

논문

AC2B 알루미늄합금의 고온용해에 의한 금속간화합물 β -AlFeSi 상 형상개량 효과

김헌주[†]

Effects of Melt Super-heating on the Shape Modification of β -AlFeSi Intermetallic compound in AC2B Aluminum Alloy

Heon-Joo Kim[†]

Abstract

Melt super-heating which promotes shape modification of β intermetallic compounds was conducted to improve mechanical properties of recycled AC2B aluminum alloy. Modification of needle-shape β intermetallic compounds was effective for the specimens of AC2B aluminum alloys containing 0.85wt.% Fe by melt super-heating, in which the melts had been held at 850°C or 950°C for 30 minutes respectively. Owing to the modification of needle-shape of β intermetallic compounds by melt super-heating of the alloy with containing 0.85wt.% Fe to 950°C, increases in elongation and tensile strength were prominent to be more than double and 55% respectively in comparison with the melt heated to 740°C. Moreover, modification of needle-shape β intermetallic compounds in the alloy containing 0.85wt.% Fe by 950°C melt super-heating led to 48% improvement of the value of impact absorbed energy as compared with the melt heated to 740°C. (Received April 14, 2001)

Keywords: AC2B aluminum alloy, Melt super-heating, Modification of β intermetallic compound, Tensile property, Computer Aided Instrumented Charpy impact test

1. 서 론

에너지절약 및 환경보존의 시대적 요청에 따라 일상 생활용품과 공업용으로 널리 사용되는 알루미늄금속의 재활용이 중요한 문제로 인식되고 있다. 1톤의 알루미늄을 제련하기 위해서 약 21,100 kWh라는 큰 전력이 소모되지만[1] 스크랩을 재활용하여 잉고트를 제조할 경우에는 3-5%의 전력만이 필요하므로[2], 알루미늄 스크랩의 재활용은 환경보존, 자원절약과 이용 극대화 및 공해와 폐기물 방지에도 큰 역할을 할 수 있다. 또한, 국내소요 알루미늄은 전량 수입에 의존하고 있으므로 이에 막대한 비용이 소요되고 있다.

이와 같은 알루미늄 금속 재활용의 당위성에도 불구하고, 알루미늄 재활용에 있어 문제점은 여러 용도로

사용되어 분류되지 않은 채 수집되는 알루미늄 스크랩이다. 이런 측면에서 재생 알루미늄의 활용을 높이기 위해서는 혼입된 각종 유해원소를 제거하거나 악영향을 완화하는 기술확립이 필요하다.

회수되는 스크랩을 사용한 2차 지금(Secondary Ingot)의 사용증가와 용해도구 등으로부터 혼입되는 Fe로 인해 재활용 알루미늄 잉고트에는 침상의 Fe 금속간 화합물이 형성된다.

본 실험에 사용된 시료도 다량의 Fe 함유로 인하여 침상의 β -AlFeSi상 형성이 예상되며 이로 인한 재료의 기계적 특성 저하가 우려된다[3]. 유해원소 중에서 Fe는 가장 많이 혼입되는 원소로, Al용탕 내에 Fe함량이 증대되면 기계적 특성을 저해시키는 침상의 β -AlFeSi상이 형성된다. 이 화합물은 취약하고 형상비(Aspect

부경대학교 공과대학 금속공학과(Department of Metallurgical Engineering, Pukyong National University)

[†]E-mail : metjoo@pine.bknu.ac.kr

Ratio)가 커서 응력이 가해지면 쉽게 파단되어 특히 연신율을 저하시킨다[4-6]. 이와 같은 Fe에 의한 악영향을 개선하기 위해 Mn, Cr 등의 합금원소를 첨가하는 방법[3, 5]과 냉각속도[3,7-8] 및 비평형 열처리법[9] 등에 의해 β 상을 α 화합물상으로 변화시키는 방법이 연구되고 있다.

최근에는 β 상의 형상을 개량하기 위하여 액상선보다 200~300°C 고온에서 용해하고 급속 냉각시키는 고온 용해방법(Melt super-heating)[4, 9-10]이 소개되었다.

본 연구에서는 재활용 알루미늄합금의 기계적특성 향상을 목적으로, Fe함유 Al-Si-Cu합금을 대상으로 고온 용해방법에 의한 침상 β 상의 형상개량과 이에 따른 인장특성과 충격흡수 에너지 향상효과를 평가하였다.

2. 실험방법

2.1 시료제작

본 실험에 사용된 재료는 아공정 Al-Si-Cu합금으로 AC2B합금에 해당되며, 실제 화학조성은 Table 1과 같다. 알루미늄 재활용시 혼입되는 Fe의 영향을 조사하기 위하여 AC2B합금에 0.33wt.% Fe와 0.85wt.% Fe를 각각 첨가시켰다.

형상비가 큰 침상 β 금속간 화합물의 형상개량으로 기계적특성 향상을 위해 시료를 각각 740, 850, 950°C로 용해하였다.

용해작업은 흑연도가니를 사용한 실리콘이트 발열체

Table 1. Chemical composition of the alloys. (wt.%)

Si	Cu	Ni	Mg	Mn	Fe	Al
5.5	3.0	<0.5	<0.05	0.5	0.33, 0.85	Rem.

전기로에서 행하였으며, 잉고트 용락이 일어나는 온도에서 플럭스를 도포하고 용해온도를 각각 740, 850, 950°C로 변화시켜 30분간 유지한 후, 탈가스 처리를 하였다. 탈가스 처리 후 740°C에서 용탕을 진정시켜 사형몰드($H59 \times L240 \times W73 \times H20$ mm)에 주입하였다.

2.2 조직관찰 및 파단면관찰

용탕의 과열정도에 따른 침상 Fe 금속간 화합물의 형상개량 효과를 조사하기 위하여 Fe조성과 용해온도가 각각 상이한 용탕을 사형주조한 시료의 조직을 비교하였다.

β 상의 형상 개량효과를 측정하기 위한 β 상의 길이는 500배율의 광학현미경으로 5군데 부위를 화상해석 프로그램으로 자료화하였다.

또한, 각 온도에서 고온용해된 시료의 충격파단면을 주사전자 현미경(SEM)으로 관찰하여 β 상의 형상개량 효과와 파단면 형상변화를 충격흡수 에너지와의 상관관계로 조사하였다.

2.3 인장실험

침상의 Fe 금속간 화합물 개량화 효과를 평가하기 위하여 인장실험을 행하였다. 인장시편은 평행부 직경

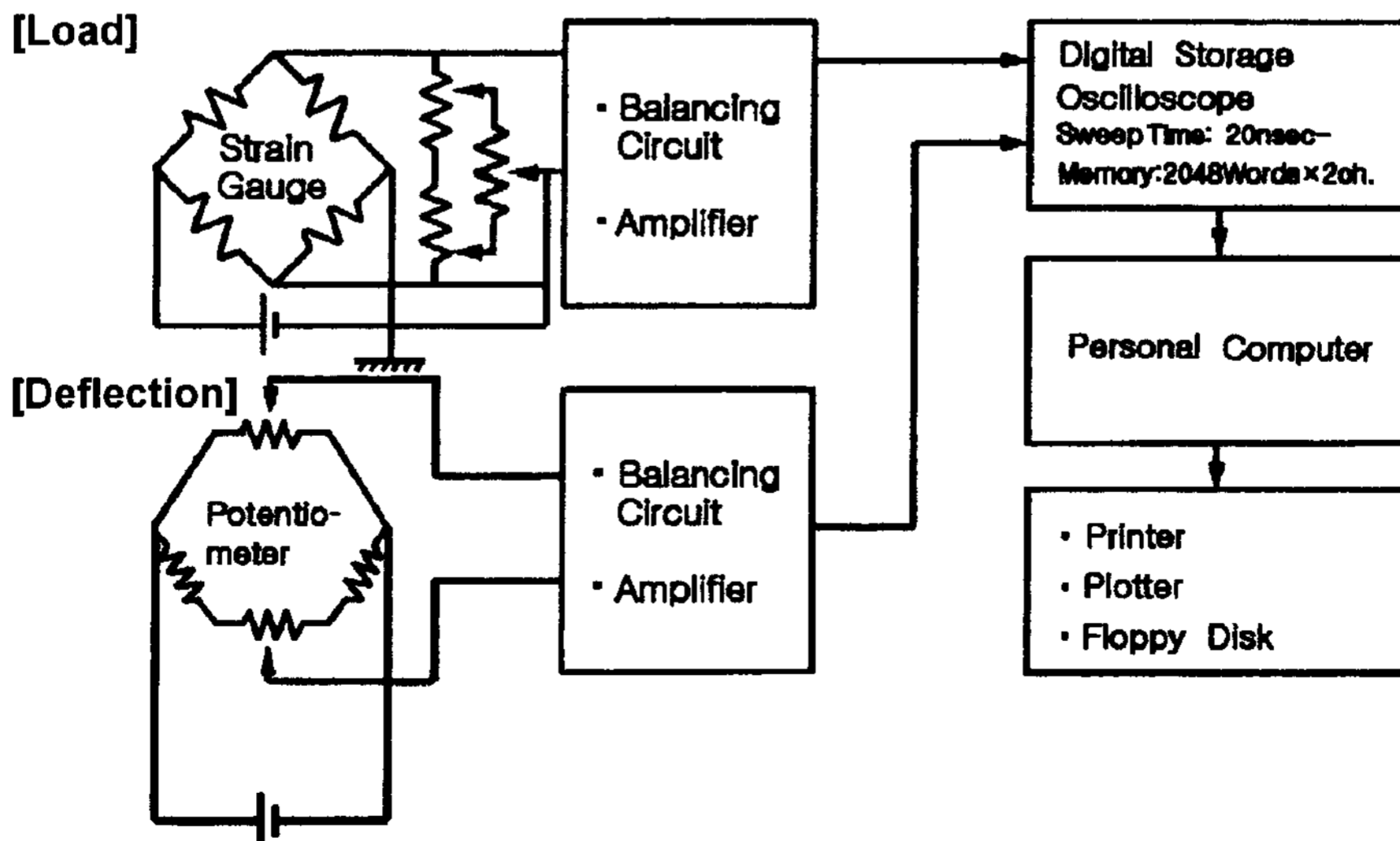


Fig. 1. Configuration of the CAI system.

12.5 mm, 표점거리 50 mm의 봉상으로 제작하였으며, 인스트론형 시험기에서 크로스헤드 속도 1 mm/min의 변형속도로 상온에서 인장하고, 인장강도와 연신율을 측정하였다.

2.4 계장화충격실험

침상의 Fe 금속간 화합물 개량화 효과를 평가하기 위하여 충격실험을 행하였다. 충격시편은 표준 Charpy 형상이며, 용량 98Joule의 CAI(Computer Aided Instrumentation) 충격시험기[11,12]를 사용하여 상온에서 실험하였다.

Fig. 1과 같이 시편과 해머의 충격시 발생된 하중을 계측한 하중-시간곡선으로부터 총흡수 에너지(E_t), 균열 발생 에너지(E_f) 및 균열전파 에너지(E_p)를 평가하였다.

충격파괴가 일어나는 동안 침상의 화합물이 시료의 파괴거동에 미치는 영향을 파악하기 위해서 파단면에 수직한 단면을 조사하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 미세조직

Al-Si-Cu합금은 고용체 α Al dendrite, 공정Si, Chinese script 형상의 α 화합물상(Al_5Fe_2Si), 침상의

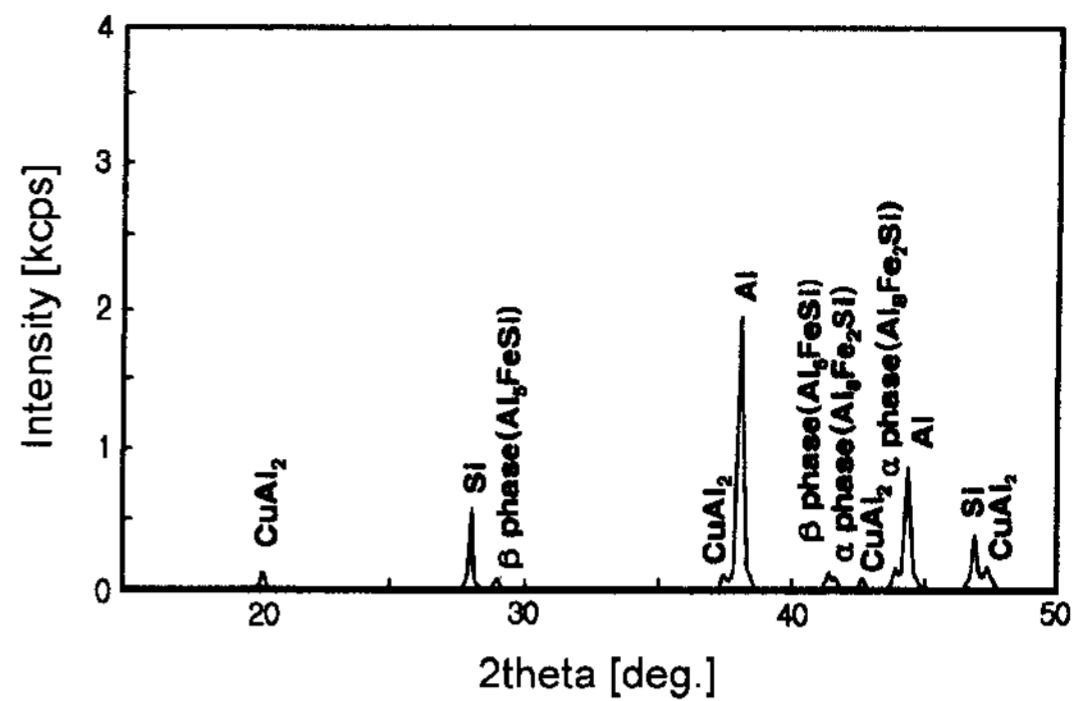


Fig. 2. Result of X-ray diffraction of the alloy with 0.85wt.%Fe.

β 화합물상(Al_5FeSi)과 3원 공정에 의한 $CuAl_2$ 화합물상들로 구성된 조직이다.

Fig. 2는 시료의 X선 회절 결과로, 본 시료를 구성하는 상을 나타내고 있다.

Photo 1은 강 부식시킨 시료를 SEM-EDX로 확인된 상들의 형상이다. 광학현미경으로 이들 상들의 구분은 형상과 색의 농도에 의해 구분 가능하였다. 공정 Si상은 냉각속도가 빠를수록 점차 미세한 침상의 공정Si들이 거미집 형태를 유지하였으며, 개량화제의 첨가로 미세한 깃털상의 형태를 나타내었다. α 화합물상은 Chinese script 형상으로 공정 Si상에 비하여 모서리가

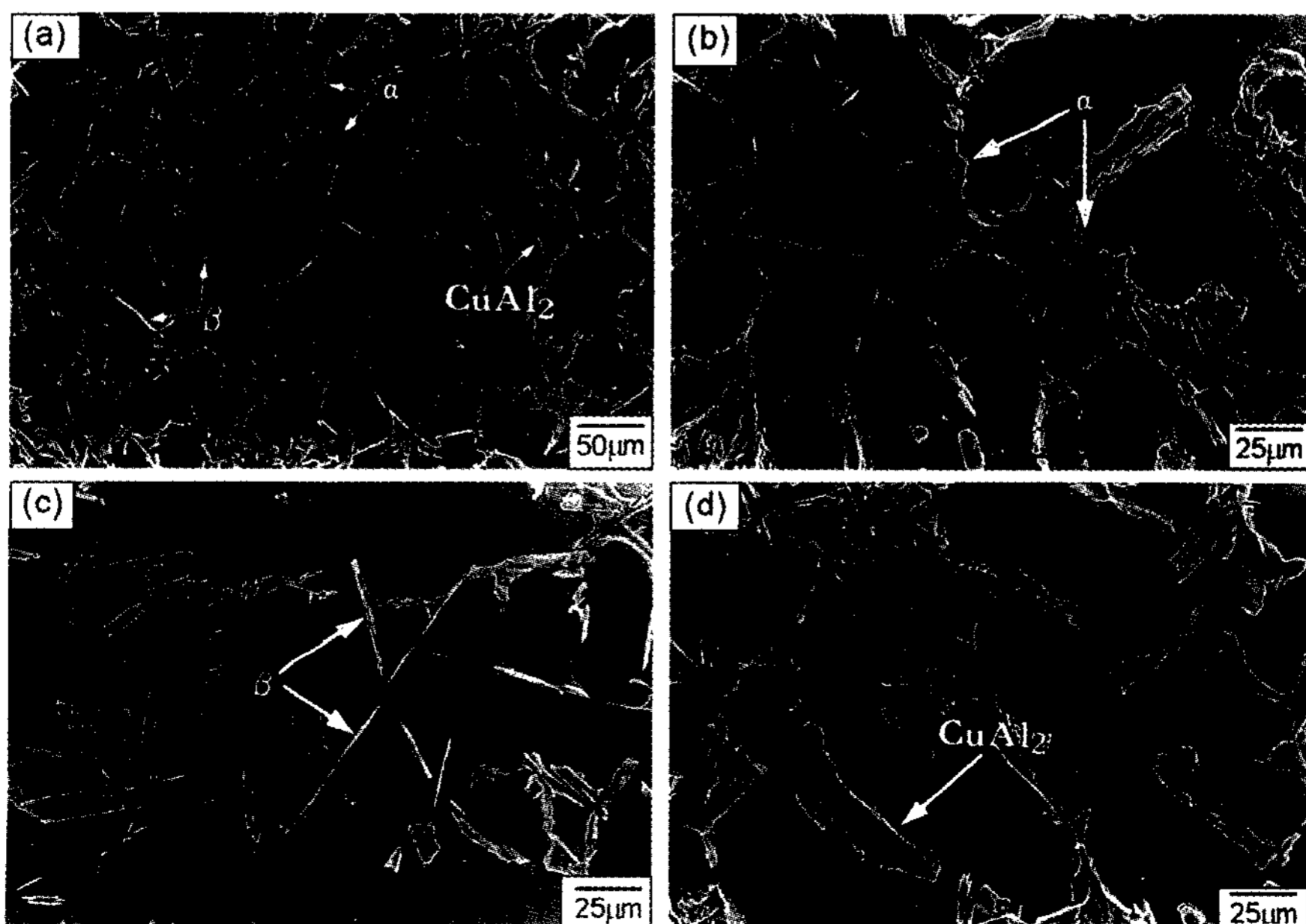


Photo 1. Deep etched SEM photographs showing intermetallic phase in the alloy with 0.85wt.%Fe.

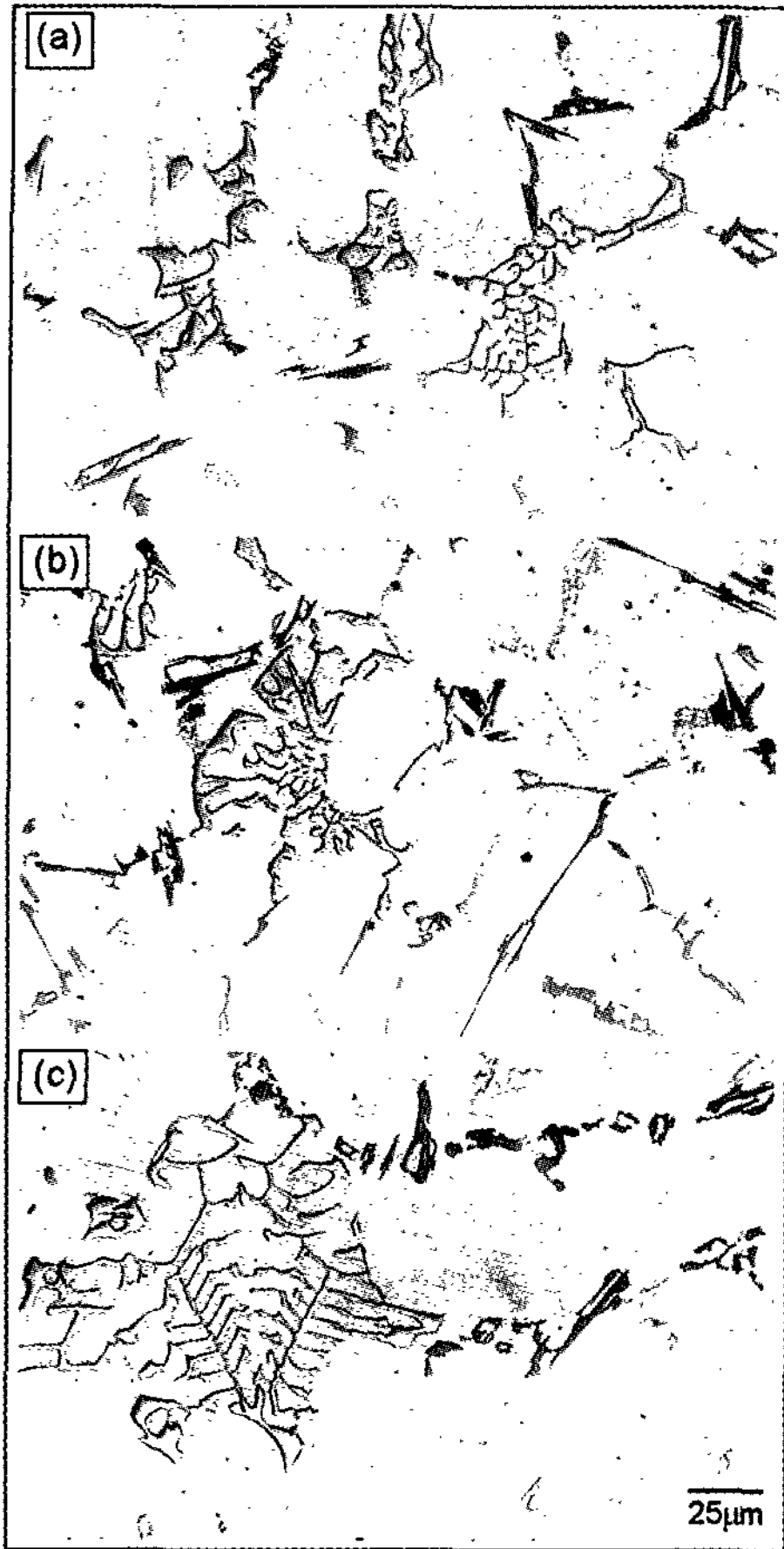


Photo 2. Effect of the superheating temperature on the shape of α phase in the alloy with 0.33wt.%Fe. (a) 740°C holding (b) 850°C superheating treatment (c) 950°C superheating treatment .

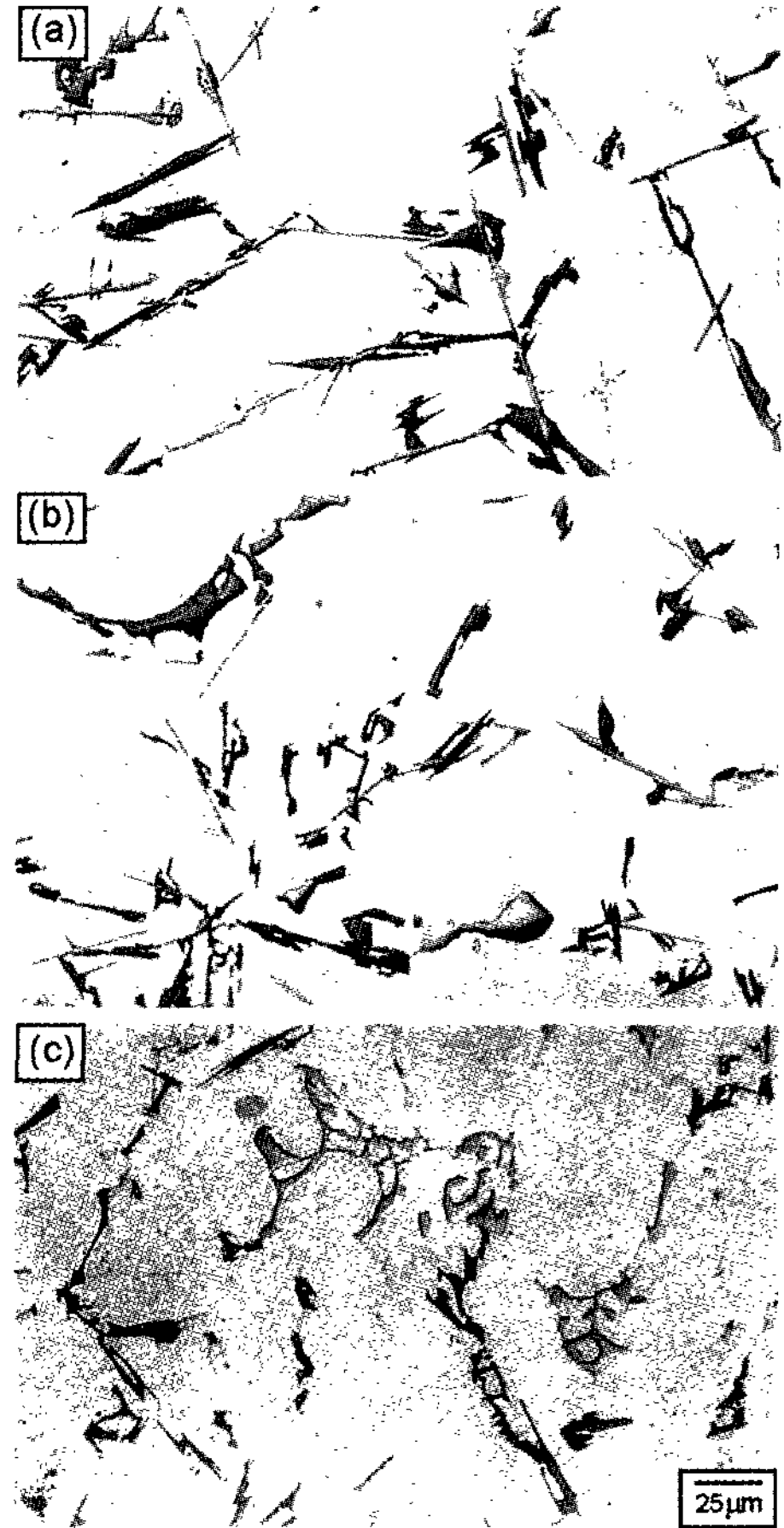


Photo 3. Effect of the superheating temperature on the shape of α phase in the alloy with 0.85wt.%Fe. (a) 740°C holding (b) 850°C superheating treatment (c) 950°C superheating treatment .

완만하고 연한 농도의 형상을 가진다. $CuAl_2$ 상은 더욱 연한 색채로 불규칙 형상을 가진 화합물상이며, β 화합물상은 냉각속도가 느릴수록 막대모양의 조대한 침상의 화합물로 나타났다.

3.2 고온용해에 의한 Fe 금속간 화합물의 형상개량 효과

알루미늄합금에서 Fe금속간화합물이 존재하는 조직을 제어하는 여러 방법 중, 고온용해 방법은 액상선 온도보다 200~300°C 고온에서 용해하고 급속 냉각시킬 때 침상 Fe금속간 화합물인 β 상을 α 상의 Chinese script형상으로 변화시킬 수 있다고 보고되었다[9-10].

또한 고온용해 방법이 β 상 형성시 핵생성 입자의

크기와 수를 감소시켜 형상개량이 가능하다는 이론도 제시되고 있다.[4, 13]

용탕을 740, 850, 950°C에서 30분간 유지후 사형 주조된 0.33wt.% Fe함유시료와 0.85wt.% Fe시료의 조직을 Photo 2와 3에 각각 나타내었다. Fe함량이 적은 0.33wt.% 시료에서 침상 Fe금속간 화합물인 β 상은 관찰되지 않고 고온용해에 의해 Chinese script형상의 α 상이 점차 조대화되고 있다.

반면, 0.85wt.% Fe함유 시료는 침상의 β 상이 850°C 고온용해에 의해 비율이 점차 감소되면서 Chinese script형상의 α 상이 나타나기 시작한다.

고온용해에 의해 β 상이 α 상으로 형상개량되는 것은 응고시 용탕내에서 β 상의 핵생성 장소 제공여부와

β 상이 성장할 수 있는 시간적 여유를 검토해야 한다. 알루미늄 용탕의 응고시 형성되는 β 상 결정은 γ -알루미늄으로부터 핵생성되는 것이 Narayanan 등의 연구[4]로 증명되었다.

순수 알루미늄과 Al-6%Si합금에 Fe가 0.6wt.% 이상 함유된 시료에서 완전한 α 상으로 결정화되기 위해서는 1200°C 이상으로 고온용해 되어야 한다고 Awano와 Shimizu는 보고하고 있다[9]. 이 온도는 γ -알루미늄이 α -알루미늄으로 변태하는 온도와 관련이 있는 것으로 여겨진다.

그러나, 실용합금에는 다량 함유된 불순물의 영향으로 Fe 1.0wt.% 함유한 319 알루미늄합금(Al-6.0wt.% Si-3.5wt.% Cu)의 경우, 850°C 용해에서 α 상이 결정화되는 결과를 Narayanan 등은 보고하고 있다[4]. 0.6wt.% Fe를 함유한 동일합금을 대상으로 TGA 열분석을 행한 이들의 연구에 의하면, 가열시 950°C 부근에서 나타나는 발열피크를 γ -알루미늄의 α -알루미늄 변태와 관련시켜 설명하고 있다. 이와 같이 α -알루미늄로의 변태온도는 불순물농도[14], 용탕의 유지시간[15]과 교반정도에 따라 달라지는 것으로 보고된다. 특히 Mg과 Fe불순물 등은 γ -알루미늄을 안정화시키는 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 따라서 침상의 β 상을 α 상으로 형상개량시키기 위해서는 가능한 한 β 상 결정핵이 생성되지 못하도록 고온용해에 의해 α -알루미늄을 형성시키고, 용탕에 Mg과 Fe 등의 불순물농도를 낮추어야 한다.

다음으로 침상의 취약한 β 상 형성을 용탕 응고시의 냉각곡선 분석으로부터 고찰해 본다. 실험에 사용된 본 시료는 냉각과 함께 액상선온도, β 상 정출온도, Si 공정온도, Cu 공정온도를 거치면서 응고한다. 이 과정에서 β 상 정출온도가 저하되어 Si공정온도에 근접될수록 β 상 성장은 어렵게 된다. 일반적으로 β 상 정출온도를 저하시키기 위해서 용탕성분 중 (Fe/Mn)성분비를 낮추거나, 냉각속도를 증가시키든지 고온용해시키는 방법을 선택한다.

Fig. 3은 본 실험에 사용된 시료의 열분석 결과이다. 각각 740, 850, 950°C로 용해한 시료를 0.13°C/s 냉각속도로 유지시킨 시료의 냉각곡선을 측정해 본 것이다. 용탕의 Fe함량이 낮은 0.33wt.% Fe함유 시료와 950°C로 용해된 0.85wt.% Fe함유 시료에서 β 상의 정출은 검출되지 않았다. 그러나, 740°C와 850°C로 용해된 0.85wt.% Fe함유 시료에서 용해온도가 높을수록

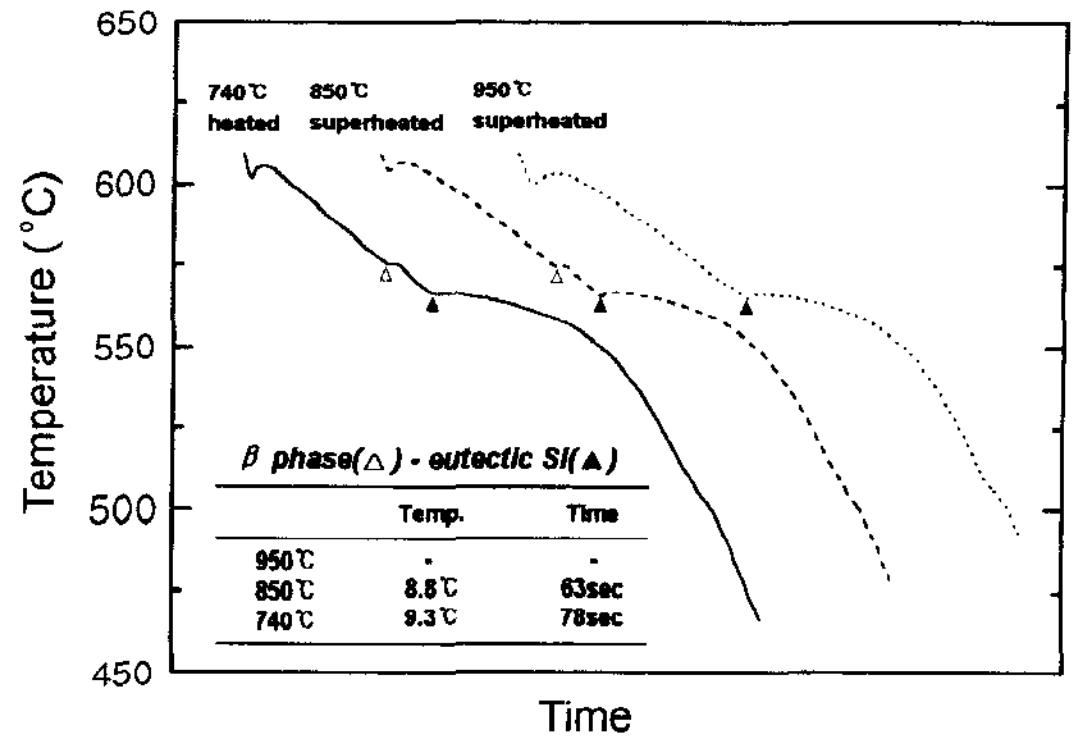


Fig. 3. Cooling curves of the used alloys superheated to 740, 850 and 950°C. (cooling rate = 0.13°C/s)

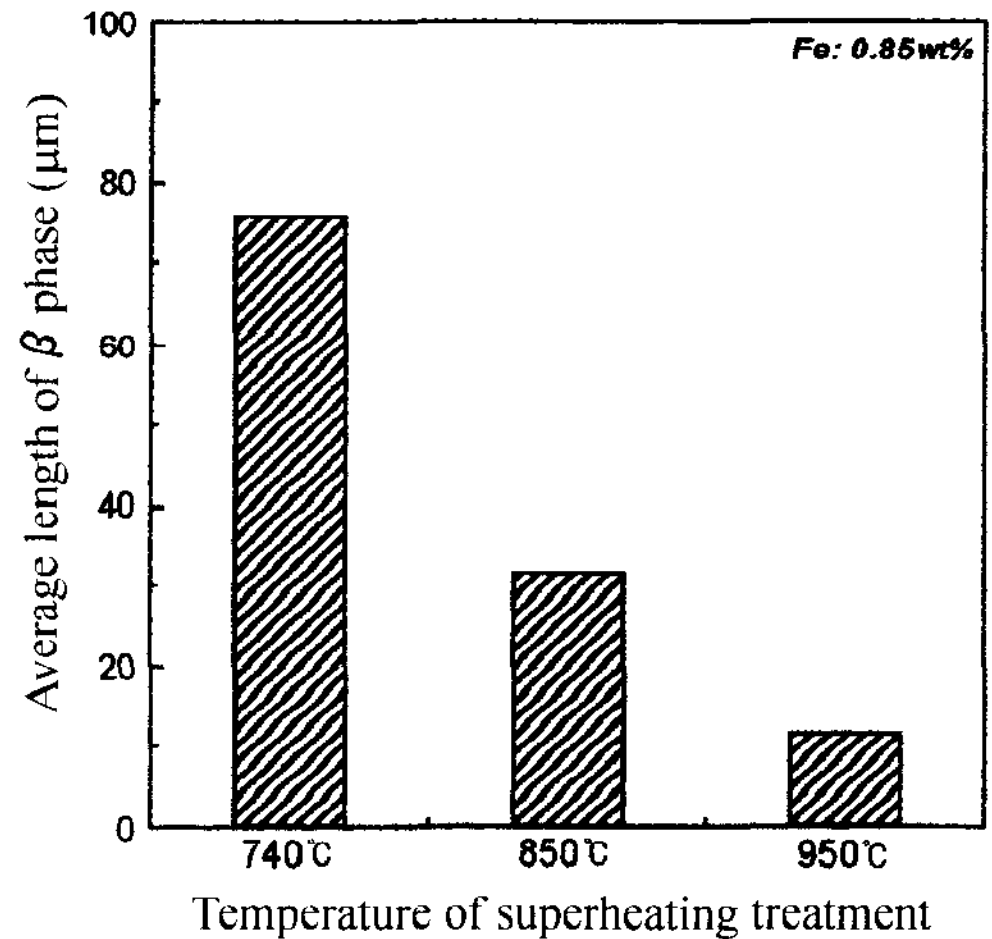


Fig. 4. Effect of the superheating temperature on average length of β phase in the alloy with 0.85wt.%Fe.

β 상 정출온도는 저하되어 Si 공정온도에 근접되면서 Fig. 3에 나타난 것처럼 β 상 성장구간이 줄어들어 형상개량 효과를 유발시킨다.

Fig. 4에 나타난 바와 같이 일반적인 용해주입온도 740°C 시료에 비해 850°C와 950°C에서 고온용해 시료의 조직에서 β 상 길이가 감소된 것으로 나타나, β 상의 성장이 장애를 받은 것으로 사료된다.

합금성분에 추가적인 Mn함량의 첨가없이 β 상을 α 상으로 결정화시키는 형상개량 효과를 얻기 위해서는 용탕의 냉각속도를 증가시키는 방법이 가장 효과적이나, 냉각속도가 느린 사형주조 조건인 경우 이와 같이 고온용해 방안을 효과적으로 적용할 수 있다.

고온용해에 의한 침상 β 상의 aspect ratio 변화는

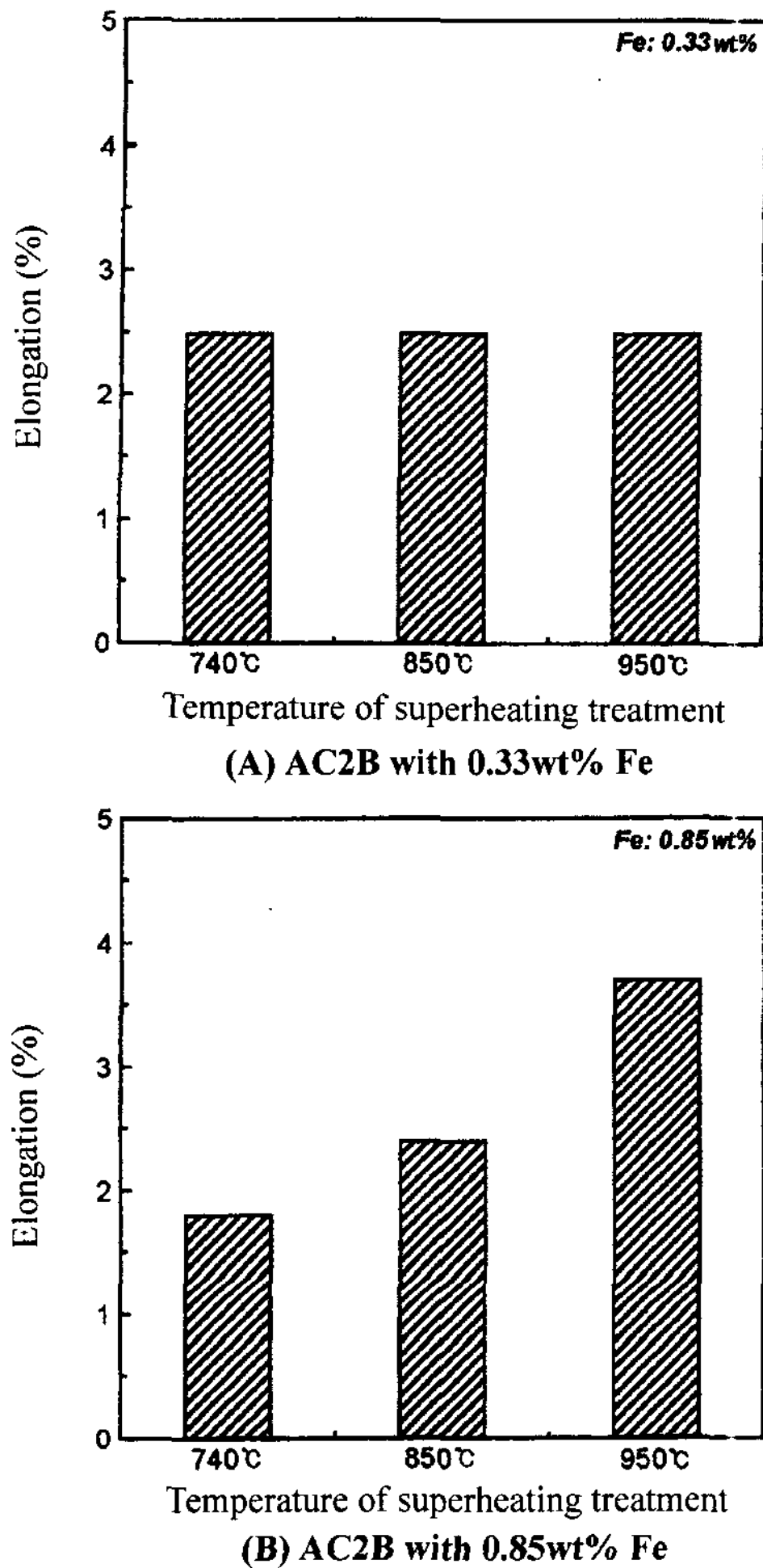


Fig. 5. Effect of the superheating temperature on elongation.

기계적 특성에도 영향을 미친다.

Fig. 5는 연신율에 대한 고온용해의 영향을 나타낸다. 0.33wt.% Fe합유 시료는 원래 β 상이 관찰되지 않아 고온용해에 의한 연신율의 변화는 감지되지 않았으나, 0.85wt.% Fe합유 시료는 조대한 침상 β 상이 고온용해에 의해 형상비가 감소되거나 β 상 비율이 적어져 950°C에서 고온용해된 시료는 740°C 용해 시료 보다 2배 정도 연신율 향상을 가져왔다.

Fig. 6은 고온용해에 따른 인장강도 변화를 나타낸 것이다. Fe함량이 낮은 시료에서는 고온용해의 β 상 형상개량 효과는 나타나지 않았으나, Fe함량이 높은 0.85wt.% Fe 시료는 고온용해에 의해 β 상 형상비가 감소되어 인장강도가 증가되는 경향을 나타내었다. 또

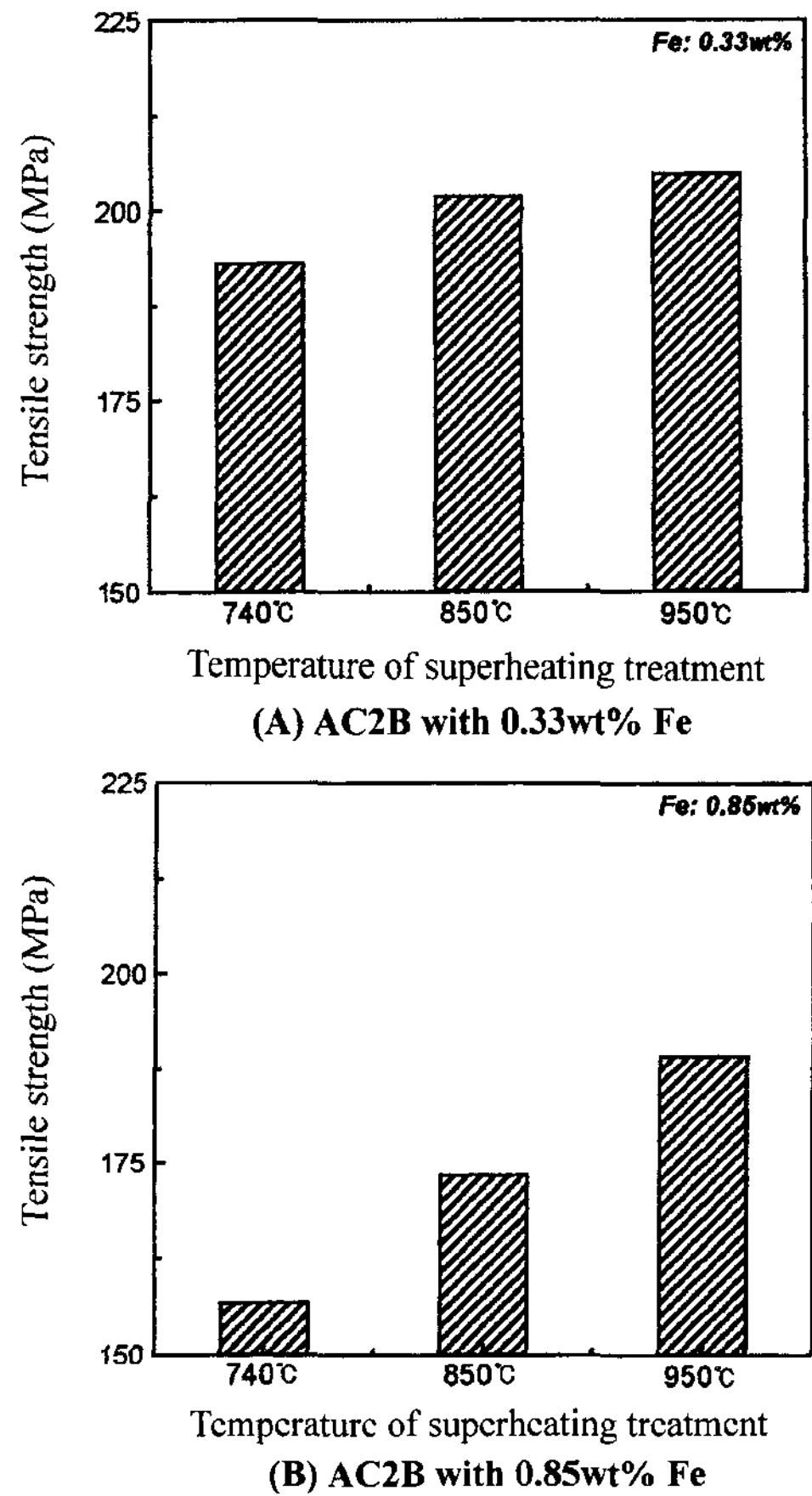


Fig. 6. Effect of the superheating temperature on tensile strength.

한, 0.85wt.% Fe 시료는 침상의 β 상이 존재하므로 0.35wt.% Fe 시료보다 인장강도는 낮게 나타나며, 고온용해에 의해 β 상 형상비가 감소하므로 응력집중이 완화되어 인장강도는 증가하는 경향을 보인다.

Fig. 7은 고온용해에 의해 Charpy 흡수에너지 변화를 나타내었다. 0.85wt.% Fe 시료를 950°C에서 고온용해한 시료의 Charpy 흡수에너지 값이 740°C 용해 시료의 흡수에너지 값보다 50% 정도 높게 나타났다.

Photo 4는 상기 시료들의 Charpy 파단면 사진으로, 고온용해의 온도가 증가함에 따라 벽개파괴(Cleavage Fracture) 양상을 나타내는 부분의 면적이 감소하고 연성파괴(Dimple Fracture) 부분이 증가되어 Charpy 흡수에너지 값이 증가되는 것을 확인할 수 있었다.

조대한 판상 β 상이 다수 존재하는 740°C 용해주입 충격시료의 파단면은 부분적으로 연성파단 영역이 존

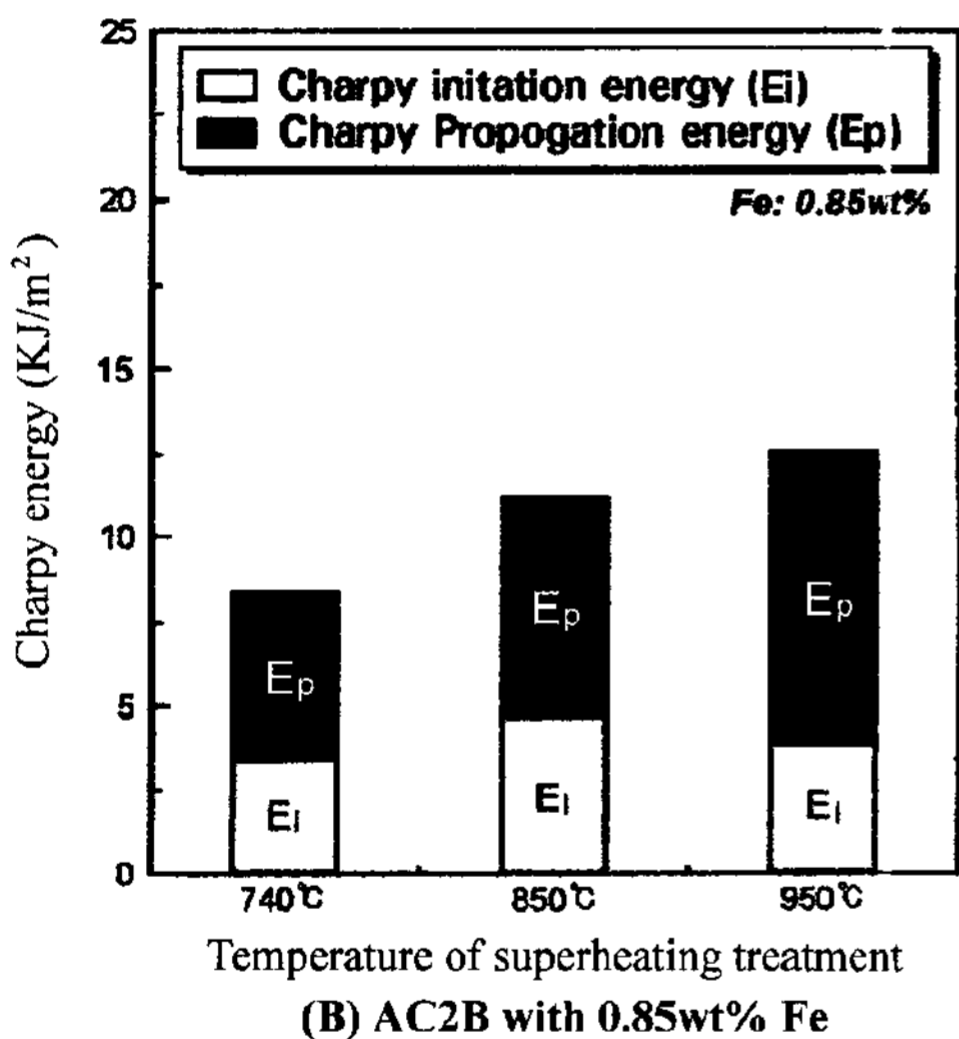
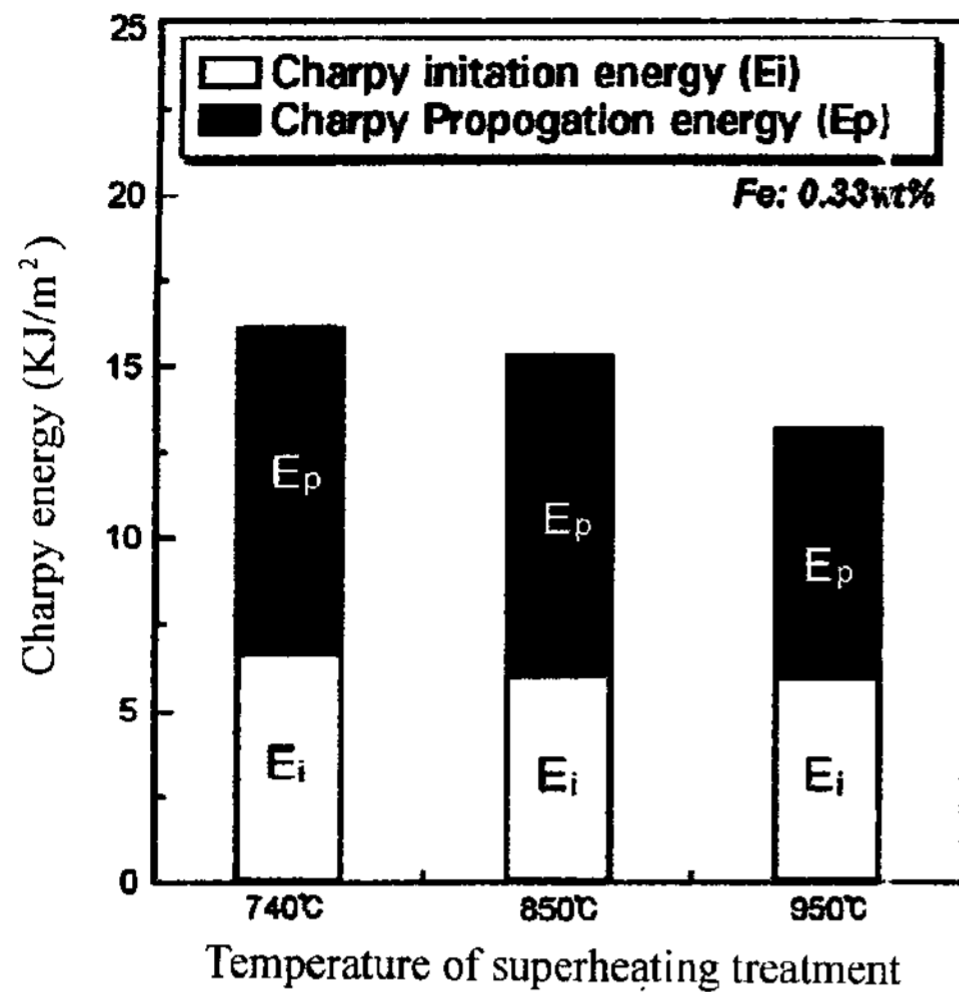


Fig. 7. Effect of the superheating temperature on Charpy absorbed energy.

재하나 벽개파괴 영역이 많이 분포되어 있다. 850°C 고온용해 충격시료 파단면에서는 벽개파괴 영역이 존재하고 있으나, 크기가 적고 산포되어 있는 양상을 나타내고 있다. 이들 시편에 충격하중이 가해지면서 β상과 기지금속의 계면분리가 벽개파괴 영역을 형성시키는 것으로 추정된다[16].

충격파단 시료의 단면부를 고찰한 Photo 5에서 β상들이 파단면에 노출되어 있어 이와 같은 추정을 뒷받침하고 있다.

충격하중이 시편에 가해질 때 시편의 노치하단부 일

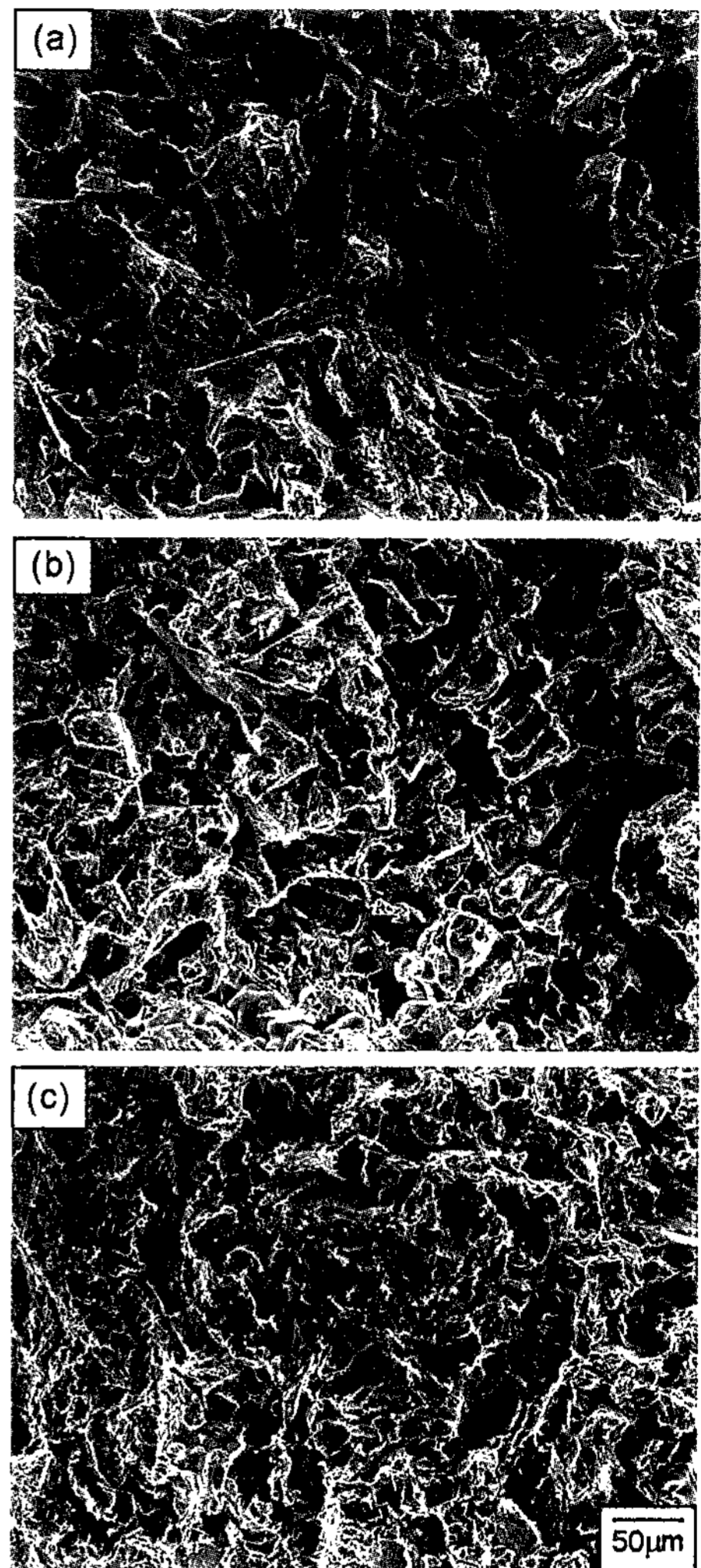


Photo 4. Effect of the superheating temperature on the fracture mode of Charpy fracture surface. (a) 740°C holding (b) 850°C superheating treatment (c) 950°C superheating treatment

정 영역은 높은 응력상태를 나타내고, 이 영역내 응력 집중을 유발시키는 결함부에서 균열이 발생된다. 740°C 용해주입 시료와 850°C 고온용해 시료에서 고르게 분포된 β상은 균열전파 과정에서 계면이 분리되고 sub-crack을 형성시켜 균열진전면(crack path)을 제공하므로, β상의 길이와 체적비가 큰 시료일수록 충격시험에서 균열전파 에너지(E_p)를 저하시키는 역할을 한다.

반면, 950°C 고온용해 시료는 β상이 Chinese script 형상의 α상으로 대체되면서 연성파괴 영역이 대부분을 차지하여 충격흡수 에너지가 증가한 것으로 사료된다.

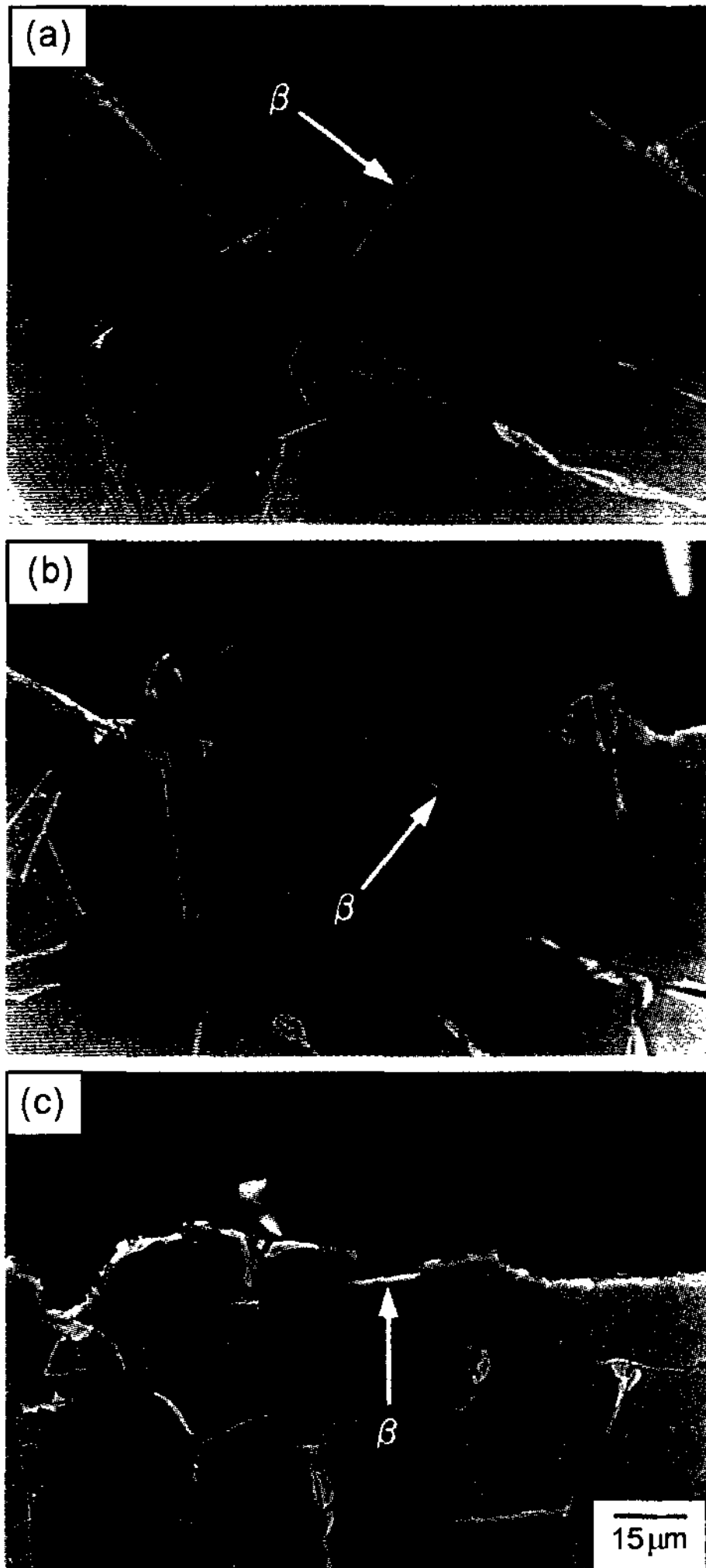


Photo 5. Transverse section through fracture surface of Charpy impact specimen (a) 740°C holding (b) 850°C superheating treatment (c) 950°C superheating treatment

4. 결 론

Fe가 다량 함유된 AC2B합금의 기계적 특성 향상을 위해 고온용해 방법으로 Fe함유 금속간 화합물 β 상의 형상 개량화 실험을 통하여 다음의 결과를 얻었다.

1. Fe함유 Al-Si-Cu합금을 850°C와 950°C, 30분 유지한 고온용해는 Fe함유 금속간 화합물 β 상 형상개량에 유효하였으며, 특히 Fe함량 0.85wt.% 시편에서 매우 효과적이었다.

2. Fe함량 0.33wt.% 시편을 850°C와 950°C에서 각각 30분 유지한 고온용해 시료는 740°C 용해주입 시

료와 비교하여 연신율 변화에는 영향을 나타내지 않았으나, 인장강도는 각각 4%, 6% 증가되었다.

3. Fe함량 0.33wt.% 시편을 850°C와 950°C에서 각각 30분 유지한 고온용해 시료는 740°C 용해, 주입 시료와 비교하여 Charpy 충격시험에서 균열전파 에너지(E_p)의 감소로, 총흡수 에너지(E_t)가 5%, 20% 감소되었다. 반면, 고온용해에 의한 균열발생 에너지(E_i)는 거의 변화하지 않았다.

4. Fe함량 0.85wt.% 시편을 850°C와 950°C에서 각각 30분 유지한 고온용해 시료는 740°C 용해, 주입 시료와 비교하여 연신율은 30%, 110% 증가되었으며, 인장강도는 11%, 20% 증가되었다.

5. Fe함량 0.85wt.% 시편을 850°C와 950°C에서 각각 30분 유지한 고온용해 시료는 740°C 용해, 주입 시료와 비교하여 Charpy 충격시험에서 주로 균열전파 에너지(E_p)의 증가로, 총 흡수에너지(E_t)가 31%, 48% 증가되었다. 한편, 고온용해에 의한 균열발생 에너지(E_i) 변화는 미약하였다.

참 고 문 헌

- [1] "平成元年アルミ空き缶回収再生利用率",アルミ缶リサイクル協會(1989)
- [2] 藤井清隆: 金屬, 61(1991), 20
- [3] A. Couture : AFS Int. Cast Met. J., (1981)9
- [4] Narayanan L. Anantha, Samuel, F. H., Gruzleski, J. E. : Metall. Trans., 25A(1994)1761
- [5] G. Gustafsson, T. Thorvaldsson, G. L. Dunlop : Metall. Trans., 17A(1986)45
- [6] Anantha N. Lakshmanan, Saeed G. Shabestari, John E. Gruzleski : Z. Metallkd., 86(1995)7
- [7] Narayanan L. Anantha, Samuel, F. H., Gruzleski, J. E. : AFS Trans., 141(1992)383
- [8] G. Phragmen : J. Inst. Met., 77(1950)489
- [9] Awano, Y., Shimizu, Y. : AFS Trans., 98(1990)889
- [10] Xiufang, Y., Guohua, Z., Shengxu, Z., Jiaji, M.: Cast Metals, 51(1992)39
- [11] T. Kobayashi, I. Yamamoto and M. Niinomi : J. Test. Eval., 21(1993)145
- [12] Toshiro Kobayashi and Heonjoo Kim : Metals and Materials, 5(1999)303
- [13] Mondolfo, L. F., Barlock, J. G., Tomeo, A. P. : Light Metals 2(1976)365
- [14] M. Plummer : J. Appl. Chem., 8(1958)35
- [15] S. J. Wilson and J. D. C. McConnell : J. Solid State Chem., 34(1980)315
- [16] Heon-Joo Kim : J. Korean Society for Heat Treatment, 13(2000) 391