

반용융 성형공정의 응용 및 문제점

강 충 길

부산대학교 기계공학부

Applications of Semi-Solid Forming and its Problems

Chung-Gil Kang

School of Mechanical Engineering, Pusan National University

Key Words: Semi-solid Forging(반용융단조), Semi-solid die casting(반용융다이캐스팅), Compression test(압축실험), Die design(금형설계), Microstructure control(조직제어)

Abstract

The production of light metal parts using aluminum is mainly performed by die casting and squeeze casting, which directly fabricate the required shape from the liquid state. However, die casting is subject to defects such as shrinkage porosity and air trapped when molten metal enters the cavity, whilst squeeze casting also has defects due to turbulent flow in the die cavity. Both diecasting and squeeze casting have inhomogeneous mechanical property in terms of dendritic structure during solidification. Active research has been carried out on semi-solid processing, rather than on conventional process methods such as die casting, which involve various problems. Therefore in this paper, to introduce the fundamental technology for die design, in die casting and forging process with semi-solid materials, relationship between stress and strain of semi-solid materials, and for producing parts die design has been proposed as parameters of globulization of the microstructure and gate shape. The prevention of various defects to produce sound parts are also introduced.

1. 서론

반용융가공은 기존의 성형방법보다 많은장점을 가지고 있기 때문에 Flemings에 의하여 제안되어질 이후 많은 연구가 이루어졌다. 국내 몇몇 대학에서도 연구를 진행하고 있으며, 96년 11월에는 금속학회와 소성가공학회가 공동으로 제 1회 심포지엄을 개최하였으며[7], 대한금속학회에서는 반용융가공기술에 관한 특집호를 출판하였다[8]. 다이캐스팅은 제품 내부에 편석, 기공 등의 결함을 가지고 있어 고강도를 요구하는 곳의 자동차 부품에는 적합하지 않다. 단조공정에 의한 부품가공은 대용량의 프레스가 필요하며 금형의 피로현상 때문에 수명을 단축시킨다. 또한 형상이 복잡한 부품에 대해서는 많은 성형공정이 필요하므로 생산원가가 높은 단점이 있다. 냉간단조의 경우에는 금형의 마모, 응력집중 등이 국부적으로 생기기 쉽고 금형에 탄성변형이 생겨 정밀한 제품을 생산하기가 어렵다. 반용융 단조 및 다이캐스팅 공정은 기존의 성형공정에 비해 공정단축과 적은 하중으로도 기능을 가진 복잡한 형상의 부품을 제조할 수 있다. 반용융성형은 액상과 고상이 공존하기 때문에 순수액상보다 응고시간이 짧아

수축결함을 줄일 수 있으며, 또한 액체상태보다 점성이 높기 때문에 충전시 유동형태가 난류로 발달하지 않아 소재를 균일하게 충전시킬 수 있어 가스 결함이 적어지는 등 여러 가지 장점을 가지고 있다. 반응용재료의 압연실험[9]등을 통하여 제품의 결함 및 기계적성질등을 파악하였다. 반응용재료를 가지고 정밀정형 제품을 제조하기 위해서는 재료내부의 고상율분포 및 사출속도의 변화에 따른 재료의 유동양상 등을 예측하여 결함을 방지할 수 있는 최적의 조건을 선정하는 것이 가장 중요하다. 임의 형상의 성형공정에서 결함이 없고 기계적 성질이 우수한 부품을 제조하기 위해서는 성형공정에 있어서 반응용재료의 변형거동이 파악되어야 한다. 반응용재료를 이용한 수치해석적인 방법, 소재생산, 세계적인 동향, 기계적 성질조사 및 재가열에 관한 연구 등은 대한금속학회지에 자세히 소개되고있다[8]. 본 내용에서는 다이캐스팅과 단조공정에서 수치해석의 응용기법과 그 문제점을 소개하고자 한다. 따라서, 본원고에서는 반응용 단조 및 다이캐스팅 성형공정에 있어서 저자가 지금까지 연구한 내용을 중심으로 금형설계에 필요한 요소기술, 반응용재료의 응력-변형률사이의 관계식 및 반응용다이캐스팅 공정에 이용되는 금형 설계 등을 소개하고, 반응용성형공정(단조, 다이캐스팅)에 있어서 제품의 결함종류 및 그 방지책에 대하여 언급하고자 한다.

2. 압축실험

단조공정의 기초실험으로서 소재의 압축거동이 중요하다. 왜냐하면 유한요소해석 결과의 검증, 구상화조직의 변형거동 등을 쉽게 파악할 수 있기 때문이다.

반응용가공의 특징은 기존의 단조공정에 비해 변형저항이 아주 작아 난가공재의 성형이 용이하나, Fig. 1에서 보여주는 바와같이 기존재료의 거동과는 완전히 다른 특성을 가지고 있다. Fig. 2에서 보여 주는 바와 같이 수치해석 결과와 압축실험결과와는 많은 차이가 있었다 [10]. 위의 원인은 압축이 이루어지면서 반응용재료의 구상화정도, 조직의 치밀화와 액상의 유동에 의한 하중의 감소 등이 해석에 고려되지 않았기 때문이다.

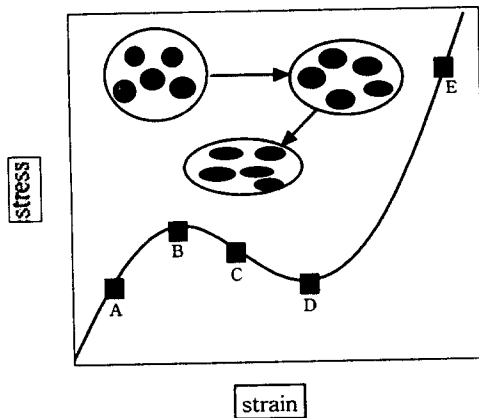


Fig.1 Behaviour of Semi-solid material in compression test process

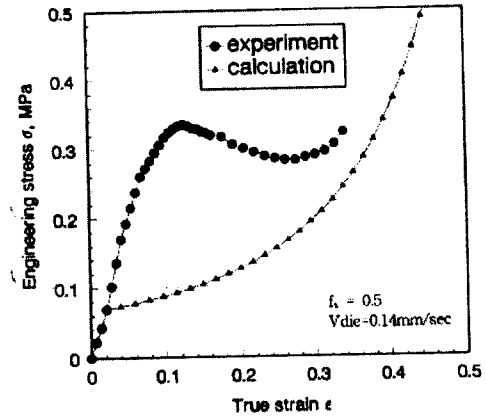


Fig.2 Engineering stress-true strain curve about the experimental results and calculated results

해석을 위하여는 Fig. 1과 같은 현상을 수식으로 표현하는 재료의 유동응력식이 규명되어야 금형 설계에 응용할 수 있다. 거시적 조직현상을 고려한 반응용재료의 응력과 변형률 사

이의 관계식을 유도하기 위하여 압축실험에 의한 재료의 거동 관찰이 필요하다. 본 실험에서 사용되어진 반응용재료는 프랑스 Pechiney에서 전자기식 교반에 의해 제조되어진 A356재료이다. 반응용재료의 압축실험은 MTS에 진기로를 부착하여 압축시편을 $\phi 15 \times h20(\text{mm})$ 으로 가공하여 원하는 고상율의 온도까지 상승시켜 압축실험을 행하였다. Fig. 3은 고상율 $f_s=50\%$ 일 때, 변형율속도의 변화에 따른 공칭응력과 진변형율과의 곡선을 나타낸 것이다. 변형율속도 $\dot{\epsilon}=5 \times 10 \text{sec}^{-1}$ 이하 일 때 초기에는 응력이 증가하다가 응력이 감소하는 현상을 나타내었다. 초기에는 조직의 치밀화 및 액상의 유동을 유발시키기 위하여 하중이 증가하지만 변형율이 어느 정도 되면서부터는 액상의 유동이 일어나기 시작하여 자유표면쪽으로 이동하기 시작한다. 액상의 유동때문에 시편표면부분의 균열발생 및 분리현상으로 인하여 하중이 감소하다가 재료의 조직이 어느 정도 치밀화되면서부터는 고상영역에서 소성변형이 되기 때문에 하중이 증가된다. 고온에서 반응용재료의 압축실험은 액상영역의 유동에 의하여 액상이 시편표면쪽으로 유출되어 시편의 표면이 압축중간에 떨어져 나가는 현상이 발생되어 지는 것이 관찰되었다. 고상율 $f_s = 50\%$ 인 경우 압축실험결과를 이용하여 유동응력식 $\sigma = K \dot{\epsilon}^m$ 의 K와 m의 계수를 알기 위하여 응력-변형율속도의 관계를 대수좌표계 ($\log \dot{\epsilon} - \log \sigma$)의 관계를 이용하여 선형회귀로써 구한 K와 m값은 다음과 같다[11].

$$\sigma = K \dot{\epsilon}^m: K=1.0015, m=0.3157 (\dot{\epsilon} \leq 5 \text{ sec}^{-1}), K=0.2976, m=0.702 (\dot{\epsilon} > 5 \text{ sec}^{-1})$$

압축실험에서 구한 k, m값은 $f_s=50\%$ 인 경우 (다이캐스팅과 단조공정의 경계영역) 금형설계시 이용할 수 있으며, 고상율과 구상화의 크기에 따른 광범위한 D/B가 구축되어야 할 것으로 사료된다.

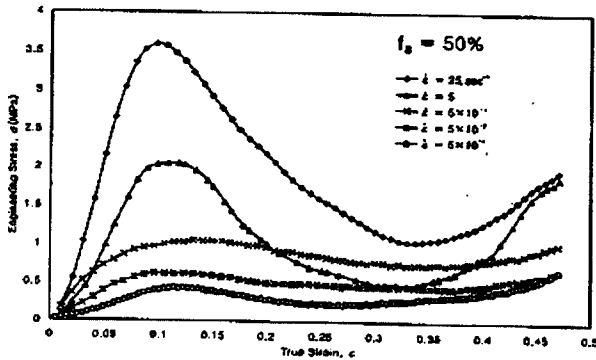


Fig.3 Engineering stress-true strain curve at $f_s=50\%$

$$(\dot{\epsilon} = 5 \times 10^{-3} \text{sec}^{-1} \sim 25 \text{sec}^{-1})$$

Fig. 4(a),(b)(c)는 Fig.1의 위치 [A]~[E]에 대응한 지점에서 압축변위에 따른 시편의 조직 사진을 나타낸 것이다. Fig. 4(a)는 변위가 각각 1, 2mm일 때 압축시편에 대한 단면의 조직사진이다. 고상입자의 변형으로 인하여 조직의 치밀화가 보이며 액상이 유동한 흔적은 나타나지 않았다. 가장 바깥부분인 ©에서도 액상이 빠져나간 기공이 거의 관찰되지 않았다. Fig. 4(b)는 변위가 각각 5, 8mm일 때의 조직사진이다. Fig. 4(a)와는 달리 액상의 유동이 일어나 바깥부분 Fig. 4(a)의 ©에서는 액상이 빠져나간 기공이 나타났다. 따라서 이 구간에서 하중이 감소하는 이유는 임계변형율 $\epsilon_{cr}=0.1$ 까지는 액상의 유동이 일어나지 않으나, 임계변형율을

넘어서면서부터는 액상의 유동이 시작되어 응력이 감소함을 알 수 있다. Fig. 4(b)의 $\delta=8\text{mm}$ 일 때의 조직사진은 액상영역들이 유출되어 고상입자들만이 밀착되어있으며 특히 액상이 빠져나간 기공들이 현저히 관찰되었다.

압축이 진행될 때 액상의 유출로 인하여 균열된 부위들이 시편으로부터 분리되기 때문이다. 따라서 반응용재료의 압축가공을 유한요소법으로 해석하기 위해서는 Fig. 4(a)~(c)에서 보여주는 바와 같이 액상의 유출을 고려한 응력과 변형을 사이의 관계를 정립하여야 한다. 반응용재료의 유동응력식은 고상율, 변형율, 변형율속도, 온도의 영향을 받기 때문에 이들 인자들의 함수로 나타내어야 한다.

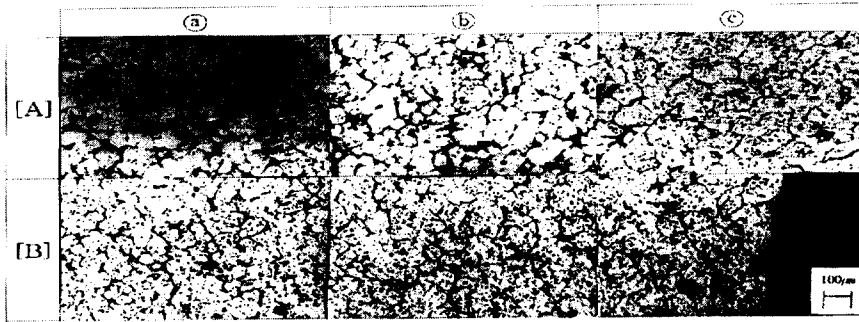


Fig.4(a) Globular microstructure was deformed by compression process within strain 0.1

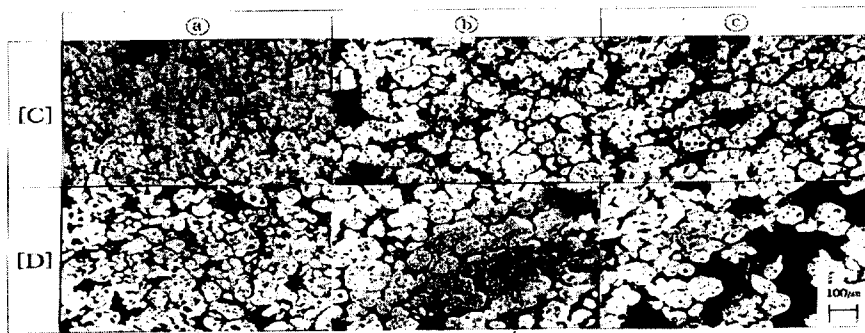


Fig.4(b) Globular microstructure in the region of semi-liquid state

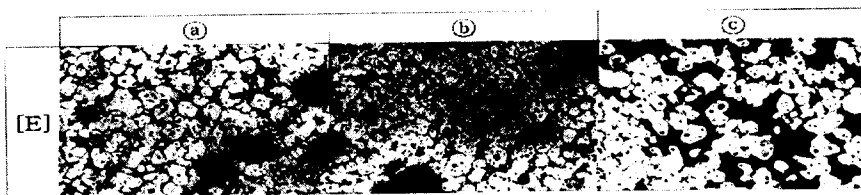


Fig.4(c) Globular microstructure in the maximum deformation region with SSM

일반재료는 변형율의 증가에 따라서 응력이 증가하나 반응용재료의 경우는 Fig.3에서 보여

주는 바와 같이 2개의 변곡점이 관찰되었다. 따라서 실제로 성형작업을 할 때는 이러한 변곡점이 나타나지 않도록 속도를 제어하여야 할 것이다.

CAE 기법을 확립하기 위해서는 응력과 변형율사이의 관계식이 정립되어야 하며 구상화의 형상을 고려한 반응용재료의 구성방정식을 다음과 같이 제안하였다[12].

$$\bar{\sigma} = K \dot{\epsilon}^m \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) [1 - \beta f_L]^{2/3} \quad (1)$$

식(1)은 압축성형시 구상조직의 변형거동을 고려하지 못하였기 때문에 수치해석에 적용할 수가 없다. 금형설계에 적용할 수 없다. 압축성형시 구상화의 변형거동을 고려하여 해석을 수행하기 위하여 고상입자들의 배열형상을 고려하여 응력과 변형율사이의 관계를 제시하여야 한다. 반응용재료를 압축성형할 때에는 고상입자와 액상영역간의 변형이 심하게 일어나게되어 구상화의 조직이 변형되어진다. 이러한 현상을 고려하기 위하여 분리계수 S를 제안하여 사용하면 Fig. 3의 응력-변형율의 관계를 표현 할 수 있다[11]. 유동응력식은 분리계수 S를 도입하여 임계변형율의 구간에 따라서 응력과 변형율의 관계식을 다음과 같이 수정한 식을 이용하여 성형공정해석을 수행하면 조업중 고상율과 변형거동을 보다 더 정확히 예측할 수 있다.

$$(i) \quad 0 < \epsilon < \bar{\epsilon}_{cr}, \quad \epsilon > \bar{\epsilon}_{crl}$$

$$\bar{\sigma} = K \exp(S) \dot{\epsilon}^m \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) [1 - \beta f_L]^{2/3} \quad (2)$$

$$(ii) \quad \bar{\epsilon}_{cr} < \epsilon < \bar{\epsilon}_{crl}$$

$$\bar{\sigma} = K \exp(1-S) \dot{\epsilon}^m \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) [1 - \beta f_L]^{2/3} \quad (3)$$

$$S_o = \frac{S^{squ}}{S_i} \quad \text{or} \quad S_o = \frac{S^{hex}}{S_i} \quad (0 \leq S_o \leq 1) \quad (4)$$

$$S = S_o + (1 - S_o) \frac{\bar{\epsilon}}{\bar{\epsilon}_{cr}} \quad (5)$$

Fig. 3에서 보여주는 바와 같이 반응용재료의 압축실험을 통하여 응력-변형율곡선에서 변형율이 거의 $\dot{\epsilon}$ 에 무관하면서 일정하게 나타나지는 2군데의 변곡점을 찾아낼 수가 있었다. 압축실험에서 응력이 갑자기 증가하다가 감소하는 $\bar{\epsilon}_{cr} \approx 0.1$ 과 응력이 감소하다가 다시 증가하는 $\bar{\epsilon}_{crl} \approx 0.35$ 를 각각 임계변형율로 정의할 수 있다. 유동응력식은 분리계수 S를 도입하여 임계변형율의 구간에 따라서 응력과 변형율의 관계식을 다음과 같이 수정한 식을 이용하여 단조공정해석을 수행하면 조업중 고상율과 변형거동을 보다 더 정확히 예측할 수 있다.

구간 $\epsilon > \bar{\epsilon}_{crl}$ 에서는 거의 고상입자들이 응집이 되었다고 가정하였기 때문에 $S=0$ 으로 두었다. 여기서 $\bar{\epsilon}_{cr}$ 와 $\bar{\epsilon}_{crl}$ 은 Fig. 3에서, 변형율속도의 증분에 관계없이 각각 0.1, 0.35임을 알 수 있었으며, K와 m은 고온압축실험에서 구한 $\sigma = K \dot{\epsilon}^m$ 의 값을 이용하였다. 향후 정확한 반응용재료의 변형거동을 예측하기 위해서는 고상율의 변화에 따른 점성의 변화를 고려한 연구를 해야 할 것으로 생각하고, 초기변형특성, 구상화의 크기 및 점성등을 고려한 반응용재료의 항복조건식의 도출이 필요하다.

Fig.5은 다이속도 $V=0.1\text{mm/sec}$ 일 때 압축실험 결과와 응력-변형율의 관계식을 이용하여 유한요소 해석을 수행한 결과를 비교한 것이다[13]. 반응용재료에 적합한 유동응력식을 사용하였기 때문에 실험치와 이론치가 거의 일치함을 알 수 있다.

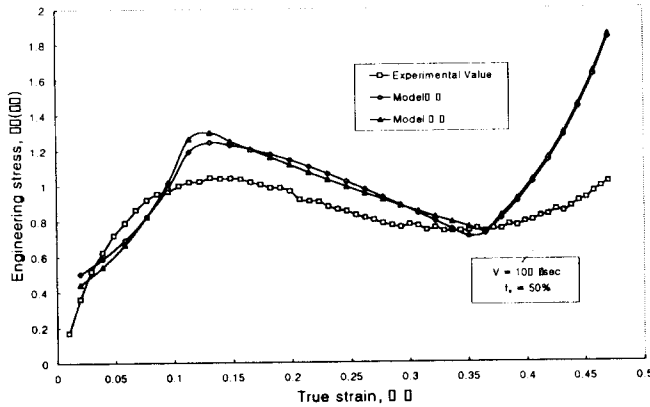


Fig.5 Engineering stress-true strain curve about the experimental results and numerical results, $V_{die} = 10\text{mm/sec}$

반용융재료에 대한 항복조건이 정립이 되어있지 않아 다공질재료의 항복조건과 Darcy's Law를 이용하여 해석하였지만, 실제 실험결과와는 많은 차이가 있어 반용융재료의 구상화정도를 나타내는 분리계수를 이용한 유동응력식을 이용하면 공정설계에 도움이 될것으로 기대한다.

3.이론 해석

3.1 반용융재료의 고상영역에 관한 소성이론

상대밀도가 100%인 재료에 대해서는 Von Mises나 Tresca의 항복조건을 사용하여 재료의 구성방정식을 세우는데, 이러한 재료들은 소성변형중에 부피의 변화를 동반하지 않는 비압축성재료로써 재료의 항복함수는 정수압응력의 영향을 받지 않는다. 반용융상태의 재료는 고상입자들 사이의 공간을 충전하고 있는 2상(Two phase) 매개물로써 소성변형시 액상의 압력에 의한 정수압응력의 영향을 받으며 부피의 변화를 동반한다. 따라서 반용융재료의 항복조건에는 정수압응력의 영향이 포함되어야한다.

반용융재료의 고상입자와 액상사이의 소성변형에 대한 정확한 항복함수는 지금까지 알려지지 않았기 때문에 고상에 대해서는 다공질개념을, 액상에 대해서는 Darcy이론을 적용하였다. 고상에 대해서는 다공질재료의 항복함수를 사용하였는데, Shima & Oyane이 제시한 항복조건식이 실험치와 근접하게 나타나기 때문에 본 논문에서는 다공질체의 조밀화에 대한 몇가지 항복조건중에서 Shima & Oyane등[14]이 제시한 항복조건식을 사용하여 반용융재료의 고상입자에 대하여 소성변형을 예측하였다.

3.2 반용융재료의 액상유동

다공질체의 공간을 흐르는 액상의 유동에 적용 가능한 유동형태는 다공질체를 통하는 유동법칙인 Darcy's Law로 설명할 수 있는데, 유동저항이 액상의 속도에 비례한다고 가정하면 단순한 형태의 Darcy's Law를 적용할 수 있다. 고상에 관한 액상의 상대적인 운동은 다음 식으로 표시된다.

$$u_{Li} \cdot f_L = \frac{\kappa}{\mu_L} \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (6)$$

고상다공질체의 체적변화량과 액상체의 유출량은 일치하므로 다음의 연속방정식이 성립한

다.

$$\frac{\partial u_s}{\partial x_i} + \frac{\partial (f_L \cdot u_{Li})}{\partial x_i} = 0 \quad (7)$$

액상에 작용하는 압력의 경계조건은 다음의 방정식에 의해 설명될 수 있다.

$$p = p_o : \text{자유 표면} \quad (8)$$

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 : \text{금형과 접촉하는 면} \quad (9)$$

3.3 고상과 액상을 동시에 고려한 지배방정식

소성가공에서 재료는 대부분 대변형을 하기 때문에 탄성변형을 무시한 응답해석만으로 성형공정을 해석해 왔다. 그래서 기존의 성형공정에서 사용된 재료들은 강소성재료로 가정하여 비압축성조건과 강체영역 등을 고려하여 변분법의 원리를 사용하여 유한요소해석을 하였다. 반응용 단조해석을 위하여 점성을 포함한 압축성 점소성체로 가정하여 해석하였다. 점소성체는 속도민감성 재료로서 변형률속도, 총변형률, 온도 등의 함수인 유동응력에 의존하며 압축성 재료로 가정하였다. 반응용재료에 대한 지배방정식은 힘의 평형방정식과 연속방정식 두가지이다. 지배방정식을 단순화하기 위하여 고상은 액상과 동일한 밀도를 가지며, 기공이 존재하지 않는다고 가정하면 힘의 평형방정식과 연속방정식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\sigma_{ij} + \delta_{ij} f_L p) = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial u_s}{\partial x_i} + \frac{\partial (f_L \cdot u_{Li})}{\partial x_i} = 0 \quad (11)$$

식(10), (11)의 고상-액상 혼합물에 대한 지배방정식들은 변형과정동안 압력의 변화가 힘의 평형관계에 영향을 미치게 된다. 그 결과로서 고상의 응력과 변형률속도는 체적변화, 조밀화를 유발시키며, 액상의 유동은 구상화조직 사이의 공간에서 일어난다. 고상의 조밀화는 액상의 유동률에 영향을 미치는 침투성과 체적변형률속도에 관련되어 있다. 따라서 정수압응력이 높거나 유효변형률속도가 높을 경우 조밀화가 일어날 수 있다.

3.4 유한요소방정식

반응용재료의 성형공정을 유한요소법으로 해석할 때 유한요소 형태의 지배방정식에서 우선적으로 구하는 것은 재료의 각 절점에서의 고상의 가용속도장(Admissible velocity)과 액상의 압력인데, 각 요소에 걸쳐 연속적인 속도와 압력을 정의하기 위해 형상함수를 도입하여 구체화시킨다. 반응용재료와 같은 압축성 점소성문제에서 미지수는 속도와 압력인데, 일차 미지수(Primary Unknown)는 속도이다. 성형공정을 해석할 때는 속도장을 먼저 구한 다음 만족할 만한 속도장에 대한 압력장을 구하여 전 영역에 대해 속도와 압력이 연계된 강성행렬과 힘벡터를 조합하여 전체적인 유한요소방정식을 구한다. 고상영역과 액상영역을 동시에 고려한 반응용재료에 대한 유한요소 방정식의 행렬 형태는 다음과 같이 연립일차 방정식으로 간단하게 표현할 수 있다[15].

$$\begin{bmatrix} [K_s(U_s)] & [H_p] \\ [H_v] & [K_L] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{U_s\} \\ \{p\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{F_s\} \\ \{Q\} \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서, $K_s(U_s)$ 는 압축성 다공질체의 요소 강성행렬이며, K_L 은 액상체의 유출량에 의한 압력의 영향을 나타낸 행렬이다. H_p 는 액상의 압력을 나타내는 행렬이고 H_v 는 다공질체의 체적변화량을 고상의 속도에 대한 함수로 나타낸 행렬이다.

3.5 비선형방정식의 해

비선형방정식을 풀기 위한 방법으로 직접반복법과 뉴우튼-랩슨법의 두 가지 방법이 있다. 직접반복법은 수렴성이 좋으나 해를 구하는데 속도가 느리고, 뉴우튼-랩슨법은 수렴의 속도는 빠르나 발산의 우려가 있다. 그러므로 두 가지 장점을 이용하기 위해 초기속도장의 발생은 직접반복법을 이용하였고, 그 이후의 계산은 뉴우튼-랩슨법을 이용하였다.

3.6 경계조건

힘이 규정된 경계면 S_F 와 속도가 규정된 경계면 S_V 에 대한 경계조건의 적용은 간단하고 여러 문헌에서 쉽게 찾아볼 수 있다. 유한요소법에 의한 금속제조공정의 실제적인 해석에 있어서는 금형 경계조건에 대한 특별한 주의가 요구된다. 왜냐하면 마찰응력의 방향은 성형되는 재료와 금형 사이의 상대속도의 방향에 대해 반대이기 때문이다. Ring압축, 압연, 단조와 같은 문제에 대해서 금형-재료 경계면 사이에서 상대속도의 방향은 간단한 방법으로 처리하기에는 어려움이 있다. 이런 문제의 주요 특징은 금형-재료 경계면을 따라 금형에 대한 재료의 속도가 영이 되는 중립점이 발생하게 되어 해석이 곤란하게 된다. 따라서 중립점을 처리하기 위해 속도의존성 마찰력을 고려하여 해석할 수 있도록 Chen과 Kobayashi가 제안한 다음과 같은 식을 사용하였다[16].

$$f_{\text{fric}} = -m_f k \left[\frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{\Delta v_s}{a_0} \right) \right] \quad (13)$$

여기서 v_s 는 금형과 재료의 상대 속도이며 a_0 는 속도의 차원을 가지는 단위로써 본 연구에서는 유한요소해석에서 일반적으로 이용되어지는 5×10^{-3} 으로 하여 계산하였다.

4. 단조공정

반용융 재료는 고상입자들 사이의 공간을 충전하고 있는 2상(Two phase) 매개물으로써 게이트 인구의 형상, 초기소재의 위치등에 따라서 기계적 성질이 현저하게 다르다[17]. 이러한 현상을 금형 설계에 적용하기 위해서는 임의형상의 다이에 있어서 수치해석기법개발이 필요하다[17]. 따라서 반용융재료의 항복조건에는 정수압응력의 영향이 포함된다.

Fig. 6(a)~(c)는 금형속도가 100mm/sec 일 때 이단계 곡선금형의 높이감소율에 따른 격자 변형상태를 나타낸 것이다. 높이감소율이 93%일 때 금형 끝부분에서 변형상태가 심하게 뒤틀려 있을 것을 알 수 있다. 이와 같이 격자변형이 심한 부분은 격자재구성(Remeshing)이 필요하며 이 단계 곡선금형의 경우는 높이감소율이 93%이후부터 격자재구성(Remeshing)이 필요함을 알 수 있다.

Fig. 7(a)~(c)는 금형속도가 100mm/sec일 때 이단계 곡선금형의 높이 감소율에 따른 고상울의 분포를 나타낸 것이다. 고상울의 분포가 재료 반경 방향으로 균일하게 되어 있다.

완전히 균일한 고상울의 분포를 위해서는 금형속도를 200mm/sec 정도로 증가시켜야 한다. 왜냐하면 금형속도가 200mm/sec일 때 일단계 곡선금형에서는 고상과 액상의 거시적인 분리 현상이 일어나지 않음으로 인하여 고상울, 유효변형을 등이 균일하였기 때문에 이단계 곡선금형에 대해서도 같은 결과를 가져오리라 생각한다.

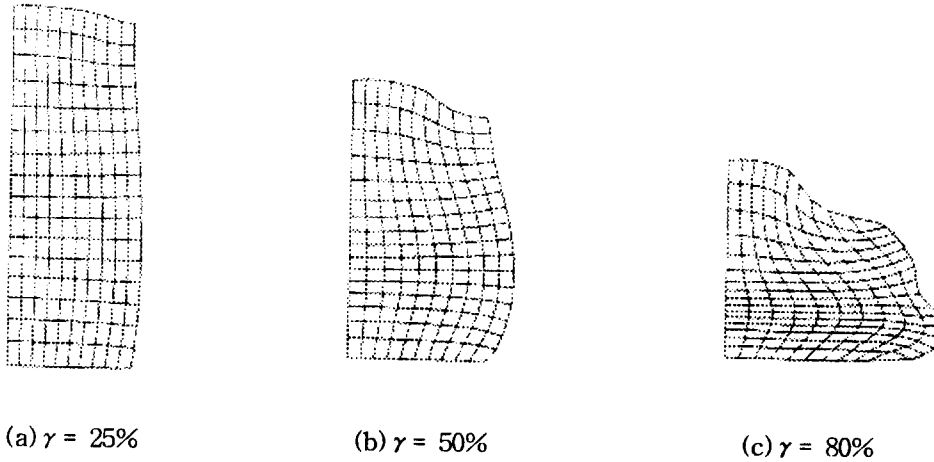


Fig. 6 (a)~(c) Grid distortions according to height reduction rate of two step spike die with $V_d=100\text{mm/sec}$, initial solid fraction $f_s = 50\%$ and friction factor $m_f = 0.3$

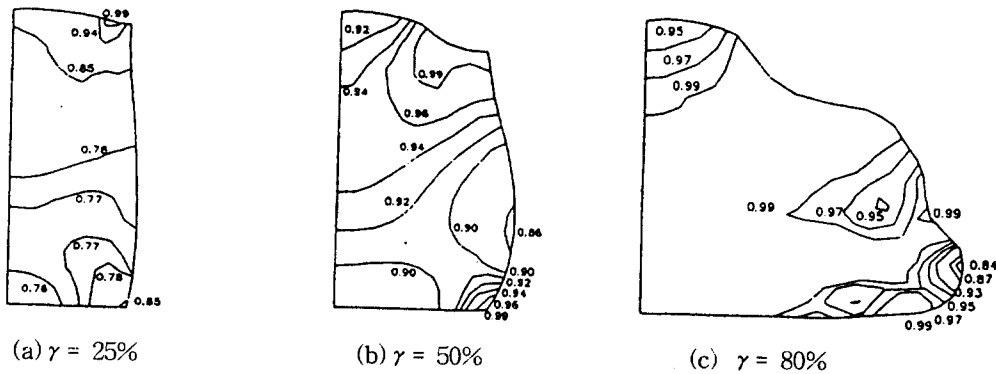


Fig. 7(a)~(c) Distortions of solid fraction according to height reduction rate of two step spike die with $V_d=100\text{mm/sec}$, initial solid fraction $f_s = 50\%$ and friction factor $m_f = 0.3$

Fig. 8(a)~(c) ~ Fig. 9(a)~(c)는 금형속도가 100mm/sec 일 때 이단계 곡선금형의 높이감소율에 따른 유효변형율속도와 유효변형율의상태를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 유효변형율속도가 대부분 균일하게 되어 있음을 알 수 있다. 그러나 금형의 곡률부분에서 유효변형율속도와 유효변형율이 불균일하게 분포되며 대체로 큰 유효변형율속도와 유효변형율 가짐을 알 수 있다. 단조공정은 소재표면과 금형이 접촉하는 면적이 많기 때문에 가압중 액상과 고상의 분리현상이 용이하다. 수직형 복동프레스를 많이 이용하며, 상하막이 금형내부에 충전되지않도록 하기위하여 금형설계에 특별히 관심을 기울이고 있다.

Fig. 6과 같은 단조성형은 조성의 균질한 제어 및 자유표면에서의 표면 결함을 억제할 수 있는 단조조건이 정립이 아주 중요하다.

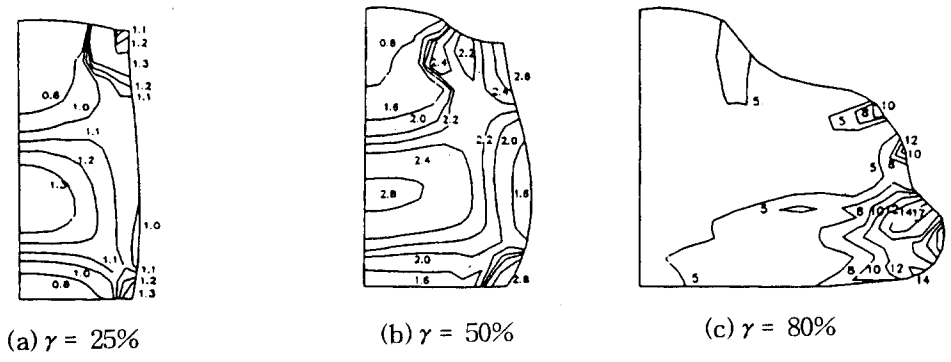


Fig. 8(a)~(c)Distributions of effective strain rate according to height reduction rate of two step spike die with $V_d=100\text{mm/sec}$, initial solid fraction $f_s = 50\%$ and friction factor $m_f= 0.3$

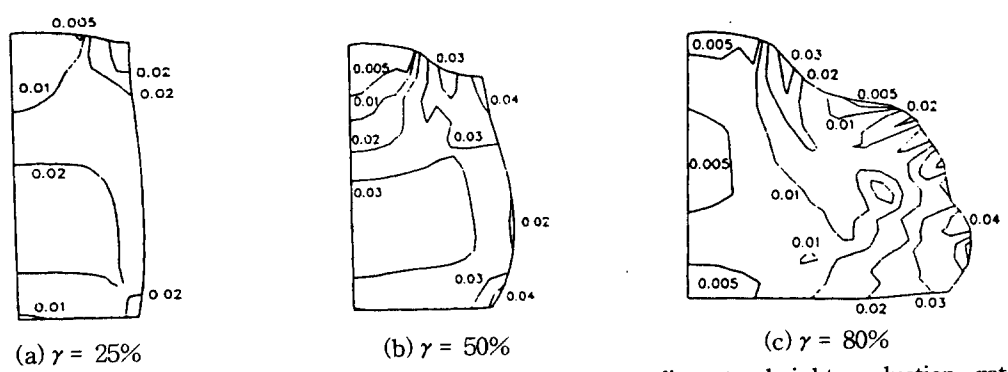


Fig. 9(a)~(c)Distributions of effective strain rate according to height reduction rate of two step spike die with $V_d=100\text{mm/sec}$, initial solid fraction $f_s = 50\%$ and friction factor $m_f= 0.3$

5. 반응용 다이캐스팅(SSM die casting)

고상율이 50% 이하인 경우 반응용소재를 이용하여 부품을 개발하고자 할 때는 용탕단조의 금형설계 기법을 주로 이용한다. 왜냐하면 가열온도가 액상영역에 가까우면 재가열시 소재 표면의 산화막이 제품내부로 유입되지 않도록 하여야 하기 때문이다. 또한 충전시 소재의 조성이 균일하게 되도록 하여야 하기 때문에 기존 용탕단조의 속도보다 2배정도 큰 1.0m/sec 이상 되어야 할 것으로 사료된다. 액상율이 50%이상인 경우는 반응용재료를 뉴튼유체로 가정하여 금형 내부의 충전거동을 파악할 수 있으며, Navier-Stokes방정식을 차분화하여 충전 시 유표면의 추적이 가능하도록 SMAC법을 이용하여 복잡한 부품의 충전거동을 응고현상과 결부지어 해결할 수 있다[18]. 이 때 온도와 변형률속도에 따른 점성을 고려하여야 하며, 상업용으로 시판중인 MAGMA S/W등이 이를 지원할 수 있다. 저자가 MAGMA S/W을 이용하여 반응용 다이캐스팅 금형설계에 응용한 예와 그 문제점을 소개하고자 한다.

실제 반응용 재료의 유동을 해석하기 위해서는 Shear rate, 고상율등의 변수에 따른 점도를 알아내야 하고, 공정의 Shear rate에 상응하는 Rheology model을 수립해야한다. 아래 식과 같이 일반화된 점성식에서 $n=1$ 인 Newtonian model과 Power-law에 따르는 경우에 대하여, 수치 해석한 결과는 아래와 같다.

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = k \dot{\gamma}^{n-1} \quad (\text{Generalized Newtonian Model})$$

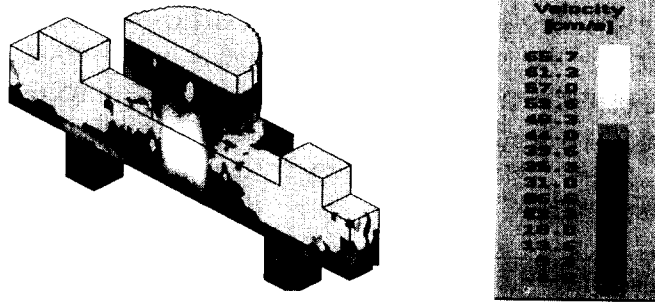


Fig.10 Velocity Contour of Newtonian Rheology Model (60% filled)

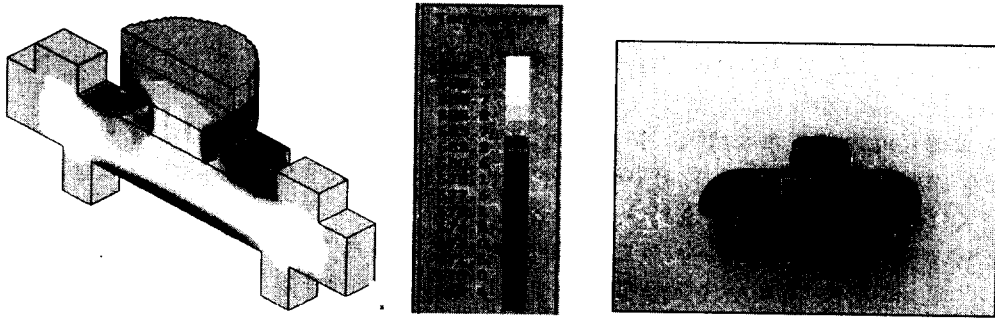


Fig.11 Ostwald-deWaele Rheology model and experimental result

금형의 온도는 250℃, 초기 소재의 주입온도는 584℃, Pouring Rate는 301.5[Cm³/s]의 조건 하에서 해석을 행하였다. Fig.10과 Fig.11에서 보듯이 Non-Newtonian Model이 실제 실험 결과와 유사함을 알 수 있다. Fig.12는 실제 자동차 부품중 반응용 가공으로 경제성이 있는 부품중의 하나인 Master Cylinder의 금형설계를 위한 해석 model이다.

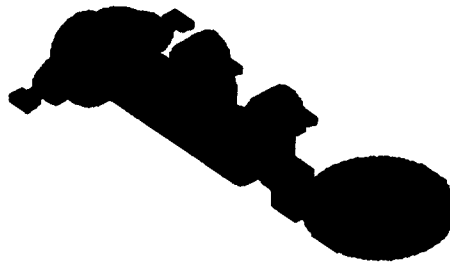
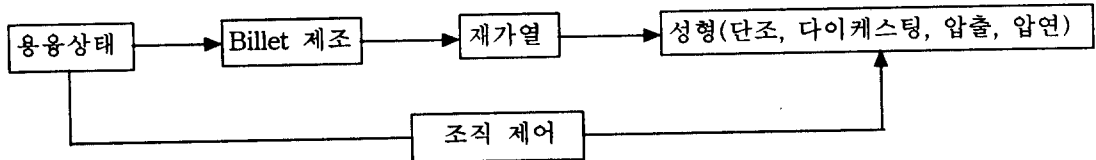


Fig.12 Enmeshed model of Master Cylinder

금형 내의 충전 및 응고 해석의 문제점을 들면 아래와 같다. shear rate에 따른 점성의 자료가 많이 부족한 상태이므로, 고상을 즉 온도의 함수로써 정의되는 점성을 고려할수 있다. 실제 반응용 소재의 Thixotropic한 성질을 완전히 고려하기는 상당히 어려운 실정이다. 본 해석에서 사용한 MAGMA S/W의 경우 충전 동안 수축 및 잔류응력여부에 대한 검사가 불가

능함으로 인하여 최적 성형공정의 도출에 한계가 있으며, 고상율이 높은 범위에서는 계산시간이 급격히 증가하였다. Control Volume based F.D.M을 이용하기 때문에 모든 Control Volume이 정육면체의 형상을 가짐으로 인하여, Modeling 자체의 accuracy의 검정이 필요하며, 유동해석상 중요한 부분의 C.V 갯수와 Computation time 사이에는 trade off가 필요하다.

반용용성형공정을 부품개발에 응용하기 위해서는 현재양산중인 A356, A390, AC2B합금이외에 고강도, 내마모성, 내열성, 고용점 및 난가공재료의 대량생산이 시급하다. 성형후 소재의 Recycling기술이 동시에 수행되어야 부품의 원가절감이 가능하다. Billet제조와 재가열이 생략된 새로운 성형기술이 요구된다.



< Cost down을 위한 semi-solid 성형공정 >

6. 결론

반용용재료의 압축시험에서 알 수 있듯이 응력-변형율의 곡선이 일반재료와는 다르기 때문에 성형공정중 무단속도제어가 필수적이다. 제품의 형태와 요구사양에 따라서 고상율의 범위를 결정하는 것은 대단히 중요하다. 고상율이 50% 이상인 경우는 다공질재료의 소성역학, DEFORM S/W 등을 이용할 수 있으나, 50% 이하인 경우는 Non-Newtonian흐름으로 가정된 해석이 필요하며 MAGMA S/W등을 이용할 수 있다. 제품개발을 위한 성형공정중 발생하는 충전불량, 표면분리현상, 가스결함, 제품의 내외부공정편식, 산화막 및 Weld line부분에서의 강도저하등을 해결할수 있는 최적성형공정의 도출이 필요하며 cost down을 위한 성형기의 개발이 향후 필수적이다.

7. 참고문헌

- (1) Spencer, D. B., Mehrabian, R. and Flemings, M. C., 1972, " Rheological Behavior of Sn-15pct Pb in the Crystallization range," Metallurgical Transaction, Vol.3, pp. 1925~1932.
- (2) Suery, M. and Flemings, M.C., 1982, "Effect of Strain Rate on Deformation Behavior of Strain Rate on Deformation Behavior of Semi-solid Dendritic Alloys," Metall. Trans., Vol. 13A, pp. 1809~1819.
- (3) Kumar, P., Martin, C. L. and Brown, S., 1994, "Predicting the Constitutive Flow Behavior of Semi-solid Metal Alloy Slurries," The 3rd Int'l Conf. on Semi-solid Processing of Alloys and Composites, pp. 37~46.
- (4) Turng, L. S. and Wang, K. K., 1991 "Rheological Behavior and Modelling of Semi-solid Sn-15% Pb Alloy," Journal of Materials Science, Vol.26, pp. 2173~2183.
- (5) Hirt, G., Cremer, R., Winkelmann, A., Witulski, T. and Zillgen, M., 1994, "SSM-forging of Usually Wrought Aluminium Alloy, "The 3rd Int'l. Conf. on Semi-solid Processing of Alloys and Composites, pp. 107~116.
- (6) Ito, Y., Flemings, M. C. and Cornie, j. a., 1992, "Rheological Behavior and Microstructure of Al-6.5 wt% Si Alloy, "Mature and Properties of Semi-solid Materials, pp. 3~17.

- (7) 고액공존금속의 성형기술심포지엄(I), 대한금속학회, 한국소성가공학회, 1996, 11.
- (8) 대한금속학회 회보, 제10권 2호. 1997.
- (9) 백남주, 강충길, 김영도, 1991, "반용융압연을 이용한 박판제조공정에 관한 연구, 대한기계학회논문집, 제15권 2호, pp.584~595.
- (10) C. G. Kang, J. H. Yoon, 1997, "A finite-element analysis on the upsetting process of semi-solid aluminum material", Journal of Materials Processing Technology 66, pp. 76-84.
- (11) 강충길, 김기훈, 대한기계학회지, "거시적 조직변화를 고려한 반용융알루미늄재료의 유동응력관계식", 1997년도 춘계학술대회 논문집(A), pp. 541-546.
- (12) J. S. Gunasekera, 1992, The 2nd Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, "Development of a constitutive model for mush materials", 211.
- (13) 강충길, 최진석, 김기훈. "반용융재료의 압축공정에서 유동응력식이 유한요소해석의 정도에 미치는 영향", 대한기계학회 논문집 투고중
- (14) S. Toyoshima, 1994, "A FEM simulation of densification in forming process for semi-solid material", The 3rd Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, (1994) 47.
- (15) 강충길, 임미동, 1997, "알루미늄 합금의 반용융단조 및 주조공정에 관한 수치해석", 한국소성가공 학회지 제6권 3호, pp.239-249.
- (16) C. C. Chen, S. Kobayashi, "Applications of Numerical Method to Forming Process", ASME, AMD, 28. pp.136-174
- (17) 강충길, 강동우, 1997, "반용융알루미늄재료의 단조공정조건이 기계적 성질에 미치는 영향", 대한기계학회논문집(A) 제21권 제9호 pp 1400-1413.
- (18) C. C. Kang, J. S. Choi, D. W. Kang, (in press. 1997) "A filling analysis of the forging process of semi-solid aluminum materials considering solidification phenomena", J. of Materials processing Tech.