

반응용 단조에서 가압유지 시간에 의한 미세조직의 특성

최제찬(부산대 ERC/NSDM), 박형진(부산대 기계기술연구소), 이병목(부산대 대학원)

Microstructural Characteristics by Compression Holding Time in Semi-Solid Forging

Jae Chan Choi, Hyung Jin Park, Byung Mok Lee

Abstract

The technology of Semi-Solid Forging (SSF) has been actively developed to fabricate near-net-shape products using light and hardly formable materials. Generally, the SSF process is composed of slug heating, forming, compression holding and ejecting step. After forming step in SSF, the slug is compressed during a certain holding time in order to be completely filled in the die cavity and be accelerated in solidification rate. The compression holding time that can affect microstructural characteristics and shape of products is important to make decision, where it is necessary to find overall heat transfer coefficient properly which has large effect on heat transfer between slug and die. This paper presents the procedure to predict compression holding time of obtaining the final shaped part with information of temperature and solid fraction for a cylindrical slug at compression holding step in closed-die compression process using heat transfer analysis considering latent heat by means of finite element method. The influence of the predicted compression holding time on microstructural characteristics of products is finally investigated by experiment.

Keywords : Semi-Solid Forging(반응용 단조), Compression holding time(가압유지시간), Solid fraction(고상률), Overall heat transfer coefficient(접면열전달계수), Microstructure(미세조직)

1. 서론

자동차 및 항공기 산업의 급속한 발전으로 인하여 고강도의 경량 부품(light product of high strength)에 대한 수요가 급증하고, 이와 관련한 새로운 가공법에 대한 요구가 증가하고 있다. 그러나 기존의 경량 소재는 합금제조 및 성형이 어려운 난가공성 소재이므로 제조 비용이 증가한다. 따라서 이러한 난가공성 소재의 성형성을 높이고, 고강도의 경량 부품을 정형(near-net-shape)으로 제조하기 위한 방법으로 반응용 단조(Semi-Solid Forging)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 반응용 단조의 세부적인 단계(step)는 구상화된 소재의 가열(slug heating), 성형(forming), 가압유지(compression holding), 이젝팅(ejecting)과 같이 4가지로 구분할 수 있고, 소재를 성형한 후 일정시간 가압유지 하는 과정에 대한 연구는 다음과 같다. Nicholas⁽¹⁾ 등이 반응용 단조에서 성형 후, 소재를 일정시간 동안 가압유지함으로써 소재 내부의 잔류 액상(residual liquid)의 수축으로 인한 다이 내부에서의 불완전한 충전(filling)을 제거할 수 있다고 제안하였다. 실험적으로는 Choi⁽²⁾ 등이 반응용 단조에서 스퍼어 기어의 성형성 실험으로 가압유지 시간이 성형성에 미치는 영향을 확인하였는데, SIMA(strain induced melt activated) 공정으로 구상화된 Al2024 소재를 고상률 70%로 가열한 후 다이 온도 400 ℃, 가압유지 시간 10초일 때 가장 양호한 제품을 얻을 수 있었다. 그리고 Choi⁽³⁾ 등은 가압유지 단계에서 소재의 잔류 액상에 의한 수축과 가압에 의한 충전이 연속적으로 이루어진다고 하여, 반응용 단조의 가압유지 단계에서 밀폐 압축 공정에 대해서 소재의 고상률이 100%되는 시간을 가압유지 시간으로 정의하고 상변화를 고려한 열전달 유한요소

해석을 하여 가압유지시간을 예측하였다.

한편, 가압유지 단계에서 소재와 다이 사이의 접면열전달계수(overall heat transfer coefficient)는 다이 및 소재의 온도, 가압력, 윤활제 및 다이의 표면조도 등에 의하여 영향을 받으므로 소재와 다이 사이의 열전달에 있어서 중요한 변수가 된다. Malinowski⁽⁴⁾ 등은 열간 공정에서 상-하부의 재료를 SUS304로 동일하게 사용하여 압력과 온도가 접면열전달계수에 미치는 영향을 유한요소법과 비선형 최적화기법(nonlinear optimization technique)을 이용하여 연구하였고, Kang⁽⁵⁾ 등은 열간 단순 업셋팅 실험으로부터 압력에 의한 소재와 다이 사이의 접면열전달계수를 산출하였는데, 압력이 일정 수준에 도달하면 접면열전달계수가 일정한 값을 가지는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 구상화된 수입 소재인 A356 재료를 밀폐압축공정(closed-die compression process)으로 성형하였고, 소재와 다이 사이의 온도 차이에 의한 접면열전달계수를 유한요소법과 비선형 최적화기법을 이용하여 산출하였으며, 여기서 구한 접면열전달계수를 이용하여 잠열을 고려한 열전달 유한요소해석으로 가압유지시간을 예측하였다. 소재의 응고시 상변화를 수반하는 열전달 문제에서 잠열을 고려하는 방법으로는 잠열을 온도의 함수로 나타내고 온도-엔탈피 관계식으로부터 잠열엔탈피를 구하는 엔탈피법을 이용하였다^{(6),(7)}. 그리고 원소재와 가열소재 그리고 가압유지 시간의 정도에 따른 제품의 미세조직의 특성을 확인하였다.

2. 이론해석

2.1 응고현상을 고려한 열전달 유한요소 정식화

비정상 상태의 열전달 문제는 다음과 같은 지배방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (k \vec{\nabla} T) + Q \quad (1)$$

식(1)을 Galerkin 방법으로 다음과 같은 약분형(weak form)을 얻을 수 있다.

$$\left[\int_{\Omega} \phi_i \phi_j d\Omega \right] \frac{\partial H}{\partial t} + \left[\int_{\Omega} k \left(\frac{\partial \phi_i}{\partial x} \frac{\partial \phi_j}{\partial x} + \frac{\partial \phi_i}{\partial y} \frac{\partial \phi_j}{\partial y} \right) d\Omega \right] T - \int_{\Gamma} \phi_i \vec{q} \cdot \vec{n} d\Gamma = 0 \quad (2)$$

$$T(\vec{x}, t) = \sum_{i=1}^n \phi_i(\vec{x}) T_i(t) \quad (3)$$

경계 조건 :

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(t)(T_{slag} - T_{die}) \quad , \Gamma_1 \quad (4)$$

$$q_n + q_c + q_r = h_{d,com}(T_{die} - T_{sur}) \quad , \Gamma_2 \quad (5)$$

식(2)의 첫 번째 항은 상(phase) 변화시 잠열 에너지에 대해 다음과 같이 나타낼 수 있다⁽⁷⁾.

$$\left[\int_{\Omega} \phi_i \phi_j d\Omega \right] \frac{\partial H}{\partial t} = \left[\int_{\Omega} \phi_i \phi_j \left(\rho c + \frac{\rho L}{T_i - T_s} \right) d\Omega \right] \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

식(2)에 대한 시간이산화(time discretization)를 위하여 θ 법을 이용하였고, 비제약적 안정성(unconditional stability)을 고려한 Crank-Nicolson법 ($\theta = 1/2$)을 채택하여 다음과 같은 식을 구하였다.

$$[C] \frac{T^{n+1} - T^n}{\Delta t} + [K] \frac{T^{n+1} + T^n}{2} = \{f\} \quad (7)$$

2.2 열전달 계수의 산출에 대한 최적화 기법

접면열전달계수의 산출은 임의로 가정된 접면열전달계수를 이용하여 수치해법으로 계산된 온도와 실험으로 측정된 온도를 비교하여 그 차이가 가장 작을 때의 접면열전달계수를 찾아내는데, 비선형 최적화기법인 황금분할탐색법을 사용하였다⁽⁴⁾.

접면열전달계수를 찾기 위해서 수치해법으로 계산 온도와 실험에 의해 측정된 온도와의 오차합 수는 식(8)과 같다⁽⁵⁾.

$$E(h(t)) = \sum_{i=1}^N [(T_C)_i - (T_{T.C.})_i]^2 \quad (8)$$

첫 시간스텝(time step)에서 초기 접면열전달계수값은 아주 작은 값을 이용하였고, 그 다음 스텝에서는 전 단계에서 얻어진 값을 초기 가정값으로 주어지게 된다. 식(8)에서 오차합수가 임계값보다 작거나 분할된 구간의 간격이 충분이 작으면 현 시간스텝에서 접면열전달계수의 값을 설정하고, 다음 시간스텝으로 넘어간다. 또한 오차합수의 임계값은 1.0이고, 구간 간격의 임계값은 0.001로 선택하였다.

2.3 가압유지시간의 예측

반응용 단조에서 소재를 다이에 충전시킨 후, 잔류 액상의 응고에 의한 수축으로 인하여 다이 내부에 불완전한 충전이 발생한다. 따라서 수축으로 인한 불완전한 충전을 없애기 위해 일정 시간의 가압유지가 필요하다. 즉, 응고에 의하여 수축된 소재는 가압유지에 의하여 다이에 재충전된다. 이러한 과정은 소재 내부의 잔류 액상이 완전히 없어질 때 까지 계속 반복하여야 한다. 이러한 반응용 단조의 가압유지 단계에서, 소재의 고상률이 100% 될 때까지 가압유지하는 일정한 시간을 가압유지 시간이라고 한다⁽³⁾. 소재의 고상률 계산을 위해서 Hirt⁽⁶⁾ 등이 A356에 대해서 실험으로 제안한 값을 온도에 따라 소구간별 선형 보간하여 사용하였다.

3. 실험

3.1 실험 장치

반응용 단조의 가압유지 단계에서 가압하중에 대한 소재와 다이의 접면열전달계수를 구하여 유한요소해석으로 예측한 가압유지 시간에 따른 제품의 미세조직의 변화를 확인하기 위해서 밀폐 압축 실험을 하였다. 실험에 사용된 다이 세트에 대한 개략도를 Fig.1에 나타내었다.

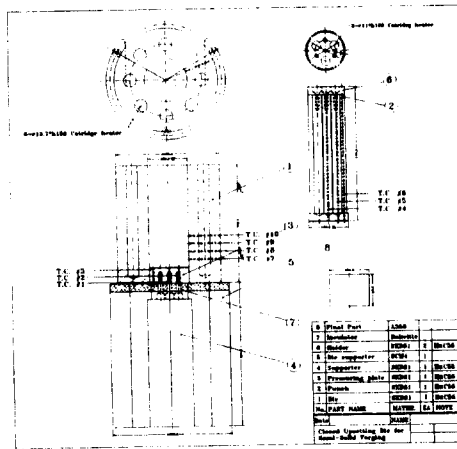


Fig.1 Drawing of die set for closed-die compression (T.C. : thermocouple)

원형 다이와 펀치의 재료는 고온 공구강인 SKD61을 HRC55로 열처리하였고, 다이와 펀치를 가열하기 위해 비교적 취급이 용이한 카트리지 히터를 이용하였다. 온도 측정을 위한 열전대는 고온용 INCONEL $\phi 1.6$ K-Type을 이용하였고 데이터 레코드를 사용하여 온도를 측정하였다. 다이와 펀치를 가열할 때, 최대 용량이 10 kW인 컨트롤러를 사용하여 펀치의 5번 열전대와 다이의 8번

열전대의 리드선을 카트리지 히터 콘트롤러에 연결하여 250℃로 최대한 균일하게 가열하였다. 그리고 최대 하중이 25톤인 MTS(Material Test System)를 이용하여 초기 직경과 높이가 각각 D=44mm, L=65mm인 구상화된 A356 소재를 최종 제품의 치수가 $\phi 50 \times h50$ (mm)인 실린더형 제품으로 성형한 후에 가압유지한다. 소재의 가열은 유도가열로를 이용하였는데, 소재를 가열한 후 다이에 삽입될 때까지 열손실이 발생한다. 이러한 열손실의 정도를 알기 위해서 대류열전달계수를 구하는 실험을 하였으며 소재의 온도를 부위별로 측정하기 위해서 6개의 열전대를 설치하였다. 가압유지 실험에 대해서는 상·하부 중심에 소재표면으로부터 깊이 2mm, 직경 3mm의 드릴가공된 소재를 이용하여 가압단계에서 소재의 온도를 측정하도록 하였다. 소재의 가열온도는 고상률이 55.7%에 해당되는 575℃로 가열하였다. 또한 접면열전달계수가 고려된 열전달 유한요소 해석으로부터 구한 가압유지시간의 타당성을 검증하기 위해서 예측한 가압유지 시간과 그 보다 짧은 시간 그리고 훨씬 긴 시간으로 가압하여 성형한 경우에 대해서 제품의 치수와 미세조직을 확인하였다.

3.2 소재의 유도가열 실험

소재의 유도가열은 중심부와 표면의 온도차를 줄이고 조직을 균일화시킬 목적으로 계단식 가열(step heating)을 하였는데, 처음에는 가열할 때 출력을 10kW로 하여 약 135초 동안 가열하였고, 다음에는 4.77kW로 하여 약 55초 동안 가열함으로써 소재 전체의 온도를 균일하게 하였다⁽⁹⁾.

소재를 유도가열로에서 가열한 후, 다이에 삽입하는 과정에서 주위(surrounding)와의 온도차에 의해 열손실이 발생하는데, 이것은 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다⁽⁷⁾.

$$q_n + q_c + q_r = h_{conv}(T_{shug} - T_{sur}) \quad (9)$$

식(9)에서 소재가 주위에 의해 대류, 복사 등의 원인으로 열손실이 발생하지만, 실험과 해석에 의해 h_{conv} 인 대류열전달계수로 표현할 수 있다. 따라서 소재를 유도가열한 후 10초 정도 상온에서 유지시키고 소재의 시간-온도를 측정하여 2.2절의 방법으로 대류열전달계수를 산출하였다.

Fig.2는 이렇게 구한 대류열전달계수를 나타내고 있다. 시간이 경과할수록 대류열전달 계수의 값이 점차적으로 증가함을 알 수 있고, 경과 시간 7초 이후부터는 그 값이 일정함을 알 수 있다.

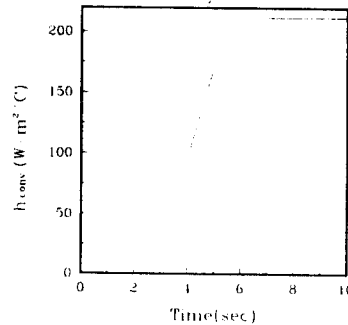
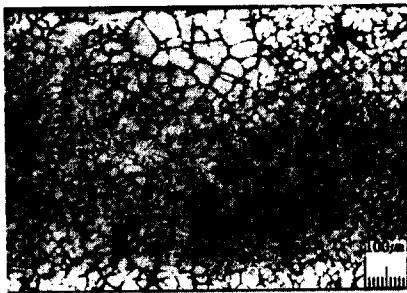


Fig.2 Variation of convection heat transfer coefficient on the time

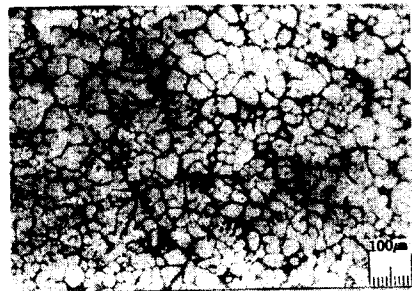
가압유지 실험에서 소재를 유도가열한 후 다이에 삽입할 때까지 약 5초가 소요되었으므로 주위의 열손실이 5초 동안 일어남을 알 수 있다. 주위로 열손실이 5초 동안 발생한 소재의 온도 분포를 Fig.3에 나타내었고, 이것은 소재와 다이의 열전달 유한요소 해석을 할 때 초기 온도로 사용한다. Fig.4 (a), (b)는 원소재의 미세조직을 나타내고 있고, Fig.5 (a), (b)는 소재를 가열한 후, 5초 동안 주위에 의해 열손실이 발생된 소재의 미세조직을 나타내는데, 미세 조직의 입자크기(grain size)는 Jeffries planimetric method⁽¹⁰⁾를 사용하여 구하였다. 원소재의 입자크기는 횡단면(horizontal cross section)에 대해서는 약 37.0 μ m이고, 종단면(vertical cross section)에 대해서는 약 38.4 μ m였다. 위의 방법으로 가열한 소재의 입자크기는 횡단면에 대해서 약 47.6 μ m이고, 종단면에 대해서는 약 49.8 μ m이다. 따라서 가열하는 동안에 원소재의 고상입자들이 성장함을 알 수 있다.



Fig.3 Distribution of temperature for slug lost by convection

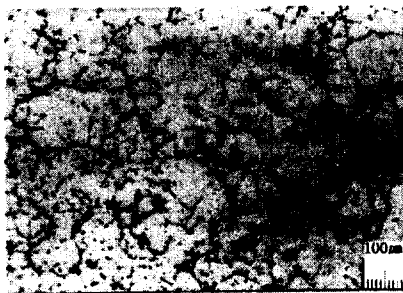


(a) Horizontal cross section

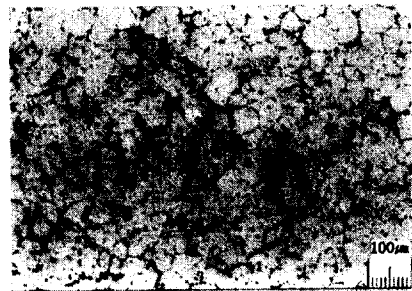


(b) Vertical cross section

Fig.4 Microstructure of original slug



(a) Horizontal cross section



(b) Vertical cross section

Fig.5 Microstructure of slug cooled in the air for 5sec after heating

3.3 밀폐 압축공정에 대한 가압유지 실험

3.2절에서 구한 소재의 온도 분포를 초기 온도로 이용하여 펀치의 가압하중을 15톤으로 하였을 경우에 접면열전달계수를 산출하기 위하여 가압유지 시간은 20초로 하였는데, 그 이유는 소재의 고상률이 100%가 되는 시간을 예측할 수 없기 때문에 소재가 완전히 고상으로 되는 시간을 20초로 가정하였기 때문이다. 실험에 의해 얻은 소재, 다이 그리고 펀치의 온도를 유한요소해석에서 계산된 온도와 비교하여 황금 분할법으로 접면열전달계수를 구한 후에 잠열을 고려한 열전달유한요소해석으로 소재의 고상률 분포를 계산하여 가압유지 시간을 예측하는데, 11초임을 알 수 있다.

3.4 제품의 미세조직

3.3절에서 예측한 가압유지 시간을 검증하기 위해서 예측한 가압유지 시간인 11초로 성형한 제품과 가압유지 시간을 1초로 성형한 제품 그리고 가압유지 시간을 21초로 성형한 제품에 대해서 제품의 치수를 조사하고 미세조직을 관찰하였다. 또한 유한요소 해석과 최적화기법으로 구한 가압유지 시간의 타당성을 검증하기 위해서 최적의 가압유지 시간으로 성형한 경우와 가압하지 않고 성형만 한 경우 그리고 최적의 가압시간의 약 2배로 가압하여 성형한 경우에 대해 미세조직의 입자크기를 측정하였다. 조직의 입자크기는 소재의 중심부를 기점으로하여 횡단면과 종단면에 대해서 관찰하였다. Fig.6 (a), (b)는 미세조직 사진의 입자크기를 결정하기 위해 사용된 실린더형 밀폐 압축 제품의 영역을 나타내고 있다.

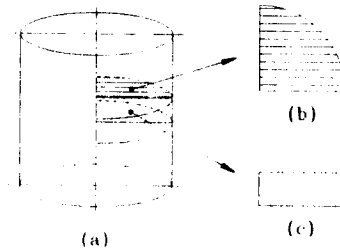


Fig.6 Position to observe microstructure for cylindrical part
 (a) cylindrical part (b) horizontal cross section
 (c) longitudinal cross section

4. 결과 및 고찰

실험과 유한요소해석에 의해 가압유지 단계에서 소재의 고상률이 100%가 되는 시간은 11초였다. 이 때, 소재와 다이 사이의 접면열전달계수를 시간에 대해서 Fig.7에 나타내었다.

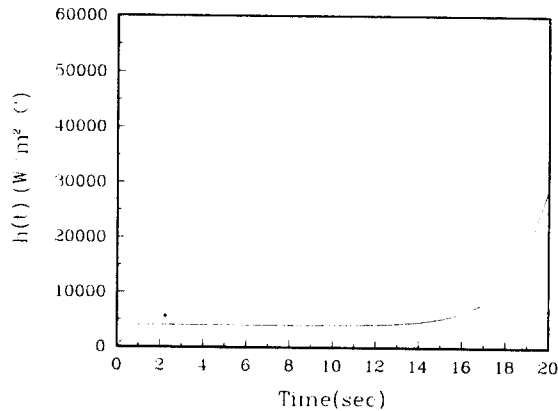


Fig.7 Variation of overall heat transfer coefficient on the time

Fig.7로 부터 약 16초 되는 시점에서 접면열전달계수가 급격히 상승하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 소재의 잠열이 다이에 완전히 방출하여 소재의 내부에너지가 급격히 감소하여 다이와 펀치 그리고 압력판에 많은 열이 전달되었기 때문으로 생각한다.

유한요소해석에서 구한 온도가 실험에서 구한 온도보다 약 $40^{\circ}C$ 정도 높은 것을 알 수 있는데,

이것은 해석에서 다이의 대류열전달계수와 다이와 펀치사이의 열전달계수를 상수로 두었기 때문이라고 생각한다. 특히 유한요소해석으로 구한 압력판의 온도가 실험에서 얻은 온도보다 다소 높은 이유는 압력판 아래에 고정구(holder)와 지지대(supporter)가 있어서 실제 대류에 의한 영향이 적으므로 해석상에서 이러한 조건을 고려하지 않았기 때문이다. 그러나 해석결과와 실험결과가 정성적으로 일치함을 알 수 있다. 이렇게 구한 접면열전달계수를 이용하여 열전달 유한요소해석을 수행하였는데, Fig.8은 원소재와 가열소재 그리고 가압하중이 15톤 일 때, 가압유지 시간을 1초, 11초 그리고 21초로 변화시켰을 때의 최종제품을 나타내고 있다.

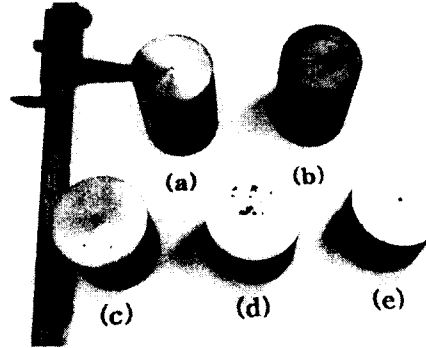


Fig.8 Slugs and parts related to compression holding experiment
 (a) Initial slug (b) Induction heated slug
 (c),(d),(e) Part of 1sec, 11sec, 21sec respectively

각각의 가압유지 시간에 따라 성형한 결과 최종제품의 직경은 49.65mm, 49.98mm 그리고 49.98mm이다. 여기서 가압유지 시간이 1초일 경우에 최종 제품의 치수는 원하는 치수 보다 5%정도 작다는 것을 알 수 있다. 열전달 유한요소해석에 의해 가압유지 시간이 1초와 11초 그리고 21초인 소재와 다이의 온도 분포를 Fig.9에 나타내었다.

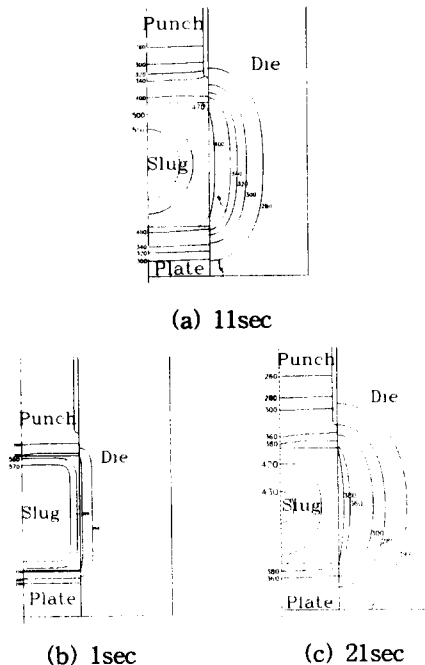
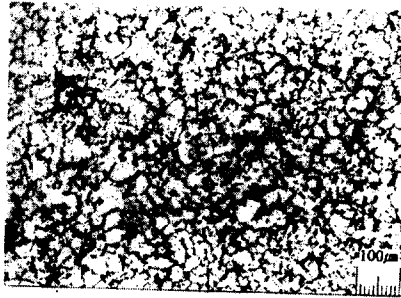


Fig.9 Distribution of temperature for slug and dies

가압유지 시간이 1초일 경우 소재 내부의 고·액 공존 영역이 전체의 90% 정도 차지함을 알 수 있고, 11초와 21초일 경우 소재 전체가 고상을 100%임을 알 수 있다. 따라서 반응용 단조의 가압유지 단계에서 소재 내부의 전체 고상률이 100%될 때까지 가압유지시키지 않으면 소재내부의 잔류액상의 수축에 의해 원하는 제품의 치수를 얻기 어렵고, 가압유지 시간이 예측한 가압유지 시간보다 긴 경우에는 제품 치수의 변화는 없음을 알 수 있다.

그리고 가압유지 시간이 1초, 11초, 21초인 제품의 미세조직을 Fig.10, 11, 12에 나타내었다. 가압유지 시간이 1초일 때, 소재내부의 잔류액상에 의해 고상과 액상영역이 불분명함을 알 수 있고, 나머지 시간대에서는 고상과 액상영역이 뚜렷함을 알 수 있다. Table 1은 원소재와 가열소재 그리고 가압유지 시간이 1초, 11초, 21초때의 미세조직의 고상 입자 크기를 나타내고 있다. 가열소재의 고상 입자 크기에 비해서 성형 후 가압유지 시킨 제품의 고상입자가 약 20%정도 감소함을 알 수 있는데, 이것은 소재가 성형후 가압유지 단계에서 고상 입자의 조밀화(densification)에 의한 것이라고 생각된다.

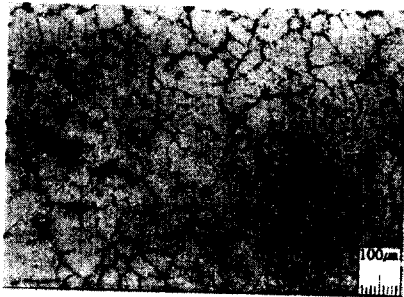


(a) horizontal cross section

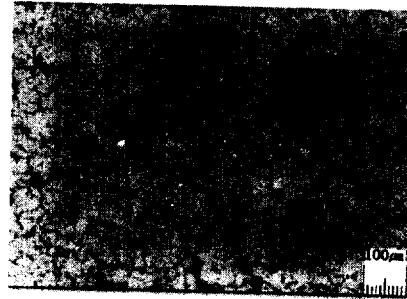


(b) vertical cross section

Fig.10 Microstructure of part for 1sec in compression holding time

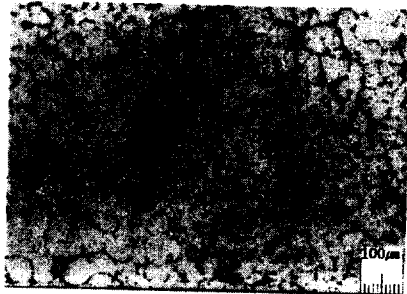


(a) horizontal cross section



(b) vertical cross section

Fig.11 Microstructure of part for 11sec in compression holding time



(a) horizontal cross section



(b) vertical cross section

Fig.12 Microstructure of part for 21sec in compression holding time

Table 1 Size of microstructure for original slug, heated slug and final parts

	Horizontal cross section	Vertical cross section
Original slug	37.0 μm	38.4 μm
Heated slug	47.6 μm	49.8 μm
Part of 1sec in compression holding time	37.1 μm	35.2 μm
Part of 11sec in compression holding time	38.7 μm	37.1 μm
Part of 21sec in compression holding time	41.8 μm	36.2 μm

5. 결론

본 연구에서는 반응용 재료의 밀폐 압축 공정에서 가압유지 시간이 제품의 미세조직에 미치는 영향을 조사하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 소재와 다이 사이의 접면열전달계수를 유한요소법과 최적화 기법을 이용하여 구한 후에 잠열을 고려한 열전달 유한요소해석을 수행하여 가압유지 시간을 예측하였으며, 실험으로 가압유지 시간의 변화에 대한 최종 제품의 치수와 미세조직을 확인하였다.
- (2) 원소재의 입자크기는 횡단면에 대해서는 약 37.0 μm 이고, 종단면에 대해서는 약 38.4 μm 이며 가열한 소재의 입자크기는 횡단면에 대해서 약 47.6 μm 이고, 종단면에 대해서는 약 49.8 μm 이므로 원소재의 고상 입자들이 가열되면서 고상 입자가 성장함을 알 수 있는 반면에, 가열소재의 고상 입자 크기에 비해서 성형 후 가압유지 시킨 제품의 고상입자가 약 20%정도 감소함을 알 수 있다.
- (3) 가압유지 시간이 1초일 때, 소재 내부의 잔류액상에 의해 고상과 액상영역이 불분명함을 알 수 있고, 예측한 가압유지시간 이후에는 고상과 액상영역이 뚜렷한데, 이것은 가압유지 단계에서 고상 입자의 조밀화에 의한 것임을 알 수 있다

참고문헌

- (1) N. Nicholas, W. Haws, L. Lane, J. Marder, "Semi-Solid Metal(SSM) formed small components of aluminum and aluminum-beryllium alloys", The 4th Int'l Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, pp.215-224, 1996.
- (2) 최재찬, 조해용, 민규식, 박형진, 최종용, "난가공성 경량소재의 반응용 단조에 관한 기초 연구", 한국정밀공학회지, 제13권, 제7호, pp.29-35, 1996.
- (3) 최재찬, 박형진, 이병목, 조해용, "반응용 단조에서 응고 현상을 고려한 가압유지 단계의 유한요소해석", 한국정밀공학회지, 제14권, 제10호, pp. 102-108, 1997.
- (4) Z. Malinowski, J. G. Lenard and M. E. Davies, "A study of the heat-transfer coefficient as a function of temperature and pressure", Journal of Materials Technology, pp.125-142, 1994.
- (5) 강연식, 양동열, "비등은 유한요소해석을 위한 접면열전달계수의 결정", 한국정밀공학회지 제14권 제4호, pp.72-77, 1997.
- (6) Yin-Heng Chen. "Study of Solidification, Shrinkage and Natural Convection in Casting Processes", Ph. D. Dissertation, The Ohio state Univ., 1990.
- (7) K. S. Chen, "Hydrothermomechanical Response Investigations Associated with Elastic Porous Media", Ph. D. Dissertation, The Ohio State University, 1986.
- (8) G. Hirt, R. Cremer, A. Winkelmann. T. Wituski, M. Zillgen, "Semi-Solid Forming of Aluminum Alloys by Direct Forging and Lateral Extrusion", Journal of Materials Processing Tecnology 45, pp.359-364, 1994.
- (9) 최재찬, 박형진, 김병민, "반응용 단조를 위한 소재의 유도 가열", 한국정밀공학회지 제14권 제8호, pp.15-20, 1997.
- (10) Vander. Veort. "Metallography Principle and Practice", McGraw-Hill Book Company, New York, pp.410-508, 1984.