

## 3 차원 입체요소를 사용한 사출성형품의 잔류응력 예측 및 후변형 해석

박 근<sup>†</sup> · 안종호\* · 임충혁\*\*

(2002년 4월 26일 접수, 2003년 2월 21일 심사완료)

### Residual Stress Estimation and Deformation Analysis for Injection Molded Plastic Parts using Three-Dimensional Solid Elements

Keun Park, Jong-Ho Ahn, and Chung-Hyuk Yim

**Key Words :** Injection Molding(사출성형), Finite Element Analysis(유한요소해석), Solid Element(입체요소), Deformation Analysis(변형해석), Residual Stress(잔류응력)

#### Abstract

Most of CAE analyses for injection molding have been based on the Hele Shaw's approximation: two-dimensional flow analysis. In some cases, that approximation causes significant errors due to loss of the geometrical information as well as simplification of the flow characteristics in the thickness direction. Although injection molding analysis software using three-dimensional solid elements has been developed recently, such as Moldflow Flow3D, it does not contain a deformation analysis function yet. The present work covers three-dimensional deformation analysis of injection molded plastic parts using solid elements. A numerical scheme for deformation analysis has been proposed from the results of injection molding analysis using Moldflow Flow3D. The accuracy of the proposed approach has been verified through a numerical analysis of rectangular plates with various thicknesses in comparison with the classical shell-based approach. In addition, the reliability of the approach has also been proved through an industrial example, an optical plastic lens, in comparison of real experiments.

#### 기호설명

- $k$  : 열전도계수
- $C_p$  : 비열(specific heat)
- $\eta$  : 점성계수
- $n$  : 점성모델 지수
- $\tau^*$  : 전단 전이응력
- $T_b$  : 온도 민감도(temperature sensitivity)
- $\beta$  : 압력계수
- $\alpha$  : 열팽창계수
- $\nu$  : 비체적(specific heat)
- $T_i$  : 전이 온도

#### 1. 서론

사출성형은 복잡한 형상의 고분자 제품을 제작할 수 있는 생산기술로서, 최근들어 제품의 경량화와 생산성 향상을 위해 많이 사용되는 방법이다. 사출성형의 공정은 크게 가소화(plastication), 충전(filling), 보압(packing), 냉각(cooling), 이형(ejection)의 5단계로 구분되며, 각각의 단계에서 공정변수를 적절하게 설정해주어야 한다. 이러한 목적으로 컴퓨터를 사용한 수치해석(Computer Aided Engineering; CAE) 기법이 사출성형용 금형 및 공정설계를 위한 목적으로 널리 사용되고 있다.

현재까지의 대부분의 사출성형 해석에 관련된 연구는 평면방향 2차원 유동으로 가장한 해석 모델을 적용하고 있다. 따라서 사출성형 해석을 위해서는 입체적으로 정의되어 있는 제품의 형상을

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 서울산업대학교 기계설계·자동화공학부  
Email : kpark@snut.ac.kr  
TEL : (02)970-6358 FAX : (02) 974-8270

\* 삼성전기(주) 중앙연구소 금형팀

\*\* 서울산업대학교 기계설계·자동화공학부

평면 혹은 곡면을 사용하여 제품의 형상을 정의하고, 이에 기반하여 2차원 박막요소(shell element)를 사용한 유한요소 격자를 생성해주어야 한다. 이러한 제품형상의 단순화는 제품 모델의 변환과정에 많은 시간이 소요될 뿐 아니라, 제품의 기하학적 형상정보가 왜곡된다는 단점을 가지고 있다. 특히 소형 제품의 경우 두께에 대한 특성길이의 비가 그다지 크지 않아 두께방향의 유동이나 압력구배를 무시할 경우 해석의 신뢰성에 심각한 영향을 미치게 된다.

이러한 문제점을 개선하기 위해 최근들어 3차원 입체요소를 사용한 사출성형 해석에 관한 연구가 진행되어왔다.<sup>(1-3)</sup> 본 연구에서는 이중 Moldflow社에서 개발한 MPI/Flow3D를 활용하여 사출성형 해석을 진행하였다. 현재 MPI/Flow3D는 사출성형과정중 충전, 보압, 냉각과정에 대한 해석기능이 개발되어 있으나, 사출성형품의 후변형 예측을 위한 변형해석 기능은 아직 출시되어 있지 않아 별도의 연구가 필요한 실정이다. 사출성형품의 변형량을 계산하기 위해서는 우선 성형과정중의 금형내의 온도 및 압력분포의 이력을 알아야 하며 이에 따른 잔류응력의 계산이 선행되어야 한다.

사출성형품의 잔류응력은 유동에 의한 잔류응력(flow-induced residual stress)과 열에 의한 잔류응력(thermally-induced residual stress)으로 구분하여 생각할 수 있다. 이중 유동에 의한 잔류응력은 상대적으로 미미하여 변형에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있고, 사출성형품의 후변형 예측에 관한 연구는 주로 열에 의한 잔류응력을 대상으로 진행되어 왔다. Jacques<sup>(4)</sup>은 두께방향의 비대칭 온도분포로부터 평판의 휨량을 계산하였고, Jansen과 Titimanlio<sup>(5)</sup>는 사출성형중의 압력분포를 고려한 잔류응력과 수축량을 탄성 모델을 이용하여 계산하였다. Zoetelief 등<sup>(6)</sup>은 선형 점탄성 구성방정식을 사용하여 보압의 영향을 고려한 잔류응력을 예측하였고, Lui<sup>(7)</sup>는 고상과 액상을 구분하여 각각 선형 점탄성 모델과 점성모델을 적용하여 잔류응력 및 변형해석을 수행하였다. Lee<sup>(8)</sup> 및 Choi와 Im<sup>(9)</sup>은 충전 및 후충전과정시 금형내 압력 및 온도분포를 고려한 잔류응력 및 취출후의 평면변형 거동을 해석하였고, Yang과 Kwon<sup>(10)</sup>은 자유 체적 이론에 근거하여 이형과정 및 그 이후의 변형량을 예측하였다. 그러나 이러한 연구는 모두 기하학적으로 얇은 형상에 대해 박막요소를 기반으로 수행되었으며, 따라서 두께방향으로의 변형량은 고려되지 못하고 있다.

본 연구에서는 이러한 관점에서 3차원 입체요소를 사용한 사출성형품의 변형해석을 위한 연구

를 진행하도록 하겠다. 이를 위해 입체요소를 사용하여 충전, 보압, 냉각과정에 대해 사출성형 해석을 수행하고 해석 결과로부터 금형내의 온도 및 압력분포에 대한 이력을 도출하였다. 도출된 온도이력 정보를 사용하여 금형내에서 발생하는 잔류응력을 계산하고, 이를 토대로 이형 후의 열변형 해석을 수행함으로써 제품의 최종 변형량을 예측하였다. 또한 이러한 해석결과를 기존의 박막요소 기반 해석결과와 비교하여 제안된 방법의 타당성을 입증하도록 하겠다.

## 2. 사출성형의 이론적 배경

### 2.1 사출성형의 지배방정식

고분자의 유동은 일반적으로 점성이 전단변형을 속도(shear rate), 온도, 그리고 압력에 따라 변하는 비뉴토니안(non-Newtonian) 유체로 알려져 있다. 고분자의 유동을 수학적으로 묘사하기 위한 연속방정식, 운동방정식, 에너지방정식은 각각 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\rho u_i)_{,i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left( \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j u_{i,j} \right) = -p_{,i} + \tau_{\mu,i} + \rho f_i \quad (2)$$

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u_i T_{,i} \right) = T_{,\mu} + \tau_{\mu,\mu} + \eta \dot{\gamma}^2 \quad (3)$$

이때 점성계수( $\eta$ )는 5개의 재료상수( $n, \tau^*, B, T_b, \beta$ )를 갖는 수정된 Cross 점성모델을 사용하였으며, 다음과 같이 표현된다.

$$\eta(T, \dot{\gamma}, p) = \frac{\eta_0(T, p)}{1 + \left( \frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{1-n}} \quad (4)$$

여기서  $n$ 은 지수,  $\tau^*$ 는 전단 전이응력(transition stress),  $\eta_0$ 는 전단력이 작용하지 않을 경우의 점성계수(zero shear rate viscosity)로 다음과 같다.

$$\eta_0(T, p) = B \exp\left(\frac{T_b}{T}\right) \exp(\beta p) \quad (5)$$

이때  $T_b$ 는 온도 민감도(temperature sensitivity)이고,  $\beta$ 는 압력 계수(pressure coefficient)이다. 한편 직교

좌표계(Cartesian coordinates)에 대해 기술하고 중력의 영향 및 전도에 의한 열전달 성분을 무시하면 식 (1)부터 (3)은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \eta \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (7a)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \eta \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (7b)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \eta \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (7c)$$

$$\begin{aligned} \rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \eta \dot{\gamma}^2 \end{aligned} \quad (8)$$

2.2 요소의 종류에 따른 해석특성의 고찰

일반적으로 사출성형에 의해 성형되는 제품의 두께는 유동평면의 특성길이에 비해 매우 작기 때문에 평면방향에 비해 두께방향의 유동은 상대적으로 무시할 수 있다. 이러한 가정 하에 두께방향의 압력구배를 무시한 Hele-Shaw 의 모델이 사출성형의 수치해석에 널리 사용되고 있으며, 이때 식 (7c)는 다음과 같이 단순화된다.<sup>(11)</sup>

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \eta \frac{\partial w}{\partial z} \right) \approx 0 \quad (9)$$

한편 얇은 형상에 대해서 평면내의 열전도량은 두께방향, 즉 금형 벽면으로의 열전도량에 비해 상대적으로 적어 무시할 수 있다. 또한 두께 방향의 대류열전달 역시 상대적으로 미미하므로 식 (8)은 다음과 같이 간략화시킬 수 있다.

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k_t \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \eta \dot{\gamma}^2 \quad (10)$$

대부분의 사출성형해석 S/W 는 위와 같은 단순화 가정에 의해 평면방향 2차원 유동으로 가정한 유한요소 모델을 적용하고 있다. 평면방향 유동을 효율적으로 묘사하기 위해 일반적으로 2차원 3점 삼각형 박막요소가 널리 사용된다. 따라서 사출성형 해석을 위해서는 입체적으로 정의되어 있는 제품의 형상을 평면 혹은 곡면을 사용하여 면(surface) 정보로서 제품의 형상을 정의하고, 이에

기반하여 박막 요소를 사용한 유한요소 격자를 생성해주어야 한다. 이러한 제품형상의 단순화는 제품 모델의 변환과정, 즉 3차원 입체형상을 2차원적으로 단순화하는 과정에서 많은 시간이 소요될 뿐 아니라 경우에 따라 제품의 기하학적 형상정보가 왜곡된다는 단점을 가지고 있다. 특히 소형 제품의 경우 두께에 대한 특성길이의 비가 그다지 크지 않아 두께방향의 유동이나 압력구배를 무시할 경우 해석의 신뢰성에 심각한 영향을 미치게 된다.

이러한 차이점을 보다 자세히 살펴보면 다음과 같다. 일반적으로 사출성형품의 두께가 특성길이에 비해 매우 얇으면 해당 제품은 전술한 Hele Shaw 의 가정에 의해 평면유동에 기초한 해석으로 단순화할 수 있다. 즉 Fig. 1과 같이 제품의 형상을 평면 혹은 곡면정보로 변환하여 간략화시킬 수 있다. 이때 단순화된 형상에 두께정보가 포함된 2차원 삼각형 요소를 사용하여 유한요소 격자를 구성해준다. 이를 사용하여 압력장을 풀기 위한 유한요소 해석이 진행되며, 두께방향의 온도분포는 각 삼각형 요소를 여러 층으로 나누고, 이에 대해 유한차분 수식을 계산하여 얻어진다.

반면에 상대적으로 두꺼운 제품의 경우는 Fig. 1과 같이 형상을 중간면으로 가정하는데 많은 문제가 있다. Fig. 2를 보면 우선 형상의 단순화 자체에 부리가 따름을 알 수 있다. 또한 두께방향으로의 압력구배나 대류열전달을 무시할 수 없으며, 양측면에서의 금형면과의 열전도 효과 또한 무시할 수 없어 식 (9)와 (10)의 가정이 성립될 수 없다. 이러한 경우 3차원 사면체 요소를 사용하면 기하학적 단순화 없이 직접적으로 격자를 구성할 수

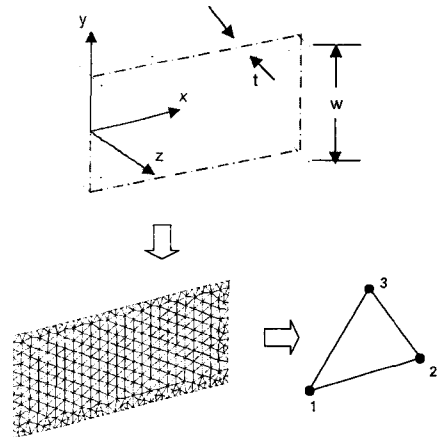


Fig. 1 Mesh structure based on shell elements for a thin geometry

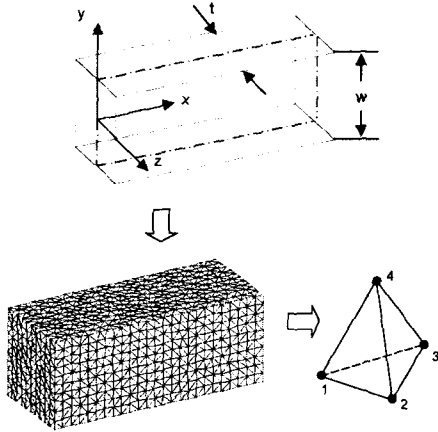


Fig. 2 Mesh structure based on solid elements for a thick geometry

있으며, 전술한 여러 가지의 가정 없이 해석을 수행할 수 있다는 장점이 있어 제품의 형상이 두껍고 입체적인 경우 보다 정확한 유동의 예측이 가능하다.<sup>(2,3)</sup>

### 3. 사출성형품의 변형해석 수식화

본 연구에서는 사출성형품의 후변형 해석을 위해 열에 의한 잔류응력만을 고려하였다. 이때 액체상태에서 발생하는 잔류응력은 무시하였고, 응고된 고분자 수지에 대해서만 선형 탄성체로 가정하여 해석을 수행하였다. 이때의 평형방정식 및 구성방정식은 다음과 같다.

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{\sigma} + \bar{f} = 0 \tag{11}$$

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}(\epsilon_{kl} - \alpha \delta_{ij} \Delta T) \tag{12}$$

여기서  $\alpha$ 는 열팽창계수로 고분자수지의 비체적 (specific volume) 값으로부터 얻어진다. 비체적은 Tait의 상태방정식을 사용하여 다음과 같이 온도와 압력의 함수로서 표현된다.<sup>(12)</sup>

$$v(T, p) = v_0(T) \left[ 1 - C \ln \left( 1 + \frac{p}{B(T)} \right) \right] \tag{13}$$

위 식에서  $v_0(T)$ 와  $B(T)$ 는 각각 다음과 같다.

$$v_0(T) = \begin{cases} b_{1,i} + b_{2,i} \bar{T}, & \text{for } T > T_i \\ b_{1,s} + b_{2,s} \bar{T}, & \text{for } T < T_i \end{cases} \tag{14}$$

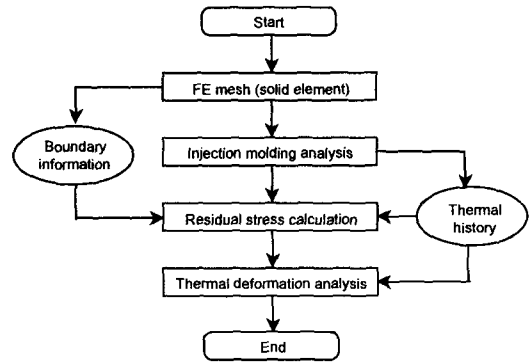


Fig. 3 Schematic procedure for deformation analysis

$$B(T) = \begin{cases} b_{1,i} \exp(-b_{3,i} \bar{T}), & \text{for } T > T_i \\ b_{1,s} \exp(-b_{3,s} \bar{T}), & \text{for } T < T_i \end{cases} \tag{15}$$

여기서  $\bar{T}$ 와  $T_i$ 는 각각 유효온도 및 전이 온도 (transition temperature)를 의미하며, 다음과 같이 온도와 압력의 함수로서 표현된다.

$$\bar{T} \equiv T - b_5 \tag{16}$$

$$T_i(p) = b_3 + b_6 p \tag{17}$$

이때  $b_1 \sim b_6$ 는 고분자수지 물성에 따른 계수이다. 한편 열팽창계수는 비체적을 온도에 대해 미분하여 다음과 같이 얻어진다.

$$\alpha = \frac{1}{3v} \frac{\partial v}{\partial T} = \frac{1}{3} \left[ \frac{C}{1 - C \ln \left( 1 + \frac{p}{B(T)} \right)} \frac{p}{B(T) + p} \frac{\partial B(T)}{\partial T} \right] + \frac{1}{v_0} \frac{\partial v_0}{\partial T} \tag{18}$$

위와 같은 수식화를 사용하여 금형내의 잔류응력 분포를 계산할 수 있다. 이때 입체요소를 사용한 사출성형 해석 결과로부터 단계별 온도분포의 이력을 추출하여 잔류응력 해석 및 이형후 열변형 해석의 입력 데이터로 사용하였다. 잔류응력 해석시는 사출성형 해석시 사용한 격자와 동일한 격자 구조를 사용하였으며, 해석은 ABAQUS Implicit 을 사용하여 수행하였다. 이때 3차원 격자구조에서 경계면의 절점 정보를 자동 추출하여 잔류응력 계산시의 경계조건으로 부과해주었다. 또한 계산된 잔류응력을 고려하여 이형 후 수지가 상온에 도달할 때까지의 열변형 해석을 수행함으로써 제품의 최종 변형을 예측하였다. Fig. 3에 이러한 과정을 개념적으로 도시하였다.

### 4. 입체요소를 사용한 사출성형품의 잔류응력 및 변형해석

#### 4.1 사각 평판의 3 차원 변형해석

제안된 방법에 의한 변형해석의 신뢰성을 입증하기 위해 Fig. 4와 같은 사각 평판을 대상으로 해석을 진행하였다. 이때 두께에 따른 변형량의 경향을 살펴보기 위해 평판의 두께를 1mm부터 4mm까지 1mm씩 증가시키며 총 4개의 모델에 대해 각각 박막요소와 입체요소를 사용하여 해석을 진행하였다. 또한 실제 금형을 제작하여 실험을 실시하였으며, Table 1에 사출조건을 요약하였다. 박막요소의 경우는 기존의 Moldflow에서 제공하는 중립면(mid-plane)에 의한 해석모델을 사용하여 사출성형 및 변형해석을 수행하였고, 입체요소의 경우에는 MPI/Flow3D를 사용하여 충전, 보압 및 냉각해석을 수행하고 단계별 온도분포를 추출하여 이를 기준으로 잔류응력 및 열변형해석을 수행하였다. 또한 잔류응력을 고려하여 열변형해석을 수행한 경우와 단순히 온도변화에 의해 계산된 열변형량을 비교함으로써 잔류응력의 고려가 변형량에 미치는 효과를 고찰해보았다.

Table 1 Injection molding conditions

Items	Contents
Material	ABS (HF06601)
Melt temperature (°C)	220
Mold temperature (°C)	60
Injection time (sec.)	1.2
Packing time (sec.)	2.0
Packing pressure (MPa)	40.0
Cooling time (sec.)	20.0

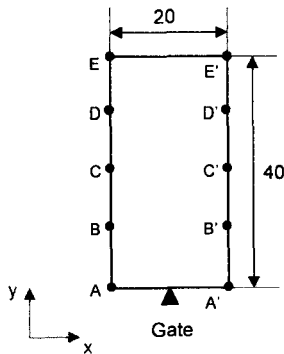


Fig. 4 Schematic view of a rectangular plate

Fig. 5에 금형 내에서의 잔류응력의 분포를 도시하였다. 소재 전체에 걸쳐 인장응력 성분이 주로 존재함을 알 수 있는데, 이는 냉각과정 동안 금형 내의 고분자수지가 응고되면서 발생하는 수축이 금형과의 접촉에 의해 억제되기 때문이다. 이러한 잔류응력은 이형 후에 발생하는 열변형과 복합적으로 작용하여 제품의 후변형을 유발한다. 따라서 본 연구에서는 계산된 잔류응력 분포를 추출하여 이를 이형 후의 초기 응력값으로 가정하고 열변형 해석을 수행하였다.

제안된 방법의 신뢰성을 검토하기 위해 사각평판의 두께를 각각 1, 2, 3, 4mm로 변화시키며 해석을 수행하고 실험결과와 비교하였다. 이때 입체요소를 사용하여 해석한 경우에는 단순히 온도변화에 의한 열변형해석 결과(solid analysis 1)와 잔류응력을 고려한 해석결과(solid analysis 2)를 비교하여 잔류응력의 고려에 따른 해석결과의 신뢰도를 고찰하였다. 실험은 해석과 동일한 조건상에서 각각 5회씩의 반복실험을 수행하였으며, 각 조건에서의 평균값으로 비교하였다. Table 2에 평판 중앙부 폭(Fig. 4의 CC')의 최종 변형량에 대해 박막요소 및 입체요소를 사용한 해석결과와 실험치를 비교하였다. 입체요소의 경우 잔류응력을 고려하지 않은 경우는 변형량이 지나치게 적게 계산되었음을 알 수 있는데, 이는 금형내 냉각과정에서 발생된 인장응력으로 인해 이형후 추가적으로 발생하는 변형이 고려되지 못했기 때문으로 분석된다.

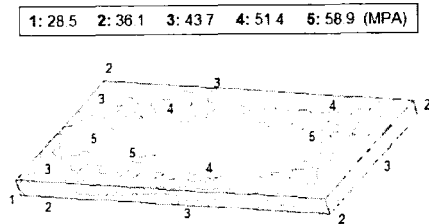


Fig. 5 Residual stress distribution before ejection

Table 2 Comparison of deformation wrt. part thickness

Thickness (mm)	1.0	2.0	3.0	4.0
Width/thickness ratio	20.0	10.0	6.67	5.0
Shell analysis (mm)	0.1742	0.2113	0.2628	0.2826
Solid analysis 1(mm)	0.0853	0.1035	0.1578	0.2001
Solid analysis 2(mm)	0.1256	0.2081	0.2453	0.2593
Experiments (mm)	0.1830	0.1922	0.2184	0.2324
Variance (x 10 <sup>-3</sup> )	0.305	0.053	0.028	0.173

한편 잔류응력을 고려한 입체요소와 기존의 박막요소를 사용한 해석결과를 비교해보도록 하겠다. Table 2를 보면 두께가 1mm 인 경우 박막요소가 보다 정확한 결과를 보였으며, 입체요소의 경우에는 지나치게 적게 평가되었음을 알 수 있다. 이러한 차이는 제안된 변형해석 과정에서 부위별 수축률의 차이에 의한 잔류응력의 계산 및 점탄성효과 고려 등 기존의 박막요소 기반 변형해석 S/W 에서 지원되는 항목을 무시하였기 때문으로 판단된다. 반면에 두께가 2mm 이상일 때, 즉 제품의 폭과 두께의 비(width to thickness ratio)가 10 이하일 때는 전술한 가정에도 불구하고 입체요소의 경우 보다 정확한 예측이 이루어졌음을 알 수 있다. 이러한 점을 정성적으로 확인하기 위해 두께에 따른 실험 결과와의 오차량을 Fig. 6에 그래프로 도시하였다.

Fig. 6을 보면 박막요소의 경우는 두께가 얇을 때는 정확한 결과를 보인 반면 두께가 증가할수록 오차량이 점점 증가하는 경향을 보인다. 한편 잔류응력을 고려하지 않은 입체요소의 경우에는 반면에 입체요소의 경우 두께가 증가해도 오차량이 크게 증가하지 않는 특성을 보이며, 특히 두꺼운 제품의 경우 실험결과와의 오차가 상대적으로 적

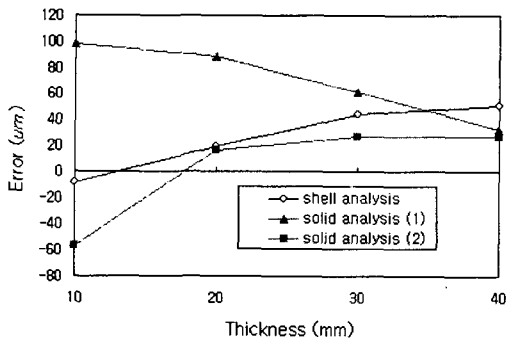


Fig. 6 Comparison of error wrt. part thickness

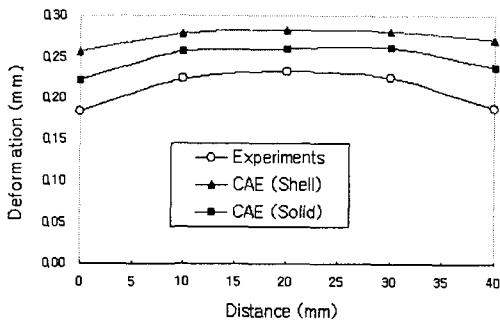


Fig. 7 Comparison of deformation along the distance from gate (part thickness: 4mm)

게 나타났음을 알 수 있다. 이러한 차이를 보다 구체적으로 비교하기 위해 두께가 4mm 인 시편에 대해 2가지 해석결과로부터 얻어진 게이트로부터의 거리에 따른 폭의 변형량의 변화를 Fig. 7에 비교하였다. 실험결과와 비교해보면 입체요소를 사용한 경우가 시편 전체에 걸쳐 보다 근접한 결과를 보이는 것으로 관찰되었다. 결론적으로 두꺼운 제품의 경우에는 3차원 입체요소를 사용한 변형해석이 전술한 몇가지의 가정에도 불구하고 기존의 평면변형에 기초한 변형해석보다 신뢰성 높은 결과를 제공한다고 판단된다.

#### 4.2 광학용 렌즈의 변형해석

렌즈는 광학제품의 성능에 직접적인 영향을 미치는 주요 부품으로서, 고정도의 형상 및 안정된 내부물성을 요구하는 정밀부품이다. 렌즈의 주요 기능은 특정 광학계 내에서 입사광이 원하는 위치에 초점을 맺을 수 있도록 굴절시켜주는 기능을 하며, 이러한 기능을 수행하기 위해 대부분의 렌즈는 두께가 연속적으로 변하는 특성을 갖고 있다. 따라서 기존의 박막요소 기반 접근방법, 즉 렌즈의 중간면을 추출하여 삼각형 격자를 생성하는 방법으로는 두께의 연속적인 변화를 정확하게 고려할 수 없다. 또한 렌즈의 양쪽 면의 정밀도가 광학적 특성에 복합적으로 영향을 미치므로 양쪽 곡면 모두에 대한 평가가 필수적이다. 이러한 특성을 고려할 때 렌즈의 사출성형해석 및 변형해석을 위해서는 입체요소를 사용한 접근이 타당하다.

본 연구에서 제시한 방법의 타당성을 검증하기 위해 Lu 와 Khim 의 관련 연구결과<sup>(13)</sup>를 참조하여 렌즈의 사출성형해석 및 변형해석을 수행하였다. 렌즈의 형상을 살펴보면 한쪽 면은 볼록하고 다른 반대쪽 면은 오목한 구면렌즈로 Fig. 8에 형상을 도시하였다. Table 3에 사출성형 조건을 요약하였는데, 이때 수지의 세부 물성정보가 명시되지 않은 관계로 광학용 PC 인 Iupilon S-2000를 사용하여 해석을 수행하였고, 사출성형 해석을 통해 최종적으로 얻어진 온도분포를 Fig. 9에 도시하였다.

Table 3 Injection molding conditions

Items	Contents
Melt temperature (°C)	300
Mold temperature (°C)	100
Injection time (sec.)	2.0
Packing time (sec.)	5.0
Packing pressure (MPa)	100
Cooling time (sec.)	30.0

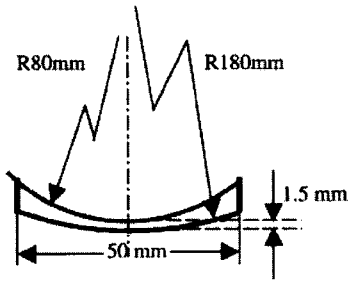


Fig. 8 Section view of an optical lens<sup>(13)</sup>

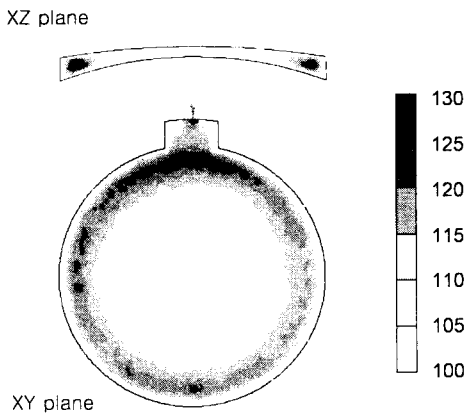
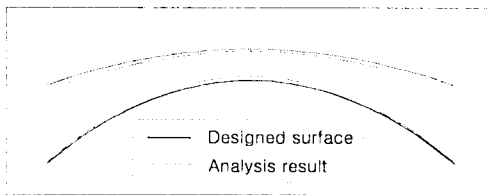
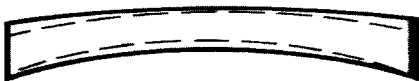


Fig. 9 Sectional views of the temperature distribution after cooling stage



(a) Deformation pattern (CAE analysis)



(b) Deformation pattern (experiments)<sup>(13)</sup>

Fig. 10 Deformation pattern of the optical lens

Fig. 9를 보면 렌즈 단면 내의 온도분포가 표면의 경우 100℃에서 내부는 130℃까지 다양하게 분포되어 있음을 알 수 있으며, 이는 불균일한 수축을 유발하여 결과적으로 후변형의 원인이 된다. 이러한 온도분포 정보를 기준으로 제안된 입체요소를 사용하여 변형해석을 실시하였다. Fig. 10 (a)는 변형해석을 통해 예측된 렌즈 단면의 변형형상을 5배 확대하여 도시한 그림으로 상면의 곡률반경은 증가하고 하면의 곡률반경은 감소함을 확인할 수 있다. 또한 이러한 결과는 이러한 결과는 참고문헌<sup>(13)</sup>에서 기술된 성형조건이 불충분하여 동일한 조건에서의 해석이 불가능했던 관계로 변형량의 정량적인 비교는 어려웠으나, Fig. 10 (b)에 도시한 실험결과<sup>(13)</sup>의 관련 실험결과와 비교했을 때 거의 유사한 변형패턴을 보임을 알 수 있다.

### 5. 결 론

이상으로 본 연구에서는 사출성형 해석의 정밀도 향상을 위해 3차원 입체요소를 사용한 잔류응력 예측 및 변형해석과 관련된 연구를 진행하였다. 이러한 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 사출성형의 이론적 배경을 분석하여 기존의 Hele Shaw 모델에 기초한 박막요소 기반 수식화의 문제점을 고찰하였고, 이를 해결하기 위한 방안으로 3 차원 입체요소를 사용한 해석을 도입하였다.
- (2) 입체요소를 사용한 사출성형품의 잔류응력 및 변형해석을 수행하기 위해 사출성형 해석 결과로부터 금형내의 잔류응력과 이형 후의 변형해석을 수행하기 위한 제반 연구를 수행하였다.
- (3) 제안된 해석기법을 사각 평판 제품에 적용하여 두께에 따른 변형량의 양상을 기존의 박막요소 기반 해석결과와 비교함으로써 제안된 방법의 신뢰성을 확인할 수 있었다. 특히 가장 두꺼운 평판(두께 4mm)의 경우 실험결과와의 오차가 박막요소 대비 52% 정도에 불과하여 보다 정확한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.
- (4) 제안된 방법을 적용하여 정밀 렌즈의 사출성형 및 변형해석을 수행하였고, 계산된 렌즈의 변형패턴이 실험결과와 유사한 패턴을 보임을 확인할 수 있었다.

이러한 연구결과를 바탕으로 기존의 박막요소를 사용한 사출성형 및 변형해석 기법의 한계를 극복하고 보다 다양한 형상으로서의 적용이 가능할 것으로 판단된다. 향후 이러한 연구결과를 토대로

사출성형 과정에서의 잔류응력 예측에 있어서 부위별 수축률의 차이, 고분자 배향의 분포, 응고시의 점탄성효과 등이 고려되면 보다 정확한 변형량의 예측이 가능할 것으로 전망된다.

## 후 기

본 연구는 서울산업대학교의 연구비 지원을 받아 수행된 것으로 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Kihara, S., Gouda, T., Matsunaga, K., and Funatsu, K., 1999, "Numerical Simulation of Three-Dimensional Viscoelastic Flow Within Dies," *Polym. Eng. Sci.* Vol. 39, pp. 152~163.
- (2) Kennedy, P., 2002, "Full 3D Analysis: what it is and when to use it," *Int. Moldflow User Group Conf.*, Boston, USA.
- (3) Park, K., Park, J. H., and Choi, S. R., 2002, "Numerical Analysis for Injection Molding of Precision Electronics Parts Using Three-Dimensional Solid Elements," *J. of Kor. Soc. Tech. Plasticity*, Vol. 11, pp. 362~371.
- (4) Jacques, M., 1982, "An Analysis of Warpage in Injection Molded Flat Parts Due to Unbalanced Cooling," *Polym. Eng. Sci.* Vol. 22, pp. 241~247.
- (5) Jansen, K. M. B. and Titomanlio, G., 1996, "Effect of Pressure History on Shrinkage and Residual Stresses - Injection Molding with Constrained Shrinkage," *Polym. Eng. Sci.* Vol. 36, pp. 2029~2040.
- (6) Zoetelief, W. F., Douven, L. F. A., and Housz, S. J., 1996, "Residual Thermal Stresses in Injection Molded Products," *Polym. Eng. Sci.* Vol. 36, pp. 1886~1896.
- (7) Liu S. J., 1996, "Modeling and Simulation of Thermally Induced Stress and Warpage in Injection Molded Thermoplastics," *Polym. Eng. Sci.* Vol. 36, pp. 807~818.
- (8) Lee, H. S., Moon, J. S., and Sin. H. C., 1999, "In-Plane Deformation Analysis of Injection-Molded Parts by Finite Element Method," *Trans. of the KSME, A*, Vol. 23, pp. 578~589.
- (9) 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, pp. 655~665.
- (10) Yang, S. S. and Kwon, T. H., 2002, "Deformation Analysis of Injection Molding Articles due to In-mold Residual Stress and Subsequent Cooling after Ejection," *Trans. of the KSME, A*, Vol. 26, pp. 340~348.
- (11) Chiang, H. H., Hieber, C. A., and Wang, K. K., 1991, "A Unified Simulation of the Filling and Postfilling Stages in Injection Molding, Part I: Formulation," *Polym. Eng. Sci.* Vol. 31, pp. 116~124.
- (12) Tait, P. G., 1988, *Physics and Chemistry of the Voyage of H.M.S. Challenge*, Vol. II, Scientific Papers LXI: Vol. II, pp. 1.
- (13) Lu, X. and Khim, L. S., 2001, "A Statistical Experimental Study of the Injection Molding of Optical Lenses," *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 113, pp. 189~195.