

# 열간단조공법을 이용한 커로드용 Al 합금의 개발에 관한 연구 A Study on the Development of Al Alloy for the Vehicle Connecting Rod Using Hot Forging

김순호 · 황태문

S. H. Kim and T. M. Hwang

**Key Words** : Hot Forging(열간 단조), KNT40-T6(Al 합금소재), Mg<sub>2</sub>Si Precipitates(중간상 석출물), Corrosion Resistance(부식특성)

**Abstract** : Alumium alloys hot forging process are gaining increased acceptance in the automotive and electronic industries and hot forging is one of the most efficient manufacturing method for mass product parts. It has been investigated the microstructures and mechanical properties of Al-11.7Si-0.5Mg (KNT40-T6)alloy fabricated by hot forging process for development of connecting rod in this study. The microstructure of hot forged specimen was composed of eutectic structure of alumimum solid solution and Mg<sub>2</sub>Si precipitates. The tensile strength of solutionized Al-11.7Si-0.5Mg alloy was 217MPa. This alloy showed a good corrosion resistance using electrochemical polarization test.

## 1. 서 론

세계 각국은 환경오염을 억제하기 위해, 환경규제를 철저히 강화하고 있는 추세이다. 특히 지구상에는 5억대 이상의 각종 자동차들이 배기가스를 배출하여 환경오염의 주요원인으로 지적되고 있으므로, 자동차 배기가스를 현재보다 크게 줄이는 대기정화법을 개정하여 자동차 배기가스 규제와 연비향상을 더욱 강화하고 있다. 즉, 미국의 경우 2005년 이후부터 1995년 대비 40%이상 자동차 연비를 향상시켜 17km/ℓ를 달릴 수 있도록 규정하고 있고, 유럽에서도 최근 배기가스 배출기준을 크게 강화시킨 법을 제정하였다. 따라서 우리나라 자동차 산업도 자동차 엔진출력 향상, 공기저항을 감소시키기 위한 설계 및 자동차 경량화 부품 제작 등을 통하여 이러한 규제에 대비하여야 한다고 사료된다. 그 중에서도 자동차 엔진출력 향상이나 공기저항 감소를 위한 설계기술은 현재 한계에 도달하였다고 볼 수 있으므로, 차체 경량화에 의한 연비향상이 가장 효율적이라 할 수 있다. 특히, 지구 온난화 문제는

CO<sub>2</sub> 저감 효과가 있는 경량화, 고연비 차량개발 및 엔진의 Down sizing 등의 자동차 부품제작 기술의 업그레이드화를 불러오고 있다. 한편, 현재 국내 및 세계적인 자동차 산업은 기술개발의 중요성이 그 어느 때보다도 중요한 시점으로, 세계 각국은 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 있다고 사료된다. 이러한 자동차 경량화와 관련된 연구방향은 소재의 경량화에 집중되어 있는데, 그 이유는 자동차 소재의 경량화는 엔진효율을 높일 수 있는 최적의 방법이며, 궁극적으로 자동차의 연비 향상을 도모할 수 있기 때문으로 사료된다. 최근 소재 경량화에는 주철 및 철강소재 부품을 알루미늄(Al) 및 마그네슘(Mg)으로 대체 또는 금속소재의 플라스틱 대체가 활발히 이루어지고 있는 실정이다.<sup>1,2)</sup> 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 우수하여 봉재, 판재, 선재, 각재 및 관재 등으로 가

접수일 : 2007년 8월 7일, 채택확정 : 2008년 1월 13일  
김순호(책임저자) : 신라대학교 자동차기계공학과  
E-mail : skim@silla.ac.kr, Tel : 051-999-5623  
황태문 : 신라대학교 대학원 자동차기계공학과

공되어 자동차 등의 수송기계 부품에 많이 사용되고 있다. 또한 2000계열(Al-Cu계 합금)이나 7000계열(Al-Zn-Mg계 합금)에 비해 강도는 낮지만, T6열처리(용체화처리+시효열처리)에 의해 강화되는 것으로 알려져 있다.<sup>3,4)</sup> 그리고 Al주물 합금재의 경우, Al-Si-Mg계 합금(AC4C, AC4A, AC 4CH 등)은 주조성이 좋은 Al-6~10%Si계 합금에 소량의 Mg를 첨가해 Mg<sub>2</sub>Si 중간상의 석출에 의한 열처리 효과를 부여하므로써, 기계적 성질과 피삭성을 개선한 합금이다. 그 중에서도 AC4A 및 AC4C합금은 대표적 Al-Si-Mg계 합금으로써, Si는 시효석출상 뿐 아니라 주조성 개선 및 내마모성 증대효과가 있으며, Mg는 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, 용체화 열처리에 의해 면심입방정 구조의 금속간 화합물 Mg<sub>2</sub>Si를 형성하여 석출강화되는데 석출과정에 관한 연구는 상당수 보고되어 있다.<sup>5,6)</sup> 이에, 본 연구에서는 이러한 Al합금 소재 중, Al-Si-Mg계열 합금으로 분류할 수 있는 Al-11.7Si-0.5Mg (KN T40-T6) 합금을 자체연구, 개발하여 압출 및 열간 단조법을 적용함으로써, 치밀한 내부조직 및 기공의 제거 등을 통하여 경량화 효과를 나타낼 수 있는 자동차 Al경량화 커넥팅로드(Con-Rod)시제품을 개발하고자 한다.

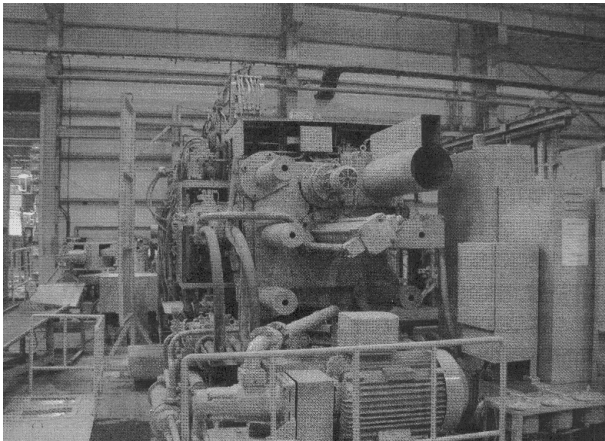


Fig. 1 Schematic of HVSC for melting

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 소재선정 및 압출제작

본 연구의 소재는 주물용 Al합금 중 Al-Si-Mg합

금계를 선정하였는데, 이 합금소재는 Al합금계 중 자동차 부품제작용 소재로 많이 사용되고 있는 것 중 하나로, 주조상태(F), T4 및 T6열처리하여 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 AC4A보다 높은 인성을 획득하기 위하여, Al에 Si(11.7%)와 Mg(0.5%)를 합금원소로서 첨가한, KN T 40-T6(Al-11.7Si-0.5Mg)를 자체, 개발하여 소재로 선정하였다.

아울러 사용된 용해로는 모합금의 용해 중 발생하는 산화를 최대한 억제하기 위하여 급속 용해로를 사용하였으며, 용해로 및 보온로를 Fig.1에 나타내었다. 그리고 KNT40-T6에 대하여 분광분석기로 화학적 성분분석을 하였으며, 제조된 Billet의 화학적 조성은 Table 1에 나타난 것과 같은 바, 특히, 인장강도, 연신율 및 충격치 등에 큰 영향을 미치는 Fe의 함량을 최대한 억제하였다.

Table 1 Chemical compositions of Al-11.7Si-0.5Mg alloy(wt. %)

Elements Specimen	Elements							
	Si	Mg	Cu (max)	Zn (max)	Fe (max)	Mn (max)	Other	Al
AC4A ASTM 7) Specimen	8.0- 10.0	0.20 -0.45	0.23	0.32	0.50	0.37	0.45	bal.
Research Specimen	11.70	0.54	3.01	0.05	0.17	0.11	0.38	bal.



Fig. 2 High frequency preheating furnace using preheating of billet

또한, 제조된 Billet에 대한 예열을 위하여 Fig. 2

와 같은 고주파 예열로에서  $450^{\circ}\text{C}\pm 30$ 의 온도에서 30분간 예열하였으며, 3,200TON의 Press에서 압출공정을 거친 후, Cooling Table에서 냉각하였다. 냉각후, 100TON Stretcher에서 진직교정 후, 절단 Saw로 절단하여 중량 250g+5g, 외관치수  $22\pm 0.3\text{mm}$ 의 소재를 제작하였다.

## 2.2 미세조직 관찰

주조조직 및 용체화 처리에 따른 미세조직 변화를 조사하기 위하여, 시편의 중간 평면 부위를 채취한 후, Keller용액(2ml-48%HF, 3mlHCl, 20mlHNO<sub>3</sub>, 175mlH<sub>2</sub>O)으로 부식시켜 광학현미경 및 주사전자현미경으로 관찰하였다.

## 2.3 기계적 특성조사

인장시험(시험편 규격: ASTM B557-94)은, 시편의 주조상태에서 단면적  $28\pm 0.5\text{mm}^2$ , 표점거리  $6\pm 0.1\text{mm}$ 의 봉상형태의 인장시편을 사용하였으며, 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, KNT40-T6합금의 편석이나 계재물 등 화학적 불균일부의 효과적인 제거를 위해  $500^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ 의 온도에서 2HR $\pm$ 20MIN의 시간동안 용체화처리 하였으며, 시효열처리는 시효열처리로서, 170, 175, 180 $^{\circ}\text{C}$ 에서 각각 8시간 동안 시효 열처리한 후, 20 $^{\circ}\text{C}$ 의 물에 급냉시켰다. 아울러 경도측정은 로크웰(Rockwell)경도기로 하중 60 Kg, 부하시간 10초로 하여, 10~15회 측정, 산술평균하였다.

## 2.5 부식특성 조사

합금의 내식성을 조사하기 위하여, 전기화학분극장치(Potentiostat : EG&G Potentiostic / Galvanostat Model 273)를 사용하여 컴퓨터로 제어하며 분극시험을 행하였다. 작업전극(Working electrode)은 전극 반응면적이  $0.95\text{cm}^2$ 가 되도록 하였고, 시편홀더는 plate형으로 가공하였다. 대전극(Counter electrode)으로는 탄소봉을, 기준전극(Reference electrode)으로는 포화칼로멜 전극(Saturated calomel electrode)을 사용하였다. 시편은 직경

15mm, 두께 3mm의 원판형으로 제작하여  $0.3\mu\text{m}$ 의 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>연마재로 폴리싱한 후, 아세톤으로 충분히 초음파 세척하였으며, 부식특성 시험은 실온에서 완충용액인 3%NaCl 전해액을 사용하여 행하였으며, 실험시작 30분전에 Ar가스를 주입하여 전해액의 용존 산소를 최소화하였다.

## 3. 연구결과 및 고찰

### 3.1 미세조직 관찰

Fig. 3은 KNT40-6T(Al-11.7Si-0.5Mg)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 화학적 불균질 물질 ((Fe,Mn)Al<sub>6</sub>, FeAl<sub>3</sub>,  $\alpha$ -Al(Fe, Mn,Si), Al<sub>7</sub>Cr<sub>2</sub>Fe)이다. (b)는  $500^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ 의 온도에서, 2시간  $\pm$  20분동안 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 용체화과정에서 주조결함의 원인이 되는 불순물 및 미소기공(Microporosity) 등<sup>8)</sup>의 화학적 불균일부가 효과적으로 제거되었기 때문으로 판단된다. 또한 Fig.4는 Al-11.7Si-0.5Mg합금의 용체화처리 후의 주사식 전자현미경 사진과 EDS분석결과를 나타낸 것이다. (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  $\beta$ 상(용체화처리 과정에서 석출된 중간상 : Mg<sub>2</sub>Si)석출영역이며, 결정입내 영역은  $\alpha$ 상(Al 고용체) 석출영역으로 판단된다. 그리고 이러한  $\alpha$ 상과 Mg<sub>2</sub>Si의 공정상 형성은 비평형 응고의 결과로 볼 수 있는데, 즉, 응고 시 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 만

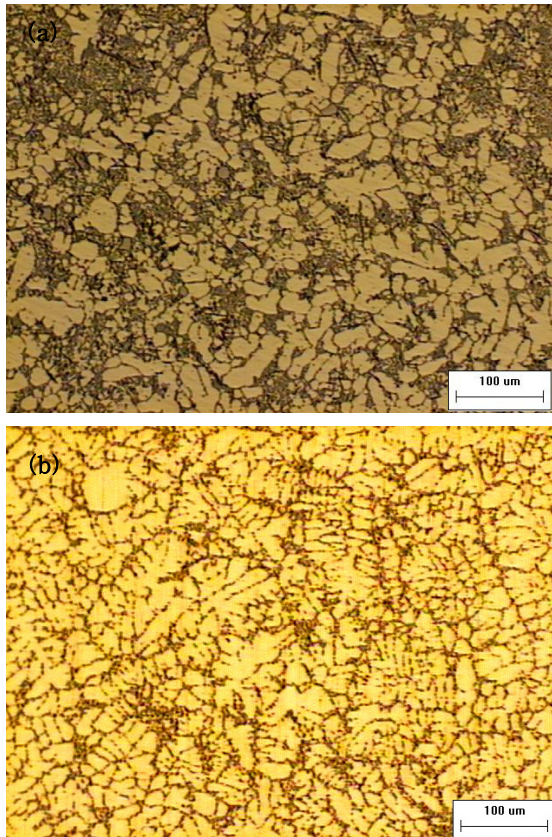


Fig. 3 Optical microstructures as cast structure (a) and solid solution treatment (b) of Al-11.7Si-0.5Mg alloy

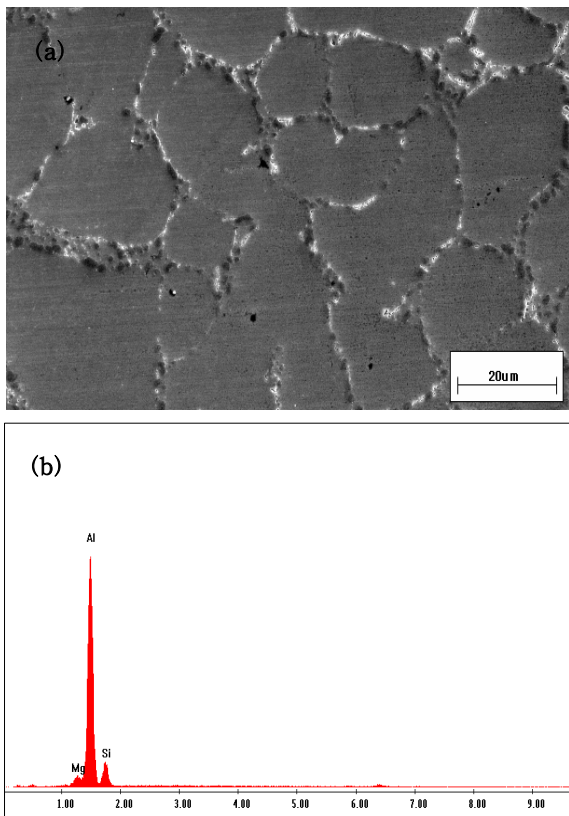


Fig. 4 SEM micrographs (a) and EDS analysis (b) of Al-11.7Si-0.5Mg alloy as solid solution treatment

나 고립된 액상을 형성하게 되는 최종 응고부에서의 과포화된 공정조직으로 볼 수 있다.

### 3.2 기계적 특성

본 연구에 사용된 KNT40-T6 합금의 기계적 특성을 ASTM 기준, AC4A 합금과 비교<sup>9)</sup>하여 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Mechanical properties of Al-11.7Si-0.5Mg alloy as solid solution treatment

Alloy	Heating Treatment	UTS (MPa)	YS (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HRB)
ASTM <sup>9)</sup> (AC4A)	T6	212	117	8.2	85.1
KNT40-6T	T6	217	120	7.5	86.2

즉, Table 2에서와 같이 용체화처리를 실시한 시편의 기계적 특성 시험결과, 최대 인장강도와 항복강도는 각각 217MPa, 120MPa를 나타내어 AC4A의 ASTM기준치인 212MPa, 117MPa와 유사한 강도값을 나타내었다. 그리고 연신율의 경우, 규정값보다 다소 낮은 7.5% 정도로 나타났는데, 이는 용체화 처리 후에, 조밀육방정으로서 슬립시스템이 작은 중간상인  $\beta(\text{Mg}_2\text{Si})$ 상의 석출 분률이 높기 때문으로 해석할 수 있다.

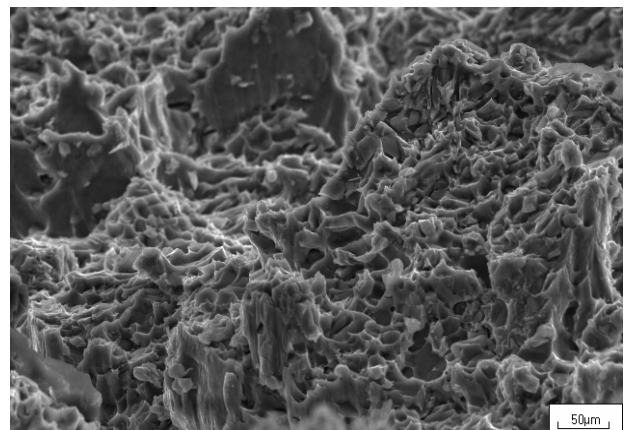


Fig. 5 SEM fractograph of Al-11.7Si-0.5Mg alloy

Fig. 5는 Al-11.7Si-0.5Mg합금의 주사식 전자현미경 조직사진인데, 이것은 용체화처리된 시편의 인장시험 후의 파단면 조직사진으로서, 주된 파괴형태는 결정입계에서 일어나는 취성파괴 형태를 나타내고 있다. 즉 결정입계 주변에 입자들이 모여

있는 것으로 보아 수지상 경계를 따라 파괴가 일어났음을 알 수 있으며, 결정입내는 일부 dimple이 관찰되고 있다.

### 3.3 시효경화 특성

Fig. 6은 KNT40-T6합금을 용체화 처리한 후 170, 175, 180°C에서 시효열처리하였을 때 시효시간에 따른 미소경도 변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 모든 온도에서 초기 시효시간의 증가에 따라 급격한 경도값의 상승을 보이고 있으며, 170°C에서는 7시간, 175°C에서는 3시간, 180°C에서는 2시간 30분 시효처리시 최고경도값을 나타내었는데, 이와 같이 시효온도가 높은 경우일수록 최고경도값에 이르는 시간이 짧아진 것은, 시효온도가 증가할수록 핵성장 속도가 증가하기 때문<sup>9)</sup>으로 사료된다. 또한 세 시효온도에서 가장 최고경도값은 175°C에서 3시간 시효처리한 경우로서, 그 때의 경도값은 86.2(HRB)이었으며, 이는 ASTM 규정의 AC4A 주물소재인 경우, 최적시효조건시의 값<sup>10)</sup>인 85.1(HRB)에 적정한 값이며, 세 시효온도 모두에서 최고경도 이후의 경도값은 완만하게 감소하였다. 아울러 이러한 시효열처리에 따른 경도변화는 석출물의 석출거동과 밀접한 관련을 가지는 것<sup>11-13)</sup>으로서, 시효 초기에 경도가 급격히 상승하는 것은 Al기지에 석출한 침상 석출물에 의한 내부에너지의 증가에 기인한 것으로 생각되며, 각 시효온도에서 최고 경도값은 침상 석출물과 정합 석출물( $\beta$ 상)의 석출에 의한 것으로 생각된다. 또한 최고 경도 이후의 경도값이

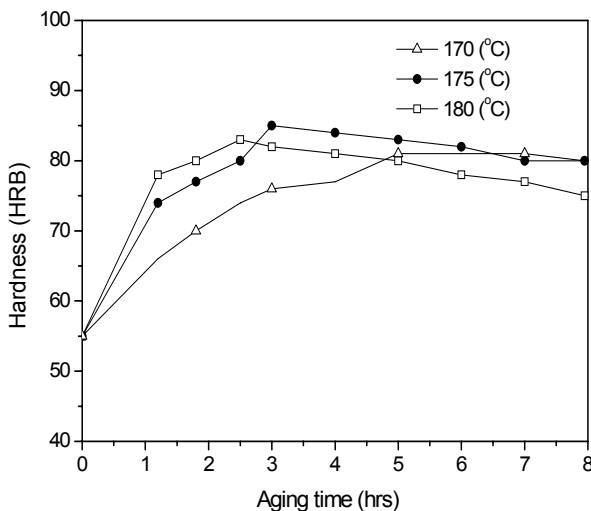


Fig. 6 Aging curves of KNT40-T6 Al alloy aged at 170, 175, and 180°C

완만하게 감소하는 이유는 정합 석출물이 평형상태로의 변태속도가 느리거나 평형 석출상의 조대화속도가 느리기 때문이라고 판단된다.

### 3.4 부식 특성

Fig.7은  $\text{KH}_2\text{PO}_5 \cdot \text{NaOH}$  완충용액으로 pH7로 고정한 3%NaCl 전해액에서, 본 연구시편인 KNT 40-T6(M1) 및 AC4A (M2)시편에 대하여 전류밀도 ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )변화에 따른 전위의 변화를 측정된 것으로서, 본 연구시편인 M1시편은 M2시편에 비하여 높은 부식 전위값을 나타내었다. 또한 Table 3에 나타낸 바와 같이, 분극곡선에서 측정된 부식전류밀도와 시편의 부식반응면적, 밀도 및 등가량으로부터 각각의 부식속도를 계산한 결과에서도 M1시편의 경우는 0.31(mpy)이었고, M2시편은 0.38(mpy)로 나타나, M2 시편에 비해 M1시편이 부식속도가 감소하였음을 알 수 있었다.

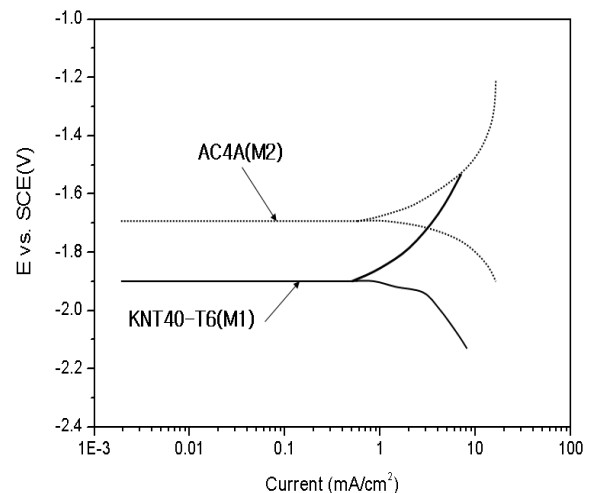


Fig. 7 Potentiodynamic polarization of and AC4A (M2) alloys in a deaerated 3%NaCl buffered with  $\text{KH}_2\text{PO}_5 \cdot \text{NaOH}$  (pH7.0)

Table 3 Corrosion properties of KNT40-T6(M1) and AC4A(M2) alloys in a deaerated 3%NaCl solution

	A	d	E.W	E <sub>corr.</sub>	I <sub>corr.</sub>	C.R
	cm <sup>2</sup>	g/cm <sup>3</sup>	g	V	μA/cm <sup>2</sup>	mpy
<b>M1</b>	0.95	2.65	10.85	-1.91	0.5817	0.31
<b>M2</b>	0.95	2.69	10.83	-1.68	0.7261	0.38

A : area, d : Density, E.W. : equivalent weight  
E<sub>corr.</sub> : corrosion potential, I<sub>corr.</sub> : corrosion current density, C.R.: corrosion rate

이러한 결과들로 보아, 유사 Al합금들에 비해 KNT 40-T6(Al-11.7Si-0.5Mg)합금이 상대적으로 내식성이 양호하다고 볼 수 있다. 이러한 실험결과 및 고찰 등을 거친 후, 열간단조 공법을 적용하여, Fig.8과 같이, 가로(최장) 140mm, 세로(최장) 58 mm, 외관치수(최장) 14mm의 커넥팅 로드 시제품을 제작하였다.



Fig. 8 Photo. of connecting rod trial manufacture

#### 4. 결 론

자동차 경량화 Al 소재개발의 일환으로, Al-11.7Si -0.5Mg 합금에 대하여 미세조직 관찰, 기계적 특성 및 부식특성 조사 등을 수행한 후, 다음의 결론을 얻었으며, 이 합금을 이용하여 열간단조 제조법으로 자동차 커넥팅 로드 시제품을 제작하였다.

- 1) 미세조직은 Al 고용체인  $\alpha$ 상 및  $\beta$ (Mg<sub>2</sub>Si)상의 공정조직 (Eutectic structure)으로 구성되어 있었다.
- 2) 인장시험 결과 최대 인장강도와 항복강도는 각각 217MPa, 120MPa을 나타내어, 유사 Al합금의 ASTM 기준치와 유사한 강도값을 나타내었다.
- 3) 전기화학분극시험으로 부식특성을 조사한 결과, 본 연구의 소재인 KNT40-T6의 경우, 연간 부식 속도가 0.31mpy를 나타내어 내식성이 양호한 것으로 나타났다.
- 4) 열간단조 제조법으로 가로(최장) 140mm, 세로(최장) 58mm, 외관치수(최장) 14mm의 자동차 커넥팅 로드 시제품을 제작하였다.

#### 참고 문헌

1. G.A. Chadwick and Bloyce, 1992, "Magnesium Alloys and Their Applications", DGM Conf., p. 93.
2. T.J. Ruden, SAE Technical paper No. 900793
3. R.E. Spear and G.R. Gardner, 1972, "Effect of Applied Pressure on Mechanical Properties of Squeeze Cast Al alloys" Cast. Prod., p. 1988.
4. J.P. Lynch, L.M. Brown and M.H. Jacobs, 1982, "Microanalysis of age-hardening precipitates in Aluminium alloys", Acta Metallurgica, Vol. 30, pp. 1380~1385.
5. A.J. Bryant, Aluminio E. Nuova, 1977, "Crystallography of Mg<sub>2</sub>Si precipitates in Al-7.0Si-0.4Mg alloy", Metallurgia, 42, p. 228.
6. A.K. Gupta and D.J. Lloyd, 1992, "Microstructural study of continuous precipitation in Al alloys" ICCA3, p. 21.
7. Metal Handbook 9th ed., Vol.15, 1988, ASM., pp. 327~335.
8. J.P. Lynch, L.M. Brown and M.H. Jacobs, 1987, "Microanalysis of age-hardening precipitates in Aluminium alloys", Acta Metallurgica, Vol.30, pp. 1389~1395.
9. D.A. Porter and K.E. Easterling, 1992, "Phase Transformations in Metals and Alloys", 2nd ed., Chapman & Hall, p. 307.
10. Metal Handbook 9th ed., Vol.9, 1990, ASM, pp. 61~67.
11. G.D. Preston, 1938, proc. R. Soc., A167, p. 526.
12. A. Guinier, 1939, Ann. Physic, 12, p. 161.
13. I. Dutta and S.M. Allen, 1991, "Precipitation hardening of Al-Si-Mg alloy" J. Mat. Sci. letter, 10(6), p. 323.