

반용융 성형된 반응고 A356 합금의 인장 특성

柳永彬 · 宋八容 · 金祥植 · 李在鉉* · 李明鎬**

경상대학교, 재료공학부, 항공기부품기술연구소

*창원대학교, 금속재료공학과

**자동차부품연구원, 경량소재실

Tensile Properties of Thixoformed Semi-solid A356 Alloy

Y. B. Yu, P. Y. Song, S. S. Kim, J. H. Lee* and M. H. Rhee**

Gyeongsang National University, Division of Materials Science and Engineering, ReCAPT, Korea

*Changwon National University, Department of Metallurgy and Materials Science, Korea

**Korea Automotive Technology Institute, Light Materials Engineering Lab., Korea

(1999년 10월 20일 받음, 1999년 11월 24일 최종수정본 받음)

초 록 반응고 금속의 반용융 성형법은 그 우수한 성형성으로 생산공정에 있어 주조나 단조와 같은 일반 성형법에 비해 많은 장점을 가지고 있는 반면, 정밀한 공정 변수 제어가 요구되므로 실용화에 있어 크게 제한 받고 있다. 본 연구에서는 반응고 금속인 A356합금을 사용하여 밀폐형 가압 성형 전후의 기계적 특성의 변화를 관찰하여, 가압 성형시의 정확한 공정 변수 제어가 이루어지지 않았을 경우에 일어날 수 있는 기계적 특성의 감소 원인이 가압 성형에 의한 미세조직의 응집과 조대화에 있음을 미세조직과 과단면 관찰을 통하여 규명하였다. 또한 가압 성형 후 본 연구에서 '반응고 열처리'라 명명한 후처리 공정을 적용하여 인장 특성을 향상시킬 수 있었다.

Abstract Despite the improved formability and processing advantages, the use of semi-solid metals is greatly limited due to the difficulties in controlling the optimum forming parameters. In the present study, the tensile properties of closed die, pressure formed semi-solid A356 alloy were examined. It was demonstrated that the tensile strength of thixoformed A356 alloy could be greatly reduced when the forming parameters were not rigorously controlled. The reduced strength of inappropriately formed products appeared to be related to the coarsening of the primary phases. The possibility of improving tensile properties of as-formed products by simple post heat treatment was also assessed.

Key words : Al A356 alloy, thixoforming, tensile properties, semi-solid heat treatment.

1. 서 론

최근 들어 반응고 금속의 제조와 이를 이용한 부품의 반용융 성형 공정에 대한 연구가 국내외적으로 활발히 진행되고 있다.^{1~3)} 반용융 성형법(thixoforming)은 반응고 금속을 고상 성분과 액상 성분이 공존하는 온도 영역으로 재가열하여 반용융 상태에서 합금을 압연, 압출 또는 사출 등의 방법을 응용해 성형하는 방법을 지칭하는 말로서, 주조공정과 열간 압연 공정의 장점을 동시에 취한 공정으로 각광받고 있다. 이러한 반용융 성형법은 변형저항이 낮아 작은 하중으로도 성형이 가능하며, 유동성이 양호하여 형상이 복잡한 부품의 제작이 용이하므로 단 공정으로 실 형상에 가까운 제품의 생산이 가능하다. 또한 액상과 고상이 공존하기 때문에 순수 액상보다 응고 시간이 짧아 수축 결함을 줄일 수 있으며, 소재를 균일하게 충전시킬 수 있어 가스 결함을 감소시켜 건전한 부품을 얻을 수 있는 장점도 가지고 있다. 반용융 상태 금속의 성형을 위해서는 그러나 매우 정밀한 재가열 조건의 설정을 통한 고상을 제어가 요구되어진다.^{4,5)} 또한 가압성형시 가압력, 가압속도, 가압시간, 금형의 온도와 같은 공정변수가 적절히 제어되어야 하며, 이러한 성

형 공정상의 변수들은 성형된 부품의 기계적 특성에 지대한 영향을 미치게 된다.^{5,6)} 이처럼 반응고 금속의 실용화를 위해서는 구형의 미세조직을 가지는 합금재의 제조 공정에 관한 연구뿐만 아니라, 반용융 성형 공정 과정에서 해결되어야 할 난제들이 많은 것이 현실이다. 국내외적으로 지금까지 반응고 합금을 제조하는 공정과 이들의 반용융 성형 공정에 관한 연구는 다수 보고되고 있으나, 반용융 성형된 부품의 최종 기계적 성질에 관한 연구보고는 드물게 이루어져 왔다.^{7,8)}

한편 반응고 금속을 제조하는 방법 중의 하나로 SIMA(strain induced melt activated)법이 1981년에 개발되어 소형 빌렛 제조에 일부 사용되고 있다.^{1~3)} SIMA법은 입자의 구형화를 위해 고체 상태의 금속을 열간 혹은 냉간 가공을 통해 충분한 소성가공을 가해준 후 고액 공존온도로 가열하여 구형화된 조직을 얻는 방법으로, 수직상 조직의 고상 합금으로부터 교반 등의 방법을 이용하지 않고 직접 반용융 합금을 제조하는 기술이다. 이처럼 SIMA법을 적용한 최종 반응고 합금의 조직은 매우 미세하고 균일한 비수지상의 구형조직을 가지는 것으로 보고되어 있으나, 아직 그 기구에 관해서는 명확하게 밝혀져 있지 않다. 기술적 측면에

Table 1. Reheating and forming condition for semi-solid A356 alloy used in the present study.

Reheating Temp. (°C)	Reheating Time (min.)	Die Diameter (mm)	Die Temp. (°C)	Pressure (MPa)	Pressure Holding Time (sec.)
578	15	35	578	100	10

서는 이러한 SIMA 법을 이용하여 대형 소재의 제조도 가능하다. 제조비용이 전자기 교반법에 비해 경쟁력이 없는 것으로 보고되고 있다.⁹⁾

본 연구에서는 반응용 합금 성형의 기초연구로서 Pechiney사에서 제조된 반응고 A356 (Al-7%Si-0.3%Mg) 합금 빌렛을 고액공존 온도로 재가열하여 밀폐형 금형 가압 성형을 한 성형체의 성형 전과 후의 인장 특성의 변화를 관찰하였다. 또한 인장 특성의 저하를 보이는 반응용 성형된 A356 합금 성형체에 '반응고 열처리'라 명명한 변형된 SIMA 공정을 후처리 공정으로 적용하여 성형품의 최종 인장 특성을 향상시킬 수 있는 가능성에 대하여 고찰해 보았다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 Pechiney사에서 전자기 교반법으로 제조된 76.2mm 직경의 반응고 A356 (Al-7%Si-0.3%Mg) 합금 빌렛을 구입하여 사용하였다. As-received 상태의 반응고 A356 합금 빌렛을 직경 25mm의 원봉으로 가공하여 전기로를 이용하여 재가열한 후 직경 35mm의 밀폐형 금형에 10초 이내로 이송한 후 가압 성형하였다. 본 연구에서 사용한 재가열 조건과 성형 조건을 표 1에 나타내었다.

한편 비수지상 조직을 가지는 합금 빌렛 제조에 적용되는 SIMA 공정을 다소 변형시켜, 일부 반응용 성형된 A356 합금 시편을 고액공존 온도 직전의 온도인 577°C에서 수분간 유지하여 미세조직과 기계적 특성의 변화를 관찰하였다. 성형 전후의 일부 시편은 525°C에서 5시간 용체화 처리 후 수냉하고 170°C에서 7시간 시효하는 T6 열처리를 행하였다. 각 공정에서의 인장 특성을 측정하기 위하여 반응고 A356 합금 원소재, 성형된 시편 및 성형 후 반응고 열처리를 적용한 시편에서 봉상의 인장 시험편을 제작하여, 만능재료 시험기를 이용하여 변형률속도를 $5 \times 10^{-4}/\text{sec}$ 로 하여 인장시험을 행하였다. 미세조직은 Keller 용액을 이용해 연마된 시편 표면을 부식시켜 광학현미경을 이용하여 관찰하였으며, 인장 시험 후 파단면은 주사전자 현미경 (SEM)을 이용하여 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

1) 반응고 A356 합금 원소재의 미세조직 및 기계적 특성

그림 1은 반응고 A356 합금 원소재의 (a) 종방향과 (b) 횡방향의 미세조직과 (c) T6 열처리한 후의 종방향으로의 미세조직을 광학현미경을 이용하여 관찰한 사진을 보여주고 있다. 반응고 A356 합금 원소재의 조직은 그림에서 보는 바와 같이 초정의 크기는 약 30 내지 50 μm 내외로 초정의 고상율은 약 70% 정도임을 알 수 있었으며, 이

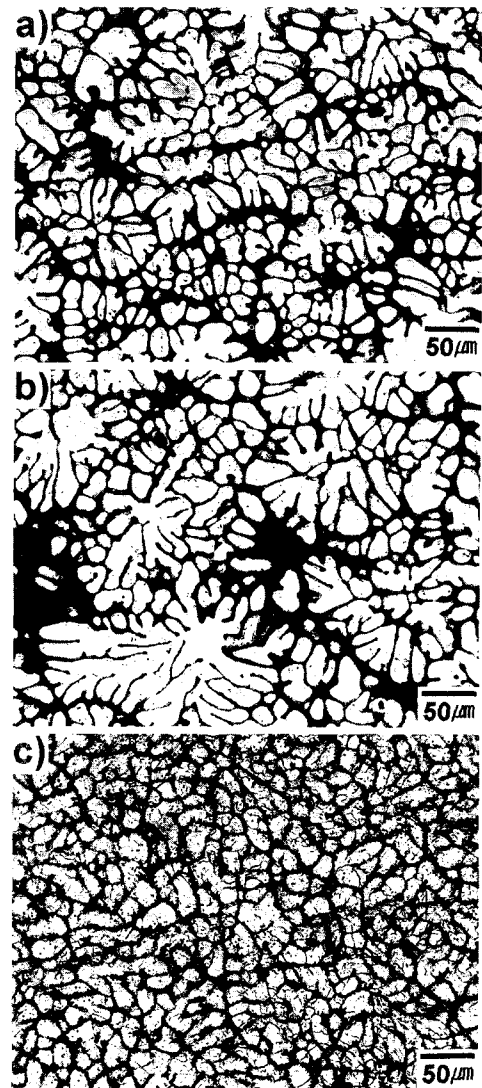


Fig. 1. Optical micrographs of semi-solid A356 alloys along (a) longitudinal and (b) transverse directions, respectively, and after (c) T6 heat treatment.

때 초정은 구형보다는 장미상 (rosette) 의 형상을 나타내고 있으며, 수지상 조직이 교반 후에도 상당히 잔존하고 있다. 또한 그림 1 (b)의 화살표 부분에서 보는 바와 같이 공정 조직이 불균일하게 분포되어 있는 영역들이 때때로 관찰되고 있다. 이러한 반응고 A356 합금 원소재를 T6 열처리하면 20 내지 30 μm 크기의 초정과 이들의 경계면에 1 내지 3 μm 크기의 Si 입자들이 분포하는 미세조직을 나타내며, 초정 내부에는 결정립들이 다소 생성되어 있음을 알 수 있다. 표 2는 반응고 A356합금 원소재와 이를 T6 열처리한 시편의 인장 특성을 보여주고 있다. 비교를 위해 이미 보고된 전자기 교반법에 의해 제조된 반응용 A356 합금 빌렛

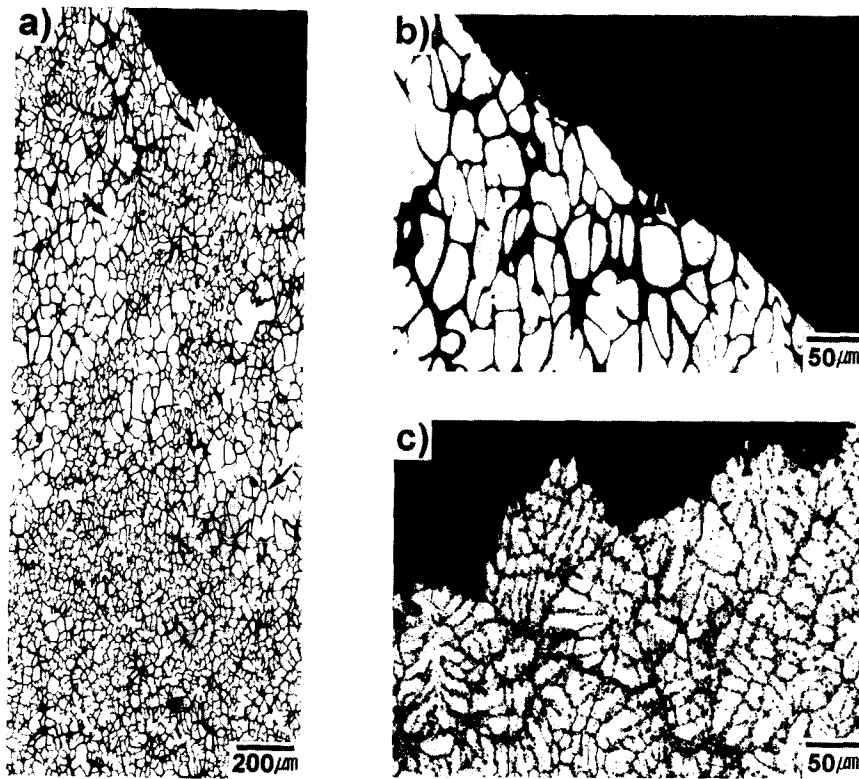


Fig. 2. Sideviews of tensile fractured semi-solid A356 alloys: (a)(b) as-received and (c) T6 heat treated, respectively.

Table 2. Mechanical Properties of as-received and T6 treated semi-solid A356 alloy.

Temper Designation	YS (MPa)	UTS (MPa)	Elongation (%)	Comments
As-received	132	236	15.4	
	110	220	14	ref. 8
T6	253	300	8.8	
	240	320	12	ref. 8

의 인장 특성도 함께 나타내었다.

그림 2는 반응고 A356합금 (a) (b) 원소재와 (c) T6 열처리한 시편을 종방향으로 인장 시험한 후 시편을 종방향으로 절단하여 과단면 주위의 측면을 광학현미경으로 관찰한 사진을 보여주고 있다. 그림 2(a)와 (b)에서 보는 바와 같이, 원소재 시편에서는 인장 파단이 초정과 공정의 전단에 의해 진행되었음을 알 수 있다. 흥미로운 것은 동일 배율의 그림 1(a)와 그림 2(b)를 비교해 보면, 인장 파단이 상대적으로 크기가 큰 초정들이 응집되어 있는 곳에서 일어나고 있음을 알 수 있으며, 이러한 조대한 초정 영역은 그림 2(a)의 저배율 사진에서 보는 바와 같이 여러 부분에서 관찰되고 있다 (화살표). 한편 그림 2(c)에서 보는 바와 같이 T6 열처리된 반응고 A356 합금 원소재의 경우는 초정과 공정의 전단에 의해 인장 파단이 진행된 것이 아니라 초정과 초정 계면을 따라서 진행되었음을 알 수 있다.

전술한 이러한 경향은 SEM을 이용한 과단면 관찰에서도 나타나고 있다. 그림 3은 반응고 A356합금 (a) 원소재와 (b) T6 열처리한 시편을 종방향으로 인장 시험한 후 파단

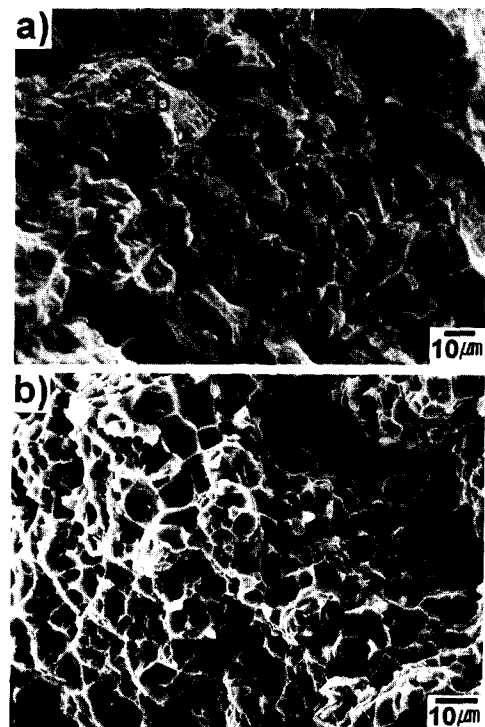


Fig. 3. SEM fractographs of tensile fractured semi-solid A356 alloys: (a) as-received and (b) T6 heat treated, respectively.

면을 SEM을 이용하여 관찰한 사진을 보여주고 있다. 그림 2(a)와 (b)에서 관찰되는 경향과 같이, 원소재를 인장한 과단면(그림 3(a))에서는 초정이 전단된 영역(a)과 공정

Table 3. Mechanical properties of thixoformed A356 alloys.

Process	Heat Treatment Condition	Sampling Position	YS (MPa)	UTS (MPa)	Elongation (%)	Comments
S.S.F*	as-formed	center	88	153	26	
		circumference	92	164	27	
	T6	center	246	286	6.9	
		circumference	232	285	9.7	
P.M.C**	T6		186	262	5	ref. 8
C.D.F***	T6		280	340	9	ref. 8

* S.S.F.: Semi-solid Forming

** P.M.C. : Permanent Mold Casting

***C.D.F. : Closed Die Forging

조직이 전단된 영역 (b) 이 확연히 구분되어 관찰되고 있다. 이러한 영역을 EDX를 이용해 분석해 보면, a 영역은 Si가 2% 정도로 거의 대부분이 Al 성분인 초정이며, b 영역은 Si이 18% 정도인 공정조직임을 확인할 수 있었다. 이에 반해 T6 열처리된 시편에서는 초정과 초정 계면의 Si 입자에서 생성된 것으로 판단되는 microvoid에 의해 인장 파단이 진행된 전형적인 연성과파괴 양상이 관찰되고 있다.

2) 밀폐형 다이 가압 성형한 반응고 A356 합금의 기계적 특성

밀폐형 다이에서 반응용 성형된 35mm 직경의 반응고 A356 합금 봉재를 원주부와 중앙부를 구분하여 종방향으로 시편을 채취한 후 인장시험을 행한 결과를 표 3에서 보여주고 있다. 비교를 위해 수지상의 A356 합금을 각각 금형주조한 시편과 밀폐 단조한 시편을 T6 처리하여 인장시험한 보고되어진 결과를 함께 나타내었다. 본 연구에서 반응용 성형된 시편의 인장특성을 표 2의 반응고 A356 합금 원소재의 인장시험 결과와 비교해 보면, 연신률의 경우는 대단히 증가하였으나, 항복 및 인장강도는 매우 급격한 감소를 나타내고 있다. 예를 들어 반응고 A356 합금 원소재의 인장강도는 236MPa인데 반해 반응용 성형된 봉재의 중앙부의 인장강도는 150MPa 내외로 약 35%의 인장강도의 감소를 보이고 있다. 특별히 중앙부와 원주부에서 채취된 시편에서의 인장 특성의 차이는 크지 않았다. T6 처리된 성형 전과 후의 시편의 인장강도를 비교해 보면 인장강도의 차이가 5% 내외로 열처리되지 않은 시편에 비해 감소 폭이 상당히 줄어들어 있음을 알 수 있다. 한편 금형주조 후 T6 열처리된 일반 A356 합금의 보고된 기계적 특성을 본 연구에서 성형된 반응고 A356 합금의 특성과 비교하면 전체적으로 반응고 A356-T6 합금 성형체의 기계적 특성이 강도면에서나 연신률면에서 다소 우수한 것을 알 수 있다. 그러나 단조된 일반 A356-T6 합금에 비해서는 강도면에서 낮은 값을 나타내고 있다.

한편 본 연구에서 반응용 성형된 반응고 A356 합금의 기계적 특성의 저하 원인을 살펴 보고자 성형 후의 미세조직과 인장시험 후의 측면과 파단면을 관찰하였다. 그림 4는 반응용 성형된 시편의 (a) 종방향과 (b) 횡방향의 미세조직과 이를 T6 처리한 시편의 (c) 종방향과 (d) 횡방향의 미세조직을 광학현미경을 이용해 관찰한 사진을 보여주

고 있다. 그림 4와 그림 1을 비교해보면 성형 전에는 초정 사이의 공정 조직들이 대체로 균일하게 분포되어 있으나, 반응용 성형 후에는 장미상 초정들의 응집현상이 상당히 관찰되며, 공정 조직의 분포도 대단히 불균일한 것을 알 수 있다. 이러한 반응용 성형된 A356 합금을 T6 열처리하게 되면 원소재를 열처리하였을 때와 마찬가지로 재결정에 의해 형성된 것으로 보이는 결정립계를 따라 Si 입자들이 분포되어 있는 조직을 가지게 되며, 이때의 결정립들은 원소재를 T6 열처리하였을 때에 비해 월등히 미세한 것을 알 수 있다.

그림 5와 6은 반응용 성형된 A356 합금의 (a) 성형된 상태와 (b) 이를 T6 열처리한 시편을 인장시험한 후의 측면을 광학현미경으로 관찰한 사진(그림 5)과 파단면을 SEM으로 관찰한 사진(그림 6)을 각각 보여주고 있다. 반응용 성형된 A356 합금에서는 원소재와는 달리 초정과 공정조직의 분리 경향이 다소 증가되었으며, 초정에서의 전단과 공정조직에서의 microvoid의 형성에 의해 인장파단이 진행된 것으로 판단된다. T6 열처리된 시편에서는 원소재와 마찬가지로 결정립계에 분포된 Si 입자에서의 microvoid의 형성에 의한 전형적인 연성과파괴 양상이 관찰된다. 흥미로운 것은 그림 5(a)에서 보는 것과 같이 인장 파단된 부분의 초정이 인장 방향으로 상당히 연신되어 있음을 알 수 있다. 즉 그림 4(a)에서 관찰되는 종방향에 수직인 방향으로 연신되어 있던 초정들이 인장 변형 동안 종방향에 수평한 방향으로 연신되어 있음을 관찰할 수 있었다. 실제로 그림 7에서 보는 것과 같이 파단면에서 멀어질수록 그림 4(a)에서 관찰되는 조직이 그대로 관찰되고 있음을 알 수 있었다.

그림 4, 5 및 6에서 살펴본 바와 같이 반응용 성형에 의한 기계적 특성의 저하 원인은 초정의 응집 현상에 의한 것으로 사료된다. 원소재의 인장 파단시에도 초정들이 응집된 취약한 영역에서 인장파단이 일어나고 있음을 관찰할 수 있었으며, 반응용 성형된 시편에서의 심한 초정의 응집에 의한 조대화 현상이 기계적 특성 저하의 주원인인 것으로 사료된다. 반응용 성형된 시편을 T6 열처리하게 되면 재결정에 의한 것으로 보이는 결정립계가 생성되면서 공정 조직은 거의 사라지고 Si 입자들이 결정립계에 존재하게 되는데 이때의 미세조직은 원소재를 T6 열처리하였을 때와 비교하면

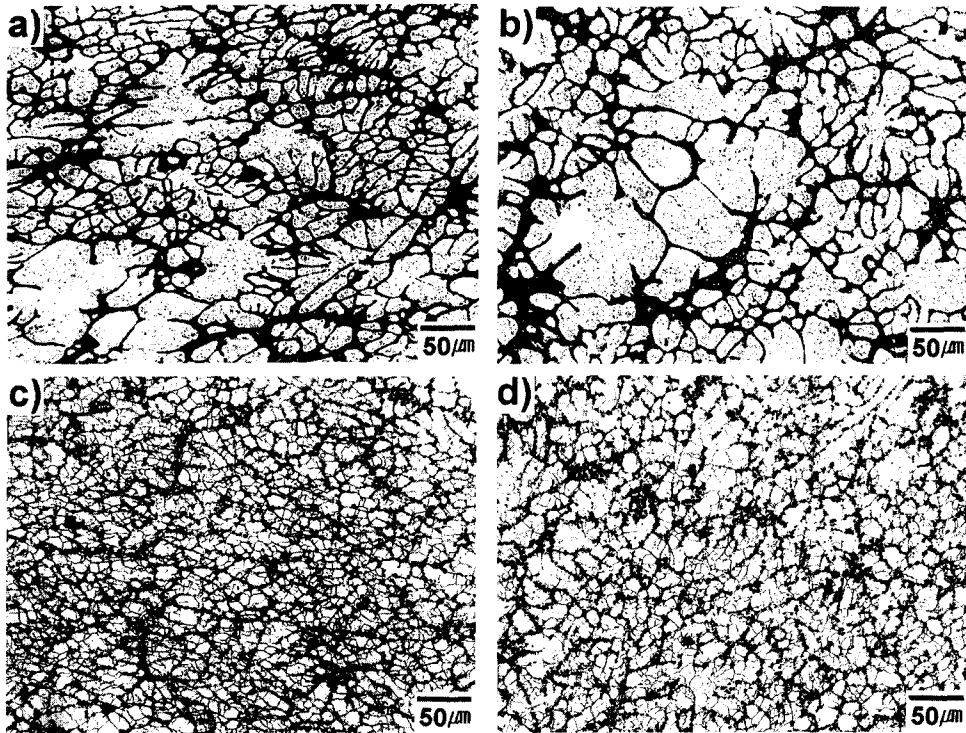


Fig. 4. Optical micrographs of semi-solid A356 alloys after thixoforming: as-formed along the (a) longitudinal and (b) transverse directions, respectively and T6 heat treated along (c) longitudinal and (d) transverse directions, respectively.

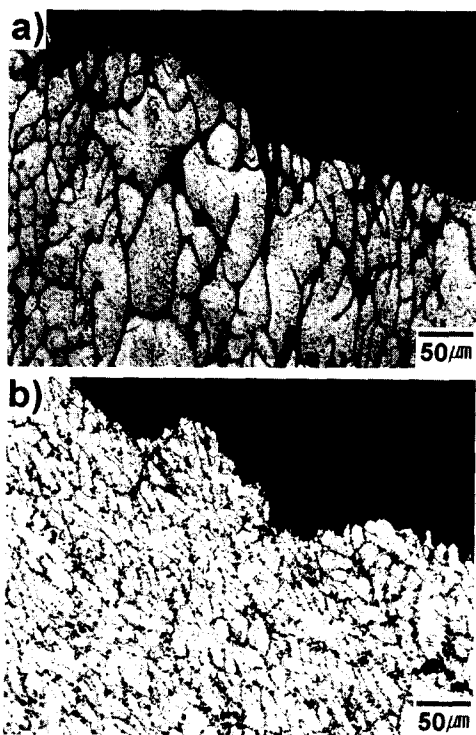


Fig. 5. Sideviews of tensile fractured semi-solid A356 alloys after thixoforming: (a) as-formed and (b) T6 heat treated, respectively.

크기면에서는 다소 감소하였으나, 형상면에서는 큰 차이를 보이지 않고 있다. 이에 따라 표 3에서 보는 것과 같이 T6

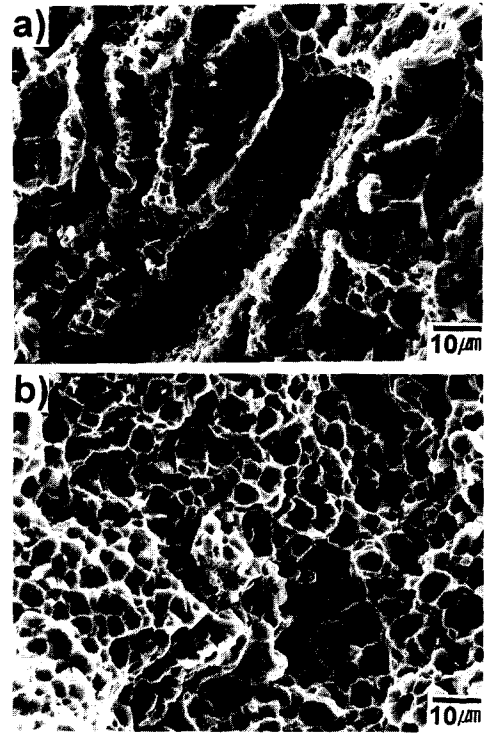


Fig. 6. SEM fractographs of tensile fractured semi-solid A356 alloys after thixoforming: (a) as-formed and (b) T6 heat treated, respectively.

열처리된 경우의 성형전과 성형후의 기계적 특성이 크지 않은 것으로 사료된다.

3) 반응고 열처리를 적용한 반응용 성형된 A356 합금의 기계적 특성

지금까지 반응고 금속의 thixotropy 성질을 이용한 반응용 성형 방법에 대한 연구는 주로 성형전 재가열 조건 및 성형시 공정변수들에 대해서 주로 이루어져 왔다. 특히 반응고 금속의 반응용 성형을 위한 재가열 조건은 우선 성형직전의 고상율을 결정하고, 이에 따라 성형된 부품의 기계적 특성에 지대한 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다. 반응용 성형을 위한 재가열은 성형전 원소재의 고상율을 적절히 유지하면서, 성형하고자 하는 빌렛의 내부까지 고르게 가열하여야 함으로 유도 가열을 이용하는 것이 일반적이다. 유도가열을 이용하는 경우에도 정확하고 균일한 온도 조절이 용이하지는 아니며, 재가열 조건이 적절치 못하였을 때 일어날 수 있는 기계적 특성의 저하에 관해서는 국내외적으로 체계적으로 연구되어 있지 않고 있는 것이 사실이다. 본 연구에서처럼 전기로를 이용하여 성형하고자 하는 빌렛을 가열하였을 경우, 특히 열처리되지 않은 성형품에 관해서는, 극심한 기계적 특성의 저하가 일어날 수 있는 가능성을 표 3에서 이미 제시하였다.

본 연구에서는 급격한 기계적 특성의 저하를 나타내는 성형된 부품에 대해 반응고 합금 빌렛 제조에 사용되는 SIMA 공정과 유사한 열처리를 성형 후 공정으로 적용하여 보았다. 즉 반응용 성형된 A356 합금 시편을 고액공존 온도인 577°C 직전의 온도로 가열한 후 기계적 특성의 변화를 관찰하였다. 표 4는 이러한 후처리 공정을 거친 반응고 A356 합금 성형체의 기계적 특성을 나타내고 있다. 그림 8에서는 지금까지 얻어진 반응고 A356 합금의 (a) T6 열처리하지 않은 시편과 (b) T6 열처리한 시편의 원소재 상태, 반응용 성형 상태와 이를 후처리한 상태의 인장, 항복강도 및 연신률을 비교하여 나타내었다. 본 표와 그림에서 보는 바와 같이 후처리 공정을 성형된 제품에 적용하였을 때 강도 면에서 상당한 향상을 기할 수 있음을 알 수 있다. 예를 들어 반응용 성형된 A356 합금 시편을 577°C에서 8분간 유지한 후 수냉하였을 때 성형된 시편에 비해 인장강도 면에서 78%, 원소재에 비해 16%의 강도 증가를 나타내고 있다. T6 열처리된 시편에서도 후처리 공정을 적용하였을 때 반응용 성형된 상태에 비해 15%, 원소재에 비해 10% 이상의 강도 증가를 보이고 있다.

후처리 공정을 적용하였을 때 강도 증가의 원인을 알아보 고자 반응용 성형된 A356 합금 시편을 (a) 577°C에서 8분간 유지한 후 수냉하였을 때와 (b) 이를 다시 T6 열처리 하였을 때의 미세조직을 광학현미경으로 관찰한 사진을 그

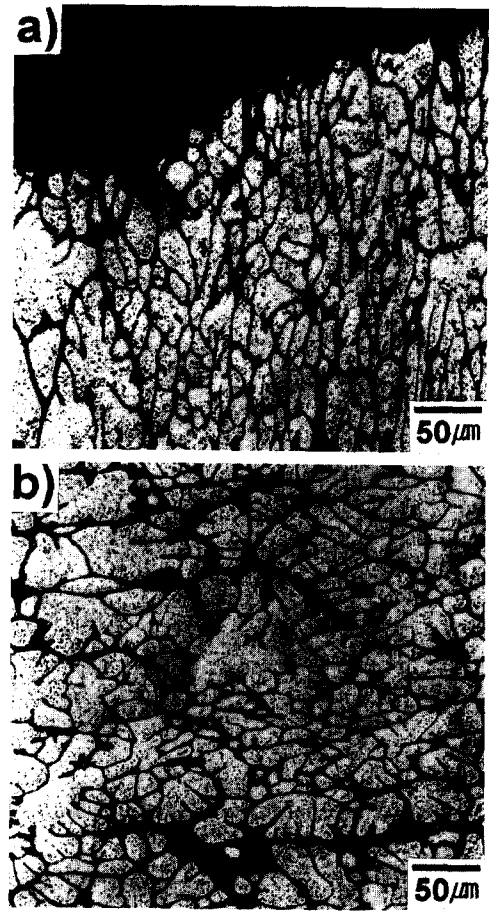


Fig. 7. Sideviews of tensile fractured semi-solid A356 alloys after thixofforming. Pictures were taken in the (a) fracture area and (b) 10mm away from the fractured area.

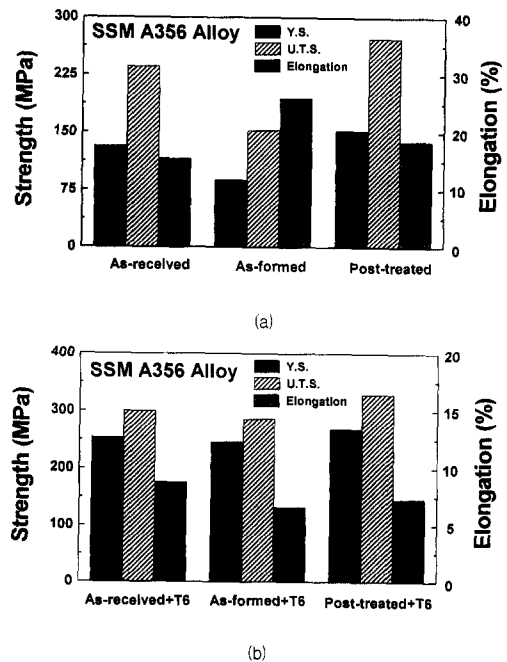


Fig. 8. Changes in tensile properties of semi-solid A356 alloys after each processing step: (a) without T6 heat treatment and (b) with T6 heat treatment, respectively.

Table 4. Mechanical Properties of thixofomed A356 alloy with post heat treatment.

Post-processing Condition	YS (MPa)	UTS (MPa)	Elongation (%)
577°C-8min+WQ	153	273	18.5
577°C-8min+AC	113	226	23
577°C-8min+WQ+T6	269	329	7.3

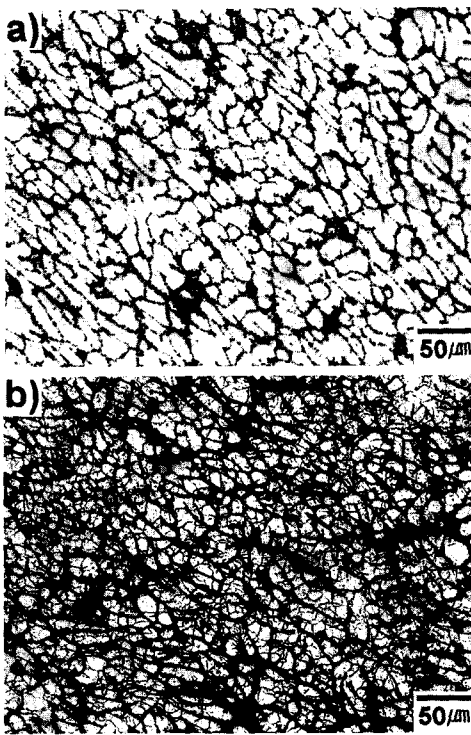


Fig. 9. Optical micrographs of semi-solid A356 alloys after thixoforming and post treatment: (a) as-post treated and (b) T6 heat treated, respectively.

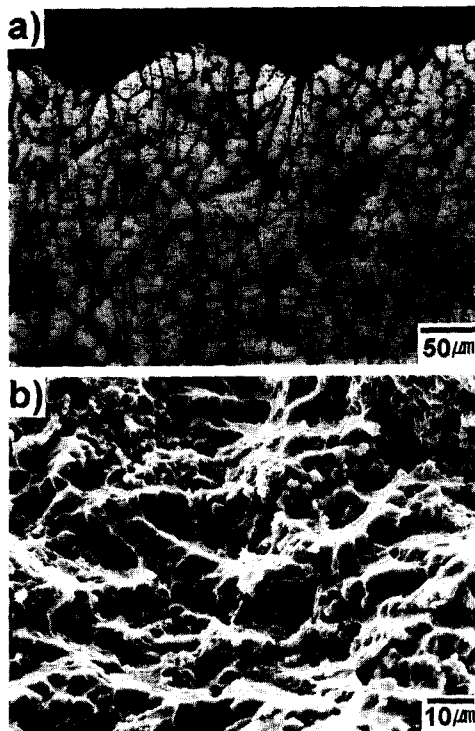


Fig. 10. Optical sideview and SEM fractograph of semi-solid A356 alloys after thixoforming and post treatment: (a) sideview and (b) fracture surface, respectively.

림 9에 나타내고 있다. 그림 9와 그림 4를 비교해 보면, 후처리 공정을 적용한 성형된 시편의 미세조직에서는 초정의

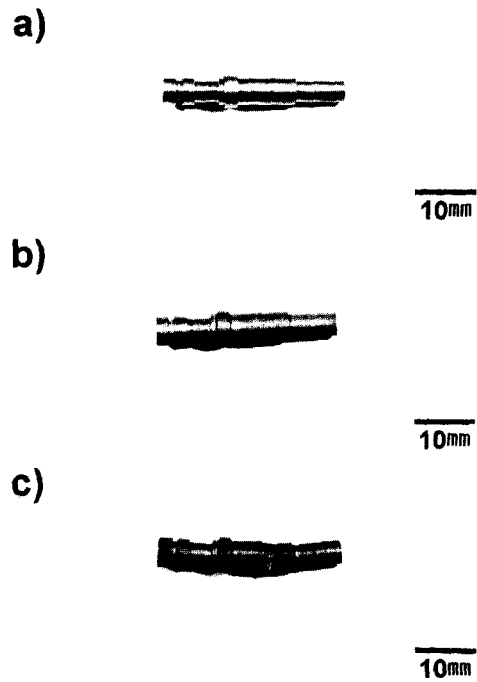


Fig. 11. Macroscopic views of proportional valve shape, made of semi-solid A356 alloy: (a) as-formed, (b) heated at 577°C for 15minutes and (c) heated at 580°C for 15minutes, respectively.

응집 현상이 관찰되고 있지 않으며, 원소재를 T6 처리하였을 때와 유사하게 상대적으로 미세한 초정 조직과 이들 사이에 공정조직이 균일하게 분포됨을 알 수 있다. 이러한 현상은 577°C의 온도에서 부분적으로 금속 내에 액상이 형성되고, 이러한 액상의 높은 유동성과 열간가공에 의한 SIMA 효과에 의해 액상의 재분포와 초정의 구형화가 동시에 일어난 것에 기인한 것으로 사료된다. 이러한 후처리 공정의 효과는 577°C 미만의 온도에서도 관찰되고 있으며, 이에 대한 금속학적 연구가 본 실험실에서 진행 중이다. 또한 그림 10의 후처리 공정을 거친 성형된 A356 합금 시편을 인장 시험한 후 (a) 광학현미경을 이용한 측면 관찰과 (b) SEM을 이용한 파단면 관찰에서도 알 수 있는 것과 같이, 후처리를 하게 되면 인장파단이 대부분 초정과 공정조직의 계면에서 일어나고 있으며, 초정의 전단은 매우 감소되어 있음을 알 수 있다. 파단면 관찰에서는 공정조직에서의 Si 입자에서 생성된 microvoid에 의해 대부분의 인장파단이 진행되었음을 알 수 있다.

진술한 후처리 공정을 성형품에 적용하는데 있어서 액상의 생성은 실제로 성형된 제품의 정확한 치수를 유지할 수 없을 경우를 발생시킬 수 있다. 따라서 최종 부품의 형상유지 여부를 살펴보기 위하여, 자동차용 브레이크 실린더에 들어가는 proportional valve 형상을 580°C에서 10분간 유지하여 조직을 구형화한 반응고 A356 합금에서 기계 가공하여 577°C의 온도에 15분 그리고 580°C에서 15분 노출시킨 후 치수 유지 가능성을 관찰해 보았다. 그림 11에서 보는 것과 같이, (a) 가열전과 (b) 577°C에서 15분 노출하였을 때는 치수의 차이는 전혀 관찰되지 않았다. 그러나

580°C에서 15분 가열하였을 경우(그림 11(c))는 형상을 유지하지 못하는 것을 알 수 있다.

결론적으로 본 연구에서는 반응고 A356 합금을 특별히 재가열 조건이나 성형 조건을 정밀하게 제어하지 않고 성형하였을 때 발생할 수 있는 기계적 특성의 급격한 저하 현상과 이의 원인을 살펴보았다. 또한 이처럼 기계적 특성이 저하된 반응고 A356 합금 성형품의 기계적 특성의 회복 또는 증가를 도모할 수 있는 후처리 가능성을 제시하였다. 그러나 이러한 공정의 실제 적용을 위해서는 많은 금속학적인 연구가 이루어져야 할 것으로 보인다. 국내외적으로 이러한 시도는 아직까지 없는 것으로 알고 있으며, 충분한 연구를 거쳐 앞으로 알루미늄 합금의 반응용 성형에 적용이 가능할 것으로 사료된다.

4. 결 과

반응고 A356 합금을 고액공존온도로 재가열하여 밀폐형 금형에서 가압 성형한 성형체의 인장 특성을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 반응고 A356 합금을 고액공존온도에서 재가열하여 밀폐형 금형에서 가압 성형한 후의 인장 및 항복강도는 성형전 원소재에 비해 약 35% 내외의 감소를 나타내었다. 반응용 성형된 합금의 미세조직에서 전체적으로 초정의 응집에 의한 조대화 현상이 관찰되었으며, 이러한 조대화가 성형품의 인장 특성 저하의 주된 원인으로 사료된다.
- 2) 반응용 성형된 반응고 A356 합금 성형체를 고액공존 온도인 577°C 직전의 온도에서 수분간 열처리함으로써 성형된 시편이나 원소재의 경우보다 큰 인장 강도를 얻을 수 있었다. 이러한 후처리 공정을 거친 성형된 합금의 미세조직에서는 초정의 응집 현상이 관찰되지 않았으며, 상대적으

로 미세한 초정조직과 이들 사이에 공정조직이 균일하게 분포되어 강도의 향상에 크게 기여한 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 99년도 한국과학재단 산학협력연구지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. D.H. Kirkwood and P. Kapranos (eds), *International Conference on Semi-solid Processing of Alloys and Composites*, 4th ed., The University of Sheffield, England, (1996).
2. *Symposium on Semisolid Forming Technology (I)*, Korean Institute of Metals, Korea, (1996).
3. *Symposium on Semisolid Forming Technology (II)*, Korean Institute of Metals, Korea, (1997).
4. D.H. Kim, Y.S. Han and H.I. Lee, *Juno*, **12**, 19 (1992).
5. H.K. Jung and C.G. Kang: *Juho*, **18**, 38 (1998).
6. S.B. Brown and M.C. Flemings, *Advanced Materials & Processes*, **1**, 36 (1993).
7. D.G. Kirkwood and P. Kapranos, *Casting Tech.*, *Jan.*, 16 (1989).
8. G. Chiarmetta, *International Conference on Semi-solid Processing of Alloys and Composites*, 4th ed., pp. 204, The University of Sheffield, England, (1996).
9. J.P. Eom, D.H. Jang, S.G. Lim, D.G. Kim and D.E. Yoon, *Juho*, **17**, 26 (1997).