

## 광디스크 기판의 사출압축성형시 발생하는 복굴절에 관한 연구

김종성\* · 김 현\* · 강신일\*\*  
(1999년 3월 3일 접수)

### On the Birefringence Distribution in Optical Disk Substrate Fabricated by Injection Compression Molding

Jong Sung Kim, Hyun Kim and Shinill Kang

**Key Words:** Optical Disk Substrates(광디스크기판), Birefringence(복굴절), Injection Compression Molding(사출압축성형), Optical Information Storage Device(광학정보저장기기)

#### Abstract

It is necessary to improve mechanical and optical properties in the optical disk substrates as the information storage devices with high storage density using short wavelength laser are being developed. Injection compression molding is regarded as the most suitable process to manufacture optical disk substrates with high dimensional accuracy, low residual stresses, and superb optical properties. In the present study, polycarbonate optical disk substrates were fabricated by injection compression molding and the birefringence, regarded as one of the most important optical properties for optical disk, is measured. The effects of various processing conditions upon the development of birefringence distribution were examined experimentally. It was found that the values of the birefringence distribution were very sensitive to the mold wall temperature history and the variance of the birefringence distribution in the radial direction was affected by the level of the packing and the compression pressure.

#### 1. 서론

CD, DVD, MOD 등과 같은 광정보저장매체의 고저장밀도화에 따라 광 픽업 레이저의 파장도 현재 780nm에서 650nm, 430nm등으로 계속 짧아지고 있다. 이와 같은 단파장 레이저를 이용한 정보재생방식과 높은 저장밀도를 갖는 정보저장기기의 개발로 기존의 공정으로는 이에 적합한 기판의 제조가 어려운 실정이며 이에 따른 새로운 성형공정 및 금형의 개발이 필요하게 되었다.

최근에 광디스크 기판이나 플라스틱 광학렌즈 등과 같은 광학성형품의 성형공정으로 사출성형

보다는 사출압축성형공정이 더욱 각광을 받고 있다. 사출압축성형법이란 형체 완료시 캐비티 용적을 미세하게 형개한 상태에서 사출하고, 충전 후 가동측에 위치한 가압 피스톤에 의한 압축공정을 가미하여 캐비티 전면에 균일한 압력을 걸어 전체적으로 왜곡이 적고 두께의 분포가 균일한 제품을 제조할 수 있는 성형방식으로 기존의 사출성형에 비해 저압성형, 수지 유동배향완화, 잔류응력 경감, 형상정밀도 및 치수정밀도 향상 등의 장점이 있다. 광디스크 기판은 마스터링 공정에 의해 제조되는 스템퍼에 의해 데이터가 피트의 형태로 기록되며 또한 데이터의 재생시 레이저가 통과하는 부분으로, 광디스크 기판의 성형은 복합적인 광디스크 제조공정 단계에 있어서 매우 중요한 부분이다. 특히 기판을 통과하는 레이저광의 복굴절현상은 디스크의 광학적 특성을 결정하는 주요 인자이다. 복굴절 현상은 빛이 가

\* 연세대학교 대학원 기계설계학과

\*\* 회원, 연세대학교 기계·전자공학부

지고 있는 진동방향에 따라 구분되는, 정상광선과 이상광선이 이방성이 있는 물질을 통과할 때 그 진동방향에 따라 다른 속도를 가지고 통과하는 현상을 말한다. 진동방향에 따라 가장 빠르게 통과하는 축을 Fast Axis, 가장 느리게 통과하는 축을 Slow Axis라고 하며 이에 따른 최대 굴절률과 최소 굴절률의 차이를 복굴절의 값  $\Delta n$ 이라고 한다.<sup>(1)</sup> 이 복굴절현상은 플라스틱과 같은 비정질 물질에서는 나타나지 않는 것이 일반적이지만 비정질 물질이라 하더라도 일시적인 외부의 압력이 가해지는 경우나 재료 내부에 잔류응력이 발생한 경우에는 방향에 따라 서로 다른 특성을 지니게 되어 복굴절 현상을 일으킬 수 있게 된다. 고분자 수지와 같은 경우는 충전시 유동에 의한 응력의 분포와 이의 이완에 의해 발생하는 복굴절(Flow-Induced Birefringence)과 불균일 냉각에 의해 발생하는 복굴절(Thermally-Induced Birefringence)로 대분할 수 있으며 기판의 최종 복굴절은 이 두가지 영향이 복합적으로 작용하여 발생한다. 따라서 광디스크 기판의 성형조건에 따라 복굴절의 정도가 크게 달라질 수 있다. 복굴절과 마찬가지로 수지 유동의 배향(orientation) 정도를 예측할 수 있는 인자로는 extinction angle이 있다. extinction angle은 응력분포와 관련하여 광디스크 기판 시편에 작용하는 응력들을 고려할 때 기판의 한 점에서 기하학적인 축과 주응력 축이 이루는 각을 의미한다.

사출압축성형공정은 사출속도, 사출압력, 보압, 압축압력, 사출량, 금형온도, 용융수지 온도, 냉각시간 등 여러 가지 공정조건들이 서로 맞물려 기판의 기계적 또는 광학적 특성에 영향을 미치므로 각각의 공정조건이 기판의 특성에 미치는 영향에 대한 이해가 필요하다. 사출압축성형공정 및 고분자 수지의 점탄성적인 성질로 인해 재료의 변형과 열적 변화에 따라 잔류응력(Residual Stresses), 복굴절(Birefringence), 휨(Warpage), 수축(Shrinkage) 등이 발생한다. Santhanam과 Wang<sup>(2,3)</sup>은 사출성형 디스크의 잔류응력 및 휨의 발생을 점탄성 모델을 써서 분석하였고 비균일 냉각이 휨에 미치는 영향 등을 실험 및 해석적으로 고찰한 바 있다.

사출성형을 통한 광디스크 기판 성형시 발생하는 잔류응력 및 복굴절에 관한 다양한 연구가 있었다. Jansen 등<sup>(4,5)</sup>은 금형벽면온도가 사출성형품

의 유동배향, 잔류응력 및 복굴절에 미치는 영향을 연구하였고 Greener 등<sup>(6)</sup>은 반경방향의 유동모형을 사용하여 광디스크에 발생하는 복굴절에 대한 연구를 수행하였으며 Isayev와 Hieber<sup>(7)</sup>는 간격이 좁은 두 평판 사이의 유동에 Leonov모형을 사용하여 고분자의 탄성에 관한 성질을 연구하였다. 또한 Shyu 등<sup>(8)</sup>은 Leonov 모형을 이용하여 폴리카보네이트(polycarbonate)와 폴리스티렌(poly-styrene) 재료를 이용하여 사출성형에 의한 잔류응력과 복굴절에 관한 기초연구를 수행하였고 Wu와 White<sup>(9)</sup>는 폴리카보네이트 재료의 사출성형 및 압축성형시 급속냉각 등 여러가지 공정조건이 복굴절의 발생에 미치는 영향을 실험적으로 규명하였다.

본 연구에서는 폴리카보네이트 광디스크 기판의 사출압축성형에 필요한 기본적인 공정조건 및 기판에 발생하는 복굴절의 측정기술을 확립한 후, 보압, 압축압력, 금형온도, 용융수지온도 등 여러가지 공정조건들의 변화가 광디스크 기판 내부에 발생하는 복굴절의 분포에 미치는 영향을 실험적으로 규명하고, 이를 통해 복굴절 값을 감소시키고 균일한 분포를 갖게하는 성형 및 금형설계 방안을 모색한다.

## 2. 사출/사출압축성형에 의한 광디스크 기판 성형 및 복굴절 분포 측정

### 2.1 사출/사출압축성형 공정조건 확립

본 연구에서는 광디스크 기판의 재료로 널리 사용되는 광학용 폴리카보네이트(Lexan 141, optical grade)를 사용하여 지름 86.0mm, 두께 1.2mm의 광디스크 기판을 성형하였다. 본 연구에서 사용된 광디스크 기판 성형용 금형을 Fig. 1에 나타내었다. 본 금형이 장착된 사출압축성형기는 체결력이 50ton이고 최대 이론 사출량이 77 cm<sup>3</sup>이며 최대 사출 압력이 2022 kg/cm<sup>2</sup>이다. 사출시 용융수지의 온도를 300℃까지 올리기 위하여 실린더 내부의 온도 분포를 4단계로 나누어 스프루에 가까운 부분부터 각각을 300℃, 320℃, 320℃, 300℃로 설정하였고 이는 사출압축성형기의 설정값이다. 사출량은 30mm으로 설정하였으며 이는 전체 스크루 이동거리이다. 보압 절환 위치 값을 14mm로 설정하였으며 이는 30mm부분부터

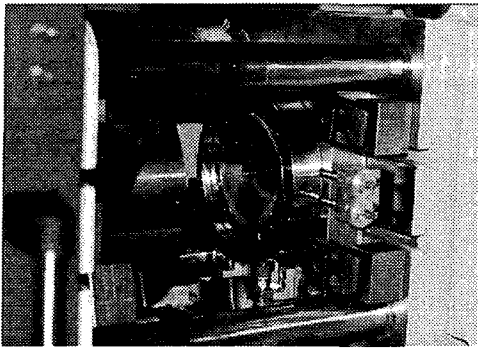


Fig. 1 Injection-compression mold with a stamper to fabricate MOD substrate (core-compression type).

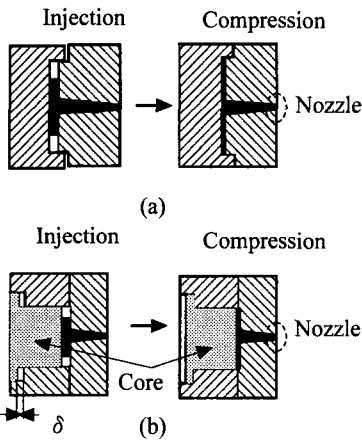


Fig. 2 Two types of compression mechanism: (a) a total compression of a moving plate by a clamping force control (b) a core compression by separate unit.

14mm까지 사출공정이 진행되고 14mm 이후부터는 보압공정이 진행됨을 의미한다. 충전시간은 0.5초로 설정하였고 금형온도는 고정축과 운동축 모두 50℃, 보압은 41.2MPa를 기본공정조건으로 설정하였다.

압축의 방식은 Fig. 2에서 보듯이 운동부 금형의 이동에 의해 압축되는 전면압축방식과 따로 설계된 코어 부분에 의해 캐비티면에 압축을 가하는 코어 압축방식이 있으며 본 연구에서는 코어 압축방식을 선택하였다. 복굴절에 대한 보압과 압축의 영향을 살펴보기 위해 우선 보압과 압

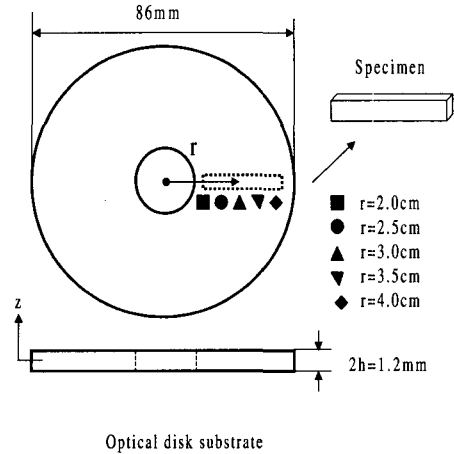


Fig. 3 Dimension of the optical disk substrate and the location of the measurement points.

축을 가하지 않고 시편을 만들어 복굴절을 측정하였고 다음으로는 보압을 0.5초간 각각 20.6MPa, 41.2MPa만큼 바꾸어 가며 시편을 제작하였다. 또한 압축을 충전시간 이후 1초간 각각 41.2MPa, 82.4MPa로 바꾸어 가며 시편을 제작하였다. 금형온도가 복굴절의 분포에 미치는 영향을 알아보기 위해서는 금형온도를 40℃, 60℃, 100℃로 각각 설정하였으며 용융수지 온도의 영향을 보기 위해서는 용융수지의 온도를 280℃, 300℃, 315℃로 각각 설정하였다.<sup>(8)</sup> 압축공정에서의 압축이동 거리  $\delta$ 는 금형이 가지고 있는 설계 사양으로 0.1mm이다.

2.2 복굴절측정장치 및 방법

광디스크 기관 내부의 복굴절측정은 여러 조건에 따른 광디스크기관 제작, 시편 절단, 폴리싱, 복굴절 측정의 순으로 이루어졌다.

사출압축성형에 의해 성형된 광디스크 기관에서 측정할 시편을 잘라 내기 위해 다이아몬드 톱을 이용, 폭 0.7mm의 시편으로 Fig. 3과 같이 절단했다. 시편의 절단시 마찰열에 의한 영향을 줄이기 위하여 다이아몬드 톱의 회전속도는 150~200rpm으로 비교적 낮게 설정하였다. 절단시 디스크 기관의 손상을 줄이기 위해 두께 1mm의 아크릴 판을 더미로써 양쪽에 대고 가운데 디스크 기관을 위치시켜 절단을 수행하였다. 또한 복

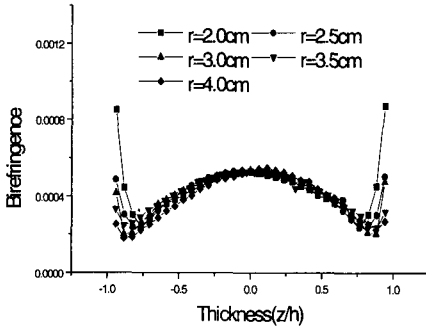


Fig 4 Gapwise distribution of birefringence under zero packing pressure without compression.

굴절의 측정시 절삭면에서의 거친 표면조도의 영향을 최소화 하기 위해 1 $\mu$ m 현탁액용 다이아몬드 분말 용액을 연마제로 이용한 1차 폴리싱과 0.3 $\mu$ m 알루미나를 이용한 2차 폴리싱을 수행하였다.

마지막으로 편광현미경을 이용하여 extinction angle과 복굴절을 반지름 방향으로 5부분 (r=2.0cm, r=2.5cm, r=3.0cm, r=3.5cm, r=4.0cm)에 대해 측정하였다. 두께방향의 복굴절 분포를 측정하기 위해 시편을 두께방향으로 35등분 하였고 양 끝 경계에 대해서는 폴리싱과정에서의 손실부분이 포함되어 있어 각 시편에 따라 33에서 35등분으로 약간의 차이가 있게 된다.

### 2.3 측정결과 및 토의

#### 2.3.1 보압과 압축공정이 없는 단순사출성형에서의 복굴절 분포

보압과 압축공정이 없는 사출성형에 의해 성형된 디스크 기관에서 절단된 시편으로부터 측정된 복굴절의 분포를 Fig. 4에 나타내었다. 그 결과 벽면에서 최대치를 보이며 중심부는 가운데가 위쪽 방향으로 볼록한 형상을 보이는 데 중심에서 볼록한 형상을 보이는 것은 유동의 속도가 중심에 가까울수록 증가하는 양이 높아지기 때문이다. 실험측정에 의한 복굴절 분포의 최소 값은 무차원화 시킨 두께의  $\pm 0.7$ 부근에서 나타나며 반지름방향으로는 대체적으로 중심에서 가까운

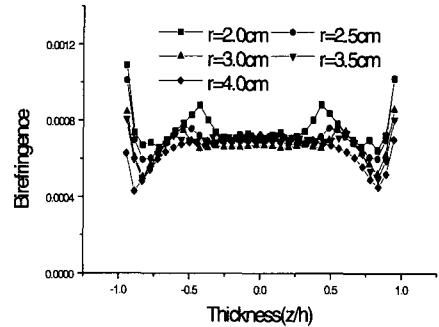


Fig. 5 Gapwise distribution of birefringence for packing pressure of 20.6MPa.

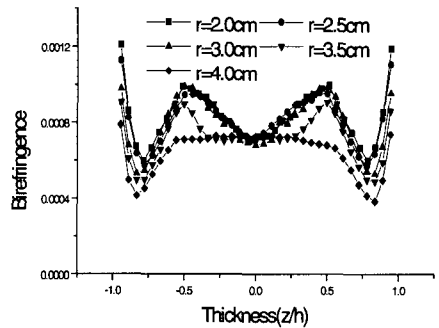


Fig. 6 Gapwise distribution of birefringence for packing pressure of 41.2MPa.

방향일수록 높은 값을 보여주고 있다. 복굴절 값의 분포가 두께방향의 중심에서 비교적 낮은 값을 보이는 것은 성형품이 냉각과정을 끝내고 굳어 있는 동안 내부의 응력완화가 일어나기 때문으로 분석되며 벽면에서 여전히 높게 남아 있는 것은 응력완화가 일어나더라도 벽면에서는 냉각이 가장 먼저 일어나게 되어 응력완화의 효과가 매우 적어 전단응력이 여전히 남아있을 뿐만 아니라 분수유동 효과의 영향이 작용하기 때문이다. 또한 반지름 방향에 대해서는 가장자리에 비해 중심에서 크게 나타났는데 이것은 유동의 속도가 중심에서 가장 빠르고 속도 구배 역시 가장 심하기 때문으로 분석된다.

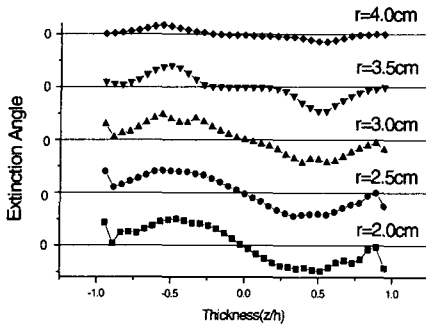


Fig. 7 Gapwise distribution of extinction angle for packing pressure of 41.2MPa.

2.3.2 보압공정 및 압축공정이 복굴절 분포에 미치는 영향

보압공정이 디스크의 복굴절 분포에 미치는 영향을 규명하기 위해 단순사출에서의 공정조건을 고정시키고 보압만을 20.6MPa, 41.2MPa로 가하면서 동일한 실험을 반복하였고 두께방향의 복굴절 분포는 Fig. 5 및 Fig. 6에 각각 나타내었다. 단순사출을 통해 얻어진 디스크에 나타난 복굴절 분포와 보압이 가해진 디스크의 복굴절 분포와의 차이점이 중심과 벽면사이(무차원 두께의 ± 0.5 부분)에서 발견된다. 전체적으로 두께방향에 대해 ± 0.5부근에서의 복굴절 값이 상승했다. 보압과정에서 나타난 용융수지의 2차 유동에 따른 폴리카보네이트의 오리엔테이션 정도가 상승하기 때문이며 벽면은 이미 냉각이 이루어져 보압의 영향을 적게 받으므로 보압에 따른 복굴절 상승은 보여지지 않는다. 보압 역시 사출압력과 마찬가지로 중심에서 그 영향이 크게 나타나기 때문에 보압에 의해 복굴절 값이 상승되는 효과도 중심에서 가장 가까운 r=2.0cm에서 가장 크게 나타났다. Fig. 7은 보압을 41.2MPa로 설정하여 제작한 광디스크 기관 내부의 extinction angle 분포이다. 이는 중심을 기준으로 점대칭적인 분포를 나타내었고 반지름 방향의 모든 부분에서 상승과 하강하는 경향이 동일하였다. extinction angle이 전체적으로 같은 경향을 나타낸 것은 반지름 반향 모든 위치에서 유동의 방향이 서로 일치하기 때문이다. 그리고 그 절대값이 변화하는 경향은 복굴절 값 크기가 변화하는 경향과 거의 일치하였다.

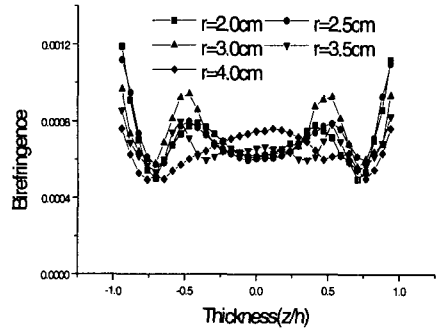


Fig. 8 Gapwise distribution of birefringence for compression pressure of 41.2MPa.

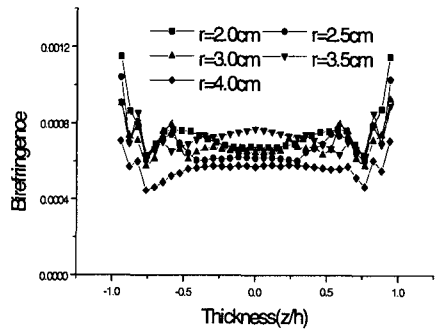


Fig. 9 Gapwise distribution of birefringence for compression pressure of 82.4MPa.

압축공정이 복굴절 분포에 미치는 영향을 규명하기 위해 압축을 각각 41.2MPa, 82.4MPa로 가하여 성형한 디스크의 내부 복굴절 분포를 각각 Fig. 8 및 Fig. 9에 나타내었다. 이 그래프에서 보듯이 압축공정이 가해진 성형품에서도 압축에 의한 유동이 발생하기 때문에 복굴절 값 상승이 나타났는데 보압을 가했을 때와 비교하여서는 반지름방향으로 보다 더 균일한 분포를 나타냈다. 이는 압축공정시에 나타나는 유동의 속도 분포가 사출이나 보압과정시에 나타나는 속도 분포와는 반대로 반지름 방향 중심에서 가장 작게 증가하고 끝부분에서 가장 많이 증가하여 반지름방향 중심과 끝에서 나타나는 수치 유동의 속도 구배 차이가 감소하기 때문이며 이와 같은 속도 증가의 경향은 반지름방향 끝부분에서 수치유동방향의 역전을 일으킨다. 역전된 유동의 영향은

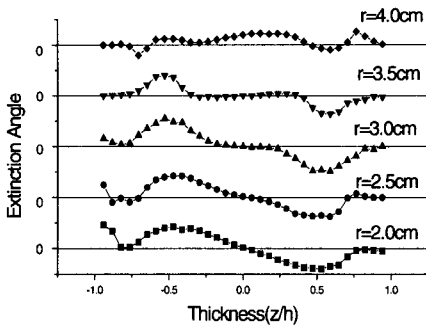


Fig. 10 Gapwise distribution of extinction angle for compression pressure of 41.2MPa.

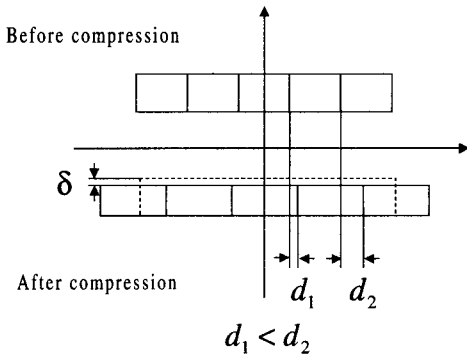
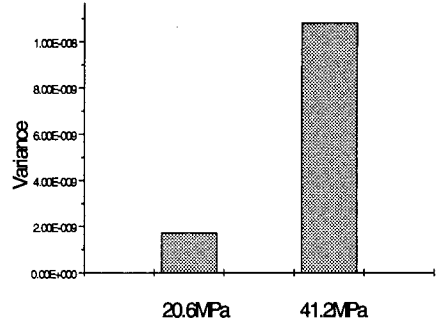


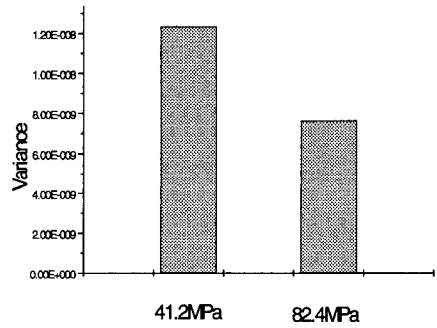
Fig. 11 Effect of the compression on the resin velocity.

r=3.0cm, r=3.5cm에서 또는 그 안쪽인 r=2.0cm까지 영향을 받아 정상적인 유동의 방향과 서로 상쇄되어 복굴절 값이 떨어지는 결과를 가져오기도 한다. Fig. 10은 압축을 41.2MPa로 가한 성형품 내부의 extinction angle분포이며 보압을 41.2MPa로 설정한 경우인 Fig. 7과 비교해 보면 r=4.0cm에서 유동의 방향이 사출이나 보압공정에 따른 방향과 반대방향으로 나타나는 부분이 발생함을 알 수 있다. Fig. 11은 압축공정시 유동속도의 증가가 반지름 방향 가장자리에서 가장 큰 현상을 모형화하여 나타낸 것이다.

보압공정과 압축공정이 반지름방향의 복굴절 분포에 미치는 규명하기 위해 2차 유동의 영향으로 2차 정점이 발생했을 때 그 지점에서의 반지름 방향에 대한 복굴절 분포의 분산 값을 보압과 압축의 경우에 대하여 Fig. 12에 각각 나타내었



(a)



(b)

Fig. 12 Variance of the second peak values in the radial direction obtained from the birefringence measurements for (a) different packing pressure (b) different compression pressure.

다. 분산 값이 크다는 것은 복굴절의 평균값이 같더라도 반지름 방향 안쪽(r=2.0cm)과 바깥쪽(r=4.0cm)에서의 복굴절 값의 차이가 크다는 것을 의미하며 보압이 증가하는 경우 그 분산값이 Fig. 12 (a)에서 처럼 현저하게 증가하지만 압축압력이 증가하는 경우는 Fig. 12 (b)에서 보듯이 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 압축 공정이 반지름 방향에 대해 보다 더 균일한 영향을 미치고 있음을 나타낸다.

또한 압축공정시의 캐비티 내부 초기 두께는 코어가 압축되어 이동하는 거리 만큼 더 두껍기 때문에 사출이나 보압과정에 나타나는 수치유동의 속도가 캐비티 내부에서 감소하며 두께방향

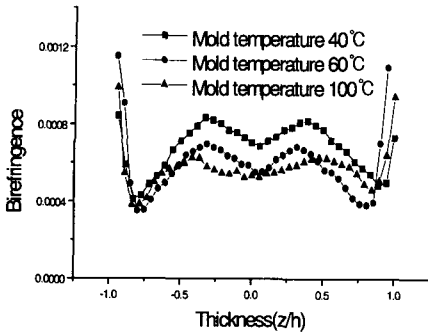


Fig. 13 Gapwise distribution of birefringence for the different mold temperature and the packing pressure of 41.2MPa( $r=2.0\text{cm}$ ).

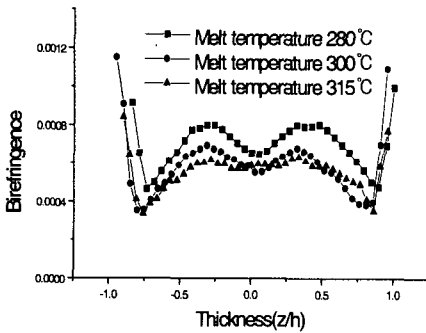


Fig. 14 Gapwise distribution of birefringence for the different melt temperature and the packing pressure of 41.2MPa( $r=2.0\text{cm}$ ).

의 속도차이도 역시 감소하여 사출압축성형에서는 복굴절 값이 감소하게 되며 압축공정이 가해지는 성형품의 경우 사출압력 자체를 작게 설정할 수 있기 때문에 위와같은 영향을 고려하지 않아도 유동배향과 성형품 내부의 불균일한 압력분포를 어느정도 완화시킬 수 있게 된다. 압축공정시에 발생하는 수치유동의 속도 증가는 전단 응력을 증가시켜 복굴절 값이 상승될 수 있는 요인을 제공하지만 초기 사출시의 속도 감소량에 비해 이러한 효과가 작기 때문에 사출압축성형시의 복굴절 분포는 일반 사출성형시의 복굴절 분포에 비해 그 값이 작아지게 된다.

2.3.3 금형온도 및 용융수지온도가 복굴절 분포에 미치는 영향

Fig. 13은 금형온도를 각각 40°C, 60°C, 100°C로 설정하여 가공한 디스크 내부의 복굴절 분포이다.  $r=2.0\text{cm}$ 인 부분의 복굴절에 대해서만 비교를 한 것은 디스크의 반지름 방향 가장 안쪽에서 보압에 의해 나타나는 2차 정점이 가장 높게 나타나기 때문이다. 여기서 보여지듯 금형온도의 상승은 전체적으로 복굴절 값을 감소시키는 데 기여한다. 또한 보압에 따른 2차 정점이 벽면쪽으로 이동함을 볼 수 있다. 이는 금형온도가 높아져 냉각속도가 감소하기 때문에 벽면근처에서 보압에 의한 영향이 증가하기 때문이다. Fig. 14는 용융수지 온도를 각각 280°C, 300°C, 315°C로 설정하여 가공된 디스크 내부의 복굴절 분포이고 역시  $r=2.0\text{cm}$ 부분의 값만 나타내었다. 금형온도의 영향과 마찬가지로 용융수지온도의 증가는 복굴절 값을 감소시키는데 기여함을 알 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 사출성형/사출압축성형에 의해 가공된 폴리카보네이트 광디스크 기관 내부에 발생하는 복굴절을 측정하여 각 공정조건이 복굴절 분포에 미치는 영향을 실험적으로 규명하였다.

보압과 압축공정이 없는 단순사출성형공정에 의해 나타나는 복굴절 분포는 벽면에서 높은 값을 나타내고 안쪽에서는 전체적으로 낮은 값을 나타내었다. 이처럼 벽면에서 복굴절 값이 높게 나타나는 것은 용융수지의 유동에 따른 분수 효과의 영향이며 냉각속도가 빠르기 때문에, 전단 응력의 응력완화가 적게 나타나기 때문이다. 또한 유동의 속도가 가장 빠른 반지름 방향 안쪽에서 가장 높은 값을 보이고 바깥쪽에서 가장 낮은 값을 보였다. 보압은 용융수지의 2차 유동을 발생시켜 복굴절 값을 증가시키는데 이 영향은 냉각이 빠른 벽면에서는 거의 나타나지 않고 무차원화 시킨 두께의  $\pm 0.5$ 부근에서 나타나 2차 정점을 발생시켰으며 보압이 증가함에 따라 그 값이 증가하였다. 사출압축공정시 가해지는 압축은 복굴절을 증가시키는 영향을 미치기도 하지만 캐비티 전면에서 고른 압력을 가해주게 되므로 압축에 따른 용융수지의 유동속도는 사출공정과 보압공정과는 반대로 반지름 방향 안쪽에서 바깥쪽으

로 갈수록 증가하여 보압에 비해 전체적으로 균일한 복굴절의 분포를 갖게 하였다. 금형온도와 용융수지온도가 증가할 수록 복굴절은 감소하며 금형온도가 증가할 수록 냉각속도가 감소함에 따라 보압에 따른 2차 정점의 위치가 점차 벽면으로 이동하였다. 이상의 결과를 토대로 금형벽면 온도의 능동제어를 위한 해석 및 실험적 연구가 진행중이다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단지정 정보저장기기연구센터의 지원(과제번호 : 1999G0102 )을 받아 이루어졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다. 또한 실험에 도움을 주신 단국대학교 기계공학과 윤경환 교수님께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Hecht, E., 1987, *Optics*, Addison-Wesley Publishing Company.
- (2) Santhanam, N., 1992, "Analysis of Residual Stresses and Post-Molding Deformation in Injection-Molded Components," Ph. D. Dissertation, Cornell University, Ithaca, New York.
- (3) Santhanam, N. and Wang, K. K., 1990, "A Theoretical and Experimental Investigation of Warpage in Injection Molding," *SPE ANTEC Technical Papers*, Vol. 36, pp. 270~273.
- (4) Jansen, K. M. B. and Flaman, A. A. M., 1994, "Construction of Fast-Response Heating Elements for Injection Molding Applications," *Polym. Eng. and Sci.*, Vol. 34, No. 11, pp. 894~897.
- (5) Jansen, K. M. B., 1995, "Heat Transfer in Injection Moulding Systems with Insulation Layers and Heating Elements," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 38, No. 2, pp. 309~316.
- (6) Greener, J., Kesel, R. and Contestable, B. A., 1989, "The Birefringence Problem in Optical Disk Substrates: A Modeling Approach," *AIChE Journal*, Vol. 35, No. 3, pp. 449~458.
- (7) Isayev, A. I. and Hieber, C. A., 1980, "Toward a Viscoelastic Modeling of the Injection Molding of Polymers," *Rheol. Acta*, Vol. 19, pp. 168~182.
- (8) Shyu, G., 1993, "Birefringence and Residual Stresses in Molded Articles of Amorphous Polymers," Ph. D. Thesis, The University of Akron, Ohio, USA.
- (9) Wu, J. and White, J. L., 1991, "Study of Birefringence Character of Injection and Compression-Molded Polycarbonate and Its Interpretation," *Polym. Eng. and Sci.* Vol. 31, No. 9, pp. 652~660.