

반용융 복합압출 제품의 성형실험 및 유한요소해석

최재찬* · 박준홍** · 김병민*

(1999년 1월 29일 접수)

Finite Element Analysis and Experiment of Combined Extrusion in Semi-Solid State

Jae Chan Choi, Joon Hong Park and Byung Min Kim

Abstract

Many products related to automobile and airplane industry have been manufactured by semi-solid forging. In this paper finite element analysis of product by combined extrusion in semi-solid state was performed and its experimental verification using A356 was conducted. Distribution of solid fraction was analyzed and compared with the experimental microstructure in the product. In addition, distribution of temperature in the product was analysed by finite element method.

Key Words : Semi-Solid Forging, Combined Extrusion, Solid Fraction, Finite Element Method

1. 서 론

1972년 MIT에서 Spencer등⁽¹⁾이 반용융 상태의 합금에 대한 거동을 연구한 이후에 반용융 단조 공정은 정형(near-net-shape) 제품을 만들기 위한 새로운 가공 방법으로 발전하였으며, 이와 관련한 많은 연구가 진행되고 있다. 이러한 반용융 단조의 특성으로는 복잡한 형상을 가진 부품을 정형 제조하여 후가공을 줄일 수 있고, 응고하는 액상이 작으므로 수축량이 작고 치수 정밀도가 향상되며, 액체상태의 소재를 이용하는 기존의 성형법에 비해 높은 점성으로 인하여 지향성 응고를 촉진시키고 소재를 반용융 상태로 가열하므로 기존의 주조에 비하여 에너지 감소 측면에서 효과가 있다.

반용융 단조 공정은 개략적으로 구상화 조직의 소재를

준비하는 과정, 소재를 원하는 고상물의 온도로 가열하는 과정, 제품 성형 과정, 가압 과정, 취출 과정으로 나눌 수 있고, 소재의 고상률, 금형예열온도, 가압유지시간, 편치 하강속도 등이 반용융 단조 공정에 있어서 성형 변수가 될 수 있다.

본 연구에서는 산업적으로 적용 및 응용이 가능한 A356 합금을 소재로 하여 복합압출 공정으로 반용융 가공하였을 때 반용융 재료의 변형 거동을 예측하기 위하여 유한요소해석을 수행하였는데 즉, 반용융 재료를 압축성 점-소성 거동을 하는 고상영역과 Darcy의 다공질체에 대한 유동법칙을 따르는 액상영역이 공존하는 재료로 모델링하여 유한요소해석을 수행하고 이를 검증하기 위하여 전·후방압출 형상 제품인 탄두 형상의 제품을 반용융 복합압출로 성형하였다.

* 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터

** 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

2. 지배방정식 및 유한요소 정식화

2.1. 변형해석의 유한요소 정식화

본 연구에서 반응용 재료는 다공질체인 고상영역과 이 다공질체의 기공을 대체하는 액상영역으로 구성된다고 가정하였다. 이때 반응용 재료 전체에 작용하는 응력은 고상 영역에 작용하는 응력과 액상영역에 작용하는 압력의 합으로 표시할 수 있다. 따라서 고상 다공질체의 지배방정식은 식(1)과 같은 평형방정식과 식(2)와 같은 경계조건으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial X_i} (\sigma_{ij} + \delta_{ij} f_L p) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} v_{,si} &= \bar{v}_{,si} \quad \text{on } S_v \\ (\sigma_{ij} + \delta_{ij} f_L p) n_j &= \bar{t}_i \quad \text{on } S_f \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, f_L 은 액상률이다. 또한 고상 다공질체의 변형에 대한 항복식은 압축성 재료에 대해 Kuhn등⁽²⁾이 제시한 항복식을 사용하였으며, 금형과 소재 접촉면에서의 마찰을 고려하기 위하여 Chen등⁽³⁾이 제안한 식을 이용하였다.

액상영역에 대한 지배방정식은 연속방정식과 다공질체를 통과하는 유체의 유동법칙인 Darcy의 유동법칙으로 표현하였으며, 다음의 식(3), (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{\Delta} \cdot \vec{U}_S + \vec{\nabla} \cdot (f_L \vec{U}_L) = 0 \quad (3)$$

$$\vec{U}_L = \frac{x}{\mu_L f_L} \vec{\Delta} p \quad (4)$$

경계조건은 아래와 같이 자유표면에 대해서는 식(5)를, 다이와 접촉하는 면에서는 식(6)으로 나타낼 수 있다.

$$p = p_0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad (6)$$

위의 식(1), 식(3) 그리고 식(4)를 유한요소 분할화하면 반응용 재료에 대해 고상의 변형과 액상의 유동이 연계

된 전역 유한요소 방정식이 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{bmatrix} K_S & K_L \\ L_S & L_L \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta V_S \\ \Delta P \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_S \\ Q_L \end{Bmatrix} \quad (7)$$

2.2. 열전달 해석의 유한요소 정식화

반응용재료의 압축성형시 재료의 온도분포를 고려하기 위한 비정상상태의 열전달 지배방정식은 다음과 같다.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + f \quad (8)$$

그리고, 이러한 비정상상태의 열전도 방정식은 아래와 같은 매트릭스의 형태로 나타낼 수 있다.

$$[K] \{T_i\} + [C] \left\{ \frac{\partial T_i}{\partial t} \right\} = \{f\} \quad (9)$$

또한, 재료는 액상에서 고상으로 응고가 될 때 잠열이 방출되므로 이러한 잠열방출을 고려하기 위해 여러 가지 수치적인 방법 중 엔탈피 법을 사용하였다.⁽⁴⁾

재료가 응고되는 구간인 $[T_{f1}, T_{f2}]$ 사이에서의 엔탈피 H 는

$$\begin{aligned} H &= \int_{T_{ref}}^T \rho C_1(T) dT \quad \text{for } T < T_{f1} \\ H &= \int_{T_{ref}}^{T_{f1}} \rho c_1(T) dT + \int_{T_{ref}}^T \left(\rho \left(\frac{dL}{dT} \right) + \rho c_f(T) \right) dT \\ &\quad \text{for } T_{f1} \leq T \leq T_{f2} \\ H &= \int_{T_{ref}}^{T_{f1}} \rho c_1(T) dT + \int_{T_{f1}}^{T_{f2}} \rho c_f(T) dT \\ &\quad + \int_{T_{f2}}^T \rho c_2(T) dT \quad \text{for } T > T_{f2} \end{aligned} \quad (10)$$

이 때, 여기서 $T_{f1} = T_f - \Delta T_f$ 는 고상선 온도이고, $T_{f2} = T_f + \Delta T_f$ 는 액상선 온도이며 c_f 는 $T_{f1} \leq T \leq T_{f2}$ 에서의 비열이다.

위의 정의에서 내부발열량을 무시하면 지배방정식은 아래와 같다.

$$\frac{dH}{dT} \circ \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla(k(\nabla T)) = 0 \quad (11)$$

여기서 잠열을 고려한 열용량을 $c^* = \frac{dH}{dT}$ 라 할 수 있다. 시간적분항을 처리하기 위하여는 θ 법을 사용하였고, Dupont II scheme 의 three-time-level scheme을 사용

하면 식(9)는 아래의 식으로 정리된다.

$$\left(c^* + \frac{3}{4}\Delta t K^*\right)T^{n+1} = c^*T^n - \frac{1}{4}\Delta t K^*T^{n-1} + \Delta t F^* \quad (12)$$

여기서 상첨자 *는 이 매트릭스와 벡터가 $t^* = t_n$ 에서 계산됨을 의미한다.

3. 반응용 복합압출 공정에 대한 유한요소해석

반응용 재료의 거동을 예측하기 위하여 해석대상인 박격포용 탄두에 대하여 1/2 축대칭 해석을 하였으며 초기 고상률은 0.55로 일정하다고 가정하였다. 그리고 반응용 재료의 성형공정은 고온에서 이루어지므로 열전달해석을 동시에 수행하였으며 해석에 사용된 소재와 금형의 초기 격자는 Fig.1에 나타내었다.

유한요소해석에 사용된 소재에 대해서는 Kang등⁽⁵⁾이 사용한 A356합금의 물성치를 사용하였고, 유동응력식은 Choi등⁽⁶⁾이 실험으로 구한 값으로 하였다.

Fig.2는 공정조건인 금형온도 400℃와 펀치속도 200 mm/sec에 대한 유한요소해석으로 부터 얻어진 고상률 분포를 나타내는 그림이다.

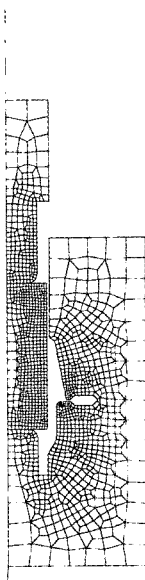


Fig. 1 Finite element mesh system for combined extrusion of semi-solid material

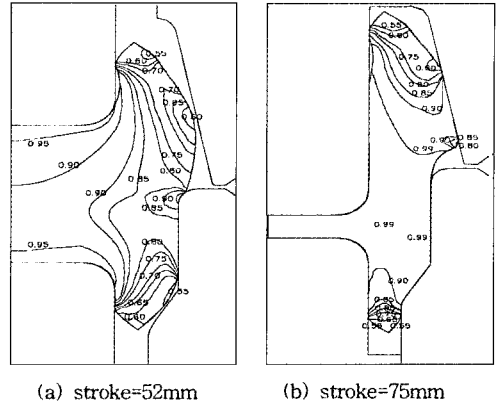


Fig. 2 Distribution of solid fraction by finite element method

4. 반응용 복합압출 공정에 대한 실험적 검증

4.1. 실험장치

반응용 복합압출 공정에 관한 유한요소해석의 실험적 검증을 위해 단두형상의 반응용 복합압출품을 성형하였다. 실험에 사용된 금형 세트의 개략도를 Fig.3에 나타내었다.

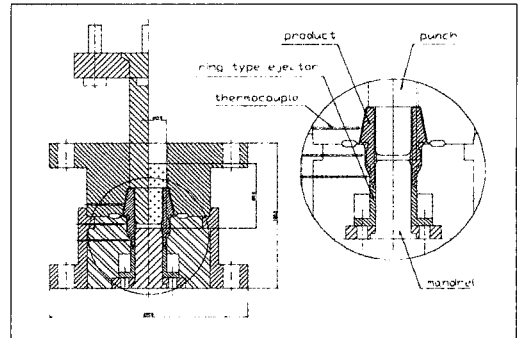


Fig. 3 Schematic drawing of die set for combined extrusion of semi-solid material

상·하 금형과 펀치 그리고 맨드렐은 고온 공구강인 SKD61을 HRC55로 열처리 하였고, 금형과 펀치, 맨드렐을 가열하기 위해 카트리지 히터(cartridge heater)를 사용하였다. 금형의 온도가 상승하는 것을 비교적 정확하게 측정하기 위해 고온용 INCONEL $\phi 1.6$ K-Type 열전대를 사용하여 상·하부 금형의 온도를 측정하였다. 금

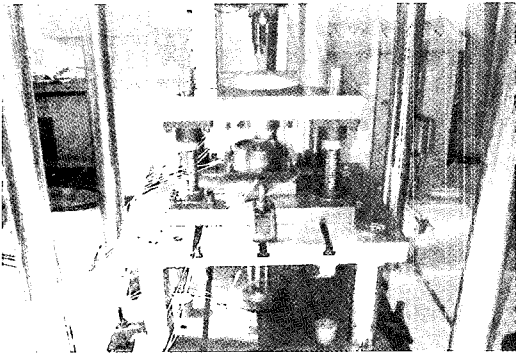


Fig. 4 Photograph of die set for combined extrusion of semi-solid material

형의 예열온도는 성형시 금형의 예열온도에 대한 영향을 파악하기 위해 200℃와 400℃로 하여 각각 실험을 수행하였다. 반응용 복합압출품을 제조하기 위해 사용된 프레스는 200톤 고속 유압 프레스이며, 해석과 동일하게 펀치 속도는 200 mm/sec로 설정하였다.

소재는 초기 직경 및 높이가 각각 $\phi 43 \times h 65$ (mm)인 프랑스 Pechiney사에서 전자기 교반법으로 제작한 A356 합금을 사용하였다. 소재의 가열은 50 kW 유도가열로를 사용하였고, 가열온도는 고상률이 55%인 578℃로 가열하였으며 중심부와 표면의 온도차를 줄이기 위해 계단식 가열(step heating)을 하였다.

제품 하단 부의 두께가 약 5 mm의 링형상으로 일반적인 방식으로는 제품 취출에 부적합하여 맨드렐을 감싸는 링형상의 이젝터 핀으로 제품을 취출하게 된다.

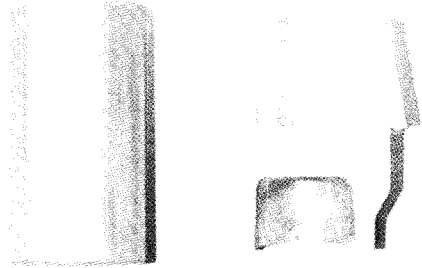
Fig.4는 프레스에 금형이 설치된 사진을 나타내고 있다.

4.2. 반응용 복합압출품의 성형

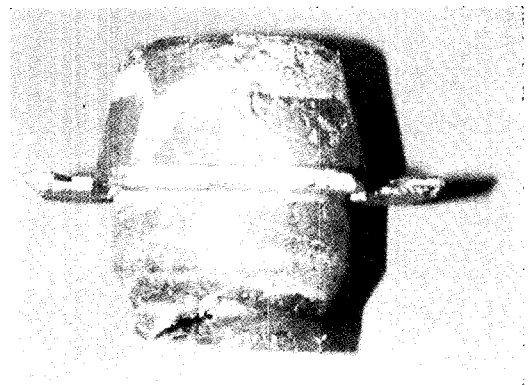
반응용 복합압출품의 성형 공정은

- (1) 절단된 A356 시편을 준비한다.
- (2) 상·하 금형과 펀치를 닫은 후, 금형을 예열한다.
- (3) 소재를 원하는 온도까지 유도가열한다.
- (4) 소재 이송전, 펀치와 상금형을 상승시킨다.
- (5) 소재를 맨드렐 위에 위치시킨다.
- (6) 펀치를 하강시켜 성형한다.
- (7) 가압유지를 한다.
- (8) 펀치와 상금형을 상승시킨다.
- (9) 링형상 이젝터로 제품을 취출한다.

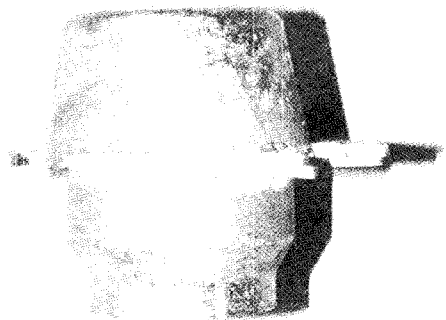
이와 같은 공정으로 반응용 복합압출품을 성형하였고 제품의 형상은 Fig.5와 같다.



(a) photograph of initial billet(left) and vertical section of final product with 400 °C in die temperature



(b) product of 200 °C in die temperature



(c) product of 400 °C in die temperature

Fig. 5 Photograph of product by combined extrusion in semi-solid state

또한 제품의 길이방향으로 절단하여 미세조직을 확인하였는데, Fig.6과 같다.

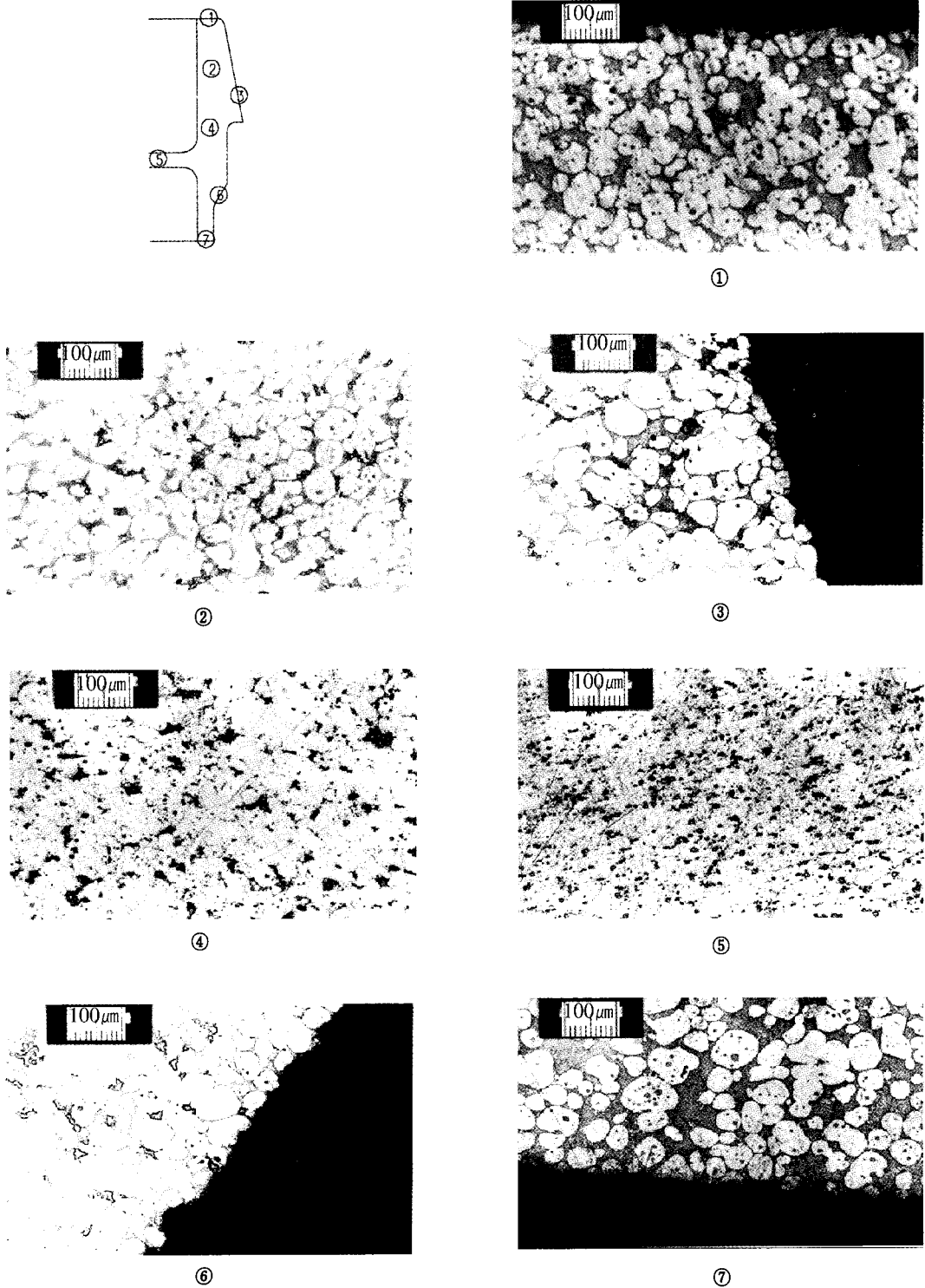


Fig. 6 Microstructure of vertical section of combined extrusion product in semi-solid state with 400°C of die temperature

5. 결과 및 고찰

소재의 측면부가 금형과 아직 접촉하지 않은 상태에서 고상률을 비교하면, 보통 높은 성형속도에서는 액상이 고상과 함께 유동하게 되어 균일한 고상률이 유지되지만, 본 연구에서 사용된 조건에서는 투과율이 크기 때문에 높은 성형속도이지만 고상률의 분포가 크게 균일하지는 않았다. 또한, 소재의 측면부가 금형에 접촉한 후에는 접촉한 부분의 고상률은 온도에 의한 영향이 크다고 가정하고 열전달해석으로 계산된 온도를 보간하여 고상률을 계산하였다. 따라서 Fig.2에서처럼 금형과 접촉한 부위의 고상률은 거의 응고가 이루어졌음을 보여준다.

하지만 해석도중 발생하는 유출되는 액상에 대한 해석적인 처리 방법이 아직 고려되지 않아 최종 스트로크까지 해석을 수행하였으나 완전히 충전된 해석결과는 얻지 못했다.

또한 시뮬레이션 결과로부터 펀치와 맨드렐에 의한 전·후방 압축이 동시에 일어남을 알 수 있고, 펀치의 하강에 의해 다이 캐비티의 하부가 먼저 충전된 후 다이 캐비티의 상부로 상승함을 알 수 있다. 성형시 소재가 펀치와 맨드렐에 먼저 접촉하므로 이 부분에서의 금형의 예열이 중요함을 알 수 있고 이 부분에서의 소재 응고에 따른 불완전한 충진을 막기 위해 히터의 설치 부분을 최대한 다이 캐비티에 근접하도록 설계하였다. 또한 맨드렐과 펀치 내부에도 히터를 설치하여 소재의 급냉에 의한 미충진을 방지하였다.

본 연구의 실험에서는 금형 예열온도가 제품의 성형에 미치는 영향을 파악하기 위해 금형 예열온도를 200℃, 400℃로 하여 실험을 수행하였다. 금형의 예열온도가 200℃일 때는 금형과 소재사이의 큰 온도차로 인해 급냉에 의한 미충진과 표면의 거침정도가 큼을 알 수 있다. 이와는 반대로 금형온도가 400℃일 경우에는 소재가 금형내부로 완전히 충전되어 양호한 형상과 제품 표면을 나타내고 있다.

금형 예열온도가 400℃일 때의 제품의 미세조직은 전반적으로 구상화된 입자를 나타냄을 알 수 있고, Fig.6의 ⑤에서는 성형시 펀치와 맨드렐에 의해 소재가 압축되어 아주 치밀하고 높은 고상률을 나타냄을 알 수 있고, 제품의 상·하 끝 부분인 Fig.6의 ①, ⑦에서는 내부로부터 액상이 유출되어 낮은 고상률을 나타냄을 알 수 있다. 또한 제품의 측면부인 Fig.6의 ③, ⑥에서는 제품의 상·하부보다는 고상이 많음을 알 수 있고 구상화된 입자를 나타내고 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 A356 합금을 사용하여 탄두 형상의 제품을 반응용 복합압출로 성형하였으며 이에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 그 결론은 다음과 같다.

- (1) 전·후방 압축이 동시에 일어나는 반응용 복합압출 공정에 대해 열전달을 고려한 유한요소해석을 수행하였다.
- (2) 유한요소 해석을 통하여 반응용 복합압출품의 고상률 분포를 얻었으며, 실제 발생하는 액상유출 현상을 해석시 고려하지 못해 완전한 충진을 이루는 해석결과는 얻지 못했다.
- (3) 탄두 형상의 제품을 반응용 복합압출에 의해 성형하였다.
- (4) 반응용 복합압출품의 미세조직을 고찰하였고, 고상 및 액상의 분포가 유한요소해석과 정성적으로 일치함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

- (1) D. B. Spencer, R. Mehrabian, M. C. Flemings, 1972, "Rheological Behavior of Sn-15% Pb in the Crystallization Range", Metall. Trans., Vol.3A, pp. 1925~1932.
- (2) H. A. Kuhn and C. L. Downey, 1971, "Deformation Characteristics and Plasticity Theory of Sintered Powder Materials", Int. J. Powder Metallurgy, vol. 7, pp. 15~25.
- (3) C. C. Chen and S. Kobayashi, 1978, "Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Ring Compression", Applications of Numerical Methods to Forming Process, ASME, AMD, vol.28, pp. 163~174.
- (4) A. J. Dalhuijsen and A. Segal, 1986, "Comparison of Finite Element Techniques for Solidification Problems", Int. J. Numerical Methods in Engineering, Vol. 23, pp. 1807~1829.
- (5) 강충길, 임미동, 1997, "알루미늄합금의 반응용 단조 및 주조공정에 관한 수치해석", 한국소성가공학회지, Vol.6, No.3, pp.239~249.
- (6) 최원도, 고대철, 민규식, 김병민, 최재찬, 1997, "유도가열을 고려한 반응용 재료의 성형공정에 관한 유한요소해석", 한국정밀공학학회지, 제14권, 제8호, pp. 82~91.