



특 집

# 유한요소해석을 사용한 휴대폰 카메라용 렌즈모듈의 결합특성 개선

문 양 호·문 재 호·류 민 영\*·박 근\*\*†

삼성전기(주) OMS사업부 정밀기술팀

\*서울산업대학교 제품설계금형공학과, \*\*서울산업대학교 기계설계자동화공학부  
(2009년 10월 5일 접수, 2009년 10월 14일 수정 및 채택)

## Improvement of Assembly Characteristics of a Lens Module in a Mobile Phone Camera using Finite Element Analysis

Yang-Ho Moon, Jae-Ho Moon, Min-Young Lyu\*, and Keun Park\*\*†

Precision Technology Team, Samsung Electro-Mechanics Co, Suwon 443-174, Korea

\*Dept. of product Design and Manufacturing Eng., Seoul Nat'l Univ. Tech., Seoul 139-743, Korea

\*\*Sch. Mechanical Design & Automation Engineering, Seoul Nat'l Univ. Tech., Seoul 139-743, Korea

(Received October 5, 2009, Revised & Accepted October 14, 2009)

**요약** : 본 연구에서는 휴대폰 카메라용 렌즈모듈의 구조를 최적화하기 위한 연구를 수행하고자 한다. 휴대폰 카메라용 렌즈모듈의 안정적인 작동을 위해 경통부와 외장부간 결합력의 적절한 유지가 필요한데, 본 연구에서는 유한요소해석을 사용하여 적절한 결합력 유지를 위한 나사 간섭부 설계변수의 영향에 대해 고찰하였다. 또한 실험계획법을 적용하여 렌즈모듈 설계변수 최적화를 위한 연구를 수행하고, 실험계획법 결과에 대한 통계적인 분석을 통해 최적 조건을 선정하여 결합토크의 크기를 원하는 범위 내로 유지하고 동시에 산포를 감소시킴으로써 제품품질 향상에 기여하고자 한다.

**ABSTRACT** : The present study covers the optimal design for a lens module in a mobile phone camera by using the design of experiments (DOE) and finite element (FE) analysis. FE analyses are performed to investigate the effect of design parameters on the amount of torque required to assemble a barrel and a housing part. The DOE approach is then performed to optimize the design parameters in order to maintain an appropriate torque with less variations.

**Keywords** : mobile phone, camera module, finite element analysis, design of experiment

### I. 서 론

영상인식 카메라 모듈 (Image Sensing Module)은 렌즈의 수광 신호를 화상센서 (Image Sensor)를 이용하여 디지털 신호로 변환하는 장치이다. 최근들어 휴대폰용 카메라 모듈로의 사용이 급증하고 있으며, 그 밖에도 홈네트워크, 자동차, 로봇, 의료용 등의 분야에도 널리 사용되고 있다.<sup>1</sup> 특히 휴대폰용 카메라모듈은 최근의 고화질, 고슬림화 및 다기능화에 힘입어 점차적으로 디지털카메라를 대체해가고 있다. 본 연구에서는 휴대폰 카메라의 핵심부품인 렌즈 모듈의 구조를 최적화하기 위한 연구를 수행하고자 한다.

휴대폰 카메라용 렌즈모듈의 구조를 살펴보면 다수개의 플라스틱 렌즈가 경통 (Barrel) 내부에 조립되어 있고, 경통부 외부에 나사산이 형성되어 외장부 (Housing)의 내측 나사부와

조립되어 있어 미세 초점거리 조절에 활용된다. 이때 경통부와 외장부간 결합력의 적절한 유지가 필요한데, 본 렌즈모듈의 체결 메커니즘은 일반 나사와는 달리 나사좌면과 체결부의 접촉이 발생되지 않는다. 대신 결합력을 증가시키기 위해 경통부의 수나사와 외장부의 암나사간에 인위적인 간섭 (Interference)을 발생시켜 접촉압력을 증가시키는 방법을 사용하고 있는데,<sup>2</sup> 이때 적절한 결합토크를 유지하기 위한 간섭량 및 구조의 설계에 많은 어려움이 뒤따른다.

본 연구에서는 유한요소해석 (Finite Element Analysis)을 사용하여 적절한 결합력 유지를 위한 나사 간섭부 설계변수의 영향에 대해 고찰하고자 한다. 즉 나사산간의 간섭에 의해 발생하는 접촉응력을 예측하고, 이를 토대로 나사 체결부의 결합력을 예측해보고자 한다. 또한 유한요소해석 기법을 적용하여 렌즈모듈 조립체의 설계변수에 따른 접촉압력 및 결합토크에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

또한 실험계획법을 적용하여 렌즈모듈 설계변수 최적화를

† 대표저자 E-mail: kpark@smut.ac.kr

위한 연구를 수행하고자 한다. 실험계획법은 공정의 특성에 영향을 미치는 여러 인자를 선정하고 인자간의 관계를 체계적으로 조사하기 위한 실험을 실시하여 데이터를 얻고 이를 분석함으로써 최적의 공정변수를 경제적으로 찾아내고자 하는 방법으로,<sup>3</sup> 최근 유한요소해석과 연계하여 제품 및 공정설계 과정에서 활용되고 있다.<sup>4,5</sup> 본 연구에서는 실험계획법 결과에 대한 통계적인 분석을 통해 최적 조건을 선정하여 결합토크의 크기를 원하는 범위 내로 유지하고 동시에 산포를 감소시킴으로써 제품품질 향상에 기여하고자 한다.

## II. 휴대폰용 렌즈모듈의 조립특성 고찰

### 1. 휴대폰 카메라 렌즈모듈의 설계사양 고찰

영상인식 카메라 모듈 (Image Sensing Module)은 렌즈의 수광 신호를 화상센서 (Image Sensor)를 이용하여 디지털 신호로 변환하는 장치이다. 최근들어 휴대폰용 카메라 모듈로의 사용이 급증하고 있으며, 그 밖에도 홈네트워크, 자동차, 로봇, 의료용 등의 분야에도 널리 사용되고 있다. 휴대폰 카메라 모듈은 크게 렌즈 모듈, 센서, 기판, 케이스 등의 부품으로 구성되어 있으며, Figure 1에 기본 구조를 도시하였다.<sup>1</sup> 렌즈 모듈의 경우 최근 요구되는 렌즈의 고성능과 경량화를 동시에 만족시키기 위해 비구면렌즈로 구성되어 있다.

본 연구에서는 휴대폰 카메라용으로 사용되는 렌즈 모듈을 대상으로 조립성을 고찰하고자 한다. 렌즈 모듈은 3개의 플라스틱 비구면 렌즈로 구성되어 있다. Figure 2에 3개의 렌즈로 구성된 휴대폰 카메라 모듈 광학계의 광선추적 (Ray Tracing)

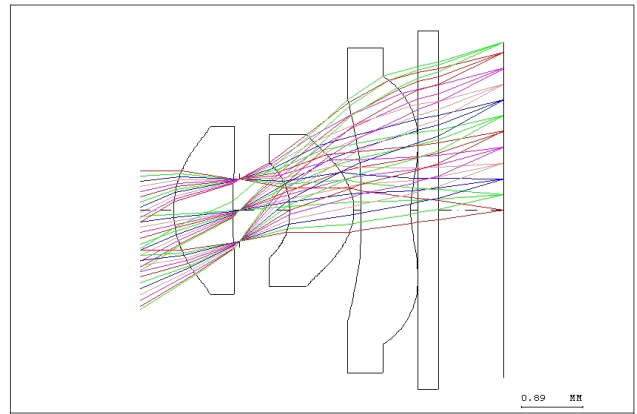


Figure 2. Ray tracing results using CODE V.

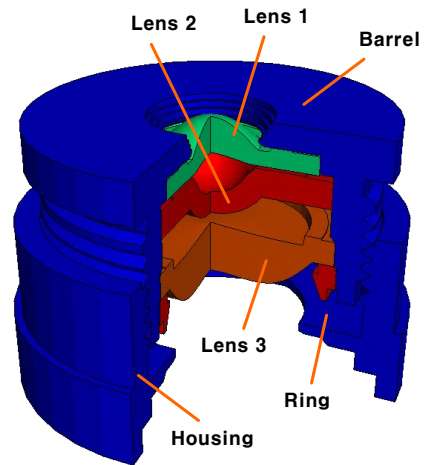


Figure 3. Assembly structure of a lens module.

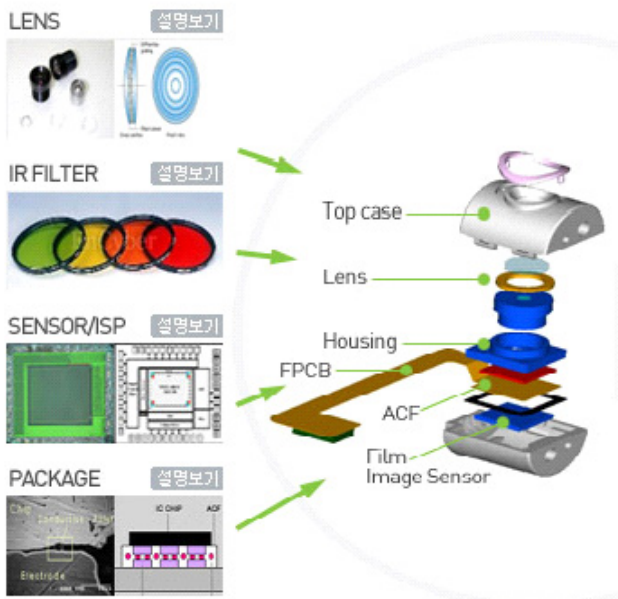


Figure 1. Schematic description of an image sensing module.<sup>1</sup>

결과를 도시하였다. 현재의 광선추적 결과를 보면 여러 범위의 Field 및 파장에서 모두 동일한 위치에 초점을 맺을 수 있도록 렌즈의 비구면계수가 최적화되어있음을 알 수 있다. Figure 3에 휴대폰 카메라용 렌즈모듈의 구조를 도시하였다. 내부 구조를 살펴보면 3개의 플라스틱 렌즈가 경통 (Barrel) 내부에 조립되어 있고, 경통부 외부에 나사산이 형성되어 외장부 (Housing)의 내측 나사부와 조립되어 있어 미세 초점거리 조절에 활용된다.

### 2. 렌즈모듈의 나사 형합 특성

Figure 3에 도시된 바와 같이 렌즈모듈의 경통부와 외장부에 나사산이 형성되어 있으며, 미세 초점거리 조절 후 UV를 사용하여 경화수지를 도포함으로써 최종 조립체를 완성하게 된다. 이때 경통부와 외장부간 결합력의 적절한 유지가 필요한데, 예를 들어 결합력이 부족한 경우 UV 도포과정에서 나사부의 회전이 발생할 가능성이 있고, 반면에 결합력이 과도할

경우 조립성에 악영향을 미치게 된다. 따라서 적정한 범위의 결합토크 유지가 필요하며, 본 연구에서 대상으로 하는 제품의 경우 50~100 gr-cm에 해당한다.<sup>2</sup>

본 연구에서는 원하는 결합력 유지를 위한 나사의 설계변수의 영향에 대해 고찰하고자 한다. Figure 4에 일반적인 나사의 결합력 발생 원리를 도시하였는데, 이때 수나사와 암나사간의 체결력은 식 (1)과 같이 표현된다.<sup>6</sup>

$$T = \frac{F_V}{2} (D_2 \tan(\alpha + \beta) + \mu_r D_r) \cong \frac{F_V}{2} \left( \frac{\mu D_2}{\cos \theta} + \frac{p D_2}{\pi D} + \mu_r D_r \right) \quad (1)$$

여기서  $T$ 는 결합토크,  $F_v$ 는 축력을 의미하며,  $\mu$ 는 나사산간의 마찰계수,  $\mu_r$ 은 나사좌면의 마찰계수를 의미한다. 즉, 일반 나사의 경우 나사산간의 마찰력과 나사좌면의 마찰력의 2가지 성분으로 결합력이 구성되게 되며, 이때 나사좌면과 체결면간의 마찰력이 주요 성분으로서 작용한다.<sup>2</sup>

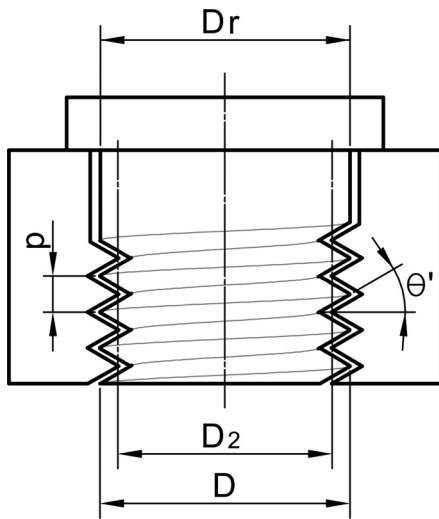


Figure 4. Schematic description of the conventional screw mechanism.

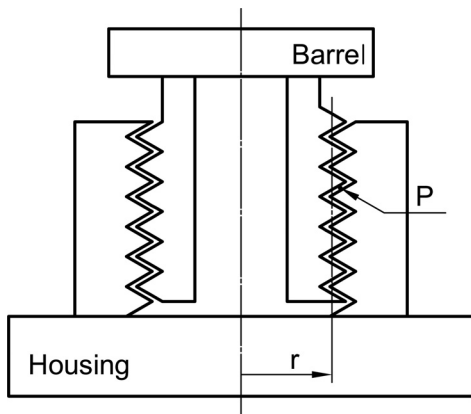


Figure 5. Schematic description of the proposed barrel-housing screw mechanism.

반면에 본 렌즈모듈의 경통부와 외장부의 체결 메커니즘은 Figure 5에 도시된 바와 같이 나사좌면과 체결부와의 접촉이 발생되지 않는다. 따라서 나사산간의 마찰력만으로 결합토크를 계산할 수 있으며, 이때의 결합토크는 식 (2)와 같다.

$$T = \int \mu P r dA \cong \sum_{i=1}^n \mu P_i r_i A_i \quad (2)$$

여기서  $n$ 은 접촉하고 있는 나사산의 수,  $P$ 는 접촉압력,  $r$ 은 중심선으로부터의 거리,  $A$ 는 접촉면의 면적을 의미한다. 이때 결합력을 증가시키기 위해 경통부의 수나사와 외장부의 암나사간에 인위적인 간섭 (interference)을 발생시켜 접촉압력을 증가시키는 방법을 사용하였다. 간섭을 발생시키는 방법으로는 경통부 나사와 외장부 나사간에 유효경 차이를 부여하는 방법, 피치 차이를 부여하는 방법, 나사산의 각도 차이를 부여하는 방법의 3가지를 대상으로 비교 검토하였다.

### III. 유한요소해석을 사용한 결합특성 개선

#### 1. 렌즈모듈 조립부 해석의 개요

본 연구에서는 유한요소해석을 사용하여 앞절에서 언급된 나사산간의 간섭에 의해 발생하는 접촉응력을 예측하고, 이를 토대로 나사 체결부의 결합토크를 예측해보고자 한다. Figure 6 (a)에 해석을 위한 유한요소 모델을 도시하였다. 해석은 기하학적 형상을 고려하여 축대칭 (Axisymmetric)으로 가정하여 진행하였으며, 3개의 렌즈, 경통부와 외장부, 압입링에 대해 2차원 4절점 유한요소 격자를 생성하였다. 특히 나사산 접촉부위의 접촉처리를 위해 경통부와 외장부의 나사산 부분에 격자 세분화 (Mesh Refinement)를 수행하였다. Figure 6 (b)에 격자세분화가 이루어진 나사 접촉부위의 유한요소 모델을 확대

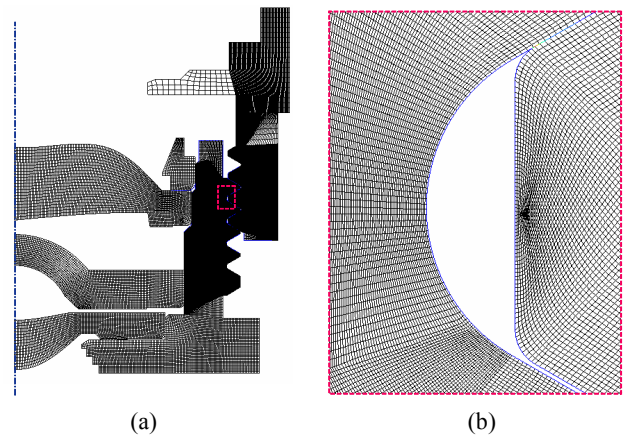


Figure 6. Finite element mesh for the lens module: (a) mesh for the entire domain and (b) enlarged mesh structure of the barrel-housing contact region.

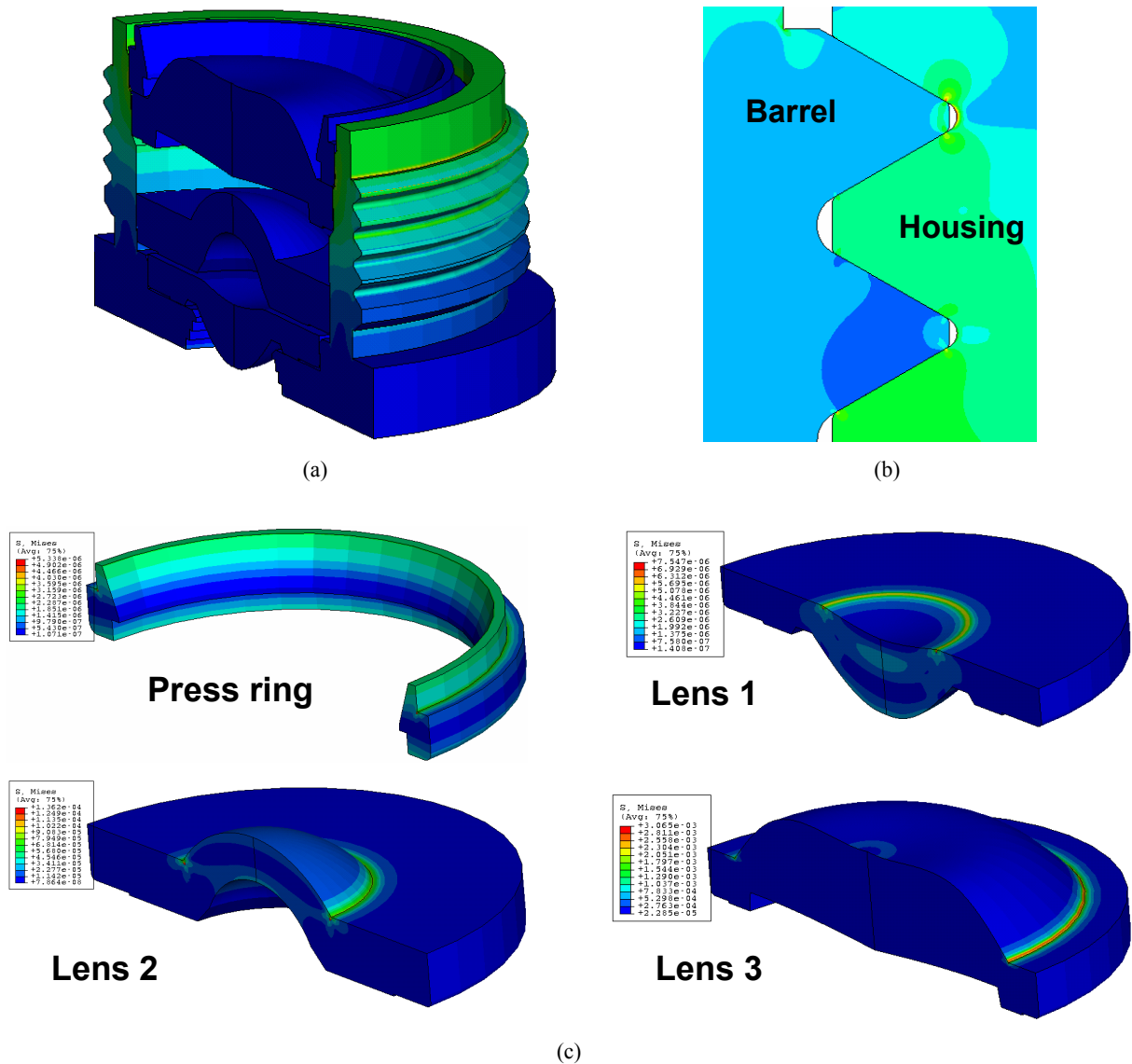


Figure 7. Distributions of the von-Mises stress: (a) the barrel, (b) the barrel-housing contact region, and (c) the press ring and three lenses.

Table 1. Mechanical properties of various materials

Material	PA66	PC3025	ZeonexE48R	Brass
Density (g/cc)	1.39	1.34	1.02	8.47
Elastic modulus (GPa)	10.5	3.4	2.55	115
Poisson's ratio	0.3	0.3	0.38	0.307
Tensile strength (MPa)	110~186	80	71	20.3
Component	Housing	Barrel	Lens	Press ring

도시하였다. 해석은 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 사용하여 해석을 수행하였다. Table 1에 각각의 요소에 대한 재료 및 해석에 사용된 물성을 요약하였다.

Figure 7에 유효경 차이를  $-6 \mu\text{m}$ 으로 부여한 경우, 즉 외장부 나사산의 유효경이 경통부 나사산의 유효경보다  $6 \mu\text{m}$  작은 경우에 대한 유한요소해석 결과를 도시하였다. Figure 7 (a)에 경통부 내에 3개의 렌즈 및 압입링이 조립된 상태에서의 유효 응력 분포를 도시하였는데, 렌즈나 압입링보다는 경통부 나사산 부위에 많은 응력이 걸림을 알 수 있다. Figure 7 (b)에 나사 접촉부위의 응력분포를 확대 도시하였으며, 이때 경통부의 최대응력은  $11.1 \text{ MPa}$ , 외장부의 최대응력은  $19.2 \text{ MPa}$ 로 예측되어 외장부 나사의 끝부분에 가장 많은 응력이 걸림을 확인할 수 있었다. 상기 결과는 원재료의 인장강도 (Table 1 참조)에 비해 충분히 작은 값으로 안전계수 5 이상의 값을 보임을 알 수 있다. 한편 Figure 7 (c)에 기타 부품의 응력분포를 도시하였

다. 압입링의 경우 최대응력이 5.3 Pa, 1번 렌즈의 경우 최대응력이 7.5 Pa로 상대적으로 미미하였으며, 2번 렌즈의 경우 136.2 Pa, 3번 렌즈의 경우 3.06 kPa로 점차적으로 증가하나 역시 원재료의 인장강도와 비교할 때 충분히 작은 값으로 평가되었다.

### 2. 설계변수에 따른 접촉압력 분석

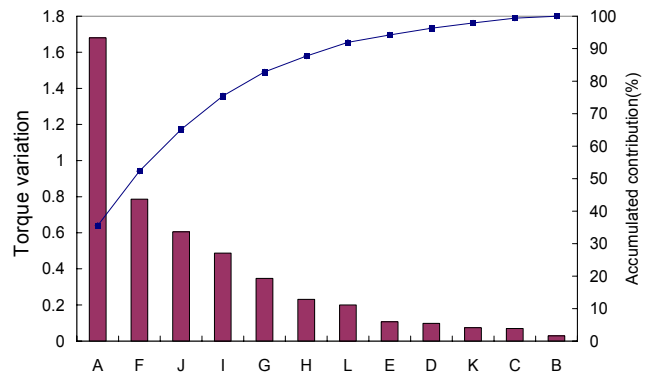
본 절에서는 상기 유한요소해석 기법을 적용하여 렌즈모듈 조립체의 설계변수에 따른 접촉압력 및 결합토크에 미치는 영향을 분석하고자 한다. Table 2에 주요 설계변수를 요약하였는데, 나사 유효반경 차, 나사 물림수, 압입링 조립공차 등의

**Table 2. Summary of design factors with standard and deviation values**

Factor	Description	Standards	Deviations
A	Screw radius tolerance	-6 $\mu$ m	-15 $\mu$ m
B	Screw corner radius	10 $\mu$ m	30 $\mu$ m
C	No. of contacted screw	2.5	3.5
D	Screw contact area	0.173mm <sup>2</sup>	0.080mm <sup>2</sup>
E	Press ring tolerance	-6 $\mu$ m	0 $\mu$ m
F	Press ring material	PC3025	Brass
G	Lens 3 tolerance	0 $\mu$ m	-5 $\mu$ m
H	Housing thickness	4.5mm	3.0mm
I	Housing material	PA66	PC3025
J	Screw angle	60°	62°
K	Pitch tolerance	0.3 $\mu$ m	0.295 $\mu$ m
L	friction factor	0.1	0.08

**Table 3. Comparison of the maximum stress and torque for various conditions**

Factor	Max. stress (Barrel, MPa)	Max. stress (Housing, MPa)	Torque (gr-cm)
A	14.4	20.5	147.6
B	66.4	76.8	295.3
C	29.8	35.2	149.0
D	29.2	39.3	222.7
E	18.1	33.6	127.1
F	18.6	16.5	84.8
G	42.4	58.9	443.0
H	47.1	87.7	57.5
I	86.6	130.2	101.0
J	52.2	75.0	177.6
K	22.2	27.8	170.2
L	19.3	31.8	176.8



**Figure 8. Pareto chart for the torque variation.**

총 12개의 설계변수를 선정하였다. 각각의 설계변수에 대해 기존 사용조건을 표준조건 (Standard)으로 부여한 상태에서 변동조건 (Deviation)을 부여하여 결과에 미치는 영향을 분석하였다. 각각의 조건에 대한 해석 결과로부터 예측된 경통부와 외장부의 최대응력 및 결합력 결과를 Table 3에 정리하였다. 조건별 결합력의 분포를 살펴보면 최소 57.5 gr-cm에서 최대 295.3 gr-cm 사이의 분포를 보여 기준치 (165.3 gr-cm) 대비 34.8%에서 178.6% 범위 내에서 변화함을 알 수 있었다.

Figure 8에 조건별 변동량에 대한 결합력의 변화율을 그래프로 도시하였다. 결합력 변화에 미치는 영향을 분석하면 나사 유효반경의 차이 (A), 압입링 재료 (F), 나사산 각도 (J), 외장부 재료 (J) 순으로 영향이 큰 것으로 분석되었다. 이러한 결과를 바탕으로 상기 4가지의 조건 (Vital Few)을 대상으로 실험계획법과 연계한 최적 조건을 선정하고자 한다.

### 3. 실험계획법을 적용한 설계변수 최적화

본 연구에서는 앞절에서 언급된 4개의 설계조건을 대상으로 실험계획법을 적용하였다. 이중 압입링 재료 (F), 나사산 각도 (J), 외장부 재료 (J)의 3가지 인자는 설계자의 의도대로 조절할 수 있는 반면, 나사 유효반경의 차이 (A)의 경우 일차적으로 금형의 유효반경으로 조절 가능하나 사출성형시 성형 수축으로 인한 치수산포가 발생하여 조절이 어려운 관계로 잡음인자 (Noise Factor)로 설정하였다. 실험계획은 3개의 설계인자와 1개의 잡음인자에 대해 2개의 수준으로 완전요인법을 사용하여 진행하였고, 총 16번의 해석을 진행하였다.

Figure 9에 최대응력에 대한 주효과 (Main Effects) 그래프를 도시하였다. Figure 9 (a)는 최대응력의 평균값에 대한 주효과 그래프로 압입링 재료와 나사산의 각도가 유의한 변수로 나타남을 알 수 있으며, 플라스틱 (PC3025) 압입링을 사용하였을 경우와 나사산 각도가 작을 경우 최대응력이 감소함을 알 수 있다. Figure 9 (b)는 최대응력의 신호대 잡음비 (S/N Ratio)에 대한 주효과 그래프로 역시 압입링 재료와 나사산의 각도가

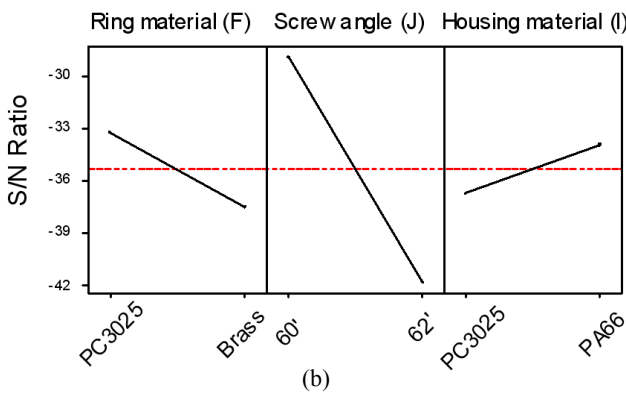
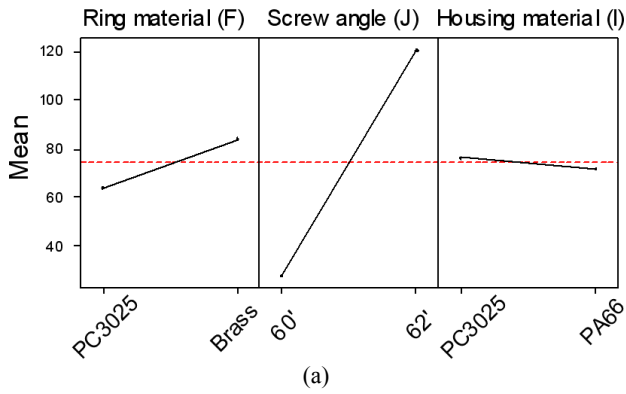


Figure 9. Main effect plots for the maximum stress: (a) mean value and (b) S/N ratio.

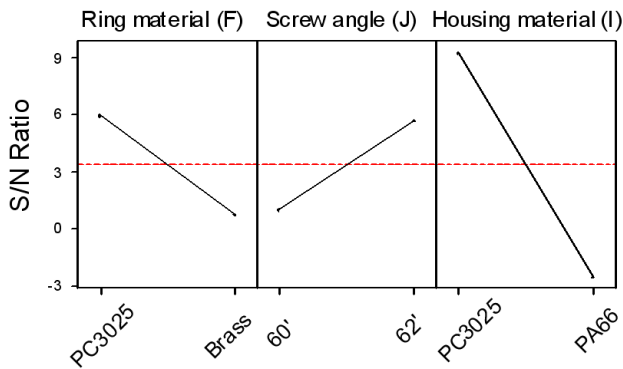


Figure 10. Main effect plots for the S/N ratio of the resulting torque.

유의함을 알 수 있으며, 플라스틱 압입링을 사용하였을 경우와 나사산 각도가 작을 경우가 신호대 잡음비가 커 안정된 결과를 보임을 알 수 있다. Figure 10은 기존 결합토크를 100 gr-cm로 설정하였을 경우 최대응력의 신호대 잡음비에 대한 주효과 그래프이다. 그래프를 보면 외장부 재질의 민감도가 가장 높은 것으로 분석되며, 플라스틱 압입링을 사용하였을 경우, 나사산 각도가 큰 경우, 외장부 재료가 PC3025인 경우가

Table 4. Comparison of the optimized conditions and their results

Factor	Current design	Design (1)	Design (2)						
Ring material (F)	Brass	PC3025	PC3025						
Screw angle (J)	60°	60°	62°						
Housing material (I)	PA66	PC3025	PC3025						
Screw tolerance (A)	3 $\mu$ m	0 $\mu$ m	-3 $\mu$ m	3 $\mu$ m	0 $\mu$ m	-3 $\mu$ m	3 $\mu$ m	0 $\mu$ m	-3 $\mu$ m
Torque (gf-cm)	0	100	248	51	100	149	86	100	114
Max. stress (MPa)	0	26	64	13	21	29	103	113	122

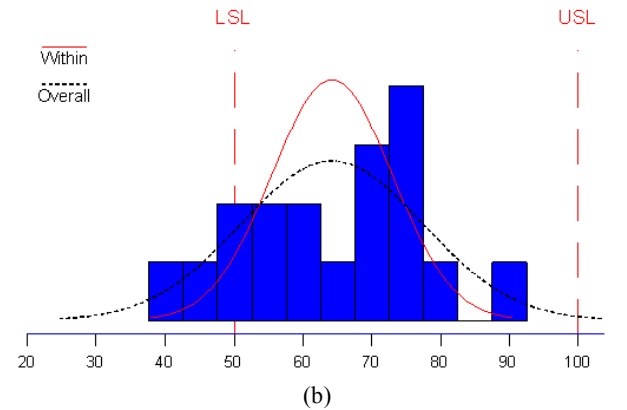
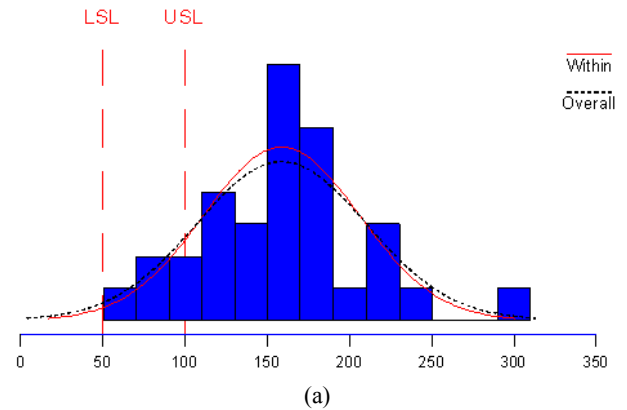


Figure 11. Histograms for the process capability analysis: (a) before optimization and (b) after optimization.

신호대 잡음비가 커 안정된 품질산품을 보임을 알 수 있다. 상기 결과를 토대로 렌즈모듈 조립특성 개선을 위한 최적 설계조건을 도출하였다. 최적 조건은 결합토크의 산포와 최대응력이 동시에 작은 조건을 선정하였다. Table 4에 기존 조건에서의 결과와 최적화된 설계조건에서의 결과를 비교하였다. Design (1)의 경우는 최대응력을 최소화시키는 방향으로, Design (2)의 경우는 결합토크의 산포를 최소화시키는 방향으로 선정하였다. Figure 11에 각각의 경우에 대한 결과치를 그래프로 비교하였는데, 이때 결합토크의 산포와 최대응력의 크

기를 동시에 감소시킬 수 있는 Design (1)을 최적의 조건으로 선정하였다.

선정된 설계조건을 적용하여 실제 부품들을 제작하여 조립을 실시한 후 조립품의 결합토크를 측정하였다. 측정은 기존의 제품과 최적화된 제품을 대상으로 실시하였으며, 각각의 경우에 대해 총 32개씩의 제품을 측정하였다. Figure 11 (a)와 (b)에 각각 기존의 제품군과 최적화된 제품군의 결합토크 분포를 히스토그램으로 도시하였다. 기존 제품의 경우 평균치가 158.72 gr-cm로 허용범위 (50~100 gr-cm)를 초과하는 것으로 나타났으며, 표준편차가 51.62 gr-cm로 산포가 크게 발생하였다. 또한 그래프를 보면 전체적으로 50~300 gr-cm의 분포를 보여 허용범위를 크게 벗어남을 알 수 있다. 반면 최적화된 제품의 경우 평균치가 64.22 gr-cm로 허용범위 내부에 분포하며, 표준편차가 13.20 gr-cm으로 크게 감소하여 결과적으로 안정적인 품질의 제품을 생산할 수 있는 것으로 확인되었다.

#### IV. 결 론

이상으로 본 연구에서는 유한요소법과 실험계획법을 연계하여 휴대폰 카메라용 렌즈 모듈의 조립특성을 개선시키기 위한 연구를 진행하였다. 이러한 결과를 종합적으로 정리해보면 다음과 같다.

1) 휴대폰용 렌즈모듈의 조립특성을 고찰하고, 인위적인 간섭이 부여된 경통부와 외장부간의 접촉특성을 고려한 나사산 간의 결합토크를 수치적으로 계산하기 위한 수식화를 수행하였다.

2) 휴대폰 렌즈모듈의 조립체에 대한 유한요소해석을 수행하여 인위적인 간섭에 의한 접촉응력을 해석하고 그에 따른 결합부의 토크를 예측하였다. 또한 다양한 설계변수에 대해 해석을 수행함으로써 결합토크에 영향을 크게 미치는 주요 인자(나사 유효반경의 차이, 압입링 재료, 나사산 각도, 외장

부 재료)를 선정하였다.

3) 선정된 4개의 설계조건을 대상으로 실험계획법을 적용하여 유한요소해석을 수행하였고, 실험계획법 결과에 대한 통계적인 분석을 통해 최적 조건을 선정하였다. 최적 설계조건 적용 결과 제품의 결합토크의 산포를 기존 대비 1/4 수준으로 감소시킴으로써 제품 품질을 향상시킬 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 지식경제부와 한국산업기술재단의 전략기술인력양성사업의 일부 지원으로 수행된 연구결과로 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. H. Eom and K. Park, "Ray tracing of a plastic aspheric lens by considering index distribution induced from injection molding", *Trans. Mater. Proc.*, **18**, 128 (2009).
2. Y. H. Moon, "Improvement of torque dispersion of mobile-phone camera module using CAE", 6 *Sigma Project Reports*, Samsung Electro-Mechanics Co. (2008).
3. J. Krottmair, *Optimizing Engineering Designs*, McGraw-Hill, New York (1993).
4. K. Park and J. H. Ahn, "Design of experiment considering two-way interactions and its application to injection molding processes with numerical analysis," *J. Mat. Proc. Tech.*, **146**, 221 (2004).
5. S. P. Jung, T. W. Park, J. W. Yoon, K. J. Jun, and W. S. Chung, "Design optimization of spring of a locking nut using design of experiments", *Int. J. Prec. Eng. Manufact.*, **10**, 77 (2009).
6. S. R. In and M. Y. Park, "Tightening characteristic of domestic M8 stainless screws", *J. Kor. Vacuum Soc.*, **10**, 155 (2001).