

Al-Mg-Si합금의 고온 소성 변형 거동

권용남*·이영선*·이정환*

Plastic Deformation Behavior Of Al-Mg-Si Alloy At The Elevated Temperature

Y.-N. Kwon*, Y.-S. Lee* and J.-H. Lee*

Abstract

Thermomechanical behavior of Al-Mg-Si alloys have been studied to investigate the effect of microstructural features such as pre-existing substructure and distribution of particles on the deformation characteristics. The controlled compression tests have been carried out to get the basic information on how the alloy responds to temperature, strain amount and strain rate. Then hot forging of Al-Mg-Si alloys has been carried out and analyzed by the comparison with the compression tests. Microstructural features after forging have been discussed in terms of the thermomechanical response of Al-Mg-Si alloys. As already well mentioned, we have found that the deformation of Al-Mg-Si at the elevated temperature brought the recovered structure on most conditions. In a certain time, however, abnormally large grains have been found as a result of deformation assisted grain growth, which means that hot forging of Al-Mg-Si alloys could lead to a undesirable microstructural variation and the consequent mechanical properties such as fatigue strength.

Key Words : Thermomechanical Behavior, Al-Mg-Si Alloy, Hot Forging

1. 서 론

Al-Mg-Si 합금은 250~300MPa 범위의 인장강도를 가지는 중강도급의 석출경화형 합금으로 구조부품으로 광범위한 적용예를 가지고 있다. 최근 자동차 경량화의 일환으로 알루미늄 합금의 사용량이 증가하고 있다. 자동차 부품의 적용 부위에 따라 5XXX계 및 6XXX계 합금이 고려되고 있는데 이 중 6XXX계 Al-Mg-Si합금의 경

우 차량 운행시 가장 큰 부하를 받는 부위들을 중심으로 일체형 부품으로 적용이 시도되고 있다. 이러한 구조부품의 생산을 위해 저압주조, squeeze casting, 반응고 성형 및 열간단조등이 고려되고 있는데 가장 신뢰성이 높은 부품의 제조는 열간단조를 통해 이루어지고 있다.

이미 많은 연구자들에 의해 Al-Mg-Si합금의 고온 변형 특성에 관한 연구가 이루어졌으며 그 결과는 알루미늄 고온압출 공정 제어에 효과적으로 적용되어오고 있다.

* 한국기계연구원 공정연구부 소성응용그룹

압출공정은 부위별 변형량, 변형율속도, 가공열에 의한 온도 상승 등 여러가지 공정 변수들의 예측 및 제어가 단조공정에 비해 상대적으로 용이한 측면이 있다. 단조공정의 경우 최종 단조품의 형상이 복잡한 경우가 대부분으로 공정중 발생하는 변형을 및 이에 따른 변형율속도가 부위별로 큰 차이를 나타내는 경우가 대부분이다. 즉, 열간단조품의 경우 부위별로 상이한 미세조직이 공정중에 형성이 되며 이에 따른 물성의 차이가 크게 발생할 수 있는 높은 가능성이 예상된다.

본 연구에서는 Al-Mg-Si합금의 열간단조제어를 위해 사용하는 열간변형 전 재료의 상태 및 온도와 변형율속도가 최종 단조품에 미치는 영향을 조사하였다.

이를 위하여 압출재 및 연속주조재 2종의 Al-Mg-Si 합금을 사용하였다. 압출재의 화학조성은 wt.% 단위로 0.98Mg, 0.62Si, 0.25Fe, 0.29Cu이며 연속주조재는 1.15Mg, 0.84Si, 0.21Fe, 0.26Cu, 0.35Mn을 함유하고 있다. 압출재의 경우 8:1 열간압출 후 400°C에서 소둔을 실시한 상태로 공급받았으며 내부 조직은 아결정립이 발달되어 있었다. 반면 연속주조재는 내부에 변형에서 기인한 전위가 존재하지 않는 완전한 주조조직으로 560°C에서 균질화처리를 실시한 상태로 공급받았다. 이상의 두 가지 합금에 대해 Gleeble machine을 사용하여 압축시험을 실시함으로써 고온변형거동을 조사하였으며 변형시험 후 투과전자현미경으로 미세조직을 관찰하였다.

석출형 알루미늄 합금의 경우 고온변형특성은 첨가 합금원소들의 상태에 따라 크게 영향을 받을 것으로 예상된다. Al-Mg-Si합금의 경우 Mg₂Si 석출물의 유무에 따라 고온 변형 특성이 변화함이 보고되고 있다. Al-Mg-Si합금의 최적 열간단조온도로 알려진 400~500°C의 범위에서 석출거동은 상이할 것으로 생각되며 이에 따른 변형거동도 달라진다. Mg₂Si 석출물은 400°C 부근에서 석출이 가장 빨리 발생하여 수 μm 크기의 조대한 부정합 입자를 형성한다. 반면에 500°C 이상의 온도에서는 Mg 및 Si 원소들이 고용상태로 존재하게 된다. 이상의 석출반응에 따른 변형거동을 평가하기 위하여 용체화처리를 실시한 후 압축시험을 실시하는 방법을 사용하였다.

이상의 결과를 이용하여 실제 단조 공정에서 발생하는 미세조직을 해석하기 위하여 특정한 형상을 가지는 모델 단조 금형을 제작한 후 압출재를 사용하여 실제 단조시험을 실시하였다. 단조품의 미세조직은 Gleeble machine을 사용하여 얻은 시험결과를 이용하여 해석하였다.

2. 소재 상태에 따른 고온변형특성

소재의 변형조직의 유무에 따른 변형특성을 조사하기 위하여 변형율속도를 0.01~10/s, 변형온도를 350~500°C로 변화시키면서 압축시험을 실시하였다. 알루미늄의 적층결함에너지는 166mJ/m²이며 알루미늄 합금의 경우에도 매우 높은 값을 가지고 있기 때문에 고온 변형시 재결정이 발생할 확률은 매우 낮은 것으로 잘 알려져 있다. 따라서 고온 응력-변형을 곡선의 경우 일정 변형율 이후 정상상태의 응력을 나타내는 경우가 많은 것으로 보고되고 있다. 그림 1은 온도를 변화시키면서 변형율속도 10/s에서 압출재와 연속주조재를 압축시험한 결과를 보여주고 있다. 그림 1(a)의 압출재의 경우 변형응력이 일정변형율이후 정상상태에 도달하는 알루미늄 합금의 전형적인 거동을 보여주고 있다. 이에 반해 연속주조재의 경우 10/s의 높은 변형율속도에서는 가공경화가 관찰되었는데 일반적인 거동과 차이를 나타냄을 알 수 있다.

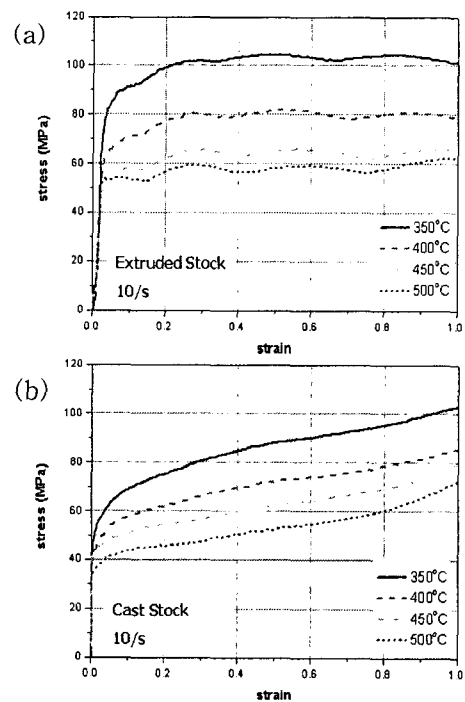


Fig. 1. Stress-strain curves at the strain rate of 10/s (a) continuously cast and (b) extruded stocks

변형률속도 0.01/s 및 1/s의 경우 시험 온도 구역에서 그림 1(a)의 압출재에서와 같이 정상상태를 나타내는 변형 거동을 나타내었다. 가공경화는 변형중 축적되는 전위의 축적에 비해 회복등을 통한 전위의 소멸속도가 낮아지기 때문에 발생한다. 연속주조재에서 변형률속도가 낮을 경우 전위의 축적과 소멸의 속도가 평형을 이루어 정상상태를 나타내는 반면 변형률속도가 높아질 경우 회복의 속도가 낮아져 가공경화가 발생하는 것으로 판단된다. 연속주조재의 경우 균질화처리를 실시하였음에도 불구하고 결정립계 주위에 용질원소의 농도가 높게 관찰이 된다. 평균에 비해 높은 용질원소들이 존재할 경우 climb을 위해 필요한 공공의 농도는 상대적으로 낮아지게 된다. 결국 불균일한 조성분포를 가지는 연속주조재의 climb속도는 압출재에 비해 낮은 값을 가지게 되며 그 결과 특정 변형률속도 이상에서는 전위의 생성과 소멸이 균형을 이루는 정상상태가 깨어져 가공경화가 발생한다.

석출강화형 알루미늄 합금의 고온 가공시 용질원소의 석출 상태가 고온 변형에 영향을 발생할 것으로 예상된다. Al-Mg-Si 합금에서 Mg_2Si 입자가 수 μm 의 크기로 빠르게 석출하는 것으로 측정된 400°C와 용체화상태로 소재가 유지되는 500°C로 시험온도를 결정하였다. 그림 2는 이상의 조건에서 시험한 결과를 나타낸 것으로 변형온도가 500°C에서는 용체화처리 시편과 as-received 시편 모두 동일하게 정상상태의 변형 거동을 나타내는 것으로 관찰되었다. 즉, 500°C에서는 가열에 의해 용질원소들이 모두 고용되어 동일한 거동을 나타냄을 알 수 있다. 이에 반해 400°C 변형의 경우 용체화처리 시편은 초기 최대응력을 나타낸 후 점차로 응력이 감소하는 경향을 보이는데 비해 as-received 시편의 경우 약간의 가공경화가 발생하는 경향을 확인할 수 있었다. 용체화처리를 한 시편을 석출이 활발하게 일어나는 온도에서 변형을 가할 경우 소재 내부의 용질원소들이 석출이 발생하여 초기에 최대응력을 나타내게 되며 변형이 진행됨에 따라 기지내에 고용되어 있던 용질원소가 소진되어 응력이 낮아지는 경향을 보인다. 반면 as-received 시편의 경우 압출 후 400°C에서 annealing을 실시할 때 이미 용질원소의 석출이 진행되어 고용에 의한 강화효과는 거의 없는 상태로 기지의 강도만이 표현되는 것으로 판단된다.

그림 3은 400°C에서 압축시험을 실시한 후 변형조직을 관찰한 결과이다. 압출재와 연속주조재에 관계없이 수 μm 에 이르는 아결정립들이 잘 발달되고 있음을 확인하였다. 즉, 미세조직 관찰을 통해서도 압축시험결과에서 확인한 바와 같이 Al-Mg-Si 합금 변형거동은 회복에 의해 지배됨을 확인할 수 있었다.

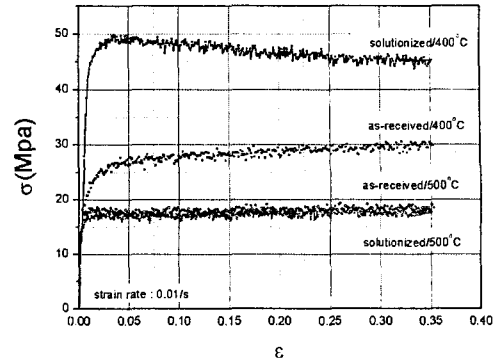


Fig. 2. Flow curves of Al-Mg-Si alloy with the condition of solutionized and as-received states.

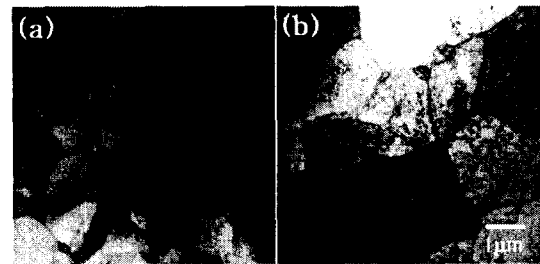


Fig. 3. TEM micrograph showing the recovered structure (a) Extruded and (b) Cast stocks.

3. 변형률속도 및 온도의 영향

Al-Mg-Si 합금의 고온 변형시 변형률속도의 영향을 조사하기 위하여 그림 4와 같이 응력-변형률속도 곡선을 압축시험으로부터 얻어내었다. 압출재와 연속주조재의 변형률속도 민감계수값은 정상상태의 변형구역에서 0.09~0.18의 범위의 값을 가지고 있으며 온도가 높아짐에 따라 커지는 일반적인 경향을 보여주고 있다. 변형률속도 민감계수 값이 0.5이상으로 높은 경우 결정립계 미끄러짐이 주 변형기구로 작동한다고 알려져 있으며 본 연구에서 얻은 값의 범위의 경우 전위 슬립이 주 변형기구로 작동하는 것으로 해석될 수 있다.

변형시 필요한 활성화에너지를 정상변형상태에서 측정하여 그림 5에 나타내었다. 압출재와 연속주조재에 관계없이 약 $Q=130kJ/mol$ 으로 알루미늄의 자기확산 활성화에너지 $142kJ/mol$ 에 유사한 값을 가짐을 확인할 수 있었다. 즉, 합금 상태에 관계없이 Al-Mg-Si 합금의 고온 변형은 전위의 climb이 변형의 속도를 지배하는 것으로 해석할 수 있다. 이상의 결과는 그림 3에 나타낸 바와 같이 아결정립이 잘 발달한 회복조직과 잘 일치하는 경향을 보여주고 있다.

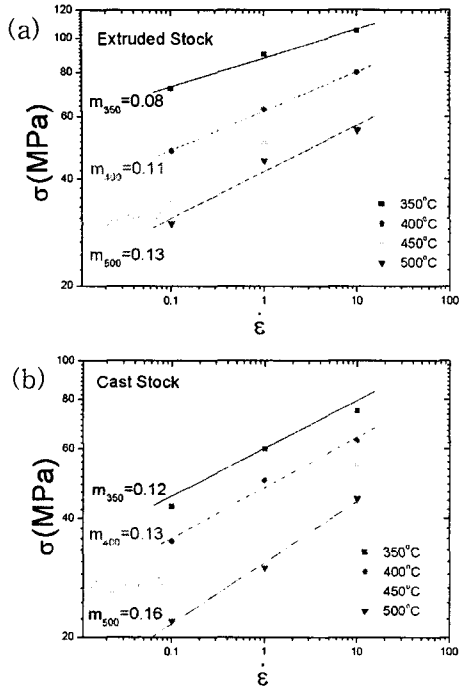


Fig. 4. Stress-strain rate curves for Al 6061 alloys (a) Extruded and (b) Cast Stocks.

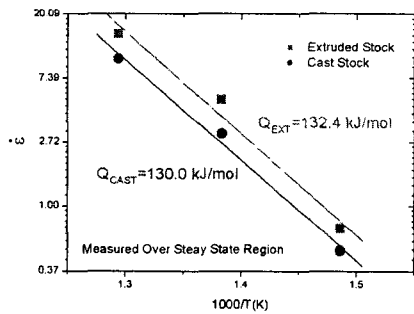


Fig. 5. Activation energy for high temperature deformation of Al-Mg-Si alloys.

4. Al-Mg-Si합금의 고온단조

압축시험 및 미세조직 관찰을 통해 얻은 결과를 실제 단조품에 적용하여 해석해 보기 위하여 그림 6(a)에 나타낸 것과 같은 모델 금형을 제조하여 단조시험을 실시하였다. 단조에 사용된 소재는 두께 35 mm의 압출재이며 단조온도는 400°C에서 가열후 실시하였다. 크랭크 프레스를 사용하여 단조를 실시하였으며 변형률속도는 약 20/s에 해당하는 것을 유한요소해석을 통하여 확인하였다. 그림 6(b)는 그림 6(a)에 표시한 구역의 조직을 관찰한 결과로 부위에 따라 매우 변화가 심한 것을 확인할

수 있다. 압축시험을 실시한 조건에서는 발생하지 않았던 결정립 성장으로 인해 수 cm에 이르는 조대한 결정립들이 절단면 좌측에 수직방향으로 관찰되었다. 이에 반해 중간에 얇은 두께를 가지는 부위는 약 100 μ m내외의 결정립을 관찰할 수 있었으며 우측에는 회복으로 형성된 feathery 결정립계를 확인할 수 있었다. 각각의 부위의 미세조직 형성은 단조중 가해진 변형을 뿐만 아니라 변형률속도 및 가공열에 의한 추가적인 온도상승에서 원인을 찾을 수 있다. 그림 6(c)는 유한요소해석으로부터 얻은 해당 부위의 변형률 분포를 나타내는 그림으로 그림 6(b)와 비교할 경우 비정상 결정립성장이 발생한 구역은 변형률이 높은 구역($\epsilon > 0.95$)과 일치하는 경향이 있다. 하지만 이 구역의 결정립성장은 압출재의 집합조직 및 석출물과 같은 제 2상 입자와 결정립계간의 방위관계 등 다양한 미세조직적 요소뿐만 아니라 가공중 온도상승이 복합적으로 작용한 결과로 향후 보다 체계적인 정량화가 필요한 실정이다. 좌측 조대 결정립들에 대비해 중간 부위의 비교적 미세한 결정립들의 구역에서는 변형률속도가 $\dot{\epsilon} > 60/s$ 이상으로 매우 높은 값을 가지는 것을 알 수 있었다. 이 구역을 제외한 나머지 영역에서 변형률속도는 10~20/s의 값을 나타내었다. 조대한 석출입자들이 형성된 구역에서는 변형률속도가 높아질 경우 climb을 통해 전위가 낮은 에너지 배열을 가지는 대신 국부적으로 재결정에 필요한 에너지를 축적할 수 있는 확률이 높아질 수 있다. 이상의 결과로부터 복잡한 형상을 가지는 부품의 제조를 위한 알루미늄 열간단조 공정의 미세조직 제어는 매우 중요함을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 Al-Mg-Si합금의 고온 압축시험을 통해 고온변형특성을 조사하였으며 실제 단조품 제작을 통해 고온변형기구와 미세조직형성의 관계를 고찰하였다. 이를 통해 균일한 미세조직과 기계적 물성을 가지는 알루미늄 열간단조품을 제조하기 위해서는 소재 상태, 공정 조건 뿐만 아니라 금형 설계의 최적화를 통한 변형률, 변형률속도 및 온도 상승의 제어도 필수적으로 고려되어야 함을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

1. F.J. Humphreys and M. Matherly, Recrystallization and Related Annealing Phenomena, Pergamon, 1995.