

# 공업용 플라스틱 성형품에 대한 잔류응력의 측정

김채환<sup>1</sup>, 윤재륜<sup>1</sup>

## Determination of Residual-Stress Distribution in Engineering Plastics

Chae-hwan Kim and Jae Ryoun Youn

### Abstract

Injection molding is a flexible production technique for the manufacturing of polymer products, but introduces residual stresses. Residual stresses in a structural material or component are those stresses which exist in the object without other external loads. The layer removal and hole drilling method are used for the measurement of residual stress in injection molded polystyrene part. The hole drilling method is potentially more flexible for determining residual stress in complex geometries and can be used as an adoptable technique for the measurement of residual stress in polymeric materials. Results obtained by experiments agree with each other.

**Key Words** : Injection molding (사출성형), Residual stresses (잔류응력), Hole drilling method (구멍뚫기법), Layer removal method (층제거법)

### 1. 서론

사출성형은 플라스틱 등 고분자 수지를 이용하여 일반적인 생활용품에서부터 정밀 부품류나 CD, DVD 와 같은 광자기정보저장매체 등 고부가가치 제품을 대량으로 생산하는 방법으로 가장 널리 쓰이는 제조법이다. 뿐만 아니라 최근 들어 제품의 경량화, 생산자동화 등과 맞물려 자동차나 항공기 내외장재 및 부품의 생산에도 자주 사용되고 있다. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 사출성형공정에서 발생하는 잔류응력과 휨, 수축 등의 변형은 최종 제품의 품질에 지대한 영향을 미치게 되며 이를 해결하기 위해서는 사출성형공정에 대한 정확한 이해와 문제점 해결에 대한 많은 연구가 필요한 실정이다. 고체고분자의 점탄성 특성에 의하여 변형을 일으키는 요인이 되며 이러한 변형은 사출품의 정밀도를 떨어뜨리고 심한 경우에는 균열을 발생시켜 상품성에 치명적인 영

향을 미치게 한다. 이와 같이 사출 성형 공정에서의 잔류응력은 매우 중요한 사항으로 이를 최소화하기 위한 최적 공정조건의 도출이 필요하며 이를 위해서는 먼저 사출품 내의 잔류응력에 대한 신뢰성 있는 측정이 선행되어야 할 것이다.

본 연구에서는 공업용 플라스틱의 일종인 폴리스타이렌 평판에 대하여 층제거법(Layer removal method)과 구멍뚫기법(Hole drilling method)을 사용하여 깊이 방향으로 변하는 잔류응력을 측정하고 각각의 결과와 비교하였으며, 상용프로그램인 몰드플로어(Moldflow)를 사용하여 잔류응력 해석을 수행하여 측정값과 상호 비교하였다.

### 2. 실험

현재 사용중인 잔류응력의 측정법에는 크게 파괴적인 방법(Destructive method) 과 비파괴적인 방법(Non-destructive method)으로 나눌 수 있으며 플

1. 서울대학교 재료공학부

라스틱 사출품에 대한 일반적인 잔류응력의 측정 방법으로는 층제거법이 사용되고 있다. 그러나 층제거법은 다양한 형상의 공업용 사출품에 대하여 적용상 어려움이 있어 본 연구에서는 기존의 금속성형품에서 사용되던 구멍뚫기법을 도입하여 폴리스틸렌 시편에 대하여 잔류응력을 측정하였으며 각각의 방법을 통하여 측정된 결과를 상호 비교하였다.

## 2.1 잔류응력의 측정법

### 2.1.1 층제거법(Layer-removal method)

층제거법은 Treuting 과 Read 에 의해 제안된 방법으로 구속되지 않은 사각평판내의 잔류응력이 자체적으로 평형상태를 유지하고 있다는 점에 착안하여 시편의 표면으로부터 연속적으로 일정하게 층을 제거하면 제거되어진 층들이 갖고 있던 잔류응력이 사라지면서 응력의 평형이 깨어지고 이때 발생된 시편에서의 곡률을 측정하고 탄성론에 근거하여 유도된 곡률-응력의 관계식을 이용하여 잔류응력의 값을 계산한다. 본 방법은 잔류응력의 측정법으로 널리 사용되는 방법이나 측정대상이 되는 성형품의 형상이 평판이어야 되는 단점이 있어 형상이 복잡한 공업용 사출품에 대하여 적용상의 어려움이 있으며 표면에서의 측정값에 대한 실험오차가 크다는 연구사례가 보고되고 있다[1,7].

### 2.1.2 구멍뚫기법(Hole-drilling method)

구멍뚫기법은 Mathar 에 의해 제안된 방법으로 잔류응력을 가지고 있는 물체의 한 부분에 작은 구멍을 뚫어 국부적으로 구멍 주변에서의 응력을 제거시켜 주는데서 고안되었으며 이후 점진적으로 발전되어 ASTM E837 에 표준절차가 정립되었다. 이 방법은 재료의 두께방향으로 응력이 일정하다는 가정하에 표면에서의 주응력을 계산하는 방법으로 재료의 표면에 Fig. 1 과 같은 로젯(Rosette)형태의 스트레인 게이지(Strain gage)를 붙이고 일정 크기의 구멍을 뚫어 이때 측정된 이완변형률(Surface strain relief)과 표면에서의 주응력(Principal stresses)의 관계를 이용하여 잔류응력을 계산한다. 이때 이완변형률과 주응력과의 관계는 아래와 같다.

$$\epsilon_r = (\bar{A} + \bar{B} \cos 2\beta)\sigma_{\max} + (\bar{A} - \bar{B} \cos 2\beta)\sigma_{\min} \quad (1)$$

여기서,  $\bar{A}, \bar{B}$  는 이완상수이다.

이 방법은 좁은 범위나 복잡한 형상의 물체에 서도 손쉽게 적용할 수 있는 유용한 방법이다. 하지만 재료의 두께방향으로의 응력이 일정하다는 가정은 현실과 상이한 가정이며, 또한 현행의 방법으로는 두께방향으로의 잔류응력을 측정할 수 없다는 단점이 있고 나아가 탄성을 가지는 금속 제품과 달리 사출품의 경우 재료의 점탄성(Viscoelastic) 거동 등으로 사출품에 대하여 적용에 제한이 있었으며 현재까지의 적용사례가 또한 많지 않다. 따라서 깊이방향으로 변하는 잔류응력장에 잘 적용될 수 있는 적분법을 응용하여 잔류응력값을 계산하였다[3~5].

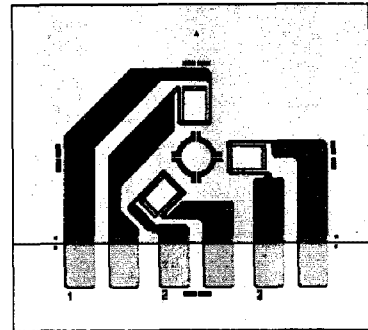


Fig. 1 Strain gage rosette for the hole drilling method

## 2.2 잔류응력의 측정

실험을 위하여 폴리스타이렌 수지로 두께 2mm 의 사각시편을 제작하였다. 층제거법은 표면층의 제거시 부가적으로 발생하는 응력의 발생을 방지하기 위하여 20,000rpm 의 고속 밀링머신을 사용하였고 시편의 곡률을 정밀하게 측정하기 위하여 50 배율의 Profile projector 를 사용하였으며, 층제거방법은 0.1mm/10 회 측정하였다.

구멍뚫기법은 RS-200 Milling guide 와 로젯을 사용하였으며 측정방법은 ASTM E837 절차를 준용하였다. 지름방향으로의 일정한 구멍을 뚫기 위해 1.57mm 의 Double ended cutter 를 사용하였으며 2,000rpm 의 핸드드릴을 사용하여 시편의 중심부에 증분(Blind-hole) 방식으로 시편의 표면으로부터 1mm 까지 0.2mm/5 회 측정하였다.

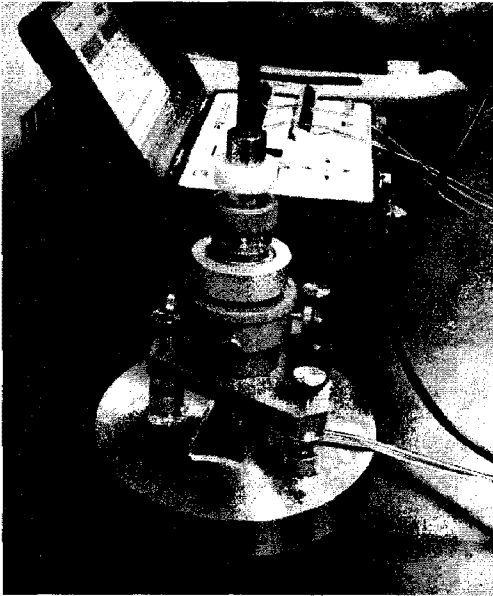


Fig. 2 Experimental equipment for measuring residual stress using the hole drilling method

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 실험 결과

각각의 측정법에 대하여 동일한 공정조건으로 제작된 시편으로 3 회씩 측정하였다. 층제거법에 의한 실험 결과는 Fig. 3 와 같이 시편의 표면으로부터 인장-압축-인장응력의 분포를 나타내고 있으며 응력값은 3.6 ~ -1.8MPa 의 범위를 보이고 있다. 그리고 구멍뚫기법에 의한 실험 결과는 Fig. 4 와 같이 시편의 표면으로부터 인장-압축-인장응력의 분포를 나타내고 있으며 응력값은 3.1 ~ -1.2MPa 의 범위를 보이고 있다.

#### 3.2 토의

Fig. 5 와 같이 실험의 결과에 대한 검증을 위해 상용프로그램인 몰드플로어를 사용하여 상호비교 결과 응력의 분포는 시편의 표면으로부터 인장-압축-인장응력의 분포를 나타내고 있으며 응력값은 4 ~ -9MPa 의 범위를 보이고 있다. 두 측정법에 대한 실험 결과는 일정한 값을 보이고 있으나 시뮬레이션 비교 결과 응력의 분포경향은 동일하나 압축응력 부분에서 정량적인 값의 차이를 보이고 있다. 이는 시뮬레이션상의 금형 벽면에서 고분자 사슬의 미끄러짐으로 인한 미끄러짐 경계조건 문

제, 실험 오차로 인한 측정값의 부정확, 사출성형 후 응력 측정시까지 시편의 응력완화 등의 원인으로 생각된다.

본 연구에서 잔류응력의 측정법으로 도입된 구멍뚫기법은 기존의 금속이나 세라믹 재료와 같이 완전 탄성체로 가정할 수 있는 시편에 대한 잔류응력 측정에 사용되었던 방법으로 점탄성 거동을 보이는 고분자 시편에 적용한 사례는 극히 드물다. 하지만 측정 결과 표면에서의 값의 차이는 다소 있으나 전반적인 응력의 분포경향 등이 일치해 사출품에 대한 이 방법의 적용가능성에 대한 개연성을 확인할 수 있었다.

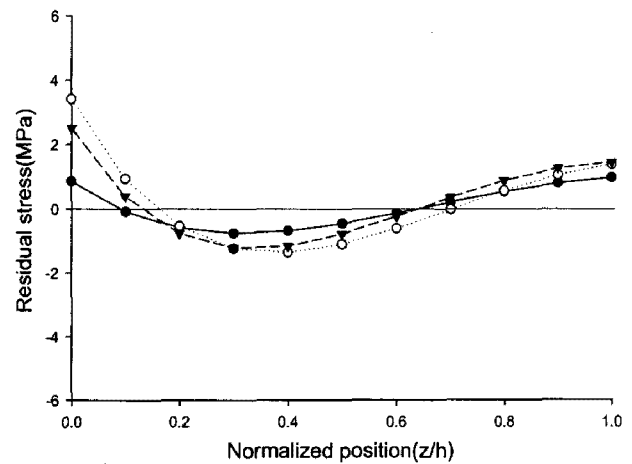


Fig. 3 Residual stresses obtained using the layer removal method

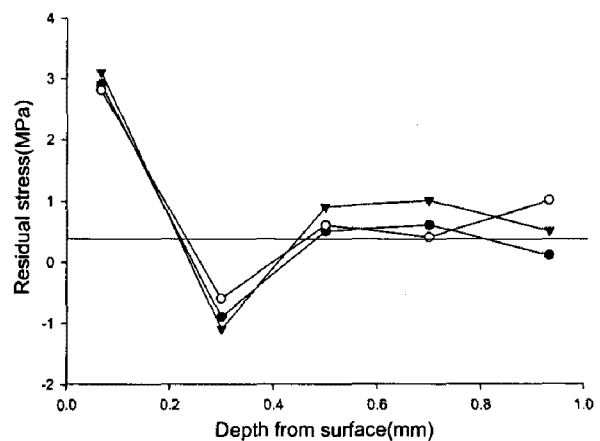


Fig. 4 Residual stresses obtained using the hole drilling method

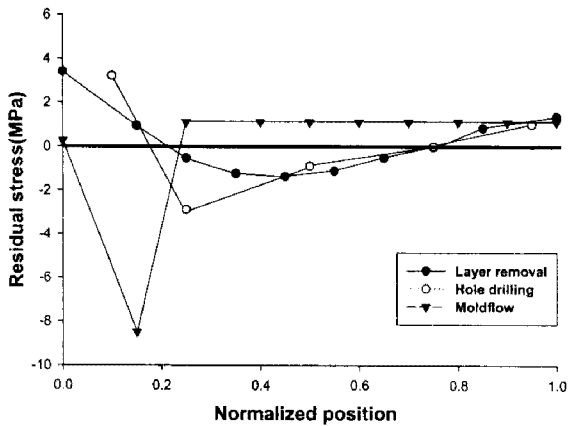


Fig. 5 Comparison of residual stresses obtained by Moldflow and experiments

#### 4. 결론

본 연구에서는 사출성형 된 폴리스타이렌 시편에 대하여 깊이방향으로 변하는 잔류응력에 대하여 상용프로그램인 Moldflow를 사용하여 잔류응력 해석을 수행하였고, 실제 사출품에 대한 잔류응력의 신뢰성 있는 측정을 위하여 층제거법과 구멍뚫기법을 사용하여 응력의 분포를 비교하였다. 그리고 잔류응력에 대한 두 가지 측정법에 대하여 상호비교 하였으며, 구멍뚫기법의 사출품에 대한 적용 가능성에 대한 기초 연구를 수행하였다.

앞서 언급하였듯이 구멍뚫기법은 다양한 형상의 공업용 사출품에 대하여 잔류응력을 측정하기에 매우 유용한 방법으로 판단되나 이 방법이 사출품의 잔류응력에 대한 측정방법으로 적용되기

위해서는 측정오차를 줄이기 위한 기술 향상과 깊이 방향으로 변하는 잔류응력장을 보다 정확하게 고려할 수 있는 응력값 계산법에 대한 연구가 지속적으로 필요하리라 판단된다.

#### 참고 문헌

- [1] Treuting, R. G. and Read, W. T., 1951, A Mechanical Determination of Biaxial Residual Stress in Sheet Materials, J. Applied Physics, Vol. 22, pp. 130-134.
- [2] X. Zhang, X. Cheng, and K. A. Stelson, 2002, Approximation Model of Thermal Residual Stress in Injection Molded Part, J. thermal Stresses, Vol. 25, pp. 523-538.
- [3] Mathar. J., "Determination of Initial Stresses by Measuring the Deformation Around Drilled Holes", Trans. ASME, Iron & Steel, Vol. 56, pp. 249-254.
- [4] Schajer, G. S, "Measurement of Non-uniform Residual Stresses Using the Hole-drilling Method", Trans. ASME, J. Eng. Mat. and Tech., Vol. 110, pp. 338-349.
- [5] ASTM, "Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method", Annual Book of ASTM E837-01, pp. 1-10.
- [6] Measurement Group, "Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method", Measurement Group Tech Note TN-503-5, pp. 1-19.
- [7] Maxwell, A. S. and Turnbull, A., "Measurement of Residual Stress in Engineering Plastics Using the Hole-drilling Technique", Polymer Testing, Vol. 22, pp. 231-233.