

온도 및 잔류응력을 고려한 플라스틱 부품의 점탄성 해석

문형일¹ · 김현영[#] · 최철우² · 정갑식²

Thermal Viscoelastic Analysis of Plastic Part Considering Residual Stress

H. I. Moon, H. Y. Kim, C. W. Choi, K. S. Jeong
(Received May 8, 2008)

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 behavior 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, Viscoelastic, Creep, Stress Relaxation, Thermal Analysis, Prony Series

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 전자제품의 외장재의 경우 생산성 및 디자인 적인 측면으로 인하여 사출성형을 통한 플라스틱 제품이 주로 사용되고 있다. 하지만 사출된 플라스틱 부품의 경우 불균일한 수축, 상하 급형 냉각차 등의 여러 가지 원인으로 인하여 제품의 변형 및 잔류응력(residual stress)이 발생하게 된

다. 또한 플라스틱 재료는 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.

1. 강원대 기계메카트로닉스공학과

2. LG전자 DAC연구소 C4 group

교신저자: 강원대학교 기계메카트로닉스공학과,

E-mail: khy@kangwon.ac.kr

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 의해 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 성형 시 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].

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 전단 탄성률

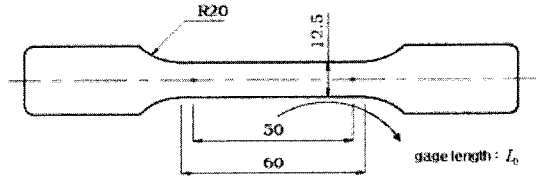
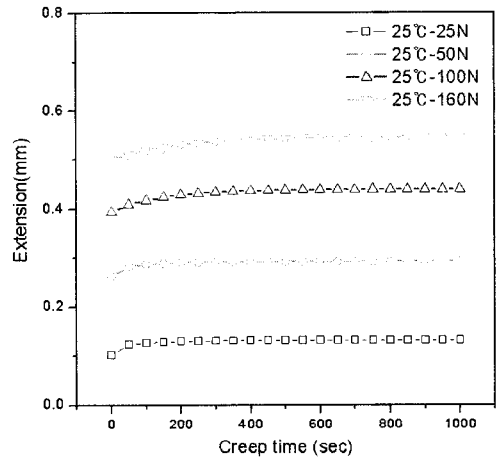
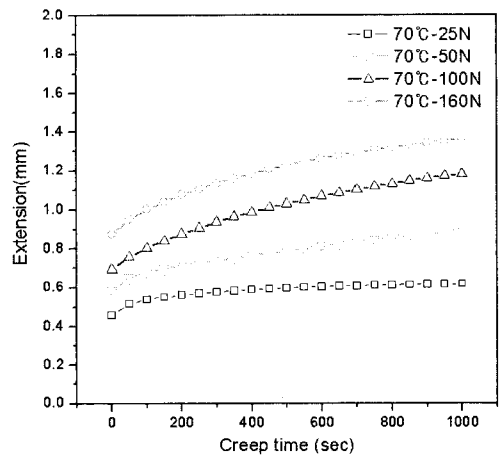


Fig. 1 Specimen shape for material test



(a) Creep test result (at 20°C)



(b) Creep test result (at 70°C)

Fig. 2 Creep test for variation in the initial load

(shear modulus)에 의한 편차 응력과 체적 탄성률(bulk modulus)에 의한 정수압응력의 합으로 표시할 수 있다. 이때 변형이 미소하고 재료가 소성변형을 거치지 않는다면 재를 선형이라 생각할 수 있으므로 발생한 응력 성분을 Boltzmann 중첩의 원리를 이용하여 표현할 수 있다[8]. 즉 임의 시간

t초에서의 응력은 t시간까지의 응력 path를 거치면서 미소 시간 동안 발생한 미소 응력 증분의 합으로 나타내어진다. 이러한 개념을 통해 지배방정식은 다음과 같이 표현된다.

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

여기서 e 와 ϕ 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 , τ 는 Prony series 상수를 나타낸다[9].

3. 재료시험

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

3.1 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.

3.2 크리프 및 응력완화 시험

점탄성 데이터를 구하기 위하여 크리프(creep) 시험 및 응력완화(stress relaxation) 시험을 수행하였다. 두 시험의 기본적인 시험 조건은 단축인장

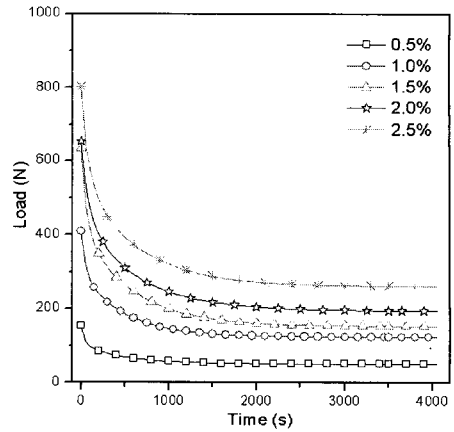


Fig. 3 Stress relaxation test result for variation in the initial strain

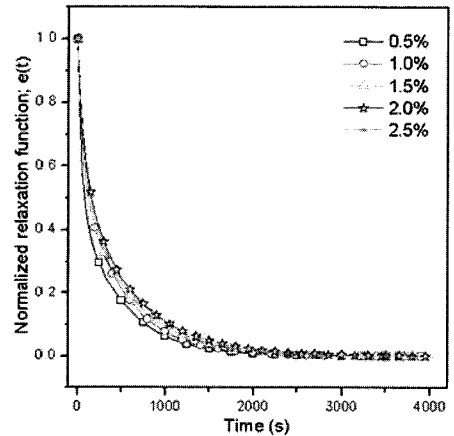
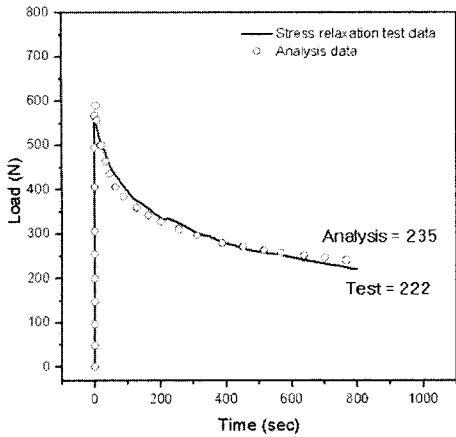


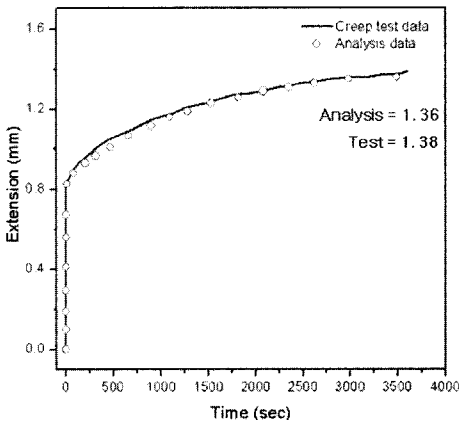
Fig. 4 Stress relaxation test results for variation in the initial strain. Normalized relaxation function ($E(t) = E(\infty) + \{E(0) - E(\infty)\}e(t)$ at $E(t) = \delta(t) / \epsilon$)

시험과 동일하게 사용하였다. 먼저 크리프 시험의 경우 일축인장 응력 상태에 대하여 하중을 고정하고 변형률을 측정하였다. 이때 작용하중을 25N~160N까지 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.

또한 변형률을 고정하고 하중의 변화를 측정하는 응력완화시험을 수행하였다. 응력완화 시험의 초기 각각 0.5~2.5%로 다르게 주고 70도의 조건에



(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. 5 Comparison with test data and analysis data

서 시험을 수행하였다. Fig. 3은 각 조건에 대한 결과를 나타낸 그래프이다. 또한 Fig. 4와 같이 시험 결과를 Normalized relaxation function으로 변환하여 보았을 때 각 변형률에 대한 결과가 비교적 동일하게 나타남을 확인하였다.[8]

4. 검증해석

입력된 점탄성 물성값이 해석적으로 잘 표현되는지 확인하기 위하여 한 개의 정육면체 요소를 사용한 검증해석을 수행하여 보았다. Fig. 5(a)와 같이 시험결과와 Prony serie에 의해 계산되어진 해석 값의 차이가 유사함을 확인할 수 있다.

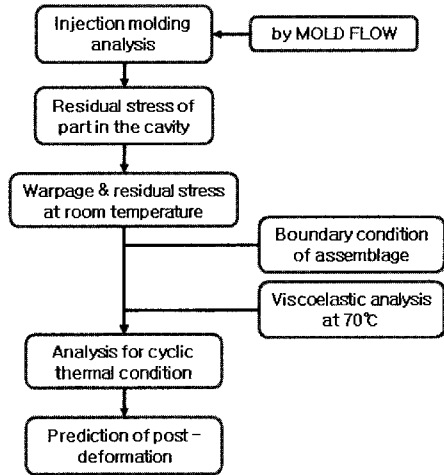


Fig. 6 Analysis process for prediction of post-deformation

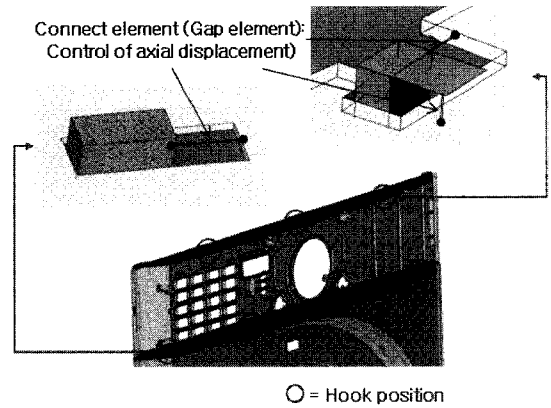


Fig. 7 F.E modeling for simulation of actual movement at hook position

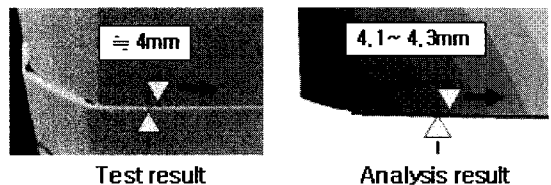


Fig. 8 Prediction of post-deformation due to cyclic thermal load

또한 크리프 시험 조건을 경계조건으로 사용한 해석 값과 시험 값을 비교해 보았다. Fig. 5(b)를 통해 확인할 수 있듯이 시험결과와 해석 결과가 큰 오차가 없음을 확인할 수 있다.

5. Control panel의 열변형 해석

Control panel의 내열 시험 결과와 해석 결과를 비교하여 보았다. 해석의 효율성을 고려하여 시험 조건을 Fig. 6와 같이 단순화 하였다. Fig. 7과 같이 체결부(hook position)를 실제 거동과 유사하게 움직일 수 있도록 1차원Connect 요소를 사용하여 모델링 하였으며 구속조건 역시 실제 경계조건과 유사하도록 모델링 하였다[9].

해석 단계로는 먼저 MOLD FLOW를 통하여 사출해석을 수행한 후 ABAQUS로 연계하여 초기 잔류응력의 효과를 고려하였다[5,9]. 그 후 내/냉열 시험 조건과 동일한 온도 변화에 대한 해석을 수행하였다. 이때, 70°C 온도에서는 약 6시간 동안 점탄성 해석을 수행하였다. 이러한 해석을 통해 구한 후변형 예측 결과는 Fig. 8과 같다. 그림에서와 같이 해석 결과값이 실제 시험 결과값이 유사함을 알 수 있었다.

6. 결론

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 1차원 connect 요소와 변위 경계조건을 사용하여 모델링 하였다.

(4) 장착된 Control panel에 대하여 내/냉열 조건

에서의 후변형을 해석적으로 예측하고 이를 시험 결과와 비교하여 보았다.

참고 문헌

- [1] S. H. Park, Y. H. Kim, S. W. Kim, S. H. Lee, 2003, A study of structural analysis for plastic parts considering injection molding effects, Conference of KSTP, pp. 217~220.
- [2] H. Y. Kim, J. J. Kim, J. S. Kim, 1996, A Study on the Warpage and Post-Deformation in Heat Resistance Test of Automotive Plastic Components, Conference of KSPE, Vol. 13, pp. 44~52.
- [3] G. Y. Choi, Y. J. Kim, H. Y. Kim, 1996, Anal Injection Molding and Prediction of Post-deformation for Automotive Plastic Fender, Conference of KSAE, pp.425~434.
- [4] J. S. Kim, J. J. Kim, H. Y. Kim, 1992, Mold Analysis of Automotive Plastic Component, Conference of KSAE, pp.436~445.
- [5] Mold Flow user manual.
- [6] M. A. Elseifi, S. H. Dessouky, I. L. Al-Qadi, S. Yang, 2006, Transportation Research Board 85th 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 J. Tech. Vol 16, pp.248~254.
- [8] J. D. Ferry, Viscoelastic properties of polymers, 1980, John Wiley & Sons.
- [9] ABAQUS user manual.