

DVD-RAM 기판의 복굴절, Radial-tilt 및 전사성 향상을 위한 사출압축성형공정 최적화

이남석* · 성기병** · 강신일***

An Optimum Design of Replication Process to Improve Birefringence, Radial-tilt and Land-Groove Structure in DVD-RAM Substrates

Namseok Lee, Kibyoung Sung, Shinill Kang

Key Words : Injection Compression Molding(사출압축성형), DVD-RAM Substrate(DVD-RAM 기판), Birefringence(복굴절), Integrity of Replication(전사성), Radial Tilt, Design of Experiment(실험계획법), Optimum Design(최적설계)

Abstract

The objective of this study is to provide a simple methodology to find optimum processing conditions to fabricate sub-micron structured DVD-RAM substrates with superb optical and geometrical properties. It was found that the birefringence, which is regarded as one of the most important optical properties for an optical disk, was very sensitive to the mold wall temperature history. Also, the integrity of the replication, represented by the land-groove structure and the radial tilt were influenced by the mold temperature and the compression pressure. A set of optimum conditions were obtained by applying Design of Experiment and the objective functions composed of three different objectives.

1. 서론

CD, DVD 와 같은 고밀도의 광학식 정보 저장 기기의 응용이 증가함에 따라, 광 pick-up 레이저의 파장은 현재의 780nm 표준형에서 405nm 로 점점 짧아지고 있다. 또한 track pitch 는 현재의 0.74 μm 표준형보다 점점 좁아지고 있으며, 이로 인한 저장 밀도는 급속히 증가하고 있다. 이러한 마이크로 구조를 가지는 광디스크 기판 제조공정에는, 압축공정이 추가되어 있는, 사출 압축 성형이 단순 사출 성형보다, 많이 이용되고 있다 사출압축 성형공정에서의 압축공정은 적은 뒤틀림과 균일한 두께의 분포, 잔류 응력의 감소를 갖게 하는 장점이 있다.

사출압축성형 공정에서 발생하는 복굴절 현상은 디스크 기판의 광학적 특성을 좌우하는 중요한 인자가 된다. 복굴절은 광학식 정보저장 시스템에서 return beam 에 영향을 미치므로, 많은 문제점을 일으킬 수 있다[1]. 전통적인 사출성형방식에서, 복굴절은 금형온도와 보압압력에 매우 민감하게 반응한다[2]. 이러한 복굴절은 발생원인에 따라 두 가지 유형이 있다. 첫번째는 금형 캐버티 내에서의 폴리머 유동에 의해 발생하는 유동에 의한 복굴절이고, 두번째는 금형내 폴리머의 불균일한 냉각에 의해 발생하는 복굴절이다[3]. 실제 디스크 기판 성형시에는 위의 두가지 원인이 복합적으로 나타난다.

Radial tilt 는, 반경방향의 뒤틀림 현상으로, 반사광선의 왜곡을 가져올 수 있다[1,4]. Land-groove 구조는 DVD-RAM substrate 에 있어서 전기적 신호의 왜곡에 영향을 미치는, 중요한 기하학적 특성으로 간주된다[5,6].

본 연구에서, 금형온도와 압축압력이 폴리카보네이트 기판의 광학적, 기하학적 특성에 미치는

* 회원. 연세대학교 대학원 정보저장공학과

** 회원. 연세대학교 대학원 기계공학과

*** 회원. 연세대학교 기계. 전자공학부

영향을 실험적으로 규명하였다. 또한 최적공정 조건을 구하기 위한 방법론을 제시하였다. 이를 위해, 반응표면 실험계획법(Response Surface Method) 및 중심합성 계획법(Central Composite Design)을 응용하여 제한된 수의 실험 데이터들을 이용하여, 공정최적화를 위한 목적함수를 도출하였다. 또한, 분산분석법(Analysis-of-Variance)을 이용하여 반응표면의 타당성을 검증하였다.

2. 실험

2.1. 사출압축성형에 의한 DVD-RAM 기판 제조

본 연구에서는, 광디스크 기판의 일반적인 재료인, 광학 등급의 폴리카보네이트 (Lexan OQ 1020c-112) 를 이용하여, 120.0mm 지름과 0.6mm 두께의 디스크를 성형하였다.

본 연구에서 이용된, 사출압축성형기는 35 ton 의 형체력과 42 cm³ 의 최대 stroke 체적, 그리고 1690 kg/cm² 의 최대 사출압력을 가지고 있다. 수지 온도를 360°C 까지 올리기 위해, 실린더내의 온도 분포를 4 구역으로 나누었다. 스프루에서 가까운 구역으로부터, 각 구역의 온도 분포는 360°C, 380°C, 360°C, 300°C 가 되었다. 충전 시간과 보압은 각각 0.17sec 와 3~35kgf 가 기본값으로 주어졌다. 금형온도와 압축압력이 DVD-RAM 기판 특성에 미치는 영향을 관찰하기 위해, 압축압력 P_{comp} 에 변화를 주면서 관찰하였고, 충전후 8 초동안 이 압축압력을 적용하였다. 금형온도의 영향을 연구하기 위해 금형온도 T_{mold} 를 변화시켰다.

2.2. 복굴절 및 Radial tilt 측정

복굴절은 편광현미경을 이용하여 측정하였다. 또한, radial tilt 는 반사되어 돌아오는 광선의 반경 방향에서의 각도 편차를 이용하여 측정하였다[3].

2.3. Land-groove 구조 측정

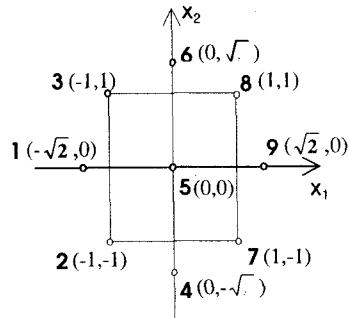
스텝퍼와 플라스틱 기판의 land-groove 구조를 측정하기 위해 AFM(Atomic Force Microscope)을 이용하였다. 측정지점의 위치는, 중심에서 반경 방향으로 25mm, 40mm, 55mm 지점이다. 측정점에 대하여, 실제로 AFM 에 의해 주사되어진, 면적은 5 μm × 5 μm 이다. 본 연구에서, groove 깊이가 기판의 전사성에 영향을 주는 주요인자로 선택되었다.

3. 중심합성 계획법을 이용한

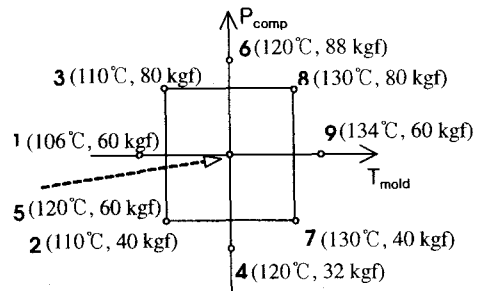
설계행렬의 구성

본 연구에서는, 사출압축 성형공정에서 고려해야 하는 중요한 공정 조건 중에서, 금형온도와 압축압력을 지배 공정 조건으로 선정하였다.

중심합성 계획법(CCD)은 실험의 횟수를 줄이기 위해서 쓰였다. 이 기법은 하나의 중심점과 네 개의 축점, 그리고 2k factorial design 으로 구성되며, 이는 2 차함수를 유도하는데 적합한 방법이다. 여기서, k 는 축의 수나, 입력 변수의 총 개수를 나타내는 값이다. 이 실험에서 k=2(금형온도와 압축압력)이며, 따라서 9 개의 공정조건 조합하에서 성형 및 측정이 반복된다.



(a) Sets of coded values



(b) Sets of actual values

Fig. 1 CCD comprised of the 2^k factorial design sets, four axial points sets, and one center point set

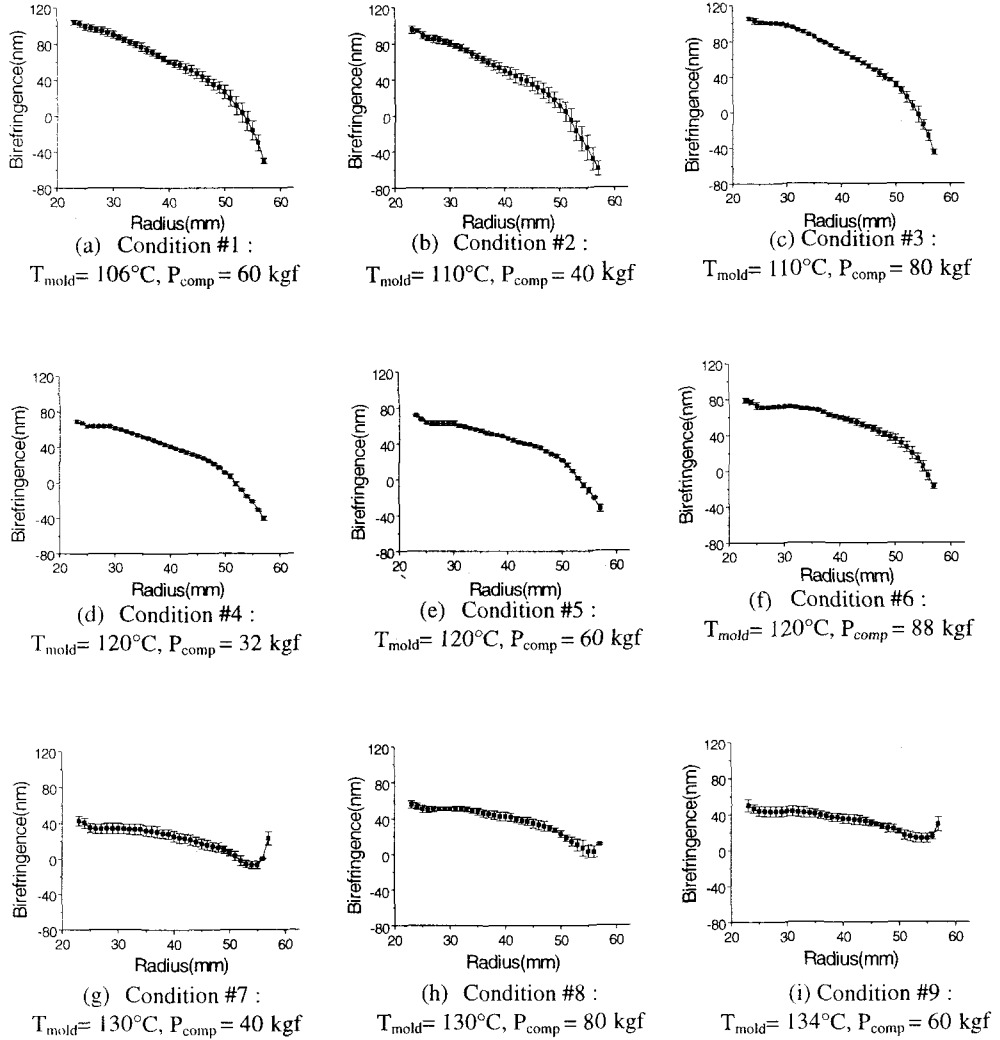


Fig. 2. Distribution of birefringence in the substrates molded with nine different sets of processing conditions.

금형온도에 대하여, 최대 최소값은 각각 $T_{mold,max} = 134^{\circ}C$, $T_{mold,min} = 106^{\circ}C$ 이고, 압축압력에 대하여는 각각 $P_{comp,max} = 88$ kgf, $P_{comp,min} = 32$ kgf. 이다. 실제 변수에 대한 선형 변환을 한, 결과값의 상한값은 +1.414 이고 하한값은 -1.414 이며 이 값은, $2^{k/4}$ 법칙을 따른 것이다. 9 개의 선형변환을 적용한 값은 Fig. 1(a)와 같고, 실험을 통한 실제 Data 값은 Fig. 1(b)와 같다.

본 연구에서 사용된, 입력변수에 관한 선형 변환식은 아래와 같다.

$$x_1 = \sqrt{2} \cdot \{2T_{mold} - (T_{mold,max} + T_{mold,min})\} / (T_{mold,max} - T_{mold,min}) \quad (1)$$

$$x_2 = \sqrt{2} \cdot \{2P_{comp} - (P_{comp,max} + P_{comp,min})\} / (P_{comp,max} - P_{comp,min}) \quad (2)$$

x_1 와 x_2 는 T_{mold} 및 P_{comp} 의 각각의 선형 변환 값이다. T_{mold} 는 $T_{mold,min}$ 와 $T_{mold,max}$ 사이에서 정의되어 지며, P_{comp} 는 $P_{comp,min}$ 와 $P_{comp,max}$ 사이에서 정의되어 진다. 반응표면을 구성하기 위해서, Fig. 1(b) 와 같은 9 개의 공정 조건의 조합하에서, 성형 실험 및 측정이 반복되었다.

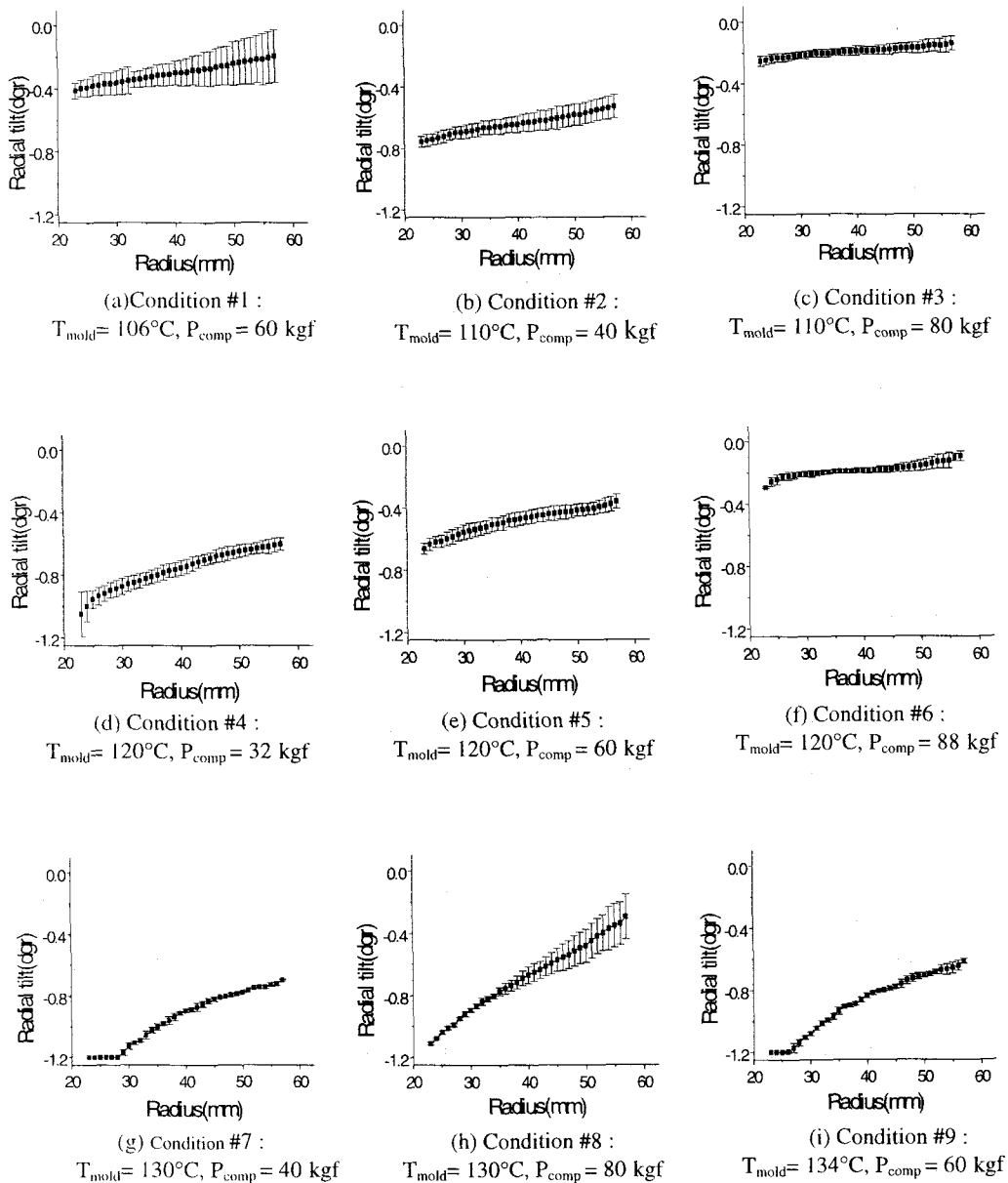


Fig. 3 Distributions of radial tilt in the substrates molded with 9 different sets of processing conditions

4. 실험 결과

4.1. 복굴절 및 Radial tilt

Fig. 2 과 Fig. 3 는 각각의 Fig. 1 의 각각의 설계 행렬에 의해서 조절된 디스크 기관의 복굴절과 Radial tilt 를 보여준다. 금형온도의 상승은 복굴절

값의 감소와 radial tilt 값의 증가를 가져온다. 압력이 증가할수록, 복굴절이 미세하게 증가하고[3], radial tilt 의 성능은 향상된다[8].

4.2. Land-groove 구조

Fig. 4 에서와 같이, 금형온도와 압축압력을 증가시키므로 전사성이 향상됨을 확인할 수 있다.

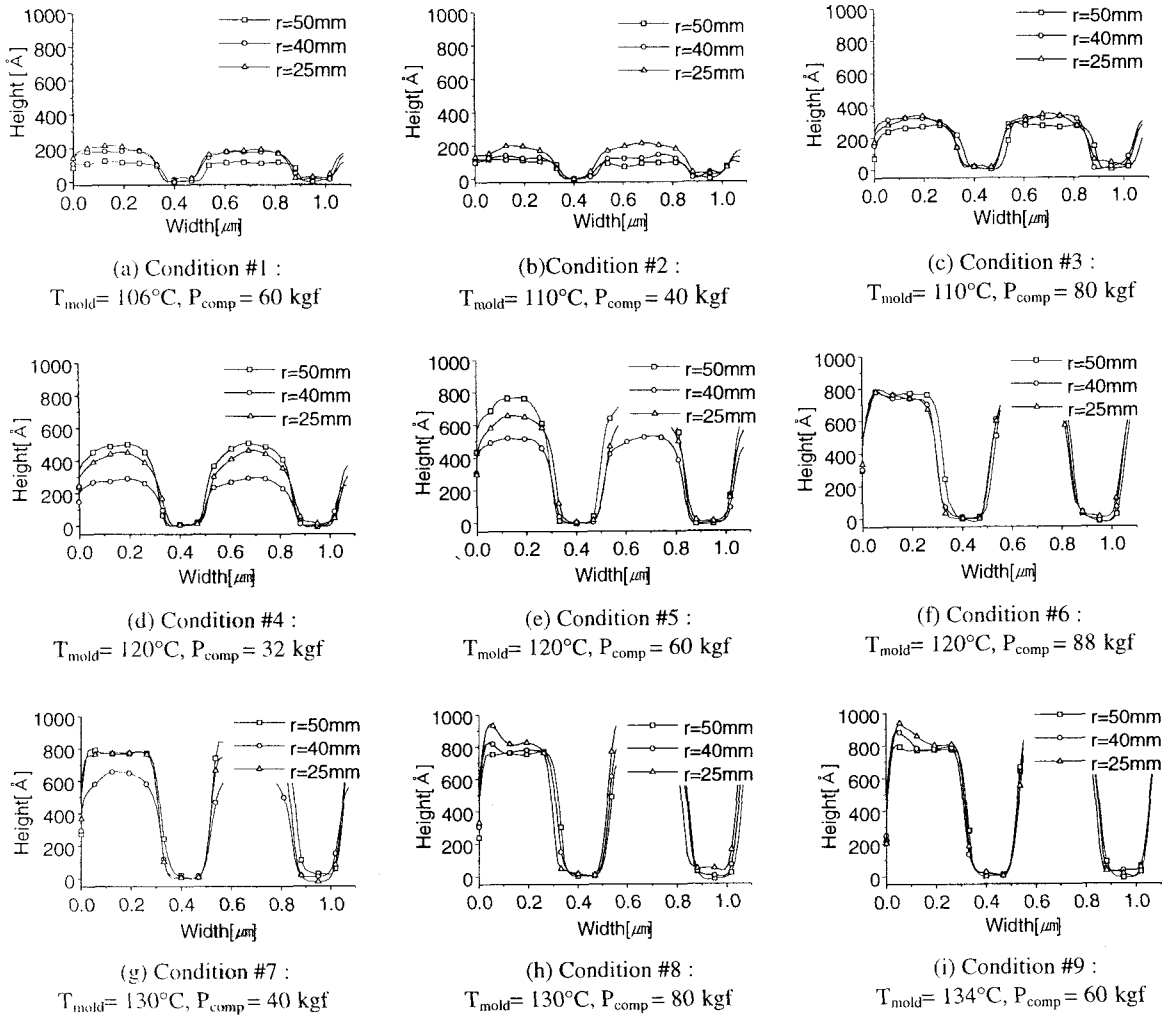


Fig. 4 Land-groove structures in the substrates molded with 9 different sets of processing conditions

5. 다중 목적 함수의 구성

5.1. 목적 함수의 구성

본 연구에서 사용되는 목적함수는, 기관과 스템퍼사이의 groove-depth 편차 f_1 , 복굴절 f_2 , radial tilt f_3 로 구성된다. 여기서 f_1, f_2, f_3 는 다음과 같이 정의된다.

$$f_1(x_1, x_2) = \|H_{\text{stam}} - h_{\text{sub}}(x_1, x_2)\|^2 \quad (3)$$

$$f_2(x_1, x_2) = \text{BRF}(x_1, x_2) \quad (4)$$

$$f_3(x_1, x_2) = \text{TLT}(x_1, x_2) \quad (5)$$

여기서, H_{stam} , h_{sub} , BRF, TLT 는 스템퍼의 groove 깊이, 기관의 groove 깊이, 복굴절, 그리고 radial tilt 를 각각 나타낸다. $h_{\text{sub}}(x_1, x_2)$, $\text{BRF}(x_1, x_2)$, $\text{Tilt}(x_1, x_2)$ 는 각각의 항들이 금형온도(x_1)와 압축 압력(x_2)의 선형 변환된 값들과 함수 관계를 나타냄을 보여준다. 여기에서, 각각의 항들은 서로 다른 특성과 값들을 가지므로, 아래(6)식에 의해 각각의 목적함수를 0 과 1 사이의 값을 갖는 무차원 함수로 변환해야 할 필요가 있다.

Table 1 Optimum sets of processing conditions for different weight values

#	Weight $\alpha_1 : \alpha_2 : \alpha_3$ (Hi : Bire: Skew)	R^2	Optimum coded values		Optimum real values	
			x_1	x_2	T_{mold} (°C)	P_{comp} (kgf)
1	0.1:0.5:0.4	0.87	0.32	0.59	123.2	71.8
2	0.2:0.4:0.4	0.90	0.20	0.87	122	77.4
3	0.3:0.3:0.3	0.92	0.37	0.67	123.7	73.4
4	0.4:0.3:0.3	0.93	0.42	0.61	124.2	72.2
5	0.5:0.3:0.2	0.95	0.65	0.30	126.5	66
6	0.6:0.2:0.2	0.95	0.55	0.48	125.5	69.6
7	0.7:0.2:0.1	0.95	0.59	0.43	125.9	68.6
8	0.8:0.1:0.1	0.96	0.63	0.40	126.3	68
9	0.1:0.1:0.8	0.97	-2.8	7.91	92	218.2
10	0.1:0.8:0.1	0.95	2.2	-1.58	142	28.4

$$f_i'(x_1, x_2) = \frac{f_i(x_1, x_2) - f_{i,min}}{f_{i,max} - f_{i,min}} \quad (6)$$

이를 이용하여 본 연구의 최적화 문제를 정식화 하면, (7)식을 만족하는 최적 공정조건 x_1^*, x_2^* 를 구하는 문제로 귀결된다.

$$f(x_1^*, x_2^*) \leq f(x_1, x_2) \quad (7)$$

이제에서

$$f(x_1, x_2) = \alpha_1 f_1' + \alpha_2 f_2' + \alpha_3 f_3', \quad \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1 \quad (8)$$

식 (8)에서 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 는 목적함수에서, 각각의 항들이 가지고 있는 상대적인 가중치를 나타내는 값이다. 목적함수는 중심합성 계획법에 의해 주어지는 설계행렬에 의해 구성된다. 식 (8)에 각 식들을 대입할 때, 아래와 같은 2 차 함수를 구하였다 [9].

$$f = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_1 x_2 + b_4 x_1^2 + b_5 x_2^2 \quad (9)$$

식(9)에서 상수, $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$ 는 최소자승법 (least-square method)에 의해 구하였다. 또한 식 (9)에 의해서 구해진 함수의 타당성은 분산분석법 (ANOVA)에 의해 검증하였다.

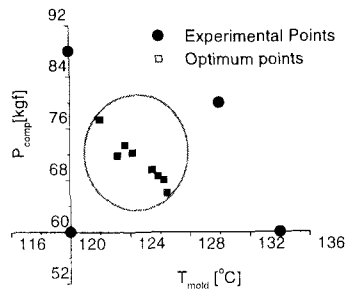


Fig. 5 Optimum sets of processing conditions with different weight values.

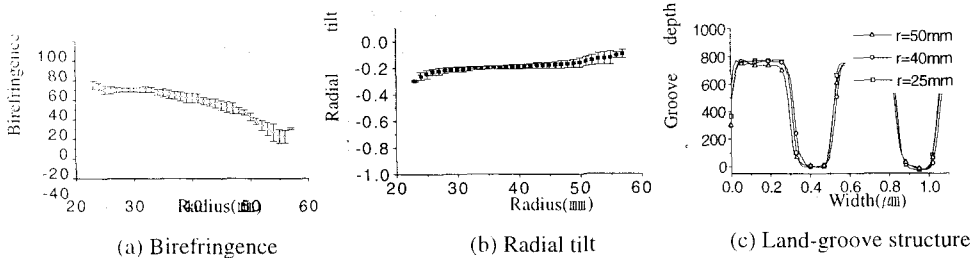


Fig.6 Measured properties in the substrate produced with the optimum processing conditions

($T_{mold} = 124^\circ\text{C}$, $P_{comp} = 70$ kgf).

다양한 가중치에 의해서 계산된, 최적 공정 조건과 R^2 (Coefficient of Determination)는 Table.1 과 같다. 첫번째 조건의 경우($\alpha_1=0.1$, $\alpha_2=0.5$, $\alpha_3=0.4$)를 제외하면 모든 실험의 R^2 이 0.9 이상으로 신뢰할 만한 결과임을 볼 수 있다. 구하여진 최적 공정 조건들은 Fig. 5 에서 보는 바와 같이 한 점 ($T_{\text{mold}}=124^\circ\text{C}$, $P_{\text{comp}}=70\text{ kgf}$)을 중심으로 하여 분포되어 있음을 볼 수 있다. 그리고 이 점에서의 R^2 값 또한 0.9 로 신뢰성있는 값으로 볼 수 있다. 신뢰성있는 최적값의 범위는 금형 온도는 122°C 에서 126.5°C 이고, 압축압력은 66kgf 에서 77.4kgf 이다. Fig. 6 은 최적화 과정을 통해 산출된 최적 공정 조건으로 성형된 기관에서의 복굴절, radial tilt, land-groove 구조를 나타낸다. 이를 통해 볼때, 표면의 거칠기 뿐 아니라, 기관과 스템퍼 사이의 groove 깊이 편차가 눈에 띄게 감소하였음을 볼 수 있다. 또한 복굴절과 radial tilt 값도 Fig. 2, Fig. 3 과 비교하여 감소하였음을 확인할 수 있다.

결론

본 연구에서는 폴리카보네이트 DVD-RAM 기관의 사출압축성형시 제한된 수의 실험을 통해, 상충하는 3 개의 공정 조건을 최적화 하였다. 최적공정 조건을 도출하기 위한 효과적인 설계방법으로 RSM 과 CCD 기법이 사용되었다. 이를 통해 금형 온도 $122^\circ\text{C} \sim 126.5^\circ\text{C}$, 압축압력 $66\text{kgf} \sim 77.4\text{kgf}$ 의 최적 공정조건을 도출하였고, 도출된 공정 조건에서 성형을 수행하여 기계적, 광학적 특성이 우수한 기관을 제작할 수 있음을 확인하였다. 본 연구에서 제시한 설계방법은 DVD-RAM 기관의 성형뿐 아니라 정밀 광학제품의 사출압축성형공정 설계에 적용할 수 있으리라 사료된다.

본 연구는 한국과학재단지정 정보저장기기 연구센터(과제번호:2000G0203)와 LG 전자의 지원을 받아 이루어졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) R. E. Gerber, and M. Mansuripur, 1995, "Effects of Substrate Birefringence and Tilt on the Irradiance and Phase Patterns of the Return Beam in Magneto-optical Disk Storage," *Applied Optics*, 34(22), 4780-4787.
- (2) G. Shyu, and A. Isayev. 1995, "Residual stresses and birefringence in injection molded disks," *SPE ANTEC Tech. Papers*, 41, 2973-2977
- (3) S. Kang, J. Kim, and H. Kim, 2000, "On the Birefringence Distribution in Magneto-Optical Disk Substrates Fabricated by Injection-Compression molding," *Optical Engineering*, 39(03), 689-694.
- (4) S. Kang, C. A. Hieber, and K. K Wang, 1998, "Optimum Design of Process Conditions to Minimize Residual Stresses in Injection-molded Parts," *Journal of Thermal Stresses*, 21, 141-155.
- (5) N. Miyagawa, Y. Gotoh., E. Ohno., K. Nishiuchi., and N. Akahira, 1993, "Land and groove recording for high track density on phase change optical disk," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 32(11B), 5324-5328.
- (6) I. Satoh., S. Ohara, N. Akahira., and M. Takenaga. 1998, "Key technology for high density rewritable DVD(DVD-RAM)," *IEEE Transaction of magnetics*, 34, 337-342
- (7) E. Walpole. And H. Myers. 1993, *Probability and statistics for engineers and scientists*, Macmillan Pub, 5th Ed., 235-462.
- (8) N. Santhanam, K. K. Wang, 1990, "A Theoretical and Experimental Investigation of Warpage in Injection Molding", *SPE ANTEC Technical Papers*, 36, 270-273.
- (9) R. O. Kuehl, 2000, *Design of Experiments: Statistical Principles of Research Design and Analysis*, Duxbury Press.