

Plate 가열방식 유리렌즈 성형공정해석을 위한 PBK40 소재의 유동 특성에 관한 연구

장성호*, 허영무#, 윤길상**, 신광호**, 이영민**, 정우철**, 강정진**,
정태성***, 김동식***

A Study on Flow Characteristics of PBK40 for Glass Lens Forming Process Simulation Using a Plate Heating Type

Sung Ho Chang*, Young Moo Heo#, Gil Sang Yoon**, Gwang Ho Shin**, Young Min Lee**,
Woo Chul Jung**, Jeong Jin Kang**, Tae Sung Jung*** and Dong Sik Kim***

ABSTRACT

Recently, remarkable progress has been made in both technology and production of optical elements including aspheric lens. Especially, requirements for machining glass materials have been increasing in terms of limitation on using environment, flexibility of material selection and surface accuracy. In the past, precision optical glass lenses were produced through multiple processes such as grinding and polishing, but mass production of aspheric lenses requiring high accuracy and having complex profile was rather difficult. In such a background, the high-precision optical GMP process was developed with an eye to mass production of precision optical glass parts by molding press. This GMP process can produce with precision and good repeatability special form lenses such as camera, video camera, aspheric lens for laser pickup, f- θ lens for laser printer and prism, and fine glass parts including diffraction grating and V-grooved base. GMP process consist a succession of heating, forming, and cooling stage. In this study, as a fundamental study to develop molds for GMP used in fabrication of glass lens, we conducted a glass lens forming simulation. In prior to, to determine flow characteristics and coefficient of friction, a compression test and a compression forming simulation for PBK40, which is a material of glass lens, were conducted. Finally, using flow stress functions and coefficient of friction, a glass lens forming simulation was conducted.

Key Words : GMP Process (GMP 공정), Aspheric Lens (비구면 렌즈), PBK40, Compression Test (압축시험), Compression Forming Simulation (압축 성형 해석), Glass Lens Forming Simulation (유리 렌즈 성형 해석)

접수일: 2006년 7월 27일; 게재승인일: 2007년 2월 21일

* 한국생산기술연구원 정밀금형팀

교신저자: 한국생산기술연구원 정밀금형팀

E-mail: ymheo@kitech.re.kr Tel. (032) 850-0325

** 한국생산기술연구원 정밀금형팀

*** 재영솔루션

1. 서론

최근 광학렌즈는 광학계 구성의 간략화 및 경량화를 위해 비구면화 되어왔으며 소재 측면에서도 굴절률, 색수차, 투과율, 열변형 등 플라스틱 소재의 광학적 한계를 극복하기 위하여 점차 유리소재로 대체되고 있다.¹ 이전에는 유리렌즈의 생산을 위해 주로 연마법이 이용되었으나 연마법으로는 생산할 수 있는 렌즈의 크기, 형태 등이 제한될 뿐 아니라 양산성이 크게 떨어지기 때문에 근래에는 GMP(Glass Molding Press)방식의 직접 프레스 성형법이 개발, 이용되고 있다.²

GMP 공정은 일괄처리(batch) 방식과 순차이송(progressive) 방식으로 나눌 수 있으며 일괄처리 방식은 하나의 플랫폼에서 유리성형공정을 진행하는 방식으로 IR 방식 등을 이용하여 소재를 가열하는 반면에 순차이송 방식은 각기 다른 플랫폼에서 예열, 성형, 냉각단계를 분리하여 진행하는 방식으로 플레이트 가열방식을 이용하여 소재를 가열한다. Fig. 1 에는 순차이송 방식 GMP 공정을 나타내었다. 일괄처리 방식에서는 제품생산을 위한 사이클 타임이 예열, 성형, 냉각 시간을 모두 포함한 시간인 반면에 순차이송 방식에서는 예열, 성형, 냉각에 소비되는 시간 중, 가장 긴 시간을 소비하는 공정에 의해 사이클 타임이 결정된다. 때문에 순차이송 방식은 일괄처리 방식에 비하여 연속적인 생산방식에 의한 생산시간감소라는 장점을 지닌다. 또한, 각각의 공정에서 발생하는 문제점 파악이 용이하고 급형에 문제가 발생하였을 시 수정 및 보수가 용이하여 근래에는 유리렌즈 성형을 위해 주로 순차이송 방식 GMP 공정이 이용되고 있다.

본 연구에서는 순차이송 방식 GMP 공정의 생산성 향상을 위하여 비구면 유리렌즈의 성형에 사용되는 초정밀 다수 캐비티 급형·성형기술 개발을 위한 기초 연구로서 유리렌즈 성형 해석을 수행하였다. 성형 해석에 앞서 K-PBK40 소재를 이용한 고온압축시험을 수행하였으며 이로부터 유리소재의 유동응력식을 확보하였다. 확보된 유동응력식을 이용하여 압축 성형 해석을 수행하였고 유리렌즈 성형 해석을 위한 마찰계수를 결정하였다. 최종적으로 유리렌즈 성형 해석을 수행하였으며 이로부터 실제 성형 시 발생하는 성형하중과 유리렌즈의 변형형상을 예측하였다.

2. 관련 이론

일반적으로 고온에서 성형되는 소재의 유동응력(σ)은 온도(T)와 변형률(ϵ), 변형률속도($\dot{\epsilon}$)의 함수로 나타낼 수 있으며 다음 식과 같다.

$$\sigma = \sigma(\epsilon, \dot{\epsilon}, T) \tag{1}$$

유리 소재의 경우에는 위의 식을 다음과 같이 변형률과 변형률속도항으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma = \eta(T)\dot{\epsilon} + E\epsilon \tag{2}$$

유리 소재의 거동은 전이온도를 기준으로 낮은 온도에서는 고상영역으로 탄성변형에만 의존하는 반면에 높은 온도에서는 액상영역으로 점성에만 의존한다. 그러나 전이온도영역에서는 탄성과 점성의 성질이 모두 나타난다. 프레스를 이용한 유리성형은 연화점 근방의 높은 온도에서 이루어지 때문에 유리 소재의 거동을 비압축성 뉴턴유체로 볼 수 있으며, 전이점 이상의 고온에서 유리소재의 거동은 초기 변형의 효과를 무시할 수 있으며 유리 소재의 성형 과정을 등은 과정이라 가정하면 식 (2)는 식(3)과 같이 표현될 수 있다.

$$\sigma = k(\dot{\epsilon})^m \tag{3}$$

다음으로 식 (3)을 로그함수를 이용하여 변환하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\log \sigma = \log k + m \log(\dot{\epsilon}) \tag{4}$$

위의 식에서 k 는 응력계수이고 m 은 변형률 속도민감도지수이다.^{2,5}

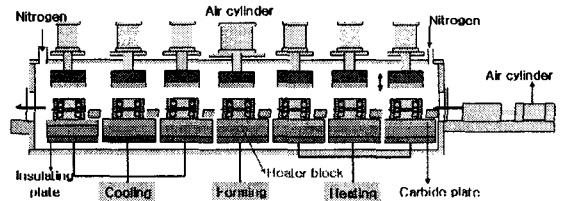


Fig. 1 Progressive GMP process

Table 1 Specifications of a micro compress tester

Load capacity	2200 N Max
Load accuracy	±0.5 % of indicated load
Stroke	10 mm
Test speed	1 mm/sec Max
Test temperature	700 °C
Test mode	Compression Compression creep Forming
Position accuracy	1.1 μm
Control	Load & Position

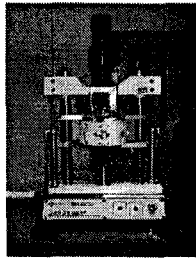


Fig. 2 Micro compress tester

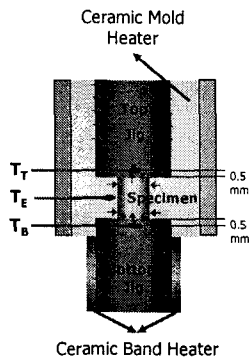


Fig. 3 Schematic diagram of a heating system using a ceramic band and mold heater

3. 시험장치 및 시험편

3.1 미세압축시험기

Fig. 2 와 Fig. 3 에는 각각, 고온압축시험을 위해 제작된 미세압축시험기와 가열시스템의 개략적인 모습을 나타내었다. 시험편을 가열하기 위해 세라믹 몰드 히터와 세라믹 밴드 히터를 제작하였으며 온도조절장치(UP550, YOGOGAWA)를 이용하여

Table 2 Thermal and mechanical properties of K-PBK40

Glass specification			Value
Thermal properties	Transformation point	T_g (°C)	501
	Yielding point	A_1 (°C)	549
	Thermal expansion	100 ~ 300 (10 ⁻⁶ /°C)	7.3
Mechanical properties	Knoop hardness	Hk (Class)	615(6)
	Vickers hardness	Hv	606
	Young's modulus	E (GPa)	79.9
	Modulus of rigidity	G (GPa)	32.5
	Poisson ratio	-	0.229

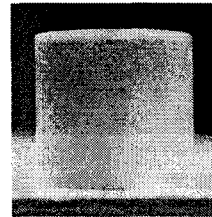


Fig. 4 Test specimen (K-PBK40 : $\Phi 7 \times H 7$)

설정 온도 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 이하로 제어 할 수 있도록 하였다. 이렇게 두 가지 히터를 사용함으로써 상/하부 지그의 온도 차이를 최소화할 수 있었다. 미세 압축시험기의 최대 시험하중은 2200N 이며 두 개의 probe type 의 변위센서(SOLARTRON, Peak to peak error = 0.99 μm, 10 mm reading)를 장착하여 두 센서의 보정 값으로 성형위치를 제어하였다. 미세 압축시험기의 세부 사양을 Table 1 에 나타내었다.

3.2 시험편(K-PBK40)

고온압축시험에 이용된 K-PBK40 은 프레스 성형용 유리렌즈 전용소재이다. 시험편은 SUMITA 광학에서 생산되는 7(Φ)×7(H)(unit : mm)의 원통형 시험편이며 시험편의 형상을 Fig. 4 에 나타내었다. Table 2 에는 K-PBK40 소재의 열적, 기계적 물성을 나타내었다.⁶

4. 고온압축시험

4.1 시험조건

Fig. 3 과 같이 3 지점으로부터 온도를 측정하였으며 몰드 히터를 조절하기 위해 상부 지그로부터

Table 3 Test conditions for compression test

$T_T, T_B (^{\circ}C)$	$\dot{\epsilon}$ (1/sec)			
570	0.005	0.01	0.03	0.05
580	0.005	0.01	0.03	0.05
590	0.005	0.01	0.03	0.05

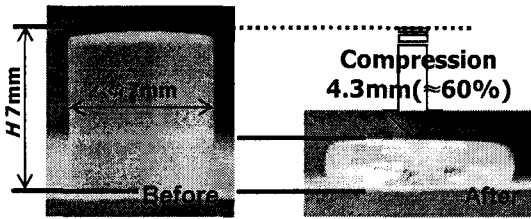


Fig. 5 Deformation of a specimen (before and after compression test)

측정되는 온도 T_T , 밴드 히터를 조절하기 위해 하부 지그로부터 측정되는 온도 T_B 를 이용하였다. 온도 T_T, T_B 가 시험온도에 도달한 뒤 3 곳으로부터 측정된 온도의 변화가 없는 정상상태 일 때 압축 시험을 수행하였다. 실제 순차이송 방식 GMP 공정의 성형단계에서 렌즈소재(gob)의 가열온도가 570 이상, 성형속도(strain rate)가 0.01 ~ 0.02 임을 감안하여 시험온도 및 변형률속도를 결정하였으며 시험편 높이의 약 60 % (4.3 mm)까지 시험편을 성형하였다. Table 3 에는 시험조건을 나타내었다.

4.2 시험결과

시험편의 성형 전/후의 형상을 Fig. 5 에 나타내었다. 위, 아랫면의 형상이 균일하게 변형하여 가열시스템에 의하여 상/하부 지그의 온도조절이 잘 이루어졌음을 알 수 있다. Fig. 6 에는 성형온도가 590 °C 일 때, 변형률속도에 따른 하중 - 변위선도를 나타내었으며 Fig. 7 에는 변형률속도가 0.005 (1/sec) 일 때, 성형온도에 따른 하중 - 변위선도를 나타내었다. 온도가 낮을수록, 변형률속도가 높을수록 성형하중은 증가하였으며 시험편의 변위가 4.3mm 에 가까워 질수록 시험편의 단면적 증가로 인하여 성형하중이 급격히 증가함을 알 수 있다.

4.3 K-PBK40 소재의 유동응력식

Fig. 8 에는 590 °C 일 때의 진응력-진변형률선도를 나타내었다. 진응력 - 진변형률선도의 일정 기울기 구간을 이용하여 변형률속도에 따른 1 차의 진

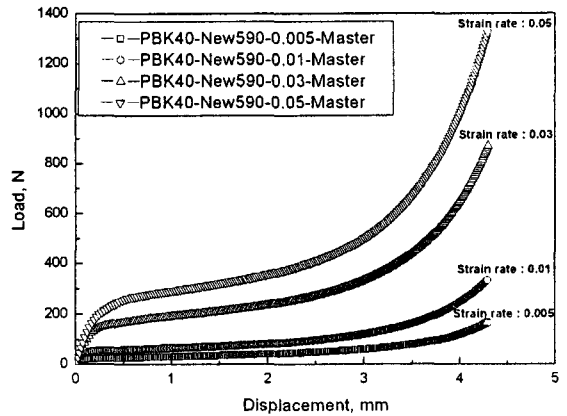


Fig. 6 Load - displacement curve (temperature = 590 °C, strain rate = 0.005, 0.01, 0.03, 0.05)

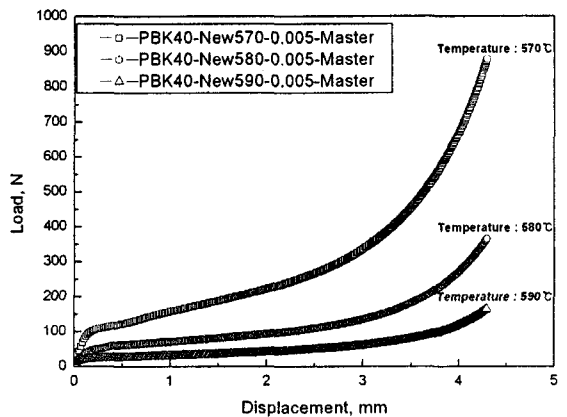


Fig. 7 Load - displacement curve (temperature = 570, 580, 590 °C, strain rate = 0.005)

응력 - 진변형률 보간선도를 구하였고 이를 Fig. 9 에 나타내었다. Fig. 9 의 보간선도로부터 0.1 과 0.8(중분 0.1)사이의 변형률에 해당하는 진응력의 크기를 구하고 이를 로그 값으로 변환하여 Fig. 10 과 같은 $\log(\text{진응력}) - \log(\text{변형률속도})$ 선도에 나타내었으며, 이 응력과 변형률속도의 관계를 1 차의 보간선도 형태로 구하였다. 이렇게 구한 직선의 방정식과 식 (4)를 이용하여 570, 580, 590 °C 에서의 유동응력식을 구하면 다음과 같다.^{3,5}

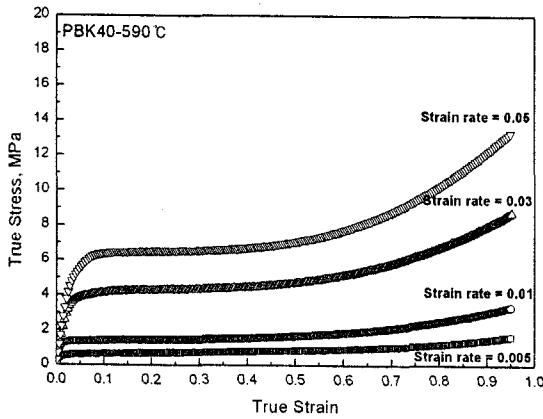


Fig. 8 True stress - true strain curve (temperature = 590 °C, strain rate = 0.005, 0.01, 0.03, 0.05)

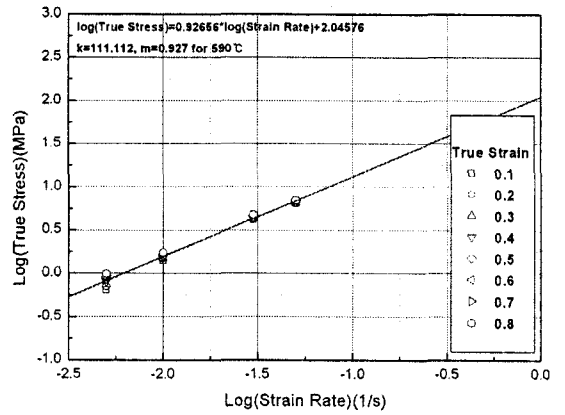


Fig. 10 Log(true stress) - log(strain rate) curve (temperature = 590 °C)

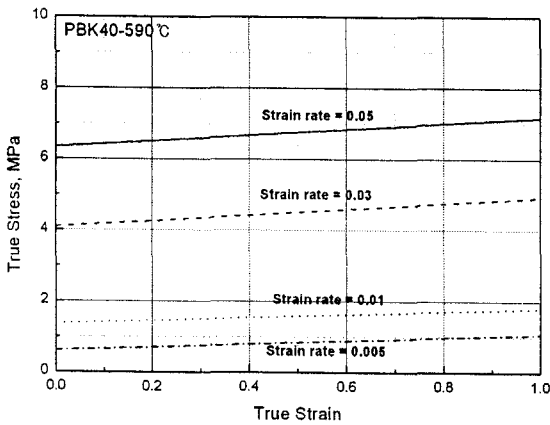


Fig. 9 Linear curve of a true stress - true strain curve for a Fig. 8

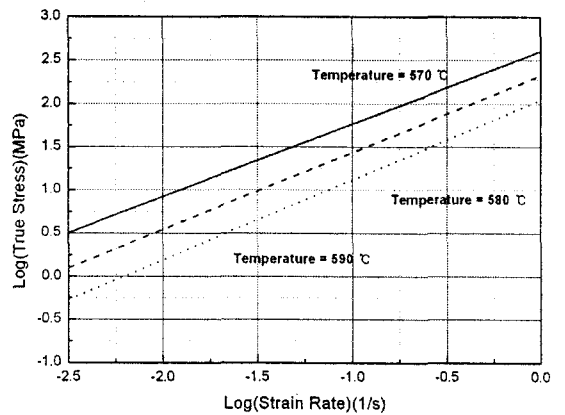


Fig. 11 Log(true stress) - log(strain rate) curve (temperature = 570, 580, 590 °C)

$$\sigma = 405.2(\dot{\epsilon})^{0.842} \text{ at } 570^\circ\text{C} \quad (5)$$

$$\sigma = 213.2(\dot{\epsilon})^{0.893} \text{ at } 580^\circ\text{C} \quad (6)$$

$$\sigma = 111.1(\dot{\epsilon})^{0.927} \text{ at } 590^\circ\text{C} \quad (7)$$

Fig. 11 에는 고온압축시험으로부터 구한 K-PBK40 소재의 log(진응력) - log(변형속도) 선도를 온도 별로 나타내었으며 Table 4 에는 응력계수 k 와 변형률속도민감도지수 m 값을 나타내었다. 온도가 증가함에 따라서 응력계수는 작아지는 반면에 변형률속도민감도지수는 커짐을 알 수 있다.

5. 압축 성형 해석

5.1 해석 모델 및 조건

본 해석의 목표는 마찰계수의 변화에 따른 성형하중 및 해석모델의 배부름(barreling) 형상 변화를 고찰하고 이를 압축시험결과와 비교, 최종적으로 유리렌즈 성형해석에 이용할 마찰계수를 획득하는데 있다. Fig. 12 에는 해석에 이용된 해석 모델을 나타내었다. 시험편의 형상이 대칭임을 감안하여 2D, 1/2 모델을 이용하였으며 압축시험과 같이 모델 높이의 60%(4.2mm)까지 성형되도록 하였다. Table 5 에는 해석 조건을 나타내었다. 상부

Table 4 Strength coefficient and strain rate sensitivity for PBK40 at 570, 580, 590 °C

Temperature (°C)	Strength coefficient (k)	Strain rate sensitivity (m)
570	405.2	0.842
580	213.2	0.893
590	111.1	0.927

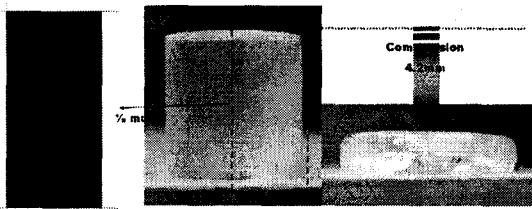


Fig. 12 Compression forming simulation model

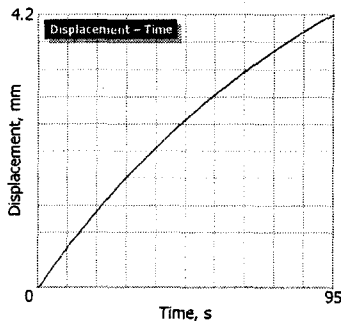


Fig. 13 Displacement - time curve for an upper jig

지그의 변위를 실제 압축시험결과를 이용하여 시간에 따라 변화시켰으며 이를 Fig. 13 에 나타내었다. 해석에는 MSC Marc 를 이용하였다.

5.2 해석 결과

Fig. 14 에는 해석과 압축시험으로부터 획득된 배부름 형상을 Table 6 에는 해석으로부터 구한 성형하중과 성형된 모델의 반경(R)을 나타내었다. 마찰계수가 증가할수록 배부름 형상이 더욱 두드러짐을 알 수 있다. 성형된 시험편과 해석으로부터 구한 반경은 마찰계수가 0.6 일 때 5.75mm 로 일치하였지만 마찰계수가 1 일 때와 큰 차이는 없었다. 성형하중은 마찰계수가 1 일 때 1542N (실험 : 1596N)으로 실험과 유사한 결과를 보였다(Fig. 15).

Table 5 Simulation conditions

Temperature / Strain rate	k	m	Coefficient of friction
570(°C) / 0.01(1/s)	405.2	0.842	0.1 ~ 1.0

Table 6 Simulation results

	Coefficient of friction	Load [N]	Radius [mm]
Simulation	0.1	908	5.66
	0.2	920	5.69
	0.3	975	5.71
	0.4	1019	5.73
	0.5	1060	5.74
	0.6	1131	5.75
	0.7	1162	5.76
	0.8	1243	5.77
	0.9	1329	5.78
	1.0	1542	5.79
Test	-	1596	5.75

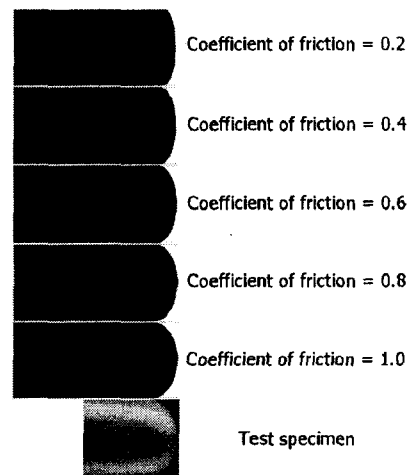


Fig. 14 Simulation results (Barreling shapes)

최종적으로 성형해석결과(성형하중 및 응력)가 유리렌즈의 냉각해석과 금형의 구조해석에 적용될 것을 감안하여 성형된 모델의 형상보다는 성형하중이 압축실험과 유사한 결과를 보이는 마찰계수 1 을 유리렌즈 성형해석에 적용하였다.

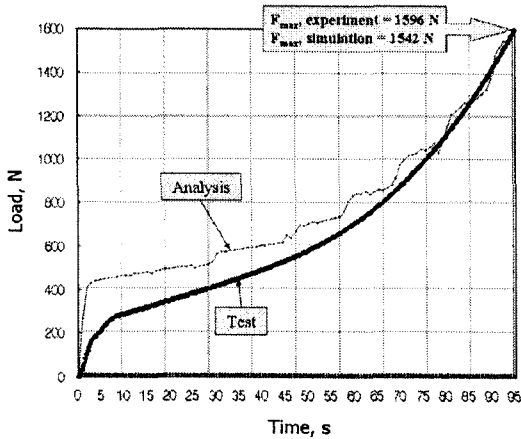


Fig. 15 Load - time curve for simulation and test result(Coefficient of friction=1.0)

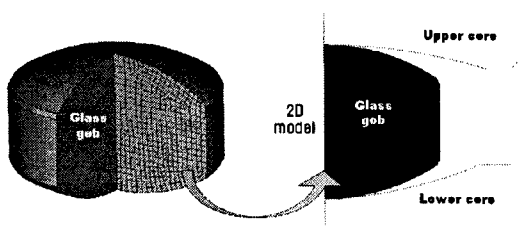


Fig. 16 Glass lens forming simulation model

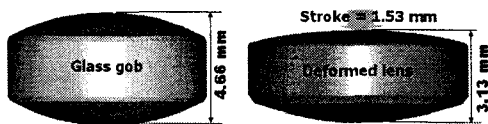


Fig. 17 Forming shape of glass gob

6. 유리렌즈 성형 해석

6.1 해석 모델 및 조건

Fig. 16 에는 유리렌즈 성형 해석에 이용된 모델을 나타내었다. 유리소재(glass gob)와 상/하부 코어의 형상이 대칭임을 감안하여 2 차원의 1/2 모델을 해석에 이용하였다. 실제 비구면 유리 렌즈의 성형 온도가 약 570℃, 성형시간이 30s 임을 감안하여 Table 7 과 같이 해석 조건을 설정하였다. 성형속도는 Fig. 17 과 같이 1.53mm 가 성형되는데 소요되는 시간 30s 를 이용하여 계산되었다. 해석에 적용된 마찰계수는 1 로 하였다.

Table 7 Lens forming simulation conditions

Forming time	Velocity of upper core	k	m
30(s)	0.051 (mm/s)	405.2	0.842

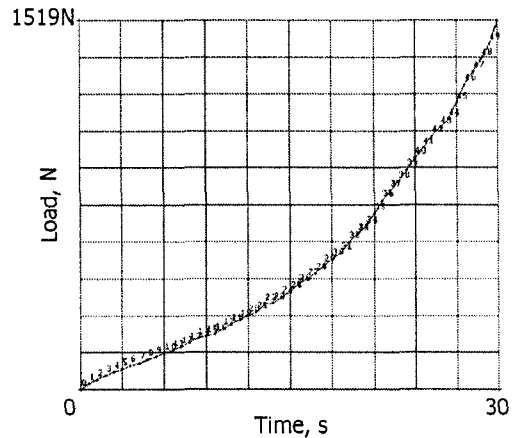


Fig. 18 Load - time curve for a upper core

6.2 해석 결과

Fig. 18 에는 해석으로부터 얻어진 성형하중의 변화를 나타내었다. 실제 렌즈성형과정과 같은 변위를 가하였을 때 해석으로부터 얻어진 최대 성형하중은 1519N 으로 실제 공정에서 발생하는 약 1400N 에 비하여 약 100N 의 차이가 발생하였다. Fig. 19 와 Fig. 20 에는 해석으로부터 구한 결과를 나타내었다. 성형 후, 유리렌즈에도 배부름 형상이 나타나 후가공이 필요함을 알 수 있다. 코어와 유리렌즈 사이에 발생하는 마찰력은 147.6N 이며 반복적인 성형하중과 마찰력에 의해 코어의 코팅 면에 영향을 주게 됨을 알 수 있다. 또한 성형과정에서 유리렌즈 내에 최대 40.1MPa 의 응력이 발생하였으며 이러한 내부 응력 중에 잔존하는 잔류응력이 유리렌즈의 품질을 저하시키는 원인이 된다. 따라서 냉각해석을 수행하여 성형 후 발생하는 잔류응력에 관한 연구가 수행되어야 할 것이다. 마지막으로 정확한 성형 해석을 위해서는 앞서 구한 유동응력식에서 고려하지 않았던 탄성영역에 대한 고려와 성형과정에서 발생하는 소재내의 온도변화, 그리고 소재의 열적 특성에 관한 추가적인 연구가 이루어져야 할 것이다.

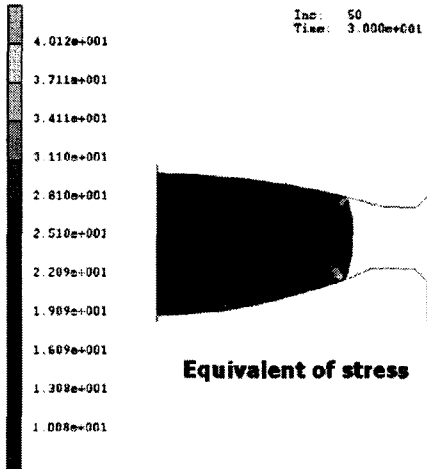


Fig. 19 Contribution map for equivalent of stress

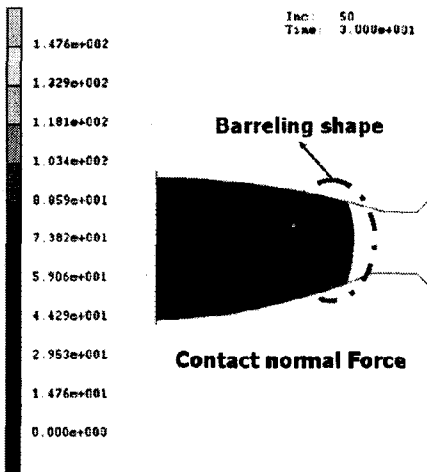


Fig. 20 Contribution map for contact normal force

7. 결론

본 연구에서는 비구면 유리렌즈의 초정밀 다개취수 금형·성형기술개발을 위한 기초연구로서 유리렌즈 성형공정해석을 위한 해석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 유리 소재의 유동특성을 위한 고온압축시험을 수행하였으며 570, 580, 590℃에서의 유동응력식을 구할 수 있었으며 온도가 높을수록 응력계수의 크기는 증가하는 반면에 변형속도민감도의 크기가 작아짐을 알 수 있었다.

(2) 압축 성형 해석을 수행하여 마찰계수의 변화에 따른 성형하중 및 배부름 형상을 얻을 수 있었으며 실제 실험결과와 비교하여 유리렌즈 성형 해석에 적용할 마찰계수(1.0)를 구할 수 있었다.

(3) 압축시험과 해석으로부터 획득된 유동응력식과 마찰계수를 이용하여 유리렌즈 성형 해석을 수행하였으며 성형과정에서 발생하는 성형하중 및 변형형상을 예측할 수 있었고 실제 성형하중과 약 100N의 차이가 발생함을 알 수 있었다.

후기

본 연구는 부품·소재기술개발사업의 일환으로 수행중인 「Progressive 방식의 GMP 공정을 위한 다수 cavity 금형·성형 기술개발(과제번호 : 10020636)」의 지원에 의하여 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Suzuki, H., Hara, S. and Matsunaga, H., "Study on Aspherical Surface Polishing Using a Small Rotating Tool," Journal of the Japan society for precision engineering, Vol. 59, No. 10, pp.1713-1718, 1993.
2. Jeon, B. H., Hong, S. K. and Pyo, C. R., "Finite Element Analysis for Shape Prediction on Micro Lens Forming," Transactions of Materials Processing, Vol. 11, No. 7, pp.581-588, 2002.
3. Park, M. S, Kang, G. M. and Han, D. S., "Quality Assessment by Analysis of Yoke Caulking Process Considering Strain Rate Sensitivity," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 20, No. 6, pp.37-46, 2003.
4. Na, J. W., Rhim, S. H., Oh, S. I. and Jeon, B. H., "Finite Element Analysis of Glass Lens Forming Process Using Open Die," Transaction of Materials Processing, Vol. 12, No. 4, pp.296-301, 2003.
5. Korea Institute of Industrial Technology(KITECH), "Development of Micro Glass Lens of Non-spherical surface for Camera Phone," pp.11-44, 2004.
6. Sumita Optical Glass, Inc., "Optical Glass Data Book," Glass Data Version 3.03, pp.199, 2002.