

Lens 성형시 UV경화 반응에 따른 수축 및 변형 대한 해석적 접근

박시환*, 문종신²

¹울산과학기술대학교 디지털기계학부, ²LG 전자

Analysis of the shrinkage and warpage of Wafer lens during UV curing

Sihwan Park^{1*}, Jong-Sin Moon²

¹School of Mechanical Engineering, Ulsan College

²LG Electronics

요약 웨이퍼 단위의 렌즈를 성형 시 일반적으로 UV경화 방식을 사용한다. 이 경우 발생될 수 있는 문제점은 크게, 경화 후 이형과정에서 성형 렌즈의 금형 고착문제, 경화 공정 중 발생하는 소재의 수축 현상으로 렌즈간의 형상 오차 발생 및 웨이퍼 단위의 변형, 위치별 렌즈 형상 편차 발생, 웨이퍼 양면의 렌즈 형상 및 센터 정렬 오차 등이다. 이중 UV경화 과정에 직접적인 영향을 받는 것은 형상 오차 및 변형으로 그 요인은 UV 조사 균일성, UV 강도에 대한 경화도, UV 경화 소재의 수축 특성이다. 따라서 소재에 대한 경화 모델링 수립 및 경화 반응에 따른 수축율과 물성 변화에 대한 이론정립이 필요하다. 또한 이러한 모델링을 해석에 구현할 수 있는 해석 툴 개발이 필요하다. 본 연구에서는 Comsol을 이용하여 수립된 모델링을 반영하고 이를 통하여 웨이퍼 단위 렌즈의 성형 공정에 대한 해석 기법을 제안하였다. 이를 통해 7.2mm에 대한 누적 공차 값을 실제 성형 공정 후 결과(0.149 μ m)과 비교하여 제안한 해석 방법에 의한 결과(0.215 μ m)를 비교, 검증을 수행하였으며 이를 통하여 UV경화 공정 후 변형에 대한 해석 가능성을 확인하였다.

Abstract The UV curing method is a popular process for lens molding on a unit wafer. This process, however, has several drawbacks including wafer adhesion during the ejection process after curing, errors in lens shape and wafer warpage due to material shrinkage during the curing process, and lens centering errors on both sides of a wafer. Among these, the lens shape error and warpage are influenced directly by the UV curing process due to factors including the UV radiation uniformity, the degree of cure according to UV intensity, and the shrinkage characteristics of the material. Therefore, a theory is needed not only to understand the change in the material characteristics, such as the shrinkage rate due to the curing reaction, but also to establish a model. In addition, an analysis system is needed to realize the model. This study proposes a new analysis method for the wafer lens molding process by Comsol modeling. This method was verified by comparing the results with those of the actual process.

Key Words : Curing Model, UV Curing, Wafer level lens, Warpage

1. 서론

휴대폰 렌즈(lens) 방식은 현재 플라스틱 사출 렌즈 방식을 많이 채택하고 있다. 이는 대량생산을 통한 생산원가 절감 및 경량화의 장점에도 불구하고 수축에 의한 형

상 치수의 변경 및 내부 응력에 의한 복굴절 발생 등으로 성능결함이 발생할 가능성이 매우 높다. 또한 생산성 향상을 위해서 다중 캐비티(multi-cavity) 방식의 금형을 적용하여 생산성 향상을 시도하고 있으나 유동 균형을 위한 금형 설계의 어려움으로 인하여 노하우 확보 문제와

본 논문은 2014년 울산과학기술대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행되었음.

*Corresponding Author : Sihwan Park(Ulsan College.)

Tel: +82-2-279-3121 email: shpark3@uc.ac.kr

Received October 22, 2014

Revised November 4, 2014

Accepted November 6, 2014

각 캐비티별로 일관된 광학특성 확보에 어려움이 있다. 또한 카메라폰 부품이 SMT(Surface Mount Technology)방식으로 일괄 조립되는 것에 비해 카메라 모듈은 후 공정 처리해야 하는 문제점이 있다. 따라서 렌즈 모듈을 SMT 처리하기 위해서는 리플로우(reflow) 공정 시 발생하는 180 ℃ 이상의 고온에서 재질 변화가 없어야 하나, 일반 플라스틱 렌즈를 사용하는 카메라폰 렌즈 모듈에서는 80 ℃ 이상부터 재질 변형이 생겨 적용하기가 어려우며, 또한 SMT 처리 시 렌즈 포커스 공정을 할 수가 없어 렌즈 고유 성능 구현이 어려움이 존재한다.

이를 위하여 광경화성수지를 이용한 캐스팅 타입의 리플로우용 휴대폰 렌즈 개발에 대한 연구가 진행되어지고 있다. 이를 위하여 광경화성 수지의 수축 변형 해석에 대한 평가를 진행하기 위하여 광경화성 소재의 성형 공정에 대하여 수치적 해석이 필요하나 이에 대한 연구가 기존에 부족하여 실제 공정 개발 시 많은 시행착오를 거치고 있다[1-3].

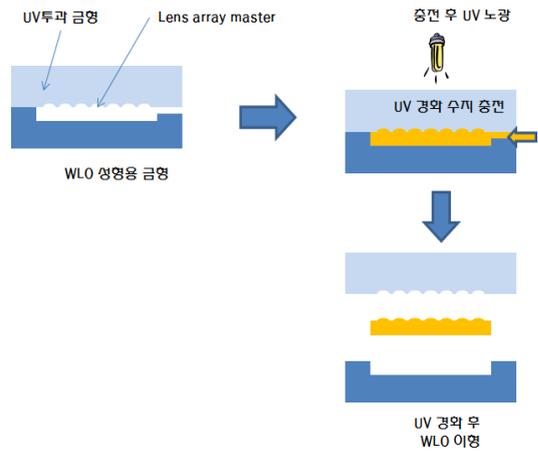
2. 연구 방법 및 경화모델

2.1 연구 방법 및 경화모델

본 연구에서는 UV 경화 과정의 고찰을 통하여 웨이퍼 단위의 렌즈 (wafer level lens) 성형에 있어서 변형에 영향을 미칠 수 있는 인자에 대하여 검토하고 이를 바탕으로 UV 경화 현상 및 변형에 대한 해석 기법 정립하고자 한다. 또한 실제 성형 결과와 비교함으로써 해석 기법의 적용 가능성을 검토한다.

Fig. 1은 웨이퍼 단위의 렌즈를 제작하는데 있어서의 공정을 간략하게 표현하였다. 이러한 렌즈는 UV 광경화성 소재를 이용하여 제작하므로 상층에는 UV투과가 가능한 금형을 사용하여 하층에는 WLO(Wafer Level Optics)성형용 금형을 사용한다. 이후 gate에서 UV경화성 소재를 주입하고 충전이 모두 끝난 이후에는 UV를 조사함으로써 경화시키고 이후 이형과정을 거친다. 이러한 공정 중에 발생할 수 있는 주요 이슈 사항은 경화 후 이형 과정에서의 성형 렌즈의 금형 고착, 경화 공정 중 발생하는 소재의 수축 현상으로 렌즈 형상 오차 발생, 성형 후 웨이퍼 변형 발생, 웨이퍼 상의 위치별 렌즈 형상 편차 발생, 웨이퍼 양면의 렌즈 형상 센터 정렬 오차 등 다양하다. 본 연구에서는 경화 도중에 금형 안에서 발

생되는 수축과 이후 내부 응력에 의해 이형 후 발생하는 변형에 관한 연구로 국한 한다. 소재와 금형간의 고착 문제 및 UV 경화소재의 물성과 수축률 문제는 소재의 특성 및 표면에너지 등 소재의 특성을 고려한 접근이 필요하여 본 연구에서는 기존의 유사 소재를 사용한 연구 결과를 채용하여 적용하고자 한다. 따라서 본 연구에서는 필요한 UV경화 소재의 경화 모델은 수정된 “simple pseudo-autocatalytic” 모델[4-7]을 사용하였으며 수축 모델은 Patham[8]의 모델을 적용하였다. 또한 상용 S/W인 Comsol을 이용하여 UV경화 과정 및 이형 이후의 웨이퍼 렌즈 변형에 대한 해석 기법을 제시하였다.



[Fig. 1] Wafer-Level Microlens Molding Process

본 연구에서는 Alfonso Maffezzoli[4]는 “simple pseudo-autocatalytic” 모델을 제시하였고 이를 바탕으로 Ha[5]는 light intensity의 효과를 고려하여 이를 수정한 모델을 식 (1)와 같이 제시하였다.

$$\frac{d\alpha}{dt} = K(T)I_0^b \alpha^m (1 - \alpha)^n \quad (1)$$

여기서 α 는 경화도, t 는 반응시간 $K(T)$ 는 온도에 기반한 반응 속도 상수, m 과 n 은 반응 차수이다. $K(T)$ 는 Arrhenius 형태로 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 또한 I_0 는 light intensity, b 는 fitting parameter, $K(T)$ 는 반응활성화 에너지이다[6].

$$K(T) = A \exp\left(\frac{-\Delta E}{RT}\right) \quad (2)$$

여기서 설명한 4가지 parameter은 실제 fitting parameter로 일정의 fitting과정을 통해서 결정되어진다.

경화도 본 연구에서 사용되는 경화도에 대한 식의 fitting parameter은 Ha[4]의 연구에서 실험한 결과를 기준으로 하였다. 실제 본 연구에 사용되는 수치를 직접 측정하여 그 결과 값을 도출하여야 하나 본 연구의 범위는 UV 경화수지의 경화 과정 동안의 메커니즘을 해석적으로 구현하고자 하는 것에 한정하였기에 실제 소재에 대한 경화도 측정은 실시하지 않았다. 하지만 동일한 계열의 소재를 사용하여 그 차이는 크지 않을 것이다.

[Table 1] Fitting Parameter

$K(T)$	b	m	n
0.1735	0.3992	1.5042	1.2667

위 (1)번의 식은 실제 두께에 고려가 되어있지 않다. 하지만 실제 공정에서는 제품의 두께가 존재하고 UV 빛이 두께에 따라 다르게 전달되어 진다. 따라서 실제 공정에 적용하기 위해서는 두께에 따른 UV intensity를 고려할 수 있는 모델이 필요하다. 따라서 이를 위하여 B. Golaz[7] 연구에 따르면 두께에 따른 UV intensity의 감소분은 식(3)와 같이 표현될 수 있고, 이를 식(1)에 대입하면 식(4)과 같이 UV 경화성 수치 기반 경화 모델은 수정될 수 있다.

$$I(\lambda, z) = I_0(\lambda) \cdot e^{-\mu z} \quad (3)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = K(T) I_0^b e^{-\mu z} \alpha^m (1 - \alpha)^n \quad (4)$$

2.2 수축모델

상용 S/W인 Comsol는 현재 UV 경화 공정을 해석할 수 있는 모듈을 가지고 있지 않다. Patham[8]의하면 온도에 의한 응력(stress)과 수축에 의한 응력의 조합으로 열경화성 소재의 경화반응 과정 중의 응력을 구현하였다. 이를 열경화성 소재의 수축과 UV에 의한 경화반응에 대한 수축이 공정에 미치는 영향이 동일함으로 열변화에 의한 수축에 의해 변형률(strain)이 발생하고 이로 인해 응력이 발생하는 열응력 모델(thermal stress model)을 도입하여 공정 중 열적 변화와 열팽창계수에 의해 발생하는 변형률을 UV경화에 의한 변형률로 상사시켰다. 이때 Comsol의 "Thermal stress model"을 사용하였고, 열응력 부분을 수정하여 경화에 따른 응력을 구현하기 위

해서는 열변형률(thermal strain) 항을 조절 하는 방법을 사용하였다. 즉 식(7)과 같은 열변형률을 경화에 따른 수축에 의한 변형률로 변경할 수 있다.

$$\epsilon_{el} = \chi(T - T_{ref}) \quad (7)$$

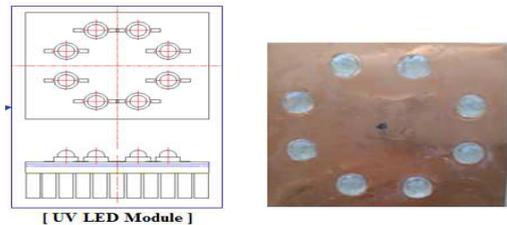
$$T_{ref} = T - \left(\sqrt[3]{1 + \Delta V_{sh}} - 1 \right) \frac{\alpha}{\chi} \quad (8)$$

이때 χ 는 열팽창계수이며 T_{ref} 을 식(9)와 같이 설정하면 열에 의해 발생하는 변형률은 상쇄되고 UV 경화도중 발생하는 수축(shrinkage)에 의한 변형률로 표현할 수 있다. 여기서 ΔV_{sh} 는 Total specific volumetric curing Shrinkage이며 α 는 경화도이다.

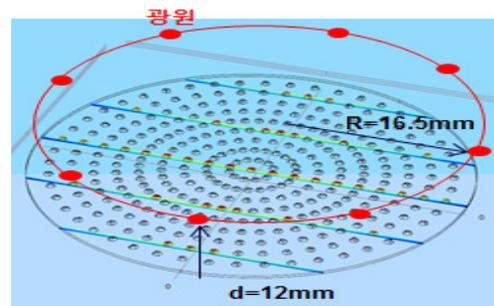
3. 실험 및 결과 분석

3.1 실험장치

본 연구에서는 Fig. 2와 같은 방식으로 UV 광원을 배치하였으며 해석적으로 구현하고자 Fig.3 과 같이 점광원으로 광원을 구현하였다. 또한 사용된 UV는 LED로 사양은 $510mW/cm^2$ (조사거리 1mm이내), 파장400nm이며, LED는 8개를 원형으로 배치(직경 33mm)하였고, 실제 조사거리는 12mm이다.

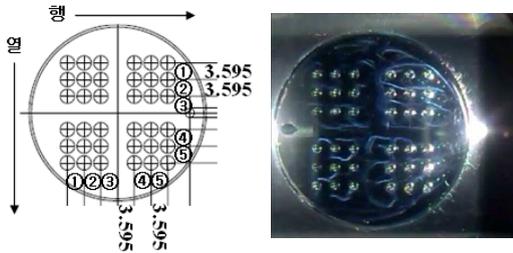


[Fig. 2] Apparatus for UV curing and LED light source



[Fig. 3] Schematic of UV curing system

웨이퍼 상에서의 렌즈의 배열은 Fig. 4과 같으며 단일 렌즈의 정확한 치수(dimension)는 공동 연구 회사의 기밀사항으로 공개하지 않는다.



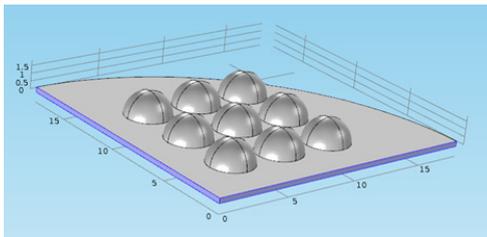
[Fig. 4] An array of lenses on the Wafer

3.2 해석 모델링 및 Boundary Condition

3.2.1 해석 모델링

해석 수행을 위하여 렌즈의 형상과 배열을 모사하고자 Fig. 5과 같이 모델링하였다. 광원의 위치 렌즈의 형상 및 배열이 4개의 분면에 모두 대칭구조로 되어있어 해석 시간의 단축과 단일 렌즈의 변형의 검토 등을 위하여 1/4 모델링을 수행하였다. 또한 여러 개의 웨이퍼를 적층할 시 문제가 될 수 있는 z축 방향의 변형 검토가 필요하여 얇은 제품의 해석에 주로 사용되는 “Plane strain” 가정을 적용 불가로 Full 3D로 모델링하였다.

해석에서 적용된 웨이퍼의 반지름은 18 mm이며 제품의 base 두께는 0.33 mm로 하였고, 렌즈의 반지름은 렌즈의 설계치를 기준으로 하였다.

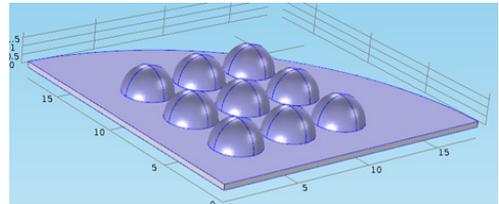


[Fig. 5] Modeling

3.2.2 Boundary Condition 설정

금형 안에서 UV경화가 일어나는 공정을 해석하기 위하여 Fig. 6와 같이 B.C를 설정하였다. 전체 모델 중 1/4만 해석을 진행하기 때문에 대칭면에 symmetric B.C를 설정하였고, 금형면은 법선(normal) 방향으로 fixed B.C

를 적용하였으며 접선방향으로는 free B.C를 적용함으로써 경화반응 시 수축중 금형면을 미끄러지는 효과를 모사하였다. 이러한 구속 조건은 사출성형 해석에서도 일반적으로 사용되어진다. 하지만 소재와 금형면에서의 표면(surface) 에너지에 의한 고착 등은 추가적으로 고려되어야 할 것이나 본 연구과제에서는 적용하지 않았다. 마지막으로 같이 중앙의 edge를 고정하였다.



[Fig. 6] Setting boundary conditions for the analysis

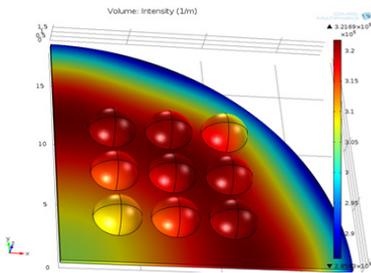
또한 이형 후 금형안에서 경화로 인한 내부 응력에 의해 발생하는 변형을 해석하기 위하여 경계조건을 설정하였다. 이때도 1/4 모델링으로 해석을 진행하기 때문에 대칭면에 symmetric B.C를 설정하였으며, 중앙의 하단 점을 고정하였다. 그리고 금형에서 완전히 이형된 이후의 상황을 모사하는 것이기 때문에 다른 모든 부분에서는 free B.C를 적용하였다.

3.3 해석 결과 및 분석

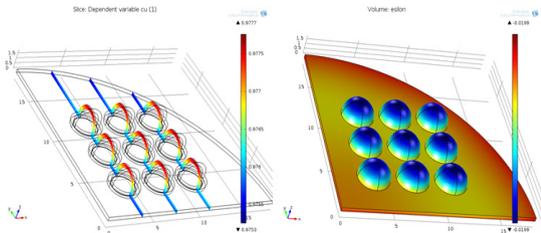
3.3.1 경화도 분석

본 연구는 광경화성 소재의 경화 과정 및 이형 이후의 변형을 해석하기 위한 연구이다. 따라서 경화 과정에 대한 기본적 신뢰성 확보가 중요하다. 이를 위하여 우선 광원에 배치에 의한 UV Intensity 결과 검토가 중요하다. 본 연구에서는 앞서 설명한 것과 같이 8개의 점광원을 가정하였고 이에 의해 표면에서 받는 UV Intensity는 Fig. 7와 같다. 광원이 원주의 테두리 부분에 배열되어 있기 때문에 테두리 부분과 중앙부는 상대적으로 intensity가 낮고 원주 안쪽은 8개의 광원에 의해 intensity가 상대적으로 높은 편이다. 광경화성 소재의 경화도는 UV Intensity에 의한 주로 결정되기 때문에 이를 균일화할 수 있는 광원의 배열에 대한 최적화가 필요하다. Fig. 8는 두께별 경화도를 나타내고 있다. 이는 UV Intensity와 직접적인 연관관계가 있고 두께에 대한 UV Intensity를 고려하는 모델을 사용하여 두께에 의한 경화도의 정도차이

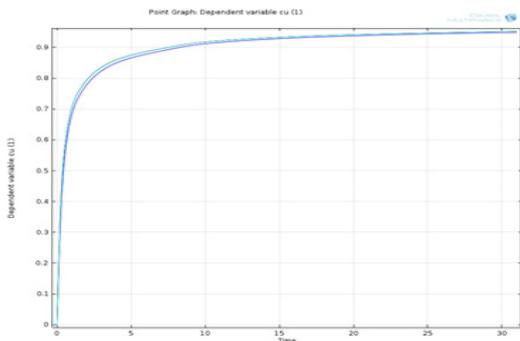
를 구현 하였다. 광원과 가까운 쪽에서의 경화도는 비교적 높으면 거리가 상대적으로 먼 바닥면이 경화도는 상대적으로 낮다. 이는 z축 방향의 변형의 원인으로 작용한다. Fig. 9은 렌즈 상단에서의 경화도를 시간에 대하여 표현하였다. 해석결과 경화초기에 급격한 경화 과정이 진행되며 해석 시간이 31초 이후에는 99%이상의 경화가 진행됨을 볼 수 있다. 이 결과를 바탕으로 금형안에서의 경화 목표를 설정하고 공정 시간에 대한 검토를 진행할 수 있다.



[Fig. 7] UV Intensity distribution result



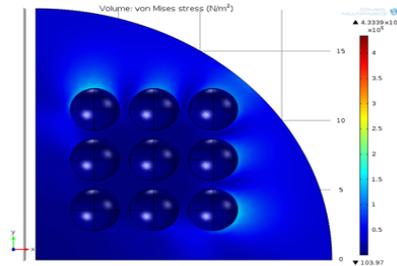
[Fig. 8] The result of the influence of thickness and distance from the light source on the degree of cure



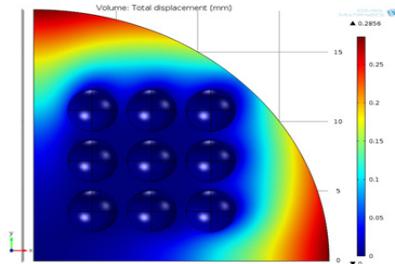
[Fig. 9] The degree of cure as a function of time

3.3.2 금형내 응력 분석 및 변형 분석

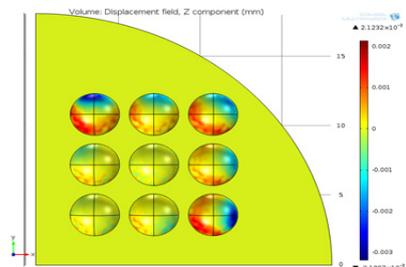
Fig. 10는 해석 시간 31초 이후의 99% 경화 후 금형내에서의 응력 분포를 나타내고 있다. 금형면의 normal방향으로는 고정되어 있고 x,y축으로의 변형 허용하였기 때문에 이에 의하여 바깥쪽 렌즈 바닥 부분에서는 응력이 발생한다. 또한 이때 Fig. 11, 12와 같이 전체 변형량은 최대 약 0.29 mm이며, z축 변형은 거의 발생되지 않는다.



[Fig. 10] The stress distribution in the mold after 31 seconds and 99% cure



[Fig. 11] The total amount of deformation in the mold after 31sec



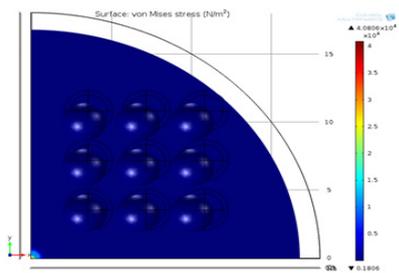
[Fig. 12] The the amount of deformation of the z direction in the mold after 31sec

3.3.3 이형 후 stress 분석 및 변형 분석

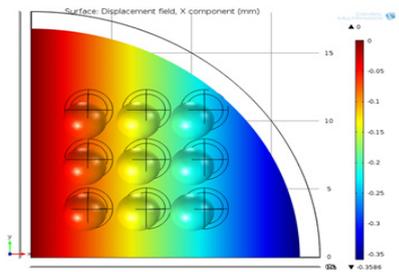
Fig. 13는 경화 완료 후 이형공정을 거친 제품의 응력

분포이다. 중앙부 응력이 높은 부분은 free body motion의 방지를 위하여 설정한 B.C에 의한 응력집중구간이다. 본 해석결과 잔류 응력이 대부분의 영역에서 풀렸음을 알 수 있다.

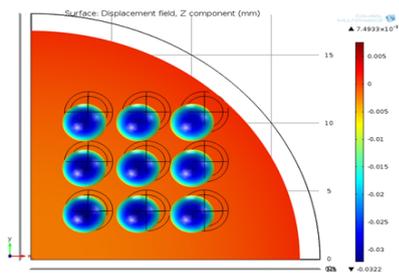
Fig. 14, 15는 경화 완료 후 이형공정을 거친 제품의 전체 변형 결과 및 x축 z축에 대한 변형 결과이다. 경화 과정에서 불균일하게 변형이 발생하였으나 이형 후 렌즈에 의한 구속 조건이 풀려 전반적으로는 비교적 균일한 x, y축 방향으로의 변형이 발생한다. 또한 z축의 변형 차이도 부분별로 크지 않다.



[Fig. 13] The stress distribution after demolding



[Fig. 14] The the amount of deformation of the x direction after demolding process

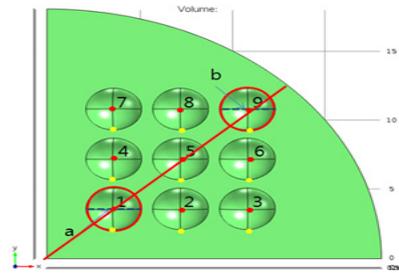


[Fig. 15] The the amount of deformation of the z direction after demolding proces

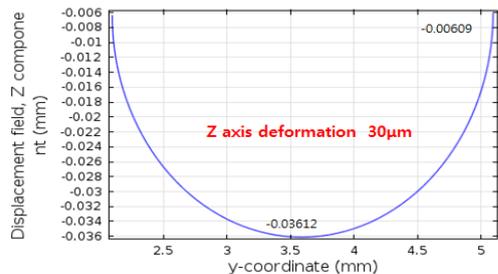
3.3.4 이형 후 렌즈별 변형 검토

일반적으로 렌즈 모듈은 각각의 렌즈를 적층하여 모듈화한다. 따라서 각각의 렌즈에 대한 변형 검토가 필요하다. 따라서 Fig. 16와 같이 9개 렌즈에 대해서 각 렌즈의 주요점을 중심으로 분석을 진행하였다. Fig. 17 와 Fig. 18는 1번과 9번에 대한 구면에 대한 z축 변형량을 측정 결과 1번 렌즈와 9번 렌즈 모두 30 μ m의 수축변형이 발생하였다. 이를 개선하기 위하여서는 수축을 보상하기 위한 공정의 도입이 필요하다. 사출성형의 경우 보압공정으로 일반적으로 수축을 보완하지만 광경화성 소재의 경우 이러한 보압공정을 마련하기 어렵다. 따라서 수축을 보상하기 위한 compression 공법을 적용할 필요가 있다. Fig. 19는 중심과 연결된 반경방향의 선을 따라 바닥면의 변형 결과를 나타내고 있으며 Fig. 20은 렌즈 꼭지점 부분 변형결과를 나타내고 있다. 그 결과 바닥면은 약 4 μ m가 변형되고 있으며 결과적으로 렌즈 꼭지점 부분도 상대적으로 중앙부 1번 위치보다는 9번 위치가 상대적으로 들러 있음을 알 수 있다. 이는 렌즈를 적층시킬 때 불량요인으로 작용한다.

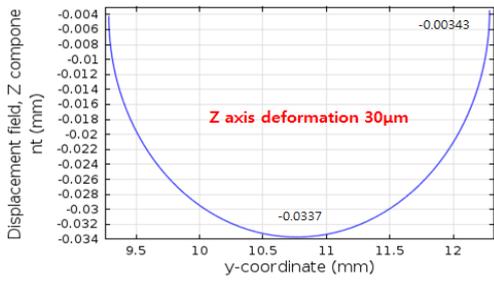
Fig. 21과 Fig. 22는 1번과 9번에 대한 렌즈 하단면에서의 반지름의 변화를 나타낸 결과이다. 이는 반지름의 변화량이 1번, 9번 렌즈 모두 29.8 μ m~29.9 μ m으로 렌즈의 높이 변화와 거의 같아 각각 렌즈에서의 실제 구경의 차이는 극히 미비하다.



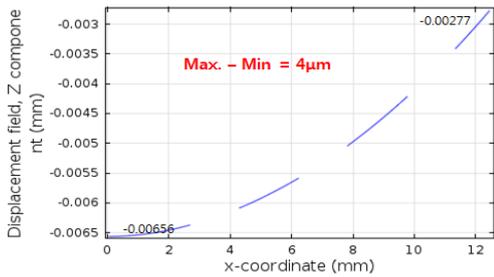
[Fig. 16] Measuring point



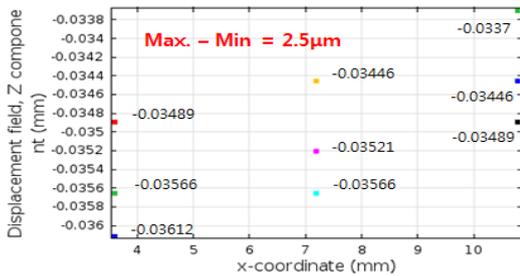
[Fig. 17] the variation of a z-axis direction of the circle 1



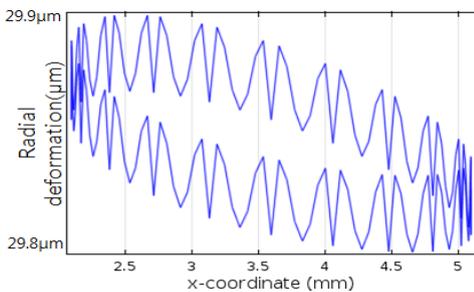
[Fig. 18] the variation of a z-axis direction of the circle 9



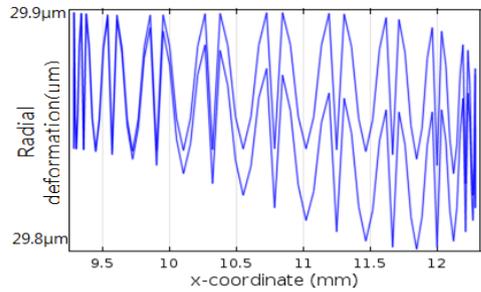
[Fig. 19] the variation of a z-axis direction along a diagonal line on the bottom surface



[Fig. 20] the variation of a z-axis direction in the measuring point

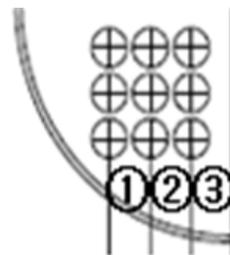


[Fig. 21] The amount of change in the radius at circle 1



[Fig. 22] The amount of change in the radius at circle 9

Fig. 23 와 Table 2 는 위치에 따른 공차 및 누적 공차에 대한 결과이다. 실험과 해석에는 다소간의 차이가 발생하고 있다. 이는 소재의 정확한 물성 반영이 이뤄지지 않았기 때문이다. 현 해석 적용 소재의 수축율이 6%이다. 이는 일반적인 아크릴레이트 계 광경화성 소재의 수축율이다. 하지만 실제 수축률에 대한 측정이 매우 어렵고 실제 소재에 대한 수축률에 대한 명확한 측정 데이터를 마련하는 것은 또 다른 연구 과제로 삼을 만큼 어려운 과제로 본 연구에서는 다루지 않았지만 이에 대한 명확한 측정이 필요하다. 따라서 본 해석과 실험의 차이는 사용 소재의 물성에 기인한 것으로 판단 할 수 있다.



[Fig. 23] Measuring point

[Table 2] The result of the cumulative tolerance

1	Measured	0.052
	Calculated	0.07167
2	Measured	0.039
	Calculated	0.07167
3	Measured	0.058
	Calculated	0.07167
Cumulative tolerance	Measured	0.149
	Calculated	0.21501

4. 결론

본 과제의 궁극적 목표는 웨이퍼 기반 휴대폰용 카메라의 렌즈를 성형하는데 있어서 사전에 공정상의 문제점을 분석하고 개선할 수 있는 해석 툴(simulation tool)을 개발하고자 함에 있다. 광경화성 소재를 사용하여 경화 과정에서 발생될 수 있는 문제점을 분석하고 이형이후의 변형을 예측할 수 있는 해석 툴이 기존에 개발되어 있지 않아 실제 공정에서는 많은 시행착오를 겪을 수밖에 없었으나 본 연구의 수행으로 UV경화 과정에 대한 해석 기반을 구축하였고 이를 실제 실험과 비교 검토를 통하여 신뢰성을 확보하였다. 따라서 향후 렌즈의 성형 뿐 아니라 산업현장에서 널리 사용되고 있는 UV경화 방식으로 생산되어지고 있는 많은 부품의 생산 공정에 폭 넓게 사용될 수 있을 것이다.

References

- [1] H. Schmitta, M. Rommela, A.J. Bauera, L. Freya, A. Biche, M. Eisner, R. Voelkel, M. Hornung, "Full wafer microlens replication by UV imprint lithography", *Microelectronic Engineering*, Volume 87, Issues 5-8, May - August 2010, pp. 1074 - 1076
- [2] R. Voelkel, J. Duparre, F. Wippermann, P. Dannberg, A. Bräuer, R. Zoberbier, M. Gabriel, M. Hornung, S. Hansen, R. Suess, "TECHNOLOGY TRENDS OF MICROLENS IMPRINT LITHOGRAPHY AND WAFER LEVEL CAMERAS (WLC)", *MOC'08, Conference on Micro-Optics*, Brussels, Belgium on September 25 - September 27, 2008
- [3] H. Han, M. Kriman, M. Boomgarden, "Wafer Level Camera technology - from wafer level packaging to wafer level integration", *Electronic Packaging Technology & High Density Packaging (ICEPT-HDP), 2010 11th International Conference on*, 16-19, pp. 121 - 124, Aug. 2010
- [4] A. Maffezzolia, R. Terzib, "Effect of irradiation intensity on the isothermal photopolymerization kinetics of acrylic resins for stereolithography", *Thermochimica Acta*, Volume 321, Issues 1-2, pp. 111-121, November 1998
- [5] M.J. Ha. "Cure Kinetics Modelling of UV Curable Resin", master's thesis, SNU 2008
- [6] U. Muller, S. Jockusch, H.J. Timpe., "Photocrosslinking of silicones. VI. Photocrosslinking kinetics of silicone

acrylates and methacrylates", *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry* Volume 30, Issue 13, pp. 2755 - 2764, December 1992

DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/pola.1992.080301311>

- [7] B. Golaz, V. Michaud, Y. Leterrier, J.-A.E. Manson, "UV intensity, temperature and dark-curing effects in cationic photo-polymerization of a cycloaliphatic epoxy resin", *Polymer* Volume 53, Issue 10, 25 pp. 2038-2048, April 2012
- [8] B. Patham, "COMSOL® Implementation of a viscoelastic model with cure-temperature-time superposition for predicting cure stresses and springback in a thermoset resin", *Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference 2009 Bangalore*

박 시 환(Si-Hwan Park)

[정회원]



- 1999년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학사)
- 2001년 2월 : 서울대학교 대학원 기계항공공학부 (공학석사)
- 2011년 2월 : 서울대학교 대학원 기계항공공학부 (공학박사)
- 2012년 9월 ~ 현재 : 울산과학기술대학교 디지털기계학부

<관심분야>

사출금형, Polymer Processing

문 종 신(Jong-Sin Moon)

[정회원]



- 1990년 2월 : 서울대학교 기계설계과 (공학사)
- 1992년 2월 : 서울대학교 공과대학원 기계설계학과 (공학석사)
- 1999년 2월 : 서울대학교 공과대학원 기계설계학과 (공학박사)
- 2002년 5월 ~ 2014년 2월 : LG화학 부장

• 2014년 2월 ~ 현재 : LG전자 수석연구원

<관심분야>

사출성형, 컴퓨터응용설계