

형체압축성형을 이용한 도광판의 복굴절 저감효과에 관한 실험적 연구

민인기^{1,2}, 김종선¹, 고영배¹, 박형필¹, 윤경환², 황철진^{1,#}

An Experimental Study on the Reduction of a Birefringence Distribution in LGP by Injection-Press Molding

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

Abstract

The residual birefringence in molded plastic parts can be divided into two kinds of residual birefringence, i.e., the flow induced residual birefringence produced in flowing stages and the thermally induced residual birefringence produced in cooling stage. In this paper, the effect of new injection-press molding process with normal injection mold, i.e. i) injection-compression mode, ii) injection-press mode, on the distribution of birefringence was studied. It was found that the values of the birefringence was reduced at i) low clamping force and ii) longer mold opening length by injection-press molding.

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

1. 서론

휴대폰 BLU의 기본 구조는 광원 역할을 하는 LED와 액정 패널에 점 광원을 면 광원으로 바꾸주는 도광판(Light Guide Plate, LGP) 그리고, 도광판에 의해 만들어진 면 광의 휘도 및 시야 각을 조절해주는 휘도조절필름들로 구성되어 있다. 도광판의 경우 대부분 사출성형에 의해 만들어 지고 있다. 하지만 사출성형 공정과 고분자 물질의 특성상 최종 제품에 남는 광학적 이방성, 즉, 잔류 복굴절의 분포는 피할 수 없다. 이러한 도광판 내부에 남는 복굴절의 분포는 광학 설계 단계에서는 예측하지 못하는 결과들을 초래하게 된다. 그래서 품질이 우수한 도광판을 생산하기 위해서

도광판 내부의 잔류 복굴절(birefringence)의 양을 줄이려는 연구가 활발히 진행 중이다.

도광판 전체에 분포하는 복굴절의 양을 줄이는 방법은 수지가 정해져 있는 경우 크게 두 가지 방법이 있다. 하나는 냉각수의 유로 조절 등의 금형 구조 개선을 통한 방법이고 다른 하나는 성형조건을 개선하여 광로 상의 복굴절의 양을 줄이는 것이다[1]. 사출성형 후 도광판에 존재하는 복굴절의 양은 기판에 입사된 광이 투과 또는 반사 시 일어나는 편광 상태의 변화를 측정하여 알아 보았다. 본 논문에서는 위의 사항들을 고려하여 일반 2 인치 휴대폰용 도광판금형과 형체압축성형이 가능한 LS전선의 사출 성형기를 사용하여 성형한 도광판의 복굴절 분포에 미치는 영향을 밝히고자 하는데 목표를 두었다.

1. 한국생산기술연구원 정밀금형팀 (KITECH)

2. 단국대학교 기계공학과

#. 한국생산기술연구원, cjhwang@kitech.re.kr

2. 사출성형 및 형체압축 성형

2.1 사출성형

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. 사출성형에는 크게 일반 사출성형(*general injection molding*)과 여기에 압축방식을 추가한 사출/압축성형(*injection-compression molding*)으로 나눌 수 있다. 사출/압축성형은 코어압축성형(*core-compression molding*)과 형체압축 성형(*injection-press molding*)으로 나뉘며 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 사출 압력과 사출속도 및 보압을 필요로 하며 결과적으로 높은 형체력을 요구한다. 한편 사출성형에 의해 생성되는 복굴절은 크게 용융수지가 흘러 들어갈 동안 생성되는 유동에 의한 복굴절(*flow-induced birefringence*), 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 받는다. 이 영향에 대한 대책으로는 제품의 두께를 균일하게 한다거나 금형내의 냉각수 유로조절 등 금형의 구조개선을 통하여 해결할 수 있다. 유동에 의한 복굴절은 금형 벽면에 인접하여 높은 전단 응력과 빠른 냉각속도의 복합적인 원인으로 고화된 층에 의해 발생한다. 이를 줄일 수 있는 방법으로는 높은 수지온도 및 금형온도 등 수지의 유동을 좋게 하여 해결하거나 긴 충전시간 낮은 사출속도, 낮은 보압력, 짧은 유동길이 등을 통하여 해결할 수 있다. 이번 실험에서 주안점을 둔 형체압축성형은 바로 이 유동에 의한 잔류응력을 줄이기 위함이다. 형체압축성형은 사출 후 충전된 수지를 금형 전체에 압력을 가하여 유동의 배

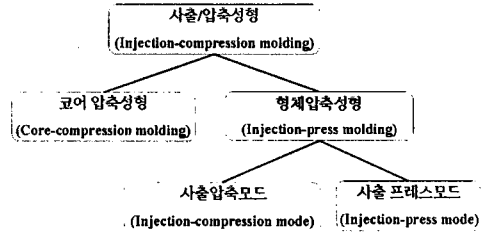


Fig. 1 Classification of injection-compression molding.

향을 완화시키고 잔류복굴절의 분포도 균일하게 하며 전체 양을 줄일 수 있으며 금형을 열어놓거나 낮은 형체력을 유지하는 상태에서 사출을 하기 때문에 사출과정에서 발생하는 잔류 복굴절의 양을 저감시킬 수 있다. 결과적으로, 유압장치에서 발생하는 최대 사출압을 낮추어 결과적으로 낮은 형체력으로도 성형이 가능한 장점이 있다 [1,3,4,5].

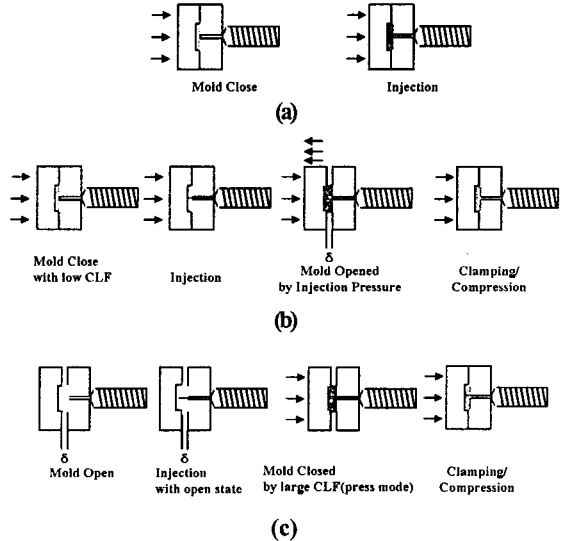


Fig. 2 Molding schematics of (a) General injection molding system, (b) Injection-compression mode, (c) Injection press-mode.

2.2 형체압축 성형

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

Fig. 2(c)에서 설명하고 있는 성형방법은 사출 프레스 모드(*injection-press mode*)이다. 이 경우에는

사출 압축모드와는 달리 초기 설정치(δ) 만큼 금형을 열어놓았다가 사출이 완료되면서 금형을 닫는 것이다[6].

일반 사출성형 방법과는 달리 형체 압축방식은 초기에 금형을 개방해 놓는다거나 적은 형체력을 유지하고 있으므로 일반 사출성형에서 금형 캐비티 내에 수지를 충전시킬 때 보다 최대 형체력을 낮출 수 있기 때문에 적은 형체력으로도 사출성형이 가능하며 결과적으로 복굴절의 저감효과를 얻을 수 있다.

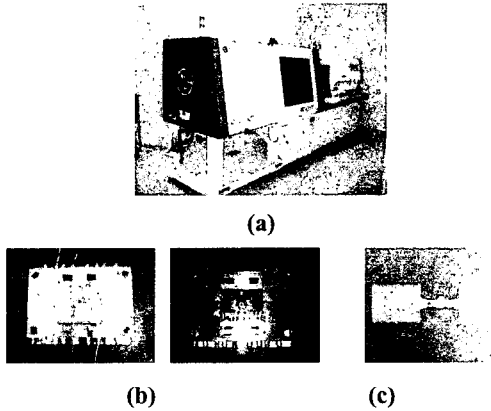


Fig. 4 (a) Injection molding machine LGE-110D (b) injection mold (2", 2 cavity) (c) injection molded LGP.

본 논문에서는 Fig. 4(a)처럼 LS 전선의 LGE-110D 모델의 형체압축 성형기를 이용하였고, Fig. 4(b)의 2 캐비티(2 cavity)의 2 인치 휴대폰용 금형을 사용하였으며, Fig. 4(c)에 본 사출기와 금형을 사용하여 만든 도광판을 도시화 하였다. LS 전선의 LGE-110D 사출기를 사용하여 Fig. 1 과 같이 2 가지 방식(사출 압축모드, 사출 프레스 모드)으로 형체압축실험을 할 수 있었다.

3. 복굴절 및 광탄성 이론

3.1 복굴절

분자의 구조가 등방성 물질이라도 응력을 받으면 광학적 이방성을 가지게 되며 Fig. 5 에서 보는 바와 같이 횡 파인 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 각

각 굴절률에 관한 주축이라 하며 직선 편광된 빛이 광학적 이방성인 물체를 통과할 때 fast axis 와 slow axis 로 성분이 분리되면 두 파형 사이에는 경로 차 또는 위상 차가 생긴다. 이러한 속도 차에 의해 발생하는 두께 d 를 통과하는 사이의 거리 경로차, D_f 는 다음의 식 (1)로 계산할 수 있다.

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

여기에서 t 는 매질 통과 시간, v 는 매질 통과 속도, c 는 진공 또는 공기중의 광속, n_s, n_f 는 각각 slow axis 와 fast axis 의 굴절률이며 그 차이를 통상 복굴절의 값이라 부른다[7].

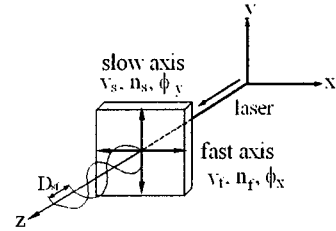


Fig. 5 A linear polarized light and path difference passing an anisotropic substance.

3.2 광탄성 이론

1816 년 David Brewster 는 투과성이 있는 등방성 물질이라도 응력을 가하면 광학적으로 이방성을 띠게 된다는 것을 발견하였다. 이러한 현상을 광탄성(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 횡파가 물질을 통과할 때의 굴절률이며 C는 광탄성계수(stress - optical coefficient)이다. 본 실험에서 사용한 PMMA의 경우 광탄성 계수는 약 $-5Br$ ($1Br = 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$) 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].

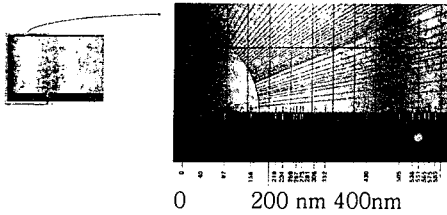


Fig. 6 Levy's interference chart.

4. 복굴절 측정장치 및 실험조건

4.1 측정장치의 구성

본 논문에 사용한 복굴절 측정 시스템은 기본적으로 Fig. 7과 같은 원편광 시스템을 사용하고 있으며, 측정에 사용된 시스템은 Fig. 8에 나타난 바와 같다. 시스템의 구성은 Edmund Industrial Optic사의 편광 필름 2장, 1/4 파장판 2장, 그리고, LED 평면 광원, 그리고 복굴절 이미지의 촬영을 위하여 Canon사의 300D 디지털 카메라, 마지막으로 CANON EF 180 mm f/3.5L Macro USM 렌즈를 사용하였다[7].

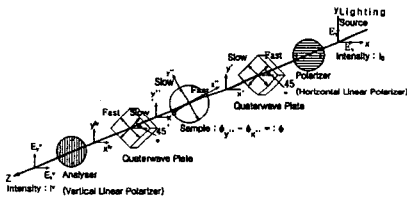


Fig. 7 Optical setup for birefringence measurement.



Fig. 8 Birefringence measurement system by CCD camera.

4.2 실험조건

이번 실험에서 사용한 LS 전선 LGE-110D 모델은 최대 형체력이 110 ton 이며 금형영점조정 시 최대형체력을 조절할 수 있다. 본 연구에서는 최대 형체력을 80 ton 으로 설정하여 실험하였다. 수지는 SUMITOMO 社の PMMA(grade : MGSS)를 사용하였고 수지온도는 230℃ 이며 금형온도는 55℃로 설정하였다. 실험은 일반 단순사출(general

injection molding)과 사출 압축모드(injection-compression mode), 사출 프레스 모드(injection-press mode) 이렇게 세 가지의 실험을 하였으며 초기 형체력 및 형개 거리를 조절해가면서 실험을 하였다.

4.2.1 형체압축성형: 사출압축모드

Fig. 9에서는 일반 사출조건과 사출압축모드(injection-compression mode)의 결과를 비교하였다. 각각의 그림에서의 수치들은 초기 형체력 값이다. Fig. 9(a)의 경우는 일반 사출성형의 조건으로 형체력을 일정하게 80 ton으로 유지하면서 성형한 것이고 Fig. 9(b), (c), (d)는 사출압축모드(injection-compression mode)로 수지가 캐비티 안으로 충전될 때 금형이 뒤로 밀린 후 두 번째로 설정된 값 75 ton의 형체력이 가해지는 경우이다. 형체력 조건은 Table 1과 같다.

Table 1 Conditions of injection-compression mode.

	1 st clamping force	2 nd clamping force
General injection molding	80 ton	80 ton
Injection-compression mode	75 ton	75 ton
	55 ton	
	35 ton	

4.2.2 형체압축성형: 사출프레스모드

Fig. 10에서는 일반 사출조건과 사출 프레스 모드(injection-press mode)를 비교하였으며 각 그림에서의 수치들은 초기 형개거리 값이다. Fig. 10(a)는 일반 단순 사출성형의 조건으로 형개거리를 0 mm로 설정한 상태에서 형개거리 변화 없이 사출한 것이고 Fig. 10(b), (c), (d)는 사출프레스 모드(injection-press mode)로 사이클이 시작되면 초기 형개거리만큼 형폐가 진행되고 수지가 캐비티 내로 유동하면서 두 번째로 설정된 형개거리 값 0.01 mm로 형폐가 이루어져 충전이 완료되면 형개거리가 0 mm로 되는 형태이다. 형개거리 조건은 Table 2와 같다.

Table 2 Conditions of injection-press mode.

	1 st mold opening length	2 nd mold opening length
General injection molding	0 mm	0 mm
Injection-press mode	0.10 mm	0.01 mm
	0.13 mm	
	0.17 mm	

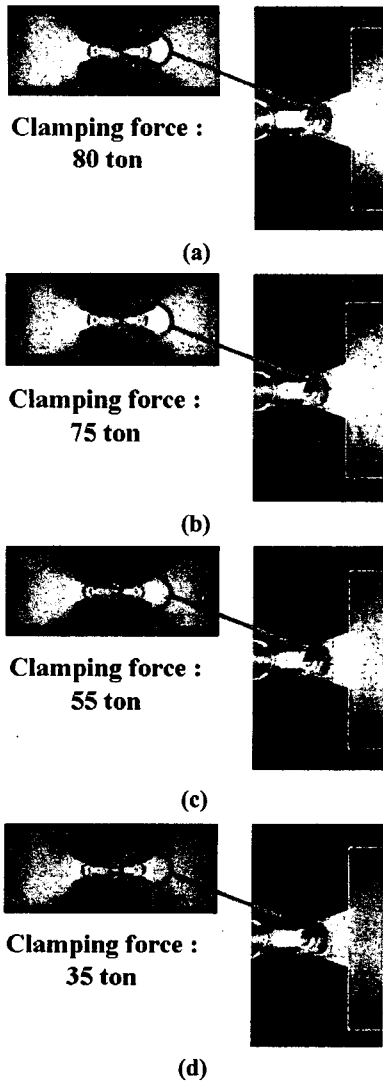


Fig. 9 General injection molding and injection-compression mode with clamping force (a) 80 ton (general injection molding), (b) 75 ton, (c) 55 ton, and (d) 35 ton.

5. 결과 및 토의

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

Fig. 9는 일반 단순사출과 사출압축모드(injection-compression mode)의 결과이다. Fig. 9(a)에서는 일반 단순 사출성형의 결과로 Fig. 6의 Levy's chart를 참고하여 경로차를 계산해 보면 대략 380~400 nm 근처이다. 이는 형체력을 조절하지 않고 80 ton으

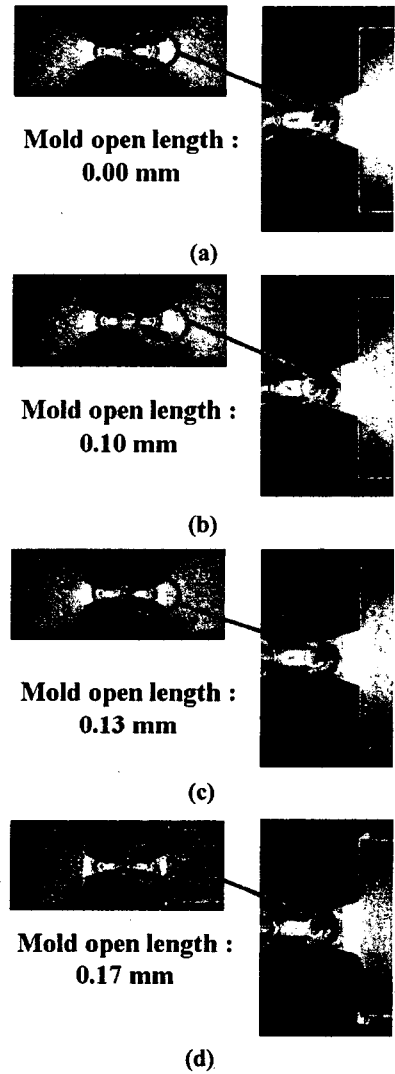


Fig. 10 General injection molding and injection-compression mode with (a) 0.00mm (general injection molding), (b) 0.10mm, (c) 0.13mm, and (d) 0.17mm.

로 일정하게 유지하고 있으므로 그만큼 높은 사출압력을 요구하므로 유동에 의한 복굴절이 많이 발생한다. Fig. 9(b)는 초기 형체력 및 두 번째 형체력 모두 75 ton이며 이는 경로차가 Fig. 9(a)보다 약간 감소하지만 여전히 400 nm 근처이다. Fig. 9(c)는 초기형체력을 55 ton으로 한 결과이고 경로차는 조금 감소하여 약 310~320 nm이다. 두 번째 형체력은 75 ton으로 고정하고, 초기형체력을 조금씩 줄이면서 성형한 결과 복굴절은 감소함을 알 수 있고 Fig. 9(d)에서 초기형체력을 35 ton으로 설정

하였을 때 경로차가 150~160 nm로 현저히 감소한 것을 알 수 있다. 초기 형체력이 75 ton 일 때 복굴절의 값은 그다지 줄지 않았지만 설정 값을 55 ton부터 35 ton으로 줄일수록 복굴절이 감소하기 시작하는데 이 의미는 사출압력이 형체력보다 작은 경우에는 형체력을 유지하지만 사출압력이 형체력보다 클 경우에는 형 열림으로 인해 캐비티가 상대적으로 커져 사출압력이 낮아지고 캐비티면과 중심 사이의 유동속도차이가 감소해 전단력이 작아져 복굴절이 감소하는 것이다.

Fig. 10는 일반 단순 사출성형 및 사출 프레스 모드(injection-press mode)로 성형한 결과이다. Fig. 10(a)은 일반 단순 사출 성형의 결과로 형개거리를 0 mm로 설정하고 성형하였으며 경로차는 약 380~400 nm이다. Fig. 10(b)의 초기 형개거리 값은 0.10 mm, 두 번째 형개거리 값은 0.01 mm이며 경로차는 380 nm근처로 Fig. 10(a)와 비교해볼 때 복굴절 값은 그다지 감소하지 않았다. Fig. 10(c)에서는 초기 형개거리를 0.13 mm로 설정하였고 경로차는 약 330 nm로 나타났으며 Fig. 10(d)는 초기 형개거리를 0.17 mm로 하였으며 경로차는 대략 200~220 nm정도이다. Fig.10 (a), (d)를 비교해보면 초기 형개거리를 크게 할수록 복굴절이 감소하는데 이것은 수지가 캐비티 내로 유동하면서 금형이 열려있으므로 캐비티가 상대적으로 커진 상태에서 사출성형을 시작하는 것이기 때문에 수지의 유동이 쉬워 사출압력에 의한 복굴절이 적은 것이다. 이로써 형체압축을 이용하면 수지가 캐비티 내로 유동될 때 금형을 열어놓거나 낮은 형체력을 유지함으로써 적은 형체력으로 사출이 가능하며 성형 시 발생하는 잔류 복굴절의 양이 저감하였음을 정성적으로 알 수 있었다.

6. 결론

본 연구에서는 사출/압축성형 방법으로 핸드폰용 BLU의 도광판을 성형하여 게이트 부위의 잔류 복굴절을 측정하였다. 본 연구를 통하여 얻을 수 있었던 결론은 다음과 같다.

1) 사출/압축금형이 아닌 일반 금형으로도 형개거리 및 형체력을 조절하여 복굴절을 완화할 수 있음을 실험적으로 규명하였다.

2) 형체압축 성형을 이용함으로써 보다 적은 형체력으로도 도광판의 성형이 가능함을 실험적으로 보였다.

3) 형체압축 성형방법을 통하여 게이트 부위에서 발생하는 복굴절을 줄일 수 있음을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구에 기술적 후원을 도와주신 김범중님, 박상호님, 정성욱님, 김진영님 등 LS 전선 분들께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 권태헌, 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, 권태헌, 윤경환, 2002, 사출/압축 성형 Center-gated 디스크에서의 잔류응력과 복굴절의 수치해석 (II), 대한 기계학회 논문집 A 권, 제 26 권 제 11 호, pp. 2355~2363.
- [4] 김일환, 박성진, 정성택, 권태헌, 1998, Center-gated 디스크에 대한 사출/압축 성형공정의 수치적 모델링 (2), 대한 기계학회 논문집 A 권 제 22 권 제 2 호, pp. 302~310.
- [5] C. H. Wu and 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] LS전선 사출시스템사업부, 2003, LG 사출성형기 (LGE Series) 취급설명서, LS전선.
- [7] 김종선, 윤경환, 2003, 회전에 의한 플라스틱 기관에 야기되는 복굴절 측정에 관한 연구, 2003년도 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집 pp. 470~473.