

Al-7.0Si-0.4Mg 합금 자동차 연료계 부품의 스퀴즈 캐스팅에 관한 연구

김순호[#]

A Study on the Squeeze Casting of Al-7.0Si-0.4Mg Alloy for Fuel System Parts

Soon Ho Kim[#]

ABSTRACT

Aluminum alloys casting are gaining increased acceptance in the automotive and electronic industries and squeeze casting is the most efficient method of manufacturing such mass produced parts. This study has been investigated the microstructures and mechanical properties of Al-7.0Si-0.4Mg (AC4C) alloy fabricated by squeeze casting process for development of Fuel system Parts (Fuel rail). The microstructure of squeeze casted specimen were composed of eutectic structure Aluminim solid solution and Mg₂Si precipitates. The tensile strength of as-solid solution treatment Al-7.0Si-0.4Mg alloy revealed 298.5MPa. It was found that Al-7.0Si-0.4Mg alloy have good corrosion resistance in electrochemical polarization test.

Key Words : squeeze casting(스퀴즈 캐스팅), Al-7.0Si-0.4Mg alloy fuel rail(AC4C 합금 연료 장치), Mg₂Si precipitates(중간상 석출물), electrochemical polarization test (전기화학 분극 시험)

1. 서론

현재, 국내 및 세계적인 자동차 산업은 커다란 변혁기를 맞이하고 있는 바, 특히 자동차 기계부품 산업의 경우 세계적인 글로벌 소싱, 모듈화 추진 등으로 기술개발의 중요성이 그 어느 때보다도 중요한 시점이라 하겠다. 따라서 우리나라 자동차 산업도 이러한 기준을 만족시키기 위해 다양한 방법으로 기술개발에 박차를 가하고 있다. 그러한 개발 기술 중에서도 자동차 전체 중량의 경량화는, 자동차 엔진효율 향상, 연비증가로 인한 에너지 문제

접근, 배출가스 저감 등으로 인한 환경오염 감소, 그리고 차량구조 대책 및 충돌 완화가 목적인 안정성 문제 등에 크게 기여할 수 있는데, 이러한 자동차 기계부품의 경량화에는 주철 및 철강소재 부품을 알루미늄(Al) 및 마그네슘(Mg)으로 대체 또는 금속소재의 플라스틱 대체가 활발히 이루어지고 있는 실정이다.^{1,2} 이와 같이 자동차 경량화와 관련된 연구방향은 소재의 경량화에 집중되어 있다 해도 과언이 아니다. 그 이유는 자동차 소재의 경량화는

^{1,2} 접수일: 2003년 5월 21일; 게재승인일: 2003년 11월 14일
[#] 교신저자: 신라대학교 공과대학 자동차기계공학과
E-mail: skim@silla.ac.kr, Tel: (051) 309-5623

엔진효율을 높일 수 있는 최적의 방법이며, 궁극적으로 자동차의 연비 향상을 도모할 수 있기 때문이다. 최근 소재 경량화의 주 연구대상으로는 Al 및 Mg 등 경량 주물 합금소재들을 들 수 있는데, 그 중에서도 Al합금은 강도 및 주조성이 우수하며, 기계가공성, 용접성 및 응력 부식균열 저항성도 우수하여 실린더 부분을 제외한 많은 자동차 부품 제조에 적용되고 있다. 특히, 전신재의 경우 6000계열인 Al-Mg-Si계 합금은 압출성, 단조성 등의 성형성이 특히 우수하여 봉재, 판재, 선재, 각재 및 관재 등으로 가공되어 자동차 등의 수송기계 부품에 많이 사용되고 있다.^{3,5} 또한 2000계열(Al-Cu계 합금)이나 7000계열(Al-Zn-Mg계 합금)에 비해 강도는 낮지만 T6열처리(용체화처리+시효열처리)에 의해 강화되는 것으로 알려져 있다.^{6,7} 그리고 Al주물 합금재의 경우, Al-Si-Mg계 합금(AC4C, AC4A, AC4CH 등)은 주조성이 좋은 Al-6~10%Si계 합금에 소량의 Mg를 가해 Mg₂Si 중간상의 석출에 의한 열처리 효과를 부여해 기계적 성질과 피삭성을 개선한 합금이다. 그 중에서도 AC4C계 합금은 알루미늄(Al)에 Si(6.5~7.5%), Mg(0.2~0.4%), Mn(0.35%) 등이 합금된 Al-Mg-Si합금계로서, Si는 시효석출상 뿐 아니라 주조성 개선 및 내마모성 증대효과가 있으며, Mg은 연성을 저하시키지 않고 내식성 및 용접성의 향상에 기여하고 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 Si의 입계편석으로 인하여 재결정시 입계 취성파괴의 원인이 되는 것으로 알려져 결정립 구조를 조절하는 Mn을 미량원소로 첨가하고 있다. 또한, AC4C 합금은 용체화 열처리에 의해 면심입방정 구조의 금속간 화합물 Mg₂Si를 형성하여 석출강화되는데 석출 과정에 관한 연구는 상당수 보고되어 있다.⁸⁻¹⁰ 이와 같은 AC4C Al소재는 자동차 휠(Wheel)을 비롯한 유압부품, 미션케이스(Mission case), 플라이 휠 하우징(Flywheel housing), 브라켓(Bracket), 수냉 실린더 블록(Water cylinder block), 펌프 본체와 부품(Pump body and accessory) 및 핸들(Handle) 등 대단히 많이 적용되고 있는 자동차 부품소재이다. 한편, 경량화 자동차 부품에 대한 제조기술도 다양화 및 급격한 진보를 거듭하고 있다. 이러한 제조 기술들은 경량화에 의한 연비향상 필요성이 대두되면서 기존 저압주조외 주조기술을 보완한 방법들을 적용하고 있는 바, 특수 다이캐스팅인 PF 다이캐스팅, 용탕단조법(Squeeze casting) 및 반응용 가압성형법(SSF)등을 들 수 있으며,^{11,12} 특히, 신 주조 기술

들로서는, 주물재료의 개량 및 개발에 의한 고 강도화를 통한 두께의 저감, 주물전체의 구조 최적화에 의한 박육화, 경량합금 주물재료 및 신 재료의 적용을 통한 제조공법 개선 등¹³을 들 수 있다. 아울러 이러한 주조방법으로 제작된 주조품은 자동차의 경우, 전체 중량의 약 15% 이상을 점유하고 있으며, 특히, 주행성능에 관련된 엔진, 미션, 샤프트 등의 부품은 약 80% 이상이 주물로 제조되고 있는 실정이다. 여기서, 본 연구에 적용할 스퀴즈 캐스팅 제조법은 기존 저압 또는 금형주조시보다 20%정도의 경량화 효과를 얻을 수 있는데, 이유로는 스퀴즈 캐스팅시 급속한 냉각효과, 치밀한 내부조직 및 기공의 제거 등으로 우수한 주조품질을 확보할 수 있기 때문이다.^{14,15} 이와 같이 경량화 및 제조공법이 개선된 자동차 엔진 연료장치 부품의 하나인 퓨얼 레일(Fuel rail)에 관한 연구·개발은 상당히 관심이 가는 부분이라고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 AC4C Al합금의 미세조직 및 기계적 성질을 조사하고, 시효경화 특성조사, 표면처리를 하지 않은 상태의 부품적용을 위한 부식균열 저항성 등의 특성을 조사한 후, 스퀴즈 캐스팅 제조법을 적용하여 경량화 연료계 부품(Fuel rail)을 개발하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 소재선정 및 시편제조

본 연구의 소재는 주물용 Al합금 중 Al-Si-Mg 합금계를 선정하였는데, 이 합금소재는 Al합금계 중 자동차 부품 제작용 소재로 많이 사용되고 있는 것 중 하나로, 주조상태(F), T4 및 T6 열처리하여 사용되고 있다. 이러한 Al-Si-Mg 합금계 중 AC4A는 Si를 8~10% 함유하고 있어, 용탕 유동성이 양호하지만 α(Al)상의 정출량이 적기 때문에 수축공상의 수축결함을 일으키기 쉬운 결점이 있어, 본 연구에서는 AC4A에 비해 Si(7.0%)와 Mg(0.4%)량을 적게 해 인성을 부여한 AC4C합금(Al-7.0%Si-0.4%Mg)을 소재로 선정하였다. 아울러 사용된 용해로는 모합금의 용해 중 발생하는 산화를 최대한 억제하기 위하여 급속 용해로를 사용하였으며, 용해로 및 보온로를 Fig. 1에 나타내었다. 그리고 용해시 사용된 도가니는 연강제 도가니를 이용하여 미리 예열된 AC4C Ingot를 용해하였으며, 스퀴즈 캐스팅(Maker : Japan UBE

Co., 모델명: HVSC 800)으로 제조된 시편의 화학적 조성은 Table 1에 나타난 것과 같으며, 인장강도, 연신률 및 충격치 등에 큰 영향을 미치는 Fe의 함량을 최대한 억제하였다.



Fig. 1 Schematic of HVSC for melting

Table 1 Chemical composition of Al-7.0Si-0.4Mg alloy

elements specimen	Si (%)	Mg (%)	Cu (%) (max)	Zn (%) (max)	Fe (%) (max)	Mn (%) (max)	Ni (%) (max)	Oth er (%)	Al (%)
ASTM ^{1b} specimen	6.5 -7.5	0.20 -0.45	0.25	0.35	0.55	0.35	0.10	0.45	bal.
Test specimen	7.01	0.40	0.23	0.35	0.32	0.36	0.08	0.30	bal.

2.2 미세조직 관찰

주조조직 및 용체화 처리에 따른 미세조직 변화를 조사하기 위하여, 시편의 중간 평면 부위를 채취한 후, Keller용액(2ml-48%HF, 3mlHCl, 20ml HNO₃, 175mlH₂O)으로 부식시켜 광학현미경 및 주사전자현미경으로 관찰하였다.

2.3 기계적 특성조사

인장시험(시험편 규격: ASTM B557-94)은, 시편의 주조상태에서 단면적 28±0.5mm², 표점거리 6±0.1mm의 봉상형태의 인장시편을 사용하였으

며, 게이지 레인지는 50mm, 크로스 헤드 스피드를 0.5mm/min으로 하여 인장시험을 행하였다. 인장시험에 사용된 인장시편의 갯수는 3개 또는 4개를 사용하여 이를 산술평균하였다.

2.4 시효경화 특성조사

시효경화 특성을 조사하기 위하여, AC4C합금의 편석이나 계재물 등 화학적 불균일부의 효과적인 제거를 위해 540℃에서 30분 동안 용체화처리 한 후, 20℃의 물에 급냉하여 과포화시켰다. 그리고, ±1℃의 오차를 가지는 실리콘 오일 베스를 사용하여 160, 170, 180℃에서 각각 0~28시간 동안 시효열처리하여 경도변화를 마이크로비커스(Microvickers)경도기로 하중 500g, 부하시간 10초로 하여 10~15회 측정, 산술평균하였다.

2.5 부식 특성 조사

표면처리를 시행하지 않은 상태이기 때문에 응력 부식균열등의 조사를 위하여, 합금의 부식 특성을 조사하였는 바, 전기화학분극 장치(Potentiostat : EG&G Potentiostic / Galvanostat Model 273)를 사용하여 컴퓨터로 제어하며 분극시험을 행하였다. 작업전극(Working electrode)은 전극 반응면적이 0.95cm²가 되도록 하였고, 시편홀더는 plate형으로 가공하였다. 대전극(Counter electrode)으로는 탄소봉을, 기준전극(Reference electrode)으로는 포화 칼로멜 전극(Saturated calomel electrode)을 사용하였다. 시편은 직경 15mm, 두께 3mm의 원판형으로 제작하여 0.3μm의 Al₂O₃연마제로 폴리싱한 후 아세톤으로 충분히 초음파 세척하였으며, 내식성 시험은 실온에서 완충용액인 0.03% NaCl 전해액을 사용하여 행하였으며, 실험시작 30분전에 Ar가스를 주입하여 전해액의 용존산소를 최소화하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 미세조직 관찰

Fig. 2는 Al-7.0Si-0.4Mg 합금의 광학 현미경 조직을 나타낸 것으로서, (a)는 주조조직이며, (b)는 용체화처리 후의 조직이다.

주조조직 (a)에서 입계를 따라 나타나 있는 침상입자들은 주조과정에서 형성되는 2상입자 또는

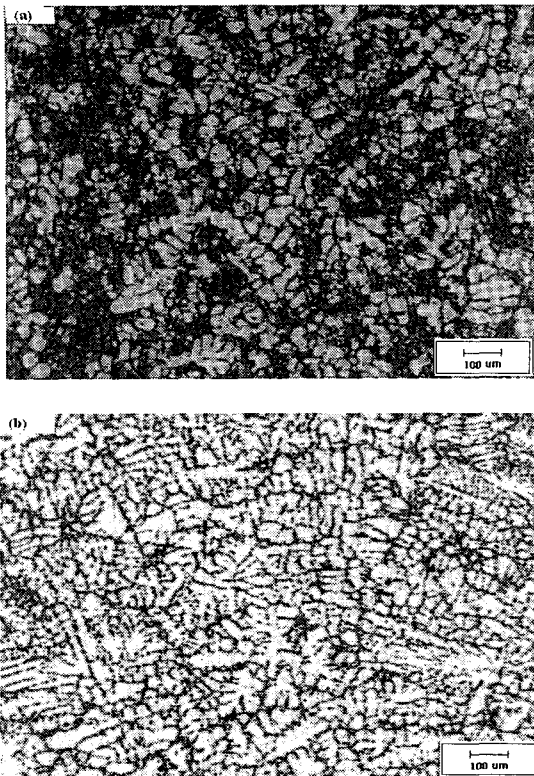


Fig. 2 Optical microstructures as fabricated (a) and solid solution treatment (b) of Al-7.0Si-0.4Mg alloy

화학적 불균질물질 ((Fe,Mn)Al₆, FeAl₃, α-Al(Fe, Mn, Si), Al₇Cr₂Fe)이다. (b)는 540℃에서 30분 동안 용체화처리하여 수냉한 조직으로 주조과정에서 형성된 화학적 불균일부는 제거되었으나 고용점을 가지는 2상 입자 또는 금속간 화합물들은 용체화처리 이후에도 여전히 잔존하고 있음을 알 수 있다. 그러나 대체적으로 두 조직사진 모두에서 주조결함이 효과적으로 제거되어 있으며, 특히, (a)의 주조조직보다 (b)의 용체화처리 조직에서 더욱 미세화 및 건전화되어 있음을 알 수 있는데, 이는 용체화 과정에서 주조결함의 원인이 되는 불순물 및 미소기공 (Microporosity) 등¹⁷⁾의 화학적 불균일부가 효과적으로 제거되었기 때문으로 판단된다.

또한 Fig. 3은 Al-7.0Si-0.4Mg합금의 용체화처리 후의 주사식 전자현미경 사진과 EDS분석결과를 나타낸 것이다.

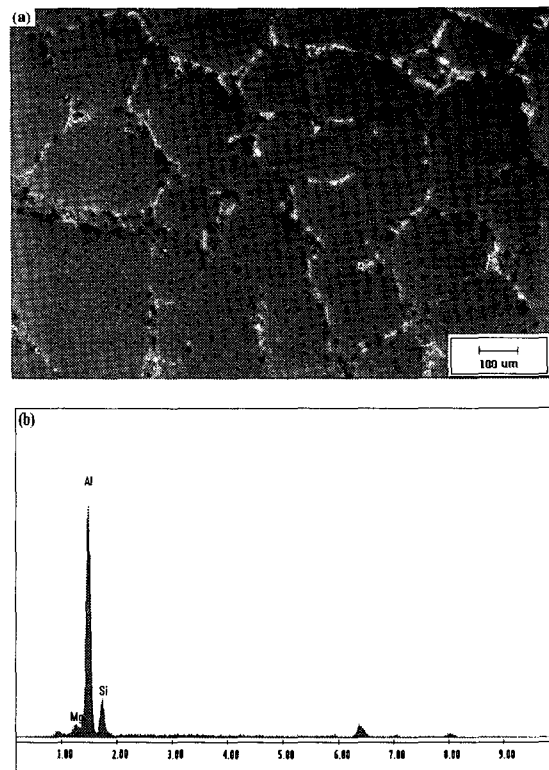


Fig. 3 SEM micrographs (a) and EDS analyses (b) of Al-7.0Si-0.4Mg alloy as solid solution treatment

(a)의 조직사진에서 화합물로 관찰되는 상들은 대부분 결정립 경계부분에 존재하였으나, 일부는 결정립내에서도 관찰되었다. (b)의 EDS분석 결과에서 Mg과 Si의 피크가 같이 나타난 것으로 보아, 결정립계 영역들은 β상(용체화처리과정에서 석출된 중간상 : Mg₂Si) 석출영역이며, 결정입내 영역은 α상(Al 고용체) 석출영역으로 판단된다. 그리고 이러한 α상과 Mg₂Si의 공정상 형성은 비평형 응고의 결과로 볼 수 있는데, 즉, 응고시 계면전방에 축적된 용질에 의하여 응고전면의 액상은 평형응고 온도 아래서도 액상으로 존재하는 조성적 과냉상태가 되며, 이에 의해 고/액 계면이 불안정하게 되어 수지상이 생기게 되는데, 이러한 수지상들이 성장함에 따라 용질을 액상쪽으로 내놓음으로써, 서로 만나 고립된 액상을 형성하게 되는 최종 응고부에서의 과포화된 공정조직으로 볼 수 있다.

3.2 기계적 특성

본 연구에 사용된 AC4C 합금의 기계적 특성을 ASTM 기준, AC4C 합금과 비교¹⁸하여 Table 2에 나타내었다. 용체화처리를 실시한 시편의 기계적 특성 시험결과, 표에서와 같이 최대 인장강도와 항복강도는 각각 298.5MPa, 231.4MPa를 나타내어 ASTM 기준치인 285MPa, 225MPa보다 높은 값을 나타내었다. 그리고 연신율의 경우, 규정값보다 다소 낮은 6.2% 정도로 나타났는데, 이는 용체화 처리 후에, 조밀육방정으로서 슬립시스템이 작은 중간상인 $\beta(Mg_2Si)$ 상의 석출 분률이 높기 때문으로 해석할 수 있다.

Table 2 Mechanical Properties of Al-7Si-0.4Mg alloy as solid solution treatment

Alloy	UTS (Mpa)	YS (MPa)	Elongation (%)	Heating Treatment
ASTM ¹⁸	285.0	225.0	7.3	T6
Test specimen	298.5	231.4	6.2	T6

Fig. 4는 Al-7.0Si-0.4Mg합금의 주사식 전자현미경 조직사진인데, 이것은 용체화 처리된 시편의 인장시험 후의 파단면 조직사진으로서, 주된 파괴형태는 결정입계에서 일어나는 취성파괴 형태를 나타내고 있다. 즉 결정입계 주변에 입자들이 모여 있는 것으로 보아 수자상 경계를 따라 파괴가 일어났음을 알 수 있으며, 결정입내는 일부 dimple이 관찰되고 있다.

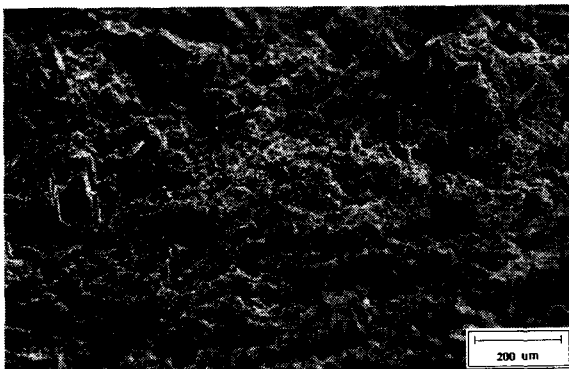


Fig. 4 SEM fractograph of Al-7.0Si-0.4Mg alloy

3.3 시효경화 특성

Fig. 5는 AC4C 합금을 용체화 처리한 후 160, 170, 180℃에서 시효 열처리하였을 때 시효시간에 따른 미소경도변화를 나타낸 것이다.

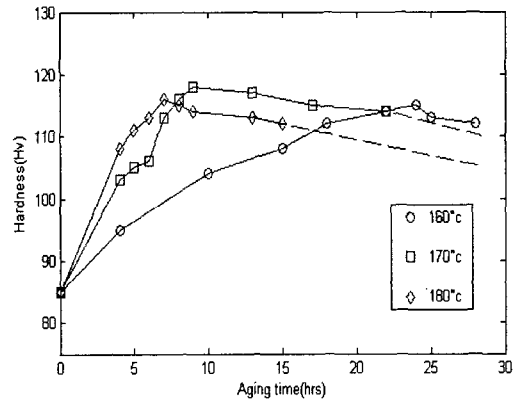


Fig. 5 Aging curves of AC4C Al alloy aged at 160, 170 and 180℃

그림에서와 같이 모든 온도에서 초기 시효시간의 증가에 따라 급격한 경도값의 상승을 보이고 있으며, 160℃에서는 24시간, 170℃에서는 9시간, 180℃에서는 7시간 시효처리시 최고경도값을 나타내었다. 최대경도값은 170℃에서 9시간 시효처리한 경우로서 그 때의 경도값은 118.3Hv이었으며, 이는 ASTM 규정의 AC4C 주물소재인 경우 170℃, 12시간 시효조건시의 값¹⁹인 118Hv에 적정한 값이며, 세 시효온도 모두에서 최고경도 이후의 경도값은 완만하게 감소하였다. 아울러 이러한 시효열처리에 따른 경도변화는 석출물의 석출거동과 밀접한 관련을 가지는 것²⁰⁻²²으로서, 시효 초기에 경도가 급격히 상승하는 것은 Al기지에 석출한 침상 석출물에 의한 내부에너지의 증가에 기인한 것으로 생각되며, 각 시효온도에서 최고 경도값은 침상 석출물과 정합 석출물(β 상)의 석출에 의한 것으로 생각된다. 또한 최고 경도 이후의 경도값이 완만하게 감소하는 이유는 정합 석출물이 평형상으로서의 변태속도가 느리거나 평형 석출상의 조대화속도가 느리기 때문이라고 생각되며, 시효온도가 증가할수록 최고경도값에 이르는 시간은 단시간축으로 이동하였는데, 이는 핵생성속도가 증가하기 때문인 것으로 판단된다.²³

3.4 부식특성

Fig. 6은 $\text{KH}_2\text{PO}_5 \cdot \text{NaOH}$ 완충용액으로 pH 7로 고정된 0.03% NaCl 전해액에서 본 연구시편인 AC 4C (M1) 및 380Al (M2) 시편에 대하여 전류밀도 (mA/cm^2) 변화에 따른 전위의 변화를 측정된 것으로서, 본 연구시편인 M1 시편은 M2 시편에 비하여 높은 부식 전위값을 나타내었으며, 활성화 영역도 상당히 감소하였다는 것을 알 수 있다.

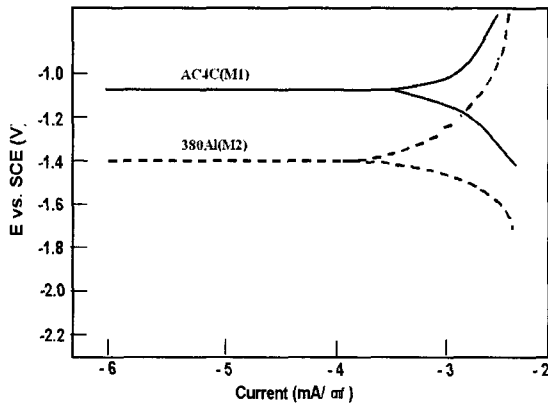


Fig. 6 Potentiodynamic polarization of AC4C(M1) and 380Al(M2) alloys in a deaerated 0.03% NaCl buffered with $\text{KH}_2\text{PO}_5 \cdot \text{NaOH}$ (pH7.0)

또한 분극곡선에서 측정된 부식전류밀도와 시편의 부식반응면적, 밀도 및 등가량으로부터 각각의 부식속도를 계산한 결과에서도 M1 시편의 경우는 0.28(mpy)이었고, M2 시편은 0.43(mpy)로 나타나, M2 시편에 비해 M1 시편이 부식속도가 감소하였음을 알 수 있었다. 이러한 결과들로 보아 유사 Al 합금들에 비해 AC4C(Al-7.0Si-0.4Mg) 합금이 상대적으로 내식성이 양호하다고 볼 수 있다.

이러한 실험결과 및 고찰 등을 거친 후, 스퀴즈 캐스팅 주조방법으로 Al-7.0Si-0.4Mg(AC4C) 합금을 사용하여 Fig. 7과 같이 두께 2.1mm, 중량 123.1g, 길이 288mm의 Fuel rail 시작품을 제작하였다.

4. 결론

자동차 소재 경량화의 일환으로 Al-7.0Si-0.4Mg 합금에 대하여 미세조직 관찰, 기계적 특성 및 내

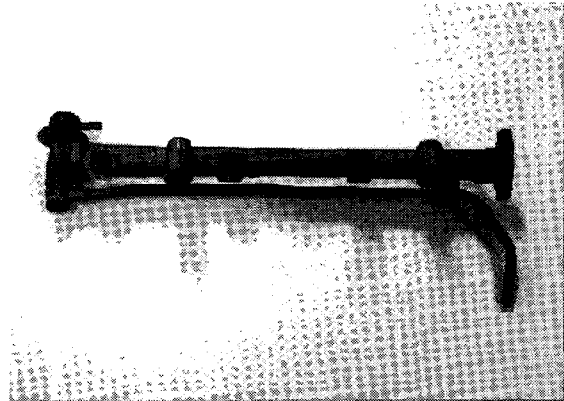


Fig. 7 Photo of Fuel rail trial manufacture

식성 조사 등을 수행한 후, 다음의 결론을 얻었으며, 이 합금을 이용하여 스퀴즈 캐스팅 방법으로 자동차 연료계 장치의 시작품을 제작하였다.

- 1) 미세조직은 Al 고용체인 α 상 및 $\beta(\text{Mg}_2\text{Si})$ 상의 공정조직 (Eutectic structure)으로 구성되어 있었다.
- 2) 인장시험 결과 최대 인장강도와 항복강도는 각각 298.5MPa, 231.4MPa을 나타내어, ASTM 기준치인 285MPa, 225MPa보다 높은 값을 나타내었다.
- 3) 전기화학 분극시험으로 내식특성을 조사한 결과, AC4C 합금은 연간 부식속도가 0.28mpy를 나타내어 내식성이 양호한 것으로 나타났다.
- 4) 스퀴즈 캐스팅 주조방법으로 AC4C 합금을 사용하여 두께 2.1mm, 중량 123.1g, 길이 288mm의 자동차 퓨얼 레일 시작품 제작이 가능하였다.

후 기

본 연구는 2001학년도 신라대학교 교내연구비 지원에 의한 것이며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Chadwick, G. A. and Bloyce, "Magnesium Alloys and Their Applications," DGM Conf., p. 93, 1992.
2. Ruden, T. J., SAE Technical Paper No. 900793
3. Polmear, I. J., "Light alloy," 2nd ed., Edward Arnold, p. 144, 1987.

4. King, F., "Aluminium and Its Alloy," Cambridge University Press, p. 112, 1980.
5. Charlie R. Brooks, "Heat Treatment, Structure & Properties of Nonferrous Alloys," American Society for Metals, 1982.
6. Metals Handbook 10th ed., 2, ASM, p. 152, 1990.
7. Pharr, G. M., Courington, S. V., Wadsworth, J., and Nieh, T. G., "Deformation of an extruded Nickel Beryllide between Room Temperature and 820," J. Mater. Res., 6, p. 2653, 1991.
8. Bryant, A. J. and Aluminio E. Nuova, "Crystallography of Mg₂Si Precipitates in Al-7.0Si-0.4Mg Alloy," Metallurgia, 42, p. 228, 1977.
9. Gupta, A. K. and Lloyd, D. J., "Microstructural Study of Continuous Precipitation in Al Alloys," ICCA3, p. 21, 1992
10. Lynch, J. P. Brown, L. M., and Jacobs, M. H., "Microanalysis of Age-hardening Precipitates in Aluminium Alloys," Acta Metallurgica, 30, p. 1389, 1982.
11. Metal Handbook 9th ed., Vol. 15, ASM., p. 323, 1988.
12. Klein, F., "Magnesium Alloys & Their Applications," DGM, Conf., p. 33, 1992.
13. Shool, S. O., SAE Technical Paper No. 900790
14. Spear, R. E. and Gardner, G. R., "Effect of Applied Pressure on Mechanical Properties of Squeeze Cast Al alloys," Cast. Prod., p. 1988, 1972.
15. Chadwick, G. A., "Behavior in Magnesium Alloy Ingots and Castings," Proceeding of Conf. on Magnesium Technology, Inst. Metal, London, p. 75, 1986.
16. Metals Handbook 9th ed.,2, ASM, p. 45, 1990.
17. Flemings, M. C., Solidification Processing, McGraw-Hill Book Company, p. 207, 1974.
18. Metals Handbook 9th ed.,2, ASM, p. 61, 1990.
19. Metals Handbook 9th ed.,2, ASM, p. 156, 1990.
20. Preston, G. D., Proc. R. Soc., A167, p. 526, 1938.
21. Guinier, A., Ann. Physic, 12, p. 161, 1939.
22. Dutta, I. and Allen, S. M., "Precipitation Hardening of Al-Si-Mg alloy;" J. Mat. Sci. Letter, 10(6), p. 323, 1991.
23. Porter, D. A. and Easterling, K. E., Phase Transformations in Metals and Alloys, 2nd ed., Chapman & Hall, p. 307, 1992.