

마이크로 렌즈 성형시 형상에측을 위한 유한요소해석

진병희* · 홍석관** · 표창률*

Finite Element Analysis for Shape Prediction on Micro Lens Forming

B. H. Jeon, S. K. Hong and C. R. Pyo

Abstract

Among the processes to produce micro lens, the process using press-molding is a new technology to simplify the process, but it contains many unknown variables. The press-molding process proposed in this paper was simplified into two step process, the first step is the pressing to design the preform for glass element, the second step is the annealing to reduce the residual stress. It is important to estimate the amount of shrinkage of glass gob and the residual stress during process. It is difficult to evaluate the process variables as mentioned above through the experiment. The influences due to process variables was evaluated by using FEM parametric analysis. The results in this paper can be applicable to produce micro lens.

Key Words : Press-Molding Process, Residual Stress, Shrinkage, Annealing Process,
Micro Lens Forming, Shape Prediction, Cooling Effect

1. 서론

현재 정보화에 따른 산업의 구조가 전통 기계산업에서 초정밀 가공산업으로 이동하고 있다. 따라서 최근 광산업이 새로운 고부가가치 산업의 하나로 각광을 받고 있다. 광학렌즈의 경우 최근 들어 반도체, 영상정보, 전자광학 분야 등의 첨단 산업분야가 확대 발전됨에 따라 광학부품에 대한 경량화와 정밀화의 요구가 높아지고 있으며, 비구면 렌즈에 대한 수요가 급속히 증가하고 있다.

또한, 사용되는 광 파장이 짧아짐에 따라 렌즈의 정밀도가 높은 제품이 요구되고 있는 추세이다.⁽¹⁾

렌즈의 가공기술은 래핑 및 폴리싱 기술, 사출성형기술, 유리성형기술, 연삭숫돌을 사용하는 연삭가공기술 등이 있으며, 이들 가공기술은 렌즈의 소재면에서 크게 사출성형기술과 유리성형기술로 나눌 수 있다. 사출성형기술은 최근 상품에 응용되어 렌즈의 저가격화와 소형화 경량화에 기여하고 있다.

플라스틱렌즈는 가볍고 충격에 강하며 정밀급형에 의

* 인덕대학교 컴퓨터응용기계계열
** 인덕대학교 산업기술연구원

해 자유로운 형상을 저가격으로 양산할 수 있다는 장점이 있는 반면에 열과 온도에 의해 광학적 특성이 변하는 등 유리렌즈에 비하여 신뢰성이 떨어지는 단점이 있다.

유리렌즈는 내열성이 높고 단단하며, 화학적으로 안정하여 열화가 적어 넓은 사용범위를 가진다. 또한 광학적인 측면에서 굴절률의 선택범위가 넓다는 큰 장점이 있다. 그러나 유리성형기술은 정밀 연삭 및 폴리싱 공정을 통한 가공방법과 코팅기술등 매우 복잡하고 많은 공정으로 이루어진다. 또한, 렌즈의 크기가 작아지면 연삭공정에서 렌즈를 고정시켜야 하는데 이것이 어렵게 되고 그에 따라서 가공하려고 하는 렌즈의 정확한 중심, 위치맞춤이 어려워지므로 렌즈의 정밀도를 맞추기가 어렵다.

따라서 높은 제조원가로 인하여 관련 제품의 가격경쟁력을 확보하기가 어려운 실정이다. 이러한 유리렌즈가공 기술의 난이성 때문에 유리렌즈의 광학적 우수성에도 불구하고 점차 플라스틱 사출렌즈로 대체되는 실정이다.

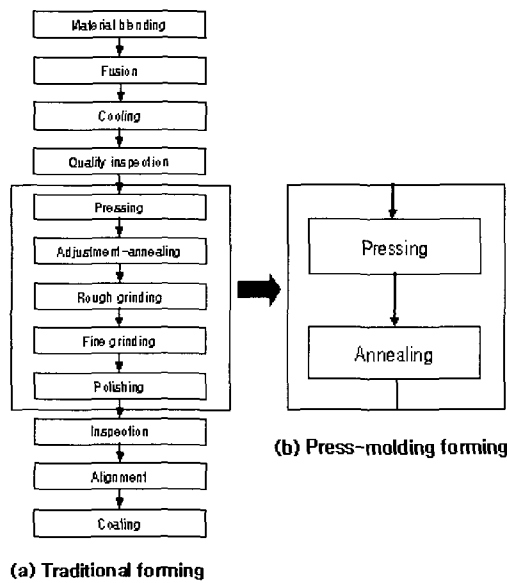


Fig. 1 Traditional forming process and Press-molding process

그러나 최근 유리렌즈가공 기술의 한계를 극복하기 위해서 새로운 기술개발이 이루어지고 있으며 그 중 하나가 바로 프레스-몰딩 기술이다. 기존의 렌즈의 제작 방법에서 Fig. 1에 나타난 바와 같이 연삭과 연마공정을 생략하고 렌즈를 직접 프레스-몰딩 성형하여 완제품을 제작하는 획기적인 기술이다. 따라서 직접 프레스-몰딩 성형하여 초소형 렌즈를 제조하게 되면 위와 같은 문제점을 극복할 수 있을 뿐만 아니라 제조 방법이 간단하여

자동화가 가능하게 되어 대량 생산이 가능하여 제조 단가가 저렴해지며 재료를 절약할 수 있고 생산성이 뛰어나므로 제조 시간이 단축되는 장점을 가지게 된다.

프레스-몰딩기술은 기존의 공정에 비해 공정수가 줄어드는 반면에 프레스(pressing)와 어닐링(annealing)이 동시에 이루어져 많은 공정변수로 제어해야 하는 어려움이 있다. 공정변수로는 크게 프레스에서 요구되는 변수와 어닐링에서 요구되는 변수로 나눌 수 있다. 프레스시에는 가열하기 전 원소재인 유리재료(glass element)를 성형하기 알맞은 온도로 가열하여 유리굽(glass gob)으로 만드는데 이때 굽형의 온도와 유리재료의 온도를 제어하는 것이 중요하다. 또한 고온의 유리굽을 성형할 때 유리는 온도에 따라 다른 점도값을 가지게 된다. 점도값의 변화는 프레스 압력값과 밀접한 연관성을 가지며 이는 소재를 성형 후 냉각할 때 프레스 압력값을 달리 해야 함을 의미한다. Fig. 2는 원통형 형태의 소재를 가공했을 때 굽형과 소재사이에 공기로 인해 제품이 올바르게 성형되지 않았음을 보여준다. 따라서 예비성형체(preform)를 달리하여 공기를 제거해야만 한다.⁽²⁾ 또한 적절한 예비성형체 설계는 굽형의 압력 분배를 이룰 수 있어 굽형수명 연장에도 도움이 된다.

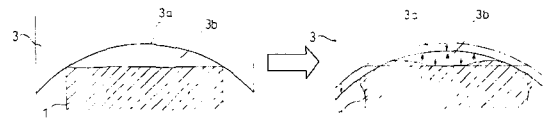


Fig. 2 Schematic diagram of preform design

어닐링 시에는 유리의 전이온도 이상에서 성형하여 상온으로 냉각할 때 냉각속도에 따라 잔류응력(residual stress)이 다르게 나타나며 수축량 또한 다르다. 성형체가 냉각 후 수축으로 인해 형상이 왜곡되면 렌즈의 곡면이 바뀌게 되어 구면수차가 심하게 발생한다. 따라서 형상 왜곡을 억제하기 위해서는 냉각시 프레스가 동시에 이루어져야 한다. 이러한 여러 변수들을 제어하기 위해서는 실험적인 시행착오에 의해 설계가 이루어지게 되는데 이는 많은 비용과 시간을 필요로 하며, 비효율적이다. 따라서 유한요소법(finite element method)을 이용하여 가상의 성형공정해석을 함으로써 시간과 비용을 절약할 수 있다.

본 문에서는 광 화이버에 커플링으로 사용하는 지름 1.8mm의 마이크로 비구면 렌즈(micro aspherical glass lens)를 대상으로 여러 변수들이 성형 후 렌즈형상과 잔류응력에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

2. 이론적 배경

2.1 프레싱 공정 해석 모델

일반적으로 유리의 거동은 온도에 따라 크게 3가지로 분류할 수 있다. 유리 전이온도를 기준으로 전이온도보다 낮은 온도에서는 고상(solidus)영역으로 유리의 거동은 탄성변형에만 의존한다. 또한 전이온도보다 높은 온도에서는 액상(liquidus)영역으로 유리의 거동은 점성에만 의존한다. 그러나 전이온도영역에서의 유리 거동은 탄성과 점성의 성질(visco-elasticity)이 모두 나타난다.

따라서 프레싱 공정은 전이온도 이상에서 이루어짐으로 유리의 거동을 비압축성 뉴턴유체(incompressible Newtonian fluid)로 보고 다음과 같은 식에 의해서 변형률속도의존 점성의 항으로 표현할 수 있다.

$$\sigma'_{ij} = \left(\frac{2\bar{\sigma}}{3\bar{\epsilon}} \right) \dot{\epsilon}_{ij} = \mu(\bar{\epsilon}) \dot{\epsilon}_{ij} \quad (1)$$

여기서 $\bar{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3}\dot{\epsilon}_{ij}\dot{\epsilon}_{ij}}$ 는 유효변형률속도, $\bar{\sigma}$ 는 변형률속도에 의존하는 항복응력이고, $\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3}\delta_{ij}\sigma_{kk}$ 는 편차 응력이다. 따라서 상당 점성계수(effective viscosity)는 다음과 같다. ⁽³⁾

$$\mu = \frac{2\bar{\sigma}}{3\bar{\epsilon}} \quad (2)$$

일반적으로 작업온도는 연화점(softening point)으로 ASTM 규격에 따라 점도를 $10^{7.6}$ poise로 볼 수 있고 해석에 사용한 유리는 Lead Silicate glass계로 hoya 광학 유리 조성표를 참고하였으며 해당 연화점이 696.85°C 이다. 따라서 해당온도에서 변형률속도에 의존하는 유리값의 경화거동은 von Mises의 등방성 소성이론과 등방 경화률을 적용하여 다음과 같은 구성방정식으로 표현할 수 있다. ⁽⁴⁾

$$\bar{\sigma} = 5.97\bar{\epsilon} \quad (3)$$

2.2 어닐링 공정 해석 모델

프레싱 공정 후 냉각가스로 주위온도를 낮추어 고온의 유리값을 냉각하여 제품을 만드는데 이때 빠르게 급냉하면 유리는 표면과 내부가 다른 속도로 냉각되므로 잔류

응력을 갖는다. 이 잔류응력은 전이 영역에서 열처리함으로써 이완시켜야 한다. 잔류응력은 템퍼링(tempering) 처리한 유리와 같이 어떤 때에는 바람직 하지만 광학렌즈에 복굴절을 생기게 하는 원인이 되기도 한다. 따라서 광학적 이용에는 창유리 용기유리에서 요구되는 것보다도 훨씬 낮은 값으로 내부응력을 감소시키지 않으면 안된다. 또한 전이온도 이상으로 가열된 유리를 상온으로 냉각하면 수축량이 크기 때문에 렌즈의 형상이 왜곡되어 구면수차가 심하게 발생할 수 있다. 따라서 위와 같은 물리적 현상을 표현하기 위해 다음과 같은 두 가지 모델을 고려하였다.

첫째, 힘에 대한 응력이완 평가를 위해 응력이완함수(stress relaxation function)로 점탄성 모델 중 이력적분 모델(hereditary integral model) ⁽⁵⁾을 사용하였다.

$$\epsilon(t) = C(t)\sigma(0) + \int_0^t C(t-\tau) \frac{d\sigma(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (4)$$

여기서 $\epsilon(t)$ 는 임의의 시간 t에서의 변형, $C(t)$ 는 크리프응답(creep compliance), $\sigma(\tau)$ 는 응력 이력, τ 는 이력시간이다.

둘째, 온도에 대한 응력이완 평가를 위해 이동함수(shift function) 중 Narayanaswamy 모델 ⁽⁶⁾을 사용하였다.

$$\xi(t, T) = \int_0^t \exp\left(-\frac{H}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T(t')} \right)\right) dt' \quad (5)$$

여기서 $\xi(t, T)$ 는 임의의 시간과 온도에서의 환산시간(reduced time)이고, H는 활성화에너지(energy of activation)이며, R은 완전기체상수, T_{ref} 는 기준시간(reference temperature)이다.

Table 1 Thermo-viscoelastic characteristics

Young's modulus (Gpa)	Poisson ratio	K_g/K_g	H/R	α_g	α_1
70	0.22	0.18	55,000K	9×10^9	25×10^9

점탄성(visco-elasticity)해석에 필요한 주요 물성치는 크리프(creep) 실험으로 구해지며 본 연구에서는 이와 유사한 수치 ⁽⁶⁾를 사용하였으며 Table 1과 Table 2에 나타냈었다.

Table 2 Viscous and structural relaxations - weights and relaxation times ($T_{ref}=590.85^{\circ}\text{C}$)

Term No.	Shear Constant (Gpa)	Relaxation Time
1	6.498	3.292
2	8.204	7.497×10^{-1}
3	6.558	1.672×10^{-1}
4	3.485	1.514×10^{-2}
5	2.353	1.197×10^{-3}
6	1.584	6.658×10^{-3}

Term No.	Bulk Constant	Relaxation Time
1	10.896	2.033
2	13.470	1.199×10^{-1}
3	7.301	1.925×10^{-2}
4	0.980	2.022×10^{-3}
5	0.765	9.945×10^{-4}
6	0.758	5.009×10^{-3}

Term No.	Weight	Reference Relaxation Time
1	2.265×10^{-1}	29.630
2	2.860×10^{-1}	6.747
3	2.286×10^{-1}	1.505
4	1.215×10^{-1}	1.362×10^{-1}
5	8.205×10^{-2}	1.077×10^{-2}
6	5.523×10^{-2}	5.965×10^{-1}

3. 프레스 몰딩 공정

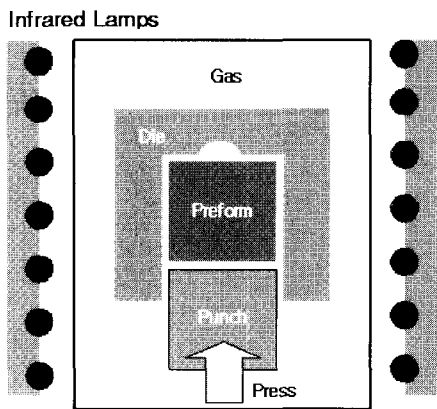


Fig. 3 Schematic diagram of press-molding process

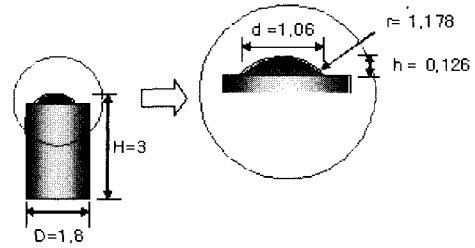


Fig. 4 Dimension of micro aspherical lens

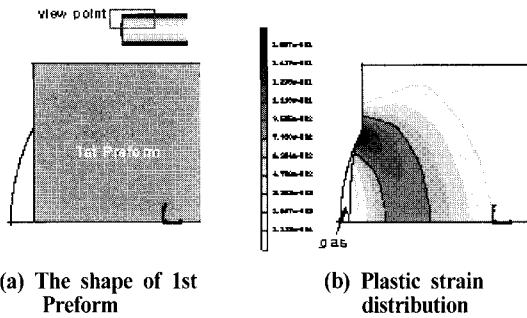
Fig. 3은 프레스 몰딩 공정 시스템의 개념도를 나타낸 것이다. 가열 시스템은 여러 가지 방법이 있으나 본 연구에서는 그림에서와 같이 적외선 램프의 복사열로 급형과 유리재료를 동시에 가열하는 방법으로 하였다. 따라서 가열 초기에는 급형과 유리의 열전달계수가 달라 가열속도가 다를지라도 일정시간 가열한 뒤 성형함으로써 성형시 온도는 같다. 그러므로 프레스 공정해석은 등온상태로 가정하여 열전달은 고려하지 않았다. 또한 어닐링 공정해석에서는 가스로 생각하는 방식으로 급형과 소재간의 온도차가 크지 않아 급형과 소재간의 열전달을 고려하지 않았다. Fig. 4는 해석에 사용한 정확한 제품의 치수를 나타낸 것이다.

4. 프레스 공정 유한요소해석

4.1 예비성형체 설계

해석은 축대칭 모델로 4절점 비압축 요소인 Hermann incompressible elements를 사용하였다. 또한 성형공정동안 동일한 온도를 유지하여 유리곱의 온도변화가 없음을 가정하였으며 고착조건을 적용하기 위해 예비성형체와 급형간의 마찰계수를 1.0으로 설정하였다. 고온의 유리곱은 프레스 압력이 적을 뿐만 아니라 내부 응력도 수 초 내에 완성이 되기 때문에 응력 평가는 큰 의미가 없으며 예비성형체 설계의 목적을 Fig. 2에서 보이듯이 공기를 제거하기 위한 방향으로 이루어 졌다.

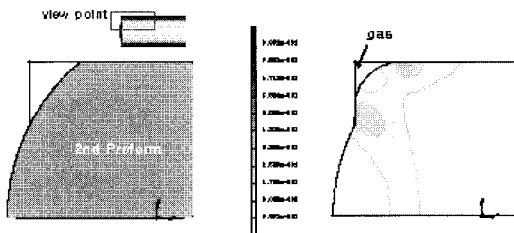
먼저 Fig. 5를 보면 일반적인 원통형 예비성형체는 가공은 용이하지만 성형과정에서 공극(cavity)이 생겨 가스가 압축되어 성형중 가스를 제거해야 하는 번거로움이 있다. 따라서 Fig. 6과 같이 예비성형체의 끝을 원형으로 하여 내부 가스를 밀어내는 방식으로 개선하였으나 역시 공극이 발생하였다. 이러한 공극을 제거하기 위해 Fig. 7과 같이 하부의 플래시(flesh)부를 상부로 이동하여 가스를 밖으로 밀어내는 방식으로 개선하였다.



(a) The shape of 1st Preform

(b) Plastic strain distribution

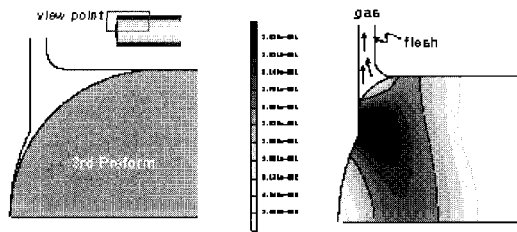
Fig. 5 Prediction of deformation for the shape of 1st preform



(a) The shape of 2nd Preform

(b) Plastic strain distribution

Fig. 6 Prediction of deformation for the shape of 2nd preform



(a) The shape of 3rd Preform

(b) Plastic strain distribution

Fig. 7 Prediction of deformation for the shape of 3rd preform

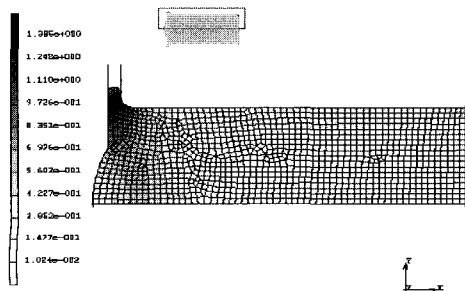


Fig. 8 Plastic strain distribution of deformed 3rd preform

5. 어닐링 공정 유한요소해석

5.1 잔류응력 평가

고온 유리를 냉각하면 유리 표면은 급속히 냉각하여 수축하는 반면에 내부는 고온이어서 수축은 느리다. 이 결과 표면의 수축이 억제된다. 따라서 표면근방에는 표면에 평행한 방향으로 인장응력이 발생하며 내부는 압축응력이 발생한다. 온도가 계속 냉각되어 유리전이온도보다 낮아지면 유리표면은 고상(solidus)이 되고 내부는 아직 액상(liquidus)으로 남아있게 된다. 따라서 표면은 압축응력이 발생하고 내부는 인장응력이 발생하여 상온에서 잔류응력으로 남게 된다.⁽⁸⁾

Fig. 9는 프레싱 공정 후 분위기 온도 20°C에서 자연대류(free convection)로 냉각하였을 때 시간에 따른 렌즈 부의 지름방향 주응력(principal stress) 분포를 나타낸 것인데 최종적으로 냉각이 완료되었을 때 렌즈 표면에는 압축응력이, 내부에는 인장응력이 분포하는 것을 볼 수 있다. 그러나 냉각초기에서는 상기 한 바와 같이 최종 응력상태와 반대의 양상을 보이는데 Fig. 9의 section A부를 확대해서 보면 Fig. 10과 같이 일시적인 온도구배에 의해 렌즈의 표면에는 인장응력이, 내부에는포 압축응력이 각각 증가하다가 점차 점성흐름(viscous flow)이 일어나 응력이 이완되어 다시 감소하는 구조이완 (structural relaxation)현상이 잘 나타나고 있다. 또한 냉각 초기에 응력이 역전되기 전 최대응력 분포를 Fig. 11에 나타내었다. 그리고 최종냉각 후 잔류응력분포는 Fig. 12에서 보이듯이 빛이 통과하는 주요부분인 중심부 A,B에서 집중되는데 이러한 응력집중으로 인하여 빛이 산란되어 렌즈의 성능저하가 예측된다.

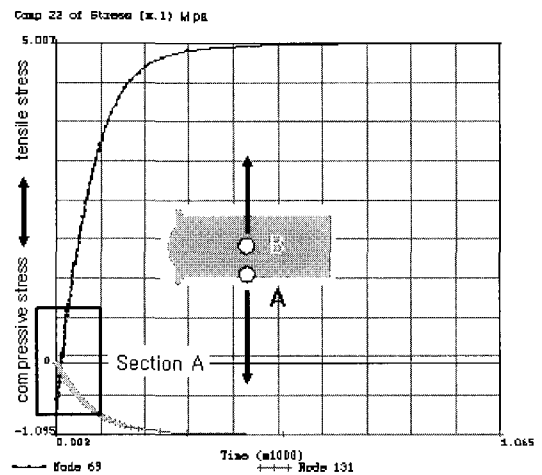


Fig. 9 Computed axial stress versus time at the surface and in the inner part of the lens

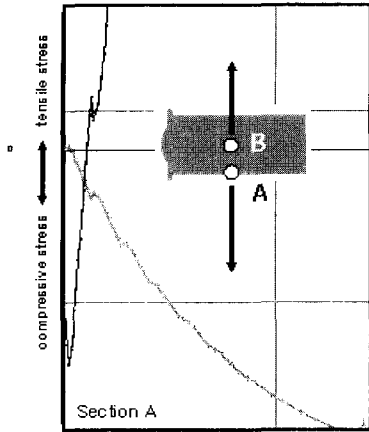


Fig. 10 Computed axial stress versus time at the section A

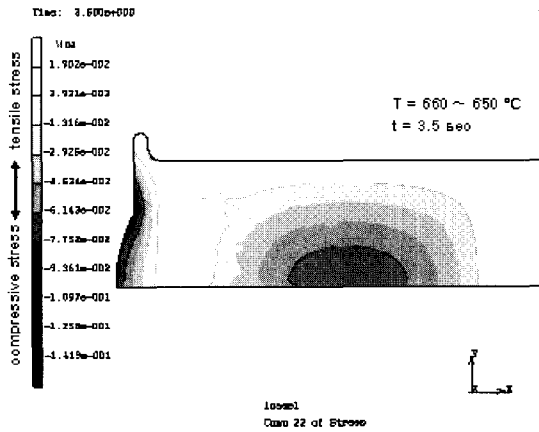


Fig. 11 Principal stress distribution at the initial cooling

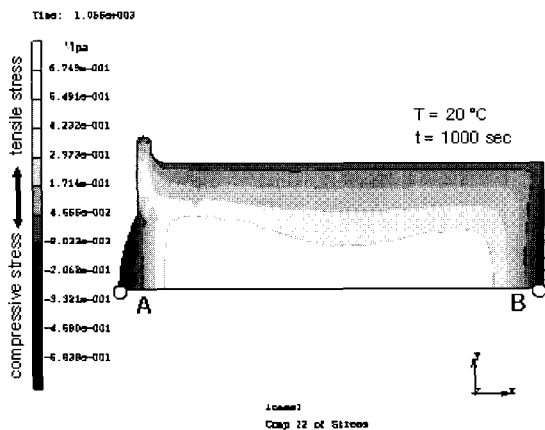


Fig. 12 Principal stress distribution at the final cooling

5.2 수축량 평가

렌즈 부의 형상은 빛을 의도적으로 굴절시키는 부분으로 정밀도가 요구되는 부분이다. 그러나 산류응력은 산란손실의 원인이 되며 수축현상에 의한 형상 왜곡은 굴절률에 영향을 미친다. 따라서 성형 후 상·하급형을 제거하고 그대로 상온에 방치하였을때 수축량의 정도를 평가하였는데 Fig. 13에 보이듯이 성형체가 균일하게 수축하여 체적이 약 1.21% 감소함을 알 수 있었다. 또한 Fig. 13과 같은 방법으로 렌즈 부의 A점부터 B점까지 축방향 이동량을 계산하여 도시한 Fig. 14는 냉각전 렌즈부 형상과 냉각후 렌즈부 형상을 비교하여 변형된 정도를 나타낸 것인데 렌즈의 중심이 표면보다 더 많이 수축한 것을 알 수 있다.

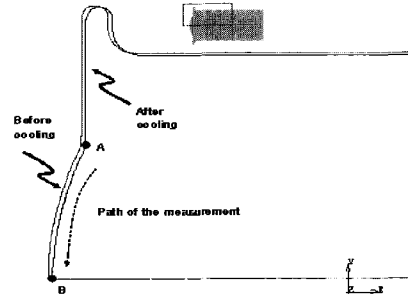


Fig. 13 Prediction of Shrinkage shape after cooling

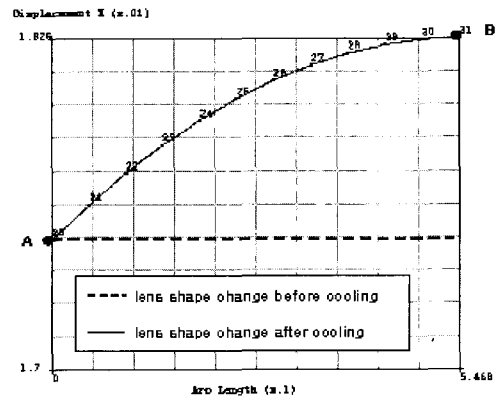


Fig. 14 Comparison of the lens shape between before and after cooling process

6. 공정 최적화 유한요소해석

상기 내용과 같이 고온의 유리굽을 성형한 후 냉각시에 수축으로 제품의 형상이 변경되었으며 이로 인하여

잔류응력이 발생됨을 알 수 있었다. 따라서 이러한 현상을 방지하기 위하여 추가 성형과정 즉, 냉각과 동시에 어느 정도 프레스 압력을 가함으로써 수축으로 왜곡된 렌즈형상을 다시 성형하여 초기의 형상을 유지할 수 있으며 또한 잔류응력은 냉각속도를 충분히 느리게하여 제거할 수 있다. 그러나 냉각속도는 생산성과 관련되어지며 따라서 잔류응력이 허용범위내에 존재하도록 냉각속도를 조절하는 것이 중요하다. 본 해석에서는 공정 최적화를 위하여 해석 변수를 프레스 압력과 냉각속도로 하여 광학유리의 잔류응력이 허용 인장응력(약 375 psi)⁽⁸⁾을 만족하도록 최적의 해석 변수를 구하는데 있다.

추가 성형시에는 더 이상의 성형은 이루어지지 않고 수축으로 인해 변형된 렌즈형상을 금형에 밀착시켜 초기의 형상을 유지시켜주는 역할만 한다. 그러나 프레스링 공정 후 곧바로 추가 성형이 이루어지면 낮은 점성($10^{7.6}$ poise)으로 인해 계획했던 치수보다 더 많이 성형이 되어 버린다. 또한 추가성형 시간도 너무 길면 점성(10^{13} poise)이 높아져 인장응력이 증가하게 되며 냉각도중에 크랙(crack)이 발생하는 문제가 있게 된다. 따라서 본 해석에 적용한 유리 물성치에 따라 적절한 점성(10^{10} poise~ 10^{13} poise)을 이루는 온도범위는 $660^{\circ}\text{C} \sim 600^{\circ}\text{C}$ 이며 추가성형은 이 구간에서 이루어져야 함을 알 수 있다. Fig. 15는 냉각속도 $1^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ 일 때 냉각초기부터 발생하는 축방향 수축량을 시간에 따라 산출한 값인데 유리금이 액상(liquidus)일 때 수축의 대부분이 일어남을 알 수 있다.

또한 앞에서 언급한 온도범위의 최하한이 전이범위(transition range)의 최하한과 일치한다.

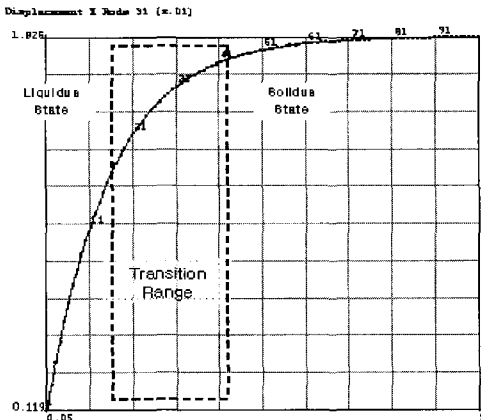


Fig. 15 Computed shrinkage versus time at the surface part of the lens

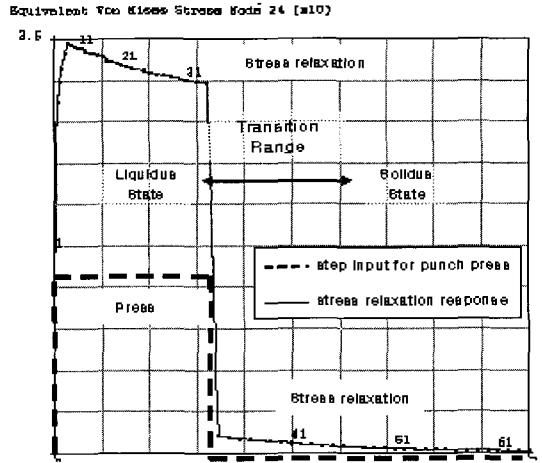


Fig. 16 Result of optimum press-molding process analysis

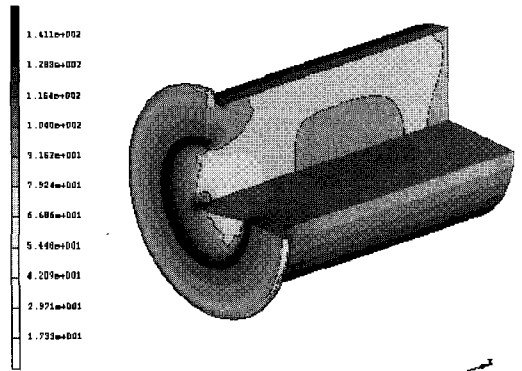


Fig. 17 Equivalent von Mises stress distribution at loading press (Mpa)

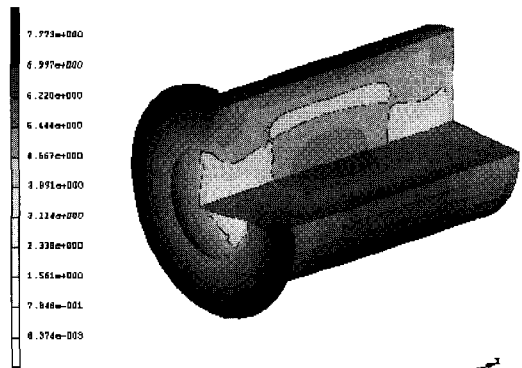


Fig. 18 Equivalent von Mises stress distribution at unloading press (Mpa)

그러므로 그 구간동안 프레스 압력을 가하여 유리 전이 영역(transition rage) 이전까지 유지하면 수축하여 왜곡된 형상을 추가 성형할 수 있고, 그 이후는 구조이완(structural relaxation)현상에 의해 모든 잔류응력이 이완되도록 하중을 제거한다.

따라서 반복해석으로 구한 최적치는 Fig. 16에서 보듯이 1°C/sec의 일정한 냉각속도로 냉각하면서 냉각 초기부터 전이온도영역(590.85°C)이 시작되는 부근까지 프레스 하중(10kgf)을 유지시켜준 후 압력을 제거했을 때 나타나는 응력 이력 곡선으로 대부분의 응력이 이완되어 허용응력이내로 소멸되는 것을 볼 수 있다. 또한, 스텝 하중에 따르는 전형적인 응력이완(stress relaxation)곡선을 잘 보여 주고 있다. 따라서 고온의 유리굽이 액상일 때 비교적 큰 압력으로 가압하여 추가 성형을 하고 전이온도영역에서 압력을 제거하여 성형시 추가된 잔류응력을 이완시켜야 함을 알 수 있다. Fig. 17과 Fig. 18은 초기 프레스 압력을 가했을 때와 제거하였을 때에 나타나는 응력 분포를 3차원 형상으로 나타낸 것이다.

7. 결론

본 연구에서는 초소형 유리 렌즈 프레스-몰딩 공정에 대하여 상용 유한요소 프로그램인 MARC를 이용하여 해석을 수행하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 예비성형체(preform) 설계시 급형 상부에 플래시 부를 두고 끝이 원형인 예비성형체로 공기를 밖으로 밀어내는 방식이 타당함을 알 수 있었다.

(2) 냉각 과정에서 수축으로 인한 렌즈의 표면과 내부의 비 체적의 차이가 잔류응력을 발생시키는 것을 알 수 있었다.

(3) 냉각 후 잔류응력은 렌즈 표면에는 압축응력, 내부에는 인장응력이 분포하며, 수축량은 약 1.21%임을 알 수 있었다.

(4) 잔류응력과 수축으로 인한 형상 왜곡은 냉각시 압력을 동시에 가함으로써 억제할 수 있었고 잔류응력은 냉각속도와 프레스압력을 조절함으로써 세기할 수 있음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 차세대 신기술 개발 사업 중 한국기계연구원이 주관하고 있는 고기능 초미세 광·열유체 마이크로부품 기술개발 사업의 세부 과제로서 수행중이며 이에 관계자 여러분께 감사의 말씀을 올립니다.

참 고 문 헌

- (1) 최현중, 2000, "광 부품 가공기술의 현황과 가공의 예", 월간 공작기계.
- (2) Canon Kabushiki Kaisha, 1993, "Press Forming Method for Optical Element", United States Patent.
- (3) MARC User's Manual, 1999, "Rigid plastic flow", Volume A, pp. 182~184.
- (4) Yasufumi Kanki, 1990, "Simulation of Glass Forming for Automobiles", Asahi Glass Co. Ltd.
- (5) Aben, H. and Guillement, C, 1993, "Photoelasticity of Glass" Springer Verlag, Berlin, Germany.
- (6) Helen Carre, L. Daudeville, 1997, "Load bearing capacity of tempered structural glass" pp. 29~31.
- (7) MARC User's Manual, 1999, "Structural relaxation for a glass cube", Volume E, pp. 1579~1583.
- (8) Burke, M.A, Soules, T.F., Busbey, R.F. and Kheson, S.M., 1987. "Finite-element calculation of stresses in glass part undergoing viscous relaxation." J. Am. Ceramic Society, pp. 90~95.