

〈논 문〉

반용융 알루미늄재료의 제조 및 압축거동에 관한 실험적 연구

강충길* · 윤종훈** · 서영호**

(1995년 1월 19일 접수)

An Experimental Study on the Fabrication and the Compression Behavior of Semi-Solid Aluminum Material

Chung-Gil Kang, Jong-Hoon Yoon and Young-Ho Seo

Key Words : Semi-Solid Material(반용융재료), Reheating Time(재가열시간) Globularization(구상화), Cooling Rate(냉각속도), Shape Factor(형상계수), Dendritic Structure(수지상정조직), Surface Crack(표면균열)

Abstract

A fabrication process using Semi-Solid Material(SSM) for casting alloy has been studied to demonstrate the possibility for mass production with controlled solid fraction. The SSM was fabricated under the various solid fractions and preheating temperatures of mold. The behaviour of a semi-solid global microstructure has been investigated under the various heating and die temperatures for solid fraction. The effect of reheating time on the globularization of SSM microstructure has been investigated in detail. And the behavior of SSM which has the solid fraction 0.5 was observed under compression. The stress strain relationship was also obtained for the compression test of semi-solid materials. The rheological behaviour of semi-solid with globule microstructure was investigated as a function of the compression velocity under isothermal holding conditions.

기 호 설 명

f_s : 고상률

F_{shape} : 형상계수(shape factor)

N_L : 단위길이당 고상과 액상의 경계면의 개수

N_A : 단위면적당 고상 입자들의 개수

T : 반용융재료의 온도

T_L : 액상선 온도

T_m : 금형의 온도

T_s : 고상선 온도

t : 가압시간

t_r : 재가열시간

V_{die} : 다이속도

$\dot{\epsilon}$: 변형률속도

σ : 응력

1. 서 론

자동차 부품의 경량화를 위하여 최근 알루미늄재료를 이용한 단조공정이 많이 연구되고 있다. 알루미늄 단조공정은 가공한계성의 제한때문에 응용이 제한되어 있지만, 용융상태의 기지재를 반용융상태로 제조한 후 복합단조를 행하면 가공한계성을 극복할 수 있기 때문에 최근 반용융재료에 대한 기초 연구가 활발히 진행되고 있다. 다이캐스팅이나 용탕단조(squeeze casting)와 같이 액체상태의 재료

*회원, 부산대학교 정밀기계공학과

**회원, 부산대학교 대학원

를 이용하여 제품을 성형하는 경우는 제품내에 수지상정 조직이 존재하게 되어 제품의 기계적 성질이 균일하지 못하다. 그러나 반용용가공법으로 부품을 성형할 경우 반용용상태의 금속을 계속적으로 교반하면 수지상정 조직이 파괴되어 구상형태의 조직을 가진 제품을 얻을 수 있기 때문에 기계적 성질이 전체적으로 균일한 제품을 제조할 수 있다.

반용용재료에 대한 실험적 연구로서 Suery와 Fleming⁽¹⁾은 $1.3 \times 10^{-3} \text{s}^{-1} \sim 1.2 \times 10^3 \text{s}^{-3}$ 범위를 가지는 변형률속도에 대하여 반용용상태의 Sn-15% Pb합금의 압축변형거동에 관하여 연구하였으며, Kumar 등⁽²⁾은 Sn-15% Pb와 Al-7%Si-0.6% Mg 두 가지 반용용재료에 대하여 유동 거동을 예측하였다. 이 결과는 고상률이 0.1부터 약 0.5~0.6범위에서 잘 맞는 것으로 되어 있다. Sannes 등⁽³⁾은 반용용상태의 마그네슘합금을 이용한 항복점의 거동에 관한 연구를 하였다.

Yoshida 등⁽⁴⁾은 Al-4.5% Cu합금을 이용한 반용용단조를 통하여 액상의 유동상태와 미세구조에 관하여 연구를 하였다. Okano⁽⁵⁾는 반용용재료의 물리적인 특성에 관한 연구를 하였으며, 그 결과로서는 반용용금속의 점도와 주결정의 성장 및 반용용재료의 응고속도 등의 예측이 가능해졌으며, 알루미늄합금, 구리합금 및 철합금 등을 이용한 반용용재료의 연속적인 생산이 가능해졌다. 또한 반용용재료를 이용한 다이캐스팅, 단조, 압출, 연속주조, 주괴제조 등이 행하여지고 있으며, 더욱이 SiC 입자강화 알루미늄기지재 복합재료를 제조하는 기술에도 응용하고 있다.

이상의 연구결과에 의하면 반용용재료의 미세조직 및 구상화에 대한 연구가 대부분이고 반용용재료의 폐쇄 단조공정해석에 필요한 물성치 파악, 반용용재료의 제조공정변수에 따른 구상화의 정도 및 가열시간이 구상화에 미치는 영향 등에 관한 연구결과는 보고되지 않고 있다. 반용용재료를 이용하여 단조실험을 하기 위해서는 재료를 가열하여야 한다. 가열시간이 구상화에 미치는 영향을 파악하여야 단조시 소재의 최적 가열시간을 예측할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 높은 강도와 연성이 요구되는 복잡한 형상의 주물용으로 쓰이는 알루미늄합금 A356을 사용하여 고상률과 금형 예열온도 즉, 냉각속도를 변수로 하여 빌렛을 제조한 후 미세 조직을 관찰하여 구상화의 정도를 관찰하였다. 제조된 빌렛을 원하는 고상률(0.5)을 가지는 온도(600 °C)로 재가열하여 반용용재료를 가공할 때 재가열시간이 구상화에 미치는 영향을 파악하기 위하여 재가열시간의 변화에 따른 구상화의 변화과정을 조사하였다. 이러한 실험결과를 바탕으로 반용용재료의 압축실험을 통하여 미시적 및 거시적 거동을 파악하였으며 응력과 변형률속도와와의 관계식을 도출하여 반용용재료의 단조공정해석에 필요한 물성치를 구하였다.

2. 실험

2.1 반용용재료의 제조

반용용재료의 제조에 사용되어진 재료는 주조용 알루미늄합금인 A356이며 그 화학적 조성은 성분분석기를 이용하여 검사한 결과, 아래의 Table 1에 나타내었다.

2.1.1 용융과정

먼저 약 500 g 정도의 A356 재료를 도가니에 담아 용해용 전기로에 넣어 액상선 온도(615 °C) 이상의 온도까지 가열하여 완전히 용탕상태로 만든 뒤 Fig. 1에 나타난 바와 같은 교반용 전기로에 넣어 원하는 고상률이 0.5가 되는 온도인 600 °C까지 재료의 온도를 하강시켰다. 열전대의 수명을 향상시키기 위하여 세라믹재료로 코팅하여 반용용상태의 재료에 삽입하여 온도를 측정하였다.

2.1.1 교반과정

일정한 고상률의 온도까지 제어한 후 구상조직을 얻기 위하여 교반시간은 15분으로 하였으며 교반기의 위치는 도가니 밑바닥으로부터 약 10 mm 정도의 위치에 오도록 하였다. 교반용 임펠러는 SUS 316을 사용하여 직경 38~58 mm로 제작하였으며,

Table 1 Chemical composition of A356 aluminum alloy

Element	Si	Mg	Fe	Cu	Pb	Mn	Ti	Al
Mass(%)	6.70	0.43	0.27	0.06	0.01	0.09	0.04	Bal.

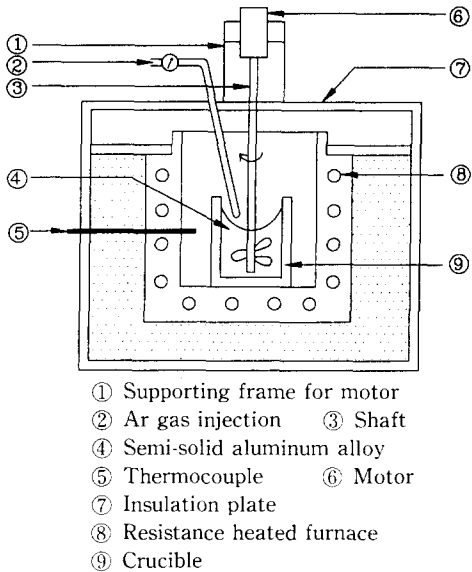


Fig. 1 A schematic diagram of furnace and stirring devices

날개각 45°, 날개수 3개로 하였으며, 지속적인 교반동안 알루미늄과의 접촉으로 인한 임펠러손상을 방지하기 위하여 세라믹재료로 코팅을 하여 사용하였다. 교반시간 동안 재료의 산화를 방지하기 위하여 계속적으로 아르곤 가스를 주입하였으며 또한 재료가 원하는 고상률을 가지는 온도에서 가급적 큰 범위로 벗어나지 않도록 교반용 전기로 내부와 반응용재료에 CA 열전대를 각각 삽입하여 온도를 제어하였다. 교반속도는 600~620 rpm으로 하였다. 여기서, A356 재료의 고상률과 온도와의 관계는 다음과 같은 식 (6)을 사용하였다.

$$f_s = \left[\frac{T_L - T}{T_N - T_S} \right]^{1/2} \times 100 (\%) \quad (1)$$

여기서, A356 재료에 대한 액상선과 고상선 온도는 각각 $T_L=615^\circ\text{C}$ 와 $T_S=555^\circ\text{C}$ 이다.

2.1.3 가압과정

교반완료후 반응용재료를 금형에 주입한 후 펀치로 가압하여 반응용재료를 제조하였다. 펀치의 최고 가압력이 100 MPa이 되도록 하였으며 이 때 가압속도는 약 20.1 mm/sec로 관찰되었다. 가압지연시간은 15초로 하였으며 가압완료 후 금형의 하부에 설치된 실린더를 이용하여 제조되어진 빌렛을 금형으로부터 추출하였다. 금형으로부터 빌렛을 추

출한 뒤 빌렛이 구상조직을 유지할 수 있도록 켈칭을 하였다. 반응용재료를 금형에 주입하여 가압할 때 냉각속도가 구상조직에 가장 큰 영향을 미친다. 따라서, 가압과정에서 재료의 구상조직에 영향을 미치는 실험변수로서는 가압력, 가압속도, 금형의 예열온도 등을 들 수 있다. 위의 3가지 인자중 가압력은 재료의 응고온도에 영향이 있으며, 용탕단조법에서는 일반적으로 75 MPa 전후로 하여 실험을 하지만, 본 실험에서는 최대속도를 얻을 수 있는 100 MPa로 하였다. 금형과 소재 사이의 열전달계수가 증대할수록 냉각속도가 증대되며, 또한 가압속도가 증대할수록 소재와 펀치 사이의 접촉시간이 적어져 냉각속도가 증대되기 때문에 본 실험 장치의 최대속도인 20.1 mm/sec로 하였다. 일반적으로 용탕단조법으로 빌렛을 제조할 때 금형의 예열온도를 250~300 °C로 하지만 반응용상태의 경우는 이에 관한 정보가 보고되지 않아 금형의 예열온도를 주요인자로 생각하여 실험변수로 하였다. 반응용재료의 금형 주입에서부터 가압후 반응용빌렛의 추출시까지 금형의 온도(몰드 내면으로부터 2 mm 위치) 변화를 DATA LOGGER와 퍼스널 컴퓨터를 이용하여 기록하였다.

2.2 반응용재료의 재가열 실험

반응용재료의 압축실험을 하기 위해서는 재료가 원하는 고상률을 가지는 온도에서 재가열시간에 따라서 조직이 달라지므로 이를 연구할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 재가열시간이 조직의 변화에 미치는 영향을 파악함과 동시에 최적의 재가열시간을 찾기 위하여 재가열실험을 하였다.

직경과 높이가 45 mm, 80 mm인 반응용빌렛으로부터 압축 시편을 가공한 후 각각 10, 20, 30분씩 시편을 분위기 온도에서 가열한 뒤 고상률에 해당하는 온도에서 켈칭하여 조직을 관찰하였다.

2.3 반응용재료의 압축실험 및 시편의 크기

반응용재료의 압축실험은 Fig. 2와 같은 유압쇄쇄회로방식의 MTS를 이용하여 행하였다. 이 때 압축 실험에 사용되어진 시편의 치수는 지름 $d=15$ mm, 높이 $h=20$ mm이다. 반응용소재의 고상률은 0.5이며 다이의 속도를 변화시켜 가면서 실험을 행하였다.

본 연구에서는 다이의 속도 V_{die} 를 이용하여 변형률속도를 다음과 같이 정의하였다.

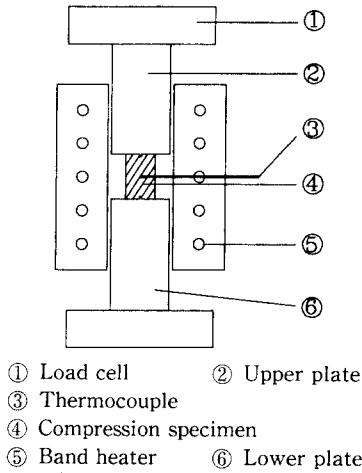


Fig. 2 A schematic diagram of experimental apparatus used for compression of semi-solid aluminum alloy

$$\dot{\epsilon} = \frac{V_{aie}}{h} = -\frac{1}{h} \frac{dh}{dt} \quad (2)$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 반응용재료의 제조 실험결과 및 고찰

냉각 속도가 구상화에 미치는 영향을 파악하기 위하여 반응용재료의 고상률과 금형의 예열온도중 고상률이 일정하고 금형의 예열온도가 변화하는 경우에 대하여 반응용재료의 내부(중심부)조직을 관찰하였다.

Fig. 3(a)~(c)는 $f_s=0.3$ 인 경우, 금형의 예열 온도 T_m 을 각각 220°C , 100°C , 25°C 로 하였을 때 제조되어진 반응용재료의 빌렛단면에서 고상부분이 가장 많이 관찰되는 부분을 나타낸 조직사진이다. 금형의 예열온도가 220°C 일 때는 대체적으로 응고조직이 삼각형이나 사각형 등 비교적 구상

형태와는 거리가 먼 형상을 나타내고 있다. Fig. 3(b)의 경우는 금형 예열온도가 100°C 일 때이며 Fig. 3(a)의 경우에 비하여 비교적 구상형태에 가까운 타원형 상이 대부분이다. Fig. 3(c)는 금형의 예열온도가 상온으로서, Fig. 3(a), (b)에 비하여 매우 양호한 구상형태의 조직을 가짐을 알 수 있다. Fig. 3(a)~(c)로부터 고상률이 일정한 경우 금형의 예열온도가 낮을수록, 즉 냉각속도가 빠를수록 반응용재료의 조직형태는 구상형태에 가까워짐을 알 수 있다. 위의 원인은 냉각속도가 빠를수록 구상형태의 고상 입자(solid grain)의 경계면으로부터 수지상정조직이 성장할 수 있는 시간적 여유가 적기 때문에 금형의 온도가 낮을수록 양호한 구상 조직이 얻어진 것이다.

금형의 온도가 상온일 때 반응용재료의 조직이 구상형태를 가짐을 알고 난 후 금형의 온도를 상온으로 고정시키고 나머지 실험변수인 고상률을 변화시키면서 제조되어진 반응용재료의 조직을 관찰하였다.

Fig. 4(a)~(c)는 금형 초기온도가 상온일 때 고상률 f_s 가 각각 0, 0.3 및 0.5인 경우 빌렛단면의 전체적인 경향을 관찰한 후 평균적인 조직관찰 결과를 나타낸 것이다. Fig. 4(a)의 경우는 $f_s=0$ 인 경우를 나타내며 그림의 하단부와 같이 수지상정조직이 관찰되었다. 이러한 응고 조직은 수지상정의 성장방향과 그 직각방향에 있어서 기계적 성질이 다르기 때문에 성형된 부품의 기계적 성질을 전체적으로 불균일하게 만드는 결과를 초래할 것이다. Fig. 4(b), (c)는 고상률이 각각 30%, 50%인 경우에 해당되는데 구상형태의 조직을 가지며 이러한 조직은 고상 입자들의 형태가 구형이므로 수지상정조직에 비하여 성형된 부품의 기계적 성질을 균일하게 한다.

Fig. 5는 금형의 온도를 상온으로 유지하고 고상

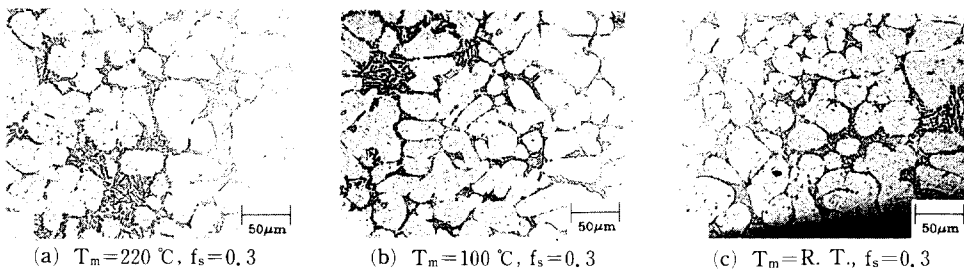


Fig. 3 Optical micrographs of semi-solid aluminum alloy with various mold temperatures

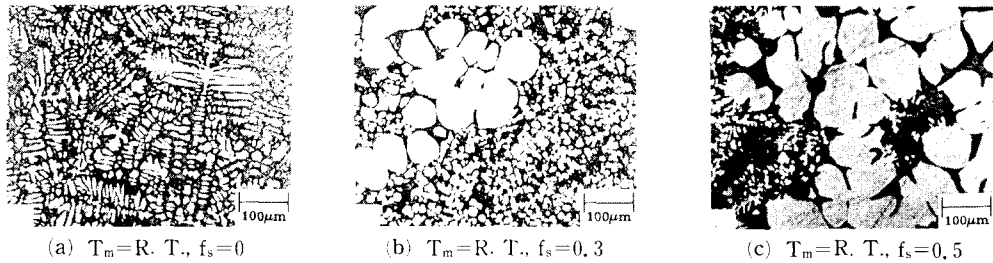


Fig. 4 Optical micrographs of semi-solid aluminum alloy with various solid fractions.

율이 각각 0, 0.3, 0.5인 반응용재료를 각각 볼드에 주입하고 100 MPa 로 가압하였을 때 몰드 내면으로부터 2 mm 위치에서의 온도변화를 나타낸 것이다. Fig. 5의 $t=0$ 의 의미는 반응용재료를 금형의 케비티내에 주입한 직후 6 sec 이후 펀치의 표면이 용융재료의 표면에 접촉하는 시간부터 금형의 온도를 측정하는 시간이기 때문에 $t=0$ 에서 25 °C 로 표현되어 있지 않다. 이 곡선에서 보여주는 바와 같이 빌렛 제조과정동안 온도의 증감이 일어나고 있음을 알 수 있다. 반응용재료의 용탕공정중 $t=0 \sim 22$ sec 동안은 펀치하강과 가압지연시간으로써 금형내부의 표면과 소재사이에서 접촉시간의 증가로 인하여 금형의 온도가 상승함을 보여주고 있다. $t=22$ sec 이후부터는 펀치가 케비티로부터 분리되어 금형이 공기와의 접촉으로 인하여 열에너지를 빼앗기기 때문에 금형의 온도가 시간의 증가와

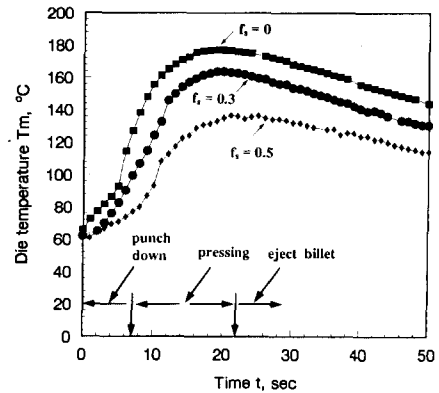


Fig. 5 Temperature history under various solid fractions at constant mold temperature, $T_m=R. T.$

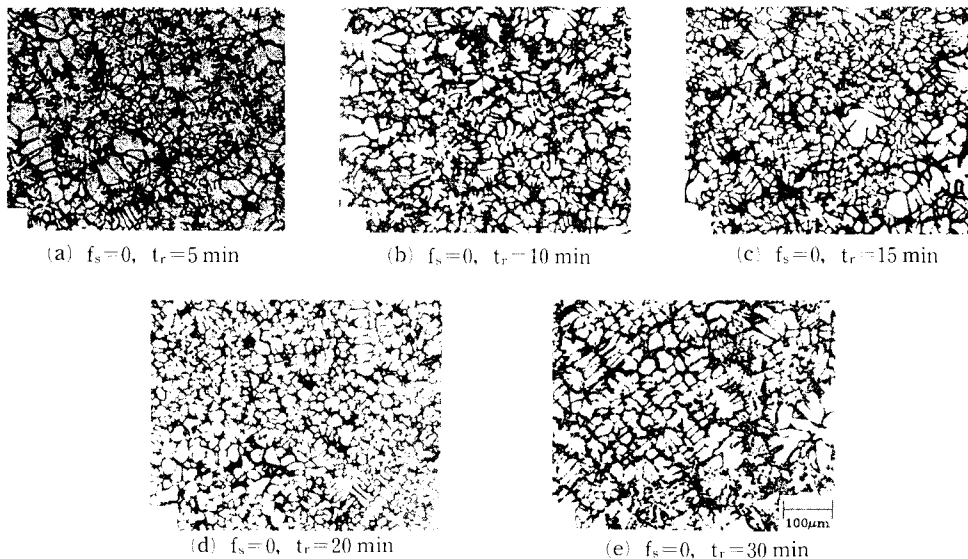


Fig. 6 Optical micrographs of 0% semi-solid aluminum alloy according to various reheating time

더불어 감소함을 알 수 있다.

3.2 재가열 실험결과 및 고찰

Fig. 6(a)~(e)는 $f_s=0$ 일 때 재가열시간의 변화에 따른 반응용재료의 내부조직변화를 관찰한 것이다. Fig. 6(a)~(c)는 결정립의 크기가 상당히 불규칙하며 재가열시간이 길어질수록 결정립이 서로 합쳐지거나 확산으로 인해서 성장하는 모양을 관찰

할 수 있다. Fig. 6(d)는 재가열시간 20 분으로서 상당히 균일해진 조직을 볼 수 있으나, 반응용재료에서 나타나는 구상화조직과는 뚜렷이 구별이 된다. Fig. 6(e)는 재가열시간이 더 길어짐으로 인해서 결정립이 더욱 성장하여 타원형상에 가깝게 길게 성장하는 모양이 많이 관찰된다. 이로써 재가열시간이 20분을 넘어서면 결정립의 조대화현상이 불규칙하게 나타나는 것을 알 수 있다.

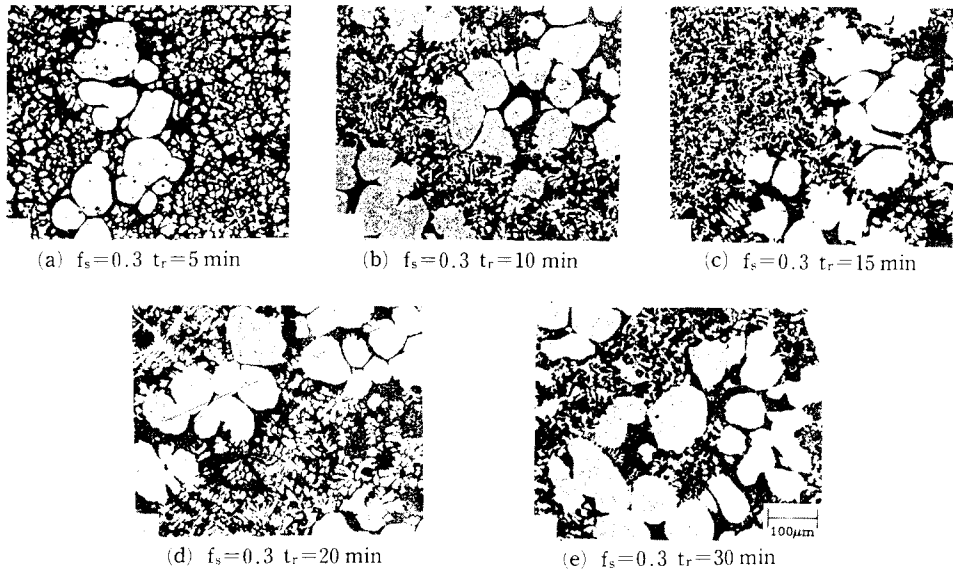


Fig. 7 Optical micrographs of 30% semi-solid aluminum alloy according to various reheating time

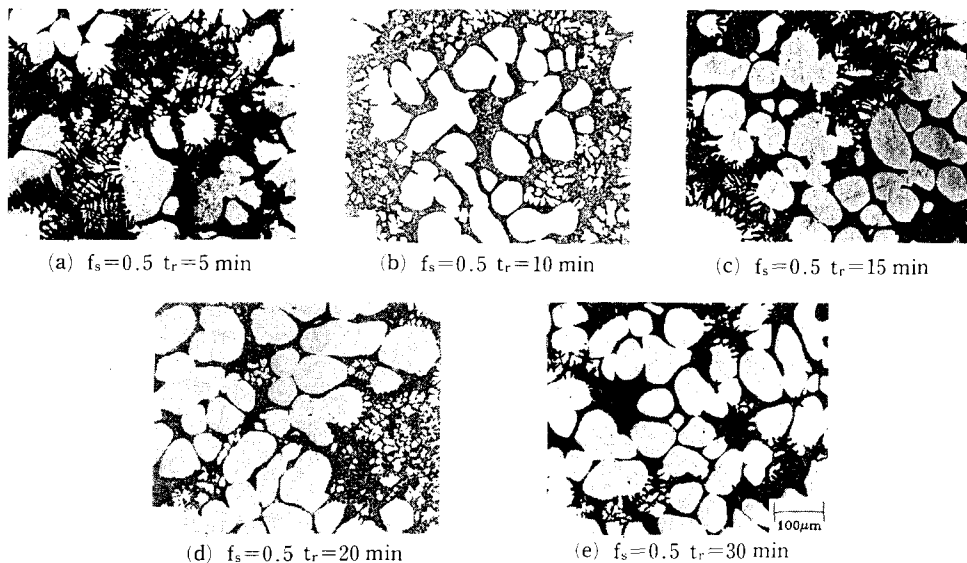


Fig. 8 Optical micrographs of 50% semi-solid aluminum alloy according to various reheating time

Fig. 7(a)~(e)는 $f_s=0.3$ 일 때 재가열시간의 변화에 따른 반응용재료의 조직변화를 관찰한 것이다. Fig. 7(a)의 재가열시간이 5분인 경우는 아직 구상화 조직이 전체적으로 나타나지 않은 단계이다. 재가열시간 10분과 15분의 Fig. 7(b)와 Fig. 7(c)는 구상화 조직의 양이 증가한 것을 알 수 있다. 그러나 구상화 조직 사이의 덴드라이트조직이 여전히 매우 불규칙한 모양을 유지하고 있다. Fig. 7(d)의 구상화 조직은 앞의 Fig. 7(b)(c)와 크게 달라진 것이 없으나 덴드라이트조직이 성장하여 타원형상으로 되는 것을 관찰할 수 있다. Fig. 7(e)는 전체적으로 구상화 조직이 규칙적으로 나타났으며, 덴드라이트조직의 조대화현상이 가속되어 서로 합쳐져서 커지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 8(a)~(e)는 $f_s=0.5$ 일 때 재가열시간에 따른 반응용재료의 조직변화를 나타낸 것이다. Fig. 8(a)는 재가열시간이 5분인 경우로써 구상화 조직이 드러나지 않고 있으며, 수지상정조직들이 남아 있다. Fig. 8(b)는 재가열시간 10분인 경우로써 고상입자들의 형상은 긴 타원형상이 주를 이루고 있으며 큰 고상입자들 주위를 아주 작은 수지상정조직들이 둘러싸고 있음을 알 수 있다. Fig. 8(c)는 재가열 시간 15분인 경우로써 앞의 두 경우보다 구상화가 더 잘 되었다는 것을 알 수 있다. 재가열시간 20 분인 Fig. 8(d)는 구상화가 많이 됨과 더불어 수지상정조직도 그 형상이 둥글게 되는 것을 관찰할 수 있다. 재가열시간이 30 분인 Fig. 8(e)는 구상화의 정도는 재가열시간이 20 분인 경우와 비슷하나 고상 입자들 주위의 작은 수지상정조직이 Fig. 8(c), (d)에 비하여 많이 감소되어 있다.

위의 재가열시간이 반응용재료의 구상조직에 미치는 영향은 다음과 같은 식으로 표시되는 형상계수(shape factor)를 이용하여 설명할 수 있다.⁽⁷⁾

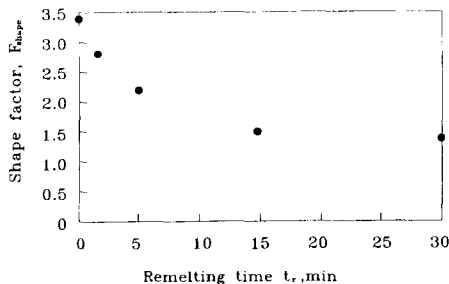


Fig. 9 Evolution of F_{shape} with remelting time for A357⁽⁷⁾

$$F_{shape} = \frac{8N_N^2}{3\pi f_s N_A} > \quad (3)$$

여기서, F_{shape} 는 반응용재료의 형상계수를 나타내는 값으로서 F_{shape} 가 1에 가까울수록 조직은 구상형태에 가까워짐을 의미한다. π 는 원주율을 의미하며, f_s 는 재료의 고상률, N_A 는 단위면적당 고상 입자들의 개수, N_N 은 단위길이당 고상과 액상의 경계면의 개수이다.

식 (3)에서 $f_s=0\%$ 인 경우에는 F_{shape} 가 이론적으로 무한대가 되어 재가열시간이 아무리 클지라도 고상 입자들이 구형에 가까워질 수 없음을 의미한다. 따라서 $f_s=0\%$ 인 경우에는 재가열시간이 클수록 어느 정도까지는 조직이 미세해질 것으로 사료되나 그 이후부터는 재가열시간에 무관할 것으로 생각된다.

$f_s=50\%$ 의 경우 본 실험에서는 재가열시간이 20 분 정도일 때를 정점으로 하여 이 보다 짧은 시간에서는 재가열시간에 따라서 조직의 변화가 많이 일어나며, 그 이후의 시간에서는, 즉 20분과 30분

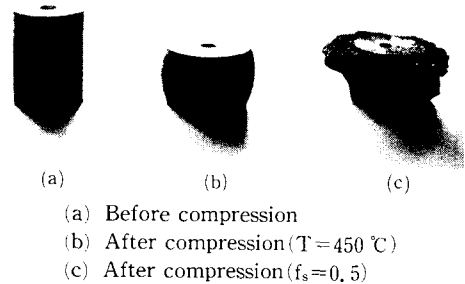


Fig. 10 Deformation behavior of compression specimen

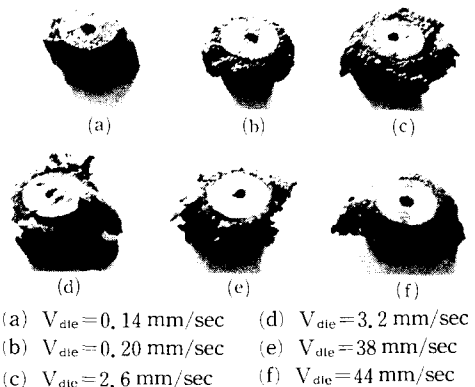


Fig. 11 Deformation behavior of compression specimen after compression

에서는 큰 차이가 나타나지 않음을 알 수 있다. 이러한 원인으로서는 Salvo 등⁽⁷⁾이 A375 재료를 이용하여 실험한 결과에 의하면 재가열 초기에는 F_{shape} 값이 급격히 감소하다가 약 15~20분을 넘어서면서부터 F_{shape} 값의 변화가 아주 완만하기 때문인 것으로 생각된다. Fig. 9는 Salvo 등의 A357 재료에 대한 재가열 실험결과를 형상계수 F_{shape} 와 재가열시간에 대하여 나타낸 곡선이다.

3.3 압축실험 결과 및 고찰

Fig. 10(a)~(c)는 길이 $h=60\sim70$ mm, 직경 $d=35$ mm로 제조되어진 반응용재료를 $d=15$ mm, $h=20$ mm로 기계가공한 시편과 열간압축 및 반응용 상태에서 압축실험한 후의 형상을 나타낸 것이다. 반응용 상태에서 압축한 시편의 표면이 열간압축시편보다 나쁘기 때문에 자유 표면이 존재할 수 없도록 폐쇄단조형태의 가공법이 필요할 것이다.

Fig. 11(a)~(f)는 다이의 속도가 각각 다를 때 압축된 시편을 나타내는 사진이다. $V_{die}=2.6\sim44$ mm/sec인 경우는 본 실험에서 $V_{die}=0.14\sim0.20$ mm/sec에 비하여 압축시편의 표면에 결함이 현저하게 발생하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 12는 압축실험시 재료의 공칭응력-진변형률 관계를 변형률속도에 대하여 각각 나타낸 그림이다. 본 연구에서 진변형률의 측정은 어렵기 때문에 공칭변형률 e 를 구하여 $\epsilon=1n(1+e)$ 의 식에 의하여 계산한 data를 이용하였다. 초기에는 반응용재료의 조직의 치밀화 및 액상의 유동을 유발시키기 위하여 하중이 상승하지만 시편 표면 부분의 균열 발생 및 분리현상으로 인하여 하중이 감소하다가

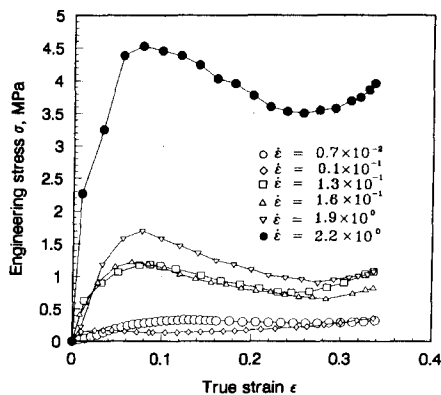


Fig. 12 Engineering stress-true strain curves from the experimental results

재료의 조직이 어느 정도 치밀화되면서부터 고상영역의 소성변형으로 인하여 하중이 증가하는 것으로 생각된다.

Fig. 13(a)~(c)와 Fig. 14(a)~(c)는 다이속도가 각각 0.14 mm/sec, 44 mm/sec일 때 압축후 시편의 조직을 나타낸 것이다. 검게 나타난 부분은 액상이 빠져나간 후 그 주위의 다른 액상이나 고상이 그 자리를 채우지 못함으로 인하여 생긴 기공이다. 각

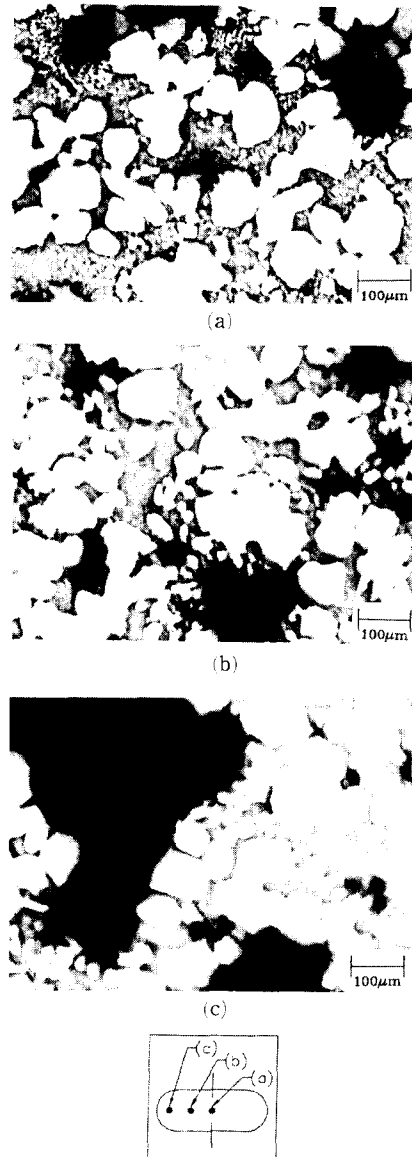


Fig. 13 Optical micrographs of semi-solid compression specimen with $V_{die}=0.14$ mm/sec, $f_s=0.5$

사진에서 시편 중심부 (a)와 시편 중심부와 자유 표면 근처 (c)의 중간지점 (b)는 기공의 형성에 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 중심부 (a)와 자유 표면 근처 (c)를 비교해 보면 중심부보다 자유표면 쪽에 액상 유출이 상대적으로 크다는 것을 알 수 있다. 특히 속도가 작은 Fig. 13(a)~(c)의 경우가 속도가 큰 Fig. 14(a)~(c)의 경우보다 상대적으로 액상 유출의 흔적이 더 많음을 알 수 있다.

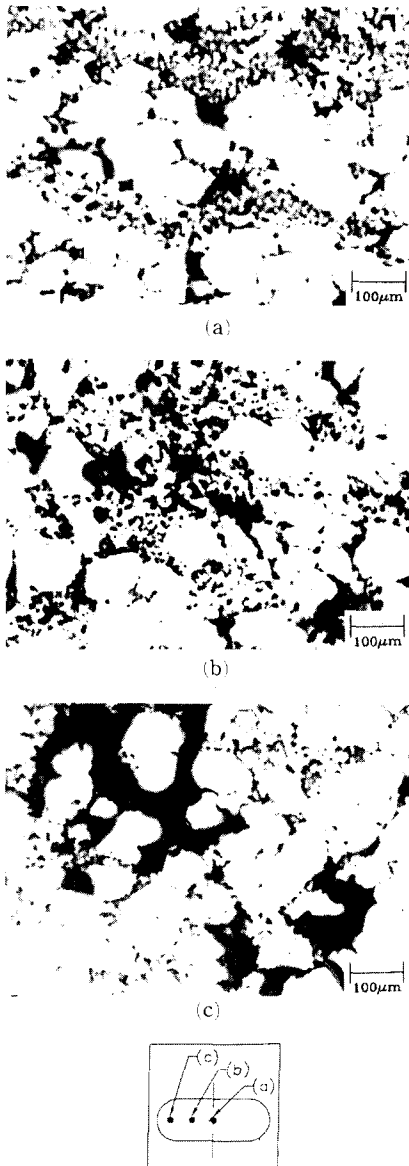


Fig. 14 Optical micrographs of semi-solid compression specimen with $V_{die}=44$ mm/sec, $f_s=0.5$

이상은 주조용 알루미늄재료의 반응용단조 (semi-solid forging)를 위한 기초연구로서 향후 고상물의 변화, 구상화 정도 파악, 제조공정 및 새로운 응력-변형률속도의 관계식이 도출되어야 할 것이다.

4. 결 론

반응용 알루미늄재료의 압축거동에 대한 실험 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) A356을 이용한 반응용재료의 제조시 초기 금형온도가 상온일 때 양호한 형태의 구상조직을 얻을 수 있었으며, 이러한 구상조직은 제품의 기계적 성질을 균일하게 하는데 중요한 역할을 할 것이다.

(2) 고상율이 30%와 50%인 A356 반응용재료의 조직을 구상화시키는데 최적의 재가열시간은 약 20~30분 정도임을 알 수 있었다. 고상율이 높을수록 약간 더 긴 재가열시간이 필요할 것으로 사료된다.

(3) 반응용재료의 압축성형시 다이의 속도가 작을수록 고상과 액상의 분리현상이 현저하게 나타나며, 따라서 고상과 액상의 거시적인 분리현상을 억제하기 위해서는 다이의 속도를 가급적 크게 하여야 할 것이다.

(4) 반응용재료의 표면균열을 피하고, 균일한 제품을 얻기 위한 가공형태는 폐쇄단조형태의 가공방법이어야 한다.

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구센터의 지원에 의하여 이루어진 연구의 일부로서써 관계자에게 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Suery, M. and Flemigs, M. C., 1982, "Effect of Strain Rate on Deformation Behavior of Semi-Solid Dendritic Alloys," *Metall. Trans.*, Vol. 13A, pp. 1809~1819.
- (2) 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.
- (3) Sannes, S., Gjestland, H., Arnberg, L. and Solberg, J. K. , 1994, "Yield Point Behavior of Semi-Solid Mg Alloys," *The 3rd Int'l Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*, pp. 271~280.
- (4) Yoshida, C., Moritaka, M., Shinya, S. , Yahata, S., Takebayashi, K. and Nanba, A., 1992, "Semi-Solid Forging of Aluminum Alloys," *The 2nd Int'l Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*, pp. 95~102.
- (5) Okano, S., 1994, *Research Activities in Rheology Technology Ltd., The 3rd Int'l Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*, pp. 7~18.
- (6) Ohnaka, I. , 1984, "Introduction to Heat and Solidification Analysis by Computer (In Japanese)," *Maruzen Press*, Tokyo, pp. 326.
- (7) Salvo, L., Loue, W. R. and Suery, M., 1994, "Influence to Thermomechanical History on The Structure and Rheological Behaviour of Semi-solid Al-Alloys," *The 3rd Int'l Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*, pp. 261~270.