

Al-Mg-Si 계 합금의 인장 특성에 미치는 합금 원소의 영향

박정호* · 권용남* · 이영선* · 강신우** · 이병근*** · 이정환*

The Effect of Alloying Elements on the Tensile Property of Al-Mg-Si Alloy

J. H. Park*, Y.-N. Kwon*, Y. S. Lee*, S. W. Kang**, B. G. Lee***, J. H. Lee*

Abstract

As an automotive industry's demand for lighter materials gets bigger and bigger, a lot of new strength Al alloys have been developed recently. In the present study, Al 6xxx series alloys were designed to get the strength level of 350MPa with the elongation of 12%. For that purpose, three alloy systems were selected based on the thermodynamics calculation. The effect of both Mg₂Si precipitate and excess Si amount on the newly designed alloys was investigated. Also, heat treatment procedure was studied to optimize the mechanical properties.

Key Words : Al-Mg-Si alloy, Strength, Elongation, Air-slip Casting, Mg₂Si Precipitate, Mn Dispersoid, Ageing, Floating Dendrite

1. 서론

6xxx 계 Al-Mg-Si 합금은 250 ~ 300MPa 범위의 인장 강도를 가지는 중강도급의 석출경화형 합금으로 각종 구조 부품에 폭넓게 적용되고 있다. 지난 10 여년간 자동차 산업에서는 연비 혁신적인 향상을 위한 경량화의 노력이 다방면으로 진행되고 있다. 가장 대표적인 방법으로는 Al 합금과 같은 경량 소재를 채용하여 차체의 중량을 감소시키는 것으로 조향·현가 부품의 경우 6xxx 계 합금의 열간 단조 공정을 통해 부품 생산이 이루어지고 있다. 일반 승용차의 구성 요소별 무게비를 나타낸 그림 1 에서 알 수 있듯이 조향·현가 부품은 총 차체 중량의 23%를 차지하고 있어 Al 합금을 이용하여 30%의 경량화를 달성할 경우 차체를 약 7% 경량화를 달성할 수 있다. 또한, Al 합금을

통해 조향·현가 부품을 제조할 경우 기존에 steel의 경우 다수의 부품을 용접을 통해 접합을 통해 제조하던 공정을 단일 공정으로 바꿈으로써 부품의 모듈화를 더욱 용이하게 달성하여 생산성을 크게 향상시키는 추가적인 장점이 있다.

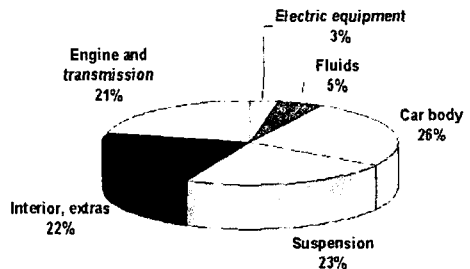


Fig. 1 Weight distribution of components in the usual passenger car.

* 한국기계연구원 공정연구부
** ㈜ CTR 선행기술연구팀
*** 성훈ENG㈜ 기술연구소

이상과 같은 자동차의 경량화에 보다 적극적으로 대응하기 위하여 인장강도 350MPa 이상의 고강도 Al-Mg-Si 합금의 개발이 요구되어 왔다. Al-Mg-Si 합금은 Mg₂Si 석출물을 강도를 얻는 전형적인 석출강화형 합금이다. Si 을 Mg₂Si 의 석출에 필요한 정도 이상으로 첨가할 경우 과잉 Si 이 강도를 향상시킬 수 있다고 보고되었다. 또한, Mn 을 첨가함으로써 미세한 Mn 입자를 기지내에 형성시키는 분산강화를 통해 추가적인 강도 향상 및 안정 변형을 유도할 수 있다.

본 연구에서는 이상의 결과를 바탕으로 기지내 과잉 Si 및 Mn 의 양을 변화시킨 합금을 제조하여 합금원소의 첨가량 Al-Mg-Si 합금의 기계적 특성에 미치는 영향을 조사하고자 하였다.

2. 합금 설계

Al-Mg-Si 에서 과잉 Si 은 Mg₂Si 을 형성하고 남은 성분으로 강도 향상에 기여를 한다고 보고되고 있으나 주조시 결정립계에 편석되어 연신율의 저하를 일으킬 수 있다. Mn 과 Cr 은 주조 및 균질화처리시 전위에 의해 전단되지 않는 분산 입자를 형성함으로써 가공 경화 지수를 높이며 열간 단조시 결정립 성장을 제어할 수 있는 가능성을 가진다. 본 연구에서는 Mg₂Si, Excess Si 및 Mn 의 영향을 평가하기 위하여 표 1 과 같은 세가지 조성의 합금 성분을 결정하였다. 각 합금의 온도에 따른 평형상을 조사하기 위하여 그림 2 와 같이 Thermo-Calc. 프로그램을 사용하여 상태도를 계산하였다. 그림 2 는 Mn 양에 따른 상태도로 그림 2(b)의 Mn 량이 0.7wt. %일 경우 α-AlMnSi 의 분율이 높아지며 Mg₂Si 의 석출온도가 조금 낮아지는 경향을 확인할 수 있다.

Fig. 2 Phase diagram of Al-Mg-Si alloy showing effect Mn addition, (a) 0.3 wt.% and (b) 0.7 wt.%.

표 1 은 본 연구에서 Air-Slip 방식의 연속주조기

를 이용하여 주조한 3 종의 합금 성분을 보여주고 있다. A 와 B 합금의 과잉 Si 은 0.44wt. %이며 평형 Mg₂Si 양은 1.26wt.%로 계산되었으며 Mn 양을 변화시켰다. C 합금의 경우 과잉 Si 양을 감소시키는 대신 Mg₂Si 석출물의 양을 증가시키는 설계를 실시하였다.

Table 1 Chemical composition of Al-Mg-Si Alloys continuously cast in the present study.

(unit: wt. %)							
	Si	Mg	Fe	Cr	Mn	Ex. Si	Mg ₂ Si
A	0.97	0.83	0.19	0.22	0.31	0.44	1.26
B	0.95	0.85	0.20	0.22	0.72	0.44	1.26
C	0.66	1.00	0.23	0.22	0.77	0.10	1.50

3. 실험 결과 및 고찰

Air-Slip 연속주조법으로 제조한 합금을 580°C 에서 8 시간 균질화처리를 실시한 후 용체화처리 및 시효처리를 실시하여 미세조직 관찰과 경도 시험을 실시하였다. 용체화처리는 510, 550°C 에서 1, 3, 5 시간으로 실시하였으며 시효처리는 160, 170, 180°C 에서 8 시간 실시하였다.

그림 3 은 T6 처리후 합금 종류에 따른 광학 현미경조직을 나타내고 있다. 평균 결정립 크기는 조성에 관계없이 약 40μm 로 관찰되었다. 그러나, C 조성의 경우 결정립내에 존재하는 입자가 A, B 조성에 비해 조대함을 확인할 수 있었다. 그림 4 는 조성 변화에 따른 투과전자현미경 사진으로 A, B 조성의 경우 다량의 석출물이 균일하게 분포하고 있음을 관찰할 수 있다. 이에 반해 C 조성의 석출물 분포는 그림 4(c)에서 알 수 있듯이 매우 불균질한 분포를 보여준다. 이상과 같이 매우 낮은 석출물 분포를 가지는 결정립은 주조시 형성된 것으로 판단되는 부유정(Floating dendrite)에 기인하는 것으로 판단된다. 그림 5 는 부유정으로 판단되는 부위를 광학현미경 관찰 결과로 결정립내에 석출물의 농도가 매우 낮게 형성됨을 확인할 수 있다.

그림 6 은 열처리 조건에 따른 경도를 나타내는 결과이다. A 조성을 550°C 에서 용체화처리 후 180°C 에서 시효처리한 경우 가장 높은 경도값을 나타내는 것을 알 수 있었다. 그림 6 의 경도 시험결과 전체적으로 A 조성이 높은 경도값을 가지며 C 조성의 경우 매우 낮은 경도값을 보여주고

있었다. 그림 7 은 각 합금을 550°C 에서 용체화처리 시간을 각각 1, 3, 5 시간으로 달리한 후 170°C 에서 8 시간 시효처리하여 인장시험을 실시한 결과이다. 항복 및 인장 강도는 경도 측정에서와 동일하게 A 합금이 가장 높은 값을 가지는 것으로 평가되었다. A, B 합금의 경우 용체화처리 시간이 3 시간 이상의 경우 강도가 최대값을 보이는 것으로 관찰되었다. 과잉 Si 의 양을 억제한 C 합금은 A, B 합금에 비해 월등히 낮은 강도 수준을 나타내는 것을 관찰할 수 있었다. 연신율의 경우 Mn 첨가량 및 과잉 Si 의 양이 동시에 높은 B 합금에서 가장 낮은 값을 나타내었다. 그림 8 은 인장시험후 SEM 관찰 결과로 모든 경우 파면은 dimple 로 이루어진 연성파면을 나타내었다. 하지만, 결정립계에 존재하는 조대 입자들에 기인한 입계파괴의 경향을 공통적으로 관찰할 수 있었다.

기초 실험을 통해 기존 Al6061 을 대신할 수 있는 고강도 6xxx 계 알루미늄 합금의 가능성을 확인할 수 있었다. 과잉 Si 조성을 가지는 합금(A, B)이 Mg_2Si 석출물의 분율이 높은 합금(C)에 비해 높은 강도를 얻을 수 있었으나 연신율은 낮아질 수 있는 가능성을 확인하였다. Mn 분산물은 열간 단조시 발생하는 결정립 성장을 억제하는 역할을 수행할 것으로 기대하였으나 동일한 Mg_2Si 및 과잉 Si 함량을 가지는 경우 Mg_2Si 가 Mn 분산물에 석출하여 미세한 Mg_2Si 석출물 양이 감소할 뿐만 아니라 Mn 분산물의 크기도 커져 강도 및 연신율의 동시에 낮추는 것으로 판단되었다. 세부적인 결과는 향후 다른 문헌에 보고할 예정이다.



Fig. 3 Micrographs of (a) A, (b) B and (c) C alloys solutionized at 550°C/5hrs and aged at 180°C for 8hrs.

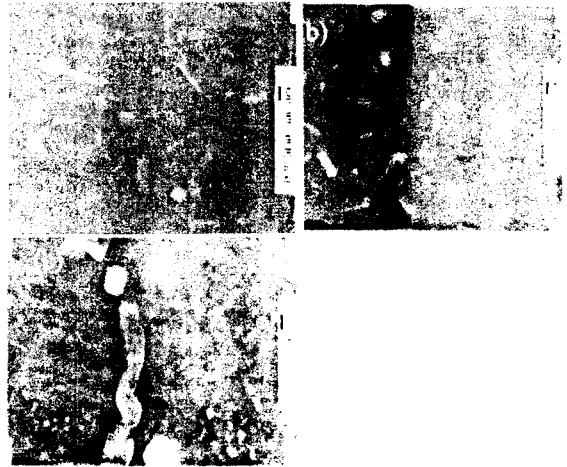


Fig. 4 TEM micrographs of (a) A, (b) B and (c) C alloys solutionized at 550°C for 5hrs and aged at 180°C for 8hrs.

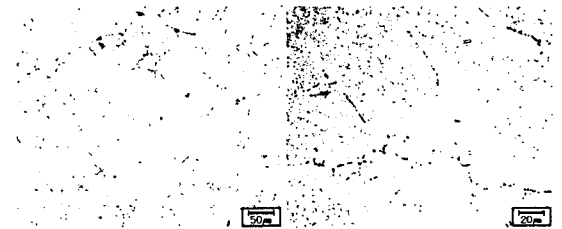


Fig. 5 Optical micrographs of floating dendrite showing uneven distribution of particles.

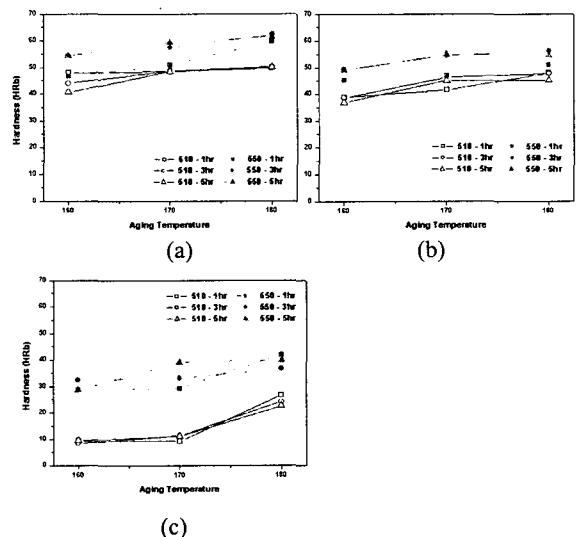


Fig. 6 Hardness with variation of ageing temperature of (a) A, (b) B and (c) C alloys solutionized at 510 and 550°C respectively.

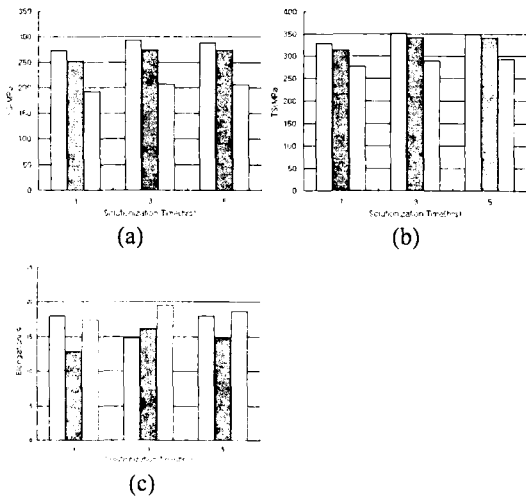


Fig. 7 Tensile properties of (a) A, (b) B and (c) C alloys solutionized at 550°C for 5hrs and aged at 170°C for 8hrs.

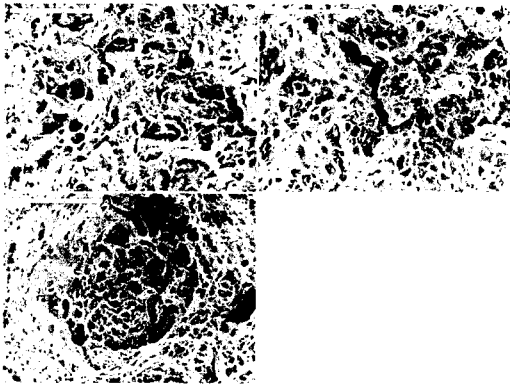


Fig. 8 SEM fractographs of (a) A, (b) B and (c) C alloys showing ductile dimples.

그림 2의 열역학 계산 및 그림 6, 7의 기계적 시험에서 확인할 수 있듯이 최종 부품이 요구하는 물성을 얻기 위해서는 균질화, 용체화 및 시효로 구성되는 열처리과정의 최적 조합이 필수적으로 요구된다. 즉, 6xxx 계 합금의 가장 중요한 강화기구는 Mg_2Si 석출물로서 열처리 제어에 따라 석출물의 형태가 결정된다. Mn을 비롯한 고용점 합금원소의 첨가량이 높아질수록 Mg 및 Si의 완전한 고용에 필요한 용체화 온도가 낮게 형성된다. B 합금의 Mg_2Si 석출온도는 A 합금에 비해 약

15°C 낮음, 그림 2). 이로 인해 Mn, Cr, Fe 계 화합물 주위에 존재하는 Mg, Si 등의 고용원소들의 용체화 경향이 낮아질 수 있다. 또한, 동일한 용체화 처리를 실시한 경우 석출물의 핵생성 자리가 많은 고합금 조성에서 미세한 석출물이 생성할 가능성이 낮아진다. 고강도 6xxx 계 합금은 강도 향상에 가장 좋은 역할을 할 것으로 판단되는 500nm 길이의 rod 형 반정합 석출물(semi-coherent precipitate)의 형성을 유도하기 위해서는 합금 조성에 적합한 열처리 조건의 설정이 요구된다.

4. 결론

인장 강도 350MPa 이상의 고강도 알루미늄 합금의 개발을 시도한 본 연구의 기초 실험을 통해 Mn 첨가 및 과잉 Si 함량의 조절을 통해 자동차용 고강도 열간 단조품 제조용 소재의 개발 가능성을 확인할 수 있었다. 과잉 Si는 6xxx 계 알루미늄 합금의 강도를 크게 높이는 작용을 하였으며 Mn 첨가량이 높을 경우 Mg_2Si 의 복합석출로 인해 강도 및 연신율의 저하가 발생한다. 최적의 기계적 성질(강도 및 연신율의 조합)을 얻기 위해서는 용체화 및 시효 처리의 제어가 요구된다.

후 기

본 연구는 부품소재기술개발사업의 위탁연구인 “6000 계 알루미늄 제어 단조 소재 개발”의 연구비 지원으로 수행된 결과로서 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) R.C. Dorward, C. Bouvier, 1998, "A rationalization of factors affecting strength, ductility and toughness of AA6061-type Al-Mg-Si-(Cu) alloys", Mater. Sci. & Eng., Vol. A254, p. 33.
- (2) L. Lodgaard, N. Ryum, 2000, "Precipitation of containing Mn and/or Cr in AL-Mg-Si alloys", Mater. Sci. & Eng., Vol. A283, p. 144.
- (3) 권용남, 이영선, 이정환, 2004, "Al-Mg-Si 합금의 고온 소성 변형 거동", 한국소성가공학회지, vol. 13, p. 27.