

변형지그를 이용한 폴리카보네이트 시편의 케미컬 크래킹 및 응력측정에 관한 연구

유서정[#] · 홍형식* · 류민영[†]

서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과, *LG생산기술원
(2014년 2월 21일 접수, 2014년 3월 31일 수정, 2014년 4월 3일 채택)

Investigation into a Chemical Cracking and the Measurement of Stress in a Polycarbonate Specimen through Deformation Jig

Seo Jeong Yoo[#], Hyung Sik Hong*, and Min-Young Lyu[†]

Seoul National Univ. of Science & Technology, Dept. of Mechanical System Design Engineering,
232 Gongneungro, Nowongu, Seoul 139-743, Korea

*LG Production Engineering Research Institute, Pyungtaek, Gyunggi-do 451-860, Korea

(Received February 21, 2014; Revised March 31, 2014; Accepted April 3, 2014)

초록: 사출성형품의 잔류응력 형성의 원인은 사출성형과정 중 재료가 받는 높은 온도변화와 전단응력이다. 케미컬 크래킹 테스트는 잔류응력을 측정하는 방법 중의 하나이며 크랙은 잔류응력의 크기에 따라 형성된다. 본 연구에서는 시편이 받고있는 응력과 케미컬 크래킹과의 관계를 연구하였다. 변형지그를 설계하고 이를 이용하여 시편에 변형을 주어 응력을 가하였다. 시편은 폴리카보네이트를 이용하여 핫 프레스로 제작하였고 시편의 제작 중에 형성된 잔류응력을 제거하기 위해 어닐링을 하였다. 시편을 변형지그에 고정시키고 시편에 크랙을 유도하기 위해 이를 솔벤트에 담겼다. 솔벤트는 tetrahydrofuran과 methyl alcohol을 이용하여 제조하였다. 시편에서 변형에 따라 응력이 증가할수록 크랙의 빈도와 밀도가 증가하였다. 본 연구의 결과는 케미컬 크래킹 방법으로 폴리카보네이트 사출성형품의 잔류응력을 정량적으로 측정하는데 활용될 수 있다.

Abstract: The causes of residual stress in an injection molded part are high temperature variation and shear stress during molding process. Chemical cracking test is one of the methods of measuring residual stress and cracks are developed according to the degree of residual stress. In this study, the relationship between chemical cracking and exerted stress have been investigated. Deformation jig was designed and used to give a stress through deformation in a specimen. Specimens were molded by a hot press using polycarbonate (PC) and annealed to remove residual stresses in the specimens. Specimens were fixed in the deformation jig and immersed into the solvent to create cracks in the specimens. Solvents were prepared by using tetrahydrofuran and methyl alcohol. As stress accordance with the deformation in the specimen increased, the frequency and density of cracks in the specimen also increased. The results of this study can be used for the measurement of residual stress quantitatively in an injection molded PC product using a chemical cracking method.

Keywords: stress, deformation jig, bergen jig, chemical cracking, polycarbonate.

서 론

사출성형 공정은 고분자 성형 공정 중 생산성과 성형 정밀도가 우수하기 때문에 플라스틱 제품의 성형에서 가장 많이 활용되고 있다. 사출성형 공정 중 재료는 성형 중 높은 온도 변화와 큰 압력을 받아 제품에 잔류응력이 형성된다. 사출공정 중에서 발생할 수 있는 잔류응력은 크게 열에 의한 잔류

응력과 흐름에 의한 잔류응력 두 가지로 알려져 있다.¹⁻³ 이러한 잔류응력은 시간이 지남에 따라 점차 해소되면서 제품의 변형을 야기시켜 성형품의 고유의 기능 및 품질을 저하시킨다. 따라서 공정 중 형성되는 잔류응력을 최소화시키는 것이 중요하고 이를 정확히 측정할 수 있는 방법이 필요하다.

플라스틱의 잔류응력을 측정하는 방법은 layer removal 방법과 hole drilling 방법 등이 있는데 이 방법들은 시편의 물리적 손상을 수반한다. 광탄성 특성을 이용하여 투명한 플라스틱의 잔류응력을 측정하는 방법은 시편의 물리적 손상이 없이 잔류응력을 측정하는데 활용되고 X-ray 회절 역시 잔류응력 측정에 활용된다.^{4,7} 이러한 잔류응력 측정 방법들은 형

[#]Present Address: Samsung Electronics Co., Suwon, Gyunggi-do 443-370, Korea

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: mylyu@seoultech.ac.kr

상이 복잡한 사출성형품의 잔류응력을 측정하는 데는 한계를 가지고 있다. 제품의 디자인이 다양해짐에 따라 복잡한 형상의 제품이 증가되고 있는 현실에서는 위와 같은 방법의 적용이 거의 불가능하다. 케미컬 크래킹 테스트 방법은 솔벤트에 시편을 담가두고 시간이 지나면 잔류응력 때문에 발생하는 크랙을 분석하여 잔류응력을 측정한다.^{8,9} 이 방법은 복잡한 사출성형품의 잔류응력을 편리하게 측정할 수 있는 장점이 있다. 그러나 소재에 적합한 솔벤트 선정의 어려움이 있고, 시편에서 발생하는 크랙과 내재된 잔류응력과의 정량적 관계를 미리 정립해 두어야 하는 절차가 필요하다. 또한 정량적 관계정립의 정확성에 한계가 있을 수 있다. 하지만, 한번 정립된 관계를 계속 활용할 수 있어 다른 방법에 비해 측정이 매우 수월하다. 케미컬 크래킹에 의한 잔류응력 측정은 그의 방법론에 대한 언급만 주로 이루어지고 있고 현장에서 정성적으로만 활용되고 있는 상황이다. 본 연구실에서는 PC/ABS와 PC/PBT 열로이에 대해 잔류응력의 측정을 시도한 바 있으나 재료의 선정, 측정시편의 형상, 그리고 시편에 변형을 주는 지그에 대한 설계가 미진하였다고 판단된다.¹⁰ 컴파운딩된 열로이 수지를 사용했기 때문에 시편내부의 잔류응력이 국부적으로 연속적이지 않고 불균질한 상태를 보여서 케미컬 크래킹 테스트 방법에 적절치 않은 수지의 선정이었다고 판단된다.

본 연구는 선행된 연구를 개선한 연구로 열로이 수지가 아닌 순수 폴리카보네이트(PC)에서 솔벤트에 의해 생성된 크랙과 시편에 작용된 응력의 관계를 연구하였다. 이를 위해 실험시편의 형상을 고안하였으며, 시편에 변형을 주는 지그의 설계에 대해서 광범위하게 논의하고 설계를 수행하였다. 본 연구를 통하여 규명한 PC 시편에서 변형에 의한 응력과 크랙과의 관계는 향후 케미컬 크래킹을 통한 사출성형품의 정량적인 잔류응력 측정에 직접 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

실 험

재료 및 시편제작. 수지는 삼양사의 호모 PC로 TRILEX 3022IR을 사용하였다. 시편에 급격한 형상 변형이 있는 경우 국부적인 응력집중 현상이 발생되어 잔류응력측정에 오차를 유발할 수 있다. 따라서 Figure 1과 같이 두께 2.5 mm인 직사각형의 평판형태에서 모서리를 라운드로 설계하였다.

본 연구는 시편에 변형을 주어 응력을 가한 다음 이에 상응하는 크랙을 관찰하여 응력과 크랙과의 정량적인 관계를 규명하는 것이다. 따라서 변형을 가하는 시편 내부에 잔류응력이 존재하게 되면 변형에 상응하는 정확한 응력도출이 어렵다. 따라서 시편 성형 시 잔류응력을 최소화할 수 있도록 사출성형보다는 핫 프레스를 이용하여 시편을 제작하였다. 다양한 실험조건에 따른 비교를 통해 시편의 성형조건을 설정

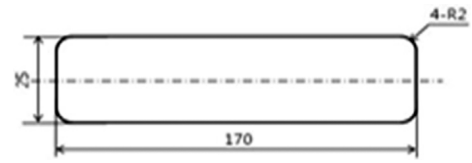


Figure 1. Designed specimen for experiment.

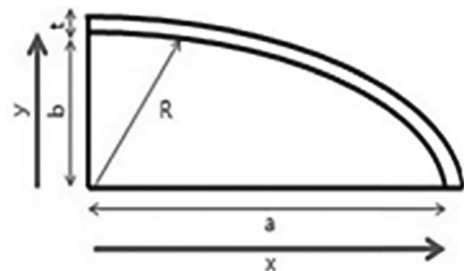
하였는데, 프레스 플레이트의 온도는 190 °C로 하고 가열시간은 90분으로 하여 성형하였다.

핫 프레스로 제작한 시편 내부에 다소 남아있을 수 있는 잔류응력을 제거하기 위하여 어닐링 처리를 하였다.¹¹ 이를 위해 성형 후 상온에 도달한 시편을 핫 프레스에서 130 °C로 10분 동안 유지하였다.

변형지그 설계. 변형지그 즉, 베르젠(Bergen) 지그는 Figure 2와 같이 타원형이다.⁹ 그림에서와 같이 타원형 곡면을 갖는 지그에 시편을 고정하면 시편에 변형이 가해지고 그 변형량을 이용하여 탄성이론으로 응력을 계산할 수 있다. 타원의 곡면을 사용하는 이유는 한 시편에서 위치에 따라 변형의 크기를 다양하게 하여 다양한 크기의 응력을 유발하기 위해서이다. 지그설계에서 변수는 장축과 단축의 길이인 a 와 b 이다. 타원 형상에서 a 와 b 값은 시편에 변형을 주었을 때 시편이 파단되지 않는 범위 내에 있는 값들 중 변형률의 범위가 넓고 고르게 분포되는 값으로 정하였다.

시편에 변형이 발생할 때 탄성변형을 하는 시편의 중립면은 시편 두께의 중심에 위치하므로 시편의 바깥쪽 표면에서의 변형률 값은 식 (1)과 같다.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{2\pi\left(R + \frac{t}{2}\right) - 2\pi R}{2\pi R} = \frac{2\pi\left(\frac{t}{2} + R - R\right)}{2\pi R} = \frac{t}{2R} \quad (1)$$



- a: Long axis of ellipse
- b: Short axis of ellipse
- x: Horizontal axis
- y: Vertical axis
- t: Specimen thickness
- R: Radius of ellipse

Figure 2. Deformation jig containing elliptical shaped curve.

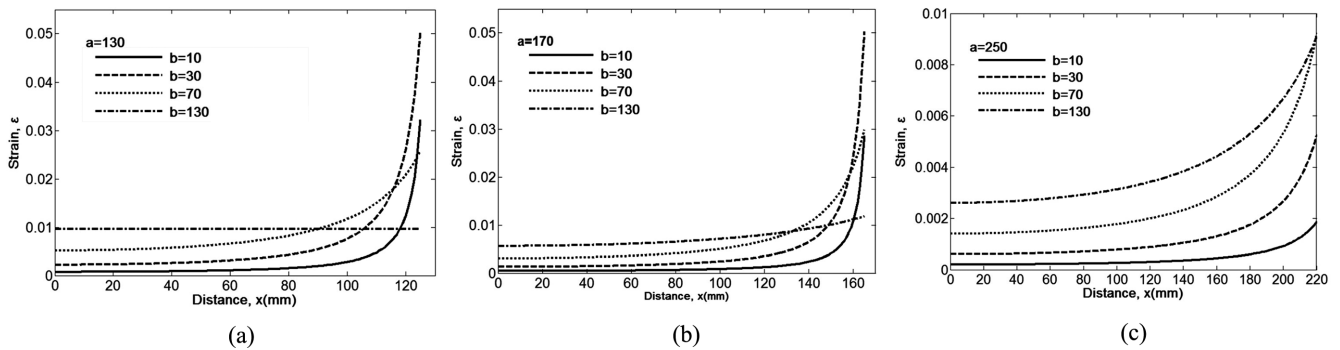


Figure 3. Strain curves according to long and short axis of ellipse in deformation jig: (a) $a=130$; (b) $a=170$; (c) $a=250$.

식 (1)에서 R 값은 곡률 κ 의 역수로 구할 수 있다. 타원의 방정식을 식 (2)와 같이 매개변수 θ 로 표현하여 곡률을 구하면 식 (3)과 같다.

$$r(t) = (a \cos \theta, b \sin \theta) \quad (2)$$

$$\frac{1}{R} = \kappa = \frac{ab}{(a^2 \sin^2 \theta + b^2 \cos^2 \theta)^{\frac{3}{2}}} \quad (3)$$

식 (3)을 다시 x, y 에 관한 식으로 변환하면 식 (4)와 같이 쓸 수 있다.

$$R = \frac{1}{\kappa} = \frac{\left(\frac{b^2}{a^2} x^2 + \frac{a^2}{b^2} y^2 \right)^{\frac{3}{2}}}{ab} \quad (4)$$

식 (4)를 식 (1)에 대입하면 식 (5)와 같이 정리된다.

$$\varepsilon = \frac{bt}{2a^2} \cdot \left\{ 1 + \left(\frac{b^2}{a^4} - \frac{1}{a^2} \right) x^2 \right\}^{\frac{3}{2}} \quad (5)$$

식 (5)에서 장축과 단축인 a 와 b 에 따른 변형률 곡선이 Figure 3에 나타나 있다. 본 연구에서는 변형에 의해 시편에 파단이 일어나지 않는 범위 내에서 변형률이 너무 급격히 분포하지 않는 조건으로 a 와 b 를 각각 170 mm와 30 mm로 결정하였다.

Figure 4는 결정된 변형지그에서 식 (5)을 이용하여 원점에 서부터의 장축의 위치에 따른 변형률과 PC에서의 응력을 나타낸 그래프이다. 변형에 상응하는 응력은 본 연구에서 사용한 PC의 영률(Young's modulus, 2400 MPa)을 이용하여 Hook's 법칙으로 계산하였다.

Figure 5에는 본 연구에서 설계한 지그가 나타나 있다. 이 지그를 이용하여 시편에 변형을 부여하였다.

케미컬 크래킹 방법. 변형지그에 고정되어 변형이 가해진

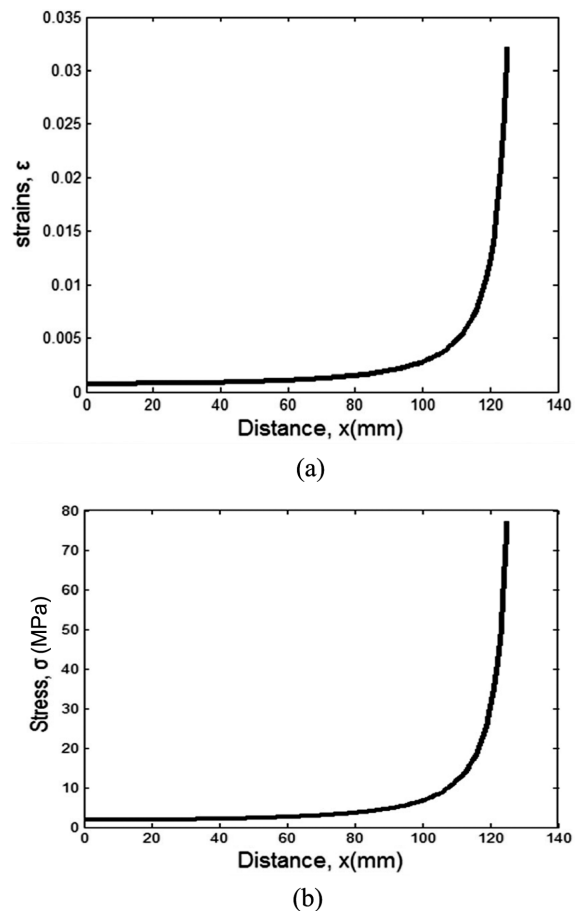


Figure 4. Strain and corresponding stress in a specimen attached in deformation jig: (a) strain in specimen; (b) stress in specimen.

시편에 크랙을 유도하기 위해 솔벤트를 준비하였다. Bayer사의 tetrahydrofuran(THF)과 methyl alcohol을 1:5의 비율로 혼합하여 솔벤트를 제조한 후 지그에 고정된 시편을 솔벤트에 담귀 크랙을 유도하였다. 시편에 크랙을 유도하고 분석하는 방법은 다음과 같다.

먼저 핫 프레스로 제작한 시편을 어닐링 처리하여 잔류응

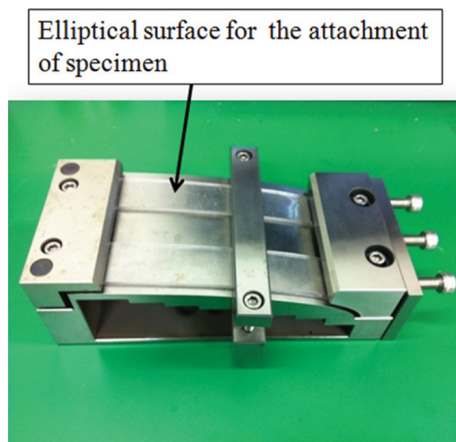


Figure 5. Deformation jig designed in this study for experiment.

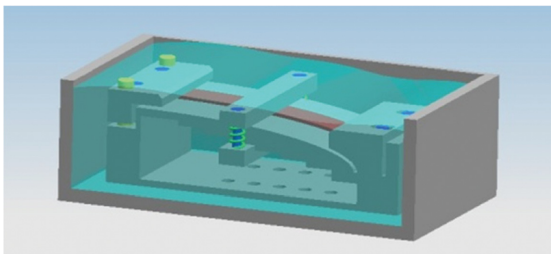


Figure 6. Schematic drawing of dipped deformed specimen in the solvent.

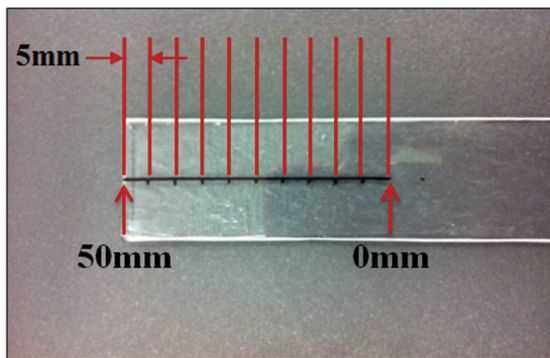


Figure 7. Analysis of cracks in a specimen.

력을 최소화한다. 그 후 어닐링 처리된 시편을 지그에 고정시킨 후 Figure 6과 같이 준비한 솔벤트에 담근다. 10분이 경과 후 지그에서 시편을 빼내어 시편에 발생된 크랙을 분석한다.

크랙의 분석은 Figure 7과 같이 크랙이 발생된 구간에서 시편 중앙에 기준선을 그은 다음 그 기준선 위에 5 mm 간격으로 구간을 나눈 다음 그 구간의 중앙선 위에 관찰된 크랙의 빈도수와 크랙 사이의 간격을 측정하였다. 크랙의 관찰은 Figure 8에 나타난 영상현미경(EGVM 35B, EG Tech Co., S. Korea)을 사용하였다.



Figure 8. Image microscope used for analysis of cracks in a specimen.

결과 및 토론

케미칼 크래킹 실험 결과 모든 시편이 일정 응력 이상에서부터 크랙이 발생하였다. Figure 9는 크랙이 발생된 시편을 보여주고 있다.

시편에 가해진 응력에 따라 크랙의 빈도와 크랙간의 간격이 다르게 나타났으며 그 결과는 Table 1에 나타나 있다. 본 연구에서는 총 12번의 실험을 통하여 크랙을 분석하였다.

시편에 가해진 응력이 증가할수록 그 구간에서 크랙의 수가 증가하는 경향이 나타났다. 또한 시편에 가해진 응력이 증가할수록 그 구간에서의 크랙간 간격이 좁아지는 경향을 보였다. 즉, 시편에 응력이 크게 작용할수록 크랙의 발생 빈도수가 증가한다는 것을 알 수 있다.

이를 도식적으로 Figure 10과 Figure 11에 나타내었다. Table 1과 그림에서 보듯이 응력이 12.8 MPa보다 크면 주어

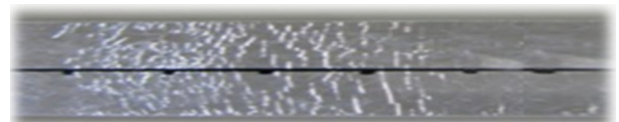


Figure 9. Cracks in a specimen after chemical cracking test.

Table 1. Average Number of Cracks and Average Gap in the Specimens according to Exerted Stress

Exerted stress (MPa)	Observed number of cracks/ Average/Standard deviation	Average gap between cracks (mm)
8.4 ~ 9.5	0/0/0	0.0
9.5 ~ 10.9	0/0/0	0.0
10.9 ~ 12.8	0/0/0	0.0
12.8~15.5	0~2/0.67/0.94	7.5
15.5~19.4	1~6/2.25/1.59	2.2
19.4~25.6	3~10/5.67/2.21	0.9
25.6~36.3	5~16/8.25/3.92	0.6
36.3~58.3	4~19/10.50/5.20	0.5

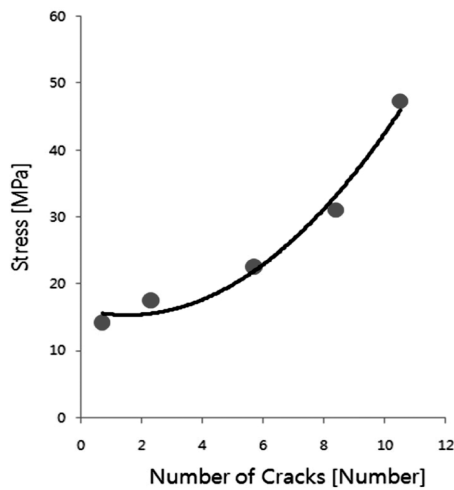


Figure 10. Stress vs observed average number of cracks.

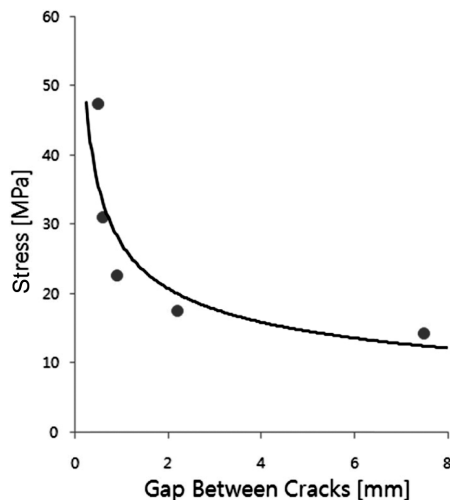


Figure 11. Stress vs average gap between cracks.

진 솔벤트에서 크랙이 형성됨을 알 수 있다. 이러한 결과로 보아 사출성형된 PC제품을 THF와 methyl alcohol을 1:5의 비율로 제조한 솔벤트에 담그면 제품의 잔류응력의 크기에 따라 크랙이 발생되어 잔류응력의 크기를 측정할 수 있을 것으로 판단된다.

Figure 10과 Figure 11에 나타난 그래프를 수식으로 표현하면 PC시편의 평균 크랙 수(x)와 응력(σ)은 식 (6), PC 시편의 크랙간 간격(x)과 응력(σ)은 식 (7)과 같은 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma = 0.3806x^2 - 1.1507x + 16.147 \quad (6)$$

여기서, x 는 크랙의 수이고 σ 는 응력이다. 위의 회귀곡선에서 결정계수(R^2)는 0.9811이다.

$$\sigma = 27.033x^{-0.384} \quad (7)$$

여기서, x 는 크랙간 간격이고 σ 는 응력이다. 위의 회귀곡선의 R^2 은 0.8087이다.

결 론

본 연구에서는 PC 시편에서 받고 있는 응력을 정량적으로 측정할 수 있는 방법을 제시하고 측정하였다.

실험을 위한 시편을 고안하였고 또한 시편에 변형을 부여할 변형지그를 설계하였다. 지그를 통해 시편에 변형을 가하면 시편의 표면에 발생하는 응력 크기의 수식을 유도하였으며 이를 토대로 지그의 치수를 결정하였다.

지그에 고정된 PC 시편에 크랙을 유도하기 위해 솔벤트를 배합하였는데 이는 THF와 methyl alcohol을 1:5로 하였다. 응력을 받고 있는 PC 시편은 솔벤트에 의해 크랙이 발생하였다.

PC 시편에 발생한 크랙의 빈도수는 시편이 받고 있는 응력에 비례하였고, 또한 시편에 발생한 크랙간의 간격은 시편이 받고 있는 응력이 클수록 작게 나타났다.

사출성형품과 같이 복잡한 형상을 가지고 있으며 큰 잔류응력을 내포한 플라스틱 제품에서 잔류응력을 케미컬 크랙킹 방법으로 쉽게 측정할 수 있는데, 본 연구에서 규명한 응력과 크랙과의 관계를 활용하여 정량적으로 측정할 수 있는 것으로 판단된다.

감사의 글: 본 연구는 보건복지부 보건의료연구개발사업의 지원에 의하여 이루어진 것이며 이에 감사드립니다(HN13C0079).

참 고 문 헌

1. M.-Y. Lyu and H.-Y. Kim, *Polymer Science and Technology*, **20**, 157 (2009).
2. J. S. Hong, S. R. Park, and M.-Y. Lyu, *Polymer(Korea)*, **35**, 1 (2011).
3. S. H. Cho, J. S. Hong, and M.-Y. Lyu, *Polymer(Korea)*, **35**, 467 (2011).
4. C. H. Kim, S. H. Kim, H. J. Oh, and J. R. Youn, *Annual Conference of the Korean Society of Automotive Engineers*, 1982 (2005).
5. S. H. Bang, S.-W. Kim, and E.-S. Lee, *Proceedings of the KSME 2006 Fall Annual Meeting*, 7 (2006).
6. H. Aben, L. Ainola, and J. Anton, *Opt. Laser Eng.*, **33**, 49 (2000).
7. C.-H. Ma, J.-H. Huang, and H. Chen, *Thin Solid Films*, **418**, 73 (2002).
8. V. Shah, *Handbook of Plastics Testing Technology*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 1998.
9. Jr. R. L. Bergen, *SPE J.*, **18**, 667 (1962).
10. S. Won, T. Kim, S. Lee, J. Won, K. Cha, and M.-Y. Lyu, *Elastomers & Composites*, **47**, 336 (2012).
11. J. H. Cho, S. R. Park, H. Kim, and M.-Y. Lyu, *Polymer(Korea)*, **36**, 131 (2012).