

<논 문>

반용융 알루미늄재료의 단조공정조건이 기계적 성질에 미치는 영향

강 충 길* · 강 동 우**

(1996년 10월 25일 접수)

The Effect of Forging Process Conditions of Semi-solid Aluminum Material on Mechanical Properties

C. G. Kang and D. W. Kang

Key Words : Semi-solid Forging(반용융단조), Solid Fraction(고상률), Globular Microstructure(구상화 조직), Gate Shape(게이트형상), Filling Behavior(충전거동), Reheating(재가열), Semi-solid Material(반용융재료)

Abstract

Semi-solid forging (SSF) process of A356 aluminium alloy has been studied to assess the effect of process variables on the component integrity. Semi-solid material (SSM) was fabricated by mechanical and electro-magnetic stirring process. The fabricated SSM by using mechanical stirring process has been carried out on cooling rate of 0.022°C/sec 0.0094°C/sec and stirring speed $n=600, 1000$ rpm, respectively. The fabricated SSM by using electro-magnetic stirring process is supplied by Pechiney. The holding time and temperature in the semi-solid state before forging also affects the globular microstructure of alloy. Therefore, the influence of these two parameters is discussed in terms of the microstructure of alloy. The SSF process has been conducted with three different die temperatures ($T_{die}=250^{\circ}\text{C}, 300^{\circ}\text{C}, 350^{\circ}\text{C}$) and two kinds of gate types (straight gate and orifice gate). This paper is to investigate the influence of gate shapes of die on filling phenomena in SSF process more deeply. The mechanical properties of forged components were also investigated for variation of process conditions such as die temperature, gate shape and SSM.

1. 서 론

알루미늄을 이용한 경량화 부품의 개발은 주로 액체상태로부터 원하는 형상의 부품을 직접 제조하는 다이캐스팅이나 용탕단조법(squeeze casting)에 의해 이루어지고 있다. 그러나 전자는 용탕이 캐비

티(cavity) 내부로 유입될 때 난류로 인한 공기의 포집과 수축에 의한 결함이 있고, 후자는 용탕의 과열도때문에 금형의 수명을 단축시키는 결점이 있다. 이러한 문제점들을 해결할 수 있는 방법으로 반용융단조(semi-solid forging)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 반용융상태에서의 성형은 기존의 단조공정에 비해 적은 하중으로도 복잡한 형상의 부품을 한 공정으로 만들 수 있고, 액체상태보다 높은 점성으로 인해 충전시 유동형태가 난류

*회원, 부산대학교 기계공학부

**부산대학교 대학원

Table 1 Chemical compositions of A356 aluminum alloy

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

로 발달하지 않기때문에 재료내부에 기공 및 가스를 포함하는 결함이 적고 초기온도가 낮기때문에 금형의 열피로를 줄일 수 있다.

반용용 가공은 여러 가지 장점을 가지고 있기 때문에 1972년에 Flemings에 의해 처음 제안되어진 이후 많은 연구가 이루어졌다. ⁽¹⁾ Suéry 등⁽²⁾은 변형률속도가 $1.3 \times 10^{-3} s^{-1} \sim 1.2 \times 10^3 s^{-1}$ 범위를 가지는 Sn-15% Pb 합금의 변형거동에 관해 연구하였으며, Kumar 등⁽³⁾은 Sn-15% Pb 합금의 유동특성에 관해 입자들의 상호작용을 고려한 수학적 모델을 제시하였다. Turng 등⁽⁴⁾은 Sn-15% Pb 반용용 재료의 물리적 특성을 실험적으로 연구하여 결보기점도를 고상률과 전단변형률속도의 함수로 제안하였다. Hirai 등⁽⁵⁾은 Al-10% Cu 재료의 반용용재료에 대해 결보기점도를 액상의 점도, 고상률과 냉각속도, 전단변형률속도의 함수로 제안하였다.

Okano⁽⁶⁾는 반용용재료의 물성실험을 통해 Hirai⁽⁵⁾의 점성식을 보다 일반화시켜 반용용재료의 고상률이 40%이하일 때는 액상과 고상의 거시적인 분리현상이 잘 일어나지 않으며, 일정한 고상률일지라도 변형률속도에 따라 결보기점도가 크게 변한다고 보고하고 있다.

Toyoshima 등⁽⁷⁾은 고상률이 10%~40%인 반용용재료인 알루미늄재료를 이용한 다이캐스팅실험에서 고상률이 높을수록 양호한 제품을 얻을 수 있다고 보고하고 있다. Hirt 등⁽⁸⁾은 고상률이 40%~80%인 경우 반용용 알루미늄재료의 단조공정에 관한 실험연구를 하여, 금형의 온도가 150°C~300°C 사이가 되어야 한다는 결론을 얻었다. Peng 등⁽⁹⁾은 Turng 등⁽⁴⁾의 연구를 바탕으로 나선형 부품의 성형공정에 있어서 반용용재료의 거동현상에 관하여 연구하였다.

지금까지 발표되어진 연구들은 반용용재료의 특성을 조사한 것이 대부분이고, 실제 임의 형상의 부품을 제조하기 위하여 단조실험을 한 예는 보고되지 않고 있다. 반용용 단조공정에 있어서 금형온도, 게이트의 형상 등이 단조품의 기계적 성질에 미치는 영향을 조사한 보고는 아직까지 발표되지 않고 있다.

따라서, 본 연구에서는 단조공정에 필요한 반응용재료의 최적 재가열시간을 조사하기 위하여 재가열온도와 재가열유지시간을 변수로 하여 조직의 구상화 정도를 파악하였다. 반응용재료의 제조방법에 따른 재가열효과를 파악하기 위하여 실험실에서 기계식 교반으로 제조한 재료와 전자식 교반에 의해 제조한 두 가지의 재료에 대하여 실험을 하였다.

반용용단조를 위하여 소재를 가열할 때 재료 표면에 산화막이 형성된다. 이러한 산화막이 단조품의 기계적 성질에 미치는 영향을 파악하기 위하여 직선형게이트와 오리피스형게이트를 사용하였다. 또한 단조품의 부위별 조직관찰을 통해 충전시 반응용재료에 포함되어 있는 고상입자와 액상입자의 거동을 예측하였으며, 단조품의 부위별 인장실험 결과와 미세조직과의 관계를 조사하였다.

2. 실험

2.1 반응용재료의 제조

반용용재료의 제조에 사용되어진 재료는 주조용 알루미늄합금인 A356이며, 성분분석기를 이용하여 검사한 재료의 조성을 아래 Table 1에 표시하였다.

기계식 교반법에 의하여 반응용재료를 제조하는데 있어서 가장 중요한 실험변수는 냉각속도와 전단변형률속도이다. 냉각속도는 핵성장에 필요한 결정입자의 크기에 영향을 미치고, 전단변형률속도는 수지상조직을 파단시키는 역할을 하기 때문에 냉각속도와 전단변형률속도가 클수록 결정입이 미세한 구상화 조직을 얻을 수 있다.⁽¹⁰⁾ 그러나 실험공정에 있어서 냉각속도를 크게 할 경우 고상입자들 간의 상호작용에 의한 응집현상이 발생하기 때문에 낮은 냉각속도 하에서 제조하여야 하며,⁽¹¹⁾ 구상화의 크기는 냉각속도와 전단변형률속도의 함수이므로 그 정량적인 관계가 파악되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 이러한 현상을 고려하여 단조용 소재를 제조하기 위하여 기계식 교반법에 의하여 실험을 하였다.

Fig. 1은 반응용소재를 제조하는 장치의 개략도

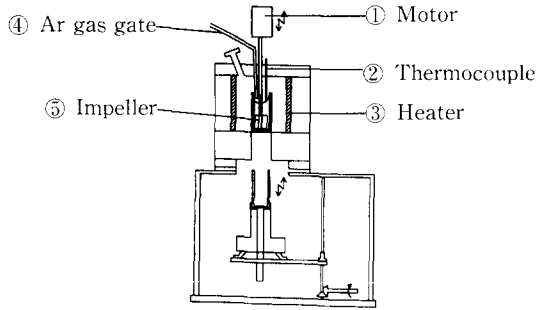


Fig. 1 Schematic diagram of furnace and stirring devices

이다. 본 장치는 저자가 제작한 장치를 개조한 것으로써 반응용 금속을 신속하게 볼드에 주입하여 빌렛을 제조하기 위하여 하부쪽으로 반응용재료를 도출하게끔 되어 있다. 교반시 임펠러를 상하이동하게 하여 고상입자가 균일한 반응용상태의 소재가 제조되도록 하였다.

2.1.1 용융 및 교반과정

약 500 g정도의 A356 재료를 도가니에 남아 용해용 전기로에 넣어 액상선온도(615°C) 이상의 온도까지 가열하여 완전히 용융상태로 만든 뒤 용탕 표면의 산화막을 제거한 후 교반을 시작하였다. 액체상태의 용탕을 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 교반용 전기로에 넣어서 원하는 고상물에 대응하는 온도까지 냉각시켰다. 용탕의 온도가 약 630°C±3°C 정도일 때 교반을 시작하였고, 용탕을 계속적으로 냉각시키면서 액상선온도에서 원하는 고상물에 대응하는 온도까지의 시간을 측정하여 냉각속도를 구하였다. 교반용 임펠러는 SUS316을 사용하여 직경 약 60 mm로 제작하였으며, 날개각 45°로 하였다. 날개수를 1단 3개와 2단 6개 2가지를 사용하여 빌렛을 제조하였다. 지속적인 교반동안 용탕과의 접촉으로 인한 교반기의 손상을 방지하기 위하여 그라파이트로 코팅을 하여 사용하였다. 교반시간동안 산소와의 접촉으로 인한 재료의 산화를 방지하기 위하여 계속적으로 아르곤가스를 주입하여 산소와의 접촉을 막았다. 재료의 정확한 고상률 제어를 위해 CA 열전대를 용탕에 삽입하여 원하는 고상률에 도달하였을 때 반응용 슬러리(slurry)를 금형에 주입하였다. A356 재료의 고상률과 온도관계식은 다음 식을 사용하였다.⁽¹²⁾

$$f_s = 1 - \left(\frac{T_f - T}{T_f - T_L} \right)^{\frac{1}{k_0 - 1}}$$

여기서 T_f , T_L , T 및 k_0 는 합금의 고상선온도, 액상선온도, 재료의 온도 및 분배계수를 각각 나타낸 것이다.

2.1.2 가압과정

재료가 원하는 고상률에 도달하면 반응용재료를 내경과 높이가 각각 45 mm, 70 mm인 금형에 주입한 후 펀치로 가압하여 반응용재료를 제조하였다. 강충길 등⁽¹³⁾이 금형의 온도변화에 따른 조직관찰을 통해 최적의 금형온도를 상온으로 제안하였기 때문에 본 실험에서도 상온으로 하였다. 가압력은 100 MPa이며, 가압속도는 약 60 mm/sec, 가압시간은 15초로 하였다.

2.2 재가열실험

제조되어진 빌렛으로 단조실험을 하기 위해서는 재가열과정을 거쳐야 한다. 재가열과정은 단순히 빌렛을 반응용상태로 만들뿐만 아니라 구상화 조직을 얻을 수 있으므로 반응용재료의 성형공정에 있어서 대단히 중요하다. 재가열 온도와 유지시간이 구상화에 미치는 영향을 파악하기 위하여 온도와 유지시간을 변화시켜 실험을 하였다. 재가열유지시간은 Salvo⁽¹¹⁾와 강충길 등⁽¹³⁾이 여러 조건에 대하여 실험을 하여 10분 이하에서는 구상화 정도가 아직 진행 중이므로 10분 이상이 양호한 구상조직을 얻을 수 있다고 제안하였다. 그러나 재가열유지시간이 상대적으로 길어지면 고상입자가 조대해지는 결과가 나타나므로 적절한 유지시간이 필요하다. 기계적 교반에 의하여 제조한 원소재의 결정입의 크기와 재가열온도가 구상화 정도에 미치는 영향을 파악하기 위하여 재가열온도를 각각 $T_r=577^\circ\text{C}$, 589°C , 598°C 로 하여 실험하였다. 재가열온도 및 가열시간의 변화 등이 단조시편의 구상화에 결정적으로 영향을 미치므로 고상률의 범위가 30~50%에 대응하는 재가열시간은 예비실험결과 10분이상으로 판단되어 본 연구에서는 15와 20분으로 하였다.

구상화된 조직을 얻기위하여 본 실험에서는 $f_s=0\%$ 의 재료와 기계식 교반에 의해 제조되어진 고상률 $f_s=30\%$ 의 재료, 전자식 교반에 의해 제조되어진 재료에 대하여 재가열실험을 하였다. 전자기식 교반에 의하여 제조한 Pechiney 소재의 화학적 성분은 Table 2와 같다.

Table 2 Chemical compositions of Pechiney

	Si	Mg	Fe	Cu	Pb+Sn	Mn	Ti	Zn	Sr	Ni
Min	6.5	0.30	-	-	-	-	-	-	0.01	-
Max	7.5	0.40	0.15	0.03	0.03	0.03	0.20	0.05	0.05	0.03

Table 3 Experimental conditions for reheating of semi-solid material

Temperature	$T_r=577^\circ\text{C}$ ($f_s=50$)		$T_r=589^\circ\text{C}$ ($f_s=40$)		$T_r=598^\circ\text{C}$ ($f_s=30$)	
Holding time	15 min	20 min	15 min	20 min	15 min	20 min

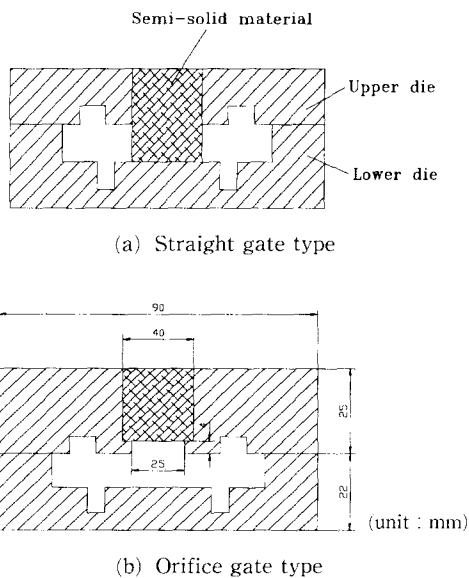
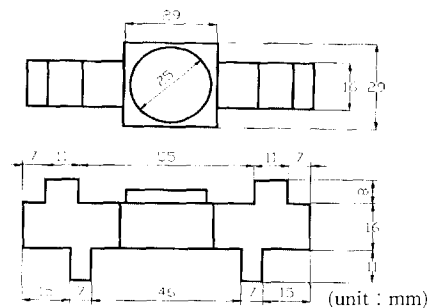
**Fig. 2** Gate type of forging die, initial of semi solid specimen

Table 1과 Table 2로부터 알 수 있듯이 A356이라고 부르지만 제조회사에 따라서 두 재료의 화학적 성분이 다를 수 있다. 본 실험실에서 사용한 재료에는 미세화제 Ti, Sr 등이 Pechiney에 비해 적거나 없음을 알 수 있다. 재가열실험조건은 아래 Table 3과 같다.

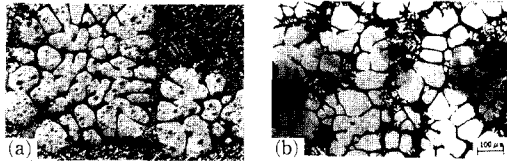
2.3 반응용재료의 단조실험

단조를 위한 시편은 직경 40 mm, 길이 80 mm로 기계가공을 하였으며, 빌렛의 정확한 온도제어를 위해 CA 열전대 삽입홀을 직경 2mm, 길이 40mm로 단면의 중심부에 가공하였다. 단조실험을 하기 위하여 복동유압프레스를 이용하였으며, 금형을 각각 상·하로 나누어 프레스에 부착하여 시편의 분

**Fig. 3** Component dimension for semi-solid forging

리를 용이하게 하였다. 금형의 가열을 위하여 500 W용량의 열선을 상부에 8개, 하부에 6개를 장착하였다. 금형의 온도를 제어하기 위하여 상·하부 각각 열전대를 측면에 삽입하여 상·하 금형을 각각 균일하게 온도가 제어되도록 하였다. 반응용재료의 단조공정에 있어서 주입구의 형상이 충전거동 및 기계적 성질에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 Fig. 2(a), (b)에서 보여주는 바와 같이 상부금형을 직선형과 오리피스형의 두가지를 제작하여 실험을 하였다. 이때 단조금형의 게이트치수는 Fig. 3에서 표시하는 바와 같다.

반응용재료의 단조실험 순서는 우선 시편을 재가열하여 원하는 고상률에서 약 15분간 유지시킨 다음 금형에 투입하여 펀치로 가압하였다. 가압시에 금형의 온도변화에 따른 충전현상을 파악하기 위하여 금형의 온도 $T_{die}=250^\circ\text{C}$, 300°C , 350°C 로 하여 실험을 하였다. 완전히 충전현상이 끝난 단조품의 단면에 있어서 미세조직을 관찰하였다. 금형의 온도변화와 원소재의 제조방면에 따른 단조품의 기계적 성질을 조사하기 위하여 충전부위별로 시편을 채취하여 인장실험을 하였다.



(a) $f_s=30\%$, $n=600$ rpm and $C=0.022^\circ\text{C}/\text{sec}$ (b) $f_s=30\%$, $n=1000$ rpm and $C=0.0094^\circ\text{C}/\text{sec}$

Fig. 4 Microstructure of aluminum alloy for variation of fabrication conditions

2.4 실험결과 및 고찰

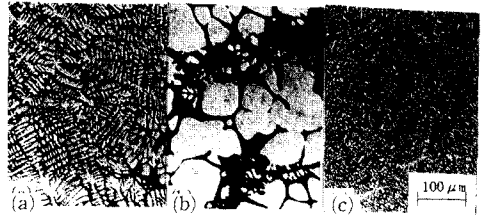
2.4.1 반응용재료의 제조 및 재가열

Fig. 4(a), (b)는 고상률 $f_s=30\%$ 일 때 교반속도와 냉각속도의 변화에 따른 조직사진을 나타낸 것이다. Fig. 4(a)의 $n=600$ rpm인 경우는 Fig. 4(b)의 1000 rpm에 비하여 덴드라이트현상이 파단되지 않았으며, 구상화 조직을 얻을 수 없었다. 교반속도 $n=600$ rpm, 냉각속도 $c=0.022^\circ\text{C}/\text{sec}$ 에서 제조한 반응용소재보다 교반속도 1000 rpm 냉각속도 $c=0.0094^\circ\text{C}/\text{sec}$ 으로 제조한 것이 양호한 구상화 조직을 얻을 수 있었다. 따라서 이후부터는 본 연구에서

사용한 반응용소재는 $n=1000$ rpm 냉각속도 $c=0.0094^\circ\text{C}/\text{sec}$ 에서 제조하였다.

Fig. 5(a)는 $f_s=0\%$ 인 용융상태의 재료를 교반하지 않고 상온상태의 금형에서 100 MPa로 가압하여 제조한 시편의 조직사진이다. Fig. 5(b)는 $f_s=30\%$ 의 조건에서 기계식 교반에 의하여 Fig. 5(a)와 같은 방법으로 제조한 시편의 사진이다. Fig. 5(c)는 Pechiney에서 구매한 전자식 교반에 의하여 제조한 소재의 조직사진이다. 기계식 교반에 의한 반응용재료의 제조는 구상화된 조직을 얻을 수 있는 반면, Fig. 5(c)의 전자식 교반은 결정립이 아주 미세한 구상화와 무관한 조직을 보여주고 있다. Fig. 5(b)의 결정립의 크기가 약 $70\sim 110\ \mu\text{m}$ 로 비교적 크고, 고상영역과 액상영역의 구분이 명확하여 고상과 액상이 균일하게 분포되어 있지 않음을 알 수 있다. 그러나 Fig. 5(c)는 결정립의 크기가 $5\sim 20\ \mu\text{m}$ 정도로 아주 미세한 조직을 얻을 수 있으며, 고상과 액상이 균일하게 분포하고 있음을 알 수 있다.

단조를 하기전에 소재를 가열하여 반응용상태로 유지하여야 한다. 따라서, 단조를 위한 재가열시편은 전기로 내부의 중심에 위치시켰으며, 정확한 온도측정을 위하여 시편단면 중심부분의 온도를 직접



(a) Without stirring at solid fraction $f_s=0\%$ (b) With stirring of $n=1000$ rpm at $f_s=30\%$ (c) Electro-magnetic stirring

Fig. 5 Comparison of the variation of microstructure and effective solid fraction

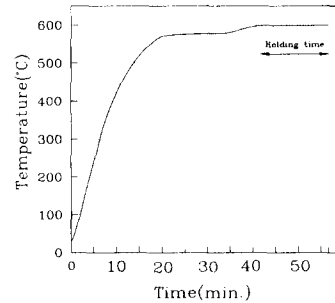


Fig. 6 Temperature of semi-solid reheating process

측정하였다. 재가열시 원하는 고상률의 온도까지 도달하는 시간은 평균 40분 가량 소요되었다. 원하는 온도에 도달한 후 15분 동안 유지하였다. 시편의 온도상승곡선을 Fig. 6에 나타내었다. 본 연구에서는 Fig. 5(b), (c)에서 보여주는 바와 같이 기계식 교반법에 의하여 제조한 구상화 조직과 전자식 교반법에 의하여 제조되어진 미세한 결정입을 가진 소재를 이용하여 재가열실험을 하였다. 실험 결과로부터 구상화가 가장 양호한 재가열조건에서 단조실험을 하도록 하기 위하여 가열시간과 가열온도를 변수로 하였다.

Fig. 7(a), (b)는 가열온도가 577°C 에서 각각 15, 20분 동안 가열한 후 급냉조직을 나타낸 것이다. 액상영역에서 미세한 고상입자가 관찰되었으며, 구상화의 형태와 크기는 Fig. 5(b)의 원소재와 비슷한 결과를 보이고 있다. 따라서 단조를 위한 재가열조건으로서는 적합하지 않음을 알 수 있다.

Fig. 8(a), (b)는 가열온도가 589°C 에서 각각 15, 20분 동안 가열한 후 급냉조직을 나타낸 것이다. Fig. 8(a), (b)에서 조직의 구상화 정도는 Fig. 7(a), (b)에 비하여 향상된 결과를 보이고 있다. Fig. 7(a), (b)에서 보여주고 있는 바와 같이

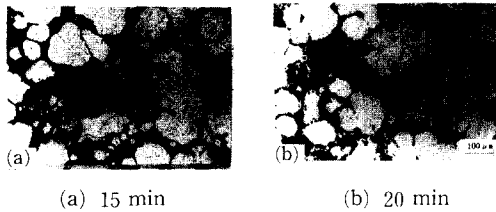


Fig. 7 Microstructure of $f_s=30\%$ after reheating in 577°C for heating time $t_{re}=15, 20$ minutes

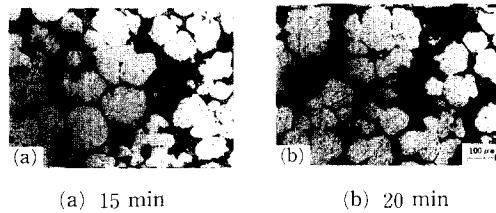


Fig. 8 Microstructure of $f_s=30\%$ after reheating in 589°C for heating time $t_{re}=15, 20$ minutes

액상영역내에 있는 미세한 고상입자는 Fig. 8(a), (b)에서 관찰되지 않았다.

Fig. 9(a), (b)는 가열온도 598°C 에서 15, 20분 동안 가열한 후 급냉조직을 나타낸 것이다. 가열온도가 Figs. 7, 8에 비하여 높기때문에 고상간의 결합이 촉진되어 액상영역이 차지하는 면적이 상대적으로 적게 관찰되었다. Fig. 9(a), (b)에서 보여주는 바와 같이 검게 나타난 기공이 많이 관찰되었다. 위의 원인은 재가열온도가 높으면 고상입자에서의 응집현상이 촉진됨과 동시에 고상입자사이에 있는 액상영역이 중력의 작용에 의하여 유동되기 때문에 생긴 기공이다. 따라서 액상영역에서 기공이 발생하지 않고 고상입자가 구상화가 이루어진 Fig. 8(a), (b)의 조건이 단조에 적합에 소재의 재가열 조건이라고 생각된다.

기계식 교반에 의한 반응용재료의 재가열실험을 통하여서는 원소재보다 적은 구상화 조직을 얻을 수 없었다. 위의 원인은 반응용 소재의 초기 결정립이 크기때문에 내부에너지와 표면에너지가 안정된 상태로 유지하여 고상과 액상간의 상호 상변화가 적게 일어나기 때문인 것으로 생각된다. 가열온도가 증가할수록 일정한 시간동안에 가열온도가 증가하면 Fig. 9에서 보여주는 바와 같이 기공이 많이 발생하는 것을 알 수 있다. 위의 원인은 시간이 지남에 따라 중력의 영향에 의하여 액상이 Fig. 9에서 보여주는 고상입자사이로 유동하기 때문이다.

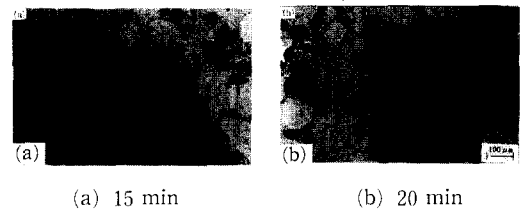


Fig. 9 Microstructure of $f_s=30\%$ after reheating in 598°C for heating time $t_{re}=15, 20$ minutes

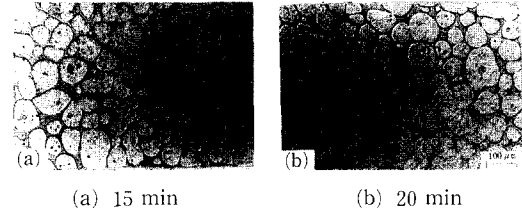


Fig. 10 Microstructure of Pechiney after reheating in 577°C for heating time $t_{re}=15, 20$ minutes

특히 시편의 길이가 긴 경우는 고상과 액상의 비가 위치에 따라 달라질 수 있으므로 재가열시 유지시간은 구상화의 관점뿐만 아니라 고상과 액상이 균일하게 분포된 성질의 시편을 얻는데 중요한 실험 변수임을 알 수 있다. 재가열시 온도가 높을수록 고상간의 용합이 많이 발견되는 경향을 보여주었다. Fig. 10(a), (b)는 전자기 교반에 의하여 제조한 반응용재료를 577°C 에서 각각 15분, 20분 유지한 후의 조직사진이다. 가열시간의 변화에 따라서 구상화의 상태는 거의 변화하지 않는다.

Fig. 11(a), (b)는 전자기 교반에 의하여 제조한 반응용재료를 $f_s=40\%$ 에 대응하는 온도인 589°C 에서 각각 15분, 20분 유지한 후의 조직사진이다. Fig. 11(a)에서는 결정립이 미세한 구상화된 조직을 보여주고 있으며, Fig. 11(b)에서는 Fig. 11(a)에 비하여 액상영역이 증가했음을 알 수 있다. Fig. 12(a), (b)에서 보여주는 바와 같이 $f_s=30\%$ 에 대응하는 온도인 598°C 에서 각각 15분, 20분 유지한 후 조직사진을 관찰한 결과, 결정립크기가 Fig. 11에 비하여 현저하게 증가하였다.

전자식 교반에 의한 반응용재료의 재가열실험을 통하여서의 크기와 액상영역이 차지하는 면적은 가열시간에 크게 의존함을 알 수 있었다. 구상화정도에 관한 명확한 정보를 얻을 수는 없었다. 이는 초기 고상입자의 크기가 작기때문에 내부에너지와 표면에너지가 열에너지를 받으므로 불안정해져서 고

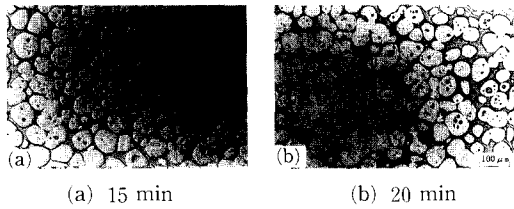


Fig. 11 Microstructure of Pechiney after reheating in 589°C for heating time t_{re} = 15, 20 minutes

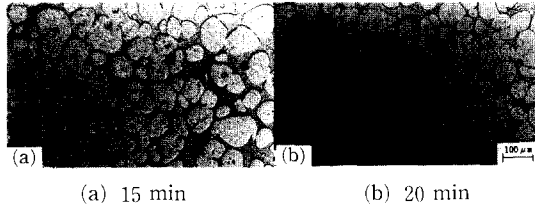


Fig. 12 Microstructure of Pechiney after reheating in 598°C for heating time t_{re} = 15, 20 minutes

상과 액상간의 상변화가 활발하게 일어나기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 재가열유지시간이 길수록 또한 고상온도가 높을수록 액상영역이 증가하고, 고상간의 상호작용이 일어나 좋지않은 결과를 보여 주고 있다.

반응용재료의 재가열은 초기 고상의 크기가 작을 수록 구상화의 효과가 현저하게 나타남을 알 수 있다.

2.4.2 단조실험 결과와 조직

반응용 단조실험의 경우 금형내부에 있어서 재료의 충전거동은 단조품의 기계적 성질에 중요한 영향을 미친다. 또한 일정한 고상률로 제어된 반응용 소재 표면의 산화물제거가 단조품의 기계적 성질에 미치는 영향을 파악하기 위하여 본 연구에서는 Fig. 2(a), (b)와 같이 두가지 형태의 금형에 대하여 단조실험을 하였다. Fig. 2(a)는 반응용 소재를 금형 캐비티내에 주입한 상태에서 단조실험을 하며, Fig. 2(b)는 금형 캐비티 외부에 반응용 소재를 주입한 상태에서 단조실험을 하였다.

구상화 조직을 가진(Fig. 5(b)) $f_s=30\%$ 의 시편을 이용하여 실험을 하기위하여, 직선형주입구를 가진 금형의 경우는 금형온도 $T_{die}=250^\circ\text{C}$, 300°C , 350°C 에서 각각 실험하였다. 이 실험은 충전거동의 관찰과 금형온도의 변화에 따른 기계적 성질을 조사하는 것이 목적이다. Pechiney사에서 구매한 소재는 직선형주입구와 오리피스형주입구를 가진 두 금형에 대하여 각각 금형온도를 변수로 하여 실험

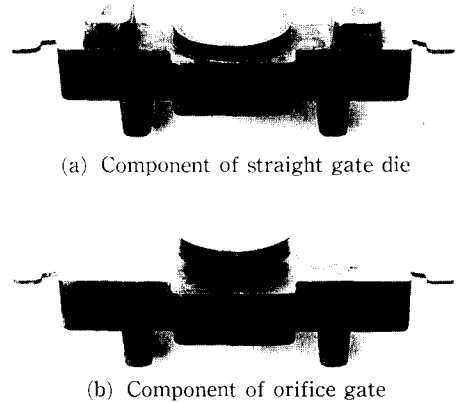


Fig. 13 Semi-solid forged components

Table 4 Filling result with gate type and die temperature

Gate type	Die temperature (T_{die})		
	250°C	300°C	350°C
Straight type	○	○	○
Orifice type	×	△	○

하였다. Table 4는 금형의 주입구형상과 금형의 온도변화에 따른 충전결과를 나타낸 것이다. 실험 결과 오리피스형주입구를 가진 금형을 사용하면 금형온도 $T_{die}=350^\circ\text{C}$ 에서는 충전이 잘 되었지만 (Table 4에서 ○로 표현) $T_{die}=300^\circ\text{C}$ 에서는 약 60%의 시편만이 충전이 완료되었으며, 40%의 시편은 미충전상태로 남아 있음을 알 수 있다(Table 4에서 △로 표현). 또한 금형온도 $T_{die}=250^\circ\text{C}$ 일때는 전혀 충전이 되지 않았다(Table 4에서 ×로 표현). 직선형주입구와 오리피스형주입구를 가진 금형에서 제조된 제품을 각각 Fig. 13(a), (b)에 나타내었다.

Fig. 14(a), (b)는 오리피스형금형의 경우 $T_{die}=300^\circ\text{C}$ 와 $T_{die}=250^\circ\text{C}$ 에서 충전이 완전히 이루어 지지않은 제품의 외관을 나타낸 것이다. 직선형금형의 경우, 세가지 온도 모두에서 충전이 완전히 이루어졌지만, 오리피스형금형의 경우 $T_{die}=350^\circ\text{C}$ 에서만 충전이 완료되었다. 이와 같은 이유는 직선형금형의 경우 초기에 재료가 금형의 주입구를 통과하여 캐비티 내부에 있기 때문에 주입구 벽면과

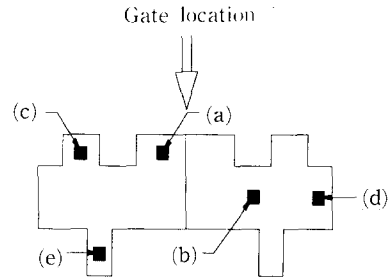
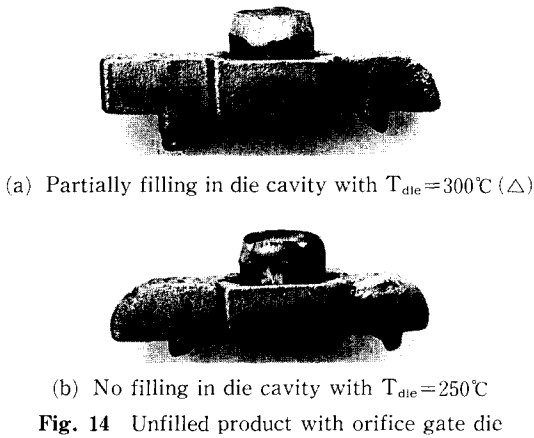


Fig. 15 Observation points to investigate micro structure of specimens after semi-solid forging

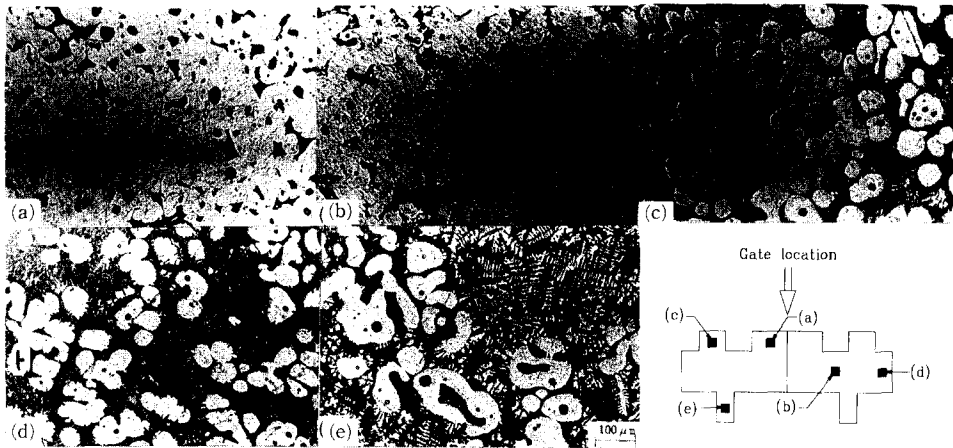


Fig. 16 Microstructure of dendritic after semi-solid forging with various points at die temperature 350°C and punch speed 60 m/s

의 접촉면적이 적지만, 오리피스형금형의 경우 주입구와의 접촉면적이 크기때문에 재료의 열손실이 증가하기 때문이다.

충전부위에 따른 조직관찰을 위하여 Fig. 15 (a) ~ (e)의 다섯 곳에서 조직을 관찰하였다. Fig. 15(a)는 주입구 근처이고, Fig. 15(b)는 충전길이의 중간 정도의 위치이다.

Fig. 15(c), (d), (e)는 각각 부위별 최외곽지점의 위치를 나타낸 것이다. Fig. 16(a)~(e)는 Table 1의 물성치를 가진 A356 소재를 기계식 교반에 의하여 제조한 반용융재료를 $f_s=30\%$ 으로 가열한 후 직선형 Fig. 4(a)의 금형온도 $T_{die}=350^{\circ}\text{C}$ 에서 단조한 후의 각 위치별 조직사진이다.

Fig. 16(a)에서 보여지듯이 액상영역이 유출되고 고상간에 압착이 일어남을 알 수 있다. Fig. 16(b)에서는 고상과 액상이 혼재함을 알 수 있지만 주입구에서 멀어질수록 액상영역이 증가함을 보여주고 있다. Fig. 16(c)는 최종 충전부위를 나타내고 있으며, 고상과 액상이 고루 분포하고 있음을 보여준다. Fig. 16(d)는 시편의 가로방향의 끝부분이며 고상과 액상이 균일하게 분포하고 있음을 보여준다고. Fig. 16(e)는 충전중 고상사이에 있던 액상이 유출되어 액상영역이 다른 부위보다 상대적으로 빨리 응고가 일어나기 때문에 수직상정조직이 많이 관찰됨을 알 수 있다.

Fig. 17~Fig. 19은 전자식 교반에 의하여 제조한

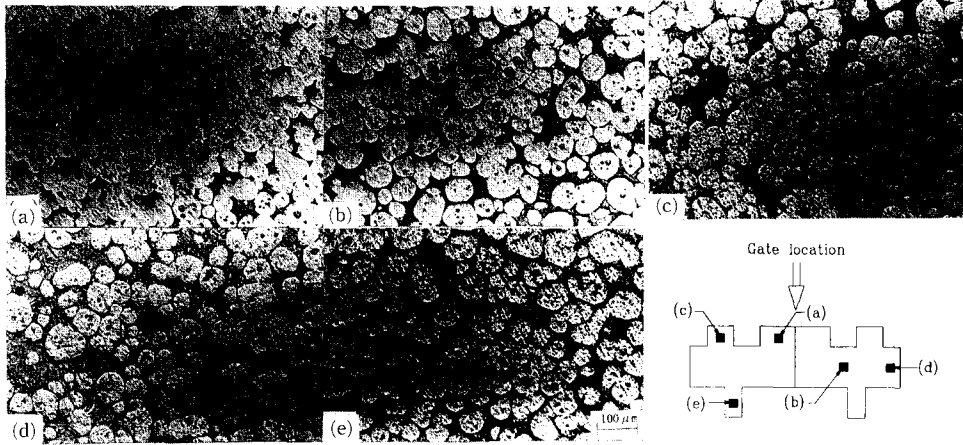


Fig. 17 Microstructure of Pechiney after semi-solid forging with various points at die temperature 350°C and punch speed 60 m/s

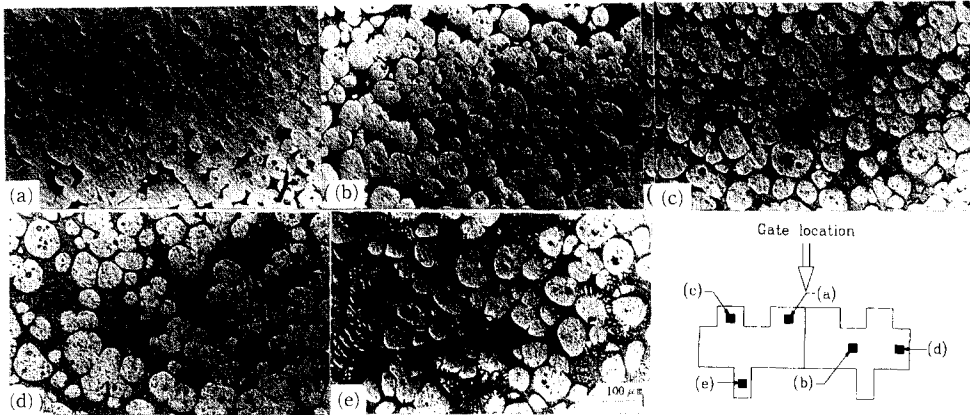


Fig. 18 Microstructure of Pechiney after semi-solid forging with various points at die temperature 300°C and punch speed 60 m/s

반용용재료를 598°C ($f_s=30\%$)에서 15분 동안 재가열한 후 금형온도 $T_{die}=350, 300, 250^\circ\text{C}$ 로 변화시켜 실험한 후의 각 부위별 조직사진을 각각 나타낸 것이다. Fig. 17(a)~(e)는 금형온도 $T_{die}=350^\circ\text{C}$, 고상률 $f_s=30\%$ 일 때 각 부위별의 조직사진이다. 각 부위별의 조직사진이 균일함을 알 수 있다.

Fig. 18(a)~(e)는 금형온도가 300°C 인 경우 각 부위별 조직사진이다. Fig. 18(a)에서 나타낸 펀치 부분에서는 고상입자끼리의 응집현상이 금형온도 350°C [Fig. 17(a)]에 비하여 현저하게 관찰되었다. 금형의 온도가 낮을수록 최종 충전부위에서 액상영역이 상대적으로 증가함을 Figs. 17, 18로부터 알 수 있었다. 온도가 가장 낮은 Fig. 19(a)~(e)로부터 $T_{die}=250^\circ\text{C}$ 의 경우 펀치근방[Fig. 19(a),

(b)]에서의 조직은 고상입자가 거의 접합되어 있음을 관찰할 수 있다.

위의 원인은 고상영역과 액상영역의 분리현상이 일어난 후 고상입자끼리의 가압현상이 증가되었기 때문이다. Fig. 19(e)에서는 수지상조직이 현저하게 관찰되었다. 위의 원인은 변형중 고상과 액상의 거시적인 분리현상이 현저하게 일어나 유동성이 좋은 액상이 최종 충전부위를 채우기 때문으로 생각된다.

2.4.3 단조품의 기계적 성질

반용용재료 단조품의 기계적 성질을 파악하기 위하여 인장시험을 하였다. 인장시험편은 Fig. 20와 같이 단조품의 양단과 중앙에서 각각 기계가공을 하여 제작한 인장시험편을 만들어 T6 열처리(540°C

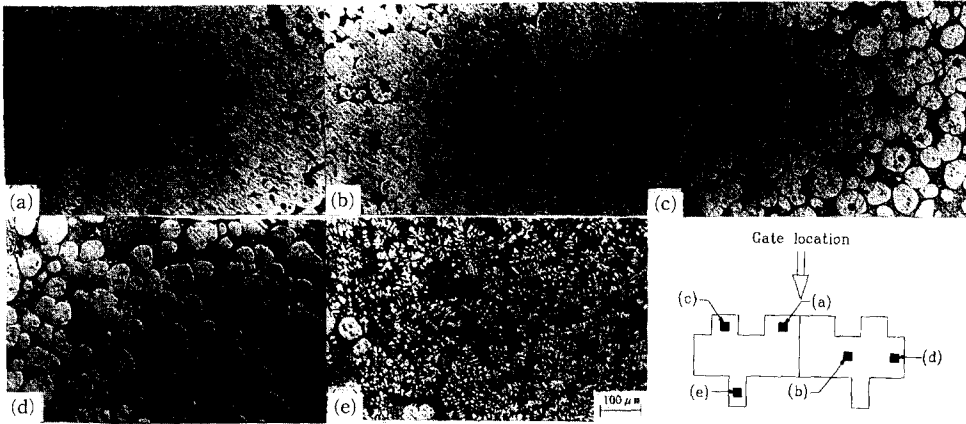


Fig. 19 Microstructure of Pechiney after semi-solid forging with various points at die temperature 250°C and punch speed 60 m/s

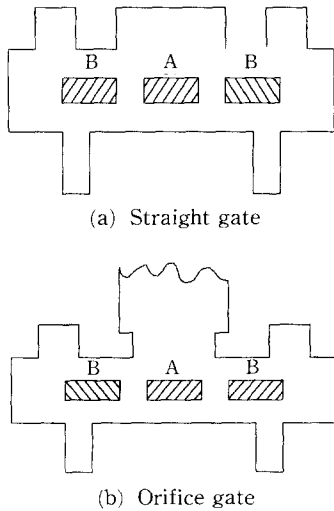
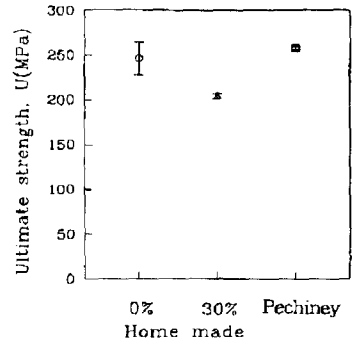


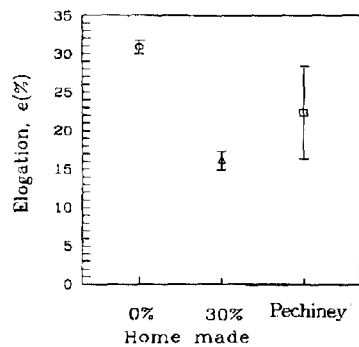
Fig. 20 Location of tensile specimen with gate types

8 hr → water quenching → 155°C 3 hr 30 min → air cooling)를 하였다.

인장시험의 결과를 Fig. 21~Fig. 24에 나타내었다. Fig. 21(a)~(b)는 반용융재료의 제조방법에 따른 기계적 성질을 나타낸 것이다. Fig. 21(a), (b)는 Fig. 5(a)~(c) 조직을 가진 반용융재료의 기계적 성질을 각각 나타낸 것이다. Pechiney 재료의 극한강도는 $U=258$ MPa이므로 $f_s=0\%$, $f_s=30\%$ 에서 제조한 반용융 소재의 강도($U=252$ MPa, $U=204$ MPa)에 비해 각각 2%, 20% 정도 더 큰 값을 가짐을 알 수 있다. Fig. 21(b)의 연신율은 $f_s=0\%$ 가 $\epsilon=31\%$ 로 높게 나타났고, $f_s=30\%$ 와 Pechiney 소재는 각각 $\epsilon=17\%$ 와 $\epsilon=22\%$ 로 나



(a) Ultimate strength



(b) Elongation

Fig. 21 Mechanical properties of various specimens before semi-solid forging

타났다. Fig. 21에서 보여주는 바와 같이 기계적 성질이 차이가 나는 이유는 Table 1과 Table 2에서 알 수 있듯이 Pechiney 재료와 본 실험실에서 사용한 A356 재료의 화학적 성분이 다르고 제조방

법에 따른 구상화의 크기가 다르기 때문인 것으로 생각된다. Pechiney 재료에는 미세화제 Ti, Sr 등이 많이 첨가되어 있음을 알 수 있다.

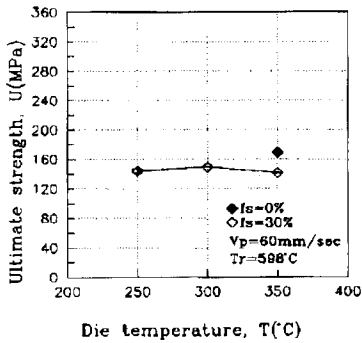
기계식 교반법에 의하여 $f_s=30\%$ 에서 제조하는 시편이 전반적으로 기계적 성질이 떨어짐을 알 수 있다. 위의 원인은 Fig. 5(a), (b)에서 보여주듯이 $f_s=30\%$ 반응용재료의 구상화 입자가 $f_s=0\%$ 에 비하여 상대적으로 크기때문인 것으로 생각된다. Fig. 5(a), (b)의 미세조직사진에서 보여주고 있듯이 $f_s=0\%$ 의 수지상정조직의 크기가 약 $5\sim 20\ \mu\text{m}$ 정도로 $f_s=30\%$ 의 반응용재료의 고상입자의 크기 ($70\sim 110\ \mu\text{m}$)보다 작음을 알 수 있다.

Fig. 22(a), (b)는 Fig. 5(a), (b)의 $f_s=0\%$ 와 30% 에서 각각 제조된 반응용재료를 고상물 30%까지 가열한 후, 직선형금형을 이용하여 단조실험을 한 후 기계적 성질을 나타낸 것이다. 금형온도가 기계적 성질에 미치는 영향은 거의 없음을 알 수 있다. 금형온도 350°C 에서의 강도는 $f_s=30\%$ 일 때

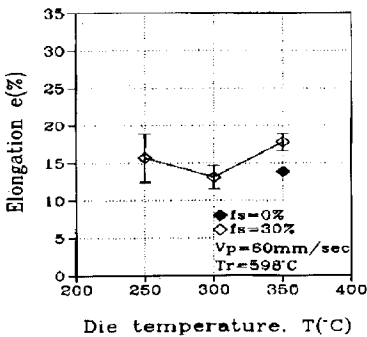
($U=152\ \text{MPa}$)보다 0% 일 때($U=168\ \text{MPa}$)가 더 높음을 알 수 있다. 위의 원인은 Fig. 5(a), (b)에서 보여주는 바와 같이 초기 구상화의 크기가 적기 때문이다. Fig. 22(b)의 $f_s=30\%$ 의 연신률은 금형의 온도변화에 따라 다소 편차가 크지만 $13.5\%\sim 17\%$ 사이의 값을 가짐을 알 수 있다. 이러한 이유는 앞에서 언급한 미세조직의 크기와 고상과 액상의 분포에 의한 차이가 단조 후에도 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

직선형금형의 경우 단조를 위한 소재의 위치가 Fig. 12(a)에서 보여주는 바와 같이 캐비티내에 존재하기 때문에 재료의 열손실이 적다. 따라서 단조시 소재가 완전히 충전됨과 동시에 가압에 의하여 조직의 미세화가 이루어지기 때문에 강도의 변화는 금형의 온도변화에 거의 무관함을 알 수 있다.

Fig. 23는 Pechiney 재료를 이용한 단조품의 기계적 성질을 Fig. 20에서 보여주고 있는 바와 같이 부위별로 나타낸 것이다. Fig. 23에서 볼 수 있듯

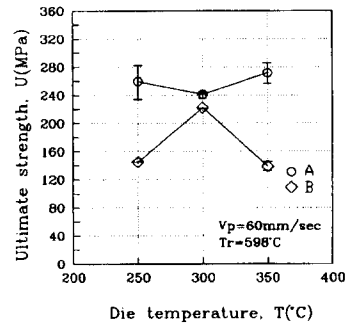


(a) Ultimate strength

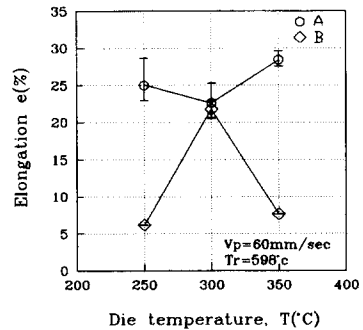


(b) Elongation

Fig. 22 Mechanical properties of $f_s=30\%$ by mechanical stirring after semi-solid forging in straight gate



(a) Ultimate strength



(b) Elongation

Fig. 23 Mechanical properties of $f_s=30\%$ by electro-magnetic stirring after semi-solid forging in straight gate

이 가운데 부분(A)의 기계적 성질이 양끝(B)의 경우보다 우수함을 알 수 있다. 특히 금형온도 $T_{die}=250^{\circ}\text{C}$ 에서는 단조품의 기공때문에 양끝의 기계적 성질이 낮게 나타남을 알 수 있다. 시편 양끝(B) 부분의 기공의 원인은 충전도중 소재가 열을 많이 빼앗겨 유동성의 저하로 인하여 완전히 충전되기 전에 응고가 발생하여 기공이 형성되었기 때문이다. 가운데 부분의 기계적 성질은 금형의 온도 변화에 따라 $U=240\sim 260\text{ MPa}$ 정도로 큰 변화는 보이지 않고 있으며, 연신율의 값은 23%~28% 정도이다.

Fig. 23(a)의 금형온도가 350°C 인 경우 양끝부분(B)에서의 강도가 (A)부분과 상당한 차이를 보이고 있다. 위의 원인은 금형온도가 높은 경우, 단조소재의 유동성이 좋아 충전은 잘되나 Fig. 19에서 보여주고 있듯이 액상영역에서 미세한 주상조직이 많이 관찰되기 때문이다.

Fig. 23(a)의 직선형게이트를 이용한 단조실험의 경우 Pechiney 재료를 이용한 단조품의 중앙부분

에서의 강도($U=240\sim 260\text{ MPa}$)는 Fig. 21(a)의 원소재의 강도($U=250\text{ MPa}$)와 거의 유사하며, 단조에 의하여 기계적 성질이 증가되지 않음을 알 수 있다. 위의 원인은 직선형금형의 경우는 단조시 반응용 소재의 산화된 표면이 단조품내부로 유입되었기 때문으로 생각된다. 따라서 이후부터는 오리피스형금형을 사용하여 계속 단조실험을 하였다.

Fig. 24는 Pechiney 재료를 오리피스형금형에서 단조실험을 한 후의 기계적 성질을 나타낸 것이다. 극한강도 $U=320\text{ MPa}$ 정도로 직선형금형보다 우수함을 알 수 있다. 또한 시험편의 위치변화에 따른 강도와 연신율의 변화는 Fig. 23의 직선형금형의 기계적 성질보다 균일함을 알 수 있다. 금형의 주입구 형상에 따른 단조품의 기계적 성질은 오리피스형주입구를 가진 금형에서 제조된 제품의 기계적 성질이 높음을 알 수 있었다. 직선형금형의 경우는 단조시 산화물이 단조품 내부로 유입되었기 때문에 기계적 성질이 균일하지 못함을 알 수 있다.

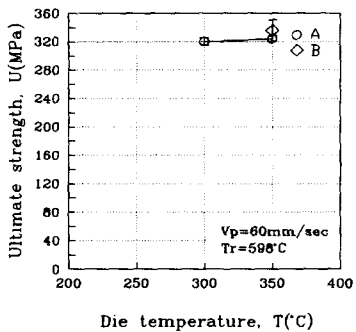
오리피스형은 산화물이 단조품 내부로 유입되지 못하게끔 Fig. 2(b)에서 보여주는 바와 같이 게이트 직경이 25 mm, 소재의 경은 40 mm로 가공되어 있다.

이상의 실험결과에 의하면 단조품의 기계적 성질은 반응용재료의 초기 고상입자의 크기가 매우 중요함을 알 수 있다. 주입구의 형상이 기계적 성질에 크게 영향을 미치는 원인은 수치해석결과로부터 알 수 있듯이 최종 응고부위의 위치가 결정적으로 영향을 미치기 때문이다.⁽¹⁴⁾ 전자식 교반에 의하여 제조한 반응용 단조품의 기계적 성질이 기계식 교반에 의하여 제조한 단조품의 기계적 성질에 비하여 우수함을 알 수 있다. 기계식 교반에 사용된 A356 알루미늄합금과 Pechiney의 화학적 조성이 다소 차이가 있기 때문에 기계적 성질의 직접적인 비교는 어렵다. 그러나 Pechiney 재료에 첨가된 미세화제들은 T6 열처리 후, 석출강화에 큰 영향을 미치기 때문에 단조전후의 기계적 성질이 향상되었음을 알 수 있다.⁽¹⁵⁾

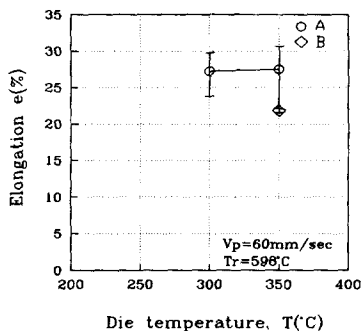
3. 결 론

고상률이 $f_s=30\%$ 인 반응용재료의 재가열과 단조실험 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 고상률 $f_s=30\%$, 교반속도 $n=1000\text{ rpm}$, 냉각속도 $c=0.0094^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ 에서 제조한 반응용재료는



(a) Ultimate strength



(b) Elongation

Fig. 24 Mechanical properties of $f_s=30\%$ by electro-magnetic stirring after semi-solid forging in orifice gate

재가열온도와 시간이 각각 589°C, 15 min일때 구상화의 크기가 가장 양호한 미세조직을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

(2) 전자기식 교반법에 의하여 제조한 반응용재료의 경우는 고상률 $f_s=40\%$ 에 대응하는 온도에서 20분간 유지한 소재가 구상화의 크기가 가장 미세한 조직을 얻을 수 있었다.

(3) 반응용단조를 위한 소재의 재가열시에는 초기 고상입자의 크기가 작을수록 미세한 구상화 조직을 얻을 수 있었다.

(4) 오리피스형게이트를 가진 금형을 이용한 반응용단조시 금형의 온도가 충전여부에 큰 영향을 미치며, 금형온도가 300, 350°C일 때 단조가 가능하였다.

(5) 금형온도 350°C, 고상률 30%인 반응용재료의 단조조건에서 오리피스형금형과 직선형금형에서 제조된 단조품의 강도가 각각 320 Mpa, 240 Mpa로써 오리피스형 단조품의 기계적 성질이 우수함을 알 수 있었다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Spencer, D. B., Mehrabian, R. and Flemings, M. C., 1972, "Rheological Behavior of Sn-15% Pb in the Crystallization range," *Metallurgical Transaction*, Vol. 3, pp. 1925~1932.
- (2) Suéry, M. and Flemings, M. C., 1982, "Effect of Strain Rate on Deformation Behavior of Semi-solid Dendritic Alloys," *Metall. Trans.*, Vol. 13 A, 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 Behaviour and Modelling of Semi-solid Sn-15% Pb Alloy," *Journal of Materials Science*, Vol. 26, pp. 2173~2183.
- (5) Hirai, M., Takabayashi, K., Yoshikawa, Y. and Yamaguchi, R., 1993, "Apparent Viscosity of Al-10 mass% Cu Semi-solid Alloys," *ISIJ*, Vol. 33, No. 3, pp. 405~412.
- (6) Okano, S., 1994, "Research Activities in Rheo-technology Ltd.," *The 3rd Int'l Conf. on Semi-solid Processing of Alloys and Composites*, pp. 7~18.
- (7) Toyoshima, S. and Takahashi, Y., 1991, "A Numerical Simulation of Forming Process for Semi-solid Materials," *ISIJ*, Vol. 3 pp. 557~582.
- (8) Hirt, G., Cremer, R., Winkelmann, A., Witulski, T. and Zillgen, M., 1994, "SSM-forming of Usually Wrought Aluminium Alloy," *The 3rd Int'l Conf. on Semi-solid Processing of Alloys and Composites*, pp. 107~116.
- (9) Peng, H., Wang, S. P., Wang, N. and Wang, K. K., 1994, "Rheomolding-Injection Molding of Semi-solid Metals," *The 3rd Int'l Conf. on Semi-solid Processing of Alloys and Composites*, pp. 191~200.
- (10) 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.
- (11) Salvo, L., Loué, W. R. and Suéry, M., 1994, "Influence of 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.
- (12) Ohnaka, I., 1985, "Introduction to Heat and Solidification Analysis by Computer," *In Japanese, Marusen Press*, pp. 196~199.
- (13) 강충길, 윤종훈, 서영호, 1996, "반응용 알루미늄재료의 제조 및 압축거동에 관한 실험적 연구," *대한기계학회논문집*, 제20권, 제3호, pp. 796~805.
- (14) Kang, C G. and Kang, D. W., 1996, "Forging Process Analysis of Semi-solid Aluminium Materials," *4th Int. Conf. on Semi-solid Process-*

ing of Alloys and Composites, 19~21.

- (15) 이정일, 한요섭, 이호인, 김문일, 1994, "Al-Si-Cu-Mg계 용탕단조 합금의 미세조직과 기계

적 성질," 대한금속학회지, 제32권, 제10호, pp. 1259~1269.