

플라스틱 유동을 고려한 사출성형 충전공정 중 금형의 변형 해석[§]

정 준 태* · 이 봉 기**

* 전남대학교 기계공학부

Numerical Analysis of Mold Deformation Including Plastic Melt Flow During Injection Molding

Joon Tae Jung* and Bong-Keel Lee**

* School of Mechanical Engineering, Chonnam Nat'l Univ.

(Received February 21, 2014 ; Revised May 4, 2014 ; Accepted May 8, 2014)

Key Words: Injection Molding(사출성형), Numerical Analysis(수치해석), Mold Deformation(금형 변형), Polymer Melt(용융 고분자), Taguchi Method(다구치 방법)

초록: 본 연구에서는 사출성형 충전공정 중 금형의 변형을 예측하기 위하여 비뉴턴 유동, 열전달, 구조 해석이 함께 고려된 수치해석 연구를 수행하였다. 정밀 사출성형 금형을 설계/제작하기 위해서는 충전공정 중에 발생하는 금형의 변형을 정확하게 예측하는 것이 중요하다. 이와 같은 금형의 국부적인 변형은 다양한 요인에 의해 발생할 수 있으나, 용융된 고분자 수지의 유동에 의한 압력이 가장 큰 원인 중의 하나로 여겨지고 있다. 따라서, 본 연구에서는 2 차원 축대칭 형상의 단순 원형 디스크 제품의 금형을 모델링하고 이에 대한 수치해석을 수행하였다. 이를 바탕으로 금형 내부의 고분자 수지의 유동 특성과 금형 변형량, 온도 분포에 대한 분석을 수행하였다. 또한 다구치 방법을 기반으로 한 실험계획법을 도입하여 유동 속도, 금형 온도, 고분자 수지의 온도가 금형 변형에 미치는 영향을 파악하였다.

Abstract: In the present study, a numerical analysis of an injection molding process was conducted for predicting the mold deformation considering non-Newtonian flow, heat transfer, and structural behavior. The accurate prediction of mold deformation during the filling stage is important to successfully design and manufacture a precision injection mold. While the local mold deformation can be caused by various factors, a pressure induced by the polymer melt is considered to be one of the most significant ones. In this regard, the numerical simulation considering both the melt filling and the mold deformation was carried out. A mold core for a 2D axisymmetric center-gated disk was used for the demonstration of the present study. The flow behavior inside the mold cavity and temperature distribution were analyzed along with the core displacement. Also, a Taguchi method was employed to investigate the influence of the relevant parameters including flow velocity, mold core temperature, and melt temperature.

- 기호설명 -

T_{melt} : 고분자 수지 온도(°C)

T_{mold} : 금형 온도(°C)

U_{inlet} : 유동 속도(m/s)

η : 점도(Pa·s)

τ^* : 전단 전이 응력(Pa)

T^* : 유리 전이 온도(K)

ρ : 밀도(kg/m³)

u_{fluid} : 속도장(m/s)

u_{solid} : 변위장(m)

p : 압력(Pa)

I : 단위 대각행렬

σ : 응력 텐서

s : 응력(N/m²)

ϵ : 변위

§ 이 논문은 대한기계학회 2013년도 학술대회(2013. 12. 18.-20., 강원랜드) 발표논문임

† Corresponding Author, b.lee@chonnam.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

c	: 탄성 텐서
n	: 외향 단위 법선 벡터
c_p	: 열 용량(J/kg·K)
k	: 열 전도도(W/m·K)
$\dot{\gamma}$: 전단 변형률(1/s)
T	: 온도(K)

1. 서론

사출성형(injection molding)은 고분자 수지를 고온에서 용융시켜 금형 내부로 빠르게 주입하고 냉각하여 제품을 생산하는 공정이다. 일반적인 플라스틱 제품에서 마이크로 기어 같은 미세 기계 요소,⁽¹⁾ 광학 렌즈 같은 기능성 제품⁽²⁾까지 다양한 산업 분야에서 사출성형 공정이 이용되고 있으며, 이에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

성형품의 품질 향상을 위해서는 사출속도 및 압력, 고분자 수지 온도 및 금형 온도, 보압 압력 등의 주요 공정변수들에 대한 고찰이 필요하다.⁽³⁾ 이와 같은 공정변수 중 사출 속도 및 수지 온도, 금형 온도는 용융된 수지의 유동 특성과 금형 내부의 온도 분포 특성에 영향을 미치는 중요한 변수로 성형품의 치수 정밀도, 기계적 특성에 많은 영향을 미친다.

용융된 고분자 수지(polymer melt)는 빠른 속도로 금형 내부로 주입이 되고, 이때 발생하는 유동의 압력은 금형 벽면에 하중을 가하게 되며 따라서 금형 변형(mold deformation)을 발생시킬 수 있다.⁽⁴⁾ 또한 고온의 고분자 수지와 상대적으로 저온인 금형 코어(core) 사이의 열전달에 의해 금형의 급격한 온도 변화가 발생하며, 따라서 금형 내부에서 열응력 및 열변형이 발생하게 된다.⁽⁵⁾ 이러한 금형의 변형은 성형품의 치수 정밀도를 저하시키며 추가적인 공정이나 비용을 발생 시키기도 한다. 이와 같이 사출성형 공정 중 발생할 수 있는 문제점들은 컴퓨터 시뮬레이션을 적용한 해석을 통하여 예측 및 분석함으로써 효과적으로 해결이 가능하며, 또한 공정변수들의 영향들을 확인함으로써 성형공정의 최적 조건을 도출해낼 수 있다.^(6,7)

따라서 본 연구에서는 사출성형 충전공정 중의 고분자 수지 압력이 금형의 변형에 미치는 영향을 확인하기 위하여 고분자 수지의 유동, 금형 변형, 및 온도 분포에 대한 연계해석을 수행하였다. 이를 통하여 금형 내부에서의 고분자 수지의 유동 및 온도 특성과 금형의 변형 거동을 확인하였다.

또한, 다구치 방법(Taguchi method)을 이용하여 주요 공정변수들이 유동의 최대 압력과 금형 변형에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 수치해석

2.1 지배방정식

사출성형 공정 중 금형 내부로 주입된 고분자 수지는 높은 압력을 금형에 가하게 되고 따라서 금형의 변형이 발생하게 된다. 이와 같은 금형의 변형은 고분자 수지의 유동에 영향을 미치게 되며, 따라서 고분자 수지의 유동과 금형의 변형은 서로 연계되어 밀접한 관계를 가지게 된다. 즉, 사출성형 공정에서의 금형 변형의 정확한 예측을 위해서는 다음과 같은 유체-구조 연성 해석(FSI, Fluid-Structure Interaction)을 수행하여야 한다.

점성을 가진 유체의 유동은 나비에-스톡스 방정식(Navier-Stokes equation)으로 기술될 수 있으며, 고체 경계면에서 가해지는 힘은 유체가 가하는 힘의 반력으로 볼 수 있다. 유체-고체 경계면에서 Arbitrary Lagrangian-Eulerian(ALE) 방법을 도입하여 Eulerian description 에 의해 기술되는 유체 거동과 Lagrangian description 에 의해 기술되는 구조체의 거동을 결합시켰다. 정상 상태(steady state)의 유체 속도장과 고체 응력장은 다음과 같은 조건을 만족한다.

- 유체 유동(Fluid flow)

$$\rho(\mathbf{u}_{fluid} \cdot \nabla) \mathbf{u}_{fluid} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \eta(\nabla \mathbf{u}_{fluid} + (\nabla \mathbf{u}_{fluid})^T)] \quad (1)$$

$$\rho \nabla \cdot \nabla \mathbf{u}_{fluid} = 0 \quad (2)$$

- 고체 구조(Solid structure)

$$-\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = 0 \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = (s \cdot (\mathbf{I} + \nabla \mathbf{u}_{solid})), \quad s - s_0 = c : (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_0) \quad (4)$$

- 유체-고체 경계(Fluid-solid interface boundary)

$$\mathbf{u}_{fluid} = \frac{\partial \mathbf{u}_{solid}}{\partial t} \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} = [-p\mathbf{I} + \eta(\nabla \mathbf{u}_{fluid} + (\nabla \mathbf{u}_{fluid})^T)] \cdot \mathbf{n} \quad (6)$$

- 열전달(Heat transfer)

$$\text{In fluid: } \rho c_{p,fluid} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k_{fluid} \nabla T) + \eta \dot{\gamma}^2 \quad (7)$$

$$\text{In solid: } \rho c_{p,solid} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k_{solid} \nabla T) \quad (8)$$

본 연구에서는 고체 구조의 변형은 유체 유동의 압력에 의해서만 발생되며, 고체 영역의 온도 변화에 따른 열변형은 고려되지 않았다.

2.2 점도 모델

일반적인 고분자 수지는 점도(viscosity)가 전단

Table 1 Parameters of WLF-type Cross model for PMMA used in the present study

Parameter	Unit	Value
n	-	0.3973
τ^*	Pa	35607
A_1	-	31.081
\tilde{A}_2	K	51.6
D_1	Pa·s	$6.13 \cdot 10^{12}$
D_2	K	377.15
D_3	K / Pa	0

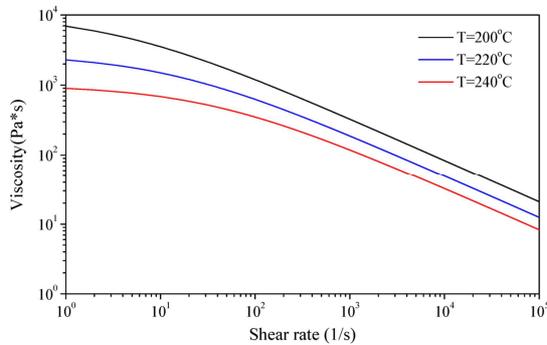


Fig. 1 Viscosity plot for PMMA(IF 850, LG MMA)

변형률(shear rate), 온도(T), 그리고 압력(p)에 따라 변하는 비뉴턴(non-Newtonian) 유체로 알려져 있다. 따라서, 본 연구에서는 용융된 고분자 수지의 점도를 정확히 나타내기 위하여 7 개의 상수(n , τ^* , A_1 , \tilde{A}_2 , D_1 , D_2 , D_3)를 가지는 WLF-type Cross 모델을 적용하였으며,⁽⁸⁾ 이와 같은 점도 모델은 다음과 같이 표현된다.

$$\eta(\dot{\gamma}, T, p) = \frac{\eta_0(T, p)}{1 + (\eta_0 \dot{\gamma} / \tau^*)^{1-n}} \quad (9)$$

$$\eta_0(T, p) = D_1 \exp\left[\frac{-A_1(T - T^*)}{A_2 + (T - T^*)}\right] \quad (10)$$

$$A_2 = \tilde{A}_2 + D_3 p \quad (11)$$

$$T^* = D_2 + D_3 p \quad (12)$$

여기서 n 은 점도모델 지수(power-law index), τ^* 는 전단 전이 응력(shear stress at transition), η_0 는 전단 변형률이 작을 경우 점도(zero shear rate viscosity), T^* 는 유리 전이 온도(glass transition temperature)이며, A_1 , \tilde{A}_2 , D_1 , D_2 , D_3 는 온도와

Table 2 Representative conditions and dimensions for the present numerical analysis

Melt temperature (°C)	220
External core temperature (°C)	60
r_{delivery} , r_{cavity} , r_{core} (mm)	2.5, 49.5, 75.0
t_{cavity} , t_{core} (mm)	1, 30
U_{inlet} (m/s)	0.4

Table 3 Material properties of mold (HP4MA)

Density, ρ (kg/m ³)	7800
Young's modulus, E (GPa)	205
Poisson's ratio, ν	0.2
Thermal conductivity, k (W/(m·°C))	50
Heat capacity, C_p (J/(kg·°C))	0.47

Table 4 Material properties of polymer (PMMA)

Density, ρ (kg/m ³)	1060.6
Viscosity, η (Pa·s)	WLF-type Cross model
Thermal conductivity, k (W/(m·°C))	0.123
Heat capacity, C_p (J/(kg·°C))	1711

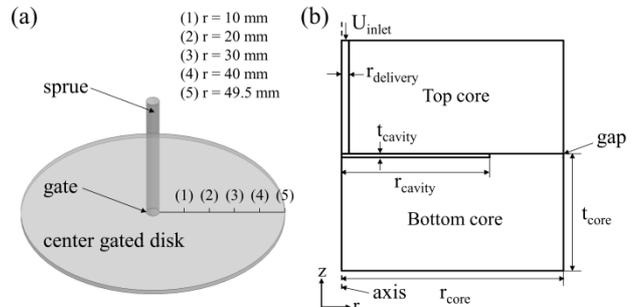


Fig. 2 Schematic diagram of (a) 3-D model of injection-molded part and (b) 2-D axisymmetric model for the numerical analysis.

압력에 관련된 상수(constant)이다.

본 연구에서 사용된 고분자 수지인 PMMA 의 경우, 압력으로 인한 점도 변화는 고려하지 않았으며 도입된 상수 값들과 전단 변형률에 따른 점도의 변화를 Table 1 과 Fig. 1 에 나타내었다.

2.3 수치해석 방법

본 연구에서는 Fig. 2(a)와 같은 단순한 원형 디스크 제품의 금형을 대상으로 수치해석을 수행하였다. Fig. 2(b)에 나타낸 것과 같이 해석모델은 디

스크 형상의 캐비티(cavity), 수지의 주입을 위한 스프루(sprue), 이송 시스템(delivery system), 그리고 금형 코어로 이루어져 있으며 2 차원의 축대칭(axisymmetric)으로 모델링 되었다. Table 2는 본 연구의 해석모델의 치수와 주요 공정조건을 보여준다. 금형 코어의 재료와 고분자 수지는 각각 HP4MA와 PMMA(LG MMA IF 850)를 사용하였으며, 두 재료의 주요 물성치는 Table 3과 4에 나타내었다.

본 수치해석은 충전공정 중 캐비티의 98% 충전으로 설정된 V/P 전환 시점(V/P switchover)을 정상 상태로 가정하여 수행되었으며, 캐비티의 충전 완료 시간이 1 초가 되는 유동 속도(U_{inlet})를 입구에서의 속도 경계조건으로 적용하였다.

본 연구의 사출성형 공정해석은 상용 해석 소프트웨어인 COMSOL Multiphysics 4.2(COMSOL, Inc.)를 기반으로 수행되었으며, 전체 해석 영역을 207,322 개의 4 절점 직사각형 요소(linear quadrilateral element)로 분할하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 유동 특성

본 연구에서는 수치해석을 통하여 먼저 사출성형 공정 중 고분자 수지의 유동 특성을 확인해 보았다. Fig. 3(a)와 같이 고분자 수지가 금형의 캐비티를 충전하면서 유동 길이가 증가함에 따라 압력은 감소하게 된다. 게이트 부근에서의 캐비티 압력이 62.4Mpa로 가장 높게 나타났으며, 이 지점에서의 금형 변형이 가장 심할 것으로 예상할 수 있다.

또한 두께 방향(z-direction)으로의 유동 특성을 확인하기 위하여 유동길이 방향(r-direction)으로 5개의 대표 지점을 설정(Fig. 2(a))하였으며, 각 지점에서의 두께 방향으로의 온도, 속도 및 점도의 분포를 Fig. 3(b), 3(c) 및 3(d)에 나타내었다. 낮은 온도의 금형 코어에 의하여 고분자 수지는 캐비티 벽면에서부터 냉각이 되며, 이와 같은 냉각에 의하여 유동 중심부의 온도가 점차 감소하고 있음을 알 수 있다. 또한 전단 변형률이 큰 게이트 부근에서는 점성 가열(viscous heating) 효과에 의한 온도 상승을 확인할 수 있다.

유동 속도의 경우, Fig. 3(c)에 나타낸 바와 같이 충전이 진행됨에 따라 그 크기가 감소되고 있으며, 속도가 0으로 나타나는 고화층(solidified layer)의 두께가 증가함을 알 수 있다. 이와 같은 고화층의 두께는 점도 분포(Fig. 3(d))를 이용하여서도 확인

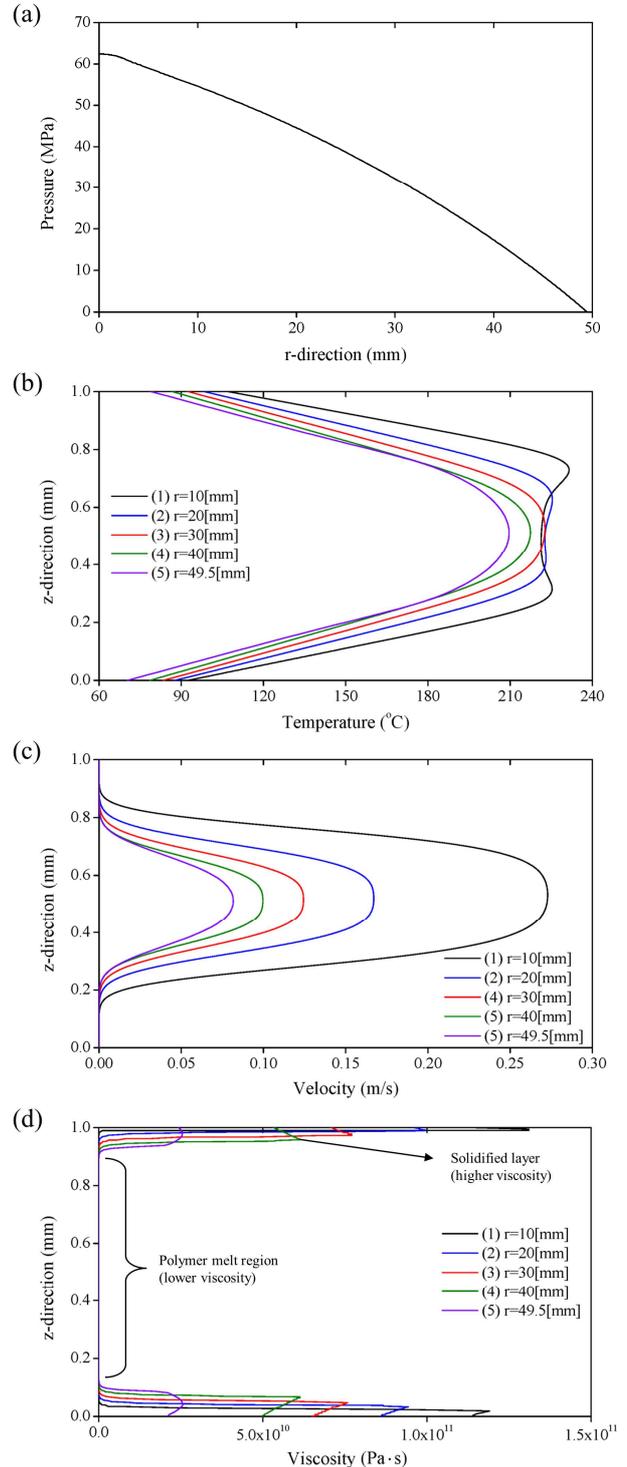


Fig. 3 (a) Pressure distribution in the cavity along the r-direction, (b) temperature, (c) velocity and (d) viscosity distributions in the z-direction.

할 수 있다. 상대적으로 낮은 온도의 금형 코어는 충전 중 접촉하는 고분자 수지를 냉각시키게 되고, 따라서 고분자 수지의 점도는 크게 증가하게 된다. 금형 캐비티의 벽면 근처에서는 캐비티의 중앙부에 비하여 점도가 큰 영역이 존재하게 되며, 이

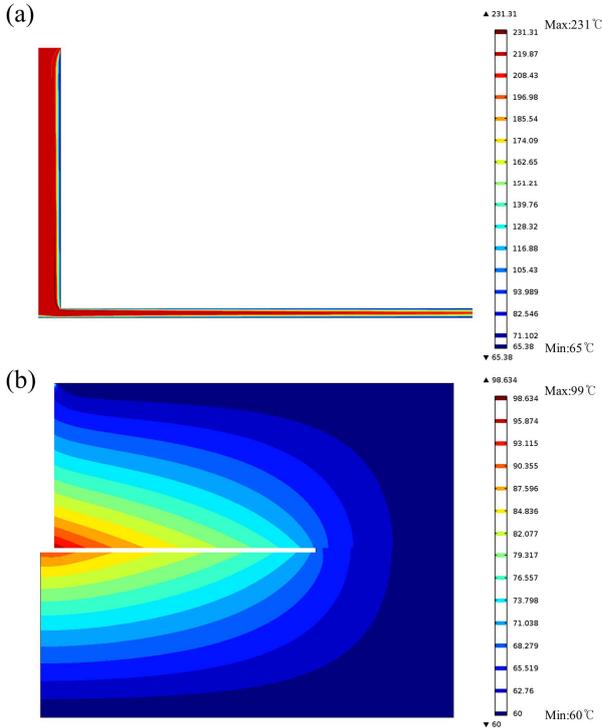


Fig. 4 Temperature distributions in the present study: (a) the filled polymer melt and (b) the mold core

영역의 크기는 충전 길이가 길어지면서 점점 커지게 된다. 이와 같은 점도의 증가로 인하여 고분자 수지의 유동성은 현저히 감소하게 되고 수지가 더 이상 흐르지 못하는 고화층을 형성하게 된다. 반면에 상대적으로 전단 변형률은 증가하게 되며, 결과적으로 벽면에서의 최대 점도 값은 감소하는 것으로 나타났다.

3.2 온도 분포

캐비티 내부를 채운 고분자 수지와 금형 코어의 온도 분포는 Fig. 4 와 같다. 높은 온도를 가지는 용융된 고분자 수지와 상대적으로 낮은 온도의 금형 코어 사이의 열전달이 발생하게 되고, 이에 따른 금형 코어의 온도 변화를 확인할 수 있다.

3.1 절에서와 같이 용융된 고분자 수지는 상대적으로 낮은 온도인 금형과 접촉하게 되면서 냉각이 일어나게 되고(Fig. 4(a)), 따라서 점도의 상승과 고화층의 두께 증가로 인한 고분자 수지의 충전이 지연되게 된다. 이와 같은 현상으로 인해 얇은 두께를 가지는 제품의 사출성형 공정에서 충전부족(short shot)이 발생하기도 한다.

Fig. 4(b)는 금형 코어의 온도 분포를 나타내고 있으며, 금형 코어는 높은 온도를 가지고 주입되는 고분자 수지에 의해 국부적으로 가열되게 된다. 금형 코어는 수지에 의해 최대 99°C 까지 온도가

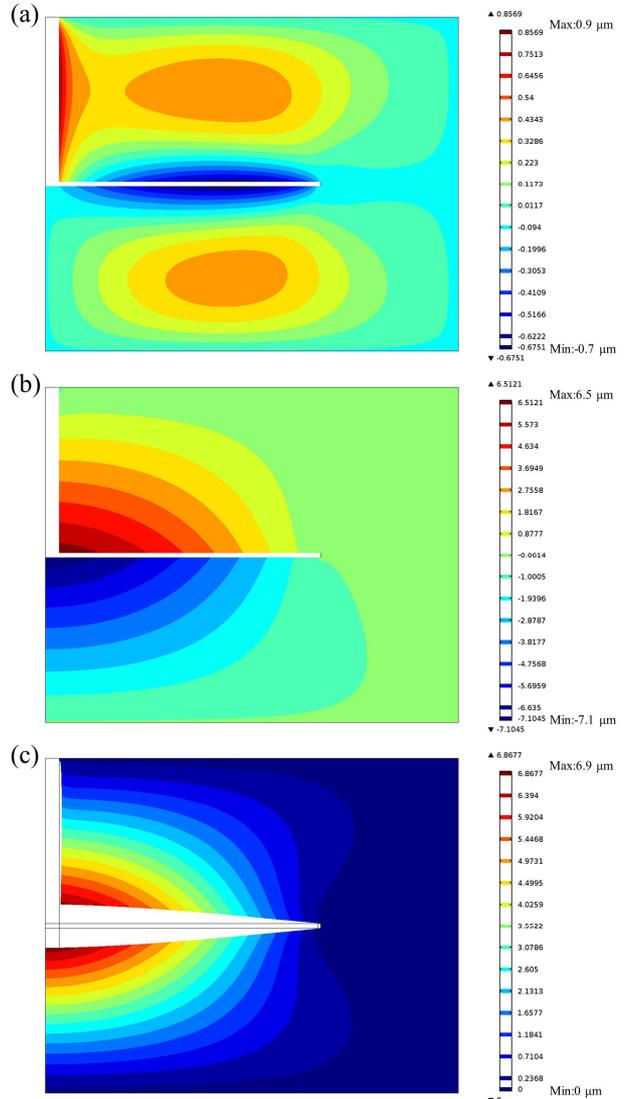


Fig. 5 Mold deformation predicted in the present study: (a) Displacement in the r-direction, (b) displacement in the z-direction and (c) total displacement (magnification: $\times 500$)

상승되며, 이로 인해 금형 코어 내부의 열응력 및 열변형이 발생할 수 있다. 금형의 온도는 충전공정 중에는 고분자 수지의 유동성 향상을 위해서 비교적 높은 온도가 유리하지만, 성형 후 제품의 이형(demolding)을 위해서는 적절한 냉각 온도가 요구된다.

이와 같은 금형 온도 분포에 대한 해석 결과는 향후 열응력 및 열변형의 예측에 활용될 것이다.

3.3 금형 변형

본 연구에서 수행된 수치해석에 의한 금형 코어의 변형(displacement)은 Fig. 5 와 같다. Fig. 5(a)와 (b)는 각각 유동길이 방향과 두께 방향으로의 금

Table 5 $L_9(3^4)$ orthogonal array for Taguchi DOE

Experiment number	Parameters			
	A	B	AB	C
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Table 6 Detailed levels for major processing parameters

Symbol	Parameter	Level		
		1	2	3
A	T_{melt} (°C)	210	220	230
B	T_{mold} (°C)	60	70	80
AB	-	-	-	-
C	U_{inlet} (m/s)	0.2	0.4	0.6

형의 변형을 나타내고 있으며, 유동길이 방향의 변형에 비하여 두께 방향으로의 변형이 더 큰 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5(c)는 두 방향의 변형을 함께 고려한 전체 변형을 나타내고 있으며, 게이트 부근에서 금형의 변형이 가장 크게 나타나며 캐비티의 끝부분으로 갈수록 점차 변형이 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 길이 방향으로의 유동의 압력 분포(Fig. 3(a))와 비슷한 경향이며, 따라서 고분자 수지의 압력이 금형의 변형에 큰 영향을 준다는 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서 적용한 공정조건의 경우, 금형의 최대 변형은 게이트 부근에서 약 $7\mu\text{m}$ 로 나타났다.

3.4 공정변수의 영향 분석

일반적으로 사출성형 공정에서는 낮은 압력으로 고분자 수지의 충전이 이루어 지는 것이 유리하다. 충전공정 중의 높은 압력은 형체력(clamping force)의 증가뿐만 아니라 본 연구에서 확인한 바와 같이 금형의 변형을 야기하게 된다. 이는 성형품의 정밀도 저하 및 생산 비용의 증가를 가져오게 되어 가능한 낮은 압력에서의 사출성형 기술의 개발을 위한 노력들이 진행되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 실험계획법의 하나인 다구치 방법을 이용하여 충전공정에서의 주요

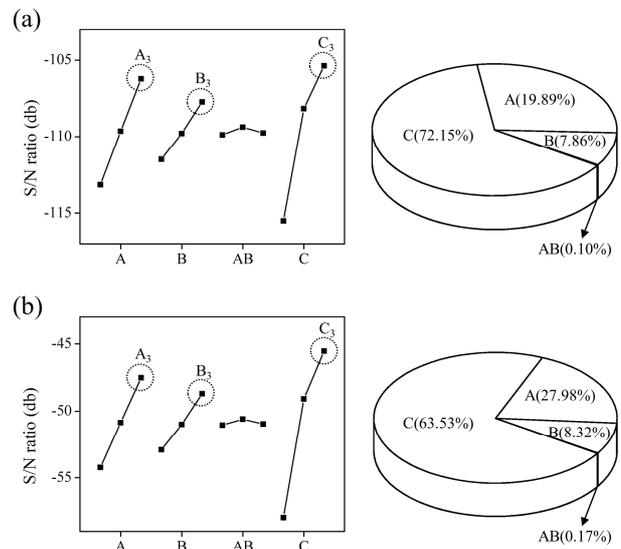


Fig. 6 Effects of major processing parameters on (a) the maximum injection pressure and (b) the maximum total displacement: S/N ratio and contribution chart

공정변수가 고분자 수지의 유동 압력 및 금형의 변형에 미치는 영향을 분석하였다. 여러 공정변수 중에서 고분자 수지의 온도, 금형 온도 그리고 입구에서의 유동 속도를 주요 변수들로 설정하였고, Table 5와 같은 직교배열표(orthogonal array)를 이용한 망소특성의 S/N비 분석을 통해 각 변수들의 영향력을 확인하였다. 네 변수에 대한 세 수준(level)의 적용이 가능한 $L_9(3^4)$ 직교배열표를 이용하였으며, 수지의 온도와 금형 온도의 교호작용(interaction)을 확인하기 위하여 Table 6과 같이 변수를 할당하고 각 변수에 대한 세 수준의 공정 조건을 설정하였다. A는 고분자 수지 온도(T_{melt}), B는 금형 온도(T_{mold}), 그리고 C는 입구에서의 유동 속도(U_{inlet})를 나타낸다.

Fig. 6은 직교배열표와 다구치 방법을 이용하여 구한 최대 압력과 최대 금형 변형에 대한 S/N비 분석 결과를 보여 준다. 본 연구에서 설정한 주요 공정변수의 범위에서는 세 공정변수 모두 그 크기가 증가할수록 최대 사출압력과 최대 금형 변형을 감소시키는 것으로 나타났다. 높은 수지의 온도와 높은 금형 온도는 고분자 수지의 점도를 낮게 유지시킴으로써 수지가 높은 유동성을 가질 수 있게 되어 이와 같은 결과를 보이게 된다. 또한 큰 유동속도의 경우, 짧은 충전 시간으로 인한 고분자 수지에서 금형으로의 열전달이 줄어들 뿐만 아니라, 유동의 속도 증가에 따른 압력 증가보다 점성가열의 효과가 더 크게

나타나게 된다. 이와 같은 복합적인 효과로 금형 내 고분자 수지는 높은 온도 및 낮은 점도를 가질 수 있으며, 이에 따라 사출압력의 감소 및 작은 금형의 변형이 나타남을 알 수 있다. 이와 같은 공정변수의 범위에서는 유동 압력과 금형 변형의 측면에서 가장 유리한 조합이 세 공정변수들이 모두 3 수준인 경우이며, 이때의 최대 유동 압력과 최대 금형 변형은 각각 47.57MPa 와 4.76 μ m 로 나타났다.

세 주요 공정변수들의 기여도 분석 결과는 수지의 유동 속도가 압력과 금형 변형에 가장 큰 영향을 주는 변수로 확인되었다. 하지만, 수지 온도와 금형 온도 사이에 교호작용은 거의 없는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 사출성형 충전공정에서의 고분자 수지의 유동, 수지와 금형의 온도 분포, 그리고 금형 변형에 대한 연계해석을 수행하였으며, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 유체-구조 연성해석 기법을 이용하여 사출성형 충전공정 중 고분자 수지의 유동과 금형의 변형을 동시에 고려하는 수치해석 모델을 성공적으로 수립하였다.

(2) 고분자 수지의 충전이 진행됨에 따라 유동 속도와 온도는 감소하는 반면, 점도가 증가하여 유동성이 급격히 감소하는 영역인 고화층의 두께가 두꺼워진다.

(3) 상대적으로 낮은 금형 온도는 수지의 충전을 지연시키며, 높은 온도의 용융된 수지에 의해 금형 코어의 국부 가열이 발생한다.

(4) 사출성형 충전공정에서 주요 공정변수들이 수지의 유동 압력과 금형 변형에 미치는 영향을 직교배열표 기반의 다구치 방법으로 분석하였으며, 입구에서의 유동 속도가 가장 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

본 연구는 사출성형 공정의 특성을 분석하는데 있어 유용한 방법이 될 수 있으며, 이를 바탕으로 향후 보다 복잡하고 실제적인 형상 해석에 적용할 예정이다.

후 기

이 논문은 2011 년도 전남대학교 학술연구비지원 및 2013 년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. NRF-2011-0014439)

참고문헌 (References)

- (1) Zhao, J., Mayes, R. H., Chen, G., Xie, H. and Chan, P. S., 2003, "Effects of Process Parameters on the Micro Molding Process," *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 43, No. 9, pp. 1542~1554.
- (2) Tsai, K. M., Hsieh, C. Y. and Lo, W. C., 2009, "A Study of the Effects of Process Parameter for Injection Molding on Surface Quality of Optical Lenses," *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 209, No. 7, pp 3469~3477.
- (3) Baek, S. B., Park, K., Youn, C. H. and Ra, S. W., 2010, "Study on Improvement of Dimensional Accuracy of a Precision Plastic Screw Under Various Injection-Molding Conditions," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 34, No. 10, pp. 1549~1554.
- (4) Giacomini, A. J., Hade, A. J., Mix, A. W., Chen, Y. C., Liao, H. C. and Tseng, S. C., 2011, "Core Deflection in Injection Molding," *J. Non-Newton. Fluid Mech.*, Vol. 166, No. 16, pp. 908~914.
- (5) Li, X., Zhao, G., Guan, Y. and Li, H., 2009, "Research on Thermal Stress, Deformation, and Fatigue Lifetime of the Rapid Heating Cycle Injection Mold," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 45, No. 3-4, pp. 261~275.
- (6) Lee, S. H., Min, B. H. and Kim, B. G., 2002, "Optimizing the Injection Molding Process for Cooling Filter Using Computer Simulation and Taguchi Methods," *IE Interfaces*, Vol. 15, No. 3, pp. 263~267.
- (7) Yu, L., Koh, C. G., Lee, L. J. and Koelling, K. W., 2002, "Experimental Investigation and Numerical Simulation of Injection Molding with Micro-Features," *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 42, No. 5, pp. 871~888.
- (8) 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, No. 2, pp. 116~124.