

주/단조 Al-Si-Mg 합금의 인장 거동

김국주* · 권용남* · 이영선* · 정순철** · 이정환*

Tensile Behavior of Cast-Forged Al-Si-Mg Alloy

K. J. Kim*, Y.-N. Kwon*, Y. S. Lee*, M. H. Bae** and J. H. Lee*

Abstract

Cast-forging process has a lot of advantages in terms of saving materials along with enhancement of mechanical properties. Therefore, this process has been taken as one of candidate process to manufacturing automotive suspension parts. Since most of cast-forging parts are made with using Al-Si alloys of high castability, the mechanical properties largely depends on the primary α and eutectic Si particles. During hot forging step these microstructural features evolve with strain increment. In the present study, the mechanical property evolution was investigated in terms of microstructural evolution with strain. Specially, fracture behavior of A356 alloy was studied to find out how to improve the mechanical properties.

Key Words : Al-Si Alloy, Cast-Forging Process, Fracture Behavior, Eutectic Si, DAS(Dendrite Arm Spacing)

1. 서론

주/단조 공정은 주조 공정을 통해 최종 형상에 근접한 예비 형상을 성형한 후 단조에 의해 최종 형상을 성형함으로써 초정 및 공정상의 형상 제어뿐만 아니라 미세한 수축공을 제거함으로써 기계적 특성을 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라 소재의 이용률을 높일 수 있는 경제적인 공정으로 주목을 받고 있다. 주/단조 공정에는 일반적으로 A356 을 비롯한 Al-Si 계 주조용 합금이 적용되고 있다. A356 합금 주조품의 기계적 특성은 공정 Si 의 형상 및 초정 크기와 같은 미세조직과 기포나 수축공으로 인한 Porosity 등의 주조 결함에 의해 영향을 받는다. 주/단조 공정의 경우 열간 단조 공정에 의해 미세한 Porosity 등과 같은 주조 결함이 제거될 수 있기 때문에 기계적 특성의 향상이

기대된다. 또한, 열간 단조 시 초정 α 상, 공정 Si 의 형상 및 분포 상태가 변화하여 기계적 특성의 변화가 예상된다.

현재까지 보고된 A356 합금을 이용한 주/단조 공정의 연구 결과를 종합해보면 열간 단조 변형량이 증가함에 따라 강도 및 연신율의 향상을 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다. 열간 단조 시 변형량이 20~30%에 이르기까지 강도 및 연신율이 직선적으로 증가하나 30% 이상의 변형량에서는 물성의 향상이 크지 않은 것으로 보고되었다. 이러한 물성의 향상은 열간 단조 시 형성되는 가공 조직에 기인하는 것으로 보고되고 있다. 하지만, Al-Si 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,

* 한국기계연구원 공정연구부

** ㈜ CTR 선행기술연구원

Al-Si 합금의 경우 초정 α 상의 크기가 증가할수록 강도가 높아지는 “Inverse Hall-Petch” 관계가 존재함이 보고되었다. α 상의 크기가 작을 경우 α 상과 공정상의 경계면의 분율이 증가하여 공정 Si 이 α 상 내부에서 발생된 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. 이상과 같은 특징을 가지는 Al-Si 주조품과는 달리 열간 단조를 거친 Al-Si 합금의 경우 초정 α 상의 형상 및 Si 입자의 분포 등과 같은 미세조직적 특징이 주조 상태와는 많은 차이를 가진다.

본 연구에서는 주/단조 공정을 통해 제조된 A356 합금의 기계적 특성에 영향을 미치는 미세조직 변화를 조사하였다. 특히, 주/단조 A356 합금의 파괴 거동에 미치는 α 상 및 Si 입자의 영향을 고찰하였다. 이를 통해 주조품의 낮은 연신율을 향상시킬 수 있는 방안을 제시하고자 하였다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 소재는 상용 A356 합금으로 화학 조성은 표 1에 나타내었다. 주/단조 공정에 사용될 주조 Preform 은 저압 주조법으로 제조하였으며 주조품의 미세조직은 그림 1에 나타내었다. 전형적인 Al-Si 합금 주조 조직을 나타내고 있다. α 상은 250 μm 의 평균 DAS(Dendrite Arm Spacing)를 나타내었으며 공정 Si는 Rod 형상을 보이고 있다. 열간 단조를 위한 60(W) \times 30(D) \times 40(H) mm^3 크기의 직육면체로 주조 Preform 을 가공하였다. 열간 단조는 200톤 수치제어형 프레스에서 실시하였다. 열간 단조 온도에 따른 미세조직의 변화를 조사하기 위하여 400, 480, 530 $^{\circ}\text{C}$ 에서 단조를 실시하였다. 또한, 단조 속도의 영향을 평가하기 위하여 10, 100 mm/min 의 프레스 속도를 사용하였다. 균질화처리의 영향을 평가하기 위하여 열간 단조 전 550 $^{\circ}\text{C}$ 에서 8시간 균질화처리를 실시한 시편과 주조 상태의 시편을 열간 단조에 사용하였다. 열간 단조시 변형량에 따른 미세조직과 기계적 특성을 조사하기 위하여 변형량을 10, 20, 40, 60%로 변화시킨 시험을 실시하였다.

열간 단조 후 540 $^{\circ}\text{C}$ 에서 10시간 용체화처리 후 160 $^{\circ}\text{C}$ 에서 6시간 시효처리를 실시하였으며 이후 미세조직 관찰 및 인장 시험을 실시하였다.

인장 시험후 파면 및 파면 아랫부분의 미세조직을 통해 파괴 거동을 조사하였다.

Table 1 Chemical composition of A356 Alloy used in the present study.

(unit: wt. %)					
Si	Mg	Fe	Ti	Sr	Al
7.120	0.330	0.066	0.116	0.019	Bal.



Fig. 1 Microstructure of low pressure cast A356 alloy.

3. 실험 결과 및 고찰

그림 2는 균질화처리를 실시한 주조 Preform 을 480 $^{\circ}\text{C}$ 에서 100 mm/min 의 프레스 속도로 열간 단조를 실시한 후 시편의 미세조직을 보여주고 있다. 변형량이 증가함에 따라 수직상 조직이 압착되며 60%의 변형량을 받은 조직의 경우 초기 주조 조직을 판별하기 어려운 정도로 큰 조직의 변화가 발생하였다. 온도 및 프레스 속도를 달리한 경우의 미세조직도 그림 2의 경우와 동일한 양상을 나타냄을 확인할 수 있었다.

그림 3은 100 mm/min 의 프레스 속도로 각각 400, 480, 530 $^{\circ}\text{C}$ 에서 열간 단조를 실시한 A356 주/단조 시편의 인장시험 결과를 나타내고 있다. 문헌에 보고된 바와 같이 열간 단조 후 강도 및 연신율의 향상이 관찰됨을 확인할 수 있었다. 하지만, 강도 및 연신율이 동일한 양상으로 향상되지

는 않는 것을 본 연구에서 확인할 수 있었다. 즉, 항복강도의 경우 10%의 열간단조를 수행하였을 경우 가장 높은 값을 나타내었으며 변형량이 증가할수록 감소하는 경향을 보여주었으며 인장강도는 동일한 열간 단조 온도의 경우 변형량에 크게 관계없이 일정한 값을 보이고 있었다. 반면, 연신율은 변형량이 증가할수록 직선적으로 증가함을 확인할 수 있었다. 초기 주조 Preform의 연신율이 6%인 것에 비해 주/단조품의 연신율은 10%이상으로 크게 향상된다. 또한, 열간 단조가 480°C 일 경우 가장 우수한 인장 특성을 나타내는 것으로 확인할 수 있었다.

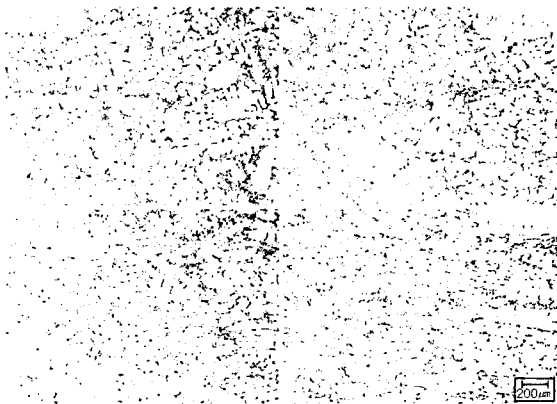


Fig. 2 Microstructural evolution of cast-forged A356-T6 alloys which were hot forged at 480°C with the press speed of 100mm/min.

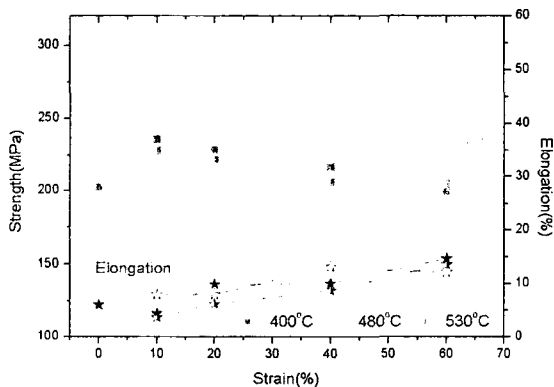


Fig. 3 Tensile results of cast-forged A356-T6 alloys with the variation of forging temperature.

그림 4는 열간 단조에 사용한 주조 Preform의 균질화처리 유무에 따른 주/단조 특성을 나타내는 그림이다. 균질화처리를 실시한 후 열간 단조를

실시한 시편의 인장 특성이 주조품을 그대로 단조한 경우에 비해 전반적으로 높게 관찰되고 있었다. 변형량이 10%로 낮은 경우와 60%로 높은 경우 물성이 동일한 수준이나 20~40%의 변형율을 가지는 경우 균질화처리 시편이 우수한 경향을 보인다.

그림 5는 프레스 속도를 변화시키면서 시험한 결과로 20%까지의 낮은 변형량 구역에서는 100mm/min의 프레스 속도를 가지는 시편이 높은 강도를 보이는 반면 40%이상의 높은 변형율 구역에서는 10mm/min의 낮은 프레스 속도로 제조된 시편이 상대적으로 높은 강도를 보인다. 연신율은 프레스 속도에 크게 영향을 받지 않는 것으로 확인되었다.

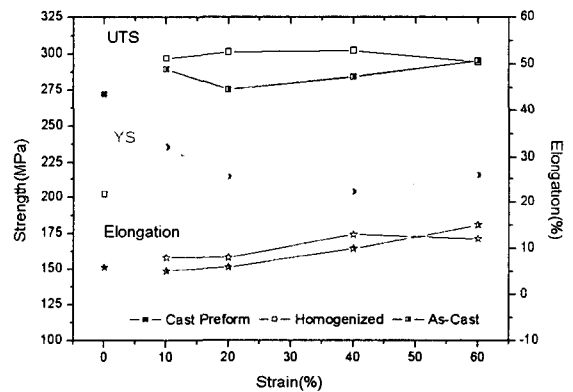


Fig. 4 Tensile results of cast-forged A356-T6 alloys with the variation of perform status 480°C.

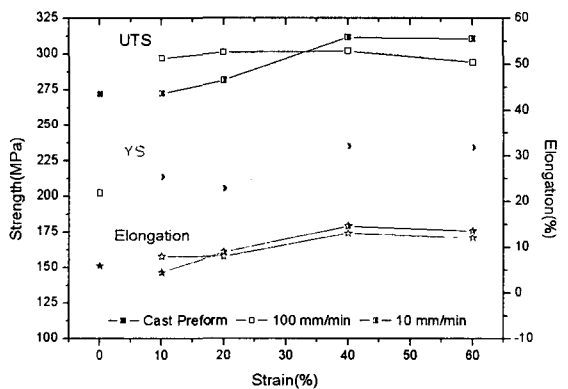


Fig. 5 Tensile results of cast-forged A356-T6 alloys with the variation of press speed at 480°C.

그림 6은 480°C에서 100mm/min의 프레스속도로 열간 단조한 시편의 인장 파면이다. 압축량이

증가함에 따라 주조품에서 관찰되던 벽개파괴 양상이 감소하는 반면 덩플들로 구성된 연성파괴경향이 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 압축률에 관계없이 주조품에 존재하고 있는 수축공들이 관찰되고 있다. 본 연구에 사용한 주조품은 저압주조법으로 제조되어 초기에 최고 200 μ m 정도의 Porosity 를 함유하고 있었다. 그림 6 의 40% 시편에서 알 수 있듯이 수축공과 접하고 있는 수지상조직이 열간 단조시 압착된 조직으로 파괴를 앞당기는 역할을 하는 것으로 판단된다. 주/단조 공정에서 열간 단조량의 증가에 따라 연신율이 직선적으로 향상되는 이유는 주조품에 존재하는 수축공 등의 결함이 압착되어 제거됨에 원인이 있다고 판단된다.

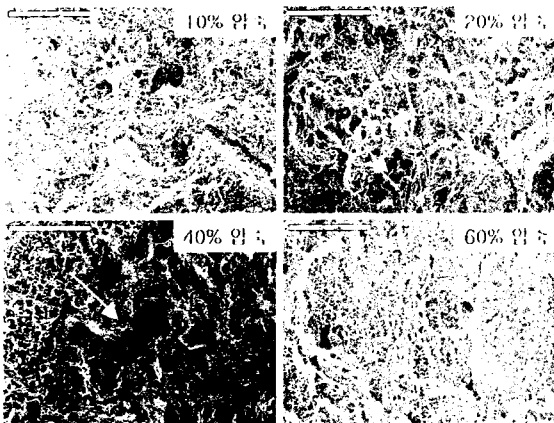


Fig. 6 SEM micrographs of cast-forged at 480°C with strain increment.

그림 7 은 인장 파면 아래 부위의 미세조직을 관찰한 결과로 Si 입자의 파괴 및 α 상들과의 계면이 분리되는 양상으로 모두 보여주고 있다. 주조용 A356 합금의 경우 입내 파괴가 주도적일 경우 입계 파괴 주도 합금에 비해 연신율이 크게 감소하는 경향을 나타낸다. 열간 단조 변형량이 증가함에 따라 초정 α 상의 Dendrite Arm 간격의 좁아진다. 또한, Si 입자들로 구성된 공정상의 폭도 감소하며 이로 인해 α 상에서 발생한 전위의 이동이 용이해진다. 따라서, 열간 단조량이 높을수록 연신율이 증가하며 공정상 경계에서 전위 축적에 의한 크랙 발생의 가능성이 낮아진다. 공정상 경계에서 응력 집중의 효과가 낮아질수록 Si 입자의 파괴보다는 Si 입자와 α 상 경계의 분리를 통한 크랙 전파가 주도적이 될 가능성이 높아져 연신율

의 향상이 관찰되는 것으로 판단된다.

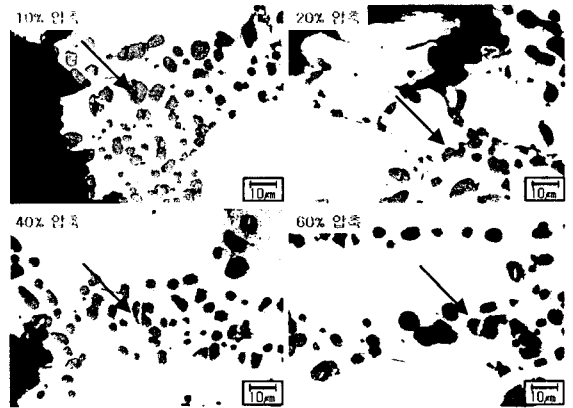


Fig. 7 Micrographs showing fracture morphology beneath fracture surface of cast-forged at 480°C with press speed of 100mm/min.

4. 결론

주/단조 A356 합금의 기계적 성질은 열간 단조 온도, 단조량, 변형 속도 및 Preform 의 균질화처리에 따라 변화한다. 또한, 파괴거동은 단조량 증가에 따른 Si 입자들의 변화에 따라 입계 파괴가 주도적으로 작용하여 연신율의 향상을 얻을 수 있었다.

후 기

본 연구는 산자부 중기거점 경남지역특화사업 (MK21) “경량소재 Fusion 성형기술” 과제의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) 박노경 외, 2004, "주/단조 공법으로 제조된 A356-T6 합금의 기계적 및 부식 특성", 대한금속·재료학회지, Vol. 42, p. 464.
- (2) 유민수 외, 2003, "주조/단조 기술을 이용한 알루미늄 Lower Control Arm 제조에 관한 연구," 한국소성가공학회 춘계학술대회, p. 139.
- (3) Q. G. Wang etc, 1998, "Fracture mode in Al-Si-Mg casting alloy", Mater. Sci. & Eng., Vol. A241, , p.72.