

잔류응력 및 점탄성을 고려한 플라스틱 부품의 후변형 예측

문형일¹, 김현영^{1*}, 최철우², 정갑식²

Prediction of Post-Deformation for Plastic Component Considering Residual Stress and Viscoelasticity

H. I. Moon, H. Y. Kim, C. W. Choi, K. S. Jeong

Abstract

Plastics is commonly used in consumer electronics because of it is high strength per unit mass and good productivity. But, using, transporting, and keeping of plastic component was happened post-deformation. As time goes by and temperature is changed, the post-deformation causes the problems of exterior design and performance. But, it is difficult to estimate the post-deformation by only thermal deformation analysis. Also, the estimation technique of the post-deformation must be easily applied to product development and it should be reliable because development time of product is limited. In the paper, the process to predict the post deformation under cyclic thermal loadings was suggested. The process was applied to the real panel, and the deformation predicted by the analysis was compared with that of real test, which showed the possibility of applying the suggested process to predict the post deformation of plastic product under thermal loadings.

Key Words : Residual stress(잔류응력), Viscoelastic(점탄성), Creep(크리프), Stress relaxation(응력완화), Thermal analysis(열변형 해석), Prony series(프로니 시리즈)

1. 서론

플라스틱은 기계적 성질에 있어서 무게 대 강도 비가 상당히 뛰어나고 높은 성형성 및 생산성을 가지고 있기 때문에 전자제품 및 자동차를 비롯한 다양한 산업분야에 널리 사용되어지고 있다. 하지만 사출을 통하여 성형된 플라스틱 부품의 경우 사용 중 또는 이동, 보관 중 형상의 변화(후변형; post-deformation)가 발생하게 된다. 특히 온도의 사용 온도의 변화와 사용시간이 오래 지속됨에 따라 이러한 현상은 크게 발생하게 된다.[1]

플라스틱 제품의 후변형은 크게 두 가지 원인으로 나누어 가정 할 수 있다. 첫째는 사출 후 제거되지 않은 잔류응력이 외부 하중에 의하여 표출되어 시간이 지남에 따라서 변형이 발생한 경우이고, 둘째는 온도변화로 인한 재료 팽창/ 수축

시 구속에 의한 국부적인 변형이 냉각 후에 그대로 남아 후 변형을 유발하는 경우이다. [2]

본 논문에서는 상용소프트웨어인 MOLD FLOW 와 ABAQUS를 사용하여 플라스틱 부품의 내/냉열 시험 결과를 예측할 수 있는 프로세스를 제시하여 보았다. 이때 사용한 해석 조건으로는 사출후의 잔류응력(residual stress)과 플라스틱의 점탄성(viscoelasticity)의 영향성, 마지막으로 제품의 체결 조건으로 제한하였다. 이는 제한된 제품 개발 시간과 해석의 효율성을 극대화 하기 위함이다

2. 플라스틱의 내/냉열 시험

플라스틱 내/냉열 시험조건은 냉각 및 내열이 가능한 챔버(chamber)를 사용하여 ABS 계열의 플라스틱에 대하여 실시하였다. 시험 온도 조건은

1. 강원대 기계메카트로닉스공학과
2. LG전자 DAC연구소 C4 group
E-mail: khy@kangwon.ac.kr

70℃~30℃의 범위에 대하여 실시하였다. 또한 70℃, -30℃의 경우 일정한 시간 동안 온도를 유지하였다. 이러한 조건을 1 사이클(Cycle)로 하여 4 사이클 후의 변화를 Fig. 1 과 같은 위치에 대하여 측정하였다. 이때 3 차원 측정기를 사용하여 mm 단위로 측정하였고 여러 개의 시편에 대한 결과값을 구하였다.

Table 1 은 4 사이클 후의 시험결과이다. 시험 후 형상은 각 위치에 따라 수축 및 팽창되었다. 또한 사출 성형의 특성이 반영되어 최대 약 0.7mm 의 산포가 발생하였다. Table 2 는 4 번의 시험 결과와 1 번의 시험 결과에 대한 차이를 나타낸다. 시험 결과 반복시험에 대한 효과가 그리 크지 않음을 확인할 수 있었다.

이와 같은 시험결과들로부터 해석 조건에 대한 가정을 다음과 같이 세울 수 있었다. 먼저 해석 결과 판단 기준은 산포를 고려하여 측정 결과의 최대값과 최소값 사이의 값으로 정하였고, 해석 효율성을 극대화 하기 위하여 반복하중의 효과는 무시하였다.

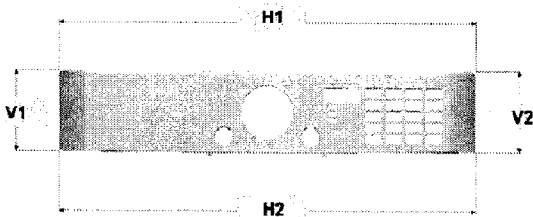


Fig. 1 The position of measurement.

Table 1 Measuring data of the C panel after 4 cycles

| | H1 | H2 | V1 | V2 |
|------|--------|--------|--------|--------|
| Max. | -1.950 | -0.590 | -0.360 | -0.290 |
| Min. | -1.360 | 0.100 | 0.270 | 0.010 |
| Mean | -1.655 | -0.245 | 0.045 | -0.140 |

Table 2 Measuring data of the C panel after 1 cycle

| | H1 | H2 | V1 | V2 |
|------------|--------|--------|-------|--------|
| 1 cycle | -1.655 | -0.245 | 0.045 | -0.140 |
| 4 cycles | -1.66 | -0.320 | 0.110 | -0.420 |
| Difference | -0.005 | -0.075 | 0.065 | -0.280 |

3. 플라스틱의 물성 측정

플라스틱 물성 측정에 사용된 시편은 ASTM 규격의 Type 1을 사용하였으며 시편의 두께는 약 3.2mm로 제작하였다. 시험에 사용한 U.T.M은 INSTRON 5567을 사용하였으며, 로드셀(load cell)용량(Capacity)은 20KN을 사용하였다.

3.1 단축인장 시험

플라스틱 시편의 경우 시편의 인장속도(Strain rate)와 시험 온도에 큰 영향을 받는다. 본 논문에서는 C-panel의 내/냉열 과정이 준정적(quasi-static)으로 발생한다고 가정하여 인장시험 속도를 약 1mm/min의 속도로 시험하였다. 각각 3회 이상의 결과값을 평균하여 사용하였다. 이 같은 시험 결과를 통해 온도 조건 별 탄성 계수를 구할 수 있었다.[3]

3.2 Viscoelastic material test

플라스틱 재료는 점성과 탄성의 성질을 동시에 가지는 점탄성체이다. 이러한 점탄성 효과는 크게 응력완화 및 시간 지연 효과로 나타난다. 일반적으로 점탄성 거동의 예측을 위한 재료시험은 크리프(creep) 시험과 응력완화시험(Stress relaxation test)이 대표적이다.[4]

먼저 크리프 시험의 경우 일축인장 응력 상태에 대하여 하중을 고정하고 시편의 변형률을 측정하였다. 시험 온도는 각각 20℃와 70℃를 사용하였고 시험 하중은 10N~160N으로 고정한 뒤 변위를 측정하였다(Fig. 3, 4). 크리프 시험 결과를 보면 재료가 충분히 굳은 20℃ 이하의 온도에서는 점탄성의 효과가 크게 발생되지 않음을 확인할 수 있다. 하지만 70℃에서의 시험은 점탄성이 비교적 크게 발생함을 확인하였다.

점탄성은 초기 하중 및 변형률에 독립적이다. 이와 같은 사실을 검증하기 위하여 다음과 같은 응력완화 시험을 실시하였다. 응력완화 시험의 경우 70℃의 조건에서 0.5%~2.5% 까지의 변형률을 사용한 시험을 실시하였다. 시험 결과 초기에 고정된 변위에 따라 완화된 응력의 양이 비례하게 나타났다. 또한 Fig. 4와 같이 시험 결과를 Normalized relaxation function으로 변환하여 보았을 때 각 변형률에 대한 결과가 비교적 동일하게 나

타남을 확인하였다.[3-4]

4. C_panel의 열변형 해석

C_panel 변형 해석에 사용된 조건은 다음과 같다. 해석 경계조건은 C_panel을 챔버에 넣은 상태를 모사하도록 설정하였으며 해석 조건은 Table 3과 같은 조건을 사용하였다. 이와 같은 조건에 대하여 ABAQUS를 사용한 해석을 수행하였다. 해석을 통해 Fig. 1의 위치에 대한 변위의 변화를 확인하고 Table 1의 시험 결과와 비교하여 보았다

먼저 Case 1, 즉 오직 온도의 변화만을 고려한 해석으로부터 계산된 변위의 변화는 각각의 측정 위치에 모두 거의 변화하지 않았음을 확인하였다.[5]

다음으로 Case 2, 온도의 변화의 영향성과 잔류응력의 영향성에 대한 해석 결과이다. MOLD FLOW를 통하여 얻어진 잔류응력의 값을 해석 초기값으로 사용한 후 Case 1과 같은 해석을 수행하였다.[5-6] Fig. 6은 각 위치에 대한 시험 결과와 해석 결과를 나타낸 그래프이다. H2 위치를 제외한 대부분의 위치에서 해석 결과값과 시험 결과값이 근사하게 나타남을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과로 볼 때 사출 후의 잔류응력이 제품의 후변형에 큰 영향을 준다는 가설을 확인할 수 있었다.

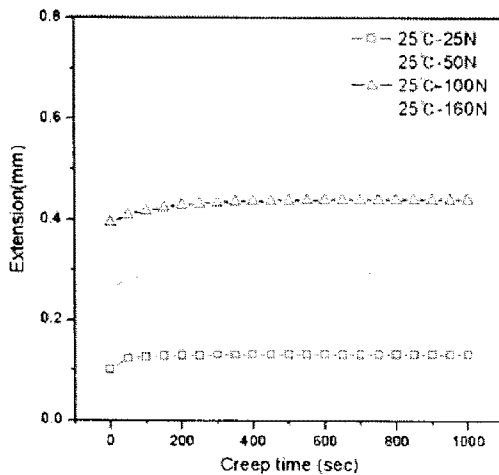


Fig. 3 Creep test results for variation in the initial load at 20°C

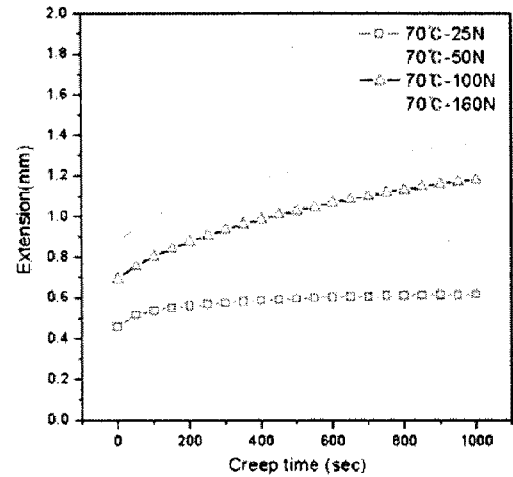


Fig. 4 Creep test results for variation in the initial load at 70°C

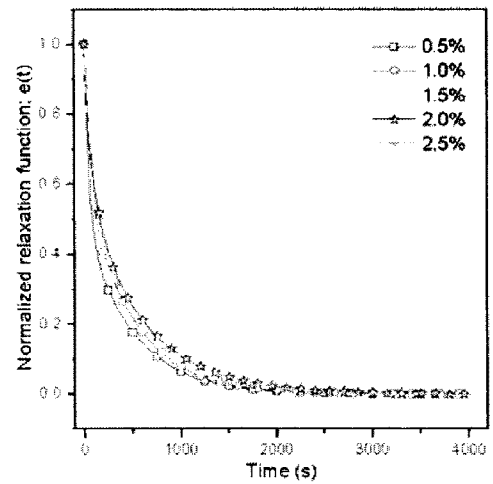


Fig. 5 Stress relaxation test results for variation in the initial strain. Normalized relaxation function ($E(t)=E(\infty)+\{E(0)-E(\infty)\}e(t)$ at $E(t)=\delta(t)/\epsilon$).

Table 3 The analysis cases for prediction of deformed shape at the C_panel

| Case | Condition | Analysis step |
|------|------------------------------------|--|
| 1 | Only thermal effect | 20 °C → 70°C → -20°C → 20°C |
| 2 | Case 1 condition + Residual stress | Residual stress → 20°C → 70°C → -20°C → 20°C |
| 3 | Case 2 condition + Viscoelasticity | Residual stress → 20°C → 70°C → Viscoelasticity → -20°C → 20°C |

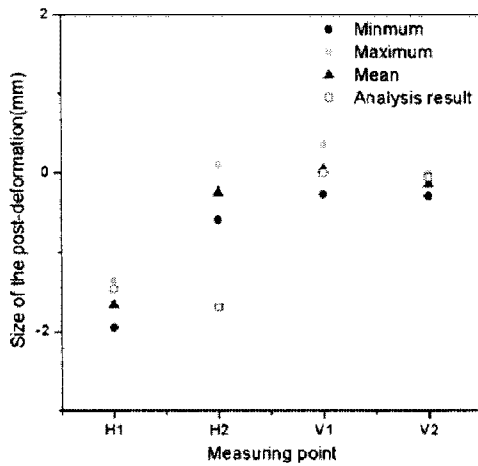


Fig. 6 Creep test results for variation in the initial load at 20°C

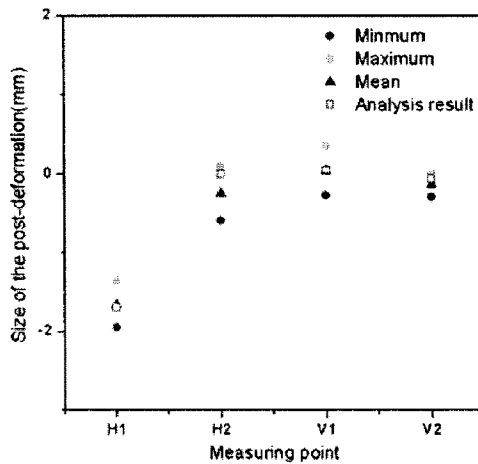


Fig. 7 Creep test results for variation in the initial load at 20°C

마지막으로 Case 3의 해석 결과이다. Case 3은 Case 2의 조건에 더불어 플라스틱의 점탄성 효과를 고려한 조건이다. 점탄성 효과는 응력완화 시험 데이터를 사용하여 70°C 조건에 대하여서만 적용하였다.[3,5] Fig. 7은 Case 3의 해석 결과이다. 모든 측정 위치에 대한 결과값이 시험 결과값의 산포 범위 안에서 예측할 수 있었으며, 특히 H2의 경우 Case 2의 결과값에 비하여 시험값의 평균값과의 차이가 줄어들었음을 확인할 수 있었다. 이

와 같은 결과로 볼 때 플라스틱의 점탄성 효과 역시 제품의 후변형에 있어 영향을 끼친다는 가설을 확인 할 수 있었다.

4. 결론

본 논문은 아래와 같이 요약할 수 있다.

(1) 플라스틱 부품의 후변형을 예측하기 위하여 시험 조건을 고려한 단축인장 시험 및 크리프 시험, 응력완화 시험을 수행였다.

(2) 특정 조건에 대한 내/냉열 시험을 실시한 후 3차원 측정기를 통하여 후변형을 측정하였다. 이로부터 해석 결과의 평가 기준 및 반복효과에 대한 영향성을 검토하여 보았다.

(3) Table 3 과 같은 조건의 해석을 수행하고 이를 시험 결과와 비교하여 보았다. 이를 통해 사출 후 잔류응력과 70°C에서의 점탄성효과를 고려하는 플라스틱 후변형 예측 방안을 제시하였고 그 신뢰성을 확인하여 보았다.

참고 문헌

- [1] 김재수, 김중재, 김현영, 1992, 자동차 플라스틱 부품의 사출 성형 해석, 한국자동차공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 436-445
- [2] 최광용, 김영주, 김현영, 1996, 승용차용 플라스틱 펜더의 사출성형해석과 열변형 예측, 한국자동차공학회 추계학술대회논문집, 제2호, pp.425-434
- [3] 문형일, 김현영, 최철우, 정갑식, 2008, 온도 및 잔류응력을 고려한 플라스틱 부품의 점탄성 해석, 한국소성가공학회 춘계학술대회논문집, pp.288-292
- [4] J. D. Ferry, Viscoelastic properties of polymers, 1980, John Wiley & Sons
- [5] ABAQUS Theory manual
- [6] MOLD FLOW User manual