

## 광디스크 기판 성형시 발생하는 복굴절의 최소화를 위한 이론적 연구

김종성\* · 강신일\*\*

(1999년 3월 18일 접수)

### An Theoretical Investigation on the Minimization of Birefringence Distribution in Optical Disk Substrate

J.S. Kim and S. Kang

#### 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. The birefringence distribution is regarded as one of the most important optical properties for optical disk. In the present study, the birefringence distribution is calculated using the Leonov model for viscoelastic constitutive equations and Cross/WLF model for viscosity approximation. The effects of processing conditions upon the development of birefringence distribution in the optical disk were examined theoretically. It was found that the values of the birefringence distributions were very sensitive to the mold wall temperature history, and based on this fact, an inverse design method was applied to obtain an optimum mold wall temperature history which minimizes the birefringence distribution. The analytical results showed the possibility of improving mechanical and optical properties in the optical disk substrates by active control of the mold wall temperature history.

**Key Words** : Optical Disk Substrate, Birefringence, Mold Wall Temperature History, Inverse Design Method, Regularization Technique

#### 1. 서론

CD, DVD, MOD 등과 같은 광자기정보저장매체의 고 저장밀도화에 따라 광 pick up레이저의 파장도 현재

780nm에서 650nm, 450nm등으로 계속 짧아지고 있다. 이와 같은 단파장 레이저를 이용한 정보재생방식과 높은 저장밀도를 갖는 정보저장기기의 개발로 기존의 공정으로는 이에 맞는 기판의 생산이 어려운 실정이며 새로운

\* 연세대학교 대학원 기계설계학과  
\*\* 연세대학교 기계·전자 공학부

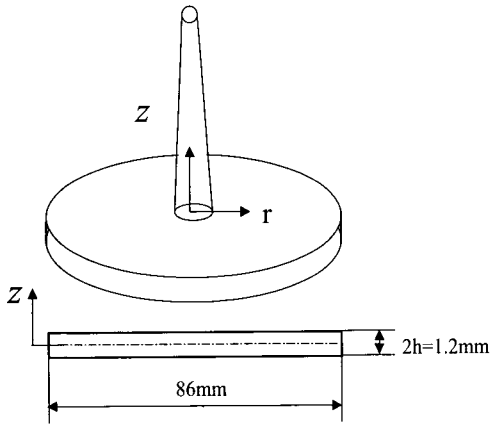


Fig. 1 The dimension and coordinates of the center-gated disk model<sup>(14)</sup>

금형 및 성형공정의 개발이 필요하게 되었다.

광디스크 기판은 마스터링 공정에 의해 제조되는 스텝퍼에 의해 데이터가 피트의 형태로 기록되며 또한 데이터의 재생시 레이저가 통과하는 부분으로, 광디스크기판의 성형은 복합적인 광디스크 제조공정 단계에 있어서 매우 중요한 부분이다. 특히 기판을 통과하는 레이저광의 복굴절현상은 디스크의 광학적 특성을 결정하는 주요 인자이다. 복굴절 현상은 빛이 가지고 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 굴절율과 최소 굴절율의 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 성형 조건에 따라 복굴절의 정도가 크게 달라질 수 있다.

사출성형공정은 사출속도, 사출압력, 보압, 사출량, 금형온도, 용융수지 온도, 냉각시간 등 여러 가지 공정조건

들이 서로 맞물려 기판의 기계적 또는 광학적 특성에 영향을 미치므로 각각의 공정조건이 기판의 특성에 미치는 영향에 대한 이해가 필요하다. 사출성형공정 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 사출성형품의 유동배향, 잔류응력 및 복굴절에 미치는 영향을 연구하였고 Greener 등<sup>(6)</sup>은 radial flow 모델을 사용하여 광디스크에 발생하는 복굴절에 대한 연구를 수행하였으며 Isayev와 Hieber<sup>(7)</sup>는 간격이 좁은 두 평판 사이의 유동에 Leonov모델을 사용하여 고분자의 탄성에 관한 성질을 연구하였다. 또한 Shyu 등<sup>(8)</sup>은 Leonov 모델을 이용하여 폴리카보네이트(polycarbonate)와 폴리스티렌(poly-styrene) 재료를 이용하여 사출성형에 의한 잔류응력과 복굴절에 관한 기초 연구를 수행하였고 Wu와 White<sup>(9)</sup>는 폴리카보네이트 재료의 사출성형 및 압축성형시 급속냉각 등 여러가지 공정조건이 복굴절의 발생에 미치는 영향을 실험적으로 규명하였다. 권태헌 등<sup>(10)</sup>은 Center-gated 디스크에 대한 사출/압축 성형공정의 수치적 모델링을 수행하였으며 윤경환<sup>(11)</sup>은 원반형상의 정밀사출성형에 관해 실험적으로 연구하였다. Kang 등<sup>(12-15)</sup>은 사출성형품 내부에 나타나는 잔류응력을 최소화시키는 방안을 연구하였고 사출압축 성형시 여러 가지 공정조건이 광디스크 기판에 발생하는 복굴절의 분포에 미치는 영향을 실험적으로 규명하였다.

본 연구에서는 Leonov 모델과 Cross/WLF 모델을 이용하여 복굴절 분포를 계산하여 보압, 금형온도, 용융수지온도 등과 같은 공정조건이 복굴절 분포에 미치는 영향을 이론적으로 규명하고 복굴절 분포의 금형벽면온도에 대한 민감성을 확인한다. 이를 바탕으로 역설계법을 적용, 최적화된 벽면온도의 이력을 도출하고 금형온도의 능동제어를 통한 복굴절 최소화 방안에 대한 기초 자료를 제시하고자한다.

## 2. 복굴절 계산의 수치적 모델

### 2.1 지배방정식의 구성

Fig. 1에서와 같이 좌표를 설정하고 수지유동을 반경 방향의 1차원 유동으로 가정하여, Hele-Shaw 근사식을 적용하면 수지유동에 적용되는 다음의 지배방정식 (governing equations)을 얻게 된다<sup>(10,16)</sup>.

continuity equation :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho r u}{\partial r} = 0 \quad (1)$$

momentum equation :

$$-\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \eta \frac{\partial u}{\partial z} \right) = 0 \quad (2)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \eta \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0 \quad (3)$$

energy equation :

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \eta \dot{\gamma}^2 \quad (4)$$

여기서  $\rho$ ,  $T$ ,  $t$ ,  $u$ ,  $w$ 는 각각 밀도, 온도, 시간 그리고  $r$ ,  $z$ 방향으로의 속도를 나타내며  $k$ 는 thermal conductivity,  $c_p$ 는 specific heat coefficient,

$\eta$ 는 점성계수,  $\dot{\gamma}$ 는 shear rate이다.

viscosity를 표현하기 위해 다음의 Cross/WLF 모델을 적용하였다<sup>(16)</sup>.

$$\eta = \eta_0(p, T) \left[ \frac{1 + s \left( \frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{1-n}}{1 + \left( \frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{(1-n)}} \right] \quad (5)$$

여기서,  $\eta_0$ 는 다음 식과 같다.

$$\eta_0 = D_1 \exp \left[ -\frac{A_1(T - T_g)}{A_2 + (T - T_g)} \right], \quad T > T_g$$

$$\eta_0 = D_1 \exp - \left( \frac{A_1 T_g}{A_2} \right) \left( \frac{T - T_g}{T} \right), \quad T \leq T_g \quad (6)$$

$$\begin{aligned} A_2 &= \widetilde{A}_2 + D_3 P \\ T^* &= D_2 + D_3 P \end{aligned} \quad (7)$$

식(5), (6), (7)에서  $T_g$ 는 재료의 유리전이온도이고  $n$ ,  $\tau^*$ ,  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ ,  $A_1$ ,  $\widetilde{A}_2$ ,  $s$ 등은 재료에 따라 달라지는 물성치이다.

p-v-T거동에 대해서 double-domain Tait model을 사용하면 밀도, 압력, 온도에 대한 관계를 다음과 같이 표현 할 수 있다<sup>(16)</sup>.

$$\rho(T, p) = \rho_0(T) \left\{ 1 - C \ln \left[ 1 + \frac{p}{B(T)} \right] \right\}^{-1} \quad (8)$$

$$\frac{1}{\rho_0(T)} = \begin{cases} b_{1,1} + b_{2,1}(T - b_5) & \text{for } T > T_g(p) \\ b_{1,s} + b_{2,s}(T + b_5) & \text{for } T \leq T_g(p) \end{cases} \quad (9)$$

$$B(T) = \begin{cases} b_{3,1} \exp(-b_{4,1}T) & \text{for } T > T_g(p) \\ b_{3,s} \exp(-b_{4,s}T) & \text{for } T \leq T_g(p) \end{cases} \quad (10)$$

$$T_g(p) = b_5 + b_6 p \quad (11)$$

여기서  $b_{1,1}$ ,  $b_{2,1}$ ,  $b_{3,1}$ ,  $b_{4,1}$ ,  $b_{1,s}$ ,  $b_{2,s}$ ,  $b_{3,s}$ ,  $b_{4,s}$ ,  $b_5$ ,  $b_6$ 등의 상수는 각각 재료에 따라 달라지는 물성치이다.

본 연구에서는 플라스틱 수지의 점탄성 거동을 묘사하기 위해 다음의 Leonov모형을 사용하였다<sup>(16,17)</sup>.

$$\begin{aligned} \tau(z, t) = 2 \sum_{k=1}^N \mu_k & \begin{pmatrix} C_{11,k}(z, t) & 0 & C_{13,k}(z, t) \\ 0 & 1 & 0 \\ C_{13,k}(z, t) & 0 & C_{33,k}(z, t) \end{pmatrix} \\ & + 2\mu_s \gamma(z, t) \theta_1(T) \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\mu_k = \frac{\eta_k(T)}{2\theta_k(T)}, \quad \mu = \frac{\eta_0(T)}{2\theta_1(T)} \quad (13)$$

여기서,  $\eta_k(T)$ 는  $k^{\text{th}}$ 모드의 shear viscosity이며  $k^{\text{th}}$ 모드의 relaxation time  $\theta_k(T)$ 와는 식(13)의 관계를 갖는다. 또한  $C_{11,k}(z, t)$ ,  $C_{13,k}(z, t)$ ,  $C_{33,k}(z, t)$  등은

$k^{\text{th}}$  모드의 Finger strain tensor의 요소들이다.

**Table 1** Cross/WLF model coefficients of polycarbonate with reference temperature 287°C<sup>(11)</sup>

n	$\tau^*$ (Pa)	$D_1$ (Pa-s)	$D_2$ (°C/Pa)
0.170	$6.91 \times 10^5$	$5.82 \times 10^9$	144
$D_3$	$A_1$	$\widetilde{A}_2$ (°C)	s
$1.9 \times 10^{-7}$	61.2	22.8	$1.0 \times 10^{-5}$

**Table 2** Double domain Tait equation coefficients of polycarbonate<sup>(8)</sup>

$b_{1,l}$ (cm <sup>3</sup> /g)	$9.799 \times 10^{-1}$
$b_{2,l}$ (cm <sup>3</sup> /g°C)	$5.788 \times 10^{-4}$
$b_{3,l}$ (dyne/cm <sup>2</sup> )	$1.483 \times 10^9$
$b_{4,l}$ (1/°C)	$3.019 \times 10^{-3}$
$b_{1,s}$ (cm <sup>3</sup> /g)	$9.799 \times 10^{-1}$
$b_{2,s}$ (cm <sup>3</sup> /g°C)	$2.429 \times 10^{-4}$
$b_{3,s}$ (dyne/cm <sup>2</sup> )	$1.965 \times 10^9$
$b_{4,s}$ (cm <sup>3</sup> /g)	$1.380 \times 10^{-3}$
$b_5$ (°C)	$1.03 \times 10^2$
$b_6$ (°C - cm <sup>2</sup> /dyne)	$3.2 \times 10^{-8}$

zero shear viscosity는 Cross/WLF 모델에 의해 다음과 같이 근사화 된다<sup>(16)</sup>.

$$\eta_0(T) = \sum_{k=1}^N \frac{\eta_k(T)}{1-s} \quad (14)$$

본 연구에 사용된 폴리카보네이트(polycarbonate, Lexan 141)의 stress-optical 계수 C의 값  $3.6 \times 10^{-10}$  이고 specific heat coefficient와 thermal conductivity값은 각각  $C_p = 2.15 \times 10^8 \text{ erg/g}^\circ\text{C}$ ,  $k = 2.34 \times 10^4 \text{ erg/cm}^\circ\text{Cs}$ 이다. 본 연구에서 사용된 optical grade polycarbonate의 Cross/WLF 계수와 double domain Tait equation 계수를 Table 1과 Table 2에 각각 나타내었다<sup>(8,16)</sup>.

잔류응력과 복굴절간에는 stress optical 계수 C를 이용하여  $\Delta n = C \Delta \tau$ 의 관계를 가지며 복굴절과 관련하여 다음과 같은 최종적인 식을 얻을 수 있다<sup>(17,18)</sup>.

$$\Delta n = C \sqrt{(\tau_{11} - \tau_{33})^2 + 4\tau_{13}^2} \quad (15)$$

$$\tau_{11} - \tau_{33} = 2 \sum_{k=1}^N \mu_k (C_{11,k} - C_{33,k}) \quad (16)$$

$$\tau_{13} = \eta_0(T) s \dot{\gamma} + 2 \sum_{k=1}^N \mu_k C_{13,k} \quad (17)$$

## 2.2 주요 공정조건이 복굴절 분포에 미치는 영향

시물레이션에 사용한 광디스크 기관은 두께 1.2mm, 지름 86.0mm이고 기본 공정조건으로 사출시의 flow rate을 16.0 cm<sup>3</sup>/s, 보압 20.6MPa, 금형최종온도 75°C로 설정하였다. 또한 용융수지의 기본 설정온도는 300°C로 하였다.

보압이 복굴절 분포에 미치는 영향을 살펴보기 위해 보압을 13.6MPa, 41.2MPa로 각각 변화시켜 가며 시물레이션을 수행하였고 각각의 경우에 대한 두께방향의 복굴절 분포를 Fig. 2, Fig. 3에 각각 나타내었다. 두께방향의 중심에서는 반경방향의 변화( $r=2.0\text{cm}$ ,  $r=2.5\text{cm}$ ,  $r=3.0\text{cm}$ ,  $r=3.5\text{cm}$ ,  $r=4.0\text{cm}$ )에 무관하게 0의 복굴절 값을 보이고 무차원화 시킨 두께의 0.5부근에서 second peak가 발생하며 벽면에서 최대값을 갖는다. 이와 같은 복굴절 값의 분포는 성형품이 냉각과정을 끝내고 굳어 있는 동안 내부의 응력완화(relaxation)가 일어나기 때문으로 분석되며 벽면에서 여전히 높게 남아 있는 것은 응력완화가 일어나더라도 벽면에서는 냉각이 가장 먼저 일어나게 되어 응력완화의 효과가 매우 적어 전단응력(shear stress)이 여전히 남아 있기 때문이다. 복굴절 분포는 반경방향의 중심부에서 가장 크게 나타나며 가장자리로 이동할수록 낮은 분포를 나타낸다. Fig. 2와 Fig. 3을 비교하면 보압의 증가에 따른 복굴절 값의 증가는 무차원화시킨 두께 0.4와 0.6사이에서 별건되며 벽면근처에서의 복굴절 분포에는 그 영향이 크지 않음을 알 수 있다.

금형온도가 두께방향의 복굴절 분포에 미치는 영향을 살펴보기 위해 금형온도만을 75°C, 125°C로 각각 변화시켜가며 시물레이션을 수행하였고, 그 결과를 Fig. 4, Fig. 5에 각각 나타내었다. 금형온도가 증가할수록 second peak치 및 벽면에서의 최대치가 모두 감소함을 보이며,

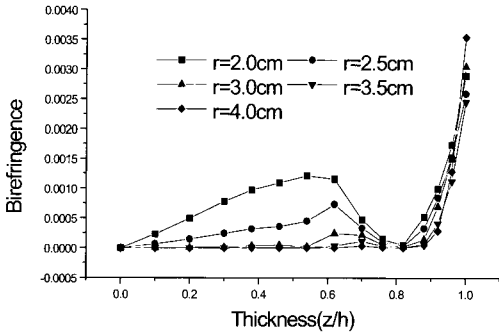


Fig. 2 The gapwise distribution of birefringence for packing pressure of 13.6MPa

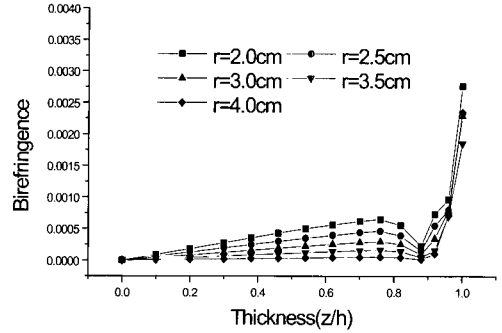


Fig. 5 The gapwise distribution of birefringence for the mold temperature of 125°C and packing pressure of 20.6MPa

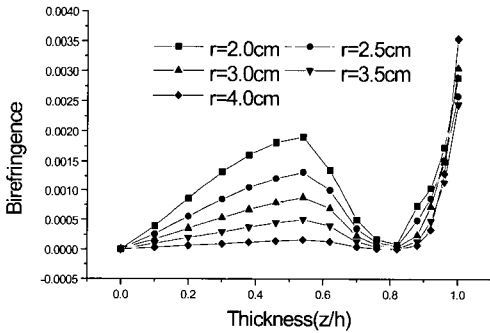


Fig. 3 The gapwise distribution of birefringence for packing pressure of 41.2MPa

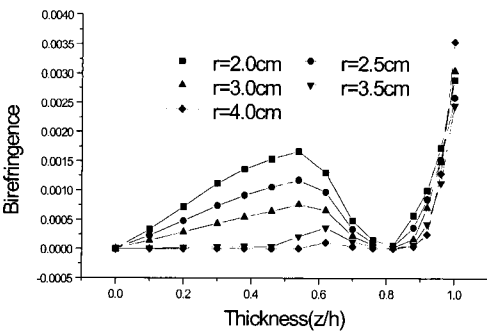


Fig. 4 The gapwise distribution of birefringence for the mold temperature of 75°C and packing pressure of 20.6MPa

이를 통해 복굴절 분포가 금형벽면온도의 변화에 대단히 민감함을 알 수 있다.

### 3. 역설계법을 통한 복굴절 분포 최소화

#### 3.1 역설계법의 정식화

냉각시간  $t_f$ 를 일정하게 고정시켰을 때, 디스크 내부 온도분포를 금형 최종온도에 근접시키면서 디스크 내부 복굴절 분포를 최소화하는 최적의 금형 벽면온도이력을 구하기 위해 역설계법(inverse design method)을 적용하였고 이를 수식화하면 다음과 같다<sup>(11,12)</sup>.

$$J(T_w^*(t)) \leq J(T_w(t)), T_w(t) \in L_2[0, t_f] \quad (18)$$

여기서  $L_2$ 는 두계영역(space domain)  $[0, h]$  혹은 시간영역(time domain)  $[0, t_f]$ 에서 제곱적분이 가능한 (square-integrable) 함수들의 집합이며,  $T_w(t)$ 는 금형 벽면 온도이력,  $T_w^*(t)$ 는 다음의 목적함수(object-function)를 최소화하는 온도이력이다.

$$J(T_w(t)) = \frac{1}{2} \|w_1(z)(\Delta n(z, t_f; T_w(t)) - \widehat{\Delta n})\|^2 + \frac{1}{2} \|w_2(z)(T(z, t_f; T_w(t)) - \widehat{T})\|^2 \quad (19)$$

여기서  $f(z) \in L_2([0, h])$ 인 모든 함수에 대해  $L_2$ -norm은 다음과 같이 정의된다.

$$\|f(z)\|^2 \equiv \int_0^h f^2(z) dz \quad (20)$$

또한  $\Delta n$ ,  $\widehat{\Delta n}$ ,  $T$ ,  $\widehat{T}$ ,  $z$ ,  $w_1$ ,  $w_2$ 은 계산되어지는 복굴절 분포, 이상적인 복굴절 분포, 계산되어지는 온도분포, 이상적인 온도분포, 두께방향 좌표, 복굴절 및 온도에 대한 가중치 함수이다.

무한차원 함수공간에서 정의되었던 최적화문제를 유한차원 함수공간에서 풀기 위해 온도이력  $T_w(t)$ 를 근사화하면 다음과 같다.

$$T_w(t) = \sum_{j=1}^N p_j \phi_j(t) \quad (21)$$

여기서  $\phi_j(t)$ 는  $\phi_j \in V_h(0, t_f)$ 를 만족하는 basis 함수이고,  $p_j = T_w(t_j)$ 을 의미하며,  $N$ 은 basis 함수의 개수,  $V_h(0, t_f)$ 는 근사함수공간이다. 본 연구에서는 basis 함수로써 cubic B-spline interpolation 함수를 사용하였다. 또한 식(19)로 표현되었던 목적함수를 유한차원 함수공간에서 나타내면 다음과 같다.

$$J(p) = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^M W_{1i} [\Delta n(z_i, t_f; p) - \widehat{\Delta n}(z_i)]^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=0}^M W_{2i} [T(z_i, t_f; p) - \widehat{T}]^2 \quad (22)$$

여기서,  $W_{1i}$ ,  $W_{2i}$ 는 각각 복굴절 및 온도분포에 대한 가중치 함수이다.

(k+1)번째 iteration 단계에서의 파라미터 벡터를  $p^{k+1} = [p_1^{k+1}, p_2^{k+1}, \dots, p_N^{k+1}]^T$ 로 나타내면 식(22)를 다음의 행렬형태로 표현할 수 있다.

$$J(p^{k+1}) = \frac{1}{2} (\Sigma(p^{k+1}) - \widehat{\Sigma})^T \mathcal{Q}_1 (\Sigma(p^{k+1}) - \widehat{\Sigma}) + \frac{1}{2} (T(p^{k+1}) - \widehat{T})^T \mathcal{Q}_2 (T(p^{k+1}) - \widehat{T}) \quad (23)$$

여기서  $\Sigma$ ,  $\widehat{\Sigma}$ ,  $T$ ,  $\widehat{T}$ 는 각각 해석으로 얻어지는 복굴절분포 벡터, 이상적인 복굴절분포 벡터, 최종 온도분포 벡터, 이상적인 온도분포 벡터로써 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (\Sigma)_i &= \Delta n(z_i, t_f; p^{k+1}), & (\widehat{\Sigma})_i &= \widehat{\Delta n}(z_i) \\ (T)_i &= T(z_i, t_f; p^{k+1}), & (\widehat{T})_i &= \widehat{T} \end{aligned} \quad (24)$$

또한  $\mathcal{Q}_1$ ,  $\mathcal{Q}_2$ 는 가중치 행렬로써 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \mathcal{Q}_1 &= \text{diag}(W_{11} W_{12} \dots W_{1M}) \\ \mathcal{Q}_2 &= \text{diag}(W_{21} W_{22} \dots W_{2M}) \end{aligned} \quad (25)$$

식(25)는 영차정규화 기법(zeroth-order regularization technique)을 이용하여 다음과 같이 바꾸어 표현할 수 있다<sup>(19)</sup>.

$$\begin{aligned} J(p^{k+1}) &= \frac{1}{2} (\Sigma(p^{k+1}) - \widehat{\Sigma})^T \mathcal{Q}_1 (\Sigma(p^{k+1}) - \widehat{\Sigma}) + \frac{1}{2} (T(p^{k+1}) - \widehat{T})^T \mathcal{Q}_2 (T(p^{k+1}) - \widehat{T}) \\ &\quad + \alpha_0 (p^{k+1})^T W_0 p^{k+1} \end{aligned} \quad (26)$$

이 방법은 미지의 파라미터를 구하는 일반적인 inverse design method에서 부적절한 초기값이 사용되거나 실험데이터에 노이즈가 크게 내재되어 있을 때 파라미터들이 발산하지 않고 최적의 값으로 수렴하게끔 해주는 장점을 가지고 있다.

최적화 수행을 위한 반복과정에서 update되는 파라미터  $p^k$ 와  $p^{k+1}$ 은 다음과 같이 선형화시킬 수 있다.

$$\begin{aligned} \Sigma(p^{k+1}) &= \Sigma(p^k) + X_1 \Big|_{p=p^k} \Delta p^k \\ T(p^{k+1}) &= T(p^k) + X_2 \Big|_{p=p^k} \Delta p^k \end{aligned} \quad (27)$$

여기서  $\Delta p^k = p^{k+1} - p^k$ 이고  $X_1$ ,  $X_2$ 는 민감도 계수행렬이다.

식(24), (25)를 식(27)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 [ & \mathbf{X}_1^T(\mathbf{p}^k) \mathbf{Q}_1 \mathbf{X}_1(\mathbf{p}^k) + \mathbf{X}_2^T(\mathbf{p}^k) \mathbf{Q}_2 \\
 & \mathbf{X}_2(\mathbf{p}^k) + a_0 \mathbf{W}_0] \Delta \mathbf{p}^k = \mathbf{X}_1^T(\mathbf{p}^k) \mathbf{Q}_1 \\
 & (\hat{\Sigma} - \Sigma(\mathbf{p}^k)) + \mathbf{X}_2^T(\mathbf{p}^k) \mathbf{Q}_2 (\hat{\mathbf{T}} - \mathbf{T} \\
 & (\mathbf{p}^k))
 \end{aligned}
 \tag{28}$$

이 식으로부터  $\Delta \mathbf{p}^k$ 를 구하고  $\mathbf{p}^{k+1} = \mathbf{p}^k + \Delta \mathbf{p}^k$ 에 의해서 update한다.

### 3.2 해석결과 및 토의

#### 3.2.1 복굴절쪽으로 가중치함수를 높게 설정한 경우(Case A)

본 연구에서의 가중치함수는 복굴절 값과 온도 값의 급수차에 따른 불균형을 맞추기 위해 상수 값을 적용하였다. 식(19)의 복굴절 및 온도에 관련된 norm중에서 첫 번째 항에 적용된 가중치 함수가 두 번째 항에 적용된 가중치 함수보다 훨씬 큰 경우로 냉각시간  $t_f$ 는 30초로 설정하였으며 초기온도를 170°C, 최종온도를 75°C로 각각 고정시킨 후, 6초, 12초, 18초, 24초 때의 온도를 변화시켜 최적화 된 금형벽면 온도이력을 구하였다. 복굴절 분포의 변화가 가장 심하고 그 값 또한 가장 크게 나타나는  $r=2.0\text{cm}$ 에서의 복굴절 분포를 최적화 대상으로 결정하였다. Fig. 6은 최적화 결과로써 얻어진 금형벽면 온도이력을 나타낸 그래프이다. 금형 벽면온도는 초기에는 상승하였다가 나중에는 75°C보다 더 낮은 값으로 하강하였고 다시 상승하여 75°C를 회복하는 곡선을 보이며, 이에 따른 복굴절 분포를 Fig. 7에 나타내었다. 금형 온도를 일정하게 고정시킨 경우에 비해 최적화된 금형벽면 온도이력에 의해 유발되는 복굴절 분포는 그 값이 현저히 감소하였음을 알 수 있다. Fig. 8은 냉각 직후 디스크 내부의 온도분포를 나타내는 그래프로 금형온도를 일정하게 유지 시킨 경우보다 벽면온도를 변화시킨 경우, 내부 온도가 현저히 높은 것으로 나타났는데 이는 가중치 함수가 복굴절 향으로 치우쳐 있기 때문이다.

#### 3.2.2 가중치함수를 복굴절과 온도분포 모두에 균등하게 설정한 경우(Case B)

식(19)의 복굴절 및 온도에 관련된 norm중에서 첫 번째 항에 적용된 가중치 함수와 두 번째 항에 적용된 가중치 함수가 균등하게 설정된 경우로 초기온도를 120°C로 설정하고 최종온도는 75°C설정하였으며 Case A에서의 마찬가지로 6초, 12초, 18초, 24초 때의 온도를 변

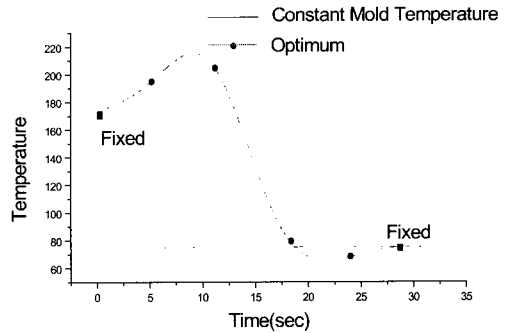


Fig. 6 The optimum history of mold wall temperature for case A

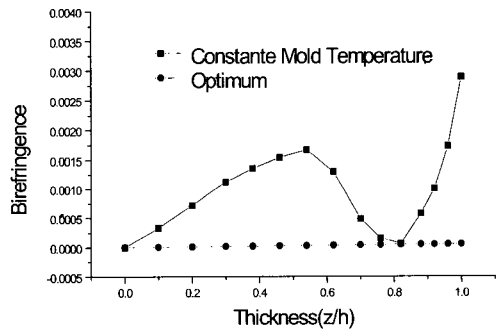


Fig. 7 The gapwise distribution of birefringence at  $r=2.0\text{cm}$  for case A

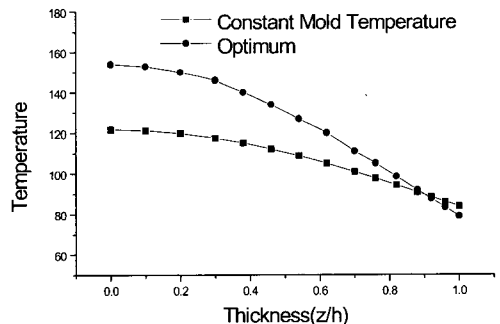


Fig. 8 The gapwise temperature distribution of temperature for case A

화시켜 최적화된 금형벽면 온도이력을 구하였다. 복굴절 값은 Case A에서의 마찬가지로  $r=2.0\text{cm}$ 의 경우만을 대상

으로 하였다.

Fig. 9는 최적화된 금형벽면 온도이력을 나타낸다. 온도의 상승과 하강이 반복되는 경향은 Case A와 유사하나, 온도 변화의 폭이 Case A에 비해 감소하였음을 알 수 있다. Fig. 10에서는 금형온도를 일정하게 유지시킨 경우의 복굴절 분포와, 최적화된 금형벽면 온도이력에 의해 유발되는 복굴절 분포를 비교하였다. Case A에서 보다 금형온도가 낮은 범위에서 변화하였기 때문에 Case A의 최적화 된 결과와 비교하면 복굴절 값이 상대적으로 증가하였지만, 금형온도를 일정하게 유지시킨 경우와 비교하면 그 값이 현저히 감소하였음을 알 수 있다. Fig. 11은 냉각 직후의 디스크 내부 온도분포로 Case A의 경우와는 달리 최적화된 금형벽면 온도이력에 의해 유발되는 디스크 내부 온도 분포가 금형온도를 일정하게 유지시킨 경우와 비교하여 큰 차이를 보이지 않

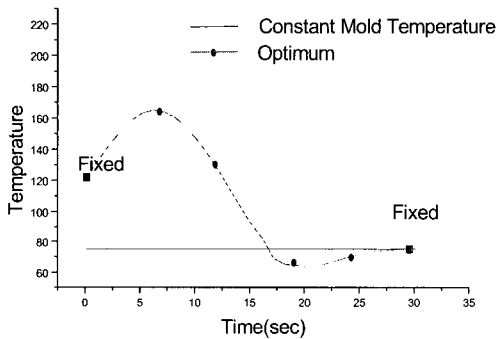


Fig. 9 The optimum history of mold wall temperature for case B

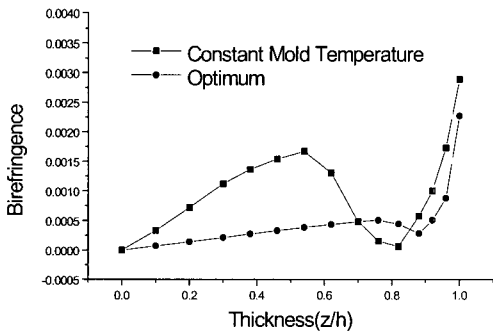


Fig. 10 The gapwise distribution of birefringence at  $r=2.0\text{cm}$  for case B

음을 알 수 있다. Jansen등<sup>(4,5)</sup>이 급속 가열장치를 통해 금형벽면온도를 빠른 시간에 100° K정도까지 상승시킨 사실을 고려할 때, 본 연구의 이론적 결과는 실험적으로 구현 가능하리라 판단된다.

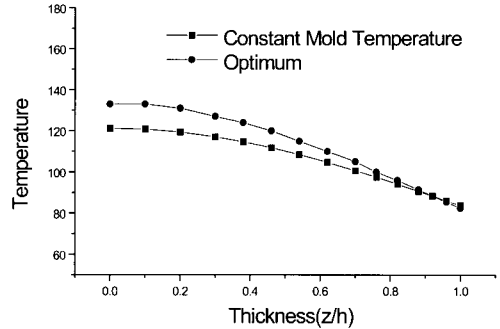


Fig. 11 The gapwise temperature distribution for case B

#### 4. 결 론

본 연구에서는 디스크 내부 복굴절 분포를 최소화하는 금형벽면 온도이력을 구하기 위한 역설계법을 제시하였다. 유동수지의 점탄성 거동을 묘사하기 위해서는 Leonov 모델을 사용하였고 viscosity의 근사화를 위해서는 Cross/WLF모델을 사용하였다. 여러가지 공정조건이 복굴절 분포에 미치는 영향을 규명하였고, 특히 복굴절 분포가 금형온도의 변화에 민감함을 보였다. 이러한 기초연구를 토대로 0차 정규화 기법을 포함하는 역설계법을 사용하여 복굴절분포를 최소화하는 금형벽면 온도이력을 구하였다. 최적화 과정의 결과로 얻어진 금형벽면 온도이력은 상승과 하강이 반복되었으며 디스크 두께 방향의 안쪽과 벽면의 복굴절 값을 모두 감소시켰다. 본 연구에서는 가공시간을 희생시키지 않으면서 복굴절을 최소화시키기 위해서는 금형벽면의 가열뿐만 아니라 냉각도 동시에 고려되어야 한다는 사실을 이론적으로 제시하였으며 이를 실험적으로 규명하는 연구가 진행중에 있다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단 핵심전문연구과제 지원(과제 번호 : 981-1212-036-2)을 받아 이루어졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.



참 고 문 헌

- (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. White, 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.
- (10) 김일환, 박성진, 정성택, 권태헌, 1998, "Center-gated 디스크에 대한 사출/압축 성형공정의 수치적 모델링(1) - 압축성을 고려한 점탄성유체 모델의 사출성형 -", 대한기계학회논문집 A권 제22권 제 2호, pp. 289-301.
- (11) 윤경환, 1995, "원반 형상의 정밀사출성형에 관한 실험적 연구", The Korean J. of Rheology, Vol. 7, pp. 19-27.
- (12) Kang, S., Hieber, C. A. and Wang, K. K., 1998, "Optimum Design of Process Conditions to Minimize Residual Stresses in Injection-Molded Parts", Journal of Thermal Stresses, Vol 21, pp.141-155.
- (13) Zabarav, N. and Kang, S., 1993, "Thermo-mechanical Final State Design of Unidirectional Solidification Processes", J. Mater. Proc. Manuf. Sci., Vol. 2, pp. 141-157.
- (14) 김종성, 김현, 강신일, 1999, "광디스크 기관의 사출 압축성형시 발생하는 복굴절에 관한 연구", 대한기계학회논문집 A권 제23권 제 11호, pp. 2050-2057
- (15) Kang, S., Kim, J. S. and Kim, H., "On the Birefringence Distribution in Magneto-Optical Disk Substrate Fabricated by Injection Compression Molding", Optical Engineering, In press.
- (16) CIMP, Consortium Meeting Notes, 1994, Cornell University, November 3.
- (17) CIMP, Consortium Meeting Notes, 1993, Cornell University, June 3.
- (18) Injection and Compression Molding Fundamentals, 1987, A. I. Isayev, Eds., Marcel Dekker, New York
- (19) Beck, J. V., Blackwell, B. and Clair, C. R. ST. Jr, 1985, Inverse Heat Conduction: Ill-Posed Problems, A Wiley Inter-science Publication.