

# 휴대폰용 카메라 모듈의 렌즈 시스템에 대한 공차 해석 및 설계 개선에 관한 연구

정상진<sup>†</sup> · 최병렬<sup>\*</sup> · 최동훈<sup>\*\*</sup> · 김주호<sup>\*\*\*</sup>

## Tolerance Analysis and Design Improvement of a Lens System for Mobile Phone Camera

Sangjin Jung, Byung-Lyul Choi, Dong-Hoon Choi and Ju Ho Kim

**Key Words :** Lens System Design (렌즈계 설계), Tolerance (공차), Latin Hypercube Sampling (라틴방격추출법), Tolerance Optimization (공차최적설계)

### Abstract

A lens system of a camera module for mobile phones is comprised of the composition and design of various shapes of lens. To improve responses such as the modular transfer function (MTF), a lens system should always be constructed by considering uncertainty that can be caused by manufacturing and assembly error. In this study, tolerance optimization using the Latin Hypercube Sampling (LHS) technique is performed. In order to reduce the computational burden of the tolerance optimization process and decrease the influence from numerical noise effectively, we use the Progressive Quadratic Response Surface Modeling (PQRSM), which is one of Sequential Approximate Optimization (SAO) techniques. Using this method, we achieved optimal tolerance for each lens and obtained reliability for satisfying user's requirements. In addition, through the design process the manufacturing and assembly cost of a lens system was reduced.

### 1. 서론

휴대폰용 카메라 모듈의 렌즈 시스템은 여러 형상의 렌즈 설계 및 조합을 통해 Modular Transfer Function (MTF) 등의 광학 특성치들이 목표 성능을 달성하도록 설계된다<sup>(1)</sup>. 원하는 성능에 도달하도록 렌즈 시스템을 구성하기 위해서는 렌즈 설계자에게 많은 경험과 전문적인 해석 능력이 요구된다. 그러나, 이를 바탕으로 렌즈 시스템을 설계하였을 지라도, 실제로 설계한 대로 정확하게 제작 및 조립을 하는 것은 매우 어렵다<sup>(2)</sup>.

따라서, 제작 및 조립 오차로 발생할 수 있는 불확정성 (uncertainty)에 의한 영향을 고려하여 항상 시스템을 구성해야 하며, 이를 구현하기 위해서는 각 렌즈 부품에 대한 적절한 공차를 할당해야 한다. 이와 같은 부품의 공차는 설계한 시스템의 성능에 영향을 줄 뿐만 아니라, 제작 및 조립 공정에서의 정밀도 및 제작 단가 등에 영향을 주게 된다.

일반적으로 공차란 확정적 변수 (deterministic variables)가 아닌 불확정성을 포함하는 확률 변수 (random variables)로서 시스템의 신뢰성 (reliability)에 영향을 미친다. 공차 설계는 설계자가 원하는 신뢰도 범위 안에서 제작 비용을 가능한 한 최소화 하거나, 또는 원하는 제작 비용 안에서 신뢰성을 극대화하도록 하는 공차를 할당하는 것이다. 즉, 설계자는 렌즈 시스템의 불확정성을 고려한 공차 해석을 바탕으로 적절히 공차를 할당해야 한다.

---

<sup>†</sup> 회원, 한양대학교 대학원 기계공학과  
E-mail : lazio7@hanyang.ac.kr  
TEL : (02)2220-0443 FAX : (02)2291-4070

<sup>\*</sup> (주)FRAMAX

<sup>\*\*</sup> 한양대학교 기계공학부

<sup>\*\*\*</sup>(주)삼성전기 중앙연구소 CAE Group

---

공차 해석을 위해 기존에는 대표적 광학 해석 프로그램인 Code-V 내부에 탑재된 TOR, TOLFDIF, TOLMONTE 등의 공차 해석 알고리즘이 주로 이용되었으나, 정확성이나 효율성이 떨어지고 기능에 제한이 있는 것으로 알려져 있다<sup>(3)</sup>.

따라서, 본 연구에서는 렌즈 시스템의 불확정성을 고려한 확률적 모델에 대하여 보다 정확하면서 효율적인 공차 해석을 통해, 설계자가 원하는 성능을 최대한 만족하면서 가능한 한 커다란 공차를 할당하도록 하는 공차 설계 방법을 제시하고자 한다.

## 2. 휴대폰용 카메라 모듈의 렌즈 시스템

본 연구에서 사용한 휴대폰용 카메라 모듈의 렌즈 시스템인 3M lens module의 3D 형상은 Fig. 1과 같다. 이 렌즈 시스템은 4 개의 렌즈, IR filter, sensor가 배열에 조립된 구조로 이루어져 있다. 렌즈 시스템을 구성하기 위해서는 렌즈 가공, 조립 시 많은 오차가 존재하며 이는 카메라의 성능 저하로 이어진다. 따라서, 일정 수준의 오차를 고려한 공차가 시스템에 존재하는데, 기존 성능을 유지 하면서 이 공차를 얼마만큼 허용하는 것이 가능한지 파악할 수 있어야 한다.

### 2.1 렌즈 시스템의 공차

일반적으로 렌즈를 가공하고 이를 조립하여 전체적인 렌즈 시스템을 구성함에 있어서 많은 공차를 고려해야 한다. 본 연구에서 사용한 렌즈 시스템의 경우에도 조립, 가공 시 필수적으로 고려해야 하는 여러 공차들이 존재하며 Table 1에 이를 정리하였다.

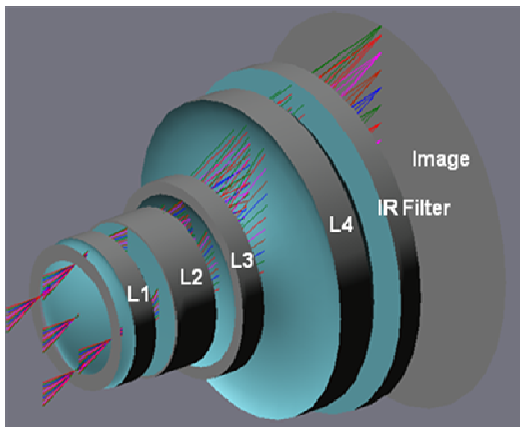


Fig. 1 3D shape of 3M lens module

Table 1에서 L1, L2, L3, L4는 각각 첫 번째부터 네 번째까지의 렌즈를 나타내며, 그 옆에 표기된 a, b는 각각 렌즈의 앞, 뒷면 (surface)을 말한다. Image는 상을 인식하는 sensor 면을 나타낸다. 렌즈 시스템 성능에 민감한 영향을 미치는 입력 변수로는 각 렌즈의 두께, 디센터, 틸트가 있으며, 이 변수들에 관련된 공차의 개수는 Table 1에서 볼 수 있듯이 총 33개이다. 이 변수들은 확률분포 형태로서 공차 해석을 위한 입력이 되는데, 이때 각 변수에 대한 분포의 표준편차를 공차 범위로서 나타낼 수 있다. 바로 이 공차 범위를 공차 해석 및 설계 등을 위한 입력 인자로서 제어하게 된다.

### 2.2 렌즈 시스템의 출력 인자

33개의 입력 공차들을 통해 해석을 수행하여 관심 있는 출력 값을 두 가지 얻게 된다. 먼저 첫 번째 출력 인자인  $R_1$ 은 Fig. 2의 네 부분의 0.75 field 중에서 MTF가 가장 큰 값과 가장 작은 값의 차이를 나타내며, 두 번째 출력 인자인  $R_2$ 는 네 부분의 0.75 field 중에서 MTF가 가장 작은 값이다. 0.75 field에서 얻어지는 각각의 MTF 값들은 가로축 방향 MTF와 세로축 방향 MTF의 평균값이다.

Table 1 Tolerances of a lens system

Tolerance	Location	No. of Tolerances
Thickness (TH)	L1a, L1b, L2a, L2b, L3a, L3b, L4a, L4b	8
Surface Decenter (SD)	L1a, L1b, L2a, L2b, L3a, L3b, L4a, L4b	8
Element Decenter (ED)	L1, L2, L3, L4	4
Surface Tilt (ST)	L1a, L1b, L2a, L2b, L3a, L3b, L4a, L4b	8
Element Tilt (ET)	L1, L2, L3, L4	4
Image Tilt (IT)	Image	1

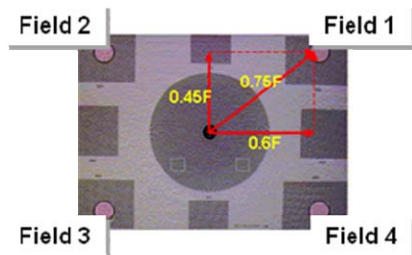


Fig. 2 0.75 field of a lens system

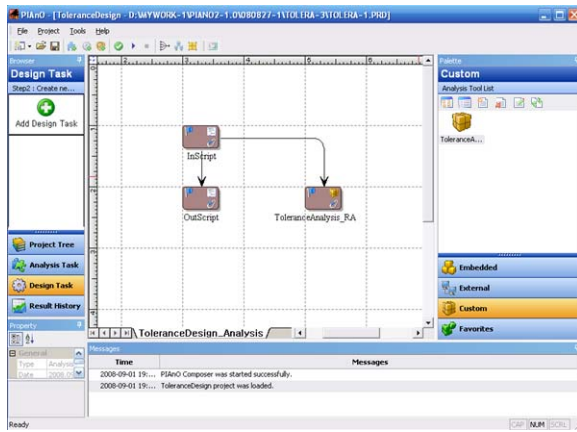


Fig. 3 Process Integration using PIAAnO 2.0

### 3. Process Integration

입출력 인자가 정의된 렌즈 시스템에 대한 해석 및 설계를 위해 본 연구에서는 2 가지 프로그램을 이용하였다. 먼저, 렌즈 시스템의 컴퓨터 시뮬레이션을 위해 상용 렌즈 해석 프로그램인 Code-V 를 이용하였다. 그리고, 상용 PIDO (Process Integration and Design Optimization) Tool 인 PIAAnO 2.0 을 이용하여 Code-V 를 통해 모델링된 렌즈 시스템의 공차 해석 및 설계를 수행하고자 하였다.

공차 해석 및 설계를 위해서는 Code-V 를 이용한 렌즈 시스템의 해석이 PIAAnO 상에서 이루어져야 한다. 따라서, PIAAnO 를 이용하여 렌즈 시스템 해석 모델의 입력, 해석, 출력을 사용자가 PIAAnO 상에서 제어할 수 있도록 구성하였고, Fig. 3 과 같이 Process Integration 을 통해 여러 해석 컴포넌트 사이의 data flow 를 설정하였다.

### 4. LHS 를 이용한 Screening

#### 4.1 Latin Hypercube Sampling

본 연구에서는 33 개의 공차에 대해 해석 모델의 출력 인자에 관한 reliability 를 파악하기 위해 라틴방격추출법 (Latin Hypercube Sampling; LHS) <sup>(4)</sup> 을 이용하였다. 일반적으로 공차 해석을 수행하기 위한 방법으로 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation; MCS)이 가장 널리 사용되고 있지만, 정확한 reliability 를 얻기 위해서 많은 샘플 사이즈를 요구하기 때문에 비효율적인 방법으로 알려져 있다.

이에 반해 LHS 는 Fig. 4 와 같이 주어진 샘플 사이즈 내에서 뽑히는 점들 사이의 거리를 최대화 하면서, 각 입력 변수의 분포 형태를 잘 고려하여

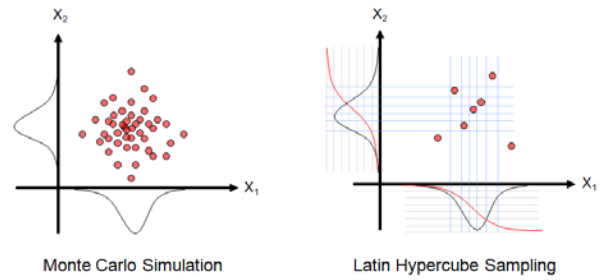


Fig. 4 MCS and LHS

가장 최적화된 상태로 점들을 배치시킨다. 따라서, MCS 에 비해 훨씬 적은 샘플 사이즈를 가지고도 정확한 결과를 얻을 수 있으며, 공차 해석 시간 또한 현저히 줄어드는 장점이 있다. 본 연구에서는 LHS 를 이용한 효율적인 공차 해석을 통해 렌즈 시스템의 주요 설계변수 선정 및 공차최적설계를 수행하고자 한다.

#### 4.2 1-D Parametric Study

앞에서 정의한 33 개의 공차들은 공차 해석 및 설계를 수행할 때 입력 변수로 이용된다. 그러나, 파레토 원리에 의하여 이 중에서 일부 공차만이 전체 시스템에 주로 영향을 미칠 수 있다.

따라서, 공차들의 주효과 (main effect)를 알아보기 위해 각 공차의 범위를 0.5 배부터 2 배까지 늘려가면서 시스템의 reliability 가 어떻게 변하는지 살펴보았다. 이처럼 다른 입력 변수들은 고정시킨 상태에서 하나의 입력 변수 변화에 대한 출력 변수의 경향을 파악하는 방법을 1-D Parametric Study (1-D PS) 라고 한다.  $R_1$  및  $R_2$  에 대한 렌즈 시스템의 reliability 는 각각 식 (1), (2)로 정의할 수 있으며 이를 수율이라고 표현하기도 한다.

$$g_1 = P(R_1 \leq 0.15) \quad (1)$$

$$g_2 = P(R_2 \geq 0.41) \quad (2)$$

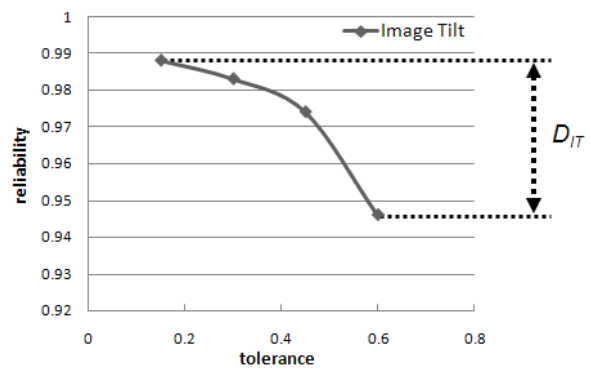


Fig. 5 1-D Parametric Study of image tilt

**Table 2** Sensitivity indices for  $g_1$

Tolerance	Location	Percentage (%)
Element Decenter	L3	19.2
Surface Decenter	L3b	15.9
Element Decenter	L1	15.4
Thickness	L4a	14.8
Element Tilt	L1	9.3
Image Tilt	Image	7.1
Thickness	L3a	5.5
Thickness	L2b	3.8
Surface Decenter	L1b	2.7
Etc.	-	6.3

**Table 3** Sensitivity indices for  $g_2$

Tolerance	Location	Percentage (%)
Element Decenter	L1	17.2
Element Decenter	L3	14.8
Surface Decenter	L3b	11.7
Image Tilt	Image	10.9
Thickness	L4a	9.9
Element Tilt	L1	9.9
Surface Decenter	L1b	8.3
Thickness	L3a	3.6
Thickness	L2b	3.1
Etc.	-	10.6

예를 들어 Fig. 5 와 같이 image tilt 의 초기 공차가 0.3 이라고 할 때, 초기 공차의 0.5 배, 1 배, 1.5 배, 2 배에 대해서 각각 LHS 를 이용하여  $R_1$  에 대한 렌즈 시스템의 reliability 를 얻고 그 변화를 파악할 수 있다. 그리고, reliability 의 최대 변화량  $D_{IT}$  를 얻었다. 이와 같은 방법을 통해 33 개의 모든 공차에 대한 주효과를 파악하였다.

이제 앞에서 얻은 각각의 공차에 대한 주효과의 크기 비교를 통해 시스템에 민감한 영향을 미치는 주요 공차를 파악하고자 한다. 다음과 같은 다섯 단계를 통해 33 개의 공차에 대한 중요도를 얻을 수 있다.

- Step 1:** k 번째 공차에 대해서 PS 를 수행
- Step 2:** Reliability 의 최대 변화량  $D_k$  를 계산
- Step 3:** 33 개의 공차에 대해서 Step 1, 2 를 반복
- Step 4:**  $D_1, \dots, D_{33}$  의 전체 합인  $D_{total}$  을 계산
- Step 5:**  $D_1, \dots, D_{33}$  이 각각  $D_{total}$  에서 차지하는 비중을 계산

이와 같은 과정을 거쳐 얻은 결과는 Table 2 및 3 과 같다. 33 개의 공차 중에서 전체 시스템에 약 90% 이상의 영향을 미치는 공차를 순서대로 나열한 것이다. Table 2 와 3 에서 볼 수 있듯이 각각 주요 공차가 9 개씩 선정되었는데 공차의 순서가 다를 뿐 동일한 공차가 선정되었음을 알 수 있다. 따라서, 선정된 9 개의 주요 공차가  $g_1$  및  $g_2$  에 대한 reliability 에 민감한 영향을 미치는 것을 알 수 있다. Table 2 와 3 의 마지막 부분에 Etc.로 표시된 부분은 선정되지 못한 나머지 24 개의 공차를 나타낸 것이다. 최종적으로 선택된 9 개의 공차를 정리하면 아래와 같다.

- Thickness 관련: L2b, L3a, L4a
- Decenter 관련: L1b, L3b, L1, L3
- Tilt 관련: L1, image

지금까지 LHS 를 이용한 PS 를 통해 33 개의 공차 중에서 최종적으로 9 개의 주요 공차를 선정하였다. 이 공차들은 앞으로 공차최적설계를 위한 설계변수로서 활용된다.

### 4.3 공차의 영향도 분석

본 절에서는 PS 를 이용한 screening 방법을 통해 선택되지 못한 나머지 24 개의 공차가 과연 전체 시스템에 어떠한 영향을 미치는지 알아보하고자 한다. 24 개 공차의 변화에 대해서 식 (1), (2), (3)이 어떠한 변화를 보이는지 파악하면, 공차최적설계에 나머지 공차의 크기를 어떻게 설정할 수 있을지 결정할 수 있다.

$$Cost = \sum_{j=1}^6 \left( t_j \cdot \sum_{i=1}^{N_j} \left( \frac{a_{ij}}{(\Delta X_{ij})^2 + b_{ij}} + c_{ij} \right) \right) \quad (3)$$

- where  $j = 1, \dots, 6$  (TH, SD, ST, ED, ET, IT)  
 $N_j$ : 공차 유형별의 개수  
 $t_j$ : 공차 유형별의 가중치  
 $a_{ij}$ : 개별 공차의 가중치

식 (3)은 cost function 으로서 앞으로 공차최적설계를 수행할 때 최소화하고자 하는 목적함수로도 이용된다. 식 (3)의 계수인  $N_j, a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, t_j$  는 각각 Table 4 에 정리되어 있으며, 다양한 계수를 두었기 때문에 렌즈 시스템의 특성에 따라서 사용자가 원하는 형태로 cost function 을 정의하는 것이 가능하다.

Table 4 Coefficients of cost function

Tolerance	$N_j$	$t_j$	$a_{ij}$	$b_{ij}$	$c_{ij}$
TH ( $j=1$ )	8	1.0	18.26	1.89	0.32
SD ( $j=2$ )	8	1.0	18.26	1.89	0.32
ST ( $j=3$ )	8	1.0	18.26	1.89	0.32
ED ( $j=4$ )	4	1.0	18.26	1.89	0.32
ET ( $j=5$ )	4	1.0	18.26	1.89	0.32
IT ( $j=6$ )	1	1.0	292.20	30.19	0.32

24 개의 나머지 공차가 직접적으로 reliability 와 cost function 에 미치는 영향을 살펴보기 위해, 24 개의 공차범위를 초기값의 1 배부터 2 배 (공차의 상한)까지 초기 공차의 10%씩 증가시켜 가면서 공차 해석을 수행하였다. 9 개의 주요 설계변수 값은 초기 공차 값으로 고정하였다.

이와 같이 PS 를 수행한 결과가 Fig. 6 에 나타나 있다. 결과 그래프의 y 축 스케일은  $g_1$ ,  $g_2$ , cost function 각각의 최대값을 1 로 보았을 때의 상대 변화율이다. 결과에서 볼 수 있듯이 나머지 24 개의 공차를 2 배까지 증가시켰을 경우, 수율의 변화는 미미한 반면 cost 는 약 50%까지 감소하는 경향을 보였다. 다시 말하면, 나머지 24 개의 공차는 일정 수준까지 증가시키더라도 렌즈 시스템의 reliability 에는 큰 영향을 미치지 못하고, 전체 공차의 약 3/4 에 해당하는 24 개의 공차가 커짐으로 인해 cost 의 큰 감소가 발생한 것이다.

다음 절에서는 나머지 24 개의 공차는 초기 공차에 비해 큰 값으로 고정시키고, 주요 공차 9 개를 설계변수로 설정한 후 공차최적설계를 수행하여, 높은 수율을 유지하면서 cost 는 감소시키는 최적의 공차 할당량을 도출해 보고자 한다.

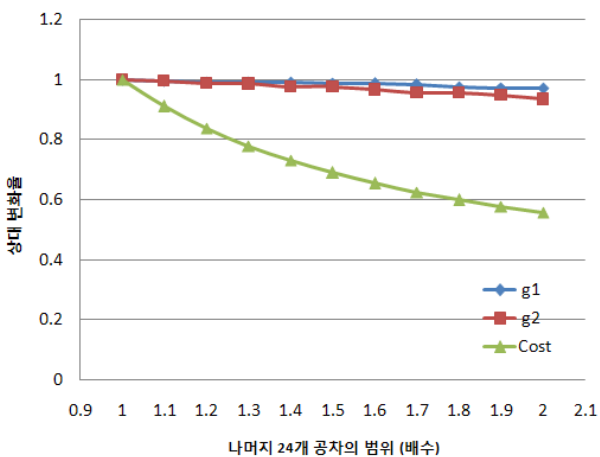


Fig. 6 Parametric Study for the rest tolerances

## 5. 공차최적설계

### 5.1 설계문제 정식화

공차최적설계를 수행하기 위한 설계문제 정식화는 식 (4)와 같다. 4 절에서 얻은 결과에 따라 식 (4)의 설계변수의 개수는 총 9 개이고, Table 2 와 3 에서 Etc.를 제외한 공차들이다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Find} && X_i && i=1,\dots,9 \\
 & \text{to minimize} && \text{Cost}(\mathbf{X}) \\
 & \text{subject to} && P(R_1 \leq 0.15) \geq 0.989 \\
 & && P(R_2 \geq 0.41) \geq 0.979
 \end{aligned} \tag{4}$$

식 (4)에서 목적함수는 식 (3)과 같고 구속조건은 식 (1), (2)가 이용되었다. 여기서 식 (1)과 (2)는 각각 0.989 와 0.979 보다 높은 reliability 를 만족해야 하는데, 이 수치는 각각 초기 공차 값을 통해 얻은 reliability 이다. 따라서 본 연구의 공차최적설계의 목적은 초기 공차에 대한 렌즈 시스템의 수율 이상의 수준을 만족하면서 cost 를 감소시키는 최적의 공차 할당량을 얻는 것이다.

### 5.2 최적화 알고리즘

본 연구에서는 공차최적설계를 수행하기 위한 알고리즘으로 PIANO 2.0 의 순차적 근사 최적설계 (Sequential Approximate Optimization; SAO) 기법 중에 하나인 점진적 이차 반응표면법 (Progressive Quadratic Response Surface Modeling; PQRS) (5)을 사용하였다. 이 기법은 일반적인 국부 최적화 (local optimization) 기법인 구배 기반 최적화 (gradient-based optimization) 기법이 아니라, 함수 기반 최적화 (function-based optimization) 기법이기 때문에 해석 모델의 민감도를 계산하지 않고도 최적화가 가능한 알고리즘이다.

본 연구의 설계문제의 경우 공차최적설계 시 매 iteration 마다 공차 해석을 해야 하는데, 이때 일반적으로 공차 해석을 수행하여 얻어지는 민감도는 부정확하다. 따라서 구배 기반 최적화 기법을 사용하게 되면, 부정확한 민감도로 인해 실제 문제가 가지고 있는 최적해와는 다른 최적설계 결과를 얻을 가능성이 있다.

그리고, PQRSM 은 다른 최적화 기법에 비해 효율적이면서 비교적 정확한 최적해를 얻을 수 있는 장점이 있다. 즉, 기존의 근사 최적화 기법에 비해 상당히 적은  $2n+1$  ( $n$ : 설계변수의 개수)개의 실험점으로 설계변수간의 교호작용을 나타내는 항까지 고려한 full quadratic polynomial 모델을 생성할 수

있으므로 정확하면서도 효율적인 근사모델을 만들 수 있다<sup>(6)</sup>. 따라서 PQRSM 을 본 연구의 공차최적설계에 적합한 최적화 알고리즘으로 판단하였다.

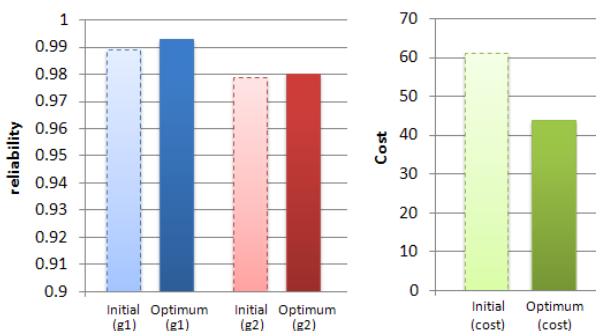
### 5.3 공차최적설계 결과

공차최적설계를 수행하기 위해서 기존의 33 개 공차를 모두 설계변수로 설정하게 되면 최적화 시간이 기하급수적으로 증가한다. 따라서, 본 연구에서는 screening 을 통해 9 개의 주요 공차를 설계변수로 설정하였고, 나머지 24 개의 공차는 초기 공차 대비 2 배로 고정시킨 후 최적화를 수행하였다.

그 결과, Table 5 와 같이 최적의 공차 할당량을 얻을 수 있었다. Table 5 에서 초기 공차 및 최적 공차 값들은 0 에서 1 사이로 scaling 된 결과이다. 설계변수의 경우, TH-L3a 와 SD-L1b 는 증가하였고 나머지는 감소하는 경향을 보였다.

**Table 5** Tolerance optimization results

Design Variables	Initial	Optimum
$X_1$ (TH-L2b)	0.5	0.483
$X_2$ (TH-L3a)	0.5	0.578
$X_3$ (TH-L4a)	0.5	0.370
$X_4$ (SD-L1b)	0.25	0.260
$X_5$ (SD-L3b)	0.25	0.219
$X_6$ (ED-L1)	0.3	0.173
$X_7$ (ED-L3)	0.3	0.117
$X_8$ (ET-L1)	0.4	0.215
$X_9$ (IT)	0.45	0.320
Design Parameters	Initial	Adjusted
24 tolerances	$E_1, \dots, E_{24}$	$2 \times (E_1, \dots, E_{24})$
Constraints	Initial	Optimum
g1	0.989	0.993
g2	0.979	0.980
Objective Function	Initial	Optimum
Cost	61.30	43.94



**Fig. 7** Tolerance optimization results for constraints and objective function

즉, 33 개의 공차 중에서 26 개의 공차는 증가하고 7 개의 공차는 감소했음을 알 수 있다. Table 5 와 Fig. 7 에서 볼 수 있듯이 일부 공차가 작아지더라도 대부분의 공차가 커졌기 때문에, cost 를 초기값에 비해 약 28.3% 낮출 수 있었으며, 수율의 경우 요구 수율을 모두 만족한 결과를 얻었다.

## 6. 결론

본 연구에서는 휴대폰용 카메라 모듈의 렌즈 시스템에 대해서 기존의 Code-V 내부 알고리즘을 이용한 비효율적이고 부정확한 공차 해석을 대신하여, 효율적으로 공차 해석 및 최적설계를 수행할 수 있는 방법을 제시하였다. 이 방법을 이용하여 여러 공차 중에서 시스템에 더 민감한 영향을 미치는 공차들을 선별할 수 있었고, 그 결과를 바탕으로 요구 수율을 만족하면서 제작비를 최소화하기 위한 최적의 공차 할당량을 효과적으로 도출할 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 최적설계신기술연구센터 (iDOT)와 (주) FRAMAX, 두뇌한국 21 (BK 21) 사업에 의하여 지원받았습니다.

## 참고문헌

- (1) Hong, S. M., Jo, J. H., Lee, Y. W., Lee, H. Y., Yang, H. S., Lee, I. W. and Hur, M. W., 2007, "Development of an Equipment for Measuring the MTF of Camera Phone Lenses", *Journal of the Optical Society of Korea*, Vol. 18, No. 1, pp. 31-36.
- (2) Kim, D. J., Kim, J. H. and Yoon, Y. B., 2008, "A Study of Lens Assembly Deformation for Mobile Phone Camera," *Annual Spring Conference of KSME*
- (3) Perrin, J. C., 2007, "Comparison of Three Methods for Tolerancing Opto-Mechanical Systems", *2007 Optical Engineering and Applications conference*
- (4) Choi, S. K., Grandhi, R. V., Canfield, R. A., 2007, "Reliability-Based Structural Design", *Springer*
- (5) Lee, Y. B., K, Hong, K. J. and Choi, D. H., 2004, "An Efficient Robust Optimal Design Method for Engineering Systems with Numerical Noise", *10<sup>th</sup> AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference*