

컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 반용융 단조공정의 금형설계 및 충전현상의 실험적 검토

이동훈* · 강충길**

(2001년 2월 26 접수)

The Die Design for Semi-Solid Forging Process of Computer Simulation and Experimental Investigation of Filling Phenomenon

D. H. Lee and C. G. Kang

Abstract

Die design by computer simulation has some advantages compared with the conventional method which has performed by designer's experiences and trials and errors. The die filling and solidification process of thixoforming process were simulated by MAGMAsoft/thixo module. Furthermore, the die design for thixoforming was performed with the various geometry shape. The effect of designed gate dimension on filling phenomenon was estimated by filling simulation. The calculated results was compared with experimental data. The free surface phenomenon obtained by experiment have good agreement with computer simulation results. The solidification effect much as porosity and shrinkage for designed semi-solid forging die had been predicted by computer simulation. The designed die for semi-solid forging had been applied to produce of the frame part which is used to aircondition system.

Key Words : Filling Phenomenon, Die Design, Thixoforming, Solid Fraction.

1. 서 론

반용융 성형 공정은 액상선과 고상선 사이의 온도에서 성형을 하므로 일반적인 주조공정보다 응고시간이 짧으므로 인하여, 응고 수축결함의 발생을 현격히 줄일 수가 있다. 생산성의 측면에서도 고압주조공정과 유사하거나 그 이상의 효과를 낼 수 있는 효율적인 가공공정이다.⁽¹⁾

반용융 주조와 반용융단조와 같은 성형 공정은 기존의 전통적인 주·단조를 대체하는 공정으로 급속도로 발전하고 있다. 알루미늄과 같은 경량 소재를 주로 이용하는 반용융 주·단조 공정들은 고강도의 복잡한 부품에 이용되어지는 자동차 산업을 중심으로 연구개발이 진행중이다. 이러한 새로운 공정은 기존의 성형 공정과는 달리 광범위하고도 경험적인 데이터베이스의 지원이 효과적이

* 부산대학교 기계공학부
** 부산대학교 대학원

지 못하므로 컴퓨터 시뮬레이션의 역할이 주축을 이루고 있다.⁽²⁾

전산 해석을 이용한 반응용 성형 공정의 금형 설계에 관한 연구는 최근에 기존의 고압주조공정에서 이용되어진 알고리즘을 수정하여 사용한 연구사례가 보고되어지고 있다. Backer⁽³⁾는 다이캐스팅의 충전과 응고에 이용되어지는 알고리즘에 점성항을 추가한 반응용 성형 공정의 소프트웨어를 소개하였다. Tims⁽⁴⁾ 등은 상용 코드를 이용하여 반응용 재료의 금속학적 충전 거동을 시뮬레이션을 이용하여 구현하였다. Lipinski⁽⁵⁾ 등은 고상물과 점성을 고려한 알고리즘을 소개하여 3차원 충전 해석을 수행하였다.

현재까지 유동 및 응고해석결과를 이용하여 반응용단조의 금형설계에 응용한 사례는 발견되지 않고 있다. 따라서, 본 연구에서는 전용 상용 코드인 MAGMA S/W를 이용하여 가전용 콤프레사 부품을 제조하기 위하여 전산 해석에 의한 충전 및 응고 해석을 수행하여 금형 설계에 적용을 하였다. 또한 반응용 단조 프레스를 이용하여 충전 실험(filling test)을 수행하여 시뮬레이션 결과와 비교검토하였다.

2. 반응용 성형 공정의 금형설계

반응용 성형 공정은 구상화 조직을 가진 원 소재의 제조, 소재의 재가열, 재가열된 소재의 이송, 주형 내의 충전 및 응고 등의 공정에 의하여 성형이 이루어진다. 공정의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.

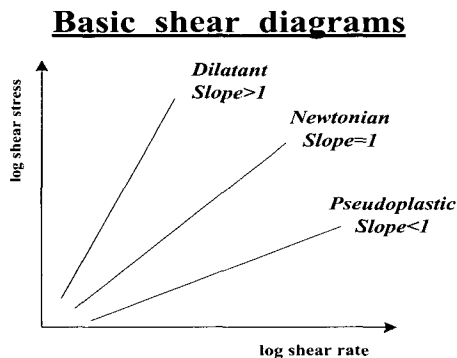


Fig. 1 Basic shear diagram for dilatant, Newtonian and pseudoplastic fluids

고체와 액체가 공존하는 영역에서는 고체의 형태가 원형이고 고상물은 30~70%에 이르며, 합금의 점성이 큰 폭으로 변화한다. 소재가 정적인 상태에서는 점도가 아주 크기 때문에 마치 고체처럼 다루어 질 수 있

으며, 전단에 의하여 점도가 급격히 변화하기 때문에 충전이 잘 이루어질 수 있는 점성 유체로 볼 수 있다. 이와 같은 반응용 상태의 성질을 디스트로픽이라 부른다.⁽⁶⁾ 이와 같은 유동특성을 이용하여 성형을 하는데 필요한 금형 설계의 방법을 제안하고자 한다.

2.1 유동모델

반응용 소재의 유동 모델을 세우기 위해서는 전단변형률 속도가 증가함에 따라 급격히 점도가 감소한다. Non-Newtonian 소재의 유동은 기본적인 전단 선도로서 설명할 수 있는데 Fig. 1에 전단변형률 속도의 증가에 따른 점도의 감소를 나타내는 준소성의 전단변형률 선도를 나타내었다. Fig. 1의 전단 변형률 속도만 가지고는 디스트로픽 유동을 정확하게 이해하기는 힘들므로 Fig. 2에 레오로지 유동 모델은 점도가 낮은 뉴턴영역과 점도가 높은 뉴턴영역, 그리고 지수법칙의 적용이 가능한 점도가 변화하는 영역의 3가지 영역으로 나누어서 전단변형률 속도와 점도와의 관계를 나타낸다.

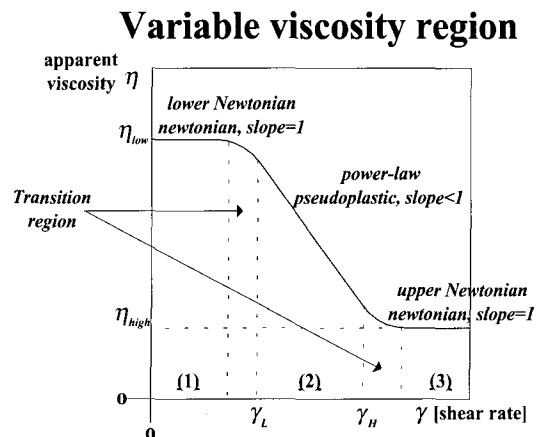


Fig. 2 The relationship between apparent viscosity and shear rate

주형 내의 소재의 충전 해석에 이용되어지고 있는 방법으로는 SOLA-VOF(solution algorithm-volume of fluid)방법과 1965년 미국의 Los Alamos 과학연구소에서 자유표면을 지닌 2차원 비압축성 유체를 해석하기 위하여 개발한 MAC(marker and cell)방법과 이를 개량한 SMAC(simplified marker and cell)방법이 충전 해석에 널리 이용되어지고 있다. 이와 같은 방법들은 해석 대상이 3차원 형상일 경우에는 직육면체의 작은 사각형으로 검사체적이 나누어지므로 계산영역이 계단식의 지그재그 모양이기 때문에 체적이 어느 정도 큰 검사체적에 대해

서는 주형 내의 유동 양상을 예측하는데는 큰 문제가 없으나, 주입구가 좁은 부분이나 경사부, 모서리부 등에서는 정확한 충전 양상을 예측하기가 힘이 들 수도 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서 요소를 세분화 할 경우에는 가능하나 연산시간이 증가된다.

본 연구에 이용된 상용 코드인 MAGMASoft는 다양한 단계의 알고리즘의 물리학적 구현이 용이하며, 물리적 성질의 보전, 전형적인 FDM, FEM 보다 정확한 수렴성, 연산시간의 감소 등의 특징을 지니고 있다. 검사체적 연산 방법인 CVFDM(control volume finite difference method)방법을 이용한 MAGMASoft의 기본 지배방정식은 액상인 용융 가공의 경우와 동일한 연속방정식, Navier-sokes 방정식, 에너지 방정식, VOF(volume of fluid)법 등이다.

반응용 성형 공정에 이용되어지고 있는 소재의 유동 모델은 Ostwald-de Waele 모델과 Carreau-Yasuda 모델이 있다. Carreau-Yasuda와 Ostwald-de Waele의 유동 모델은 다음의 식과 같다.⁽⁷⁾

$$\eta = \rho \left\{ \nu_{\infty} + (\nu_0 - \nu_{\infty}) \cdot [1 + (\lambda \cdot \dot{\gamma})^a]^{\frac{n-1}{a}} \right\} \quad (1)$$

ν_0 : low shear rate viscosity (m²/s)

ν_{∞} : high shear rate viscosity (m²/s)

λ : Fig.2에 나타난 천이 구간에서의 시간 상수 (s)

a : Yasuda coefficient

n : exponent

$$\tau_{xy} = -m \left| \frac{dv_x}{dy} \right|^{n-1} \frac{dv_x}{dy} \quad (2)$$

$$\eta = \rho \cdot m \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (3)$$

$$\tau = -\rho \cdot m \cdot \dot{\gamma}^n$$

ρ : density (kg/m³)

η : apparent dynamic viscosity (Pa · s)

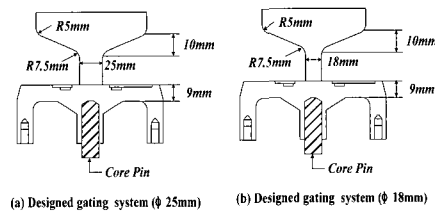
m : Ostwald-de Waele coefficient (m²/s)

$\dot{\gamma}$: shear rate (1/s)

n : Ostwald-de Waele exponent

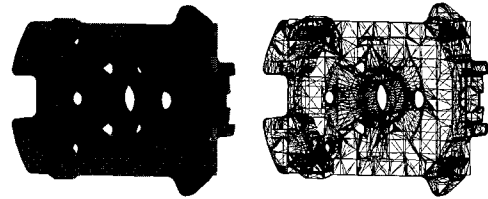
τ : shear stress (Pa)

식(2)에 나타나 있는 변수들은 일반적으로 power law 라는 식으로 알려지고 있다. 여기서 Ostwald-de Waele 지수가 1이면 $m = \mu$ 가 되는 Newtonian 유동 모델식이 된다. Kim⁽⁸⁾ 등은 유동모델을 뉴턴과 Ostwald-de Waele의 두 가지를 이용하여 MAGMASoft를 이용하여 주형 내의 충전 및 응고 해석을 수행하여 실험 결과와 비교하였을 때 Ostwald-de Waele 유동모델이 반응용 성형 공정의 해석에 더 적합하다는 결론을 얻었다. 따라서 본 연구에 이용한 유동 모델식은 Ostwald-de Waele 유동 모델식을 이용하여 전산 해석을 수행하였다.



(a) Designed gating system (φ 25mm)

(b) Designed gating system (φ 18mm)



(c) 3D solid model used for CATIA

(d) STL file used for geometry transfer

Fig. 3 The geometry modelling of designed gating system for Al frame

2.2 형상 모델링 및 해석조건의 입력

반응용 성형 공정으로 성형이 가능한 제품은 에어컨디션, 브레이크, 연료분사장치 현가부품류 및 프레임류 등의 부품으로서 그 응용 범위는 한정적이다. 본 연구에서는 구조 전용 상용 코드인 MAGMASoft를 이용하여 가전용 콤프레사 부품인 프레임의 반응용 성형 공정의 충전 및 응고 해석을 수행하여 금형 설계에 적용하였다. Fig. 3는 반응용 성형에 의하여 제품을 제조하기 위한 금형 설계의 개략도로서 주입 구의 직경을 변수로 하여 해석을 수행하였다. 또한 CATIA 상에서 3차원으로 구현한 것과 파일 변환을 위한 STL파일을 함께 나타내었다.

소재는 구조용 알루미늄 합금인 A356을 이용하여 해석을 수행하였으며, 해석에 이용된 A356_thixo 소재의 열전달계수, 밀도, 비열 및 점성등 온도의 함수로 표시된 MAGMAS에서 제공한 물성치를 사용하였다.⁽⁸⁾

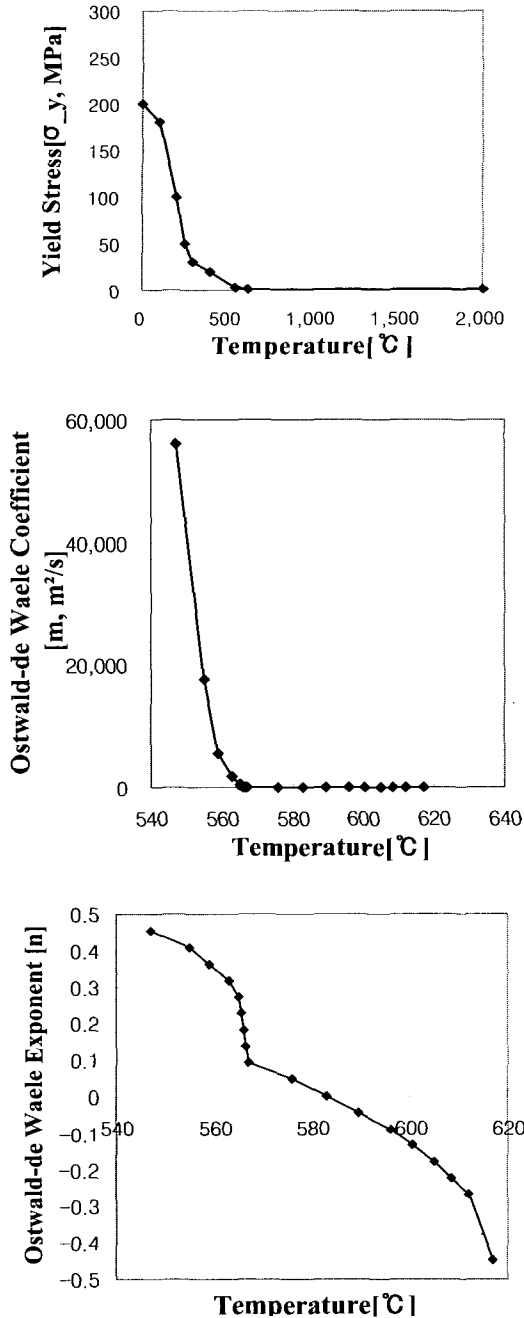


Fig. 4 Thermal material property[II] for alloy A356

Fig. 4는 해석에 이용되어지는 레오르지 재료의 σ , m , n 을 온도의 함수로 나타낸 것이다.⁽⁹⁾

각각의 모델링 된 부위에 대한 체적과 질량은 Table 1과 같다.

Table 1 Volume and mass of each modelled part

Material	Properties	
	Volume(l)	Volume(Kg)
Cast alloy	0.08917	0.238
Permanmt Mold(1)	3.39782	26.589
Permanmt Mold(2)	0.01785	0.140
Inlet	0.01637	0.044
Gating(runner)	0.04963	0.132
Ingate	0.01067	0.028

사용 소재는 A356이며 금형 온도는 250°C, 소재의 초기온도는 고상률이 50%인 583°C, 펀치의 속도를 200mm/s로 설정하였으며, 금형과 금형, 주형과 금형 사이의 열전달 계수는 각각 500, 1000W/m²K로 하였다. 가압 유지 시간은 반응용 단조 프레스의 사양과 동일하게 38Ton을 19초 동안 유지하는 것으로 설정하였으며, 자동요소 분할에 의하여 생성된 총 요소 수는 740,784개이고 주물에 해당하는 metal cell의 수는 58,260개이다.

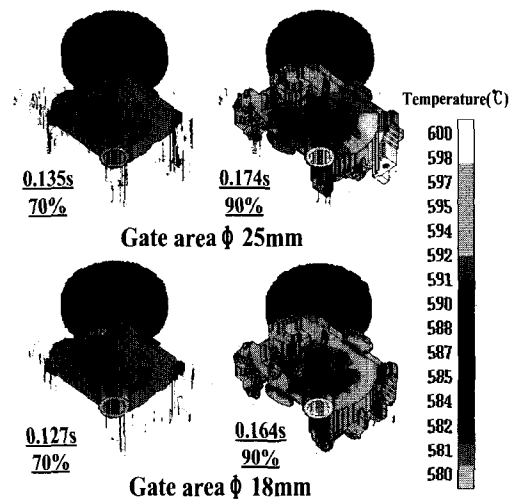


Fig. 5 The temperature distribution at 70, 90% filled state with 25mm,18mm gate area

주입구의 직경 ϕ 가 25mm, 18mm일 때의 두 가지 경우를 적용하여 충전해석을 수행한 결과를 Fig. 5~Fig. 6에 나타나 있다. 주형 내의 온도분포는 590°C 전후로 나타났으며, 압력의 분포는 1000mbar에서 3000mbar까지 광범위하게 분포하였지만 주입구의 직경이 작은 경우(18mm)가 좁은 압력 범위 내에서 균일한 압력 분포를 나타냈다. Fig. 5~Fig. 6에서 알 수 있듯이 주입구의 직경이 25mm와 18mm인 경우 충전양상은 유사하게 나타났고 70%

와 90% 충전되었을 경우의 온도 분포도 거의 유사하다. 주입구가 작은 18mm쪽이 연속의 범칙에 의하여 속도가 더 큰 값을 가지므로 25mm에 비하여 충전시간은 다소 작은 값을 가지므로 충전 양상도 좀 더 안정적으로 나타났다. 충전 중 압력분포를 나타낸 Fig. 6으로부터 알수있는 바와같이 충전 완료 후의 분포압력은 직경이 작은 쪽이 균일하면서 더 큰 값을 가짐을 알 수 있었다. 직경이 18mm인 경우가 충전 완료 후 주형내 압력이 높으므로 25mm에 비하여 좋은것으로 판단되었다.

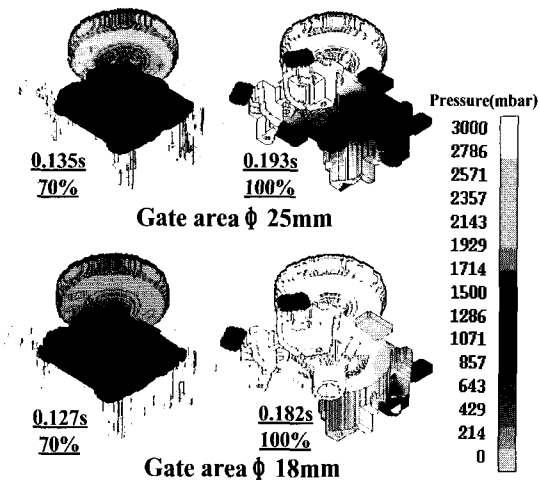
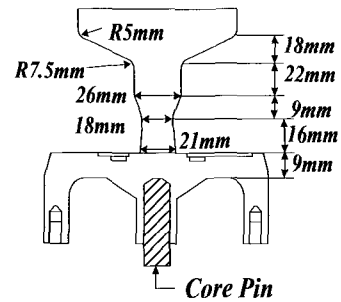


Fig. 6 The pressure distribution at 70, 100% filled state with 25mm

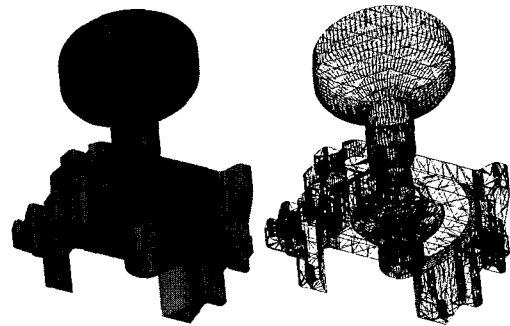
실제 전산 해석의 결과를 금형 설계에 적용하기 위하여 반응용 단조 실험에 사용된 형상은 현재중력주조로 제조하여 사용하고 있는 모양과 동일하게 하도록 수정을 하였다. 수정된 형상의 개략도와 CATIA를 이용하여 생성한 3차원 모델 파일, 형상인식을 위한 STL 파일을 Fig. 7에 나타내었다. 금형 구조상 성형 후 제품을 취출할때 슬리브 부가 파단되어 제품과 금형에 변형이 발생할 가능성이 있으므로 Fig. 7에 나타난 형상과 같이 슬리브부를 수정하여서 성형을 한 후 취출할 때 금형이나 제품에 변형을 최소화하기 위하여 금형을 수정하였다.

수정된 형상은 기존의 방안에 비하여 슬리브의 체적이 증대하였으며 캐비티의 형상도 주물과 동일한 형상으로 변경되었다. 변경된 형상에 대한 각 부의 체적과 질량을 Table 2에 나타내었다. 해석 조건으로서는 실제 성형 실험과 동일하게 적용하였다. 주입 속도에 대한 고려는 반응용 성형 시 사출 속도인 370mm/sec에 대해서 단위 초당 주입량을 계산하여 1,678.5cm³/s로 하였다. 금형의 온도는 예열을 고려하여 250℃, 소재의 초기온도는

577℃(fs=55%)로 실제 성형 시에는 재가열된 빌렛의 이송 도중 온도 손실 등이 발생하나 전산 해석상에서 정량적인 온도 손실을 입력하기 곤란하므로 빌렛의 온도는 일정하다고 하였다.



(a) Designed gating system (φ 25mm)



(b) 3D solid model used for CATIA

(c) STL file used for geometry transfer

Fig. 7 The geometry modelling of modified gating system for Al_frame

Table 2 Volume and mass of each modelled part (modified model)

Material	Properties	
	Volume(l)	Volume(Kg)
Cast alloy	0.10771	0.287
Permanrnt Mold(1)	3.36836	26.359
Permanrnt Mold(2)	0.01005	0.079
Inlet	0.04441	0.118
Gating(runner)	0.05879	0.157
Ingate	0.00166	0.004

Midson⁽¹⁰⁾ 등은 실험을 통하여 반응용 성형에 적합한 성형 조건으로서 게이트 통과 속도는 5m/s 이상이고 빌렛의 초기온도는 573℃ 이상이 적합하다고 제안하였다. 이에 근거하여 초기 형상과 수정된 형상에 대하여 각각의 게이트 통과 속도를 계산해 보았다. Table 1와 2의 초기 형상과 수정된 형상의 질량에서 금형을 제외한 나머지 부분의 체적은 각각 0.149 ℓ와 0.168 ℓ로서 149cm³와 168cm³에 해당한다.

$$V_f = \frac{W_f}{\gamma} \quad (4)$$

$$A_g = \frac{V_f}{t_f \cdot V_g} \quad (5)$$

- V_f : 게비티의 체적 (cm³)
- W_f : 게비티의 중량 (g)
- γ : 알루미늄 소재의 중량 (g/cm³, Al=2.6)
- A_g : 게이트단면적 (cm²)
- t_f : 충전시간 (s)
- V_g : 게이트 속도 (cm/s)

초기방안 형상으로 계산되어진 결과에서 주입구 직경이 25mm와 18mm일 경우의 충전 완료시간은 각각 0.193s와 0.182s이다. 이에 근거하여 수정된 형상의 충전 완료시간은 사출 속도가 370mm/s로 증가하였으므로 약 0.14s 정도가 될 것으로 예상하여 게이트 통과 속도를 각각 계산하였다. 계산 결과를 Table 3에 나타내었다.

Table 3 Gate velocity of two kinds of designed gating systems

Gate Area(diameter of gate)	V_g (Gate Velocity)
Initial Gating Shape 1, 25mm	1.57 m/s
Initial Gating Shape 2, 18mm	3.21 m/s
Modified Gating Shape, 21mm	7.25 m/s

Table 3에서 알 수 있듯이 Fig. 7과 같은 형상일 경우의 게이트 통과 속도가 7.25m/s로서 가장 반응용 성형에 적합하다고 사료된다.

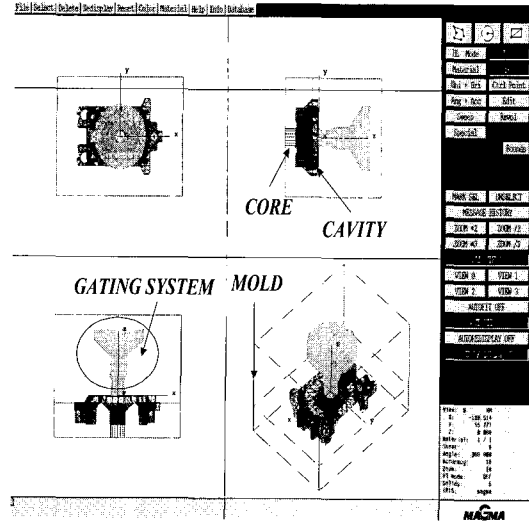


Fig. 8 The generation of material group used for MAGMA pre-processor

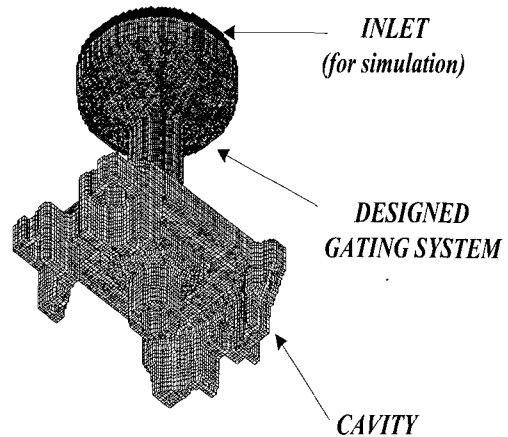


Fig. 9 Mesh of the casting and designed gating system in the die

2.3 해석결과 및 고찰

설계된 형상을 이용하여 금형 내의 충전 및 응고 현상을 살펴보았다. Fig. 8과 Fig. 9에 전처리기와 자동요소분할 후의 형상을 나타내었다. MAGMAsoft의 전 처리기에서 형상인식을 위한 STL 파일로부터 게비티, 게이팅, 입구 등의 해석상의 재료 그룹을 지정하였고 자체 모델 기능을 이용하여 간단한 형상인 금형 등을 생성하였다.

직교 좌표 분할에 의하여 생성된 직사각형 요소의 수는 591,668개이고, 주물의 게비티에 해당하는 셀의 수는 63,751개이다. 전산해석에 이용된 워크스테이션의 사양은 Indigo2의 R10000 CPU, 512M 메모리의 비교적 우수한

워크스테이션을 이용하여 전산해석을 수행하였음에도 불구하고 MAGMathixo 모듈을 이용하였을 경우 연산시간은 약 10일 정도가 소요되었다. 해석에 이용되어진 입력요소들을 Table 4에 나타내었다.

Table 4 Property values of A356 used to thixofforming simulation

Parameters	Symbol	Unit	Values
Solidus temp.	T_{sol}	°C	547
Liquidus temp.	T_{liq}	"	617
Latent heat	q	kJ/kg	430.5
Punch speed	V_{punch}	mm/s	370
Initial billet temp.	T_{billet}	°C	577
Initial die temp.	T_{die}	"	250
Pressurize parameter		Ton	38(19sec)
Boundary condition (heat transfer coefficient)	K	W/m ² K	500 (mold&mold) 1,000 (cast&mold)
Mesh→control volumes		EA	591,668
→metal cells		"	63,751

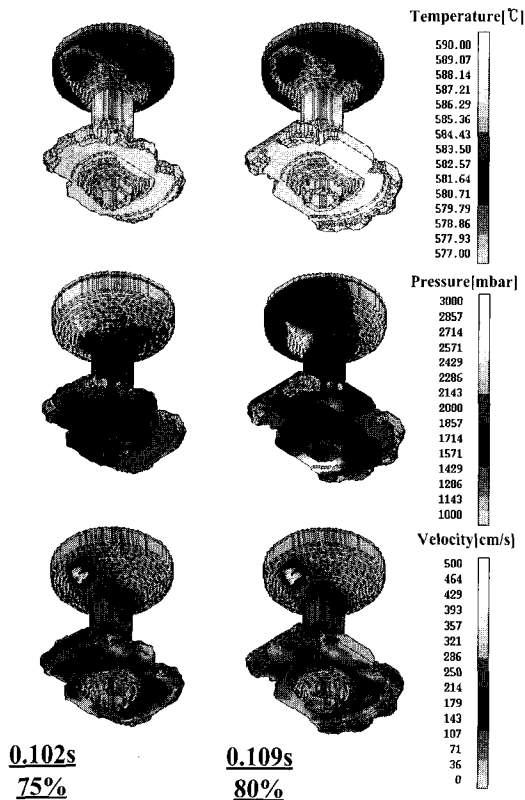


Fig. 10 The temperature, pressure and velocity distribution at 75, 80% filled state with designed gating system

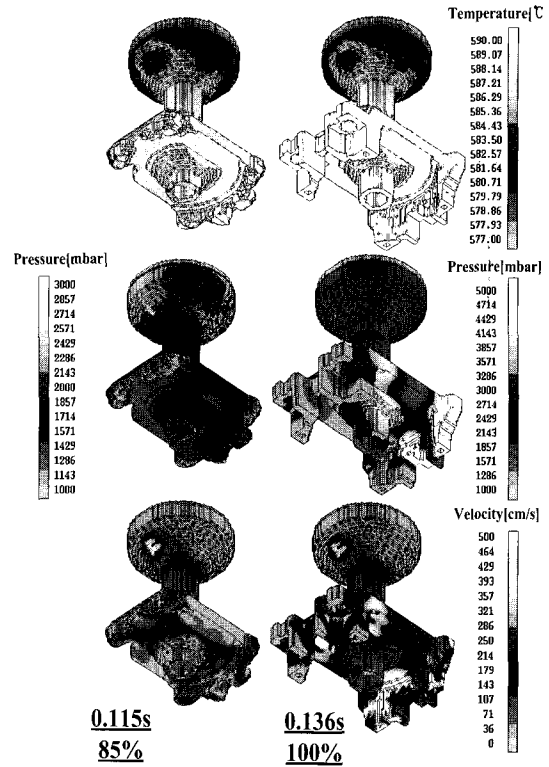


Fig. 11 The temperature, pressure and velocity distribution at 85, 100% filled state with designed gating system

대나⁽¹¹⁾은 금형 표면에 알루미늄 용탕이 흐를 때 대류 열 전달 계수를 1,260W/m²K로 제한하였으나, 본 해석에서는 반응용 빌렛과 금형과의 열 전달 계수를 1,000W/m²K로 하였고, 상형과 하형 및 코어와의 열 전달 계수는 500W/m²K로 하여 해석을 수행하였다. 유동 모델로는 Ostwald-de Waele 유동 모델을 이용하였으며 충전 완료 후의 가압유지 시간은 19초 동안 38Ton(약 82MPa)의 하중을 가하는 것으로 설정하여 해석을 수행하였다.

Fig. 10~Fig. 11에 75%, 80%, 85%, 100% 충전 시의 온도, 압력 및 속도의 분포를 나타내었다. 충전 해석 결과에서 알 수 있듯이 용탕의 경우와 같은 충전 중의 캐비티 내의 난류로 인한 공기의 포집 등의 충전 결함이 거의 발생하지 않는 반응용 유동 특성을 잘 나타내는 순차적으로 충전이 이루어지고 있다. 주입구 통과 후에 상승된 온도가 더 이상 증가하지 않으면서 80%에 해당하는 0.109초까지 충전이 진행되었으나, 아래쪽으로 충전이 진행되기 시작하면서 기하학적 형상의 구속으로 인하여 자유표면에서 온도 상승이 일어나기 시작하였다. 충전 완료 후 590°C(고상률 45%)에 이르는 높은 온도 상승은 캐비티 내의 형상의 원인뿐만 아니라 충전 완료 후의 가

압의 효과에 의한 상승 요인이 더 클 것으로 사료된다. 빌렛의 초기 온도보다 10~13℃에 이르는 온도 상승 결과의 원인은 속도의 구배에 의한 역학적 에너지의 열 에너지로의 변환이며 온도의 상승량은 반응용 상태의 점도와 속도 구배량에 의존한다고 설명할 수 있다. 압력은 80% 충전 시 충전이 완료된 측면 부위에서 상당한 압력을 받는 것으로 나타났다. 충전 완료 시에는 가압의 효과에 의하여 충전 진행 중의 압력에 비하여 거의 2배에 해당하는 5,000mbar까지 나타났으며 자유표면의 압력은 충전 진행 중에는 1,500mbar 전후로 비교적 균일한 분포를 나타내었다. 균일한 압력의 분포로 인하여 급형 수명의 측면에서 양호할 것으로 예상된다. 속도의 분포도 압력의 분포와 마찬가지로 충전 중에는 전체적으로 균일한 값을 나타내었으나 충전 완료후의 불안정한 속도 구배는 압력 분포의 원인과 동일한 것으로 판단되었다.

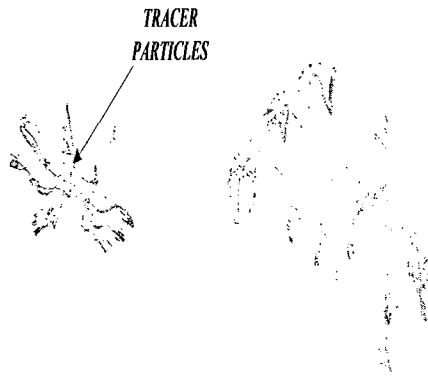


Fig. 12 Sequences of mold filling tracted by tracer particles

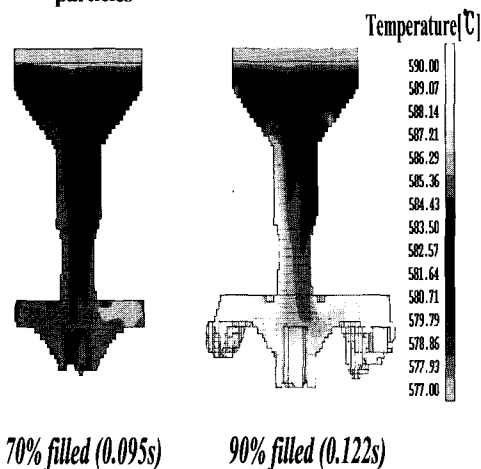


Fig. 13 The temperature distribution at 70%, 90% filled state(section view)

Fig. 12은 MAGMASoft에서 자체적으로 제공하는 충전가시화 기능을 이용한 충전 해석으로서 thixotropic 유동 패턴을 잘 나타내고 있다. Fig. 13은 70%와 90% 충전 시 단면의 온도분포로서 충전 중의 제품 내부의 온도 분포를 나타내며, 단면을 기준으로 좌우에서 약간의 온도구배의 차이를 나타내고 있다. 온도구배에 차이가 발생하는 원인으로서는 요소 생성 시 직교좌표로 분할하므로 인하여 유한요소법과 같이 완벽한 형상의 인식이 불가능하기에 발생한 것으로 사료된다. 이와 같은 현상을 방지하기 위하여 아주 작은 요소로 분할할 경우에는 연산시간의 엄청난 증가로 인하여 실제의 적용에는 문제가 있을 것으로 판단되므로 연산시간과 형상 인식의 정확도를 고려하여 요소 분할 정도의 취사선택이 필요함을 알 수 있었다.

3. 충전실험

CAE 기법의 타당성을 검증하기 위하여 반응용 단조 프레스를 이용하여 충전 실험을 수행하였다.

반응용 주·단조의 성형 공정을 위해서는 빌렛을 반응용 상태로 가열하여야 한다. 반응용 성형 공정 중 소재의 재가열 공정은 소재를 반응용 상태로 가열하는 것이 목적이지만 유도가열 공정 중에 소재의 미세 조직을 제어할 수 있기 때문에 소재의 재가열 공정은 중요하다.^[12] 유도가열을 이용하여 빌렛을 가열할 경우에는 일반적인 전기로에 의한 가열보다 가열시간이 작으므로 인하여, 산화막 등을 줄여 급형 수명을 향상시킬 수 있는 장점이 있다. 유도가열은 단위 표면 깊이 내부에서 일어나므로 빌렛의 내부로부터 전도에 의하여 열 전달이 일어나 가열되므로 알루미늄 합금과 같은 비철 금속의 경우 비교적 열전도도가 크기 때문에 유도가열의 적용에 큰 문제는 없다. 유도가열의 가장 큰 특징으로는 합금 소재를 가열 주기와 정확도가 비교적 높은 시간 간격 범위 내에서 원하는 온도분포를 반복적으로 얻을 수 있는 재현성에 있다고 할 수 있다. 이와 같은 반복성과 재현성은 생산 측면에서는 자동화가 용이하게된다.

빌렛의 초기온도에 의해 결정되어지는 초기 고상률이 반응용 가공 공정의 성패를 좌우하는 만큼 온도의 제어가 비교적 용이한 유도가열 방법이 반응용 성형 공정에 있어서는 필수적이다. 본 실험에 이용한 재가열의 조건은 3단 재가열 조건으로서 각각의 다른 온도에서 3번의 상승과 유지구간을 설정하였다.^{[13][14]} 충전 실험에 이용한 소재는 프랑스 페시니에서 전자기식 교반에 의해 제조되어진 A.357 소재를 이용하였다. 입력온도와 실제 출력온

도의 차이를 고려하여 최종 온도를 583℃로 설정하여 재가열 실험을 하였다.

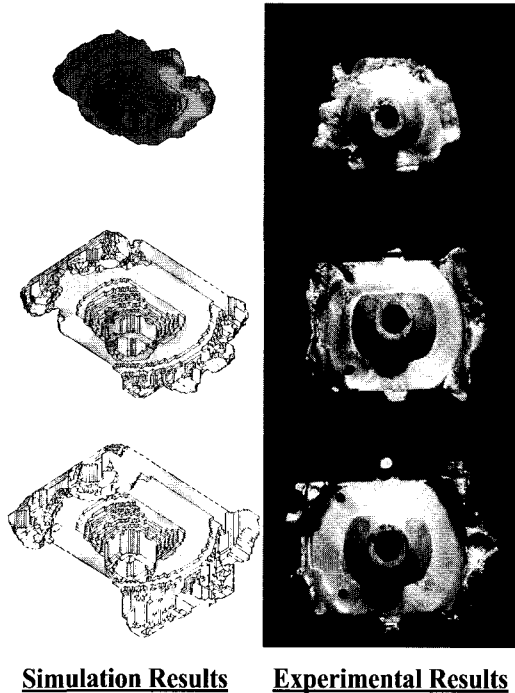


Fig. 14 The comparison of computational analysis and experimental result by filling test

충전 실험은 해석상에 입력한 조건과 동일하게 설정하여 실험을 수행하였다. 리미트 스위치의 위치를 바꾸어가면서 프레스의 메인 실린더의 스트로크를 순차적으로 증가시켜 나가면서 충전 실험을 수행하였다. Fig. 14은 전산 해석의 결과와 충전 실험의 결과를 각각 비교한 것이다. 70%, 80%와 92% 충전 결과와 충전 실험에 의한 결과를 비교해 보면 케비티선단부를 제외하고는 해석결과와 실험결과가 잘 일치함을 알 수 있었다. Fig.14은 A357을 이용 사출속도 370mm/s, 소재온도 583℃, 금형온도 250℃의 조건으로 filling test의 결과를 나타낸 것이다. Fig.14의 92% filling까지는 비교적 균일한 충전 양상을 보이고 있다. 그러나 충전을 92%부터 충전 양상이 변하고 있다. 케비티 선단 부 등에서의 약간의 차이가 발생하는 원인은 이론해석상의 충전율과 실험상의 충전율에 있어서 실험오차로 인한 차이 때문인 것으로 사료된다.

본 연구의 결과로 반응용 성형 공정에 있어서의 전산 해석에 의한 유동 및 응고 해석의 결과를 실제 금형 설계에 적용함으로써 신제품 개발에 소요되는 제품개발 시

간을 단축할 수 있을 것으로 사료된다. 또한, 반응용 소재는 온도에 아주 민감한 재료이므로 성형 공정 중 소재의 온도를 측정하여 온도에 대한 민감도를 파악하는 새로운 연구가 필요하다고 생각된다.

4. 결 론

전산해석을 이용한 반응용 성형 공정의 금형 설계에 관한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 전산 해석을 통하여 반응용 성형 공정의 유동 상태를 쉽게 파악 할 수 있는 전산 해석의 기법을 확립하였으며, 해석결과를 금형설계에 응용하여 게이트크리를 결정하였다.

(2) 펀치 속도 및 금형의 예열 온도보다는 주입구의 형상이 반응용 소재의 유동 패턴에 가장 큰 영향을 주며, 게이트 통과 속도 및 금형과 제품의 변형을 고려한 금형 설계 방안을 제안하였다.

(3) 반응용 단조공정의 충전실험을 수행하여 비교한 결과 전산해석결과 자유면이 금형캐비티내에 유입되는 형상이 이론해석 결과와 유사함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터(ERC/NSDM)를 통한 한국과학재단(KOSEF)우수연구센터 지원금과 (주)LG전선 위탁금에 의한 연구의 일부분입니다.

참 고 문 헌

- (1) Malachi P. Kenney, James A. Courtois, et al. 1988, "Semisolid metal casting and forging", Metal Handbooks, ninth ed. vol 15. [casting], p. 331
- (2) E.Flender, D.M.Lipinski and E.Hepp., 1998, "New Developments for Processes Modeling of Thixotropic Forming Processes", Advances in Aluminum Casting Technology (Conference Proceedings from Materials Solutions'98), pp. 33~38.
- (3) Gerald P.Backer.,1998,"Computer-Aided Engineering Software for Semi-Solid Metal Manufacturing", JOM, p. 21
- (4) ML Tims, J Xu, G Nickodemus and FR Dax., 1996, "Computer based numerical analysis of semi-solid metalworking", The 4th Int' l Conf. on

- Semi-solid Processing of Alloys and Composites, pp. 120~125.
- (5) D.M. Lipinski and E. Flender.,1998, "Numerical Simulation of Fluid Flow and Heat Transfer Phenomena for Semi-Solid Processing of Complex Castings", 5th Int' l Conf. on Semi-solid Processing of Alloys and Composites, pp. 273~280.
- (6) Laxmanan V and Flemings MC., 1980, "Deformation of Semi-Solid Sn-15%Pb alloy", Met. Trans, Vol,11a, pp. 1927~1937
- (7) R.Byron Bird, Warren E. Stewart, and Edwin N. Lightfoot, 1960, "Transport Phenomena", John Wiley & Sons, Inc.
- (8) C.G.Kang, Y.C.Lee.,1999, "Effect of Viscosity Variation on Flow Characteristic in Thixoforming Process of Semi-Solid Aluminium Alloys", Transactions of Materials Processing Vol.8, No.2, pp. 188~199.
- (9) MAGMA Gißereitechnologie GmbH., 1997, "MAGMASOFT User's Tutorial Manual".
- (10) S.P.Midson, L.E.Thormhill and K.P.Young., 1998, "Influence of Key Process Parameters on the Quality of Semi-Solid Metal Cast Aluminum Components", 5th Int' l Conf. on Semi-solid Processing of Alloys and Composites, pp. 181~188.
- (11) 大中逸雄, コンピュータ傳熱・凝固解析入門, 丸善株式會社, 1985, pp. 167~208.
- (12) C.G.Kang, H.K.Jung.,1999, "An Induction Heating Process with Coil Deisign and Solutions Avoiding Coarsening Phenomena of Al-6 Pct Si-3 Pct Cu-0.3 Pct Mg Alloy for Thixoforming", Transactions of Materials Processing Vol.30A, No11, pp. 2967~2977.
- (13) C.G.Kang, H.K.Jung, The Induction Heating Process of Semi-Solid Aluminum Alloys for Thixoforming and their Microstructure evaluation, Journal of Materials Processing Technology, 2000, in Press.
- (14) C.G.Kang, H.K.Jung, Y.H.Moon, Induction Heating of Semi-Solid Billet and control of Globular Microstructure to Prevent Coarsening Phenomena, Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 9, No.1, 2000, pp. 12~23.