

Al-Si 합금의 소성변형 거동

권용남 · 김상우 · 이영선 · 이정환

Plastic Deformation Behavior of Al-Si Alloy

Y.-N. Kwon, S. W. Kim, Y. S. Lee and J. H. Lee

Abstract

The effect of microstructural characteristics of A356 alloys on tensile behavior was studied in the present study. To authors' knowledge, the microstructural effect on mechanical properties of A356 alloy has not been well understood even though this alloy system is one of the most widely used alloys for the industrial purpose. Specially, quantitative relationship between properties like ductility and fracture toughness with microstructural features is lacking. In the present study, three processing routes was used to fabricate samples with different microstructures like size and distribution of primary alpha and eutectic phases. Also, compressive deformation was used to close casting porosity for the cast samples. Tensile behavior was examine and discussed in terms of microstructural aspects.

Key Words : Al-Si alloy, dendrite arm spacing,

1. 서 론

주조용 Al-Si 계 합금은 용탕의 유동성 및 충전성이 뛰어나 다양한 부품제조에 적용되고 있다. 미량의 Mg 이 첨가된 A356 합금은 Mg_2Si 상의 석출반응을 이용하여 강도가 향상시킨 대표적인 주조형 알루미늄 합금이다[1-4]. 특히, 최근에는 높은 신뢰성이 요구되는 자동차 조향·현가 부품등에도 많이 적용되고 있는 대표적인 주조용 알루미늄 합금이다.

주조용 Al 합금의 기계적 성질은 공공, 산화개재물 등을 비롯한 다양한 종류의 주조 결함의 제거를 통해 향상시킬 수 있음이 잘 알려져 있다[3,4]. 공업적으로 주조품의 품질은 X-ray 투시법을 이용하여 공공의 크기를 기준으로 등급을 부여하는 방법이 사용되고 있다. 주조결함 중 공공(porsity)은 연신율과 파괴인성의 평균값을 크게

감소시킬 뿐만 아니라 주조품 품질의 편차를 증가시키기 때문에 이에 대한 제어가 필수적이다. 기계적 특성을 지배하는 인자로는 초정 입자의 크기와 형상, 공정상의 분포 등이 있으며 이에 따른 강도, 연신율 및 파괴인성에 미치는 영향에 대한 정량적인 결과는 매우 부족한 실정이다. 낮은 연신율 및 파괴인성을 나타내는 A356 합금이 보다 다양한 분야에 적용되기 위해서는 이상에서 언급한 다양한 미세조직 인자들과 물성간의 관계에 대한 보다 정확한 이해가 필요하다.

본 연구에서는 저압주조(low pressure casting), 가압주조(squeeze casting), 반응고 성형(semi-solid casting, rheo-casting)으로 제조된 A356 합금을 이용하여 초정 및 공정상의 특성에 따른 인장특성을 조사, 비교를 실시하였다. 이와 함께 주조품내에 존재하는 공공의 제거를 위하여 열간 압축 변형을 실시한 시편을 제조한 후 인장특성도 평가하였다. 이상의 결과를 통해 A356 합금의 미세조직이 인장거동에 미치는 영향을 고찰하였다.

한국기계연구원 소재성형연구센터

권용남: E-mail:kyn1740@kmail.kimm.re.kr

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 소재는 상용 A356 합금으로 저압주조와 가압주조의 경우 (주)이수금속에서 반응고 성형품은 일본 UBE사에서 각각 제조하였다. 주조품에 존재하는 기공을 제거하기 위하여 480℃에서 압축 변형을 실시하였다. 압축변형량의 변화에 따른 초정상의 형상 변화가 인장특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 변형량을 10~60%로 변화시켜 시편을 제작하였다. 모든 시편은 T6 열처리 후 기계적 시험 및 미세조직 관찰을 실시하였다. A356 주조품의 미세조직은 주조 조건에 크게 영향을 받으며 부위별로 차이를 나타내기 때문에 인장시험을 실시한 시편의 미세조직 관찰을 추가로 실시하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

그림 1은 저압주조, 가압주조, 반응고 성형법을 이용하여 제작한 부품의 대표적인 미세조직 사진이다. 저압주조 및 가압주조품의 경우 전형적인 주조조직인 수지상조직을 나타내고 있으며 반응고 성형품은 구상의 초정 입자를 보이고 있다. 가압주조품은 저압주조품에 비해 수지상의 크기가 훨씬 작은 수준을 나타내고 있으며 이는 주조시 응고속도가 높는데 기인한다. 주조품의 미세조직은 시편의 위치에 따라 차이를 나타내고 있는데 응고가 늦게 진행되는 영역일수록 공정상의 편석이 크게 일어났다. 또한, 본 연구에 사용한 가압주조법의 경우 수축공의 발생이 예상되는 부위에 편으로 가압을 하여 수축공의 형성을 억제하는 주조방안을 사용하였는데 이미 응고가 진행된 초정입자들이 길게 연신이 발생하는 조직도 관찰할 수 있었다.

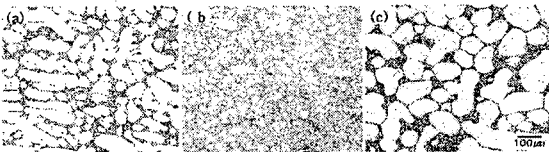


Fig. 1 Microstructure of A356 alloys, (a) low pressure casting, (b) squeeze casting and (c) semi-solid casting.

표 1은 각 공정법으로 제조된 A356 합금의 인장 및 충격시험결과를 정리한 결과이다. 저압주조품과 가압주조품은 강도측면에서는 유사한 물성

을 나타내고 있으나 가압주조품의 연신율이 월등히 높은 것을 확인할 수 있었다. 반응고 성형품은 저압주조 및 가압주조품에 비해 높은 연신율을 나타내었으며 충격에너지값도 유사한 경향을 보이고 있음을 확인하였다. 저압주조품이 특히 낮은 연신율을 나타내는 이유는 주조 공공이 큰 역할을 하고 있다. A356 합금의 주 강화기구는 T6 처리를 통해 형성된 Mg₂Si 석출이나 초정상의 크기와 공정상의 분포도 강도와 밀접한 관련을 가지고 있다. A356 합금의 파괴거동은 Si 입자의 크기 및 형상에 따라 Si 입자의 파괴 혹은 초정/Si 입자 계면의 분리로 변화할 수 있는 가능성이 있다. 반응고 성형품과 같이 Si 입자가 미세하고 구형에 가까워질수록 초정입자에서 응력집중을 완화하여 파괴를 지연시킬 가능성이 높아진다.

Table 2 Mechanical properties of A356 alloys fabricated with three different processes.

	Y.S(MPa)	T.S(MPa)	%	충격 (J/cm ²)
LP	247 ~ 255	283 ~ 306	3.1 ~ 5.6	6.4 ~ 8.0
SQ	220 ~ 258	276 ~ 327	6.0 ~ 13.6	3.7 ~ 4.2
SS	202 ~ 225	263 ~ 285	11.4~14.2	9.5 ~ 11.2

그림 2는 가압주조품 중 초정과 공정상의 크기 및 분포가 다른 시편에 대한 인장시험 결과이다. 인장 결과와 미세조직간의 상관관계를 고찰하기 위하여 파면아래 부위의 조직을 관찰하였다. 그림 2에서 인장강도는 1번 시편, 연신율은 2번 시편이 가장 높은 결과를 나타내었다. A356 합금의 변형은 초정 α상에서 발생한 전위운동이 지배를 하며 초정상을 둘러싸고 있는 Si 상은 초정상에서 발생한 전위의 운동을 방해하는 역할을 한다. 일반적으로 금속재료에서는 결정립 크기가 작을수록 강도가 높아지는 Hall-Petch 관계식이 성립하지만 A356 합금의 경우 초정 α의 크기가 작아질수록 강도가 낮아지는 경우가 발생할 수 있다. 즉, 일정한 공정상 분율을 가지는 경우 초정의 크기가 작아짐에 따라 초정/공정 계면이 증가하며 공정상의 Si 입자들이 초정에서 발생한 전위의 운동을 완벽하게 방해하지 못할 가능성이 높아질 수 있다.

최근에 보고된 결과에 따르면 A356 합금의 기계적 성질은 α 상의 크기 및 이에 따른 공정 Si 입자 분포와 밀접한 관련이 있다. 일반적인 금속 재료에 결정립 크기가 작아질수록 강도가 증가하는 Hall-Petch 관계식이 유효한 반면, Al-Si 합금의 경우 초정 α 상의 크기가 증가할수록 강도가 높아지는 “Inverse Hall-Petch” 관계가 존재함이 보고되었다[5]. α 상의 크기가 작을 경우 α 상과 공정상의 경계면의 분율이 증가하여 공정 Si 이 α 상 내부에서 발생한 전위의 이동을 방해하는 역할이 감소한다. 반대로, 공정 Si 입자들이 α 상을 완전히 둘러쌀 수 있는 경우 전위의 이동이 억제되어 강도가 높아지는 반면 연신율은 감소하는 경향을 나타낸다.

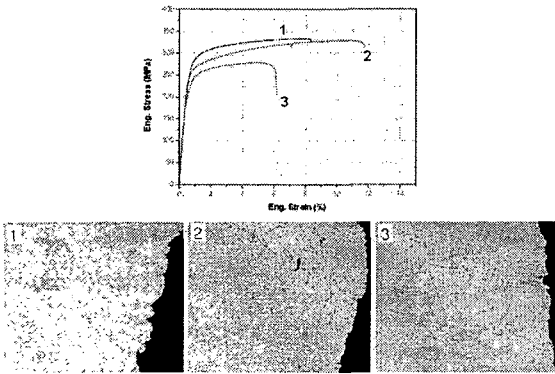


Fig. 2 Tensile curves of squeeze cast A356 alloy with the microstructure having different primary and eutectic phases.

그림 2에 나타난 인장시험에서 1번 시편은 1차 수지상(primary dendrite, PD)이 약 220 μm , 2차 수지상(secondary dendrite, SD)은 50 μm 인데 비해 2번 시편의 경우 PD는 약 170 μm , SD는 약 25 μm 으로 강도가 낮을수록 미세한 α 상을 가지고 있음으로 알 수 있다. 이와 더불어 α 상의 형상이 등축정에 가까울수록 초정/공정계면의 면적이 줄어들며 결과적으로 공정 Si가 보다 효과적으로 전위운동을 방해할 수 있을 것으로 판단된다. 반면 2번 시편이 가장 높은 연신율을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 연신율의 경우 강도와 반대로 α 상에서 발생한 전위가 초정/공정계면에서 집적되지 않고 이웃 α 상으로 이동할 때 높은 값을 가진다. 2번 시편의 경우 초정 α 의 크기가 1번에 비해 작기 때문에 강도는 떨어지지만 연신율

은 높은 경향을 나타내는 것으로 판단된다. 3번 시편의 경우 강도와 연신율이 가장 낮은 값을 가지는데 이는 앞서 언급한 바와 같이 공정 Si 상들이 국부적으로 집적되어 일종의 네트워크를 형성하여 크랙의 발생이 매우 용이한 미세조직을 가지고 있다. 즉, 공정 Si들이 편석되어 있는 colony 들은 변형량이 높지 않은 경우에도 크랙이 발생하여 조기에 파단이 일어날 수 있다.

그림 3은 주조품에 존재할 수 있는 미세공공을 압착시켜 공공이 기계적 특성에 미치는 영향을 감소시킬 목적으로 저압주조품을 480 $^{\circ}\text{C}$ 에서 각각 20, 40 및 60%의 압축변형을 가한 조직이다. 또한, 초정상의 형상을 변화시켜 이에 따른 기계적 특성의 변화를 조사함으로써 공공의 효과를 배제한 A356 합금의 특성을 고찰하고자 하였다. 그림 5에서 알 수 있듯이 압축변형량을 20%까지 가할 경우 초기 주조조직이 비교적 잘 유지되고 있으나 변형량이 증가할수록 초정상의 형상이 길게 연신되는 경향을 관찰할 수 있다.

표 2에 압축변형량을 달리하여 제작한 시편의 인장시험 결과를 정리하였다. 인장시험은 조건당 5개 시험의 평균값을 나타내었다. 압축변형량이 증가함에 따라 항복강도는 대체로 감소하며 인장강도는 증가하는 결과를 얻을 수 있었다. 반면에, 연신율은 크게 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이상의 결과는 주조품에 존재하는 공공이 압축변형에 의해 단힐 뿐만 아니라 초정의 형상 변화와 관계가 있을 것으로 판단된다. 즉, 열간 압축변형 중에 압축 방향으로 초정의 평균 폭이 좁아지며 공정상내의 Si 입자들의 재분배가 발생하여 전위들이 쉽게 인접한 초정상으로 진행할 수 있게 된다. 이러한 미세조직의 변화로 인해 항복강도는 낮아질 수 있으며 연신율은 상대적으로 크게 증가할 수 있다. 또한, 연신율의 증가에 따라 인장강도도 증가할 수 있을 것으로 판단된다. A356 합금의 산업적인 이용시 문제점 중의 하나는 주조품 부위에 따른 기계적 물성, 특히 연신율 분포의 산포가 매우 높은 점이다. 본 실험에 적용한 저압주조품의 연신율의 표준 편차는 약 $\pm 3\%$ 수준이었으나 열간 압축변형을 실시한 후 매우 안정적인 값을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 압축변형량이 60%로 증가할 경우 열간 변형중 Si 입자의 파손이 다수 발생하여 물성의 저하가 발생할 수 있음을 확인하였으며 공업적 적용시 적절한 변형량 설정이 필요하다.

그림 3 은 주단조법으로 제조된 A356 합금의 SEM 내에서 변형을 가하며 파괴 양상을 관찰한 In-situ 시험 결과이다. 공정 Si 입자들에 의해 변형이 저지되며 이로 인해 Si 입자 주위에서 크랙이 발생하여 성장하는 과정을 확인할 수 있었다. 이를 통해 인장 시험에서 확인한 초정상과 공정 Si 입자가 변형에 미치는 영향을 재확인할 수 있었다.

Table 2 Mechanical properties of A356 alloys fabricated with three different processes.

compressive strain(%)	Y.S (MPa)	T.S (MPa)	%	Impact energy (J/cm2)
10	228.3	297.1	8.0±0.3	7.4
20	234	301.3	8.0±0.8	5.8
40	225.1	302.3	13.1±1.8	8.1
60	218.5	294.2	12.1±2.8	9.3

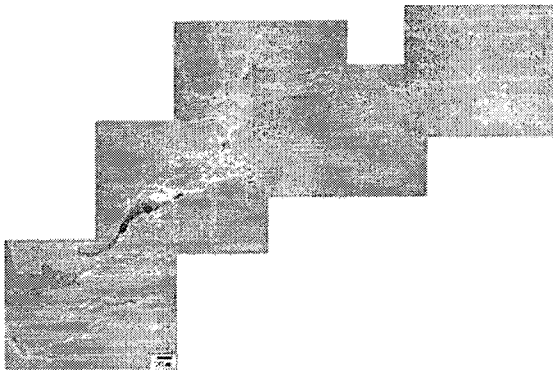


Fig. 3 In-situ fracture cast/forged A356 alloy.

4. 결론

Al-Si 합금의 미세조직에 따른 변형 특성을 조사하였다. 특히, 초정 및 공정상의 변화에 따라 항복강도는 초정상의 크기에 반비례하는 관계를 가질 수 있는 가능성을 확인하였다. 저압주조품에 열간 압축변형을 가함으로써 초정의 형상 및 Si 입자의 분포를 변화시킨 시편에서도 동일한 경향을 확인할 수 있었다. A356 주조합금의 물성향상을 위해서는 공공, 산화물 등의 주조결함의 제거뿐만 아니라 적절한 응고속도 제어를 통한 초정 및 공정과 같은 미세조직적 인자의 제어가 필수적임을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 지식기반기계 부품소재 연구개발 클러스터사업단의 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

1. 박노경 외, 대한금속·재료학회지, Vol. 42(2004), pp. 464.
2. 박철 외, 대한금속·재료학회지, Vol. 41(2003), pp. 750.
3. C. H. Caceres and B. I. Selling, Mater. Sci. & Eng., Vol. A220(1996), pp.109.
4. Q. G. Wang and C. H. Caceres, Mater. Sci. & Eng., Vol. A241(1998), pp.72.
5. A. A. Benzerga, et al., Acta Mater., Vol. 49(2001), p.3071.
6. J. Stolarz, et al., Mater. Sci. & Eng., Vol. A299(2001), pp.275.