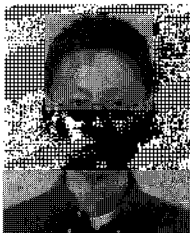
본 논문은 2010년도 2단계 두뇌한국 21사업, 지식경제부 “c-MES 설계지원 플랫폼 기술 개발” 과제 (10033162-2009-11)에 의하여 지원 받았습니다. 또한 이 연구를 위하여 PIDO 도구인 PIANo 소프트웨어를 제공한 ㈜프레임텍스에 감사드립니다.

참고문헌

1. Rimmer, M. P., “A Tolerancing Procedure Based on MTF”, *SPIE Meeting on Computer-Aided Optical Design*, Optical Research Associates, San Diego, CA, August 28-29, 1978.
2. 홍성목, 조재홍, 이윤우, 이회윤, 양호순, 이인원, 허문희, “카메라용 렌즈의 MTF 측정장치 개발”, 한국광학회지, 제18권, 제1호, 2007.
3. Taguchi, G., “Introduction to Quality Engineering”, Asian Productivity Organization, Tokyo, 1986.
4. 박경진, 이태희, 이권희, 황광현, “강건설계기법의 연구동향”, 대한기계학회 논문집 A권, 제28권, 제9호, pp. 1368-1383, 2004.
5. Phadke, M. S., “Quality Engineering Using Robust

Design”, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1989.

6. d’Entremont, K. L. and Ragsdell, K. M., “Design for Latitude Using TOPT”, *Advances in Design Automation*, Vol. 14, pp. 265-272, 1988.
7. Chen, W., Allen, J. K., Tsui, K. L. and Mistree, F., “A Procedure for Robust Design: Minimizing Variations Caused by Noise Factors and Control Factors”, *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, Vol. 118, No. 4, pp. 478-485, 1996.
8. Youn, B. D., Zhimin, X., Wells, L. and Gorsich, D. J., “Sensitivity-Free Approach for Reliability-Based Robust Design Optimization”, *Proceeding of the ASME 2007 Int. Design Eng. Tech. Conferences & Comp. and Inf. in Eng. Conference*, 2007.
9. Rahman, S. and Xu, H., “A Univariate Dimension-Reduction Method for Multi-Dimensional Integration in Stochastic Mechanics”, *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 19, pp. 393-408, 2004.
10. Xu, H. and Rahman, S., “A Generalized Dimension-Reduction Method for Multi-Dimensional Integration in Stochastic Mechanics”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 61, pp. 1992-2019, 2004.
11. Youn, B. D., Xi, Z., Wells, L. J. and Wang P., “Enhanced Dimension-Reduction (eDR) Method for Sensitivity-Free Uncertainty Quantification”, *11th AIAA/ISSMO Multi-disciplinary Analysis and Optimization Conference*, Portsmouth, Virginia, 2006.
12. 유순민, 민준홍, 김동호, 최동훈, “가변적인 샘플링을 이용한 차원 감소법에 의한 신뢰도 해석 기법”, *대한기계학회 논문집 A권*, 제33권, 제9호, pp. 870-877, 2009.
13. 정상진, 최병렬, 최동훈, 김주호, “휴대폰용 카메라 모듈의 렌즈 시스템에 대한 공차 해석 및 설계 개선에 관한 연구”, *대한기계학회 추계학술대회*, 2008.
14. Hong, K. J., Kim, M. S. and Choi, D. H., “Efficient Approximation Method for Constructing Quadratic Response Surface Model”, *KSME International Journal*, Vol. 15, No. 7, pp. 876-888, 2001.
15. Choi, H. I., Lee, Y., Choi, D. H. and Maeng, J. S., “Design Optimization of a Viscous Micropump with Two Rotating Cylinders for Maximizing Efficiency,” *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 40, No. 1-6, pp. 537-548, 2010.
16. McKay, M. D., Beckman, R. J. and Conover, W. J., “A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code”, *Technometrics*, Vol. 21, No. 2, pp. 239-245, 1979.



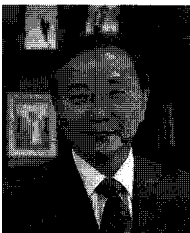
정 상 진

2005년 한양대학교 기계공학부 학사
 2005년~현재 한양대학교 대학원 기계공학과 석박사통합과정
 관심분야: Optimization Techniques, Discrete Optimization, Multidisciplinary Design Optimization



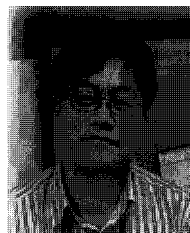
민 준 홍

2003년 한양대학교 기계공학부 학사
 2005년 한양대학교 대학원 기계설계학과 석사
 2005년~현재 한양대학교 대학원 기계공학과 박사과정
 관심분야: Reliability-Based Design Optimization, Robust Design Optimization, Multidisciplinary Design Optimization Framework



최 동 훈

1971년~1975년 서울대학교 기계공학과 학사
 1975년~1977년 KAIST 기계공학과 석사
 1981년~1986년 Univ. of Wisconsin-Madison 기계공학과 박사
 1986년~현재 한양대학교 기계공학부 교수
 1999년~현재 한양대학교 최적설계기술연구센터 소장
 관심분야: Optimization Techniques, Approximation, Design under Uncertainty, Multidisciplinary Design Optimization, Global Optimization



김 주 호

1991년 서울대학교 조선해양공학과 학사
 1994년 서울대학교 기계설계학과 석사
 2001년 서울대학교 기계설계학과 박사
 2003년~현재 삼성전기(주) 수석연구원
 관심분야: Opto-mechanical Lens Tolerancing, LED Lighting