

## 압축효과를 가미한 도광판의 전사성과 복굴절 향상에 관한 실험적 연구

민인기<sup>1,2</sup>, 김종선<sup>1</sup>, 고영배<sup>1</sup>, 박형필<sup>1</sup>, 윤경환<sup>2</sup>, 황철진<sup>#,1</sup>

# An Experimental Study on The Improvement of Pattern Replication and Birefringence in LGP by Adding Compression Effects

I. K. Min, J. S. Kim, Y. B. Ko, H.P. Park, K.H. Yoon, C.J. Hwang

(Received September 9, 2005)

### Abstract

It is necessary to improve the pattern replication and birefringence in LGP(Light guide panel) for better optical performance. In the present paper, the effects of injection-compression and injection-press mode with normal injection mold on the distribution of transcription of pattern and birefringence were studied. It was found that the values of pattern replication was improved and the birefringence was reduced for the cases of low initial clamping force in injection-compression mode and for the cases of longer mold opening length in injection-press mode, respectively.

**Key Words** : Injection Molding, Injection-Compression Molding, Injection-Press Molding, Birefringence, Residual stress

### 1. 서 론

휴대폰 BLU(Back-Light Unit)의 기본 구조는 광원 역할을 하는 LED와 점 광원인 LED에서 나온 광을 면 광원으로 바꿔주는 도광판(Light Guide Plate, LGP), 그리고 도광판에 의해 만들어진 면 광의 휘도 및 시야각을 조절해주는 휘도조절 필름들로 구성되어 있다. 도광판의 경우 대부분 사출성형에 의해 만들어 지고 있으며 도광판의 성형에 있어 중요하게 고려되는 요인으로는 복굴절 및 전사성을 들 수 있다. 도광판의 두께가 얇은 경우 제품의 성형 시 앞서 말한 특성들의 제어에 어려움이 있으며 설계한 의도의 광학적 특성들을 얻기가 힘들다. 그래서 품질이 우수한 도광판을 생산하기 위해서 도광판 내부의 잔류 복굴절(birefringence)의

양을 줄이려는 것과 패턴의 전사성향상을 위한 연구가 활발히 진행 중이다.

패턴의 전사성 저하와 내부에 남아있는 복굴절의 발생은 액체상태의 수지가 금형 내에 유입되면서 금형 벽면과의 온도차이로 인해 급격히 고화되면서 유동저항의 증가로 수지의 유동을 방해하여 전사성을 저하시키고 복굴절을 증가시키게 된다. 도광판 패턴의 전사성을 향상시키기 위해서는 금형의 온도를 조절하는 방법과 사출속도를 높여 성형하는 고속사출성형방법과 사출압력을 높이는 방법, 그리고 사출/압축성형법 등이 있다. 하지만, 사출속도를 늘이거나 사출압력을 높일 경우 도광판 내부에 잔류응력의 증가로 복굴절이 증가하는 경향이 있다. 도광판 전체에 분포하는 복굴절의 양을 줄이는 방법은 수지가 정해져 있

1. 한국생산기술연구원 정밀금형팀 (KITECH)

2. 단국대학교 기계공학과

# 교신자 : 한국생산기술연구원, cjhwang@kitech.re.kr

는 경우 크게 두 가지 방법이 있다. 하나는 냉각수의 유로 조절 등의 금형 구조 개선을 통한 방법이고 다른 하나는 사출/압축 성형법을 이용하여 성형법 자체를 개선하여 광로 상의 복굴절의 양을 줄이는 것이다[1]. 사출성형 후 도광판에 존재하는 복굴절의 양은 기관에 입사된 광이 투과 또는 반사 시 일어나는 편광 상태의 변화를 측정할 수 있었다.

본 논문에서는 위의 사항들을 고려하여 일반 2인치 휴대폰용 도광판 금형과 형체압축성형이 가능한 LS 전선의 사출 성형기를 사용하여 압축효과를 가미해 성형한 도광판의 복굴절 저감과 패턴의 전사성향상에 관한 실험 결과들을 보이고자 한다.

## 2. 사출성형 및 형체압축 성형

### 2.1 사출성형 및 사출 압축성형 개요

사출 성형은 성형기의 가소화 장치에서 용융된 수지를 금형의 내부에 충전시키고 사출된 수지를 냉각, 고화시켜 원하는 성형품을 만드는 성형 기술이다. 일반적인 사출성형에서는 용융 수지를 게이트에서 고압으로 주입한 후 냉각에 따르는 수축분을 보압 과정을 거쳐 보충하여 성형한다. 사출/압축성형은 금형의 구조에 따라 코어압축성형(core-compression molding)과 형체압축성형(injection-press molding)으로 나눌 수 있으며 이번 실험에서 사용한 형체압축 성형은 압축 방식에 따라 사출 압축모드(injection-compression mode)와 사출 프레스 모드(injection-press mode)로 나눌 수 있으며 Fig. 1처럼 정리할 수 있다.

일반적인 사출성형 방법은 Fig. 2(a)처럼 사출이 시작되기 전부터 높은 형체력을 가해준 후 캐비티(cavity)내에 수지를 충전시켜 사출하는 방식이다. 하지만, 이러한 일반적인 사출방법의 경우 밀폐된 공간에 수지를 유입해야 하므로 높은 사출압력과 사출속도 및 보압을 필요로 하며 결과적으로 높은 형체력을 요구한다. 한편, 사출 성형품 내에 형성된 복굴절은 수지가 유동하면서 발생하는 유동에 의한 복굴절(flow-induced birefringence)과 냉각 과정 동안 생성되는 열에 의한 복굴절(thermal-induced birefringence)로 나눌 수 있다[1~2]. 열에 의한 복굴절의 원인으로는 금형 내에서 수지의 불 균일 냉각 등 전체적으로 금형내의 온도분포에 의한 영향을 많이 받으며 대책으로는 제품의 두

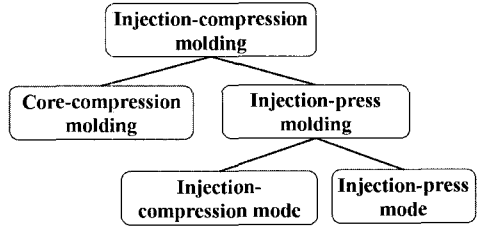


Fig. 1 Classification of injection-compression molding

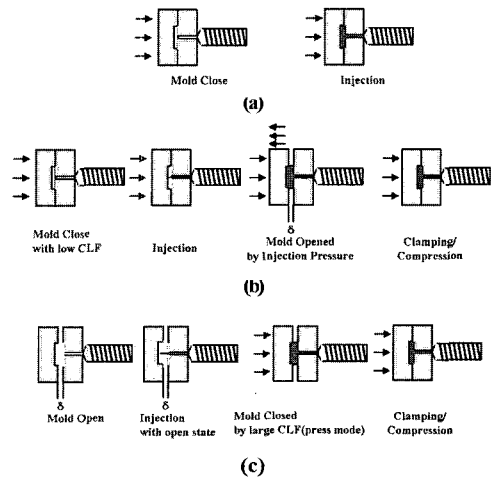


Fig. 2 Molding schematics of (a) general injection molding, (b) injection-compression mode and (c) injection-press-mode

께를 균일하게 한다거나 금형내의 냉각수 유로조절 등 금형의 구조개선을 통하여 어느 정도 해결할 수 있다. 유동에 의한 복굴절은 금형 벽면에 인접하여 높은 전단응력과 빠른 냉각속도의 복합적인 원인으로 고화된 층에 의해 발생한다. 이를 줄일 수 있는 방법으로는 높은 수지온도 및 금형온도 등 수지의 유동을 개선 하여 해결할 수 있다. 이번 실험에서 주안점을 둔 형체압축성형은 바로 이 유동에 의한 잔류응력을 줄이기 위함이다. 형체압축성형은 사출 후 충전된 수지를 금형 전체에 압력을 가하여 유동에 의해 발생한 배향을 완화시켜 잔류복굴절의 분포를 균일하게 하며 전체 적인 양을 줄일 수 있다. 또한, 금형을 열어놓거나 낮은 형체력을 유지하는 상태에서 사출을 하기 때문에 사출과정에서 요구되는 잔류 복굴절의 양을 저감시킬 수 있으며 사출

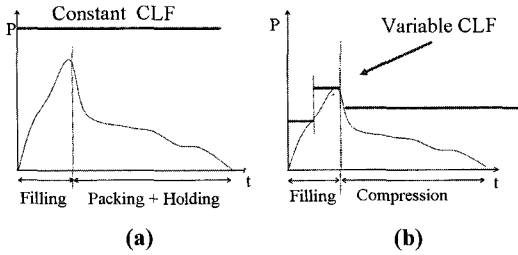


Fig. 3 Pressure profiles of (a) general injection molding and (b) injection-press molding

후 압축작용으로 전사성을 높일 수 있는 효과를 볼 수 있다. 결과적으로, 유압장치에서 발생하는 최대 사출압을 낮추어 적은 형체력으로도 성형이 가능한 장점이 있다[1,3,4,5].

### 2.2 사출압축 모드와 사출 프레스 모드

Fig. 2(b)에서 설명하고 있는 것은 사출 압축모드(injection-compression mode)이며 이 성형 방법은 초기에 매우 적은 형체력으로 금형을 체결하고 있다가 수지가 캐비티 내에 유입되면서 사출압력이 설정한 형체력보다 높으면 금형이 열렸다( $\delta$ )가 두 번째 형체력이 작동하는 방식이다[6].

Fig. 2(c)에서 설명하고 있는 성형방법은 사출 프레스 모드(injection-press mode)로 이 경우에는 사출 압축모드와는 달리 초기 설정치( $\delta$ ) 만큼 금형을 열어놓았다가 사출이 완료되면서 금형을 닫는 것이다[6].

Fig. 3에서 보는 바와 같이 일반 사출성형 방법과는 달리 형체 압축방식은 초기에 금형을 개방해 놓는거나 사출 초기에는 낮은 형체력을 설정하였다가 사출이 완료될 때 필요한 형체력만큼 늘리는 형식의 다단 형체력을 이용하여 일반 사출성형에서 금형 캐비티 내에 수지를 충전시킬 때 보다 최대 형체력 및 사출압력을 낮출 수 있기 때문에 적은 형체력으로도 사출성형이 가능하므로 따라서 복굴절의 저감효과와 압축의 영향으로 패턴의 전사성 향상을 얻을 수 있다[8].

본 논문에서는 Fig. 4(a)처럼 LS 전선의 LGE-110D 모델의 형체압축 사출 성형기를 이용하였고, Fig. 4(b)의 2캐비티(2-cavity)의 2인치 휴대폰용 금형을 사용하였으며, Fig. 4(c)에 본 사출기와 금형을 사용하여 만든 도광판을 도시화 하였다. LS 전선의 LGE-110D 사출기를 사용하여 Fig. 2에 보인 바와 같이 2 가지 방식(사출 압축모드, 사출 프레스 모

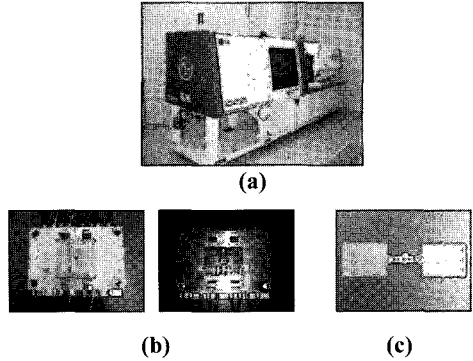


Fig. 4 Pictures of (a) injection molding machine LGE-110D (b) injection Mold (2", 2 cavity) (c) injection molded LGP

드)으로 형체압축실험을 할 수 있었다.

## 3. 복굴절 및 광탄성 이론

### 3.1 복굴절

분자의 구조가 등방성 물질이라도 응력을 받으면 광학적 이방성을 가지게 되며 Fig. 5에서 보는 바와 같이 횡파인 빛이 z 방향으로 진행할 때 진동 방향에 따라 진행 속도가 다르게 된다. 이 때 가장 빠르게 진행되는 축을 fast axis, 가장 느리게 진행되는 축을 slow axis 라 부르며 두 축 사이의 각도는 90°를 이룬다. Fast axis 와 slow axis 를 각각 굴절률에 관한 주축이라 하며 직선 편광된 빛이 광학적 이방성인 물체를 통과할 때 fast axis 와 slow axis 로 성분이 분리되면 두 파형 사이에는 경로차 또는 위상차가 생긴다. 이러한 속도차에 의해 발생하는 두께 d 를 통과하는 사이의 거리 경로차,  $D_s$  는 다음의 식 (1)로 계산할 수 있다.

$$D_s = (t_s - t_f)c = \left(\frac{d}{v_s} - \frac{d}{v_f}\right)c = (n_s - n_f)d \quad (1)$$

여기에서 t 는 매질 통과 시간, v 는 매질 통과 속도, c 는 진공 또는 공기 중의 광속,  $n_s$ ,  $n_f$  는 각각 slow axis 와 fast axis 의 굴절률이며 그 차이를 통상 복굴절의 값( $\Delta n$ )이라 부른다[7].

### 3.2 광탄성 이론

1816년 David Brewster 는 투과성이 있는 등방성 물질이라도 응력을 가하면 광학적으로 이방성을 띄게 된다는 것을 발견하였다. 이러한 현상을 광

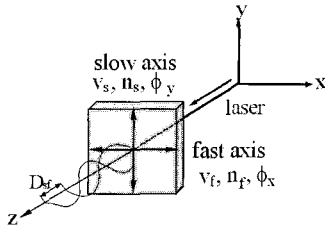


Fig. 5 A linear polarized light and path difference passing an anisotropic substance

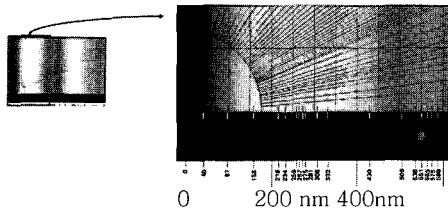


Fig. 6 Levy's interference chart

탄성(photoelasticity)이라 하며 이방성에 의한 복굴절은 주응력 차에 비례한다. 선형 광탄성(Linear Photoelasticity) 이론에서는 등방성물질이 응력을 받으면 편광된 광학 주축 방향의 굴절률의 차이가 주응력의 차이에 비례하며 다음 식 (2)과 같다.

$$n_i - n_j = C(\tau_i - \tau_j) \quad (2)$$

여기에서  $i, j, k = I, II, III$  주축의 방향이며,  $\tau_I, \tau_{II}, \tau_{III}$ 는 세 주축 방향의 주응력이다. 또한,  $n_i$ 는 주축  $i$  방향으로 편광된 빛이 물질을 통과할 때의 굴절률이며  $C$ 는 광 탄성계수(stress-optical coefficient)이다. 본 실험에서 사용한 PMMA의 경우 상온에서의 광탄성 계수는 약  $-5Br$  ( $1Br = 10^{-12} Pa^{-1}$ ) 정도이다. 복굴절이 있는 샘플에 경로차가 발생하는 경우 선형 편광기를 통해 보이는 컬러를 간섭색(interference color)라 하며, Fig. 6에서 하단의 숫자로 표시된 것과 같이 경로차가 증가할 때 이에 비례하여 간섭색(interference color)이 변화하게 된다[7].

#### 4. 측정장치 및 실험조건

##### 4.1 측정장치의 구성

본 논문에서는 패턴의 형상을 측정하기 위해 Fig. 7과 같이 Nanofocus의 3D-profiler를 사용하였으며, 샘플에서 발생하는 경로차가 1/2 파장안에 있는지

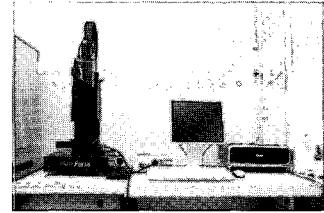


Fig. 7 3D-Profiler

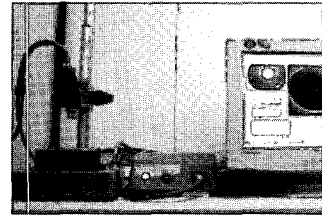


Fig. 8 Birefringence measurement system using CCD camera

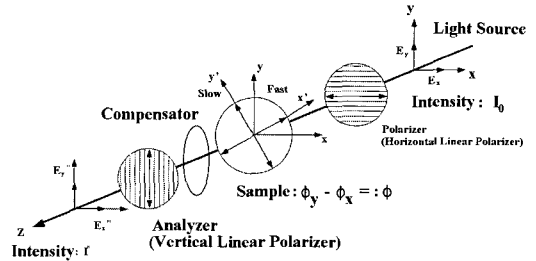


Fig. 9 Optical setup for birefringence measurement

확인하기 위해 Fig. 8과 같이 원편광 시스템을 사용하였다. 시스템의 구성은 Edmund Industrial Optics사의 편광 필름 2장, 1/4 파장판 2장, 그리고, LED 평면 광원, 그리고 복굴절 이미지의 촬영을 위하여 Canon사의 300D 디지털 카메라, 마지막으로 CANON EF 180mm f/3.5L Macro USM 렌즈를 사용하였다[7]. 샘플 내 복굴절 값의 측정에는 레이저와 보상판(compensator)을 사용한 point-by-point 측정으로 행해졌으며 Fig. 9에 그 시스템의 개요도를 보였다.

이번 실험에서 사용한 LS전선 LGE-110D 모델은 최대 형체력이 110ton이며 급형의 영점조정시 최대 형체력을 조정할 수 있다. 본 연구에서는 최대 형체력을 80ton으로 설정하여 실험하였으며 수지는 SUMITOMO의 PMMA(grade: MGSS)를 사용하였고 실린더의 온도는 230℃이며 급형온도는 55℃로 설정하였다. 실험은 일반단순사출성형

(general injection molding)과 사출압축모드(injection-compression mode), 사출프레스모드(injection-press mode) 세 가지의 실험을 하였으며 초기 형체력 및 형개 거리를 조절해가면서 실험을 하였다.

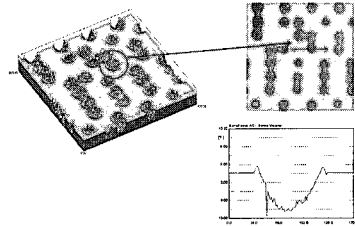
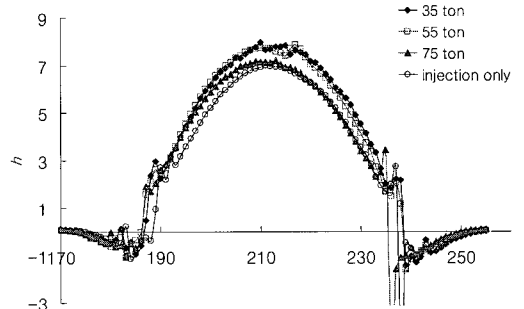


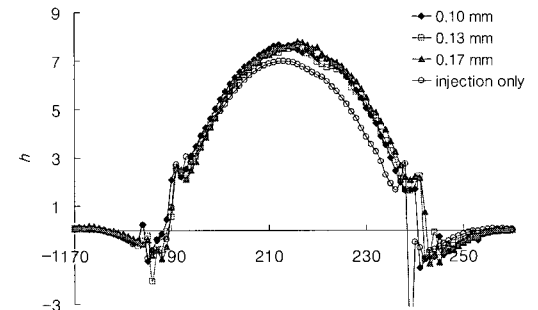
Fig.10 Pictures of a stamper and its profile

4.2 형체압축성형: 사출압축모드

사출압축 모드에서는 일정한 형체력을 유지하는 일반단순 사출 성형과 초기 형체력을 작게하여 사출압에 의해 금형이 열리게 하는 사출압축 모드에서는 초기 형체력을 75ton, 55ton, 35ton으로 변경해가며 일반 단순사출성형과 비교하였으며 실험 조건은 Table 1과 같다.



(a)



(b)

Fig.11 Pattern replication of LGP (a) injection-compression mode (b) injection-press mode

Table 1 Conditions of injection-compression mode

	1 <sup>st</sup> clamping Force	2 <sup>nd</sup> clamping force
General injection molding	80ton	80ton
Injection-compression mode	75ton	75ton
	55ton	
	35ton	

Table 2 Conditions of injection-press mode.

	1st mold opening length	2nd mold opening length
General injection molding	0.00mm	0.00mm
Injection-press mode	0.10mm	0.01mm
	0.13mm	
	0.17mm	

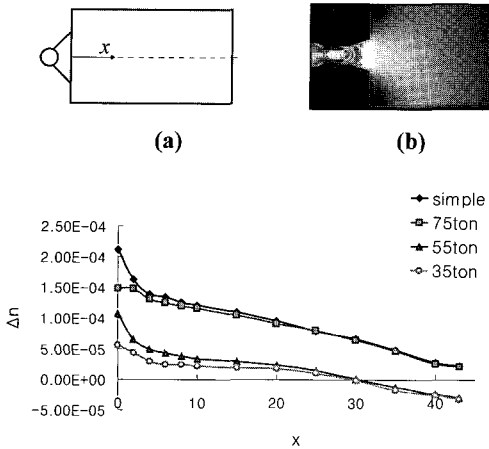
5. 결과 및 토의

본 논문에서는 형체압축을 이용하여 도광판 성형품에 대하여 전사성 및 게이트 부위에서 발생하는 복굴절의 저감시킬 수 있는 방법에 대하여 실험하였다.

Fig. 10은 이번 실험에서 사용한 스탬퍼의 형상으로 사용한 패턴은 에칭에 의해 형성된 패턴이며 지름은 약 80 $\mu$ m 이고 깊이는 각 부분마다 다르지만 측정된 dot는 스탬퍼에서의 중심부에서 8.02 $\mu$ m의 높이를 가진다.

전사성비교를 위한 샘플의 측정은 항상 일정한 위치에 있는 dot를 정하여 반복 측정하였으며 깊이와 성형품의 높이의 비율로 간단하게 전사성을 정의하고 패턴의 형상을 측정하였다.

Fig. 11(a)는 사출 압축모드(injection-compression

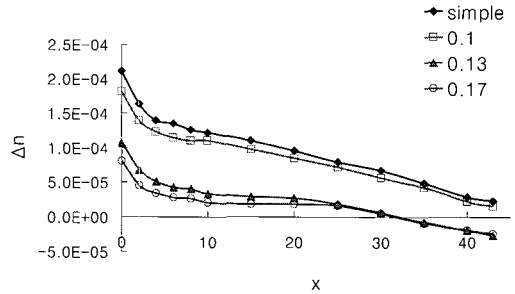


**Fig.12 (a) Coordinate of measurement, (b) A picture under the plane-polariscope, (c) Distance from a gate vs. birefringence of the sample made by injection-compression mode**

mode)의 형상의 측정 결과로 초기 형체력을 기존의 80ton과 유사하게 75ton으로 설정했을 때에는 일반 단순사출성형과 전사성의 차이가 크게 나지는 않지만 그보다 낮은 55ton, 35ton으로 설정했을 때에는 패턴의 최대 깊이만을 볼 때 전사율이 약 95%로 크게 향상된 것을 알 수 있었다.

한편, Fig. 11(b)는 사출 프레스모드(injection-press mode)를 사용했을 경우의 형상을 보여주고 있으며, 초기 형개거리의 조건이 0.10mm에서 0.17mm로 바꾼 결과 단순사출의 결과에 비해 전사성의 향상을 크게 얻을 수는 있음을 알 수 있다. 일반 사출성형의 경우 중심에서 패턴의 최대 높이가 6.9 $\mu$ m 정도임에 반해 형개거리가 0.17mm 일 경우 패턴의 최대 높이는 약 7.6 $\mu$ m로 깊이로만 볼 때 약 96%까지 전사성의 향상을 얻을 수 있었다.

Fig. 12는 Fig. 9의 setup을 이용하여 일반 단순사출과 사출압축모드(injection-compression mode)의 복굴절 측정의 결과이다. (a)에 보이는 바와 같이 게이트와 성형품이 만나는 위치를 0으로 하고 샘플의 바깥쪽으로 위치를 옮겨가며 복굴절을 측정하며, 일반 단순 사출성형, 즉, 초기 형체력이 80ton인 경우 복굴절의 값( $\Delta n$ )은 게이트 부근에서 약 2.1 $\times 10^{-4}$ 의 최대값을 나타내며 게이트에서 멀어질수록 복굴절 값이 감소하는 전형적인 패턴을 보이고 있으며, (b)에 편광판 사이에서의 패턴 사진을 보인다. (c)에 보이는 바와 같이 초기 형체



**Fig.13 Distance from a gate vs. birefringence of the sample made by injection-press mode**

력 값을 75ton으로 설정한 경우에도 큰 변화가 보이지 않지만 55ton 일 경우부터 복굴절의 값이 현저히 줄어 드는 것을 볼 수 있으며 35ton으로 설정하였을 경우 최대 복굴절의 값이 5.67 $\times 10^{-5}$ 으로 현저히 감소한다는 것을 알 수 있었다. 30mm 이상에서는 심지어 부호가 바뀌는 현상도 발견되었다. 이는 초기 형체력의 설정 값을 55ton, 35ton으로 줄일 경우 캐비티내 압력과 면적의 적분값이 초기 설정 형체력보다 클 경우에는 형열림으로 인해 캐비티의 두께가 상대적으로 커져 전단력이 작아지며 이 때 발생한 잔류응력의 값도 작아져 최종에 잔류하는 복굴절이 감소하는 것이다.

Fig. 13은 일반 단순사출성형의 결과와 초기 형개 거리를 조절해가며 성형한 사출 프레스 모드(injection-press mode)의 복굴절의 값을 측정한 결과를 보이고 있다.

일반 단순 사출성형의 결과 최대 복굴절 값은 2.1 $\times 10^{-4}$ 을 가지며 초기 형개거리를 0.10mm로 설정할 경우 최대값은 약 1.81 $\times 10^{-4}$ 이며 전체적으로 약간 감소하는 경향을 보였다. 초기 형개거리를 크게 설정할수록 샘플 내부에 남는 복굴절의 값은 줄어든다는 것을 보여주며 0.17mm일 때의 값을 보면 최대값이 약 8.0 $\times 10^{-5}$ 로 사출압축 모드의 경우와 같이 현저하게 감소하였음을 볼 수 있다. 사출 프레스 모드에서는 캐비티 내로 처음 유입될 때부터 금형이 열려있으므로 캐비티 두께가 커진 상태에서 사출성형을 시작하는 것이기 때문에 초기부터 전단력이 작아져 잔류하는 복굴절의 값이 작아진 것이다.

이로써 형체압축을 이용하면 수지가 캐비티 내로 유동될 때 금형을 열어놓거나 낮은 형체력을

## 참 고 문 헌

유지함으로써 적은 형체력으로 성형 시 발생하는 잔류 복굴절의 양이 감소한다는 사실을 실제 패턴이 있는 도광판 샘플을 통해 정량적으로 증명할 수 있었다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 사출압축과 사출프레스 모드를 사용한 압축성형 방법으로 핸드폰용 BLU의 도광판을 성형하여 패턴의 전사성과 도광판 내 잔류 복굴절의 분포를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) Fig. 3에 보인 바와 같이 형체압축 성형을 이용함으로써 보다 적은 형체력으로도 도광판의 성형이 가능함을 실험적으로 보였다.

(2) Fig. 11에 보인 바와 같이 형체압축 성형방법을 통하여 패턴의 전사성을 향상시킬 수 있음을 보였다.

(3) Fig. 12와 Fig. 13에 보인 바와 같이 형체압축 성형방법을 통하여 도광판 내부에서 발생하는 복굴절의 양을 획기적으로 줄일 수 있음을 확인할 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 2010 생산기술 혁신 기술개발 사업지원으로 연구되었으며 본 연구에 기술적 후원을 도와주신 박상호님, 한기환님, 정성욱님, 김진영님 등 LS전선 분들께 감사드립니다.

- [1] 권태현, 박성진, 윤경환, 이상봉, 정영득, 2001, 사출성형 CAE 설계지침, 문운당.
- [2] 김현, 김종성, 강신일, 1999, 사출압축성형을 통한 코아디스크 기관 성형 및 복굴절의 측정, 한국소성가공학회 '99 춘계학술대회 논문집 pp. 218~222.
- [3] 이영복, 권태현, 윤경환, 2002, 사출/압축 성형 Center-gated 디스크에서의 잔류응력과 복굴절의 수치해석(II), 대한 기계학회 논문집 A 권, 제 26권 제 11호, pp. 2355~2363.
- [4] 김일환, 박성진, 정성택, 권태현, 1998, Center-gated 디스크에 대한 사출/압축 성형공정의 수치적 모델링 (2), 대한 기계학회 논문집 A 권, 제 22권 제 2호, pp. 302~310.
- [5] C. H. Wu, Y. L. Su, 2003, Optimization of Wedge-Shaped Parts for Injection Molding and Injection Compression Molding, Int. comm. Heat Mass Transfer, Vol. 30, No. 2, pp. 215~224.
- [6] 취급설명서 LS전선 사출시스템사업부, 2003, LG 사출성형기(LGE Series), LS전선.
- [7] 김종선, 윤경환, 2003, 회전에 의한 플라스틱 기관에 야기되는 복굴절 측정에 관한 연구, 2003년도 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집 pp. 470~473.
- [8] 김동학, 유홍진, 김태완, 2004, 나노패턴을 갖는 DVD 용 스탬퍼의 표면가열방식이 COC, PMMA 수지를 이용한 사출성형품의 전사성에 미치는 영향, 한국 산학기술학회 논문지, pp. 218~222.