

자동차 플라스틱 부품의 내열변형 예측에 관한 연구

김헌영*, 김중재**, 김재수***

A Study on the Warpage and Post-Deformation in Heat Resistance Test of Automotive Plastic Components

Heon Young Kim*, Joong Jae Kim**, Jae Su Kim***

ABSTRACT

A procedure predicting warpage and post-deformation due to heat resistance test is presented. The procedure is applied to the injection molding processes of automotive plastic components, which are the door trim and the instrument pannel. The warpage of products is obtained from the residual stress after filling, packing and cooling process, and the post deformation due to the heat resistance test is calculated in the structural analysis of the product at the ejection temperature with the initial condition of residual stress, the boundary conditions and heat resistance conditions. The analyses give some useful guide lines in the design of automotive plastic parts which should satisfy heat resistance regulation.

Key Words : Injection molding (사출성형), Residual stress (잔류응력), Heat resistance test (내열 시험), Post-deformation (후변형).

1. 서론

자동차로 인한 배기 가스공해가 심각한 문제로 대두됨에 따라 선진국에서는 자동차 부품 경량화를 위해 플라스틱 부품화를 적극 추진하고 있으며, 국내에서도 연구가 활발히 진행중에 있다. 플라스틱 제품은 기계적 성질에 있어서 무게 대 강도비가 뛰어나며, 우수한 성형성 및 생산성을 지니기 때문에 그 적용성은 매우 큰 의미를 가진다. 단순한 형상의 플라스틱 부품은 금형설계, 공정조건 산출을 경험과 직관, 시행착오에 의존하여 왔으나 점차

형상의 복잡성, 고정밀성이 요구됨에 따라 컴퓨터 시뮬레이션(computer simulation)을 이용한 제품 및 금형설계가 필수적이다.⁽¹⁻⁸⁾ 컴퓨터를 이용하여 사출 성형 공정을 해석할 경우 제품개발에 있어서 설계 효율을 극대화시킬 수 있으며, 원가 절감, 개발기간의 단축 및 성형품의 품질 향상 도모 등 많은 장점을 지니고 있다. 자동차용 부품의 경우 상품성 측면에서 극온지방에서와 같은 고온상태에서도 열적 안정성이 보장되어야하는 제품 기준이 있다. 이러한 기준을 만족시키기 위한 제품 설계는 매우 어렵고, 개발 기간의 지연을 초래하는 큰 요인이 된다. 따라서

* 강원대 기계공학과
 ** 한라공전 자동차과
 *** 기아자동차 중앙기술연구소

초기 설계시 이러한 문제점들을 미리 예측할수 있는 방법이 요구 된다.

자동차 플라스틱 부품은 사출성형시 불균일한 수축, 상하 금형의 냉각차 등 여러 가지 원인으로 인하여 잔류응력 및 변형이 발생하며, 사용중 고온상태를 주기적으로 거치기 때문에 잔류응력이 크리프(creep)를 유발시키게 된다. 일반적으로 내열시험을 거친 부품의 후변형은 크게 두가지 원인으로 나눌수 있다. 첫째는 사출후 제거되지 않은 잔류응력이 열로 인한 물성저하시에 크리프를 유발하여 후변형이 남는 경우이고, 둘째는 온도상승으로 인한 재료 팽창시 구속에 의한 국부적인 변형이 냉각후에 그대로 잔류응력으로 남아 후변형을 유발하는 경우이다. 최근 CAE에 의하여 성형시 발생하는 잔류응력과 사출성형후 제품의 휨(warpage)을 예측하는 연구는 많이 있었으나⁽⁹⁻¹²⁾, 성형후 제품장착상태에서의 후변형이나, 내열시험에 대한 제품의 변형은 지금까지 많은 연구가 없었으며, 실제 플라스틱 제품 설계에 반영되지 못하고 있는 실정이다.

승용차용 도어 트림(door trim)에 대한 내열 시험 결과 게이트 부위에서 수축이 매우 심하였으며, 인스트루먼트 판넬(instrument pannel)의 내열 시험 결과 디프로스트(defrost)쪽의 처짐 등 후변형이 발생하여 이에 대한 원인 규명 및 대책을 수립 하고자 한다. 본 연구에서는 먼저 사출성형시 잔류응력의 원인을 규명하고, 플라스틱부품의 내열시험시 발생할수 있는 응력완화(stress relaxation)와 시간 지연현상(retardation)을 설명하며, 재료의 점탄성 지배 방정식을 통해서 내열 시험과정을 해석할수 있는 방법을 제시하였다. 승용차용 도어 트림과 인스트루먼트 판넬에 대한 유동, 보압, 냉각 및 변형을 포함하는 사출성형해석을 수행하고, 성형후 해석결과로부터 제품 추출상태에서의 제품의 잔류응력을 계산하였다. 계산된 잔류응력을 초기조건으로 하며, 제품의 차체 장착 상태를 경계조건으로 하여 내열 시험에 대한 열변형 해석을 수행함으로써 제품설계 및 금형 설계 단계에서 내열 시험 후 나타나는 후변형에 대한 원인 분석 및 해결 방안을 제시한다.

2. 잔류응력과 내열 변형

2.1 사출성형과 잔류응력

플라스틱 사출성형공정은 용융시킨 액상의 수지를 고압으로 금형내에 사출한후 이를 냉각시킴으로써 제품을 얻

는 공정이다. 이때 플라스틱은 두번의 수축과정을 거치는데 첫번째는 고압으로 인한 액상수지의 체적수축이고, 두번째는 액상에서 고상으로 천이하는 과정에서의 체적수축이다. 이때 체적수축은 최종제품의 변형에 큰영향을 미치게 되는데 제품전체에 균일한 체적 수축은 비틀림과 같은 변형을 유발시키지 않지만, 불균일한 체적수축은 제품내 국부적인 수축차를 유발함으로 전체적인 잔류응력 및 변형을 야기시키기 때문에 이를 최소화 시키는 것은 매우 중요하다.

사출성형시 발생하는 잔류응력의 원인은 다음의 다섯가지로 설명될 수 있다. 첫번째 원인은 배향성에 기인한 수축편차이다. 점탄성 거동(viscoelastic behavior)을 지니고 있는 고분자는 공동부(cavity)에서 전단유동을 하는 동안 유동방향으로 분자가 배향되는 성질을 가지고 있다. 이때 배향된 고분자는 스프링과 같은 탄성을 지니고 있기 때문에 전단유동이 끝나면 재료 완화, 즉 탄성 복원하게된다. 배향의 정도는 전단률에 의해 결정되는데 사출 성형에서는 재료 완화가 일어나기전에 재료가 굳어버리면 방향에 따라 영률이 서로 다른 이방성을 갖게되어 불균일한 수축을 유발하며, 이로 인해 잔류응력이 발생한다. 둘째, 결정화도에 의한 수축 편차이다. 수지는 크게 결정성수지와 비결정성수지로 나눌수 있다. 결정성 수지란 액상에서 고상으로 상변화를 거치는 동안 재료가 결정화되기 때문에 액상과 고상에서의 체적차가 큰 수지이다. 비결정성 수지는 상변화시 결정화가 일어나지 않기 때문에 상대적으로 액상과 고상에서의 체적차가 작은 수지이다. 따라서 결정화도에 의한 수축편차는 결정성수지에만 국한되게 된다. 결정성수지의 경우 금형내에서 재료를 급냉시키면 수지는 결정화가 일어나기 전에 굳어버리기 때문에 낮은 결정화도를 가지게되어 수축이 적어지고, 반면 서냉시키면 충분히 결정화가 일어난후 굳기 때문에 높은 결정화도를 가지게 되어 수축이 커지게 된다. 이러한 결정화도는 냉각시 냉각율에 의해 크게 결정되며 동일제품내 불균일한 결정화도의 차이는 변형의 직접적인 원인이 된다. 세번째 원인은 두께방향의 온도 차에 의한 영향이다. 금형내 제품의 냉각시 상부금형과 하부금형의 냉각성능이 서로 다를경우 제품 두께방향으로 온도 구배를 유발하게 된다. 이때 온도구배는 제품 상하의 수축차이를 유발하여 잔류 굽힘응력을 발생시켜 제품의 변형을 유발시킨다. 네번째 원인은 금형내 변형 구속에 의한 영향으로 금형내 제품은 평면 방향으로 구속이 일어나기 때문에 변형은 두께 방향으로만 발생한다. 제품이 평면 방향으로

구속이 없다면 냉각시 잔류응력이 없이 수축하지만 구속이 존재할경우 평면 방향으로 인장응력을 유발시키고 두께 방향으로 수축을 하게된다. 이때 인장 응력은 냉각시간에 의해 완화 될 수도 있고 잔류 할 수도 있다. 제품이 금형에서 추출될때 남은 잔류응력은 수축에 큰영향을 미치게 된다. 마지막으로 평형상태의 체적수축에 의한 영향을 들 수 있다. 보압시 금형내 제품에서 받는 압력은 서서히 굳으면서 압력이 대기상태로 떨어지게 된다. 이 과정 동안 재료의 압력, 비체적, 온도는 P-V-T선도를 따라 상태 변화를 가지게 된다. 이때 체적수축이 수반되는데 이는 최종제품의 변형을 유발시키게 된다.

2.2. 내열시험후 후변형 예측

플라스틱 재료는 점성과 탄성의 성질을 동시에 가지는 점탄성체이다. 점탄성 거동은 크게 응력완화(stress relaxation)와 지연시간(retardation time)으로 그 특성을 잘 표현할 수 있다. 이는 마치 플라스틱 재료가 스프링과 댐퍼의 직렬 혹은 병렬로 연결된 것으로 단순화시켜 생각할 수 있다. 응력완화 현상이란 직렬로 연결된 스프링과 댐퍼의 한쪽끝을 고정시키고 나머지 한쪽끝에 단위 길이 만큼의 변위를 순간적으로 주었을때 댐퍼의 영향으로 인한 시간에 따른 스프링 내력의 감소를 말한다. 지연 시간 현상이란 병렬로 연결된 스프링과 댐퍼의 한쪽끝을 고정시키고 나머지 한쪽에 단위힘을 부하하였을때 댐퍼에 의해서 하중 부하점이 일정한 변위에 도달되는데 지연된 시간을 말한다. 플라스틱 사출성형품은 성형공정속에서 흐름에 의한 전단응력, 제품 냉각 편차에 의한 응력, 금형내 여러가지 구속에 의한 응력 등 수축 및 응력이 발생할 때마다 응력완화와 지연시간의 현상을 반복하게된다. 또한 내열 시험과 같은 과정속에서도 내열시험 사이클을 거치는 동안 열을 가하거나 냉각을 시킬때 시간에 따라 급가열 혹은 급냉각을 수반시키기 때문에 응력완화 및 지연시간은 플라스틱 변형에 있어서 결정적인 주요 인자가 된다. 이와 같이 점탄성 거동은 플라스틱의 모든 온도 영역에서 나타나는 현상이지만 이를 실제 해석에 적용시키기에는 계산시간이 많이 소요되는 단점이 있으므로 재료가 충분히 딱딱하고 굳은 상태에서는 일반적으로 많은 실험자료에 의해 탄성과 점성의 성질중 탄성의 성질이 상당히 지배적인 것으로 보고되어 있다. 따라서 계산의 효율을 위해 플라스틱의 성질을 상온상태에서는 탄성체, 일정온도이상에서는 점탄성체로 재료 거동을 가정한다. 일반적으로 사출성형에서는 재료의 성질이 거의 탄성으

로 되었을때 성형을 끝내고 제품을 금형에서 추출하게 되는데 이때의 온도를 제품 추출온도라고 말한다. 이와 같이 재료가 탄성에 도달한후 금형에서 추출하는 이유는 점성의 영향이 큰 상태에서 제품을 금형으로부터 분리시키게 되면 여러가지 외력이 제품에 작용하기 때문에 작용된 하중이 영구변형을 유발시킬 수 있기 때문이다.

2.3 재료의 점탄성 거동

점탄성 거동을 하는 물체의 응력은 편차 응력(deviatoric stress)과 정수압 응력의 합으로 표시할수 있다. 이때 변형이 미소하고 재료가 소성변형을 거치지 않는다면, 우리의 계는 선형이라 생각할 수 있으므로 발생한 응력 성분을 Boltzmann 중첩 원리를 이용하여 표현할수 있다.⁽¹³⁾ 즉, 임의 시간 t 에서의 응력은 시간 t 까지의 응력 경로를 거치면서 미소 시간동안 발생한 미소 응력증분의 합으로 나타내어 진다. 이러한 개념을 통해 지배방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma(t) = \int_0^t 2G(\tau - \tau') \frac{\partial \epsilon(\tau)}{\partial \tau'} d\tau' + \int_0^t K(\tau - \tau') \frac{\partial \phi(\tau)}{\partial \tau'} d\tau' \quad (1)$$

여기서 $\frac{\partial \epsilon(\tau)}{\partial \tau'}$, $\frac{\partial \phi(\tau)}{\partial \tau'}$ 는 각각 편차 변형률속도와 체적 변형률속도를 나타내며, G(t), K(t)는 각각 전단 및 체적 완화계수 (shear and bulk relaxation modulus)로서 다음과 같은 프로니 급수(prony series) 형태로 표현될수 있다.

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

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

위식에서 G_0 , K_0 는 순간 전단, 체적 완화계수이며, $\overline{g_i^p}$, $\overline{k_i^p}$, τ_i 는 프로니 급수의 상수들이다. 일반적인 점탄성 거동에서 응력-변형을 관계는 시간 뿐 아니라 온도의 변화에 의해서도 영향을 받게 된다. 온도의 변화에 따라 완화와 크리프에 소요되는 시간이 다르게 되고 이러한 온도의 변화가 재료의 점탄성 응답에 미치는 영향을 시간의

영역으로 변환하기 위해 도입된 것이 TTS(Time-Temperature Superposition)이론이고, 이를 이용해서 온도에 의한 영향을 시간의 영향으로 대체시킬수 있다. 온도에 따른 완화에 걸리는 시간의 비를 나타내기 위해 이동상수(shift factor), a_T ,를 다음과 같이 정의한다.

$$\lambda(T) = a_T \lambda(T_r) \quad (4)$$

여기서

$\lambda(T)$, $\lambda(T_r)$ 는 각각 온도 T와 기준 온도 T_r 에서의 완화 시간이다. 이때 이동상수, a_T ,는 Williams-Landel-Ferry(WLF)식에 의해 다음과 같이 결정된다.⁽¹³⁾

$$\log(a_T) = \frac{-C_1(T - T_r)}{C_2 + T - T_r} \quad (5)$$

위식에서 C_1, C_2 는 재료와 기준온도 T_r 에 따라 실험적으로 결정되는 상수이다. 실험으로부터 구한 주파수 영역의 계수는 복소수의 형태로 주어지고 실수부를 저장탄성계수(storage modulus) G' 로, 허수부를 손실 탄성계수(loss modulus) G'' 로 정의한다. 주파수 영역의 데이터는 다음과 같이 시간 영역의 데이터로 변환이 가능하다.

$$G(t) = G_e + \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \left[\frac{G' - G_e}{w} \right] \sin wt \, dw \quad (6)$$

$$G(t) = G_e + \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \left(\frac{G''}{w} \right) \cos wt \, dw \quad (7)$$

여기서 G_e 는 탄성계수(elastic modulus)이다.

3. 수치 해석 과정

도어 트림(door trim)에 대한 내열시험 결과 (내열 시험 조건 100℃) 게이트 부위에서 수축이 매우 심하였으며, 인스트루먼트 판넬의 경우는 디프로스트(defrost)쪽의 처짐등 후변형이 발생하였다. 이에 성형 및 후변형 과정을 컴퓨터 시뮬레이션하여, 변형에 대한 원인 규명 및 대책을 수립하고자 한다. 성형해석은 상용 프로그램인 C-MOLD⁽¹⁴⁾를 사용하여 유동, 보압, 냉각, 변형해석을 하였으며, 이형후 '휨'과 후변형 예측을 위한 내열변형해

석은 ABAQUS/ Standard⁽¹⁵⁾를 사용하였다.

3.1 내열변형해석을 위한 기본가정

사출 성형 해석은 크게 나누어 유동 해석, 냉각 해석, 보압 해석 및 변형 해석으로 나눌 수 있다. 성형 해석은 제품이 금형에서 추출될때까지의 해석이며, 이후 내열 시험이나 기타 제품 장착상태에서의 변형을 예측하기 위해서는 사출성형후 잔류응력을 초기조건으로 하여 열 혹은 하중, 구속조건 등에 의한 변형해석을 수행한다. 해석시 다음과 같은 가정을 이용한다.

- 1) 사출성형품은 유동방향과 유동 횡방향의 물성이 서로 다른 비등방성이나 면내 등방성 (transversely isotropic) 점탄성체로 가정한다.
- 2) 금형에서 추출될때 사출성형품의 재료거동은 탄성체이다.
- 3) Fig.1은 내열시험 조건을 나타낸다. 이때 실온 20℃와 70℃ 사이는 탄성거동을 70℃와 내열시험온도 110℃ 사이는 점탄성거동을 한다.
- 4) 내열 시험 등에 의해 재료가 열팽창을 하더라도 재료는 소성변형을 하지 않는다. 이는 많은 수지의 인장시험 결과 대부분의 소성변형이 상당히 큰 변형률에서 발생하였고 이는 열에 의한 변형률보다 상당히 크기 때문이다.

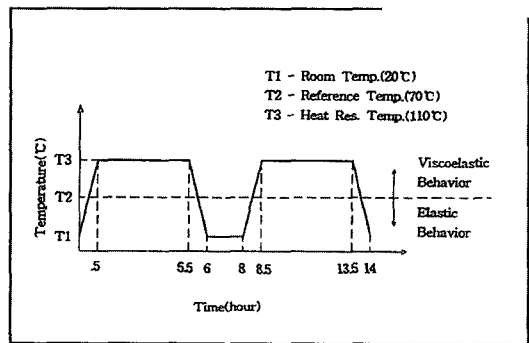


Fig.1 Conditions of heat resistance test

3.2 내열 변형 해석 과정

Fig.2는 내열 변형 해석과정을 나타낸 것으로서, 내열 시험에 대한 제품의 변형을 예측하는 단계는 다음과 같다.

- 1) 유동, 보압, 냉각, 변형 해석을 행한다.
- 2) 성형 완료후 해석모델의 모든 절점을 구속 시킨

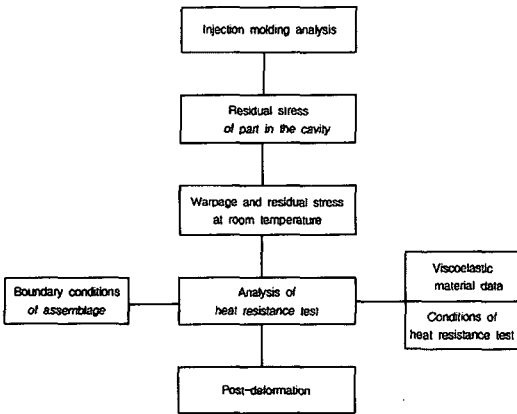


Fig.2 Procedure of predicting post-deformation due to heat resistance test

후, 성형완료시 온도부하를 가하여 제품 추출 상태에서의 잔류응력을 구한다.

- 3) 제품 추출 온도에서의 잔류응력을 초기 조건으로 하여 상온 상태에서의 제품 변형을 구한다. (이형시 '휨' 예측)
- 4) 내열시험 조건 및 시간영역의 점탄성 데이터, 차체 장착에 대한 구속조건을 부가하여 열변형 해석을 수행한다.

4. 도어 트림(door trim) 성형 및 열변형 해석

4.1 해석 모델 및 수치

Fig.3은 금형공동부, 런너/게이트, 냉각 시스템을 포함한 도어 트림의 유한 요소 모델을 나타낸다. 제품 형상을 고려하여 게이트는 뒷쪽에 세개를 설치하였으며, 냉각시

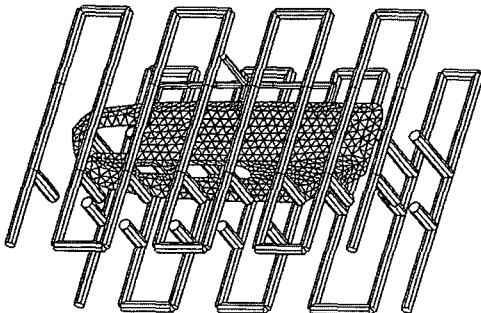


Fig.3 Finite element models of door trim and runner system

Table 1 Resin properties of door trim (PP)

Melt Density (kg/m ³)	714
Melt Thermal Conductivity (W/m · k)	0.166
Melt Specific Heat (J/kg · k)	2900
Transition Temperature (K)	388
Iso. Elastic Tensor (Pa)	1.15E+9
Poisson's Ratio (ν)	0.41
Iso. Thermal Exp. Coeff.(m/m · k)	0.000116

스템은 균일한 냉각효과를 위하여 채널과 채널간의 거리는 일정하게 유지하였으며, 배플의 설치로 취출시의 균일한 온도분포의 효과를 꾀하였다. 제품의 두께는 2.5mm이며, 사출시간은 6초로 하였다. 보압시간은 4초와 9초의 2가지 경우에 대하여 해석을 수행하였다. Table 1은 사용된 수치인 무정형의 폴리프로필렌(PP)에 대한 재료물성치이다.

4.2 해석 결과

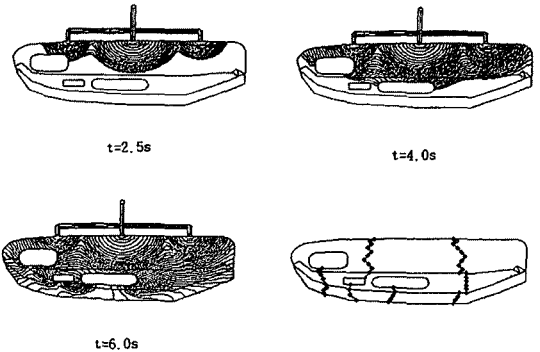


Fig.4 Melt-front advancement and weld lines in the injection molding process of door trim

Fig.4는 사출성형시의 유동 형태와 웰드 라인의 위치를 보여 준다. 유동형태는 균일 유동(unidirectional flow)을 형성하며, 웰드 라인의 위치는 실 제품과 비교 하였을 때 일치하였다. Fig.5 와 Fig.6은 보압시간(packing time)을 4초로 한 경우에 대한 시간에 따른 게이트부와 공동부의 압력변화와 보압완료후의 체적 수축률을 보여 준다. Fig.5에서 게이트와 공동부의 압력을 비교해 보면 보압이 끝난후(약 10초후) 게이트의 압력이 공동부내의 압력보다 낮음을 볼 수 있는데, 이는 공동부 내의 수지가 다시 런너로 역류되는 현상을 유발하게 되고, 궁극적으로

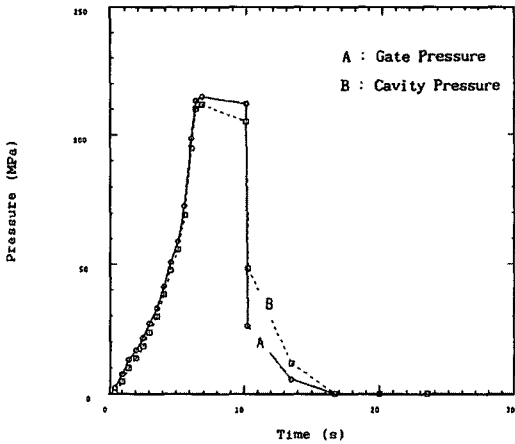


Fig. 5 Pressure curves of gate and cavity (packing time 4 sec.)

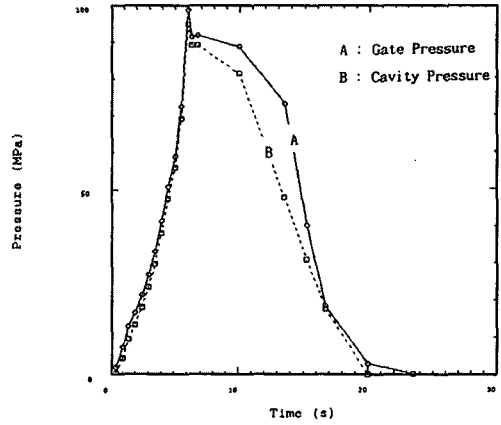


Fig. 7 Pressure curves of gate and cavity (packing time 9 sec.)

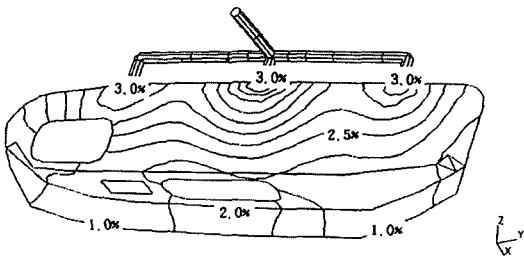


Fig. 6 Volumetric shrinkage rate distribution (packing time 4 sec.)

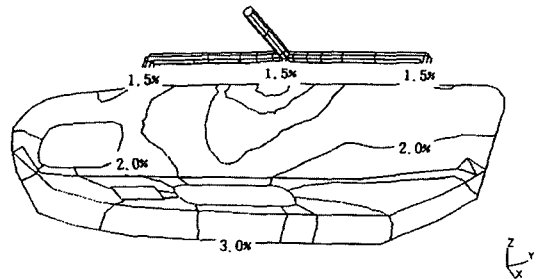


Fig. 8 Volumetric shrinkage rate distribution (packing time 9 sec.)

게이트 부위의 체적 수축률을 증가 시키게 된다. 따라서 이러한 조건하에서 사출하였을 경우 게이트 부위에서 인장 잔류응력이 발생된다. 이 제품을 내열 시험하게 되면 온도 상승으로 인한 수지의 강성이 저하될 때, 인장 잔류응력이 수축 변형을 유발시킨다.

Fig.7과 Fig.8은 보압시간을 충분히 길게한 9초일때의 압력 변화와 체적 수축률 분포인데 이때는 공동부의 압력이 게이트의 압력보다 낮게 유지되어 역류 현상이 발생하지 않는다. 보압시간이 4초인 경우 게이트부의 체적수축률이 3.0%에서 9초인 경우 1.5%로 감소하였다. Fig.9는 보압시간이 각각 4초와 9초일 때의 내열시험후의 게이트 부분의 변형양상을 나타낸다. 보압시간이 4초인 경우 게이트가 설치된 3부분에 심한 변형이 발생되었음을 알 수 있으며, 보압시간을 충분히 길게 하여 이 문제를 해결할 수 있다.

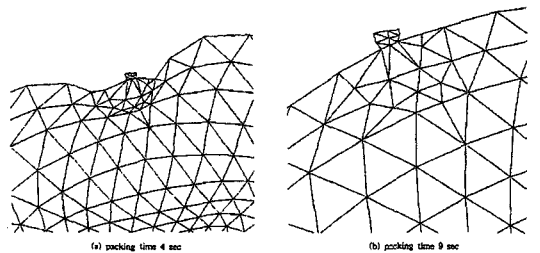


Fig. 9 Deformed shapes of door trim at the area of gate after the analysis of heat resistance test

5. 인스트루먼트 패널 열변형 해석

5.1 해석 모델 및 수치

Fig.10은 금형 공동부와 런너/게이트를 포함한 인스트루먼트 패널의 유한 요소 모델을 나타낸다. 제품의 형상

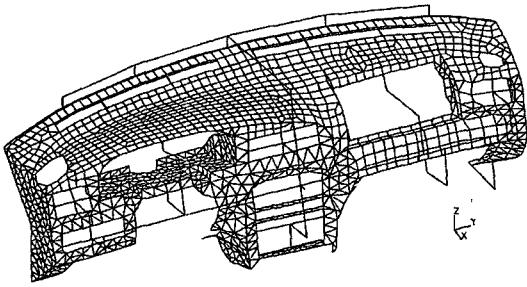


Fig. 10 Finite element model of instrument panel core and runner system

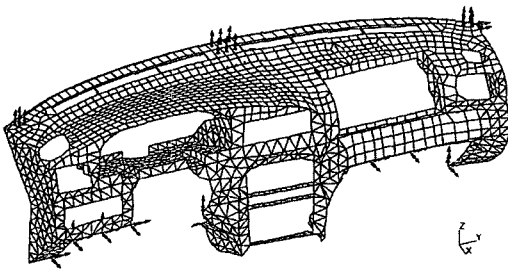


Fig.11 Boundary conditions of instrument panel

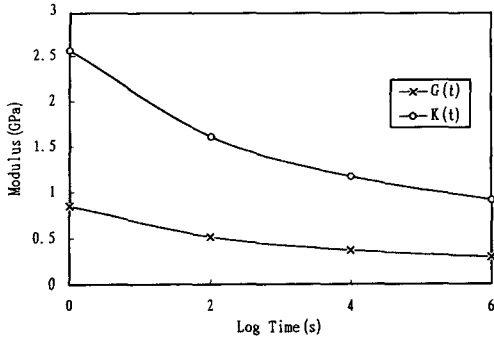


Fig.12 Shear modulus G (t) and bulk modulus K (t) of PC/ABS

Table 2 Resin properties of instrument panel (PC/ABS)

Melt Density (kg/m ³)	1007
Melt Thermal Conductivity (W/m · k)	0.13
Melt Specific Heat (J/kg · k)	1589
Transition Temperature (K)	343
Iso. Elastic Tensor (Pa)	2.3E+9
Poisson's Ratio (ν)	0.35
Iso. Thermal Exp. Coeff.(m/m · k)	0.000101

이 복잡하고 크기 때문에 불완전한 충전이 예상되므로 여러개의 게이트를 설치하였다. 또한 내열변형시의 제품의 장착위치를 측정하여 Fig.11에 나타난 해석모델상의 대응되는 절점들의 6개 자유도를 모두 구속하는 경계조건을 부여하였다. Table 2는 사용된 수지(PC/ABS)의 물성치이며, Fig.12는 내열변형에 사용되는 시간영역의 점탄성 데이터를 나타낸다. 온도에 대한 물성변화를 고려하는 식(5)에서 기준온도 T_1 을 유리전이온도 T_g 로 하였을때 c_1 은 17.44이고, c_2 는 51.6이다.

5.2 해석 결과

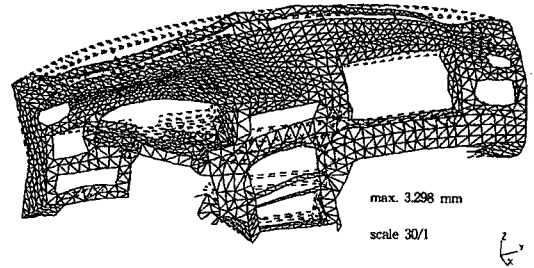


Fig.13 Deformed shape after the analysis of heat resistance test

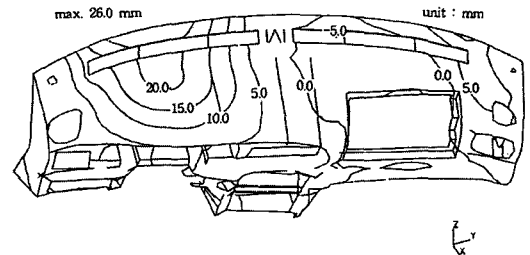


Fig.14 Z-deformation at 110°C in the analysis of heat resistance test

Fig.13은 내열변형 해석 후 제품의 변형양상을 나타낸 것으로, 변위는 약 30배 확대한 것이다. 최대변형이 3.298mm이며, 좌측 디프로스트 쪽과 계기판(meter hood) 하단부가 가라앉음을 알 수 있는 데, 실제 내열시험 결과와 일치된 경향을 보였다. Fig.14는 내열 시험중 최고온도인 110°C에서의 상하방향(Z 방향)의 변형 분포를 나타낸 것이다. 상하방향으로 최대 변형은 좌측 Defrost쪽이며, +Z 방향으로 최대 26mm 변형되었다.

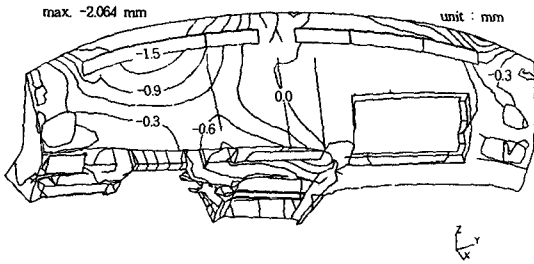


Fig. 15 Z-deformation at room temperature after the analysis of heat resistance test

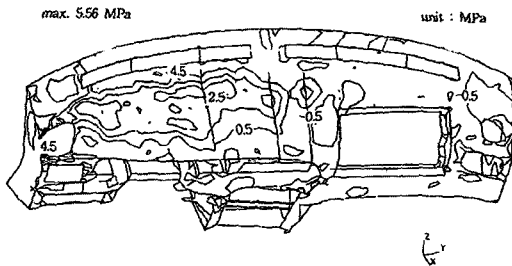


Fig. 16 Residual stress distribution after injection molding analysis

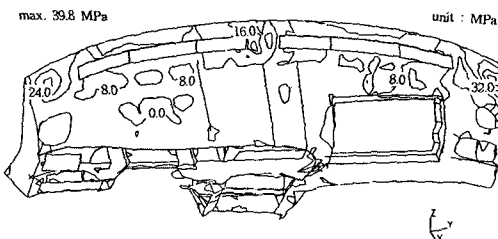


Fig. 17 Residual stress distribution after the analysis of heat resistance test

Fig. 15는 열부하후 상온상태로 되었을 때의 상하방향의 변형분포를 나타낸다. 열 부하시 최대변형이 나타난 부분이 상온상태가 되었을 때 변형의 반대방향 즉 -Z방향으로 변형되었음을 알 수 있다. 즉, 열변형은 내열시험중의 고온에서의 열팽창시 변형 양상에 크게 기인함을 알 수 있다. 열변형을 막기 위해서는 열팽창시 변형이 국부적으로 발생하지 못하도록 전체 구조물의 강성을 균일하게 유지하여 변형의 분포를 전체에 분산시켜야 할 것이다. Fig. 16과 Fig. 17은 사출성형 직후의 잔류응력의 분포 및 내열변형해석 후 잔류응력 분포를 나타낸 것이다. 사출직

후 좌측 계기판 부위에서 최대 5.56MPa의 잔류응력이 집중되어 있는데, 이는 이부위의 충진이 가장 늦고 보압 전달이 가장 안되기 때문에 수축량이 커서 인장 잔류응력이 발생한 것이다. 내열시험후에는 이부분에 큰 변형이 발생하였으며, 또한 응력완화로 인해 이부분의 잔류응력이 없어 졌음을 볼수 있다. 위의 해석 결과 후변형은 사출 성형후의 잔류응력의 집중부분과 열팽창시 변형이 가장 심한 부분에서 발생하였음을 알 수 있다. 따라서 이러한 종류의 변형을 억제시키기 위해서 이부위의 열팽창을 막을 수 있는 Z방향의 리브 보강이 요구 된다.

6. 결론

1) 자동차용 플라스틱 부품의 경우 급형에서 추출한 상태에서 부품 외관에 하자가 없다고 하더라도 내열 시험후 크고 작은 후변형을 야기시킬 수 있다. 이러한 후변형의 원인은 크게 두가지로 요약할 수 있다. 첫째는 사출후 제거되지 않은 잔류응력이 열로 인한 물성 저하시에 크리프를 유발하여 변형을 일으키는 경우이고, 둘째는 온도상승으로 인한 재료 팽창시 구속에 의한 국부적인 크리프 변형이 냉각후에 회복되지 못하고 그대로 남아 후변형을 유발하는 경우이다.

2) 사출 성형 해석을 통해서 제품의 잔류응력의 크기를 예측하고 또한 이러한 잔류응력을 가진 제품이 차체에 조립된 후 내열시험을 거쳤을 경우의 변형을 예측할수 있는 해석 방법을 제시 하였다. 따라서 본해석을 통해 플라스틱 부품의 개발시 최종 제품에서 발생할 수 있는 변형 및 문제점을 초기에 예측할수 가 있으며, 해결책 제시를 통하여 부품개발 사이클을 단축시키는 것이 가능하다.

3) 사출성형시 공정조건 특히 보압 전달은 성형후의 수축과 후변형에 상당한 영향을 미친다. 도어 트림(door trim)의 경우 보압시간이 게이트 응고시간보다 짧기 때문에 공동부 내의 높은 압력을 지닌 수지가 아직 응고되지 않은 게이트를 통해 역류를 하게 되어 공동부내의 재료 부족으로 인하여 수축이 증가하게 되었으며, 게이트 부위의 후변형을 유발하였다. 그러므로 고온 내열 시험을 거치는 플라스틱 부품에 대해 후변형을 최소화 시키기 위해 사출압력, 보압전달 등의 성형조건에 대한 많은 주의가 요구된다.

4) 인스트루먼트 판넬의 경우, 후변형은 주로 좌측 계기판 부위에서 발생하였으며, 이는 이부위가 내열시험중 열팽창이 가장 큰 부분이었다. 이와같이 제품이 차체에

고정되고 열팽창에 의해 길이 변화가 심한 경우는 후변형이 열팽창시의 변형모습에 많이 좌우됨으로 이러한 제품의 설계시 열팽창을 전체에 고르게 분산시킬 수 있는 구조적 설계 방법이 모색되어야 하며, 수치 선정시 열팽창이 작은 수치선택도 매우 중요하리라 생각된다.

참 고 문 헌

1. Hieber, C. A. and Shen, S. F., "Flow Analysis of the Non-Isothermal Two-Dimensional Filling Process in Injection Molding", Israel Journal of Tech. Vol.16, pp.248-254, 1978.
2. Chiang, H. H., Hieber, C. A. and Wang, K. K., "A Unified Simulation of the Filling and Postfilling Stages in Injection Molding. Part I : Formulation", Polymer Engineering and Science, Vol.31 No.2, pp.116-124, 1991.
3. Chiang, H. H., Hieber, C. A. and Wang, K. K., "A Unified Simulation of the Filling and Postfilling Stages in Injection Molding. Part II : Experimental Verification", Polymer Engineering and Science, Vol.31 No.2, pp.125-139, 1991.
4. Nguyen, KY T. and Kamal, M. R., "Analysis of Packing Stage of a Viscoelastic Melt", Polymer Engineering and Science, Vol.33 No.11, pp.665-674, 1993.
5. 김재수, 김현영, 김중재, 기지현, "플라스틱 Intake Manifold와 Cowl Grille에 대한 사출성형 해석", 기아기보 17호, pp.118-127, 1992.
6. 김재수, 김중재, 김현영, "자동차 플라스틱 부품의 사출성형 해석", 한국자동차공학회 1992년도 춘계 학술대회 논문집, 논문5-8, pp.436-445, 1992.
7. 김재수, 김현영, 김중재, 기지현, "자동차용 플라스틱 부품의 사출성형시 Gate System 설계", 제2회 기아그룹 슈퍼컴 사용자 발표대회 심포지움, pp.219-231, 1992.
8. 김영주, 유택희, 이세춘, 김현영, "자동차 범퍼 사출성형해석과 금형설계", 한국자동차공학회 1994년도 추계학술대회논문집, pp.481-490, 1994.
9. Rezayat, M. and Stafford, R. O., "A Thermoviscoelastic Model for Residual Stress in Injection Molded Thermoplastics", Polymer Engineering and Science, Vol.31 No.6, pp.393-398, 1991.
10. Matsuoka, T., Takabatake, J., Koiwai, A., Inoue, Y., Yamamoto, S. and Takahashi, H., "Integrated Simulation to Predict Warpage of Injection Molded Parts", Polymer Engineering and Science, Vol.31 No.14, pp.1043-1050, 1990.
11. Amoedo, J. and Lee, D., "Modeling the Uniaxial Rate and Temperature Dependent Behavior of Amorphous and Semicrystalline Polymers", Polymer Engineering and Science, Vol.32 No.16, pp.1055-1065, 1992.
12. Ariyama, T., "Cyclic Deformation and Relaxation Characteristics in Polypropylene", Polymer Engineering and Science, Vol.33 No.1, pp.18-25, 1993.
13. Ferry, J. D., Viscoelastic Properties of Polymers, John Wiley & Sons, 1980.
14. C-MOLD User's Manual, AC Technology, 1994.
15. ABAQUS/Standard (Version 5.4) Theory and User's Manual, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., 1995.