

# 온도 및 잔류응력을 고려한 플라스틱 부품의 점탄성 해석

문형일<sup>1</sup>, 김현영<sup>1#</sup>, 최철우<sup>2</sup>, 정갑식<sup>2</sup>

## Thermal Viscoelastic Analysis of Plastic Part Considering Residual Stress

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 plastic parts are usually distorted after injection molding due to the residual stress after filling, packing, cooling process, and etc. And plastic material is to be deteriorated according to various temperature conditions and operating time, which can be characterized by stress relaxation and creep. The viscoelastic behaviour of plastic materials in time domain can be expressed by the Prony series of the commercial code, ABAQUS. 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

최근 사출공정을 통한 플라스틱 제품은 경량화, 고기능, 고품질화 및 생산성 향상 등에 대한 요구가 높아짐에 따라 적용성이 점점 확대되어 가고 있다. 특히 전자제품 산업의 경우 다른 산업에 비하여 이러한 경향성이 가장 크게 나타나는 분야 중 하나라 할 수 있다[1].

특히 전제품의 대부분의 외장재의 경우 생산성 및 디자인 적인 측면으로 인하여 사출성형을 통한 플라스틱 제품이 사용되어진다. 하지만 사출된 플라스틱 부품의 경우 불균일한 수축, 상하 금형 냉각차 등의 여러 가지 원인으로 인하여 제품의 변형 및 잔류응력(residual stress)이 발생하게 된다. 또한 플라스틱의 재료적 특성상 금속재료에

비하여 하중에 대한 변위가 크고 시간과 온도에 종속적인 점탄성(viscoelastic) 특성을 갖고 있다. 이러한 특성은 불규칙적인 조건에서 더욱 크게 발현될 수 있다[2-7].

본 논문은 상용 해석 프로그램인 MOLD FLOW 와 ABAQUS를 사용하여 성형 후 발생된 잔류응력을 초기조건으로 한 플라스틱 부품의 열 변형 해석(thermal deformation analysis)를 수행하였다. 또한 특정조건(내/냉열 시험조건)에 대한 제품의 변형을 해석적으로 예측하여 보았으며, 나아가 선형 점탄성 해석(linear viscoelastic analysis)을 수행하여 시간에 대한 제품의 변형을 예측하여 보았다.

### 2. 이론적 배경

플라스틱 제품의 후변형(post-deformation)은 크게 두 가지 원인으로 나누어 가정 할 수 있다. 첫째는 사출 후 제거되지 않은 잔류응력이 열에 의

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

해 물성 저하 시 물성저하를 유발하여 후변형이 남는 경우이고, 둘째는 온도상승으로 인한 재료 팽창 시 구속에 의한 국부적인 변형이 냉각 후에 그대로 남아 후 변형을 유발하는 경우이다. 최근 CAE를 사용하여 성형시 발생하는 잔류응력과 사출성형 후 제품의 휨(warping)을 예측하는 연구는 많이 시도되고 실제 설계상에 많은 부분 적용이 되고 있다. 하지만 성형 후 제품 장착상태에서의 후변형과 내/냉열 시험에 대한 제품의 변형은 최근 들어 연구가 진행되고 있으나, 실제 제품 설계에 있어 크게 적용 되지 못하고 있는 실정이다[2-7].

### 2.1 사출성형과 잔류응력

플라스틱 사출 성형은 용융시킨 액상의 수지를 고압으로 금형내에 사출한 후 이를 냉각시킴으로써 제품을 얻는 공정으로, 이 때의 플라스틱은 두 번의 수축과정을 거친다. 먼저 고압으로 인한 액상수지의 체적수축을 거친 후 액상에서 고상으로 전이하는 과정에서 발생하는 체적수축을 거치게 된다. 이러한 체적 수축은 최종제품의 변형에 큰 영향을 미치게 되어, 제품내의 국부적인 수축차를 유발하고, 이로 인해 전체적인 잔류응력 및 변형을 발생시킨다[2-4].

### 2.2 내/냉열 시험 후 후변형 예측

플라스틱 재료는 점성과 탄성의 성질을 동시에 가지는 점탄성체이다. 점탄성 거동은 응력완화(stress relaxation)과 지연시간(retardation time)으로 그 특성을 잘 표현할 수 있는데 스프링과 댐퍼의 직렬, 또는 병렬 연결된 모델로 단순화시켜 생각할 수 있다. 플라스틱 사출제품은 공정이 진행됨에 따라서 응력완화와 시간지연 현상이 반복적으로 발생하게 된다[2-5].

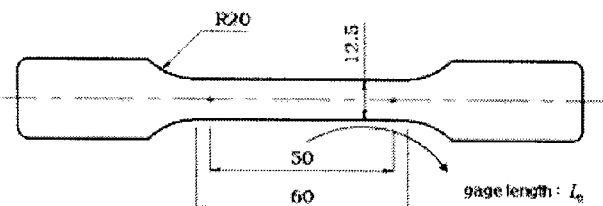


Fig. 1 Specimen shape for material test

또한 내/냉열 조건이 반복적으로 플라스틱 제품에 가해질 경우에도 이러한 응력완화 또는 시간지연 효과가 제품의 후변형에 영향을 미치게 된다[2-4].

### 2.3 재료의 점탄성 거동

점탄성 거동하는 물체의 응력은 Shear modulus에 의한 편차 응력과 Bulk modulus에 의한 정수압응력의 합으로 표시할 수 있다. 이때 변형이 미소하고 재료가 소성변형을 거치지 않는다면 계를 선형이라 생각할 수 있으므로 발생한 응력 성분을 Boltzmann 중첩의 원리를 이용하여 표현할 수 있다.[8] 즉 임의 시간 t에서의 응력은 t시간까지의 응력 path를 거치면서 미소 시간 동안 발생한 미소 응력 증분의 합으로 나타내어 진다. 이러한 개념을 통해 지배방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma(t) = \int 2G(\tau - \tau') \dot{e} dt' + \int 2K(\tau - \tau') \dot{\varphi} dt' \quad (1)$$

여기서  $e$  와  $\varphi$  는 각각 편차변형(deviatoric strain)과 체적변형(volumetric strain)을 나타내며,  $G(t)$  와  $K(t)$  는 각각 전단 및 체적 완화계수(shear and bulk relaxation modulus)로서 표현될 수 있다. 또한 식 (1)은 Prony series 형태로 식 (2), (3) 과 같이 표현될 수 있다.

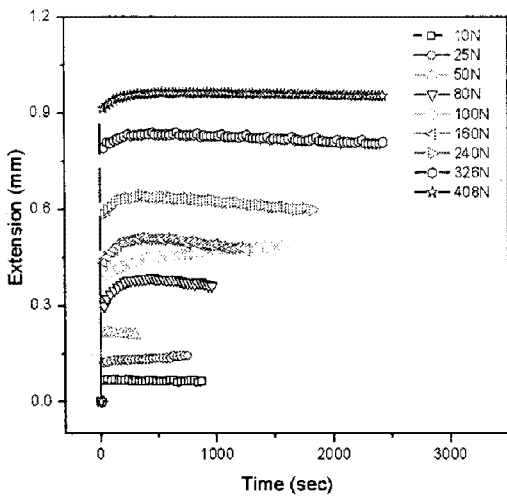
$$G(t) = G_0 \left\{ 1 - \sum_{i=1}^N g_i^p (1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}) \right\} \quad (2)$$

$$K(t) = K_0 \left\{ 1 - \sum_{i=1}^N k_i^p (1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}) \right\} \quad (3)$$

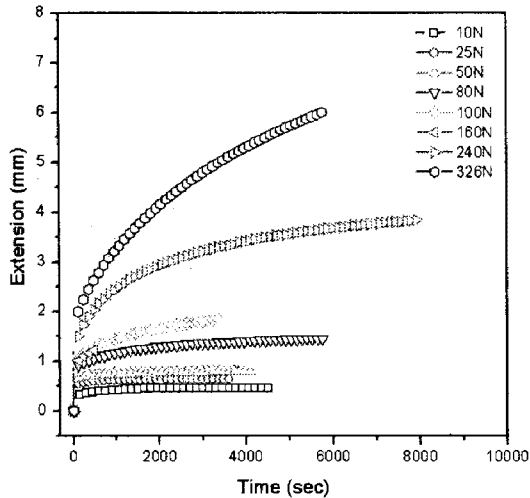
여기서  $G_0$ ,  $K_0$  는 순간 전단, 체적 완화계수(Instantaneous modulus)이며,  $g_i^p$ ,  $k_i^p$ ,  $\tau$  는 Prony series 상수를 나타낸다[9].

## 2. 재료시험

플라스틱 제품의 변형 해석 시 사용할 재료 데이터를 구하기 위하여 Fig. 1과 같은 아령형 모양의 인장시편을 제작하였다. 또한 사출공정의 영향성을 고려하여 실제제품으로부터 채취하였다[10].



(a) Creep test result (at 20°C)



(b) Creep test result (at 70°C)

Fig. 2 Creep test results for variation initial load

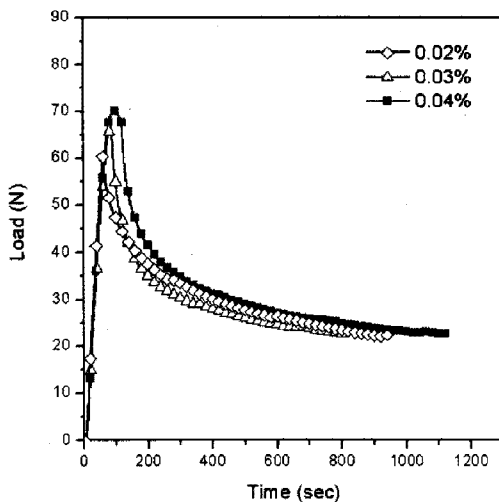
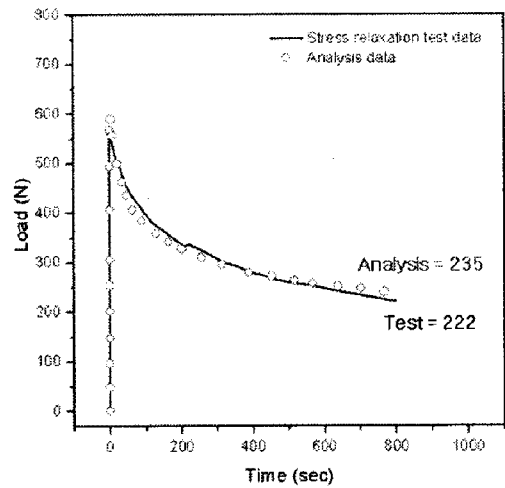
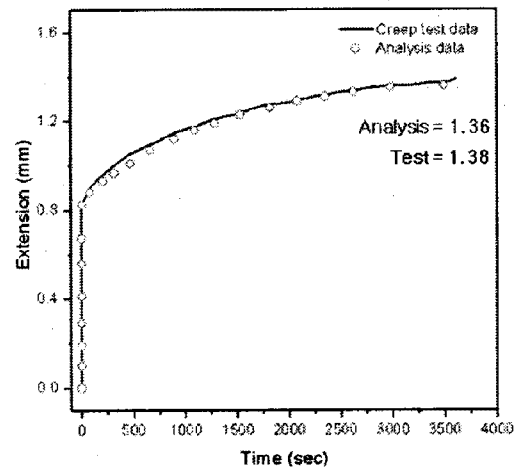


Fig. 3 Stress relaxation test results



(a) Stress relaxation test data vs. analysis data using one element



(b) Creep test data vs. analysis data using boundary condition of creep test

Fig. 4 Comparison with test data and analysis data

## 2.1 단축인장 시험

해석의 가장 기본적인 물성치인 탄성계수 (Young's modulus)를 구하기 위하여 단축인장 시험 (uniaxial tension test)을 수행하였다. 인장시험에 사용한 U.T.M은 INSTRON 5567을 사용하였으며, 로드셀(load cell)은 20KN, 인장속도는 20mm/min을 사용하였다. 이러한 조건으로 -20도, 20도, 70도에 대한 인장시험을 실시하였다.

## 2.2 크리프 및 응력완화 시험

점탄성 데이터를 구하기 위하여 크리프(creep) 시험 및 응력완화(stress relaxation) 시험을 수행하

었다. 두 시험 모두 기본적인 시험 조건은 단축인장 시험과 동일하게 사용하였다. 먼저 크리프 시험의 경우 일축인장 응력 상태에 대하여 하중을 고정하고 시편의 변형률을 측정하였다. 이때 작용 하중을 10N ~ 408N까지 변화시키며 시험하였으며, 20도와 70도의 조건에 대하여 시험을 수행하였다. Fig. 2는 크리프 시험 결과를 나타낸 그래프이다. 결과를 보면 재료가 충분히 굳은 20도 이하의 온도에서는 점탄성의 효과가 크게 발현되지 않음을 확인할 수 있다. 반대로 70도의 온도에서는 점탄성의 거동이 비교적 크게 발생함을 확인할 수 있다.

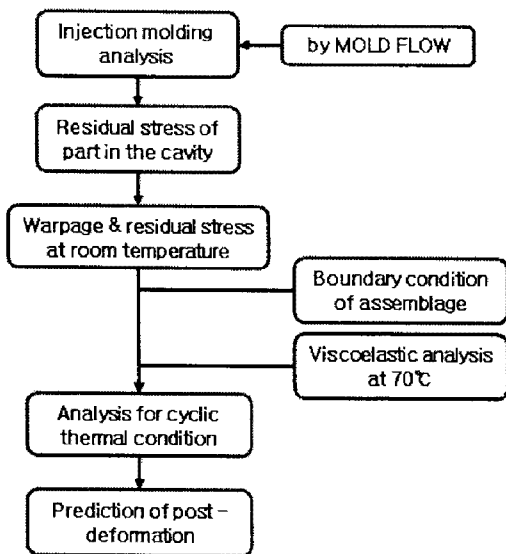


Fig. 5 Analysis process for prediction of post-deformation

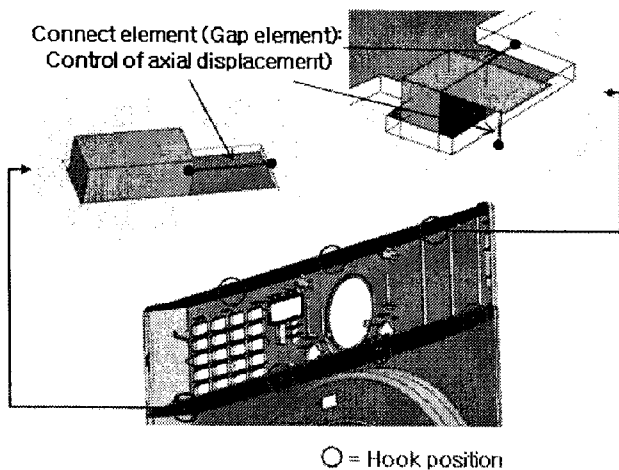


Fig. 6 F.E modeling for simulation of actual movement at hook position

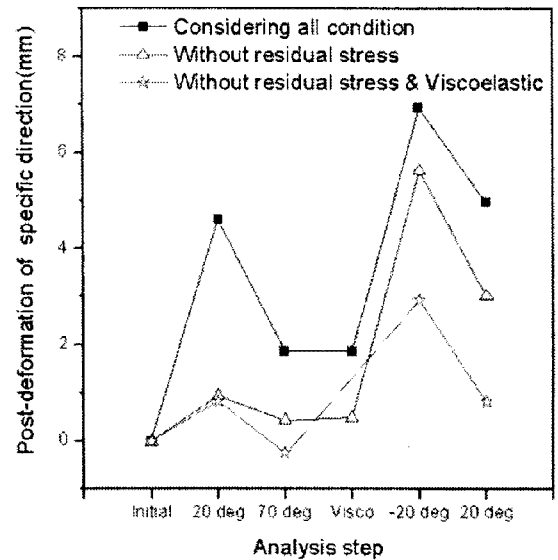


Fig. 7 Prediction of post-deformation due to cyclic thermal load

또한 시험 결과를 분석하여 보면 초기에 가해진 하중의 변화에 따라서 변형률의 변화가 개연성 없이 나타나는 경향을 발견할 수 있다. 이러한 현상은 크리프 시험이 진행됨에 따라 단면적은 연속적으로 변하게 되고, 이는 시편에 가해지는 응력을 변화시켜 발생하는 오차라 생각할 수 있다[11]. 이러한 문제를 해결하기 위하여 변형률을 고정하고 하중의 변화를 측정하는 응력완화시험을 수행하였다. 이때 초기에 시편에 가한 변형률을 각각 2, 3, 4%로 다르게 주고 하중의 변화를 확인하여 보았다. Fig. 4는 각 조건에 대한 결과를 나타낸 그래프이다.

일반적인 재료의 응력완화 시험의 경우 일정시간 이후에서는 큰 변화가 없이 선형적인 거동이 발생함이 알려져 있다[12-13]. 이러한 내용을 바탕으로 비교적 안정화된 500초 이후의 시험 결과는 선형보간법(linear fitting)을 사용하여 예측하고 이를 해석에 사용하였다.

### 3. 검증해석

입력된 점탄성 물성값이 해석적으로 잘 표현되는지 확인하기 위하여 하나의 요소를 사용한 검증해석을 수행하여 보았다. Fig. 4(a)와 같이 응력완화시험결과와 Prony serie에 의해 계산되어진 해석값의 차이가 유사함을 확인할 수 있다.

또한 크리프 시험 조건을 경계조건으로 사용한 해석값과 시험값을 비교하여 해석의 신뢰성을 다시 한번 확인하여 보았다. Fig. 4(b)에서와 같이 시험결과와 해석 결과가 큰 오차가 없음을 확인할 수 있다.

#### 4. Control panel의 열변형 해석

Control panel사출성형품의 단기 내열 시험 결과와 해석 결과를 비교하여 보았다. Fig. 5와 같은 과정을 통해 시험 조건을 모사하였으며, 70도를 제외한 나머지 온도에서는 점탄성 효과를 무시하였다. 또 초기 조건을 MOLD FLOW를 통해 계산된 잔류응력을 사용하였다.[5] 마지막으로 Fig. 6과 같이 체결부(hook position)를 실제 거동 조건과 유사하게 변형 될 수 있도록 1차원Connect 요소와 변위 경계조건을 사용하여 모델링 하였다[9]. 이러한 조건들을 사용하여 장착 상태의 Control panel의 내/냉열 변형 해석 결과는 Fig. 7과 같다. 이를 통해 제시된 모든 조건을 고려한 해석 결과값이 실제 결과값과 유사함을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 논문은 아래와 같이 요약할 수 있다.

(1) 크리프 시험, 응력완화 시험을 실시하고, 이를 기본으로 하여 점탄성 해석을 수행하였다. 또한 시험결과와 비교 분석하여 해석 결과의 신뢰성을 확인하여 보았다.

(2) MOLD FLOW를 사용한 사출해석 결과로부터 잔류응력을 계산하였고, 이를 해석 초기 조건에 사용하여 제품의 후변형을 예측하였다.

(3) 열변형 해석 시 체결부의 거동을 효과적으로 모사하기 위하여 1 차원 connect 요소와 변위 경계조건을 사용하여 모델링 하였다.

(4) 장착된 Control panel 에 대하여 내/냉열 조건에서의 후변형을 해석적으로 예측하고 이를 시험결과와 비교하여 보았다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 박상현, 김용환, 김선우, 이시호, 2003, 성형효과를 고려한 플라스틱 사출품의 구조해석, 한국소성가공학회 추계학술대회논문집, pp. 217~220
- [2] 김현영, 김중재, 김재수, 1996, 자동차 플라스틱 부품의 내열변형 예측에 관한 연구, 한국정밀공학회지, 제13권, 제5호, pp. 44~52
- [3] 최광용, 김영주, 김현영, 1996, 승용차용 플라스틱 팬더의 사출성형해석과 열변형 예측, 한국자동차공학회 추계학술대회논문집, 제2호, pp.425~434
- [4] 김재수, 김중재, 김현영, 1992, 자동차 플라스틱 부품의 사출 성형 해석, 한국자동차 공학회 춘계학술대회논문집, pp.436~445
- [5] Mold Flow user manual
- [6] M. A. Elseifi, S. H. Dessouky, I. L. Al-Qadi, S. Yang, 2006, Transportation Research Board85th Annual Meeting, A Viscoelastic Model to Describe the Mechanical Response of Bituminous Sealants at Low Temperature, pp.1~15
- [7] C. A. Hieber, S. F. Shen, 1978, Flow Analysis of the Non-Isothermal Two-Dimensional Filling Process in Injection Molding, Israel Journal of Tech. Vol 16, pp.248-254
- [8] J. D. Ferry, Viscoelastic properties of polymers, 1980, John Wiley & Sons
- [9] ABAQUS user manual
- [10] 이도명, 한병기, 이성희, 2006, 사출성형과정의 잔류응력을 고려한 표준인장시편의 선형구조 해석, 한국정밀가공학회 춘계학술대회논문집, pp. 579~580
- [11] 성낙현, 2003, 크리프 해석을 이용한 PSGT 시편의 장기거동예측에 관한 연구, 한남대학교 대학원
- [12] 이영신, 최응규, 1986, 비압축성 점탄체의 열하중 해석, 대한기계학회 추계학술대회논문집, pp. 475~479
- [13] 이원희, 강신일, 홍정화, 1997, 해골면 점탄성 특성추정 및 응력완화거동의 유한요소해석, 대한기계학회 추계학술대회논문집, pp. 360~365