



케미칼 크래킹 방법을 이용한 플라스틱 제품의 응력측정에 관한 연구

원시태 · 김태범 · 이 실 · 원정민 · 차규호 · 류민영[†]

서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

접수일(2012년 10월 11일), 수정일(2012년 11월 13일), 게재확정일(2012년 11월 27일)

A Study on the Stress Measurement in a Plastic Product using Chemical Cracking Method

S. T. Won, T. B. Kim, S. Lee, J. M. Won, K. H. Cha, and M. -Y. Lyu[†]

Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology,
172 Gongneung-dong, Nowon-gu, Seoul, 139-743, S. Korea

(Received October 11, 2012, Revised November 13, 2012, Accepted November 27, 2012)

요약 : 사출성형품에서 잔류응력은 성형과정 중 열과 전단응력에 의해 형성된다. 잔류응력을 평가하는 방법은 여러 가지가 있는데, 불투명한 제품에서의 잔류응력은 케미칼 크래킹 테스트 방법으로 측정 할 수 있다. 이 방법은 시편과 솔벤트가 반응하게 하여 측정하는 방법이다. 크랙은 응력의 크기에 따라 형성되기 때문에 크랙의 크기나 수를 측정하여 응력을 정량적으로 측정한다. 본 연구에서는 케미칼 크래킹 방법으로 잔류응력을 측정하기 위한 기초자료인 응력과 크랙과의 관계를 규명하기 위한 실험을 수행하였다. 시편을 제작하기 위한 재료는 PC/PBT와 PC/ABS사용하였으며 지그를 이용하여 시편을 변형을 주고 이를 솔벤트에 담겨서 크랙을 유도하였다. 솔벤트는 tetrahydrofuran과 methyl alcohol을 이용하여 제조하였다. 두 재료 모두 응력이 어느 정도 이상에서만 크랙이 형성되었으며, 크랙은 응력이 증가함에 따라 대략 2차함수로 증가하였다.

ABSTRACT : Residual stress in the injection molded part is originated from thermal shrinkage and shear stress during injection molding process. There are many measurement methods of residual stress in the plastic part. Residual stress in opaque products can be measured by chemical cracking test. This method enables the solvent and specimen to react and to cause cracks. Cracks developed according to the level of residual stress. Thus the stresses in plastic part can be quantitatively measured by counting the number of cracks or measuring the size of cracks. Relationship between stress and number of cracks in a plastic specimen has been investigated in this study. Bergen jig was used to give a strain in the specimens those were molded using PC/PBT and PC/ABS. Solvent for the chemical cracking test was prepared using tetrahydrofuran and methyl alcol with the ratio of 1 to 3. Stresses in the specimen can be calculated by strains those were imposed by Bergen jig. Cracks were developed for stress higher than certain level. The number of cracks increased by second order function for stress.

Keywords : residual stress, injection molding, chemical cracking testing, PC/PBT, PC/ABS

I. 서 론

응력이 작용되지 않은 상태의 물체에 물리적인 자극을 작용한 후 자극이 제거된 상태에서도 물체에 잔류하고 있는 응력을 잔류응력이라 한다. 플라스틱 성형품의 잔류응력은 성형과정 중 유동에 의해 발생하거나 열에 의해 발생되어 성형품의 내부에 남아있게 되는데, 이러한 잔류응력 때문에 제품이 고유의 기능을 발휘하지 못하고 파괴되거나 변형이 발생하게 된다. 이러한 잔류응력은 외부에서 가해지는 응력과 비슷한 효과를 발휘하고 있어 물체나 재료에 외력이 작용한다고 볼

수 있다. 따라서 고품질의 플라스틱 성형품을 제조하기 위해서는 이러한 잔류응력을 평가하고 제어하는 것이 필요하다.^{1,2}

플라스틱 성형품의 잔류응력을 평가하는 방법은 Hole Drilling 방법, Layer Removal 방법,^{3,4} 광탄성(Photoelasticity) 방법,⁵ 케미칼 크래킹 방법, 그리고 X-ray회절법⁶등 많이 있다. Hole Drilling방법과 Layer Removal방법은 시편의 두께방향으로의 잔류응력을 측정할 수 있고, 광탄성을 이용한 방법은 편광 된 빛이 투명한 시편을 통과하면서 나타나는 복굴절을 이용하는 것으로 두께방향의 평균값을 얻게 된다.¹ 복굴절의 크기가 시편의 잔류응력 크기와 비례하여 색의 변화로 나타나기 때문에 잔류응력을 평가 할 수 있다. 케미칼 크래킹 방법은 플라스틱 시편에 케미칼 처리를 하여 생성되는 크랙을 이용하여 잔류응

[†]Corresponding Author. E-mail: mylyu@seoultech.ac.kr

력을 평가하는 방법으로 사용하는 케미칼에 의한 크랙과 응력과의 관계를 먼저 규명하여 이를 실제 제품의 평가에 이용한다. 즉, 시편에 분포된 응력과 이에 따른 케미칼 크랙의 크기나 수 등의 관계를 이용하여 제품에 나타난 크랙을 관찰하여 응력을 평가하는 것이다. 케미칼 크랙킹 방법에서 가장 중요한 핵심은 응력의 크기와 크랙과의 관계를 명확히 규명할 수 있는 데이터를 확보하는 것이다.

본 논문에서는 케미칼 크랙에 의해 잔류응력을 평가하는 방법에서 PC/PBT와 PC/ABS 일로이 수지에 대하여 크랙과 응력의 크기와의 관계를 확립하고자 하였다. 시편에 응력을 가하기 위해 변형을 줄 수 있는 지그를 이용하였으며, 지그에 장착된 시편을 솔벤트에 담귀서 시편에 크랙을 유발시킨 후 시편에 작용된 응력과 크랙과의 관계를 조사하였다.

II. 재료 및 시편

1. 재료

본 연구에서 사용된 수지는 삼양사의 PC/PBT인 TRILOY 170BK-615L과 PC/ABS인 TRILOY 215NA-6231L이다. 두 수지는 PC를 70%포함하고 PBT와 ABS를 각각 30% 포함한 일로이로 PC/PBT는 내화확성이 요구되는 공업용 부품에 많이 활용되고, PC/ABS는 기계적 강성이 필요한 자동차 부품이나 전기 및 전자제품의 케이스 등에 활용되고 있다.

PC/PBT와 PC/ABS를 이용한 시편에 크랙을 유발시키기 위해 본 연구에서 사용한 솔벤트는 THF (Tetrahydrofuran)와 Methyl Alcohol로 1:3으로 혼합하여 사용하였다.

2. 시편

케미칼 크랙킹 실험을 위한 시편은 규격화 되어있어 반복 실험 시 정확한 실험결과 값을 도출하는데 용이한 인장시편 (ASTM D638-1)을 선정한다. Figure 1에 인장시편의 치수가 나타나 있다. 인장시편은 사출성형을 통하여 제작 하였다.

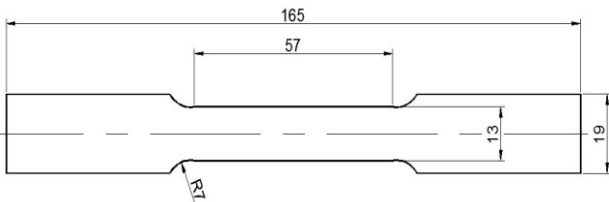


Figure 1. Test specimen used in chemical cracking experiment.

3. 변형 지그

시편에 응력을 가하기 위한 도구로 시편에 변형을 줄 수

있는 지그를 사용하였다.⁷ Figure 2는 시편에 변형 주어 응력을 유발시킬 때 사용된 Bergen 지그의 사진을 보여주고 있다. Bergen 지그의 단면은 Figure 3과 같이 타원 형상이다. 따라서 한 개의 시편에서 위치마다 다른 크기의 변형을 줄 수 있다. 즉 단축에 가까운 부분 (y축 부근)은 변형이 작고, 장축에 가까운 부분 (x축 부근)은 변형이 크다. 지그에 고정된 시편은 변형량에 따라 다양한 응력이 가해진다. Figure 2의 지그는 하나의 지그에 여러 개의 시편을 설치하도록 고안되어 있다.



Figure 2. Photo of Bergen jig to give a strain in specimen.

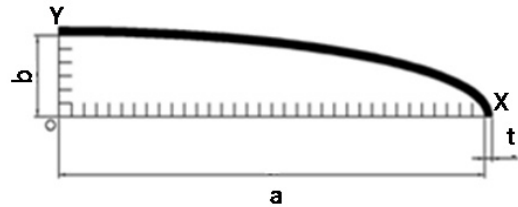


Figure 3. Cross section of Bergen jig.

식 (1)은 Bergen 지그 타원 단면의 곡선을 나타내고 있다. 그리고 Bergen 지그에 시편이 감겼을 때 시편에 나타난 변형율은 식 (2)와 같이 유도된다.

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1(a > b) \quad (1)$$

$$\varepsilon(x) = \frac{bt}{2a^2} \left[1 - \left(\frac{1}{a^2} - \frac{b^2}{a^4} \right) x^2 \right]^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

여기서 x, y, a, b 그리고 t는 다음과 같이 정의된다.

- x: 타원의 원점에서부터 x방향의 거리
- y: 타원의 원점에서부터 y방향의 거리
- a: 지그의 x방향의 전체길이 즉 장축의 반지름 (170 mm)
- b: 지그의 y방향의 전체길이 즉 단축의 반지름 (30 mm)
- t: 시편의 두께 (3.2 mm)

시편에 작용된 변형율에 의해 부과된 응력은 탄성이론으로 식 (3)과 같이 계산된다.

$$\sigma(x) = E \cdot \varepsilon(x) \quad (3)$$

여기서 E는 탄성계수이다. 식 (2)와 식 (3)을 이용하면 Bergen 지그에 감겨져 있는 시편의 x방향 (타원의 장축 방향)에 따른 응력을 계산 할 수 있다.

4. 변형 지그에 나타난 응력의 검증

Bergen 지그의 식을 통해 도출한 변형율과 응력이 타당한지 검증하기 위해 범용 구조해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 구조해석을 수행 하였다. 사용된 요소 수는 2384개 이다. Figure 4는 해석을 위한 모델을 보여주고 있다.

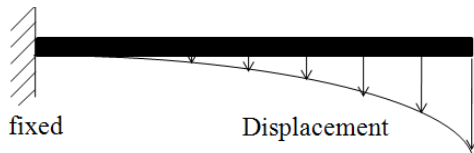


Figure 4. Model and boundary conditions for structural analysis.

구조해석 시 시편이 Bergen 지그 형태의 타원형상에서 받는 변형과 최대한 일치하도록 하는데 주안점을 두었기 때문에 시편이 고정된 왼쪽 부분부터 x방향으로 70 mm까지는 16 mm 간격으로 구간을 나누고 그 이후부터는 1.6 mm 간격으로 구간을 나누어 Bergen 지그 식을 통해 도출한 x 위치 별 변위를 부여하여 경계조건을 설정하였다. Figure 5는 수치 별 구조해석결과로 나타난 응력과 식 (3)으로 계산된 응력을 비교하였다.

구조해석과 Bergen 지그 식을 이용하여 계산한 응력들 사이에 PC/PBT의 경우 4.11%, PC/ABS의 경우는 5.90%의 평균오차가 발생하였다. 구조해석 결과와 Bergen 지그 식으로 도출한 응력 값이 큰 차이가 없어 본 실험에서 Bergen 지그를 사용한 수치에서 구한 응력을 이용하는 것이 타당성이 있다고 판단하였다.

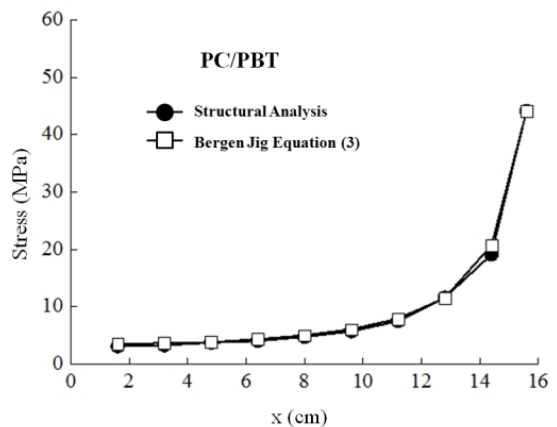
5. 실험방법 및 순서

- 가) 사출성형으로 제작 한 시편을 향온 항습기에 넣어 풀림 처리하여 성형 중에 형성된 잔류응력을 제거 한다.
- 나) 풀림 처리된 시편을 Bergen 지그에 고정시켜 변형을 준다.
- 다) 지그에 고정된 시편을 솔벤트에 담근다.
- 라) 일정 시간이 지난 후 크랙이 발생 된 후 지그에서 시편을 빼내어 발생된 크랙의 수를 측정한다.
- 마) 시편에 작용된 응력과 크랙과의 상관관계를 정립한다.

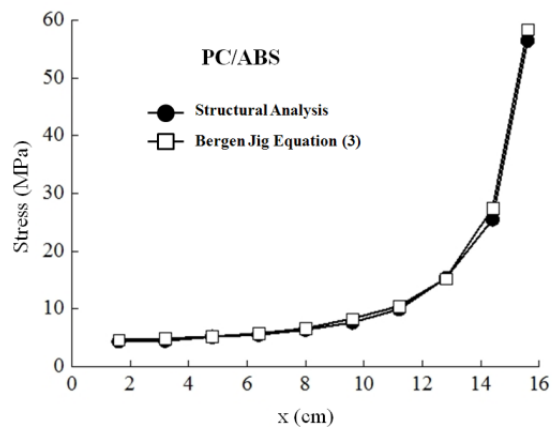
III. 결과 및 토론

1. 시편성형 및 풀림 처리 방법

시편내부에 잔류응력이 존재하게 되면 시편을 지그에 고정



(a) PC/PBT



(b) PC/ABS

Figure 5. Comparison of stresses calculated by Bergen jig equation and structural analysis in the specimens.

하기 전에 응력이 존재하게 되므로 지그를 이용하여 가해진 응력과 시편이 받는 총 응력이 다르게 된다. 따라서 시편을 지그에 고정하기 전에 사출로 성형된 시편의 잔류응력을 해소하기 위한 풀림 처리가 필요하다. 본 실험에서 사용 할 수치인 PC/PBT와 PC/ABS의 풀림 처리조건을 파악하기 위해서 먼저 PC를 이용하여 실험하였다.

투명한 수치인 PC를 사출하고, 온도와 시간을 변수로 풀림 처리실험을 수행하였다.⁸ 그리고 광탄성 장치를 사용하여 풀림 처리 전후의 잔류응력 상태를 관찰하여 응력이 해소됨을 확인하였다.

PC를 이용하여 풀림 처리조건을 찾아 본 실험에 활용하는 이유는 본 실험에서 사용하는 두 수치 모두 PC의 함유량이 70%이고, 또한 PC는 투명하여 잔류응력을 관찰하기 편리하여 잔류응력을 해소 할 수 있는 풀림조건을 찾는 데 유리하기 때문이다. PC의 풀림처리 결과를 토대로 본 연구에서 사용할 수지의 풀림 처리 조건을 설정하였다.

시편을 사출성형하기 위해 LGH-100N의 사출 성형기를 사

용하였으며 사출기의 형체력은 100 ton 이고 최대 사출량은 150 g이다. PC의 사출성형 조건은 Table 1과 같다.

사출성형된 시편을 풀림처리 하기 위해 Table 2와 같은 조건을 이용하였다. 광탄성은 빛이 재료를 통과하면서 굴절이 일어나고 또한 빛의 진행이 지체 되면서 일어나는 현상을 말하는데 이러한 광탄성을 이용하여 재료 내부의 잔류응력이나 분자의 배향 등을 평가할 수 있다. 이러한 방법은 PC처럼 재료가 투명하여 빛을 투과하는 경우에 적용된다.

PC의 풀림 처리 결과 1시간 풀림 처리 한 경우와 2시간 풀림 처리 한 경우 모두 120 °C에서 잔류응력이 해소 됨을 알 수 있었다. PC의 풀림 온도와 열변형온도 (HDT)를 토대로 PC/PBT와 PC/ABS의 풀림처리 온도를 Table 3과 같이 결정하였다. PC의 풀림처리 온도의 90% 정도 수준에서 PC/PBT와 PC/ABS의 열변형온도 이하로 설정하였으며 풀림처리 시간은 모두 2시간으로 설정 하였다.

케미칼 크랙킹 실험을 위한 PC/PBT와 PC/ABS 시편의 성형 조건은 PC의 사출성형 조건에서 온도를 Table 4와 같이 설정하였다. 온도 이외의 조건은 PC의 사출조건과 같이 하였다.

Table 1. Injection molding condition for PC specimen

Control Item		Unit	Value
Time	Injection	sec	7.5
	Cooling	sec	15
Injection	Pressure(3/2/1)	%	35/35/35
	Speed	%	35/35/35/35
	Screw Position	mm	10/20/30/45
Packing	Pressure(3/2/1)	%	20/20/30
	Speed	%	10
	Time	sec	2/2
Temperature	Cylinder	°C	290
	Mold	°C	80

Table 2. Annealing condition of PC

Temperature(°C)	110	120	130
Time(h)	1 and 2		

Table 3. Annealing condition of PC/PBT and PC/ABS

	PC	PC/PBT	PC/ABS
HDT (°C)	134	118	115
Annealing Temperature (°C)	120	110	

Table 4. Injection condition of PC/PBT and PC/ABS

Resin	Location	Unit	Value
PC/PBT	Cylinder	°C	280
	Mold	°C	60
PC/ABS	Cylinder	°C	275
	Mold	°C	60

2. 솔벤트 크랙킹 테스트 및 크랙의 관찰

풀림 처리가 완료된 시편을 지그에 설치하고 솔벤트가 있는 욕조에 담겨 반응 시켰다. 반응 시간은 20분으로 설정하였다. 반응 후에는 영상현미경을 이용하여 크랙을 관찰 하였다. 크랙의 수를 관찰하기 위해 Figure 6 과 같이 시편에 길이 방향으로 5 mm의 구간을 설정하고 5 mm의 폭을 설정하여 단위면적 (5 mm x 5 mm) 내의 크랙의 수를 측정하였다.

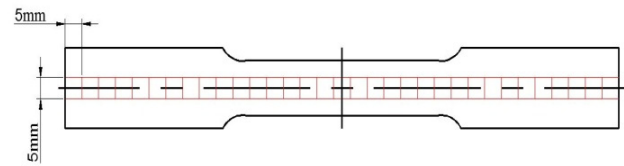


Figure 6. Division of area for the measurement of crack.

3. 실험결과 및 토의

솔벤트 케미칼 테스트를 실시한 모든 시편에서 응력의 크기에 비례하여 크랙이 발생함을 알 수 있었다. 또한 임의의 지점에서의 PC/PBT와 PC/ABS의 크랙발생의 빈도가 다르게 나타났으며 그 결과는 Figure 7과 같다. 시편의 우측(x축)으로 갈수록 변형이 커 응력이 커지기 때문에 크랙의 수가 현저히 증가하였다. 각 구간의 변형율에 따라 크랙이 다르고, 또한 변형율에 따라 응력이 다르다.

PC/PBT 시편이 받고 있는 응력과 크랙의 개수의 관계가 Figure 7(a)에 나타나 있는데 응력이 약 7 MPa수준 이상에서 크랙이 발생 하였다. 본 연구에서 사용한 지그에 의한 응력은 약 25 MPa수준까지 크랙의 수를 정량적으로 판단 할 수 있었다. 그래프에서 실선은 실험 데이터를 2차 함수의 커브로 그린 것인데 응력이 커질 수록 크랙이 더 많이 형성되는 것을 관찰 할 수 있었다.

PC/ABS 시편에서의 크랙의 관찰 결과가 Figure 7(b)에 나타나 있다. 응력이 약 13 MPa 수준 이상에서부터 크랙이 관찰되었다. 이는 PC/ABS가 PC/PBT에 비해 내화학성이 좋아 나타난 현상이라 판단된다. 유사한 응력에서 나타난 크랙의 수도 PC/ABS에서 보다 적었다. 실험 데이터를 이용하여 2차 함수

로 나타낸 그래프가 실선으로 나타나 있는데 응력이 커질수록 크랙의 수가 2차 함수로 증가함을 볼 수 있다.

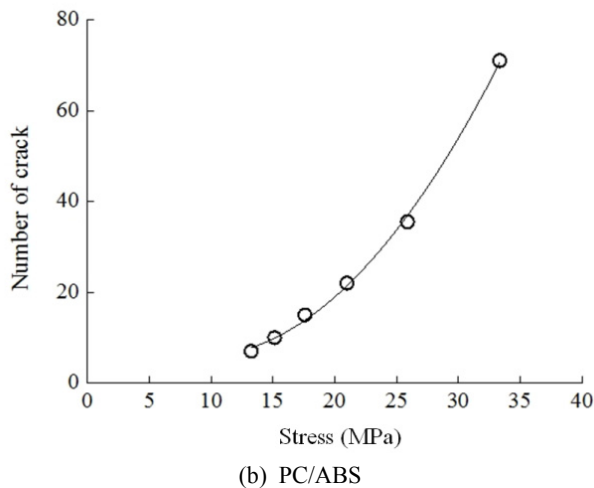
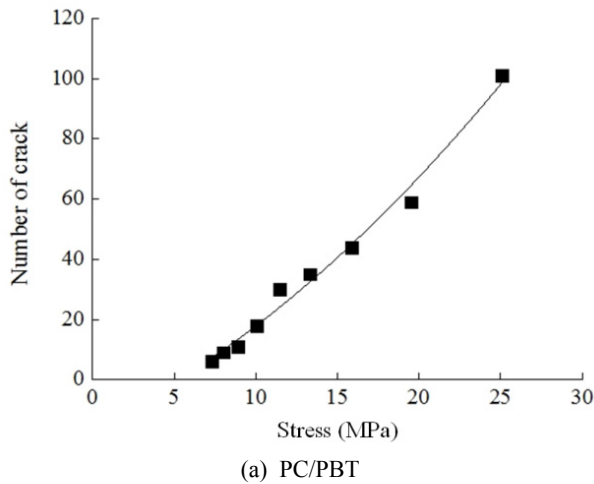


Figure 7. Number of cracks according to level of stress in the specimens.

IV. 결 론

플라스틱 성형품은 성형과정에서 받는 높은 열과 압력에 의해 성형 후 제품 내부에 잔류응력을 내포하게 된다. 본 연구에서는 플라스틱 성형품에 존재하는 잔류응력을 측정하기 위한 방법인 케미칼 크랙킹 방법을 활용하기 위해 솔벤트에 의한 크랙과 응력과의 관계를 연구하였다. 본 연구를 통해 PC/PBT와 PC/ABS 재료에서 받고 있는 응력과 케미칼에 의한 크랙과의 관계를 정립하였다.

이를 수행하기 위해 Bergen 지그와 유한요소 해석 프로그램

을 활용하여 변형율과 응력의 분포를 비교, 분석하였다. 그리고 솔벤트 크랙킹 테스트를 활용하여 플라스틱 시편의 각각의 다른 위치마다 응력의 크기에 따라 다르게 나타난 크랙의 수를 측정하여 응력과 크랙의 수와의 관계를 분석하였다. 응력의 크기에 따른 크랙의 수는 대략 2차 함수로 나타났다. 이러한 실험결과를 이용하여 추후 잔류응력을 측정하고자 하는 제품에 솔벤트 처리를 하여 크랙의 수를 조사하면 얼마나 큰 잔류응력이 존재하는지 정량적으로 판단 할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. J.S. Hong, S. R. Park, and M.-Y. Lyu, "Measurement of residual stress using photoelasticity and computer simulation of optical characteristics in a transparent injection molded article", *Polymer(Korea)*, **35**, 1 (2011).
2. S. H. Cho, J. S. Hong, and M.-Y. Lyu, "Investigation of the molding conditions to minimize residual stress and shrinkage in injection molded preform of PET bottle", *Polymer(Korea)*, **35**, 467 (2011).
3. Chachwan Kim, Sungho Kim, Hwajin Oh, and Jae Ryoung Youn, "Measurement of residual stresses in injection molded parts", Annual conference of the Korean society of automotive engineers, pp. 1982-1985 (2005).
4. Sun-Ho Bang, Sun-Woo Kim, and Eon-Seok Lee, "Measurement of residual stress in polycarbonate using hole-drilling strain gage method", Proceedings of the KSME 2006 fall annual meeting, pp. 7-10 (2006).
5. H. Aben, L. Ainola, and J. Anton, "Integrated photoelasticity for nondestructive residual stress measurement in glass", *Optics and lasers in engineering*, **33**, 49 (2000).
6. C.-H. Ma, J.-H. Huang, and Haydn Chen, "Residual stress measurement in textured thin film by grazing-incidence X-ray diffraction", *Thin solid films*, **418**, 73 (2002).
7. Jr. R. L. Bergen, "Stress cracking of rigid thermoplastics", *SPE Journal*, **8**, 667 (1962).
8. J. H. Cho, S. R. Park, H. Kim, and M.-Y. Lyu, "Investigation on the residual stress relaxation according to annealing condition for transparent injection molded part", *Polymer(Korea)*, **36**, 131 (2012).