

IML 성형과정에 따른 잔류응력 및 열 충격에 의한 변형 예측

이재원* · 장유진** · 신승원** · 박승호** · 정하승**†

* 홍익대학교 기계공학과, ** 홍익대학교 기계시스템디자인공학과

Prediction of Residual Stress Caused by IML Process and Deformation Due to Thermal Impact

Jaewon Lee*, Eugene Jang**, Seungwon Shin**, Seungho Park** and Haseung Chung**†

* Dept. of Mechanical Engineering, Hongik Univ.,

** Dept. of Mechanical and System Engineering, Hongik Univ.,

(Received October 12, 2009 ; Revised January 15, 2010; Accepted January 22, 2010)

Key Words : In-mold Labeling(IML), Film Delamination(필름박리), Injection Molding(사출성형), Thermal Impact(열충격), Residual Stress(잔류응력)

초록: 본 논문에서는 In-Mold Labeling(IML) 공정을 이용한 제품생산 과정에서 발생하는 잔류응력과 열 변형을 예측할 수 있는 해석모델을 개발하였다. IML 은 선 공정된 필름을 금형에 넣은 후 수지를 사출하여 제품을 생산하는 방법으로, 일반적인 사출성형 공정방법에 비해 뛰어난 색감을 구현할 수 있을뿐 아니라, 반영구적 보존 등의 다양한 장점을 얻을 수 있다. 반면, IML 공정을 이용한 제품 생산의 경우 필름박리 등의 다양한 불량 현상이 발생하기도 하는데, 이 중 필름박리 현상의 주요한 원인 중 한가지로 지목되는 열 변형 현상을 수치해석을 통해 예측하고, 실제 실험결과와 비교하여 연구의 신뢰성을 검증하였다. 이는 IML 공정을 통해 생산되는 제품의 초기설계 단계로부터 필름박리 및 열 변형을 예측하는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract: In this study, we developed a method to predict the residual stress distribution and thermal deformation caused by in-mold labeling (IML) processes. IML is one of the injection molding processes for injecting a material into a cavity and subsequently inserting a decorated film. The IML process can yield products with decorations of outstanding excellent quality in only one working step. Although the IML process has various advantages, it causes defects such as film delamination, wash-out, and flow marks. In particular, deformation is considered to be a major concern in terms of delamination. To validate the model, the deformation predicted by using a numerical model was compared with experimental results, and both results showed good agreement. We verified that the developed method can be used to obtain the design guidelines for preventing delamination in the initial design stage of the IML process.

1. 서 론

In-Mold Labeling(IML)은 선 공정된 필름에 열가소성, 열경화성 등과 같은 고분자 플라스틱수지(Resin)를 용융상태로 사출하여 제품화 하는 생산기술로 기존 사출성형 방식에 비해 경제적이며 제품의 색감 및 촉감표현 또한 우수하여 핸드폰, 노트북, 전자레인지 등의 전자제품 외형과 화장품케이스, 자동차 무선 키 등과 같은 일상용품의 외형 등 다양한 부분의 제품 생산에 사용되고 있다.

IML 사출성형은 크게 인쇄, 포밍, 커팅, 사출의 총 4 가지 공정으로 이루어져 있으며, 최종 사출공정에서 서로 다른 이형물질인 인쇄된 필름(Film)과 고분자 플라스틱수지가 결합하여 제품을 생산하게 된다. IML 공정기법은 인쇄 패턴의 변경만으로도 기존의 스프레이 타입보다 다양한 색깔 및 색감을 표현할 수 있으며, 한 개의 형상 안에서 여러 가지 색깔과 패턴 구현이 가능하고, 반영구적 보존이 가능하다는 장점을 가지고 있다.

반면 IML 사출성형 방식은 필름이 삽입된 상태에서 용융된 고분자 플라스틱 수지가 사출되기 때문에 제품형상, 필름과 플라스틱 수지 사이의 물

† Corresponding Author, E-mail: haseung@hongik.ac.kr

성차이, 공정조건 등의 다양한 영향들에 의해 최종제품에 잔류응력 및 수축현상과 같은 영향을 미치게 된다.⁽¹⁻³⁾ 잔류응력 및 수축현상등과 같은 영향이 일정한 형태를 넘어서게 되면 최종 제품에 필름박리(Film Delamination),^(4,5) Wash-out, Flow-mark 등과 같은 불량현상이 발생하기도 한다. 최종 사출 제품에 영향을 미치는 여러 가지 원인들 중 잔류응력 및 변형에 관한 이전 연구들을 보면 Jacques⁽⁶⁾는 사출성형 공정 시 평판의 불규칙한 냉각과정에 따른 평판의 변형을 연구하였고, Choi⁽⁷⁾ 등은 사출공정 시 사출온도와 재료의 사출속도에 따른 잔류응력 및 수축현상을 연구하였으며, Jansen⁽⁸⁾ 등은 사출과정 중 압력에 따른 잔류응력 분포 및 변형을, Chiang⁽⁹⁾ 등은 보압에 의한 잔류응력의 발생 등을 예측한 연구 내용들을 발표하였다. Patcharaphum⁽¹⁰⁾ 등의 경우 사출성형 해석 프로그램인 Moldflow 을 이용하여 sandwich 사출성형 공정과정을 해석하고, 해석결과를 실험과 비교 하였으며, Kim^(11,12)과 Park⁽¹³⁾ 등의 경우 Moldflow 와 ABAQUS 를 연동 해석하여 이형 후 변형량을 예측하였다. 이 밖에도 사출공정 시 결정하게 되는 사출시간, 냉각온도 등과 같은 다양한 공정 조건 들 역시 최종제품에 영향을 미친다는 연구들이 발표되고 있다. 이러한 공정 변수 설정의 경우 초기에는 시행착오 등의 반복적인 공정을 통하여 적절한 변수를 설정하였지만, 최근 컴퓨터의 발전으로 사출성형 수치해석 프로그램(Computer Aided Engineering)을 이용하여 실제 사출 전에 설정되는 공정 변수의 타당성을 판단할 수 있게 됨에 따라 실제 공정단계에 적용되어 효율성을 높이고 있다. 또한 사출공정 이후 발생하는 변형 현상의 경우 CAE 해석을 통하여 예측하고, 이를 실험과 비교하고 분석하는 연구가 진행되고 있다.

하지만 지금까지의 사출해석 연구들은 비교적 간단한 형상과 한정된 재료에 대하여 사출공정 해석과 변형해석이 이루어지고 있다는 점에서 실제 제품공정에 사용되는 형상과 재료를 이용한 연구에 대한 필요성이 제기되어왔다. 또한 사출성형 공정 후 일상생활 중에 발생할 수 있는 열에 의한 변형 및 영향 또한 예측이 필요하다고 판단되고 있으며, 이러한 변형현상은 필름박리 현상에 주요한 원인으로 지목되고 있다.

본 논문은 IML 사출성형을 통하여 실제적으로 생산되는 A 사의 제품을 이용하여 IML 사출성형 전반의 공정에서 제품에 발생하는 필름박리 현상 및 변형현상을 연구하고, 예측하여 제품의 생산효율성과 경제성을 높이려 하였다. 또한 공정 이후

열에 의한 일상적인 사용을 재현하기 위한 열 충격 실험을 고려하였다. 이를 위해 IML 사출성형 공정과 열 충격 실험을 연동 해석하는 방법을 개발하였고, 연구의 신뢰성을 높이기 위하여 실제 실험과 비교, 분석하였다.

2. 이론 및 실험

2.1 연구에 사용한 수치해석 모델

고분자 유동은 일반적으로 변형과 응력의 관계가 비선형을 취하고 전단속도와 온도, 압력에 따라 점성이 변하는 비뉴턴성 유체로 알려져 있다. 본 연구에서 비뉴턴성 유체의 점성계수에 관한 유동을 수치적으로 계산하기 위하여 수정된 Cross 점성 모델을 사용 하였으며 다음과 같이 표현된다.

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*}\right)^{1-n}} \quad (1)$$

이때 η 은 점성계수를 나타내며, η_0 은 전단력이 작용하지 않을 경우의 점성계수를, $\dot{\gamma}$ 와 τ^* , n 은 각각 전단속도와 전단 전이응력, 점성모델 지수를 표현하고 있다. 일반적으로 고분자 유동에 있어 냉각속도가 고분자 사슬의 완화속도에 비해 충분히 빠른 경우, 즉 완화시간의 온도 미분계수와 냉각속도의 제곱이 1 보다 충분히 큰 경우 점도는 온도에 따라 변하는 온도의존성이 지배적이다. 점도의 온도 의존성에 있어 많은 고분자 물질에 적용할 수 있는 WLF 법칙이 주로 사용하고 있으며, 기본적인 형태로 다음과 같이 표현된다.

$$\eta_0 = D_1 \exp\left[\frac{-A_1(T-T^*)}{A_2 + (T-T^*)}\right] \quad (2)$$

$$T^* = D_2 + D_3 \cdot P \quad (3)$$

여기서 A_1 , A_2 는 고분자에 대한 범용적인 상수 값을 표현하며, D_2 , D_3 는 수치해석에 사용한 계수를, T , P 는 온도와 압력을 나타낸다. WLF 식은 온도가 상승하면 액체의 자유체적이 증가하여 고분자 사슬의 이동이 쉽게 되므로 점도가 감소하는 것을 수식화 한 것이다. 즉 온도의 변화에 따른 점도의 변화를 충분히 반영하고 있다고 할 수 있다. 플라 스틱 수지의 IML 과정에서 고분자 사출해석은 Moldflow 를 이용하여 해석하였으며, 수정된 Cross 점성 모델과 WLF 법칙의 함수 형태를 이용하였다. 사출 후 열에 의한 변형해석을 수행하기 위하여 Moldflow 의 계산결과에서 형상정보 및 잔류응력

분포, 재료의 정보를 출력 받아 ABAQUS Implicit / Explicit 의 수치계산에 초기 입력 값으로 사용하였으며, Moldflow 에서의 금형 온도를 제품의 초기 온도로 설정하여 해석을 진행하였다.

고분자 물질의 응력분포의 경우 다음의 기본함수를 바탕으로 해석할 수 있다.

$$\sigma(t) = \int_0^t 2G(\tau - \tau') \dot{\epsilon} dt' + I \int_0^t K(\tau - \tau') \dot{\phi} dt' \quad (4)$$

여기에서 G, K 는 전단 탄성계수와 체적 탄성계수를 의미하며, $\dot{\epsilon}$, $\dot{\phi}$ 는 전단 변형률 과 체적 변형률을 나타내고 있다. 또한 적분변수 t 와 변수 τ 는 시간의 변화와 전단응력을 나타내고 있다. ABAQUS 를 이용한 변형 해석의 경우 사출성형품의 열에 따른 후 변형 예측을 위하여, 열에 의한 잔류응력을 고려하였다. τ 의 경우 함수의 형태로 수식화 하면 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

$$\tau = \int_0^t \frac{dt'}{A_T(T(t'))} \quad (5)$$

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{1}{A_T(T(t))} \quad (6)$$

τ 의 경우 이동함수를 시간에 대하여 적분한 형태의 함수를 취하고 있다.

$$A_T = \frac{\eta}{b_T \eta_0} \quad (7)$$

$$b_T = \frac{\rho T}{\rho_0 T_0} \quad (8)$$

고분자 물질의 열에 따른 변화의 경우 b_T 가 1 에 근접한 값을 가지게 될 경우, 그 영향력이 미비하여 일반적으로 점도의 비율로 표현되며, 다음 식 (9)과 같은 WLF 함수의 형태를 취하게 된다.

$$-\log A_T = \frac{C_1(T - T_0)}{C_2 + (T - T_0)} \quad (9)$$

다음의 식에서 T_0 , A_T 는 기준온도와 이동함수를 의미하며, C_1 , C_2 는 T_g (유리전이 온도)를 기준으로 계산된 값으로 (10), (11)식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$C_1 = \frac{C_1^g}{1 + (T_0 - T_g)/C_2^g} \quad (10)$$

$$C_2 = C_2^g + T_0 - T_g \quad (11)$$

본 연구에서는 앞서 언급한 바와 같이 Moldflow 내에서 IML 사출성형 공정과정을 해석한 후, 그 해석결과를 초기 값으로 입력 받아 ABAQUS 내에서 상온상태 및 고온, 저온에서 열 변형 해석을 실시하였다. 특히 IML 사출성형 공정 중에 발생하는 잔류응력이 열 충격 실험에 미치는 영향을 파악하기 위하여 특정 핸드폰 형상에 대하여 잔류응력을 포함한 경우와 포함하지 않는 두 가지 경우에 대하여 열 변형 해석을 실시하여, 잔류응력이 열 충격 실험 이후 최종상태에서 필름박리 현상에 미치는 영향을 확인하였다. 두 가지의 해석결과 중 보다 정확한 해석결과를 바탕으로 최종형상에 발생할 수 있는 변형현상 및 필름박리 현상을 예측하였다. IML 사출공정 해석 및 열 충격 실험해석에는 A사에서 현재 생산하고 있는 핸드폰 형상과 공정조건을 적용하였으며, Fig. 1에서 보이는 바와 같이 수지와 필름의 격자를 3 차원 4 면체 요소로 구성하여 해석을 진행 하였다.

2.2 실험을 통한 실제 변형측정

본 연구의 실험은 핸드폰 모델에 실제 IML 사출성형 공정을 실시하였으며 실험의 신뢰성을 높이기 위하여 IML 사출성형 공정을 마친 제품에서 임의로 다수의 샘플을 추출하여 열 충격 실험을 실시하였다. 실험 결과값은 IML 사출성형 공정을 마친 변형 형상과 열 충격 실험에 의한 제품의 변형 형상을 3D 스캐너를 이용하여 측정된 후 초기 형상의 좌표값과 비교하여 IML 사출성형 공정 이후의 변형량과 열 충격 실험 이후의 변형량을 정량화 하였으며, 실험에서 측정된 지점을 Fig. 2 에서 확인 할 수 있다. 본 연구에서는 Fig. 3 에서 볼 수 있듯이 수치해석에 의해 예측되는 변형량과 실험에 의해 측정된 변형량을 비교함으로써 본 연구에서 개발한 수치해석방법의 신뢰성을 검증하고자 하였다.

3. 결과 및 토의

IML 사출 제품의 열 충격 실험 후 변형 및 필름박리현상의 가능성을 예측하기 위하여 IML 사출공정을 마친 사출 제품 내에 내포하는 잔류응력의 영향에 관한 해석을 선행하였다. 잔류응력이 열 변형 시 미치는 영향을 파악하기 위하여 IML 사출성형 해석을 통해 사출성형 후 잔류응력분포를 얻었으며, 연구의 신뢰성을 높이기 위하여 실제 IML 사출공정에 사용하는 필름과 수지의 정보를 이용하였고, 이를 Table. 1 과 Table. 2, Table. 3 에서 보여주고 있다.

사출성형 공정의 특성상 금형내의 고분자 수지가 냉각되는 과정에서 급격한 온도변화를 받게

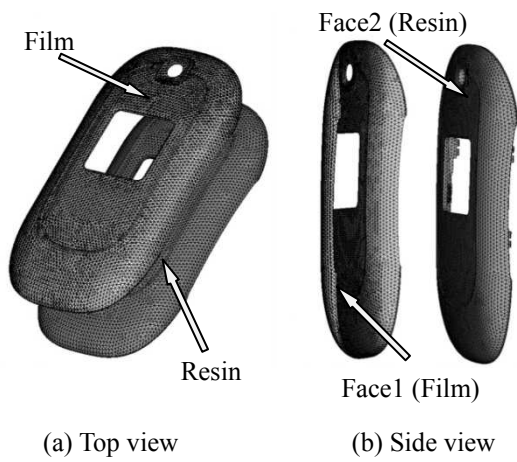


Fig. 1 Top and side view of model

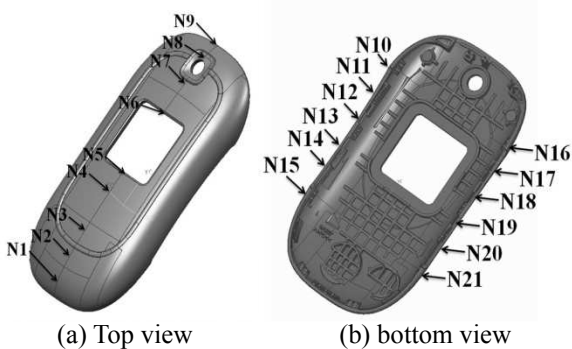


Fig. 2 Locations for Displacement Measurement

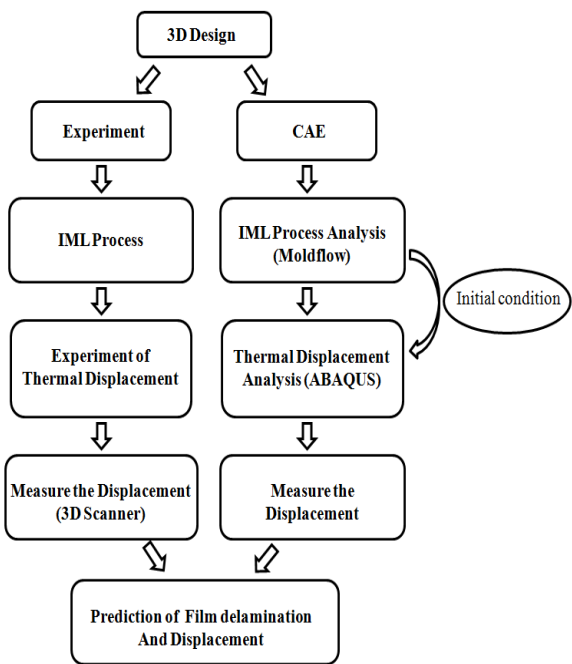


Fig. 3 Flow diagram of numerical analysis and experiment procedure

Table. 1 Material properties of Film and Resin

	Film (PET)	Resin (PC+ABS)
Melt temperature(°C)	255	250
Specific heat(J/kg·°C)	1527 (at 34.83°C) 2322 (at 274.76°C)	1883.2 (at 250°C)
Thermal conductivity (W/m·°C)	0.3305 (at 0°C)	0.177 (at 250°C)
Melt density(g/cm ³)	1.5165	0.98443
Solid density(g/cm ³)	1.7554	1.0997
Elastic modulus(MPa)	11422.1	2780
Shear modulus(MPa)	2961.83	992.9
Poisson's ratio	0.4137	0.4
CTE(10 ⁻⁵ /°C)	2.283	6.7

Table 2 Rheological properties of Film and Resin

Cross-WLF model	Film	Resin
n	0.5269	0.4505
P (pa)	7872.14	307
D ₁ (Pa·s)	1.43899e+026	8.75e+009
D ₂ (K)	380.15	417.15
D ₃ (K/pa)	0	0
A1	69.964	15.381
A2	51.6	51.6
Transition temperature(°C)	226	113

Table 3 Injection molding conditions

Items	Contents
Mold temperature(°C)	65
Melt Temperature(°C)	250
Filling control(mm/s) (Absolute ram speed)	80
Velocity/pressure switch-over(mm) (By ram position)	13
Packing time(sec)	5
Packing pressure(MPa)	140
Cooling time(sec)	12
Cycle time(sec)	40

되며, 이 과정에서 사출 제품 내부에 수축현상이 발생하게 되는데, 이러한 수축현상이 금형틀로 인해 억제되면서 잔류응력이 발생하게 된다. 이렇게 발생된 잔류응력은 사출 제품의 변형 및 불량현상의 주요한 원인으로 지적되고 있으며 잔류응력과 관련된 많은 연구들이 발표되고 있다.

본 연구에서는 IML 사출성형 과정 중 수지가 충전되는 과정을 해석한 결과를 보여주고 있는 Fig. 4와 같이 IML 사출성형 공정해석을 실시한 후 잔류응력의 유무에 따라 Case1 과 Case2 의 서로 다른 두 가지의

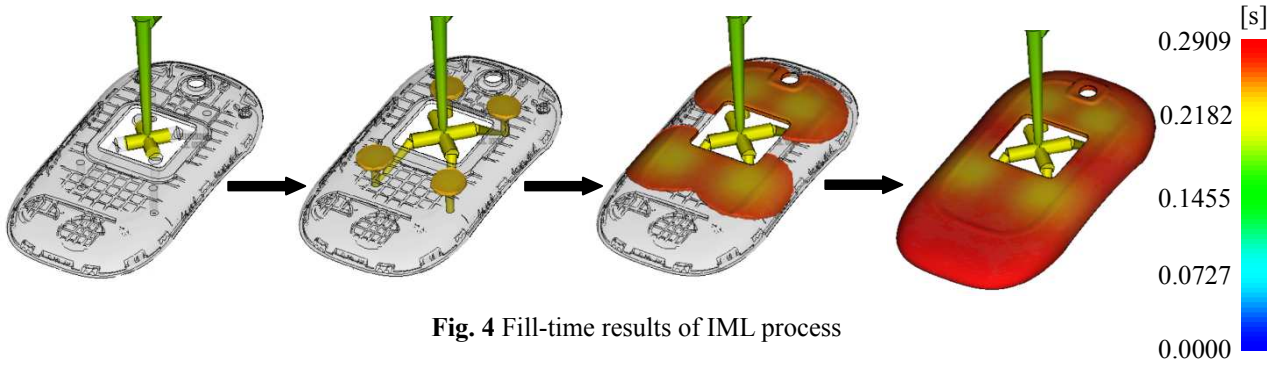


Fig. 4 Fill-time results of IML process

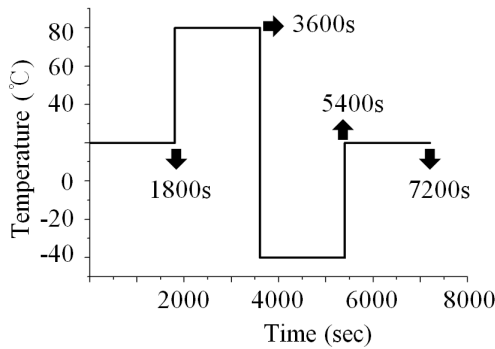


Fig. 5 Thermal impact procedure

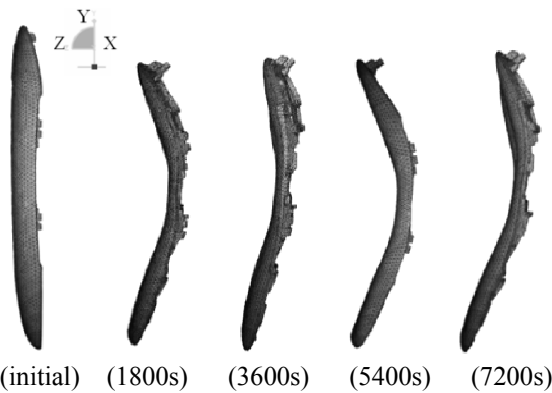


Fig. 6 Deformation shape due to thermal impact procedures (Scale factor:60)

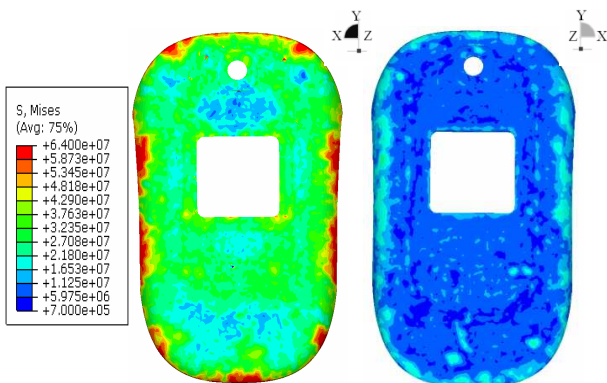


Fig. 7 Residual stress distribution of film bottom (left) and resin top (right) [at mold surface temperature]

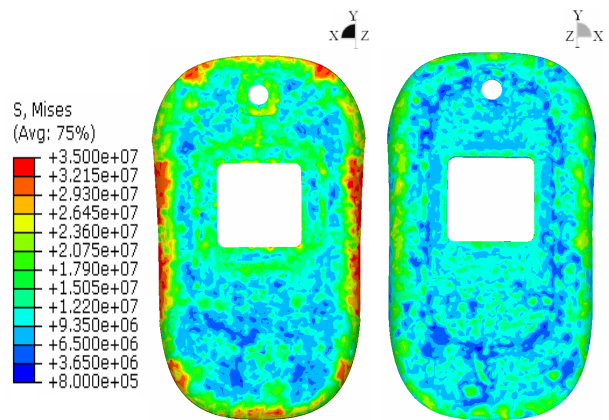


Fig. 8 Stress distribution of film bottom (left) and resin top (right) [Case1 : with residual stress]

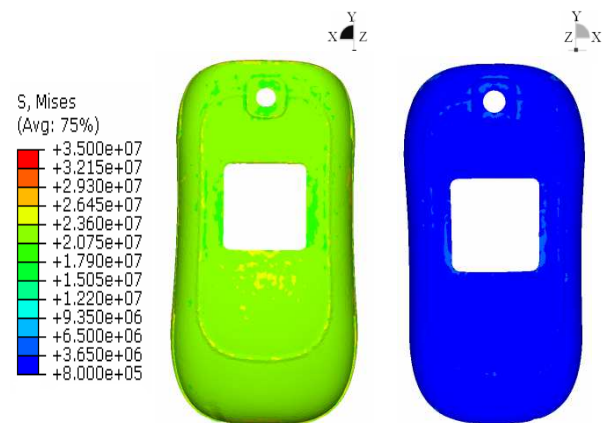


Fig. 9 Stress distribution of film bottom (left) and resin top (right) [Case2 : without residual stress]

해석을 진행하였다. Case1 의 경우 열 충격 해석 시 IML 사출성형 해석과정에서 발생하는 잔류응력을 초기응력분포로 하였고, Case2 는 잔류응력을 고려하지 않고 열 충격 해석을 실시하였다.

ABAQUS 를 이용한 열 충격 해석의 경우 IML 사출성형 공정이 끝난 후 사출 제품을 Fig. 5 의 열 충격 실험조건과 같이 상온상태로 이형 하는

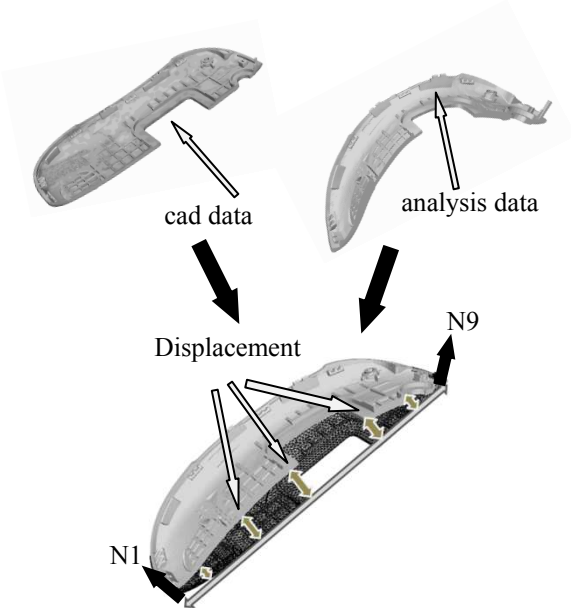


Fig. 10 Deformation measurement procedure

과정과 고온, 저온의 급격한 온도변화, 그리고 다시 상온상태로 돌아오는 과정으로 변화시켰고, 그에 따른 최종 제품 형상의 변형 및 응력분포를 구하였다. 각 단계의 시간은 실제 열 충격 실험을 실시할 때와 동일한 시간으로, 단계 별로 1800 초 씩 설정하였으며, 각 단계에서의 온도 변화에 따른 다양한 변형 현상을 Fig. 6 에서 자세하게 확인할 수 있다. 본 연구를 통해 개발한 연동해석 방법을 이용하여 IML 사출공정 이후 급형 온도에서의 제품내부 잔류응력 분포, 즉 ABAQUS 를 이용한 변형해석에 사용되는 초기 응력 분포를 Fig. 7 에서 보여주고 있으며, 잔류응력의 유무에 따른 최종 열 충격 해석 이후의 응력분포를 Fig. 8 과 Fig. 9 에서 확인 할 수 있다.

Fig. 8 은 잔류응력을 포함한 경우의 응력분포를 나타내고 있으며, Fig. 9 는 잔류응력을 포함하지 않은 경우의 응력분포를 나타내고 있다. 해석결과를 비교해보면 잔류응력을 포함한 열 변형 해석 결과의 경우 잔류응력을 포함하지 않은 경우에 비해 측정지점에서 0.8Mpa 부터 26Mpa 까지의 다양한 응력분포의 차이를 보이며, 필름의 안쪽 면인 Face1 과 수지의 바깥 면인 Face2 사이에 응력차이가 부분적으로 크게 발생하는 것을 알 수 있었다. 이러한 응력분포 차이는 두 물질 간 변형량 차이를 초래할 수 있으며, 최종 형상에서 필름바라 현상이 발생할 가능성이 다른 부분에 비해 높을 것으로 예상할 수 있다. 그 결과 형상이 끝나는 곡면의 끝부분과 윈도우 및 카메라 렌즈가 설치되는 부분에서 발생 가능성이 높을 것으로 예측된다. 반면 잔류 응력을 포함 하지 않은 열 충격 해석의 경우 필름과 수지 사이의 응력차이가 최대 22Mpa 로 비교적

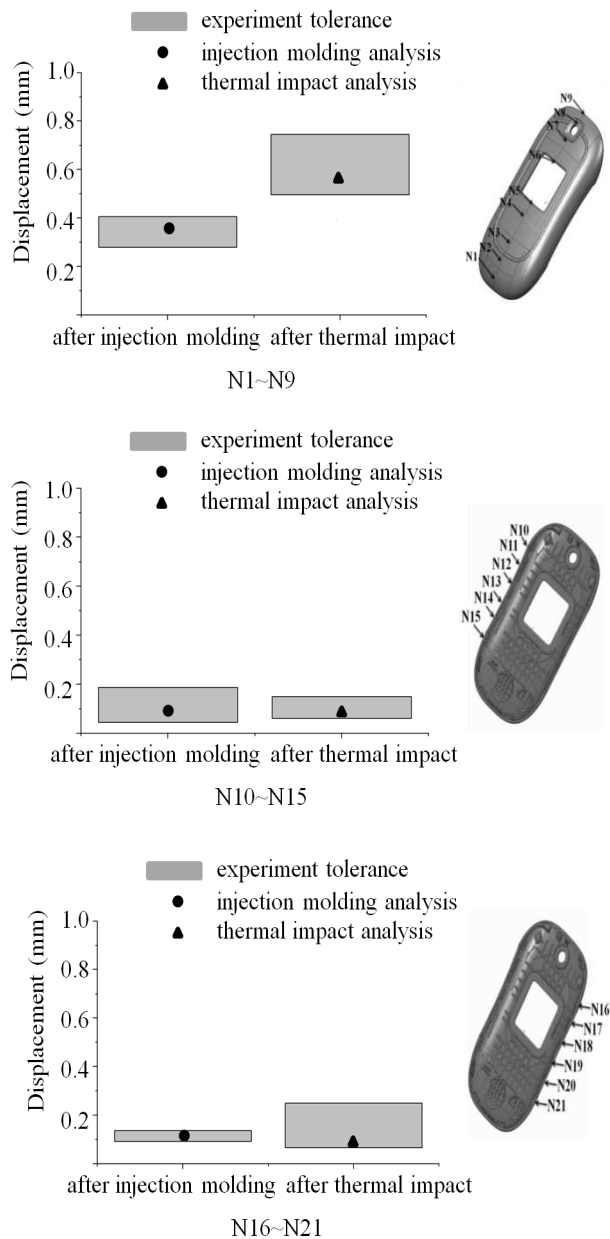


Fig. 11 Deformation comparison between numerical analysis and experiment

적으며, 응력차이 또한 전체적으로 19Mpa 의 일정한 값을 가지는 것을 알 수 있었다. 이로부터 IML 사출 공정 중에 발생하는 잔류응력을 열 충격 해석 시 고려해야 한다는 것을 확인할 수 있었다.

무작위로 선택된 4 가지 실제모델에 대하여 실험을 통해 측정된 변형량을 전술한 바와 같이 해석에 의해 예측된 변형량과 비교해 보았다. Fig. 10 은 본 연구에서 적용된 모델의 변형량 측정과정을 보여주고 있다. 변형량 측정의 경우 형상의 양끝 부분인 N1 과 N9 를 초기 CAD 데이터와 일치 시킨 후, 나머지 부분의 변형량을 측정하였으며, N10-N15, N16-N21 또한 동일한

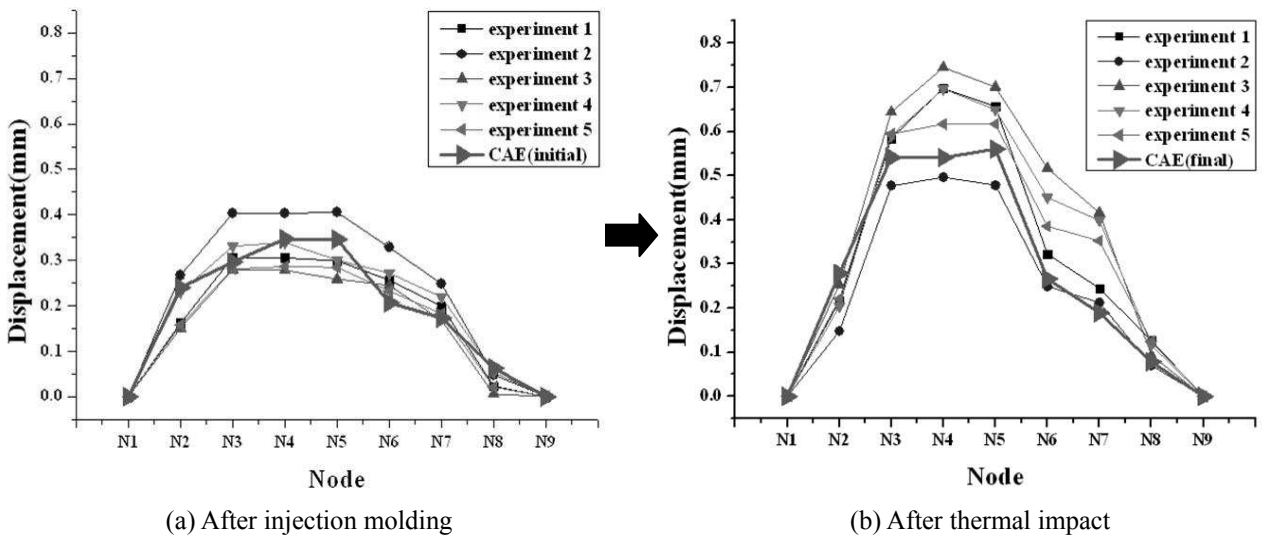


Fig. 12 Deformation comparison between numerical analysis and experiment

방법을 통하여 변형량을 정리하였다.

Fig. 11 은 측정라인으로부터의 최대 변형량과 최소 변형량을 다수의 실험을 통하여 구한 결과를 수치해석결과와 비교한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 수치해석결과가 실험을 통해 측정된 변형량의 범위 안에 포함되는 것을 확인할 수 있었으며, 이로부터 본 연구에서 사용한 연동해석 방법이 실제 변형량을 잘 예측할 수 있음을 확인할 수 있었다. Fig. 11 에서 초기 변형량은 IML 사출성형 공정을 마치고, 사출 제품을 상온상태로 이형시킨 후 측정된 변형량이며, 최종 변형량은 열 충격 실험을 마친 후 사출 제품을 상온상태에 두었을 때의 변형량을 나타내고 있다. Fig. 10 의 그래프를 보면 윈도우와 카메라 렌즈가 삽입되는 N1-N9 부분의 경우 다 곡면의 복잡한 형상을 가지고 있으며, 좌우 부분인 N10-N21 에 비해 많은 변형이 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 열 충격 실험 후 N10-N21 에 비해 추가적으로 많은 변형이 발생하는 것을 확인할 수 있는데, 이러한 내용을 바탕으로 사출 제품 내에서 변형 경향을 가장 잘 확인할 수 있는 N1-N9 부분의 변형량을 좀 더 자세하게 확인할 필요가 있으며, N1-N9 의 각 부분에 따른 변형량을 Fig. 12 에 보였다.

그림에서 볼 수 있듯이 본 연구에서 수행한 연동해석 결과의 경우 변형량뿐만 아니라 변형 경향 예측도 실제 실험 결과와 비교적 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 12 의 IML 사출공정 이후 상온상태에서의 변형 형상을 보면 형상의 끝부분인 N1 지점에서 윈도우가 삽입되는 부분까지 변형량이 일정 부분 증가하다 N5 지점 이후 감소

하는 것을 확인할 수 있는데, 열 충격 실험 이후 부분적인 변형량의 차이는 있으나, 전체적인 변형 경향은 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 특히 IML 사출 성형 공정 이후 다 곡면의 형상에서 비교적 편평한 형상으로 변하는 N3-N5 의 경우 다른지점에 비해 비교적 적은 변형량의 차이를 보이고 있으나, 열 충격 실험 이후 그 값은 다른 지점에 비해 큰 증가를 보이고 있는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 IML 사출공정 및 열 충격 실험을 통하여 얻은 실험 값과 연동해석을 통한 수치해석결과를 비교하였다. CAE 해석은 실제공정과 동일한 조건으로 실시하였으며, 실험 값과 비슷한 경향 및 값을 가지는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과를 바탕으로 IML 사출 제품 생산에 있어 사출제품 공정 전 사출공정 해석뿐만 아니라, 이후의 열 변형 해석 또한 중요하게 고려 되어져야 하는 것을 확인할 수 있었다. IML 사출성형 공정의 경우 서로 다른 이형물질인 필름과 고분자 수지를 사용한다는 점에서 사출 이후에 두 물질 사이에 서로 다른 응력분포를 형성하는 것을 확인하였고, 그에 따른 변형량 또한 부분적으로 다르게 발생하는 것을 관찰할 수 있었다. 또한 잔류응력의 경우 사출 이후의 변형량뿐만 아니라 일상생활 속에서 발생하는 온도변화에 의한 변형에도 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) IML 사출공정 중 발생하는 잔류응력은 사출 제품의 변형 및 필름박리 현상 등에 중요한 영향

을 미치며, IML 사출공정 이후 열 변형에도 중요한 영향을 미치는 것을 확인 하였다.

(2) IML 사출공정 해석 및 열 충격 해석 이후 필름의 안쪽 면(Face1)과 수지의 바깥 면(Face2)의 응력 분포차이를 통하여 필름박리 현상을 일정부분 예측할 수 있는 것을 알 수 있었다.

(3) 본 연구에서 개발한 연동해석을 이용하여 IML 사출 성형 공정 및 열 충격 실험 이후 변형량과 변형 경향을 비교적 잘 예측할 수 있음을 확인 하였다.

이러한 연구결과를 바탕으로 IML 사출성형 공정 시 본 연구에서 사용한 연동해석 방법을 통해 초기 제품 설계의 참고사항으로 활용 가능할 것이라 기대한다.

후 기

본 연구는 삼성전자와의 산학파제의 일환으로 진행 되었습니다.

참고문헌

- (1) Kabanemi, K. K., Vallancourt, H., Wang, H. and Salloum, G., 1998, "Residual Stresses, Shrinkage and Warpage of Complex Injection Molded Products: Numerical Simulation and Experiment Validation," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 38, No. 1, pp. 21~37.
- (2) Zoetelief, W. F., Douven, L. F. A. and Ingen, A., 1996, "Residual Thermal Stresses in Injection Molded Products," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 36, No. 14, pp. 1886~1896.
- (3) Liu, F., Zhou, H. and Li, D., 2009, "Numerical Simulations of Residual Stresses and Warpage in Injection Molding," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 28, No. 5, pp. 571~585.
- (4) Kitamura, T., Hirakata, H. and Itsuji, T., 2003, "Effect of Residual Stress on Delamination from Interface Edge Between Nano-Films," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 70, No. 1, pp.2089~2101.
- (5) Yu, H. H., He, M. Y. and Hutchison, J. W., 2001, "Edge Effects in Thin Film Delamination," *Acta mater*, Vol. 49, No. 1, pp. 93~107.
- (6) Jacques, M., 1982, "An Analysis of Thermal Warpage in Injection Molded Flat Parts Due to Unbalanced Cooling," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 22, No. 4, pp. 241~247.
- (7) Choi, D. S. and Im, Y. T., 1999, "Prediction of Shrinkage and Warpage in Consideration of Residual Stress in Integrated Simulation of Injection Molding," *Composite Structures*, Vol. 47, No. 1, pp. 655~665.
- (8) Jansen, K. M. B. and Titomanlio, G., 1996, "Effect of Pressure History on Shrinkage and Residual Stresses Injection Molding with Constrained Shrinkage," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 36, No. 15, pp. 2029~2040.
- (9) Chiang, K. T. and Chang, F. P., 2007, "Analysis of Shrinkage and Warpage in an Injection Molded Part with a Thin Shell Using the Response Surface Methodology," *Int j adv manuf technol*, Vol. 35, No. 1, pp. 468~479.
- (10) Patcharaphu, S. and Mennig, G., 2006, "Simulation and Experimental Investigations of Material Distribution in the Sandwich Injection Molding Process," *Polymer Plastics Tech Eng*, Vol. 45, No. 1, pp. 759~768.
- (11) Kim, S. Y., Oh, H. J., Kim, S. H., Kim, C. H., Lee, S. H. and Youn, J. R., 2008, "Prediction of Residual Stress and Viscoelastic Deformation of Film Insert Molded Parts," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 48, No. 1, pp. 1840~1847.
- (12) Kim, S. Y., Kim, S. H., Oh, H. J., Lee, S. H., BaeK, S. J., Youn, J. R., Lee, S. H. and Kim, S. W., 2008, "Molded Geometry and Viscoelastic Behavior of Film Insert Molded Parts," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 111, No. 1, pp. 642~650.
- (13) Park, K., Ahn, J. H. and Yim, C. H., 2003, "Residual Stress Estimation and Deformaion Analysis for Injection Molded Plastic Parts Using Three Dimensional Solid Elements," *Trans of the KSME (A)* Vol. 27, No. 4, pp. 507~514.