

사출금형을 이용한 비구면 렌즈의 제조기술에 관한 연구

최현종*, 이석우*, 강은구*

A Study on the Manufacturing Technology of the Aspheric Lens using Injection Molding

H. Z. Choi*, S. W. Lee* and E. G. Kang*

Abstract

The injection molding of the plastic optics is basically same as the conventional molding except it requires very intricate control of all the molding processing parameters. In the plastic optics, the problem of injection molding is the shrinkage. The shrinkage must be removed and predicted. This shrinkage is becoming more important than any other problems in precision molding because it can affect the focal length of a lens or the total performance of the optical system.

This study focused on avoiding the shrinkage that the mold design allows for the optics. In making mold, the surface accuracy(P-V) of the upper and lower mold are $0.201\mu\text{m}$ and $0.434\mu\text{m}$ respectively. A surface roughness(Ra) is below $0.02\mu\text{m}$ due to selecting the appropriate tools and using the injection molding machine in high degree. In injection molding of the plastic lens, mold temperature, resin temperature and injecting pressure are important process parameters. Injection molding process is carried out according to varying mold temperature and injecting pressure. As a result, P-V(peak to valley) of spheric lens is $3.478\mu\text{m}$ and that of aspheric lens is $1.786\mu\text{m}$.

Key Words : Injection molding, Aspheric lens, Shrinkage, Plastic lens

1. 서 론

국내 렌즈 설계는 광학업체, 전자부품업체등에서 주로 구면을 중심으로 행하여지고 있으며, 비구면의 경우 설계 개념의 정립단계에 있다. 비구면의 가공은 가공의 특수성(2축동시제어, 다이아몬드 공구를 이용한 초정밀 가공과 폴리싱등) 때문에 현재 국내에서는 초기단계이고

광학회사나 카메라 제조업체등에서 부분적으로 행하여지고 있다. 이러한 비구면 렌즈 분야의 재료로서 유리가 주종을 이루고 있었으나 카메라 렌즈, 반사경, 프리즘등과 같은 광학 부품에 플라스틱이 광범위하게 이용되고 있다. 플라스틱이 유리보다 광학부품 설계자에게 호의적인 반응을 얻고 있는 주요한 이유는 크게 두 가지가 있다.

* 한국 생산 기술 연구원

첫째, 플라스틱은 유리보다 상대적으로 가격이 싸며 둘째, 설계자들에게 비구면형상을 유연하게 구현시킬 수 있다는 점이다.

플라스틱 렌즈의 사출성형은 전통적인 사출성형 방법과 유사하지만, 모든 사출성형 변수들이 복잡하게 제어되어야 한다는 점에서 매우 다르다.

플라스틱 렌즈의 사출에서 가장 큰 문제는 제품의 수축이다. 수축은 광학시스템에서 전체 성능이나 렌즈의 초점거리에 영향을 주기 때문에 정밀한 사출에서는 다른 어떤 문제점보다 더욱 중요시되어지고 있다. 따라서 이러한 수축은 제거되어야 하며, 또한 예측되어야만 한다. 성형품의 수축은 열팽창계수의 차이와 부적절한 냉각에 의하여 발생하는 것으로 알려져 있다. 성형품의 수축을 최소화하기 위한 일반적인 방법으로 첫째, 주입구 구멍에 매우 높은 압력이 주어지거나 둘째, 냉각과정에서 주입구의 압력과 제품의 온도를 제어하여 볼륨의 감소를 막을 수도 있으며 셋째, 주입속도를 정확히 제어하는 방법이 있다. 그러나 높은 압력을 사용할 경우 잔류응력과 같은 역효과가 나타날 수 있으므로 높은 온도와 낮은 주입 속도에서의 사출 성형이 이루어지기도 한다. 수축을 피하기 위한 다른 방법으로 제품의 수축을 고려한 금형의 설계가 이루어지고 있는 추세이다.

플라스틱 렌즈 사출 성형시의 금형 온도는 92°C이며, 사출압은 70kg/cm²를 기준으로 하여, ±5%의 금형온도 변화와 ±10%의 사출압 변화에 따른 렌즈 성형과 성형품의 표면 측정을 수행하였으며, 이에 따른 렌즈 표면 형상 분석을 수행하였다.

2. 금형의 가공 및 제작

2.1 금형가공용 가공기와 공구

설계된 렌즈의 사출을 위해 수축률을 고려한 금형 설계가 필요하며, 이를 토대로 금형을 제작하였다. Fig. 1에는 금형 제작시 사용된 D.T.M. (Diamond Turning Machine)이 나타나 있으며, 그 제원은 Table 1에 나타나있다. DTM 기계는 비구면의 창생을 위하여 X, Y 양축이 동시제어 되도록 되어 있다. Fig. 2(a)는 DTM 가공기에서 사용된 다이아몬드공구를 나타내었으며, 다이아몬드공구 홀더는 Fig. 2(b)에 나타내었다.

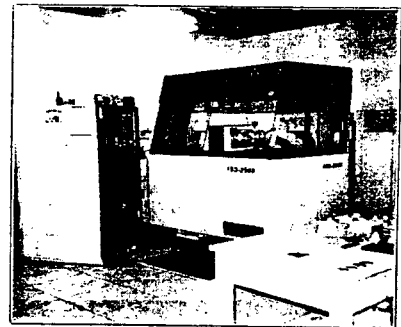


Fig. 1 D.T.M.(Diamond Turning Machine)

Table 1 Specifications of D.T.M.

	List	Specifications
1	Company	Rank Pneumo (USA)
2	Minimum step	0.01 μ m
3	Travel axis(X, Z)	Hydrostatic Oil Bearing
	X-axis stroke	254mm
	Z-axis stroke	152mm
	Feedrate	0.25 ~ 760mm/mm
4	Workpiece rot. axis	Air Bearing
	Rot. speed	100 ~ 2400rpm
	Max. load	45kg
5	Workpiece size	
	Diameter	304mm
	Length	152mm
6	Machine size	183 x 274cm

금형을 고정밀 절삭 가공하기 위한 다이아몬드공구는 높은 순도가 요구되며, 또한 공구각과 공구형상 등을 적절히 사용하여야 한다. 특히 거친 가공을 할때와 마무리 절삭가공을 할때의 공구 선택을 신중히 하여야 하며, 날끝의 반경 값에도 가공물 재료에 따른 선택이 신중히 고려될 필요가 있다.

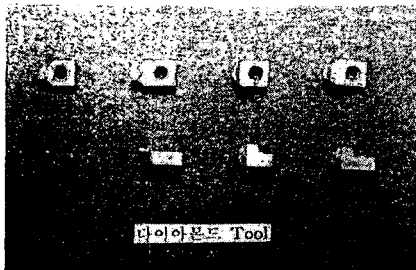


Fig. 2(a) Photograph of diamond tools

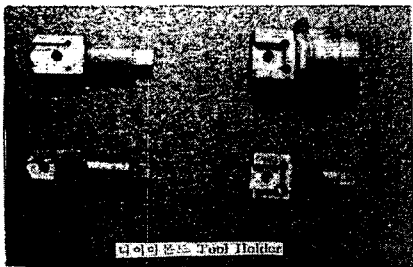


Fig. 2(b) Photograph of diamond holders

2.2 금형의 제작

금형가공에 사용되는 재료는 여러 물리적 성능이 우수한 STAVAX와 S55C를 이용하였다. 플라스틱 비구면 렌즈의 사출 성형시 렌즈의 구면과 비구면을 형성하는 상·하 코어 금형의 앞부분은 여러 물리적 성능이 우수한 STAVAX를 이용하였으며, 그 나머지 부분은 S55C를 이용하여 코어 금형을 제작하였다.

금형 제작시 중요한 점은 광학면의 경면성(표면

조도)이다. 일반적인 가시광을 대상으로 하는 렌즈의 금형은 $R_{max} < 0.03\mu m$, $R_a < 0.01\mu m$ 정도의 표면조도가 필요하다. 그러나 금형상의 아주 미세한 상처라도 광학현미경으로 관찰할 수 있는 크기의 것이라면 성형렌즈에 전사되기 때문에, 렌즈금형의 표면조도는 다른 금형보다 더욱더 우수한 표면상태가 요구된다.

광학렌즈용 금형은 초정밀 가공이기 때문에 가공상 난점을 가지고 있지만, 각 개발 공정과의 유기적인 연계에 의해 효율 좋고, 정확한 표면형상을 만들 수 있다. 또한 금형가공에서의 우수한 표면을 얻기 위해서는 반드시 정확한 측정·평가가 이루어져야 한다. 그러나 표면이 광학면의 정도가 이루어져야 하기 때문에 이를 측정·평가하기가 매우 까다롭다.

본 연구에서는 렌즈용 사출 금형의 설계시 수축을 고려한 설계가 이루어졌으며, 금형 가공시 적절한 공구선정과 정밀가공을 통한 렌즈의 금형 형상 정밀도(P-V)값은 구면(상코어)에서 $0.201\mu m$, 비구면(하코어)에서 $0.434\mu m$ 로 비구면 금형면이 구면 금형면보다 약 2배 이상 값이 큰 것을 알 수 있었다.

3. 열변형 해석 및 측정

일반적으로 플라스틱 사출성형에 영향을 미치는 주요 인자에는 수지 및 금형의 온도, 사출압력 및 속도, 그리고 사출시간등이 있다. 특히 플라스틱 광학렌즈의 경우 정밀 렌즈면의 형상 정밀도는 성형조건에 따라 크게 변하기 때문에 사출성형품으로 금형의 설계 그리고 성형환경의 설정에 세심한 고려가 필요하다. 플라스틱 수지의 수축률이 형상 정밀도에 큰 영향을 미치는데, 이러한 수축률을

결정하는 사출조건으로는 냉각시간을 결정하는 금형온도 및 수지의 사출온도, 그리고 사출압력등이 있다. 그러므로 이러한 사출조건에 대한 렌즈금형의 열변형해석은 플라스틱 렌즈 사출성형의 최적 성형조건을 결정하는데 큰 도움을 줄 수 있다. 수지가 충전시의 사출압력과 금형온도에 의한 렌즈금형의 열변형해석을 ANSYS를 이용하여 수행하였다. 유한요소 해석을 단순화하기 위해 2차원 축대칭 문제로 가정하였고 비구면 부분은 스프라인 곡선으로 처리하였다. 사출 성형되는 플라스틱 렌즈수지는 메타크릴(PMMA)수지로 유리와 비슷한 고투명성을 가지며 내구성 및 내열성이 좋을 뿐만 아니라 성형시 왜곡도 적은 편이다. 코어 금형은 물리적성능이 우수한 스테인레스 계열의 STAVAX 금형용 강재이며 코어금형을 둘러싸고 있는 몰드베이스 형판의 금형은 탄소강 계열의 S55C이다. Table 2는 유한요소해석에 사용된 이들 물성치들을 나타낸 것이며, 온도의 변화에 상관없이 일정한 값을 가진다고 가정하였다. 또한 수지가 사출되어 충전될때 수지의 액상에서 일어날 수 있는 대류현상이나 상변화를 통해 응고되는 과정에서의 수지의 체적변화는 무시하였다. 그리고 코어금형과 몰드베이스 형판사이는 완전히 밀착된 것으로 간주하여 이들 사이의 접촉 열저항은 무시하였다.

사출조건에 대한 렌즈금형의 열변형해석을 수행하기 위해서 Table 3과 같은 사출조건을 제시하였다. 즉, 기본조건을 설정한 다음 이를 바탕으로 금형의 초기온도를 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 씩 변화하였으며, 사출압력도 기본조건에서 $\pm 10\%$ 씩을 변화하면서 사출 실험 하였다.

Table 2 Material properties of resin and mold

	PMMA	S55C	STAVAX
Thermal conductivity (W/m °C)	0.2093	142	46.52
Specific heat (J/kg °C)	1465.38	480.0	446
Density (kg/m ³)	1180	7978	7816
Coef. of lin. expansion 10 ⁻⁶ (/°C)	90	15.0	12.6
Young's modulus (GPa)	3.5	200	210
Poisson ratio	0.35	0.3	0.28

Table 3 Conditions of FEM analysis

	Mold Temp.(°C)	Injection pressure (kgf/cm ²)	Note
Ax	92	1,380	Normal
Ay	92	1,518	Pressure +10%
Az	92	1,242	Pressure -10%
Bx	97	1,380	Pressure +5°C
By	97	1,518	Temp. +5°C, Press. +10%
Bz	97	1,242	Temp. +5°C, Press.-10%
Cx	87	1,380	Temperature -5°C
Cy	87	1,518	Temp. -5°C, Press. +10%
Cz	87	1,242	Temp. -5°C, Press. -10%

렌즈금형의 열변형의 경로는 다음과 같다. 우선 수지에서 렌즈금형으로 열이 전달되며, 이에 따른 렌즈금형의 온도변화로 인해 열변형이 발생하며, 수지가 충전 될 때 받는 사출압력으로 인해 렌즈금형은 변형이 이루어진다. 이러한 렌즈금형의 변형은 곧 렌즈형상에 변화를 주게 된다. 그러므로 렌즈금형이 변화되는 정도를 계산함으로써 렌즈형상의 변화를 예측할 수 있다. 렌즈금형의 내부에서는 사출압력을 경계조건으로 부여하여 열변형 해석을 수행하였다. 구속조건으로는 2차원 축대칭의 경계면의 수직인 방향의 변위자유도 및 경계면에서의 회전자유도를 구속하였다. 또한 강

체운동을 방지하기 위해 유한요소 모델링의 좌표계에서 y=0절점들 중 렌즈금형 길이방향, 맨 끝단의 한 절점에서는 길이방향의 자유도를 구속하였다. Table 4는 코어금형의 대칭면에서 렌즈 중앙 부위의 두께에 대하여 해석치와 측정치를 비교한 것이다. Table 4에서 보듯이 해석치와 측정치의 결과는 비교적 잘 일치하고 있다. 특히, 조건 Cx(사출압력 1,518 kgf/cm², 금형초기온도 87°C)에서 가장 좋은 결과를 보여주고 있다.

Table 4 Comparison of thickness of lens at center for analysis and measurement

	Sim. (mm)	Meas. (mm)	Err. (%)	Note
Ax	4.524	4.536	0.3	Normal
Ay	4.552	4.56	0.2	Pressure +10%
Az	4.535	4.503	0.7	Pressure -10%
Bx	4.523	4.538	0.3	Pressure +5°C
By	4.551	4.58	0.6	Temp. +5°C, Press. +10%
Bz	4.534	4.53	0.1	Temp. +5°C, Press.-10%
Cx	4.525	4.525	0.0	Temperature -5°C
Cy	4.553	4.499	1.2	Temp. -5°C, Press. +10%
Cz	4.535	4.493	0.9	Temp. -5°C, Press. -10%

4. 플라스틱 비구면 렌즈의 사출성형

플라스틱 렌즈를 성형하기 위해 사용한 사출성형기의 제원은 Table 5에 나타나있다.

정밀한 플라스틱 렌즈를 성형하기 위하여 다음과 같은 성형조건을 선정하였으며, 이를 토대로 하여 시제품을 제작하였다.

1) 수지온도와 건조

수지는 PMMA (Polymethyl-methacrylate)이며, 성형하기 위한 수지 초기온도는 240°C ± 10°C이다. 그러나 수지온도는 스크류의 RPM, 배압, 밴드히터의 셋팅 온도에 따라 달라지기 때문에 온도관리에 유의하여야 한다. PMMA 수지의 적정

건조온도는 약 130°C 정도이며, 이때 수지용고시간은 약 120sec 이다.

2) 금형 온도

PMMA 수지도 냉각시간에 따라 수축율이 달라지므로 적정 냉각시간 유지통한 금형온도는 정밀도의 중요한 요인이 된다. PMMA 수지에 적합한 금형온도는 92°C를 기준으로 하였으며 금형온도의 변화에 따른 사출 효과를 보기위해 금형온도를 증감하여 실험하였다.

3) 사출 속도

사출속도와 사출압력은 서로 관계가 깊다. 일반적으로 사출압력을 높이면 사출속도가 빠르게 되나, 최근의 사출성형기는 사출압력과 사출속도를 별개로 컨트롤하게 된다. 즉 사출압력은 실린더에 작용하는 유압조절 밸브에 의하여 조절되고 사출속도는 스크류가 얼마나 빨리 움직이느냐에 달려있으며, 실린더내로 유입되는 기름의 양으로 조절된다.

Table5 Specification of injection molding machine

	List	Specification
1	Company	住友機械工業(株)
2	Mold mounting force	25ton
3	Screw diameter	20mm
4	Max. injecting amount	23cm ³
5	Max. injecting .pressure	2170kg/cm ²
6	Rot. speed of screw	100RPM
7	Max. injecting speed	100mm/sec
8	Mold mounting type	Double joint
9	Mold mounting stroke	130 ~ 210mm
10	Mold thickness	140 ~ 300mm
11	Tie bar interval(H/V)	260 x 260mm
12	Ejecting force	1.2ton
13	Ejecting stroke	0 ~ 50mm

4) 사출 압력

사출압력은 수축율에 직접 관여하기 때문에 일

정하게 유지되어야 한다. 이에 대한 사출압은 플래시를 발생시키기 쉬우므로 성형품을 관찰해가며 조절한다. 관련된 사출 성형품을 얻기 위한 압력은 70kg/cm²을 기준으로 하였으며 압력의 변화에 따른 사출효과의 변화를 보기위해 압력을 ±10%씩 증감하면서 실험하였다.

5) 사출 시간

넓은 의미의 사출시간은 보압시간을 포함한다. 어떤 문헌에서는 넓은 의미의 사출시간을 스크류 전진시간이라고 한다. 즉 스크류가 전진상태로 있는 총시간을 사출시간으로 한다. 사출시간은 일반적으로 수축율과 관계가 있으며, 사출시간은 이론적으로 게이트 고화가 이루어질 때까지 유지되어야 한다. 게이트가 고화되기전에 사출압을 제거하면 성형품 쪽에서 아직 고화되지 않은 수지가 역류하여 원하는 성형품을 얻을 수 없다. 한편 게이트 고화가 된 상태보다 사출시간이 길게 되면 사이클 타임만 길게 되고 성형품의 품질에 아무런 도움이 되지 못한다. 적절한 사출시간은 게이트의 직경과 직접적으로 관련이 있다. 게이트의 직경이

적으면 게이트의 고화시간이 짧게 되어 사출시간도 짧게 된다. EVF 렌즈 제작을 위해 총진시간은 12.08초로 하였으며, 계량시간은 13.5초 사이클 시간은 150.6초로 하였다.

위에서 언급한 사출성형 조건하에 렌즈의 시제품을 사출하였으며 Fig. 3은 사출성형품의 결과 사진이다.

조건별 측정 결과는 Table 6에 나타나있다. 결과를 살펴보면 상코어(구면)의 경우 금형온도가

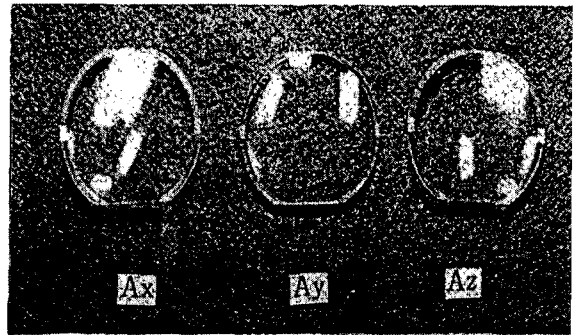


Fig. 3 Plastic lens produced when molding temperature is 92°C

높을수록 압력이 높을 수록 렌즈 표면의 P-V

Table 6 Measurement result of the plastic lens according to the molding process parameters

	Upper part		Lower part		T	Note
	R value	P.V Value	Rvalue	P. V value		
Dimension	200±6	<3μm	48.6404±15	<3μm	4.504±0.05	C=0.020559
Ax	206.535	3.478	49.03	1.786	4.536	Normal
Ay	208.575	4.031	49.20	2.646	4.56	Pressure +10%
Az	205.018	2.978	48.92	1.753	4.503	Pressure -10%
Bx	205.538	3.267	48.97	1.712	4.538	Temp. +5°C
By	204.304	2.930	49.10	2.252	4.58	Temp. +5°C Pressure +10%
Bz	202.511	2.824	48.99	1.598	4.53	Temp. +5°C Pressure -10%
Cx	206.253	4.733	49.23	1.936	4.525	Temp. -5°C
Cy	207.843	4.810	49.32	2.095	4.499	Temp. -5°C Pressure +10%
Cz	204.716	3.874	49.14	1.558	4.493	Temp. -5°C Pressure -10%

(Peak to Valley)값이 작아짐을 알 수 있다. 그리고 하코어(비구면)의 금형온도가 동일하면 일반적으로 압력이 클수록 P-V값이 증가한 결과를 얻을 수 있었다.

5. 플라스틱 렌즈의 측정

초정밀 가공의 평가에서는 진원도, 직각도, 면조도의 측정을 위해 특히 신뢰성이 높은 측정기가 있어야 한다. $0.05\mu\text{m}$ 이하의 영역에 이르면 분산이 명확히 나타나며 신뢰성이 약간 떨어진다. 평면이나 구면의 형상정밀도는 레이저 간섭계에 의하여 측정되고 있다. 비구면 측정은 대단히 까다로우며 현재 접촉식과 레이저 간섭에 의한 근사원과의 차이를 계산하는 방법이 있으나 2가지 모두 정확도 문제를 해결하지 못하고 있다. 금형 Core의 상측 및 하측의 형상오차 측정결과는 각각 Fig. 4(a),(b)에 나타나 있으며, EVF 렌즈의 구면 및 비구면의 형상오차 측정결과는 Fig. 5(a),(b)에 나타나 있다. 측정결과에서 알 수 있듯이 금형의 P-V (Peak to Valley)값은 구면(상코아)에서 $0.201\mu\text{m}$, 비구면(하코아)에서 $0.434\mu\text{m}$ 로 비구면 금형면이 구면 금형면보다 약 2배 이상 값이 큰 것을 알 수 있다. 그러나 사출 성형된 렌즈(EVF 렌즈)의 면을 측정하여 보면 구면의 P-V값이 $3.478\mu\text{m}$ 로 오히려 비구면의 P-V값 $1.786\mu\text{m}$ 보다 크게 나옴을 알 수 있었다.

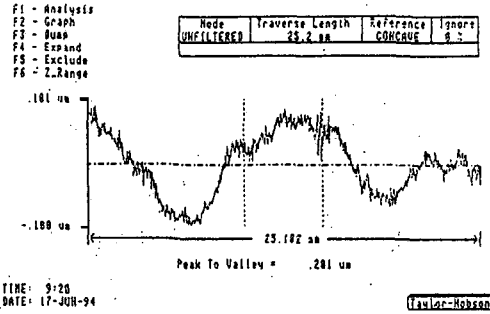


Fig. 4(a) Measurement of surface profile for upper core mold

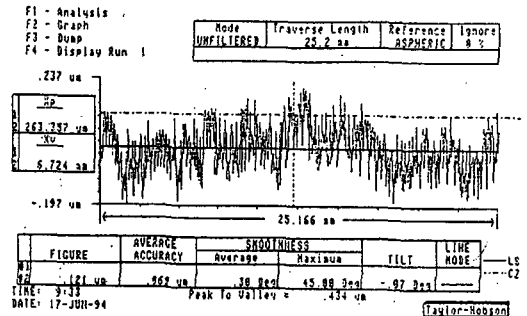


Fig. 4(b) Measurement of surface profile for lower core mold

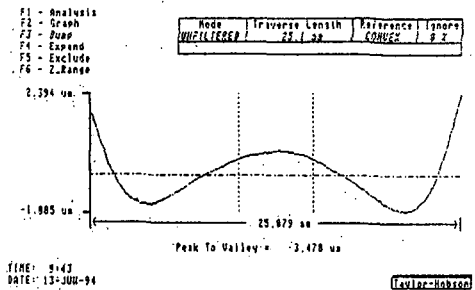


Fig. 5(a) Measurement of surface profile for EVF spherical lens

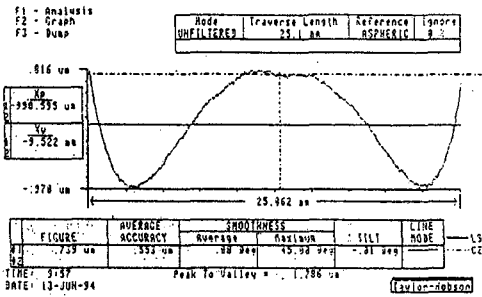


Fig. 5(b) Measurement of surface profile for EVF aspheric lens

6. 결론

고정밀도 플라스틱 비구면 렌즈를 제조하기 위해서는 제품의 형상설계 및 금형설계 등의 설계기술 확보와 더불어 코어가공 및 최적 성형조건을 위한 성형기술의 확보, 그리고 렌즈 사출을 위한 전용기의 사용이 필수적이다. 이러한 종합적인 기술이 복합적으로 작용할 때 고정밀도 플라스틱 렌즈의 제품이 나올 수 있다.

본 연구에서는 제작될 비구면 렌즈의 모델을 선정하여 이의 제조를 위한 렌즈 및 금형의 설계를 하였으며, 설계된 렌즈의 사출시 일어날 열변형에 관하여 계산적으로 검토하였다. 이렇게 하여 변형을 최소화하고 요구되는 렌즈가 정밀도를 낼 수 있는 최적의 조건을 선정하게 되었다. 또한 이렇게 설계된 도면을 바탕으로 금형을 설계·제작하였으며, 이를 이용하여 사출 후 시제품을 제작하게 되었다.

본 연구의 사출성형 조건은 금형온도 92 ~ 93 °C, 압력 70kg/cm², 수지 초기온도 240°C, 충전시간 12.08초를 기본조건으로 하였으며 금형온도와 압력이 제품에 미치는 영향을 파악하기 위하여 금형온도를 ±5°C씩 증감하였으며, 압력도 ±10%씩 증감하여 실험을 행하였다. 이때 사용수지는 투명

성이 좋고 분산특성이 작으며, 경도 및 내구성이 좋은 PMMA(폴리메틸 메타 크릴레이트)를 사용하였다.

결과적으로 상코어(구면)의 경우 금형온도가 높을수록 압력이 높을 수록 렌즈 표면의 P-V (Peak to Valley)값이 작아짐을 알 수 있다. 그리고 하코어(비구면)의 금형온도가 동일하면 일반적으로 압력이 클수록 P-V값이 증가한 결과를 얻을 수 있었다.

측정결과 금형의 P-V값은 구면(상코어)에서 0.201μm, 비구면(하코어)에서 0.434μm로 비구면 금형면이 구면 금형면보다 약 2배 이상 값이 큰 것을 알 수 있다. 그러나 사출 성형된 렌즈(EVF 렌즈)의 면을 측정하여 보면 구면의 P-V값이 3.478 μm로 오히려 비구면의 P-V값 1.786 μm 보다 크게 나옴을 알 수 있었다. 따라서, 본 기술은 기초로 하여 플라스틱 비구면 렌즈의 정도를 높이기 위한 금형 설계, 제작, 성형기술의 지속적인 연구가 진행되어야 할 것이다.

참고 문헌

- (1) 이종호, 1994, "소형 플라스틱 정밀기어 제조기술 개발", 한국생산기술연구원.
- (2) 자동차 기술, 1993, "금형 CAD/CAM 시스템의 활용", pp.82-91, 11월호.
- (3) Shunji Uchio, 1989, "광학소자 생산용 금형의 현상과 문제점", 월간 형기술 3월호.
- (4) Hiromasa Kawai의, 1989, "정밀 광학용 플라스틱 재료의 특성", 월간형기술 3월호.
- (5) Plastic Science, 1989, "초정밀 플라스틱 렌즈의 성형", Plastic Science, Aug.
- (6) 기계기술, 1993, "비구면 렌즈의 개발동향과 응용가능성", pp.90-95, 10월호.
- (7) 김정두, 1993, "비구면 렌즈의 설계 및 초정밀 가공", Vol.26, pp.78-85.