

이 논문은 1994년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

가압 급냉하에서의 사출 성형품내의 잔류 응력 형성 해석

윤경환*

Residual Stress Formation in Injection-Molded Samples under Constrained Quenching

Kyunghwan Yoon*

ABSTRACT

The residual stresses in injection-molded plastic parts can be divided into two, i.e., the flow-induced residual stress produced in flowing stage and the thermally-induced residual stress produced in cooling stage. Especially, the main source for the defect in the final parts, such as warpage, is known to be the thermally-induced stresses. For the freely quenched samples the structures of residual stresses and birefringence have been investigated by many researchers extensively. However, the boundary condition for free quenching was found to be improper to study actual injection molding process. In the present study a detailed structure of the residual stresses and birefringence produced under constrained quenching has been investigated experimentally. In constrained quenched samples a similar pattern but much less stress values than that for the freely quenched samples has been found in the case of the thickness of 1.0 mm. However, in the case of the thickness of 4.0 mm, totally different stress profile has been found experimentally. Surprisingly uniform birefringence throughout whole thickness has been found for all the cases of constrained quenching. Finally, to explain the mechanism to produce the final residual stresses and birefringence some preliminary numerical results including free volume theory have been introduced briefly.

Key Words: Injection molding(사출 성형), Residual stresses(잔류 응력), Free quenching(자유 급냉), Constrained quenching(구속 급냉), Birefringence(복굴절)

1. 서 론

플라스틱 사출 성형은 최근에 제품의 경량화, 생산 자동화의 이점을 가지고 있어 이전에 사용되어지던 금속이

나 유리등을 대체하며 기어 등 정밀 부품류나 렌즈 등의 광학 제품 등의 고부가가치 제품의 생산에 적용되는 사례가 점차 늘어나고 있다. 이러한 사출 성형 과정 중 성형 조건의 변화는 최종 제품에 다른 열적, 기계적 이력을 가

* 단국대학교 공과대학 기계공학과

치게 하며 다른 정도의 배향성과 잔류 응력을 남겨 최종 성형품의 광학적, 기계적 성질들과 그 형태까지도 결정짓는 요인이 되는 것이다. 그러므로 기계적으로나 광학적으로 우수한 제품을 만들기 위해서 각기 다른 성형 조건이 최종 성형품의 잔류 응력이나 광학적 이방성의 구조나 그 크기에 미치는 영향 등을 예측하려는 연구가 아직도 활발히 진행 중이다.

이러한 플라스틱 사출 성형 과정에서 발생하는 잔류 응력은 크게 용융 수지가 흘러 들어가는 동안 생성되는 유동에 의한 잔류 응력(flow-induced stresses)과 냉각 과정 동안 생성되는 열에 의한 잔류 응력(thermally-induced stresses)으로 나눌 수 있으며 광학적 이방성도 유동에 의한 복굴절과 비등온 냉각 과정 중에 발생하는 열에 의한 복굴절로 분류할 수 있다. 실험적 연구와 이론적 연구가 병행되어 왔으나 전단 응력 계수나 광탄성 계수가 유리 전이 온도 부근에서 점탄성적 성질을 나타내며 이들도 이들에 대한 데이터가 부족하여 최종 잔류 응력이나 복굴절의 형성에 관한 연구를 어렵게 하고 있다.

본 논문에서는 사출 성형품내의 잔류 응력, 그 중에서도 열에 의한 잔류 응력과 복굴절의 형성 과정을 밝히는 데 초점을 맞추었으며 그 방법으로는 이미 잘 알려져 있으며 현재까지 대부분의 연구에 사용된 Fig. 1(a)에 보이는 바와 같은 대기압하에서 시행하는 자유 급냉(free quenching)과 전혀 다르며 사출 성형시 조건을 좀 더 잘 모사할 수 있고 경계 조건을 단순화한 일정한 압력을 가하는 Fig. 1(b)의 구속 급냉(constrained quenching)의 경우에 대해서 집중적으로 연구하였다. 이와 같은 경계조건의 선택은 보압이 충분히 걸린 상태에서 사출품이 냉각되는 과정을 자유급냉보다 훨씬 잘 모사할 수 있으리라는 판단에 근거한다.

이론적 연구로 판유리의 자유급냉시 잔류 응력에 관한

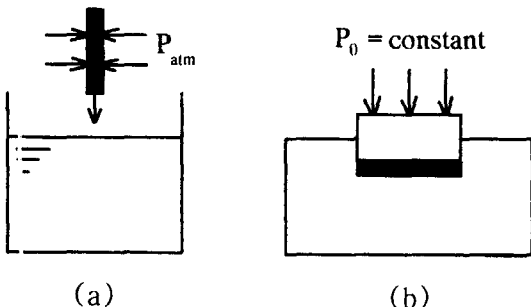


Fig. 1 Schematics of free quenching (a) and constrained quenching(b).

해석을 순간적 상변화 이론(Instant freezing theory)을 처음으로 제안한 Bartenev⁽¹⁾가 유리 전이 온도 이상에서 접도가 낮으므로 전단 응력을 견디지 못하는 이상적인 유체로 유리 전이 온도 이하에서는 탄성 고체와 같은 성질을 갖는다고 가정하여 자유 급냉 되어진 평판에서의 잔류 응력을 구했으며 Indenbom⁽²⁾은 Bartenev의 이론에서 굳는 시점에서의 온도 구배가 순간적 상변화(instant freezing) 가정을 잘 따르지 않고 최종 변형률이 안정성 요구를 충족시키지 못하는 것을 지적하였으며 좀 더 정확한 해석을 위해서 전체 변형률을 탄성 변형률, 점성 변형률, 열 변형률로 이루어졌다고 제안하여 빠른 냉각 속도의 냉각 조건에서도 좀 더 정확한 값을 얻을 수 있었다.

Aggarwala와 Saibel⁽³⁾은 잔류 응력을 구하기 위해서 일반적인 네 개의 파라미터로 구성된 점탄성 방정식을 이용하여 Maxwell 모델과 순간적 상변화(instant freezing) 가정시 온도 분포와 잔류 응력의 분포해를 멱함수의 꼴로 나타내었다. 중심에서는 인장 응력이 표면에서는 압축응력이 발생하는 상태를 정성적으로 잘 보여주었으며 냉각 속도가 아주 낮아 0에 가까울 때 응력의 분포가 2차 함수 형태로 된다는 것도 보였다. 한편, Lee, de la Vega와 Bogue⁽⁴⁾는 자유 급냉시 PS, PMMA와 PC의 잔류 복굴절의 구조를 실험적으로 구하고 strain optical coefficient를 온도만의 함수로 가정하고 Aggarwala와 Saibel의 잔류 응력 해석을 이용하여 정성적인 복굴절의 구조를 구하였다. PS와 PMMA에서는 중심에서 음의 값이 표면에서는 양의 값을 구하였으며 PC에서는 부호가 반대이며 복굴절의 값은 두께 방향으로 적분시 일반적으로 0이 되지 않음을 보였다.

Morland와 Lee⁽⁵⁾와 Lee, Rogers와 Woo⁽⁶⁾는 열유변학적 단순(thermorheologically simple)인 물질의 자유 냉각시 원통과 평판에서의 열에 의한 잔류 응력을 수치해석적으로 구하였고 이들의 연구는 점탄성적 해석의 대표적인 결과이며 Narayanaswamy와 Gardon⁽⁷⁾은 적분식을 부분적 선형 전개(piece-wise linear expansion)를 이용하여 큰 타임 스텝을 사용할 수 있으며 높은 정확성을 얻을 수 있는 형태로 고쳐 실험 결과와의 비교에서도 높은 초기 온도에서 자유 급냉된 경우에 잘 맞았으나 유리 전이 온도와 가까운 낮은 초기 온도의 경우 오차가 발생하였다.

그러나 비평형상태에서의 점탄성물질의 특성들은 자유체적(free volume)의 효과를 포함시켜 수정을 가해 주어야 한다는 것이 좀 더 발전된 점탄성 이론으로 Narayanaswamy^{(8),(9)}

는 비평형상태의 자유체적의 효과를 적용한 것과 안 한 것에 대해서 각각의 경우에서 잔류 응력을 계산해 본 결과 잔류 응력의 약 40%가 자유체적을 감안한 효과에 기인한다는 것을 알게 되었다.

그런데 Rusch⁽¹⁰⁾는 PMMA와 PS의 체적 이완과 응력 이완을 연구하면서 이동계수(shift factor)의 식에 실제 온도 대신에 상응온도(effective temperature)를 정의하여 사용하면 유리 전이온도 이하에서도 열유변학적 단순(thermorheologically simple)의 가정을 적용할 수 있다고 주장하였으며 Shyu⁽¹¹⁾는 이 가정을 적용하여 자유 급냉시 PS와 PC가 초기 온도 변화에 따라 잔류 응력 및 복굴절의 구조가 변화하는 현상을 설명하였다. Shyu는 이 과정에서 PS와 PC의 탄성이완계수(relaxation modulus)와 광탄성계수(stress optical coefficient)를 실험에 의해 구했으며 자유 급냉시 초기 온도 변화에 따른 복굴절의 값은 실험과 계산을 병행하였으나 잔류 응력의 값은 측정하지 않았다. 실제 사출 성형 제품의 최종 복굴절 구조에 관해서도 해석을 하였으며 유동에 의한 복굴절과 열에 의한 복굴절로 나누어 그 합을 최종 예측치로 하였으나 열에 의한 복굴절의 계산에 자유 급냉시 경계 조건을 사용하였고 이는 실제 사출 성형시 금형내에서의 조건과는 맞지 않는다.

이상의 연구결과들에서 볼 때 수치해석의 시도는 대부분 자유 급냉의 조건에서 행해졌으며 실제 사출 성형 조건을 잘 모사할 수 없었다. 이에 본 논문에서는 이러한 대기압하의 유체 정역학적 경계 조건하에서의 실시되는 자유 급냉과 캐비티의 양면에 일정한 압력이 작용되며 냉각되는 전혀 다른 경계 조건을 만들어 구속 급냉시 최종 제품에 남는 잔류 응력과 복굴절의 구조를 밝히기로 하였다. 이러한 냉각 조건의 선택은 앞에서 설명한 바와 같이 단순 사출성형의 경우에는 보압이 충분히 걸린 상태에서 냉각되는 과정을 도는, Fig. 2와 같이 잔류 응력을 줄이기 위해 사용하는 단순 사출이 아닌 사출/압축 성형을 사용하는 경우 압축 과정시 냉각과정을 잘 모사한 것이라고 판단된다.

우선 자유 급냉시 발생하는 잔류 응력과 복굴절을 구속 급냉시와 비교하기 위하여 한 가지 경우를 택하여 측정하였고 특수 제작한 금형과 프레스를 사용하여 일정한 압력을 가하며 냉각을 수행하는 구속 급냉시 발생하는 잔류 응력은 현재까지 알려진 방법 중 두께방향의 분포를 직접 측정할 수 있는 거의 유일한 방법으로 알려진 층제거(layer removal)법을 택했으며 복굴절은 편광현미경을

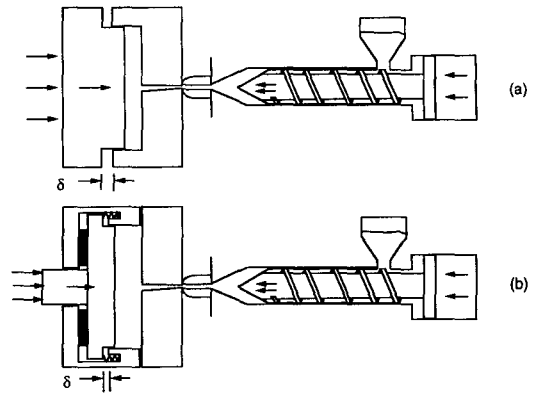


Fig. 2 Two different types of injection/compression molding: total compression (a) and partial compression (b).

사용하여 측정하여 그 구조를 비교, 분석하는데 역점을 두었다. 한편, 자유 급냉과 구속 급냉시 발생하는 잔류 응력과 복굴절의 구조를 설명하기 위하여 Santhanam⁽¹²⁾의 잔류 응력에 관한 수치해석 결과를 이용하였다. 특히, 자유 급냉시 비체적의 변화를 계산하는 과정에는 평형 상태의 곡선을 사용한 Santhanam의 방법에 체적이완 현상을 첨가하여 잔류 응력과 복굴절의 형성 과정의 변화를 보였다.

2. 본 론

2.1 층제거법(Layer Removal Technique)

일반적으로 사출 성형 된 사출품의 잔류 응력은 3차원적인 특성을 갖는다. 그러나 대부분의 사출품에 있어서 그 두께가 상대적으로 얇기 때문에 두께 방향의 잔류 응력 성분은 나머지 두 방향 성분의 잔류 응력에 비해 무시할 정도로 작으므로 평면 응력으로 간주할 수 있고, 이러한 특징의 잔류 응력을 측정하는 적당한 방법이 Treuting과 Read⁽¹³⁾에 의해서 개발된 층제거법이다.

이 층제거법은 구속되지 않은 플라스틱 사출품의 잔류 응력이 자체적으로 평형상태에 있다는 점에 착안하여 시편의 표면으로 부터 연속적으로 일정하게 층을 제거함으로써 행해진다. 이 제거되어진 층들이 갖고 있던 잔류 응력이 제거되어지면서 시편의 나머지 부분의 평형이 깨어진 후 크기는 같고 방향은 반대인 휨과 모멘트에 의해 신장되어지고 굽어지면서 다시 힘의 평형 상태로 돌아가게 될 것이다. 이 측정 방법은 시편의 재료는 선형 탄성적이며, 등방성 물질이고 잔류 응력은 평면상에서는 일정하며

두께 방향으로만 변하며 시편 층의 제거 과정은 나머지 시편의 잔류 응력 상태에 변화를 주지 않는다는 가정하에서 이루어진다.

Fig. 3에 얇은 판형의 시편과 그에 따른 좌표축을 나타내었으며 초기의 윗면과 아래면까지의 거리를 각각 $z = z_0$, $z = -z_0$, 로 하고 대기압 상태에서 x, y 방향으로의 응력 분포는 일정하다고 가정하면 남은 스트레스 성분은 σ_{xx} 와 σ_{yy} 이다. 외부에서 작용하는 힘과 모멘트가 없으므로, 시편 내에서 x축에 수직인 단면에 대해서 다음의 평형 조건을 만족한다.

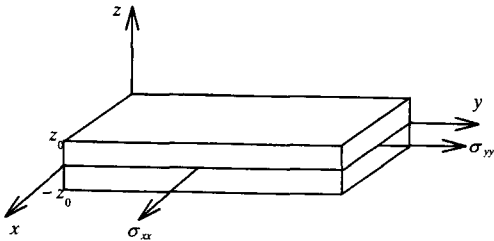


Fig. 3 A sample and its coordinate system.

$$F_x = \int_{-z_0}^{z_0} \sigma_{xx}(z) dz = 0 \quad (1)$$

$$M_x = \int_{-z_0}^{z_0} \sigma_{xx}(z) z dz = 0 \quad (2)$$

이 후 Fig. 4와 같이 어떤 두께 만큼의 층이 제거된다면 $z = z_1$ 이 새로운 윗면의 좌표가 되고 제거 과정에서 잔류 응력이 더해지지 않는다면 나머지 부분의 응력 분포는 보존되므로 단면에 작용하는 힘과 모멘트는 평형이 깨지게 된다. 층들이 제거되어질 때마다의 시편에서의 힘과 모멘트는 0이 아니므로 신장, 압축과 휨이 발생하고, 이때의 곡률은 z_1 의 함수로 표현할 수 있으므로 이 곡률을 이용하여 모멘트를 계산할 수 있다⁽¹⁴⁾.

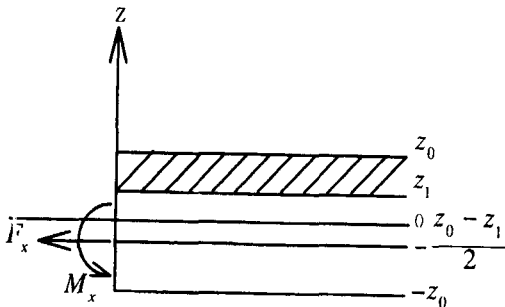


Fig. 4 A cross section showing displacement of a midplane after layer removal.

이때 각 위치에서의 곡률(curvature) ϕ 는 한쪽 끝을 고정시켰을 때 Fig. 5와 같이 변위를 측정함으로써 다음의 식을 사용하여 구할 수 있다.

$$\phi(z_1) = \frac{2\delta(z_1)}{L^2} \quad (3)$$

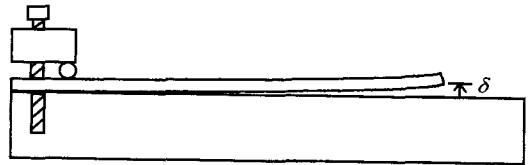


Fig. 5 A mounting block to hold the specimen for curvature measurement

이렇게 측정되어진 값 ϕ 는 불연속적인 값이므로 다항식 보간법(polynomial regression)을 사용하여 잔류 응력을 구하였다. 그리고 잔류 응력이 등방성인 경우에는 $\phi_x(z_1) = \phi_y(z_1)$ 이므로 $\sigma_{xx}(z_1) = \sigma_{yy}(z_1)$ 이며 다음과 같은 최종식으로부터 두께에 따른 잔류 응력의 분포를 구할 수 있다.

$$\sigma_{xx}(z_1) = \frac{E}{6(1-\nu)} \left[(z_0 + z_1)^2 \frac{d\phi_x(z_1)}{dz_1} + 4(z_0 + z_1)\phi_x(z_1) - 2 \int_{z_1}^{z_0} \phi_x(z) dz \right] \quad (4)$$

이러한 평면 응력을 두께의 함수로 구하는 과정에서 주목할 것은 오차의 발생요인은 앞에서 제시한 여러 가정들을 포함하여 (4)식의 첫 번째 항인 미분값을 구하는 과정을 포함함을 밝혀두며 앞으로 층제거법의 개선되어야 할 사항임을 발견하였다.

2.2 광탄성과 복굴절

1816년 David Brewster는 투명한 등방성 물질에 응력을 가하면 광학적으로 이방성을 띄게 된다는 것을 발견하였다. 이러한 현상을 광탄성이라 하며 선형 광탄성 이론을 수식으로 나타내면 다음과 같이 표시할 수 있으며 각각의 경우에 광축은 응력의 방향과 일치하고 이방성에 의해서 유발되는 주 굴절률의 차이인 복굴절은 주응력에 비례한다.

$$n_i - n_j = C(\sigma_i - \sigma_j) \quad (5)$$

여기에서 $i, j, k = I, II, III$ 이며 $i \neq j \neq k \neq i$ 이다.

또한 $\sigma_I, \sigma_{II}, \sigma_{III}$ 는 각각 세 방향의 주응력이며 n_i 는 주축 i 방향으로 편광된 빛의 굴절률이며, C 는 광탄성 계수이다. 이 선형 광탄성 관계식은 여러 고분자들에 대하여 상당히 넓은 범위에서 증명⁽¹³⁾되어 있고 폴리스티렌의 광탄성 계수는 유리 전이 온도 이상에서는 -4800 Br 이고 유리 전이 온도 이하에서는 8~10 Br로 알려져 있다.

만약 선형 광탄성 이론에서 광탄성 계수의 부호에 주의 를 기울이면 복굴절의 값은 다음과 같이 나타낼 수 있으며 광탄성 계수가 온도와 시간의 함수라고 생각할 때 이를 광점탄성 이론이라 한다.

$$\Delta n = C \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (2\sigma_{12})^2} \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{|\sigma_{11} - \sigma_{22}|} \quad (6)$$

2.3 실험 장치 및 방법

본 실험에서는 물성이 비교적 잘 알려진 폴리스티렌 (Dow Chemical의 PS 615 APR)을 재료로 사용하였으며 자유 급냉시키기 위해 시편을 Squaroid사의 진공 오븐을 이용하여 잔류 응력을 제거한 후⁽¹¹⁾ 원하는 초기 온도를 유지하다가 20℃의 물에 넣어 대기압 하에서 냉각시켰다. 이렇게 자유 급냉시킨 시편을 Buehler사의 저속 다이아몬드 톱(diamond sawing machine, Isomet)을 이용하여 길이 65 mm, 폭 7.0 mm의 시편으로 잘라 내어 잔류 응력의 측정에 사용하였다. 한편, 구속 급냉의 경우 Fig. 1(b)와 같은 피스톤과 실린더의 형태로 구성된 금형을 특별 제작하여 고온 프레스를 사용하여 냉각 과정 중 두께 방향으로 일정한 압력을 가할 수 있도록 하였다. 본 실험에서 사용한 시편은 잔류 응력의 측정이 용이하고 평면 방향으로 일정한 응력이 생성될 수 있도록 지름이 100 mm로 설계되었으며 금형 내부에 들어가는 펠렛의 양을 조절하여 공칭 두께가 1 mm, 2 mm 및 4 mm인 시편을 성형할 수 있었다. Fig. 6(a)와 (b)는 각각 본 연구를 위해 제작한 금형의 측면도와 프레스에 장착된 상태를 보이고 있다. 금형의 설계시 프레스에 장착된 온도 조절용 냉각 채널외에 추가로 금형 내부에 샘플의 표면으로부터 같은 거리가 떨어진 위치에 양면에 각각 4개의 지름 8 mm인 냉각 채널을 설치하여 급냉 실험 조건에 알맞도록 설계하였으며 실린더 벽은 두개의 반원형으로 구성된 것이 특징이다. 이는 성형시 클램프에 의해 밀면에 고정되어있게 되나 급냉시킨 시편이 만들어지고 피스톤 축을 후진시킨 후 이 두 개의 반원형 부분을 제거하면 시

편을 제거하기 용이하게 설계된 것이다.

이렇게 만들어진 시편의 잔류 응력을 측정하기 위하여 얇은 층의 제거에 20,000 rpm까지 회전이 가능한 라우터 모터를 갖춘 인장 시편 가공 장비(대부과학, DB-5)를 제작하여 사용하였다. 시편의 층과 수평을 유지하기 위하여 Fig. 7과 같은 수평 보조대와 깊이를 조절하기 위한 절삭 보조대와 마이크로미터를 이용하였고, 양면 테이프를 사용하여 접착시킨 뒤 수평 보조대를 따라 움직이면서 층을 제거하였다⁽¹⁴⁾. 그 뒤 테이프로부터 시편을 추가 응력이 유발되지 않도록 떼어 낸 다음 Fig. 5에 보인 바와

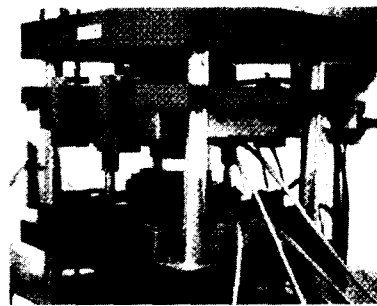
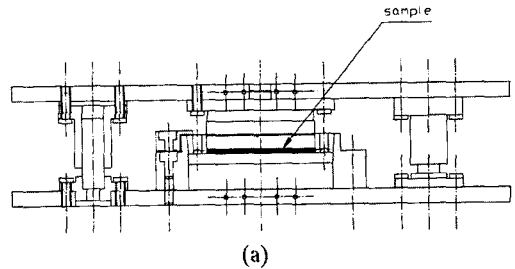


Fig. 6 A side view of the mold(a) and a photograph of the whole system installed in a press (b).

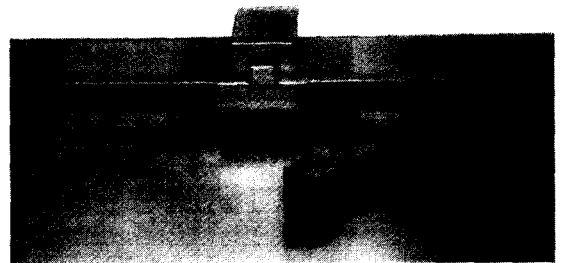


Fig. 7 A modified cutting guard and a sample holder for layer removal.

같은 고정 블록을 사용하여 곡률을 측정하였으며 고정 블록의 한 끝은 그림에서처럼 나사와 스프링으로 되어 있어 시편의 한 쪽 끝단을 지름 2 mm인 실린더 형상의 봉을 사용하여 고정하고 그 처짐량을 측정하여 곡률을 측정하였다. 한편, 처짐량을 측정하는 데는 Mitutoyo사의 형상 프로젝터를 사용하여 확대하여 측정하였다. 이렇게 측정 후 다시 양면 테이프로 수평 보조대에 접촉 시킨 뒤 다시 일정하게 층을 제거한 후 처짐량을 측정한다. 이렇게 층의 제거와 처짐량의 측정을 시편 두께의 절반까지 시편의 두께에 따라 10 또는 20 으로 일정하게 나누어 반복 측정하였다.

한편, 복굴절의 측정은 앞에서 언급한 다이아몬드 톱(diamond saw)을 이용하여 측정범위에 따라 두께 0.3 - 0.6 mm인 시편을 자른 후 사상을 거친 후 편광 현미경을 사용하여 측정하였다⁽¹⁶⁾.

3. 결과 및 토의

자유 급냉과 구속 급냉시 발생하는 잔류 응력과 복굴절의 상태에 관한 결과를 차례로 보이기로 한다.

3.1 자유 급냉(free quenching)의 실험 결과

자유 급냉의 실험은 본 실험에 사용한 폴리스티렌(polystyrene, DOW STYRON 615 APR)을 사용한 다른 실험이나 수치 해석의 결과들과 비교하기 위해 수행되었다.

우선 Fig. 8에 초기 온도 120°C에서 20°C의 물로 자유 급냉시킨 공칭 두께 2 mm인 시편의 두께 방향의 잔류

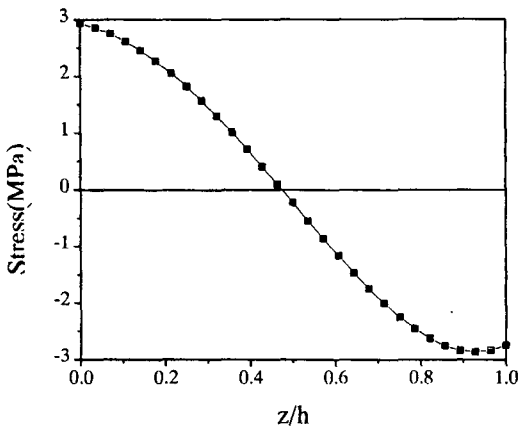


Fig 8 The experimental gapwise distribution of lateral stress (σ_{xx}) from a free quenched sample. (Initial temperature : 120 °C, thickness : 2 mm)

응력의 분포를 보이고 있다. h를 시편의 반두께라 할 때 z/h가 0인 경우, 즉, 중심에서 인장 응력을 보이고 바깥 쪽에서 압축 응력을 나타내는 전형적인 free quenching 시 응력 분포를 잘 나타내고 있다. 하지만, 벽면 부근에서의 응력의 값이 일반적으로 알려진 수치 해석에 의한 예상치보다 조금 작게 나왔으며 이는 2.1 절에서 언급한 식 (4)의 미분 값에 기인한 것이다. 대부분의 실험자들은 반 두께를 약 8 - 10 등분하여 잔류응력의 분포를 측정하였지만 본 실험에서는 20등분하여 표면 부근의 분포를 좀 더 정확히 측정하여 멱함수로 나타낸 후 미분한 결과를 이용하였으며 이 논문의 후반부에 보일 자유 냉각시 자유 체적을 감안한 결과와 잘 일치함을 볼 수 있다. 한편, 중심에서의 최대 인장 응력의 값은 약 3.0 MPa로 현재까지 알려진 다른 실험 결과들과도 잘 일치한다.

Fig. 9에는 같은 시편의 복굴절의 분포를 보이고 있으며 Shyu⁽¹¹⁾와 Lee 등⁽⁴⁾의 폴리스티렌 시편을 사용한 복굴절의 분포 결과들과 비교하였다. Shyu는 본 논문과 같은 그레이드를 사용하여 두께 2.0 mm인 시편을 초기 온도 120°C에서 얼음물에 자유급냉한 결과이며 Lee 등은 Shell TC 3-30를 사용하여 두께 1/8 inch(3.175 mm)인 시편을 같은 초기 온도 120°C에서 얼음물에 자유급냉한 결과이다. 본 실험의 결과는 초기 온도는 같지만 추후 구속 급냉의 결과와 비교하기 위해 20°C로 자유 급냉시

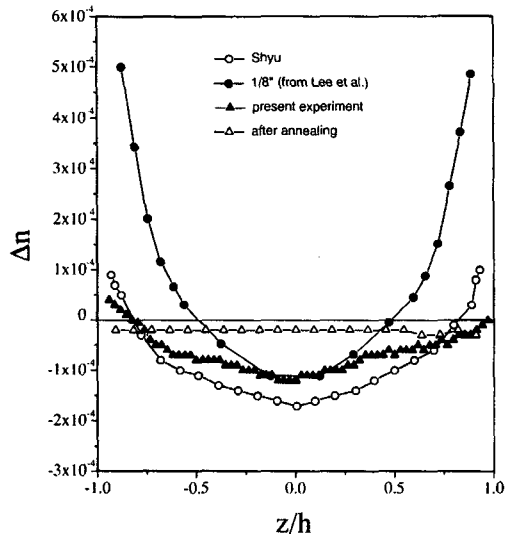


Fig. 9 The experimental gapwise distribution of birefringence (Δn) from free quenched sample. (-○- : from Shyu⁽¹¹⁾, -●- : Lee et al.⁽⁴⁾, -△- : after annealing, -▲- : present data)

켰으며 중심 부위에서 음의 값을 나타내며 바깥면 근처에서 양의 값을 나타내는 경향은 같으나 그 값은 위에서 언급한 다른 실험 결과들과 정량적인 차이를 보이고 있음을 확인할 수 있었다.

본 실험에서 사용한 시편은 앞의 장에서 설명한 구속 냉각 금형을 사용하여 서냉시킨 시편을 풀림(annealing) 과정을 거친 후 응력이 없는(stress free) 상태로 만들어 사용하였으나 Fig. 9에 같이 보인 바와 같이 자유 급냉 전 샘플에 $-2.0 \sim -3.0 \times 10^{-5}$ 의 복굴절 값이 남아있었기 때문에 z/h 가 1.0 근처에서 완전히 양의 값으로 발전되지 못했음을 발견할 수 있다.

3.2 구속 급냉(constrained quenching)의 실험 결과

구속 급냉의 실험은 2장에서 보인 특수 제작한 금형을 사용하여 초기 온도를 120℃를 중심으로 150℃와 105℃로 달리하고 금형내에 들어가는 펠렛의 양을 조절하여 공칭 두께가 각각 1.0 mm, 2.0 mm와 4.0 mm인 시편을 제작하여 자유 급냉(free quenching) 상태에서의 잔류 응력 및 복굴절의 구조와 비교하기로 한다.

우선 Fig. 10(a)에 초기 온도 120℃, 150℃와 105℃에

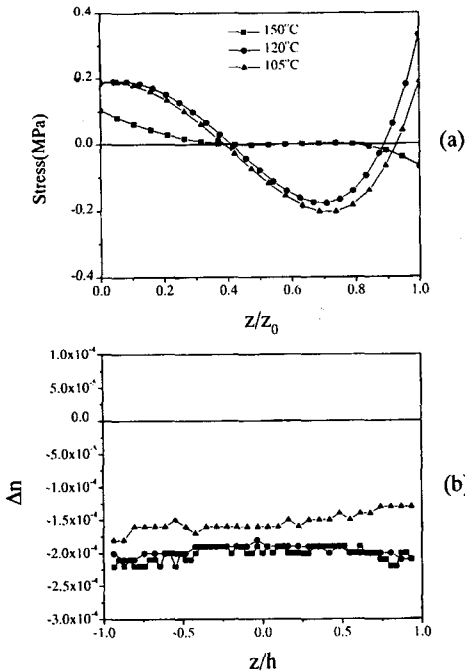


Fig. 10 The experimental gapwise distribution of lateral stress (σ_x) (a) : and birefringence(Δn) (b) : from constrained quenched sample. (Initial temperature : 120, 150 ℃ and 105 ℃, respectively, thickness : 2 mm)

서 냉각 채널에 20℃의 물을 통과시켜 10기압의 일정한 압력이 걸린 상태에서 구속 급냉시킨 공칭 두께 2 mm인 시편의 두께 방향의 잔류 응력의 분포를 보이고 있다.

z/h 가 0인 경우, 즉, 중심에서 인장 응력을 보이고 바깥 쪽에서 압축 응력을 나타내는 전형적인 자유 급냉시 응력 분포와는 다르게 초기 온도 150℃의 경우를 제외하고 벽면 부근에서의 응력의 값이 다시 양의 값을 보이는 전혀 다른 형태를 보인다. 한편, 중심에서의 최대 인장 응력의 값을 주로 비교하게 되는데 자유 급냉시 최대 약 3.0 MPa보다 훨씬 작은 값으로 약 한 오더(order)가 작은 0.2 ~ 0.3 MPa의 범위에 드는 값을 보이며 전체적으로도 작은 응력 값을 보이고 있다.

Fig. 10(b)에는 같은 시편의 복굴절의 분포를 보이고 있으며 놀랍게도 거의 일정한 음의 값이 두께 방향에 분포하고 있음을 알 수 있다. 약 $-1.5 \sim -2.0 \times 10^{-4}$ 의 복굴절 값은 같은 폴리스티렌을 사용하여 사출 성형된 디스크의 복굴절 연구⁽¹⁶⁾시 중심 부위에 남는 복굴절의 값과 잘 일치하고 있다.

또한, Fig. 11(a)에 초기 온도 120℃, 150℃와 105℃에서 10기압의 일정한 압력이 걸린 상태에서 구속 급냉시

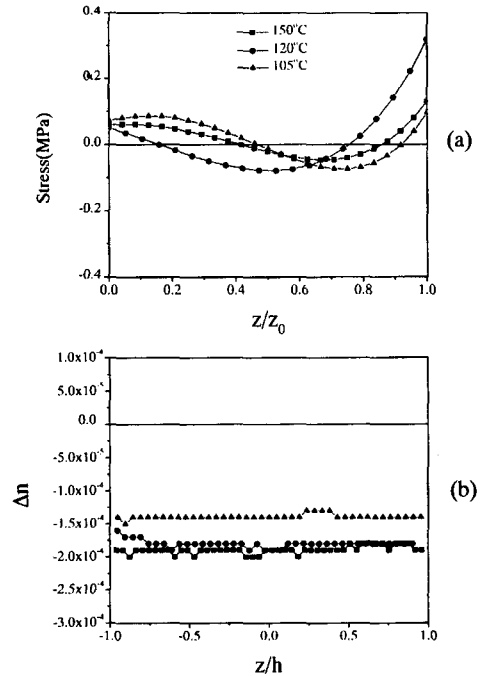


Fig. 11 The same as in Fig. 10. (thickness : 4 mm)

긴 공칭 두께 4 mm인 시편의 두께 방향의 잔류 응력의 분포를 보이고 있다. 공칭 두께 2 mm의 경우와 마찬가지로 벽면 부근에서의 응력의 값이 다시 양의 값을 보이는 자유 급냉과 전혀 다른 형태를 보인다. 한편, 중심에서의 최대 인장 응력의 값은 공칭 두께 2 mm의 경우보다 작은 값으로 나타나고 있다.

한편, Fig. 11(b)에는 같은 시편의 복굴절의 분포를 보이고 있으며 놀랍게도 공칭 두께 2 mm의 경우와 마찬가지로 음의 값을 가지며 약 $-1.4 \sim -2.0 \times 10^{-4}$ 로 거의 일정한 값이 두께 방향에 분포하고 초기 온도가 낮을수록 복굴절의 절대값이 작게 남아있음을 알 수 있다.

마지막으로 Fig. 12(a)에 초기 온도 120°C, 150°C와 105°C에서 앞에서의 경우와 같은 압력이 걸린 상태에서 구속 급냉시킨 공칭 두께 1 mm인 시편의 두께 방향의 잔류 응력의 분포를 보이고 있다. 이 경우 공칭 두께 2 mm의 경우와는 다르게 중심 부위에서 양의 값, 벽면 부근에서의 응력의 값이 음의 값을 보이는 자유 급냉과 유사한 형태를 보인다. 이는 두께의 변화에 따라 급냉시 각 위치에서의 시간에 따른 온도의 변화가 최종 응력 분포에 결정적인 영향을 미침을 알 수 있다.

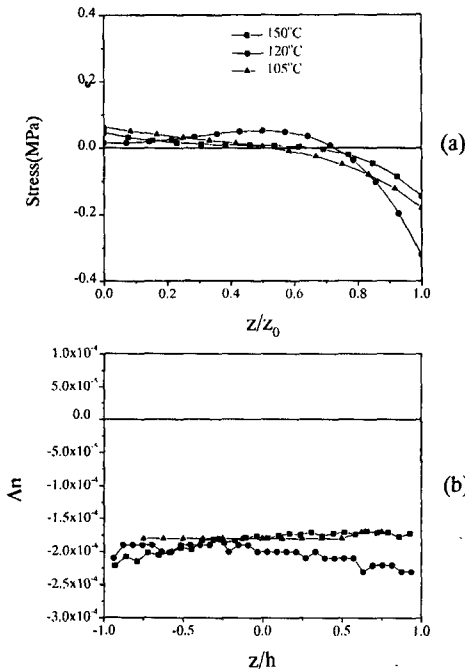


Fig. 12 The same as in Fig. 10. (thickness : 1 mm)

Fig. 12(b)에는 이 경우의 복굴절의 분포를 보이고 있으며 놀랍게도 공칭 두께 2 mm나 4 mm의 경우와 마찬가지로 음의 값을 가지며 약 -2.0×10^{-4} 로 거의 일정한 값이 두께 방향에 분포하고 있음을 알 수 있다.

3.3 구속 급냉(constrained quenching)시 볼록렌즈형 시편의 실험 결과

두께의 영향이 복굴절의 값에 어떤 영향을 미치는가 알기 위하여 위의 금형을 사용하여 양면에 볼록렌즈 형태의 구형 인서트를 제작하여 구속 급냉의 실험을 시행하였다. 초기 온도를 120°C로 유지하고 금형내에 들어가는 펠렛의 양을 조절하여 중심부의 공칭두께가 3.0 mm, 가장자리의 두께가 1.0 mm인 시편을 제작하여 10기압의 일정한 압력이 걸린 상태에서 구속 급냉상태에서의 복굴절의 구조를 측정하여 두께가 일정한 경우와 비교하였다.

Fig. 13에 두께가 각각 3.0, 2.0, 1.0 mm인 부분의 두께방향의 복굴절의 분포를 보이고 있다. 두께가 일정한 경우와 마찬가지로 음의 값을 가지며 약 $-1.5 \sim -2.0 \times 10^{-4}$ 로 거의 일정한 값이 두께 방향에 분포하고 두께가 두꺼운 부분일수록 복굴절의 절대값이 작게 남아있음을 알 수 있다.

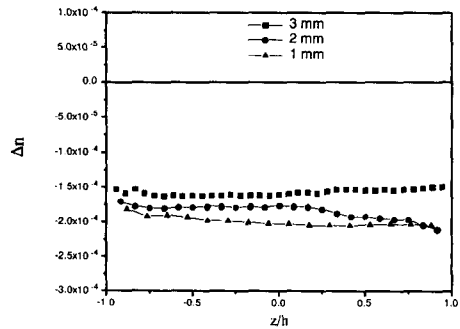


Fig. 13 The experimental gapwise distribution of birefringence(Δn) from constrained quenched spherical lens sample. (Initial temperature : 120 °C, the thickness are 1.0, 2.0 and 3.0 mm , respectively)

3.4 수치 해석의 결과와의 비교

Santhanam(12)은 자유 급냉과 구속 급냉으로 나누어 잔류 응력의 분포를 수치 해석적으로 예측하였으나 온도의 이력을 계산시 사출과정의 온도 변화를 포함하여 논문에서 의도하는 초기 조건과는 맞지 않았으며 비체적의 계산시에는 열적 평형상태를 가정하였다. 이에

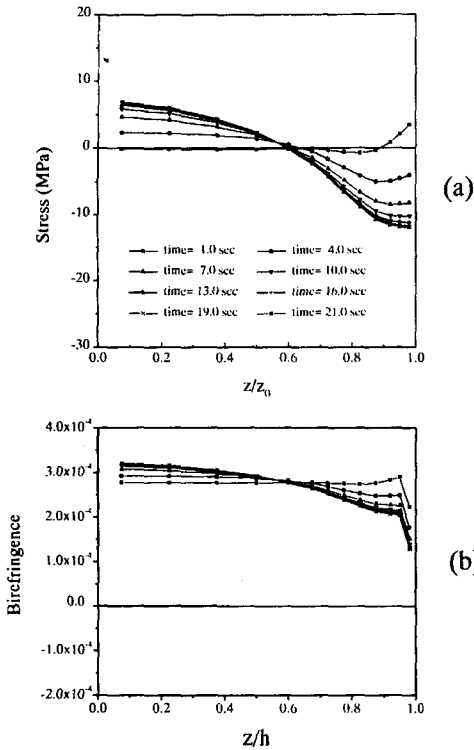


Fig. 14 The predicted stress(a) and birefringence(b) for various time without free volume theory under the condition of free quenching. (Initial temperature : 120 °C, thickness : 2 mm).

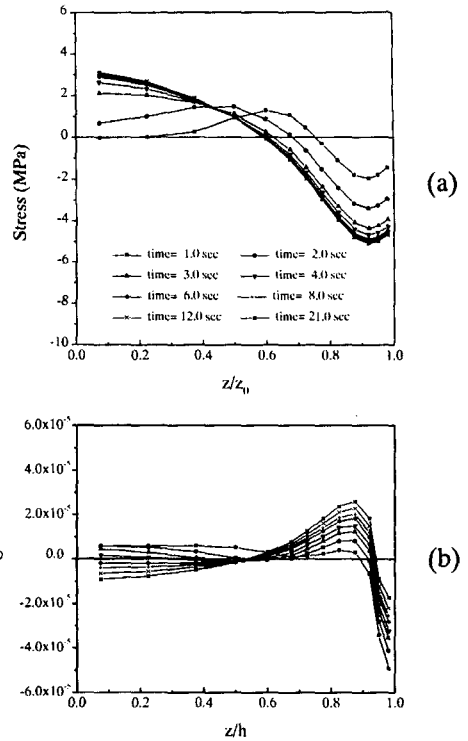


Fig. 15 The predicted stress(a) and birefringence(b) including free volume theory under the condition of free quenching (Initial temperature : 120 °C, thickness : 2 mm).

Narayanaswamy^{(8),(9)}가 밝힌 바와 같은 잔류응력에 미치는 자유체적이론의 영향을 알아보기 위하여 Santhanam의 방법에 Shyu⁽¹¹⁾의 실험에 의한 탄성이완계수와 팽창성계수의 결과를 이용하여 체적이완 현상을 첨가한 잔류 응력과 복굴절의 형성 과정을 수치계산에 의해 구한 결과를 보이기로 한다.

Fig. 14과 Fig. 15은 초기 온도가 120°C에서 20°C로 자유 냉각시에 각각 자유체적이론을 이용하지 않고 계산한 잔류 응력과 복굴절의 값과 자유체적이론을 이용하여 계산한 잔류 응력과 복굴절의 값을 나타낸 것이다. 잔류 응력은 중심에서 인장, 표면 근처에서 압축 응력을 보이는 경향을 보이거나 표면 부근에서 완만하게 압축 응력이 작아지는 경향이 나타났고, 중심에서의 응력의 크기가 자유체적이론을 이용한 결과가 자유체적이론을 이용하지 않고 계산한 결과의 약 50%임을 알 수 있다.

복굴절의 경우에는 자유체적이론을 이용하지 않은 경우 전부 양의 값이 나왔으나 자유체적이론을 이용할 경우 중

심부에서의 값이 양의 값에서 음의 값으로 바뀌고 표면 부근에서는 양의 값이, 그리고 표면에서는 음의 값으로 떨어짐을 알 수 있다.

마지막으로 보이는 Fig. 16은 120°C 에서 자유 급냉시

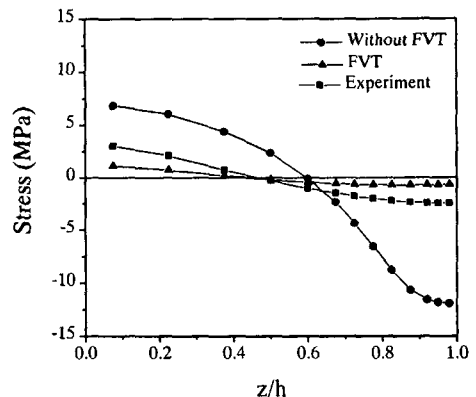


Fig. 16 A comparison between experimentally measured residual stress and predicted results.

킬 때의 잔류 응력의 분포를 실험치와 수치해석에 의한 예측치를 각각 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 자유체적이론을 고려할 때 훨씬 더 정확한 값을 얻을 수 있으며 정성적인 예측 뿐 아니라 정량적인 예측도 상당히 정확하다는 것을 알 수 있다.

이상의 자유 급냉하에서의 실험과 수치 해석의 결과 자유체적이론을 고려할 경우 훨씬 더 정확한 잔류 응력의 예측이 가능하다는 것을 알 수 있었으나 복굴절의 예측은 진성적으로는 현상을 설명할 수 있으나 아직도 최종 값을 정량적으로 예측하기에는 좀 더 정확한 광점탄성 계수에 대한 데이터의 확보가 필요하다는 것을 알 수 있다.

구속 급냉시 수치 해석의 결과로는 Santhanam⁽¹²⁾의 잔류 응력에 관한 결과가 있으며 그 결과는 중심에서 인장, 다시 압축 구간 존재하며 표면에서 인장이 생기는 형태를 보인다. 하지만 이 결과는 구속 급냉시 초기 온도 분포를 사출 성형 과정에서 구했으므로 본 연구의 초기 조건과 다르다. 또한, 이동계수(shift factor)가 온도뿐 아니라 압력의 함수이기도 하지만 아직도 충분한 실험 데이터가 부족해 수치해석에 의한 예측에는 많은 무리가 따르고 있다. 그래도 정성적으로는 자유 급냉과는 아주 다른 형태의 구조를 가질 수 있음을 보여주며 본 논문의 두께 40 mm, 2.0 mm의 경우와 정성적으로 잘 일치하고 있어 흥미로운 결과를 제공하고 있다.

그러나 구속 급냉시 복굴절의 분포는 거의 모든 구간에서 음의 값이 나타나는 형태로 예측은 되지만 아직 정량적으로까지는 예측이 되지않고 있어 아직도 연구가 더 필요한 부분으로 남아있으며 광탄성 계수의 점탄성적인 변화에 관한 좀 더 광범위한 실험 결과나 좀더 진보된 이론적 뒷받침을 기다리고 있는 실정이다.

4. 결 론

본 연구에서는 자유 및 구속 급냉시 발생하는 잔류 응력과 복굴절의 분포를 실험을 통해 그 최종 구조를 밝혀주며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 구속 급냉시 본 연구를 위하여 특수 제작한 금형을 사용하여 만든 시편의 실험 결과는 자유 급냉과는 달리 잔류 응력의 분포가 중심부에서는 2 mm(150℃ 제외)와 4 mm의 경우 중심으로부터 인장, 압축 그리고 바깥쪽에 인장이 남는 패턴이 생기나 두께 1 mm의 경우는 자유 급냉시와 같은 패턴인 중심부에 인장, 바깥 층에 압축이 생기며 전체적인 값은 한 오더(order) 낮은 값으로 생긴

다.

2. 구속 급냉시 복굴절의 분포는 자유 급냉과는 달리 두께 방향으로 놀랍게도 벽면 근처에서의 큰 변화 없이 상당히 일정하게 분포하며 약 $-1.5 \sim -2.0 \times 10^{-4}$ 의 범위에 분포하며 초기온도가 낮을수록 두께가 두꺼울수록 복굴절의 절대값이 작게됨을 발견할 수 있지만 그 값의 차이는 별로 크지 않았다.

3. 자유 급냉시 자유체적이론을 사용한 경우와 사용하지 않은 경우 모두 중심부에서는 인장 응력이 표면 부근에서는 압축 응력이 발생한다는 것을 알 수 있다. 자유체적이론을 사용한 경우 이를 사용하지 않은 경우 보다 최대 인장 응력이 약 50% 정도 작게 계산되어졌으며 실험적으로 측정된 잔류 응력과 비교할 경우 자유체적이론을 사용하여 계산한 경우 중심에서의 잔류 응력의 크기와 벽면 측 잔류응력의 감소 등의 경향을 예측함에 있어 훨씬 정확해짐을 알 수 있었다.

4. 구속 급냉시 잔류 응력과 복굴절의 분포는 정성적으로는 설명이 가능하나 정량적인 예측에는 아직 더 자세한 실험 정보가 필요하며 본 실험의 결과가 조금이나마 도움이 되기를 기대한다.

참 고 문 헌

1. Bartenev, G. M., Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki, Vol. 19, p. 1423, 1949.
2. Indenbom, V. L., "On the Theory of the Tempering of Glass.", Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki, Vol. 24, pp. 925-928, 1954.
3. Aggarwala, B. D. and Saibel, E., "Tempering Stresses in an Infinite Glass Plate.", Physics and Chemistry of Glasses, Vol. 2(#5), pp.137-140, 1961.
4. Lee, S. and De La Vega, J. and Bougue, D.C., "Residual Stresses and Birefringences in Large, Quenched Samples." Journal of Applied Polymer Science, Vol. 31, pp. 2791-2803, 1986.
5. Morland, L. W. and Lee, E. H., "Stress Analysis for Linear Viscoelastic Materials with Temperature Variation.", Trans. Soc. Rheol., pp. 233-263, 1960.
6. Lee, E. H., Rogers, T. G. and Woo, T.

- C., "Residual Stresses in Glass Plate Cooled Symmetrically from Both Surfaces.", *J. of The American Ceramic Society*, Vol. 48#9), pp.480-487, 1965.
7. Narayanaswamy, O. S. and Gardon, R., "Calculation of Residual Stresses in Glass on Cooling Rate.", *J. of The American Ceramic Society*, Vol. 52#10), pp. 491-498, 1969.
 8. Narayanaswamy, O. S., "A model of Structural Relaxation in Tempering Glass.", *J. of The American Ceramic Society*, Vol. 54#10), pp. 491-498, 1971.
 9. Narayanaswamy, O. S., "Stress and Structural Relaxation in Tempering Glass.", *J. of The American Ceramic Society*, Vol. 61#3-4), pp. 146-152, 1978.
 10. Rusch, K. C., "Time-Temperature Superposition and Relaxation Behavior in Polymeric Glasses.", *J. Macromol. Sci. -PHYS.*, B22), pp.179-204, 1968.
 11. Shyu, G. D., "Birefringence and Residual Stresses in Molded Articles of Amorphous Polymers.", Ph. D. Thesis, The University of Akron, 1993.
 12. Santhanam, N., "Analysis of Residual Stresses and Post-Molding Deformation in Injection-Molded Components.", Ph. D. Thesis, Cornell University, Ithaca, 1992.
 13. Treuting, R. G. and Read, W. T. J., "A Mechanical Determination of Biaxial Residual Stress in Sheet Materials.", *Journal of Applied Physics*, Vol. 22#2), pp. 130-134, 1951.
 14. Crouthamel, D. L., "Residual Stress and Mechanical Properties of Injection Molded Parts.", Technical Report , No.40, Cornell University, Ithaca, 1983.
 15. Janeschitz-Kriegl, *Polymer Melt Rheology and Flow Birefringence.*, Springer-Verlag, Berlin, 1983.
 16. Yoon, K., "An Experimental Study on Precision Injection Molding of Center-gated disks", *The Korean J. of Rheology*, Vol. 7, pp. 19-27, 1995.