

개방형 금형을 이용한 유리 렌즈 성형 해석

나진욱* · 임성한** · 오수익*** · 전병희****

(2003년 5월 15일 접수)

Finite Element Analysis of Glass Lens Forming Process Using Open Die

J. W. Na, S. H. Rhim, S. I. Oh and B. H. Jeon

Abstract

Though a glass lens has outstanding optical performance, it has not been widely used because manufacturing process shows poor productivity and high cost. However, press-forming method of glass lens overcomes these disadvantages with mass production. When glass lens is produced by press-forming method using closed die, it is needed that the volume of glass lens preform is precisely measured in order to prevent incomplete products and to increase in life of die. The present paper shows the shortcoming of forming process with closed die, and performs FEM simulation of forming process with open die in order to overcome this shortcoming. The design parameters of open die are selected on the basis of assembly with optical module and maintenance of optical performance. FEM simulation is carried out with selected parameter of open die and two basic preform. According to distribution of effective strain in glass lens, optical property of glass lens formed at each set of die and preform is compared.

Key Words : Glass Lens, Preform, Press Forming, FEM, Effective Strain, Open Die, Collimating Lens

1. 서론

합성 수지와 그 성형 기술의 발전에 따라 기존의 광학 렌즈의 재료로 유리보다 플라스틱이 많이 이용되어 왔다. 그러나 최근 인터넷의 보급을 통해 광통신 산업이 각광을 받기 시작하면서 광통신 분야의 기본 소재인 유리의 중요성이 다시 부각되고 있다. 광통신 부품 소자간의 연결 시에 광손실을 줄이고 조절의 편리성을 위하여 평행광을 만들어 줄 필요가 있는데 이때 사용되는 부품이 광콜리메이터이다. 광콜리메이터의 핵심 부품은 평행광을 만들어주는 콜리메이팅 렌즈이고 현

재 이는 GRIN-LENS(Gradient INDEX rod lens)가 사용되고 있다. 그러나 GRIN-LENS 는 탈륨(Tl)을 이용한 이온 교환법에 의해 제조되므로 환경친화적이지 못하고 대량 생산이 불가능하다. 대량 생산을 가능하게 하기 위해서는 기존의 연삭, 연마 과정을 생략할 수 있는 프레스 성형 방식을 이용한 유리 렌즈의 성형 기술이 필요하다. 프레스 성형 방식을 통한 성형은 렌즈의 형상이 비구면이거나 그 크기가 작아도 생산가능하고 시간과 돈이 적게 들며 품질 균일성이 보장된다.⁽¹⁻³⁾

유리 성형 전문 기기인 GMP-211 장치에 기존의 밀폐형 금형을 이용하여 콜리메이팅 렌즈의 기초

* 서울대학교 대학원

** 서울대학교 정밀기계설계공동연구소

*** 서울대학교 기계항공공학부

**** 인덕대학교 컴퓨터응용기계계열

성형 실험을 수행한 결과 부피 계량의 오차에 따라 부피가 크게 계량된 경우 렌즈의 내부가 과도한 변형응력에 의해 파괴되었고 부피가 적게 계량된 경우 렌즈부의 성형이 완전히 이루어지지 않아 성형 후 품질에 큰 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 문제를 해결하기 위해 캠코더용 볼록렌즈를 생산하는 실제 생산 현장에서는 큰 형상으로 성형하여 후가공을 통해 원하는 형상을 얻고 있다. 그러나 이 방안은 근본적인 대책이 되지 못하며 궁극적인 해결을 위해서는 보다 정밀한 부피 계량이 필요하나 이는 현재 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 부피 계량의 오차를 해결하기 위해 밀폐형 금형이 아닌 개방형 금형을 사용하는 방법을 도입하였다.

금형을 개방형으로 제작할 때의 고려 사항은 렌즈와 모듈간의 조립 가능성과 성형 후 렌즈의 광학적 성능 확보이다. 개방형 금형을 사용함으로써 발생하는 위의 두 가지 문제를 해결하기 위해 DEFORM⁽⁴⁾을 이용한 FEM 해석을 수행하였다. 성형 해석을 통해 조립이 가능하면서 적은 변형이 발생하는 렌즈 프리폼과 금형의 최적의 조합을 제시했다.

2. 콜리메이팅 렌즈 및 개방형 금형, 프리폼의 형상 설계

2.1 기하학적 광학적 성능을 고려한 렌즈의 형상 설계

콜리메이팅 렌즈의 소재는 전이점과 연화점이 다른 유리에 비해 상대적으로 낮고 PbO 성분이 제거된 프레스 성형용 광학 유리 소재인 일본 sumita 광학의 K-PSFn3 으로 선정하였다. 기본적인 물성치는 Table 1 과 같다.

렌즈의 형상은 기존의 콜리메이터에 이용되는 GRIN-LENS 와 일치시켰다. 대상인 GRIN-LENS 는 직경 1.8mm, 높이 3mm 의 원통형 형상이다. GRIN-LENS 의 형상을 바탕으로 하여 광통신에서 사용되는 빔의 파장인 1550nm 와 렌즈에 입사시 N.A 값은 0.14 를 적용하여 광학 설계 프로그램인 OSLO 를 이용하여 광통신용 콜리메이팅 렌즈를 설계하였다. 그 결과 평행광을 만들기 위한 구면부의 반경은 1.52098mm 이다. Fig. 1(a)에서 광원에서 0.25mm 떨어진 1 번 지점에서의 광선의 반경은 0.035348mm, 렌즈를 통과해 나가는 지점인 2 번 지점에서의 광선의 반경은 0.274250mm, 렌즈로부터 5mm 떨어진 3 번 지점에서는 반경 0.2815

80mm 의 광선이 평행광이되어 나간다.

앞에서 결정된 기하학적 형상과 광학적 성능을 고려한 형상을 통해 Fig. 1(b)와 같은 최종 렌즈의 형상을 결정하였다.

Table 1 Optical and thermal properties of K-PSFn3

Optical Property	Reflective index	nd	1.83917
		nC	1.82915
		nF	1.86432
Abbe number		23.9	
Thermal Property	Thermal expansion		118
	Transition point		477
	Yielding point		515

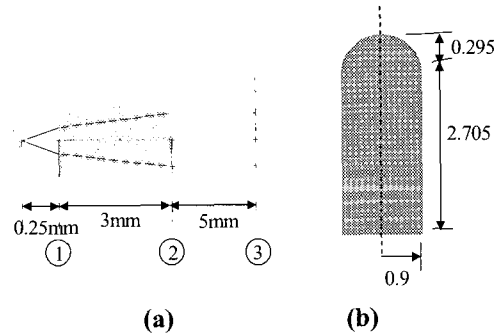


Fig. 1 Design of glass collimating lens (a) Result of OSLO, (b) Final design of glass collimating lens

2.2 개방형 금형의 형상 설계

개방형 금형은 프레스 성형용 프리폼의 부피 계량에 오차가 발생하여 부피가 크게 계량되었을 시에 금형에 과도한 성형력이 걸리는 것을 방지하기 위하여 밀폐형 금형에서 금형의 일부를 개방하여 개방된 방향으로 초과된 부피가 플래시가 되어 나가게 설계하였다.

개방형 금형의 설계를 위해 렌즈 성형 후 조립성과 렌즈의 광학적 성능 보장을 원칙으로 하여 Fig. 2 과 같이 설계 변수를 설정하였다. 설계한 렌즈의 직경이 1.8mm 인데 비해 렌즈 내부에서 실제로 광선이 지나가는 경로는 0.0707mm 부터 0.5485mm 사이의 구간만을 통과해 간다. 따라서 이 구간에서 렌즈의 내부 품질이 우수하다면 전체 렌즈의 광학적 성능은 우수하다고 생각될 수 있으므로 나머지 부분의 설계를 자유로이 할 수 있다. 단, 렌즈가 모듈에 결합될 것이므로 결합될

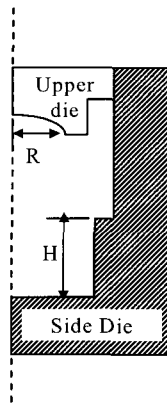


Fig. 2 Design parameter(R, H) of open die

렌즈의 하부는 직경 1.8mm 를 만족 시켜야 하기 때문에 실제로 플래시를 발생시킬 수 있는 곳은 급형의 상부와 측면부이다. 앞의 광학 설계의 결과로부터 빛이 렌즈를 통과해 가는 최대의 직경은 0.5485mm 이므로 렌즈부의 반경(R)은 최소 반경을 0.3mm 로 설정하였고 최대반경은 모듈과 결합되는 렌즈의 반경이 0.9mm 이고 부피의 초과분을 고려하여 1.2mm 로 설정하였다.

이 구간 내에서 0.3mm 씩 증가하여 0.3mm, 0.6mm, 0.9mm, 1.2mm 4 개를 선정하였고 측면 급형의 높이(H)는 렌즈가 모듈에 결합되기 위해서는 최소 1.5mm 가 필요하므로 2mm, 2.5mm 를 선정하였다. 이상의 설계 변수의 선정으로부터 총 8 개의 조합이 얻어지나 R=1.2mm 와 H=2.5mm 인 경우는 렌즈로 성형되는 상부 급형의 높이가 0.587mm 이므로 측면 급형의 높이 2.5mm 를 고려하면 성형 후 최종 형상을 만족시키지 못하므로 제외하고 나머지 7 개의 조합을 얻었다.

2.3 프리폼의 형상 설계

성형 해석을 위하여 프리폼은 평면 연마 프리폼과 구면 연마 프리폼의 두 가지를 사용하였다. 평면 연마 프리폼은 원통형 모재에서 필요한 길이만큼 잘라 양면을 평면으로 가공한 것을 말하며 구면 연마 프리폼은 한쪽 면을 구면으로 가공한 것을 의미한다.

개방형 급형을 이용하여 성형 해석을 할 때 프리폼의 초과된 부피는 3%로 설정하였다. 실제 프레스 성형으로 생산되고 있는 제품의 경우 일반적으로 부피 계량의 오차범위가 2~3% 정도이므로 3% 초과된 부피로 성형 해석하는 것은 타당하다.

Table 2 Calculation of preform volume according to radius of lens parts

Radius of lens parts(mm)	Original volume(mm ³)	Volume added 3%(mm ³)
0.3	7.562	7.789
0.6	7.391	7.612
0.9	7.272	7.490
1.2	7.272	7.490

Table 3 Calculation of preform height according to volume

Radius of lens parts(mm)	Volume added 3%(mm ³)	Height of plat-polished preform(mm)	Height of round-polished preform(mm)
0.3	7.789	3.43	3.64
0.6	7.612	3.35	3.56
0.9	7.490	3.30	3.51
1.2	7.490	3.30	3.51

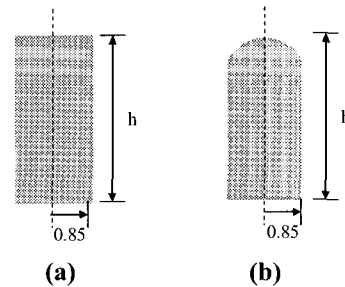


Fig. 3 Design of preform (a) plat-polished perform (b) round-polished preform

Fig. 1 에서 설계한 렌즈의 부피는 7.272 mm³ 이므로 이것에 3%가 추가된 부피는 7.490 mm³ 이 된다. 이 초과된 부피를 계산하여 프리폼의 형상을 결정하였다. 이때 렌즈부의 반경이 0.3mm, 0.6mm 인 경우엔 밀폐된 급형에서 성형한 부피가 반경이 0.9mm 일 때 성형한 부피와 다르므로 각각의 부피를 따로 계산하여 3% 추가시켜야 한다. Table 2 에 원래 부피와 3% 초과된 부피를 정리해 놓았다. 이를 바탕으로 성형 해석에 이용할 프리폼의 형상을 Fig. 3 와 Table 3 에서와 같이 구했다. 평면 연마 프리폼, 구면 연마 프리폼 둘 다 반경이 0.85mm 으로 하여 평면 연마 프리폼의 경우 높이

가 요구되는 부피로부터 계산되도록 하여 Table 2에 정리하였고 구면 연마 프리폼의 경우 구면 반경은 1로 하여 프리폼의 나머지 부분의 높이를 요구되는 부피로부터 계산하여 Table 3에 정리하였다.

3. 개방형 금형을 이용한 성형 해석

3.1 성형 해석을 위한 구성 방정식

일반적으로 온도에 의존하는 성형과정을 가지는 재료의 구성방정식은 식 (1)과 같다.

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

유리에 있어서의 식 (1)은 식 (2)와 같이 점도를 이용하여 나타낼 수 있다.

$$\sigma = \eta(T)\dot{\epsilon}^n + E\epsilon \quad (2)$$

프레스를 이용한 유리 성형은 연화점보다 약 15~20°C 정도 높은 온도에서 성형한다. 전이점 이상의 고온에서 유리의 거동은 변형이력이 포함되지 않으므로 초기 변형의 효과가 무시되므로 스트레인항은 생략할 수 있다. 또한 유리의 형상 성형 과정을 등은 과정이라 가정하였다. 실제 생산시 등은상태에서 성형되지만 엄밀한 의미에서는 유리 성형 과정이 등은과정이 될 수 없다. 그러나 기초연구단계이므로 해석의 간편화를 위해 등은과정이라 가정하였다. 이때의 온도를 T^* 라 한다. 이상의 가정을 통해 식 (2)는 식 (3)과 같이 쓸 수 있다.

$$\sigma = \eta(T^*)\dot{\epsilon}^n \quad (3)$$

식(3)에서 점도값 $\eta(T^*)$ 을 구하기 위해 식 (4)를 이용한다.

$$\log \eta = A + \frac{B}{T - T_0} \quad (4)$$

식(4)는 Vogel-Fulcher-Tammann(VFT) 식이며 여기서 A, B, T_0 는 상수이다.⁽⁵⁾ 점도확장점들을 대입하여 A, B, T_0 를 결정하여 VFT 식을 완성시킨 뒤 연화점보다 17°C 높은 532°C에서의 점도값을 구하면 대략 $10^{7.5}$ poise 로 $10^{6.5} = 3.14 \times 10^6$ Pa.s 이다.⁽⁶⁾

따라서 n의 값을 1로 단순화하고 유리 성형 해

석을 위한 유리의 구성 방정식을 식 (5)와 같이 생각할 수 있다.

$$\sigma = 3.14\dot{\epsilon} \quad (5)$$

3.2 성형 해석 결과

금형에서 총 7가지의 가능한 조합이 있고 프리폼에서 평면 연마 프리폼, 구면 연마 프리폼 등 2가지의 가능한 조합이 있으므로 성형 해석을 위한 금형과 프리폼의 조합은 총 14가지이다. 가능한 14가지의 조합에 대해 Table 4에 정리하였다.

개방형 금형으로 렌즈를 성형할 때에는 금형의 특성상 밀폐형 금형에 비해 렌즈의 변형량이 크다. 렌즈의 프레스 성형시 변형량이 증가하게 되면 렌즈 내부에서 불균질성이 발생할 가능성이 높아질 뿐 아니라 변형량이 큰 부분에서 잔류응력 발생으로 인해 복굴절이 발생하여 정밀한 광학부품으로 사용하기 어렵다.⁽⁷⁾ 따라서, 유효변형률(Effective strain)의 분포 편차가 실제 제품으로서 유리하다. 유효변형률의 분포를 성형 해석한 모든 조합에 대해 동등하게 알아보기 위해 최소값을 0, 최대값을 1로 잡은 유효변형률의 분포 그림으로 나타내었다.

Table 4 Set number of preform and die which is used in simulation

Set number	Preform	Radius of lens parts(mm)	Height of side die(mm)
1	Plat-polished preform	0.3	2.0
2		0.3	2.5
3		0.6	2.0
4		0.6	2.5
5		0.9	2.0
6		0.9	2.5
7		1.2	2.0
8	Round-polished perform	0.3	2.0
9		0.3	2.5
10		0.6	2.0
11		0.6	2.5
12		0.9	2.0
13		0.9	2.5
14		1.2	2.0

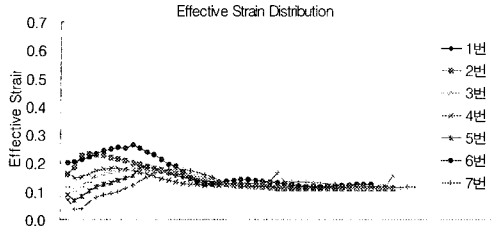


Fig. 4 Effective strain distribution in lens using flat-polished preform

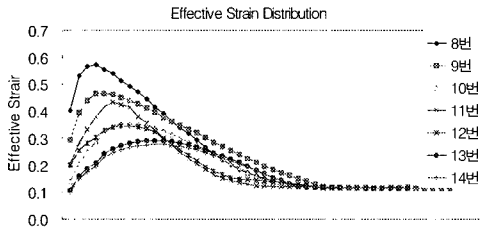


Fig. 5 Effective strain distribution in lens using round-polished preform

또한, 유효변형률의 분포 편차는 렌즈 전 영역에서 적으면 이상적이지만 개방형 금형의 특성상 불가능하고 우리가 목표로 하는 것은 렌즈 내부에서 빛이 지나가는 영역에서의 유효변형률의 분포 편차가 적은 것이다. 설계한 개방형 금형의 특성상 초과된 부피는 렌즈의 외곽 상단부 쪽으로 빠져 나가므로 렌즈중심부에 비해 멀리떨어질수록 유효변형률의 분포 편차가 크게 발생할 것이다. 실제로 광선이 지나가는 구간은 렌즈 상단에서 최대 직경 0.5485mm 이므로 실제 빛이 지나가는 경로 중 중심에서 0.3mm 떨어진 경로를 따라 렌즈 상부로부터 하부로의 유효변형률의 분포를 알아보았다.

Fig. 4 은 평면 연마 프리폼에서의 유효변형률 분포를 나타낸 것이고 Fig. 5 은 구면 연마 프리폼에서의 유효변형률 분포이다. Fig. 4, 5 에서 가로축은 원통형 렌즈의 중심에서 0.3mm 떨어진 경로를 따라 렌즈 상부로부터 하부로의 위치를 나타낸다.

같은 스케일로 그린 두 그래프에서 평면 연마 프리폼이 구면 연마 프리폼에 비해 광선이 지나가는 영역에서 유효변형률의 크기가 훨씬 적은 것을 알 수 있다. 또한 유효변형률 변화는 조합 11 번과 13 번만이 최대값과 최소값의 차이가 0.2

정도로 평면 연마 프리폼과 비슷하고 나머지는 수치가 높게 나타났다. 평면 연마 프리폼 중에서도 유효변형률 변화가 적은 것은 조합 3 번과 4 번으로 최대값과 최소값의 차이가 0.1 이하이다. 이는 구면 연마 프리폼에 비해 평면 연마 프리폼의 경우 개방형 금형을 이용하여 성형하였을 때 성능이 더 뛰어난 제품을 얻을 수 있다는 것이다.

구면 연마 프리폼의 경우 프리폼이 금형과 처음 접촉하여 변형하기 시작하는 부분이 빛이 지나가는 렌즈의 중심부이며 이 부분이 변형이 되어 밖으로 밀려 나가게 되므로 변형이 커지게 된다. 개방형 금형의 경우 렌즈의 양 끝단에서부터 성형되고 빛이 지나가는 영역인 렌즈의 중심부는 마지막에 채워지면서 성형이 되므로 빛이 지나가는 영역에서의 변형이 구면 연마 프리폼에서의 변형에 비해 작게 나온 것으로 사료된다.

평면 연마 프리폼의 사용시 또 하나의 문제점이었던 미성형의 문제는 위의 성형 해석 결과 나타나지 않았다. 프리폼의 높이가 최종성형품의 높이보다 높기 때문에 마지막에 빈 공간에 채워지며 눌러지면서 성형되는 것으로 나타났다.

4. 결 론

광학적, 기하학적 설계를 통해 콜리메이팅 렌즈의 형상을 결정하고 이를 성형하기 위한 개방형 금형과 프리폼을 설계하였다.

개방형 금형의 설계를 위해 렌즈 성형 후 조립성과 렌즈의 광학적 성능 보장을 원칙으로 하여 설계 변수를 설정하였다. 프리폼의 형상은 평면 연마 프리폼과 구면 연마 프리폼의 두 가지의 경우로 선정하였다. 성형 후 플래시로 빠져나갈 부분을 고려하여 원래 부피에 3% 초과된 부피를 고려하여 각각의 금형에 대해 프리폼의 형상은 결정하였다.

개방형 금형과 프리폼의 조합 14 가지를 선정하여 이에 대해 광학적 성능이 상대적으로 좋은 조합을 선정하기 위해 DEFORM 을 이용한 성형 해석을 수행하였다.

개방형 금형을 이용하여 유리 렌즈를 성형할 때 광학적 성능이 상대적으로 가장 좋은 경우의 수를 판단하기 위한 기준은 렌즈 내부의 빛이 지나가는 영역에서의 유효 변형률의 분포 편차이다.

구면 연마 프리폼의 경우 초기 형상이 최종 형상과 비슷하여 전체적인 변형은 적지만 변형하여 플래시로 밀려나가는 부분이 빛이 지나가는 영역

이어서 빛이 지나가는 영역에서의 유효변형률의 분포편차가 더 심함을 알 수 있다.

Fig. 4 와 Fig. 5 에서 확인할 수 있듯이 평면 연마 프리폼의 경우 빛이 지나가는 경로를 따른 유효 변형률의 분포의 최대값과 최소값의 차이는 0.1~0.2 이었고 구면 연마 프리폼의 경우에는 이 차이가 0.2~0.5 까지 나타나 개방형 금형을 사용하여 유리 렌즈를 성형할 경우 구면 연마 프리폼에 비해 평면 연마 프리폼을 이용하는 것이 상대적으로 뛰어난 광학적 성능을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

이상에서 개방형 금형과 프리폼의 14 가지의 조합 중 상대적으로 광학적 성능이 우수한 조합을 결정할 수 있었다. 향후 성형 해석으로 나온 결과로부터 직접적, 절대적으로 성형품의 광학적 성능을 확인할 수 있는 연구가 필요하다. 고가의 금형을 설계변수에 맞추어 일일이 제작하여 실험한다는 것은 불가능하기 때문에 성형품의 광학적 성능을 확인할 수 있는 성형 해석의 중요성은 더욱 크다.

후 기

이 논문은 산업자원부의 신기술실용화 과제 스피어오프 분야 프로젝트로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) V. Fischer, T. Matsuura, S. Hirota., 1995, "Pressing makes precision aspheres faster and cheaper", *Laser Focus World*, May, pp. 167~168.
- (2) Y. Aono, M. Negishi, J. Takano, 2000, "Development of large aperture aspherical lens with glass molding," *In Advanced Optical Manufacturing and testing technology, Proceeding of SPIE, Vol. 4231*, pp. 16~23.
- (3) M. Umetani, 1998, "Manufacturing of optical Glass Lens by Press-Molding Method" *New Glass, Vol. 13, No.2*, pp. 32~37.
- (4) Oh, S. I., Wu, W. T., Tang, J. P., and Vedhanayagam, A., "Capabilities and Applications of FEM Code DEFORM: The Perspective of the Developer", *Published in J. Mat. Proc. Tech., Vol 27, p. 25, 1991.*
- (5) Horst Scholze, 1991 "Glass : nature, structure, and properties / ; translated by Michael J. Lakin." New York : Springer-Verlag.
- (6) Shelby, James E., "Introduction to Glass Science and Technology", Cambridge, England : The Royal Society of Chemistry.
- (7) R. Bruckner, Y. Yue, A. Habeck., 1994, "Determination of the rheological properties of high-viscous glass melts by the cylinder compression method", *Glass Sci. Technol., Vol. 67, No. 5*, pp. 114~129.