

비평형 열처리에 의한 주조용 Al-Si-Cu합금 조직의 개량 효과

김 현 주

부경대학교 공과대학 금속공학과

Effects of the Non-equilibrium Heat-treatment on Modification of Microstructures of Al-Si-Cu Cast Alloy

Heon-Joo Kim

Department of Metallurgical Engineering, Pukyong National University

Abstract Addition of Ca element and nonequilibrium heat treatment which promotes shape modification of eutectic Si and β intermetallic compound were conducted to improve the mechanical properties of Al-Si-Cu alloy. Modification of eutectic Si and dissolution of needle-shape β intermetallic compounds were possible by nonequilibrium heat treatment in which specimens were held at 505°C for 2 hours in Al-Si-Cu alloy with Fe. Owing to the decrease in aspect ratio of eutectic Si by the heat treatment of the alloy with 0.33wt.% Fe, the increase in elongation was prominent to be more than double that in the as-cast specimen. Dissolution of needle-shape β intermetallic compounds in the alloy with 0.85wt.% Fe led to the improvement of tensile strength as the length of β compounds decreased to 50%.

(Received September 9, 2000)

Key words: Al-Si-Cu alloy, Nonequilibrium heat treatment, Modification of eutectic Si, Dissolution of β intermetallic compound, Tensile property

1. 서 론

근래 자원 재활용과 에너지절약 및 환경보존의 시대적 요청에 의해 알루미늄 재활용의 필요성이 인식되고, 일반인들로부터 많은 관심을 모으고 있다. 1톤의 알루미늄을 제련하기 위해서 약 21,100kWh라는 큰 전력이 소모되지만[1] 스크랩을 재활용하여 잉고트를 제조할 경우에는 3~5%의 전력만이 필요하여[2], 환경보존, 자원절약과 이용 극대화 및 공해와 폐기물 방지에도 큰 역할을 할 수 있다. 그러나, 알루미늄 재활용에 있어 어려움은 여러 용도로 사용되어 분류되지 않은 채 수집되는 알루미늄 스크랩이다. 재생 알루미늄의 활용을 높이기 위해서는 혼입된 각종 유해원소를 제거하거나 악영향을 완화하는 기술확립이 필요하다.

유해원소 중에서 Fe는 가장 많이 혼입되는 원소로, Al용탕 내에 Fe함량이 증대되면 기계적 특성을 저하시키는 침상의 β -AlFeSi상이 형성된다. 이 화합물은 취약하고 aspect ratio가 큰 형상으로 인해 응력이 가해지면 쉽게 파단되어 특히 연신율을 저하시킨다[3-5]. 이와 같은 Fe에 의한 악영향을 개선하기 위해 Mn, Cr 등의 합금원소를 첨가하는 방법[4, 6]과 냉각속도[6-8] 및 용

해온도 조절[3, 9-10]에 의해 β -AlFeSi상을 α 화합물상으로 변화시키는 방법이 연구되고 있다.

최근에는 β -AlFeSi상의 형상을 개량하기 위하여 일반적으로 행해지는 열처리온도 보다 높은 온도에서 짧은 시간 유지시켜 단락시키는 비평형 열처리법(Non-equilibrium Heat treatment)[11]이 소개되었다. Al-Si-Cu계 합금의 경우, 일반적인 열처리는 Cu공정온도 직하의 온도에서 행하나, 비평형 열처리는 보다 높은 Si공정온도 직하에서 행하여 β 상을 단락시키는 방법이다.

본 연구에서는 Fe함유 주조용 알루미늄합금의 기계적 특성을 향상시키기 위한 목적으로, Al-Si-Cu합금을 대상으로 비평형 열처리에 의한 조직의 형상개량과 이에 따른 인장특성을 측정하여 효과를 평가하였다.

2. 실험방법

2.1. 시료

본 실험에 사용된 재료는 아공정 Al-Si-Cu합금이며 실제 화학조성은 Table 1과 같다. 알루미늄 재활용시 혼입되는 Fe의 영향을 조사하기 위하여 아공정 Al-Si-Cu합금에 0.33wt.% Fe와 0.85wt.% Fe를 각각 첨가시

Table 1. Chemical composition of the alloys.

(wt. %)

Alloy	Si	Cu	Mg	Mn	Fe	Ni	Al
Al-Si-Cu	5.5	3.0	0.5	0.5	0.33	0.05	Bal.
					0.85		

쳤다.

알루미늄합금의 용해작업은 4번 흑연도가니를 사용한 실리콘이트 전기로에서 행하였으며, 잉고트 용락이 일어나는 온도에서 플럭스를 도포하고 760°C까지 승온한 후, 탈가스 처리를 하였다. 탈가스 처리 후 700°C에서 Al-4.5wt.% Ca 모합금으로 개량화 처리를 행하고, 740°C에서 30분간 용탕을 진정시켜 금형($^{H}59 \times ^{L}240 \times ^{W}73 \times ^{H}20$ mm)에 주입하였다.

2.2. 공정Si의 형상개량

아공정 Al-Si합금의 조직은 일반적으로 칩상의 공정Si가 형성되어 연신율의 저하가 크므로 Na, Sr, Sb 등을 첨가하여 형상개량을 통한 연신율 향상을 도모하는 것이 개량화 처리(Modification Treatment)이다[12].

본 실험에서는 Ca의 공정Si 개량화 효과[13]에 주목하여 Al-4.5wt.% Ca 모합금을 700°C 용탕에 첨가하여 용탕의 Ca함량을 변화시키고 그 영향을 조사하였다. 또한 비평형 열처리를 행할 때 수반되는 공정Si의 형상변화를 Ca함량이 다른 시편에 대하여 조사하였다.

형상개량 효과를 측정하기 위한 공정Si aspect ratio와 β 상 길이에 대한 자료는 500배율의 광학현미경으로 5군데 부위를 화상해석 프로그램으로 처리한 것이다.

2.3. Fe 금속간 화합물의 형상개량

Return Scrap을 사용하는 Secondary Ingot의 사용 증가와 용해도구 등으로부터 혼입되는 Fe로 인해 칩상의 Fe 금속간 화합물이 형성된다. 본 실험에 사용된 시료도 다량의 Fe 함유로 인하여 칩상의 β -AlFeSi상 형성이 예상되며 이로 인한 재료의 기계적 특성 저하가 우려된다[6]. Aspect ratio가 큰 칩상 Fe 금속간 화합물 형상을 개량화시켜 인장특성 향상을 도모하기 위해 용고 후 높은 온도에서 열처리하는 비평형 열처리를 행하였다.

비평형 열처리 온도를 결정하기 위하여, 시료의 DSC 열분석을 통하여 Si공정온도와 Cu 공정온도를 결정하였다. 높은 열처리 온도에서 칩상의 화합물을 부분 용해로 단락시키는 비평형 열처리조건은 DSC 열분석 결과

를 참고하여, 505°C에서 2시간, 515°C에서 2시간, 525°C에서 2시간 유지시킨 후, 그 효과를 조직사진으로 비교하여 결정하였다.

2.4. 인장실험

칩상의 Fe 금속간 화합물 개량화 효과를 평가하기 위하여 인장실험을 행하였다. 인장시편은 평행부 직경 12.5 mm, 표점거리 50 mm의 봉상으로 제작하였으며, 인스트론형 시험기에서 크로스헤드 속도 1 mm/min의 변형속도로 상온에서 행하였다. 인장강도, 연신율을 측정하였으며, 파단면은 주사전자현미경(SEM)을 사용하여 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 미세조직

Al-Si-Cu합금은 고용체 α Al dendrite, 공정Si, Chinese script 형상의 α 화합물상(Al_3Fe_2Si), 칩상의 β 화합물상(Al_5FeSi)과 3원 공정에 의한 $CuAl_2$ 화합물상들로 구성된 조직이다.

Fig. 1은 시료의 X선 회절 결과로, 본 시료를 구성하는 상을 나타내고 있다. Fig. 2는 강 부식시킨 시료를 SEM-EDX로 확인된 상들의 형상이다. 광학현미경으로 이들 상들의 구분은 형상과 색의 농도에 의해 구분 가능하였다. 공정 Si상은 냉각속도가 빠를수록 점차 미세한 칩상의 공정Si들이 거미집 형태를 유지하였으며, 개

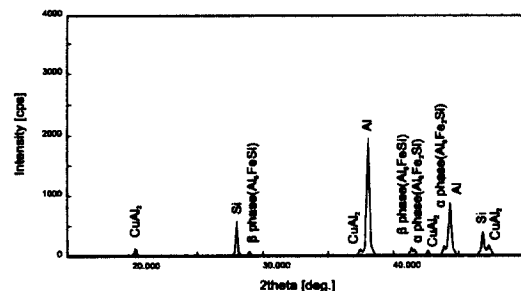


Fig. 1. Result of X-ray diffraction for the alloy of 0.85 wt.% Fe.

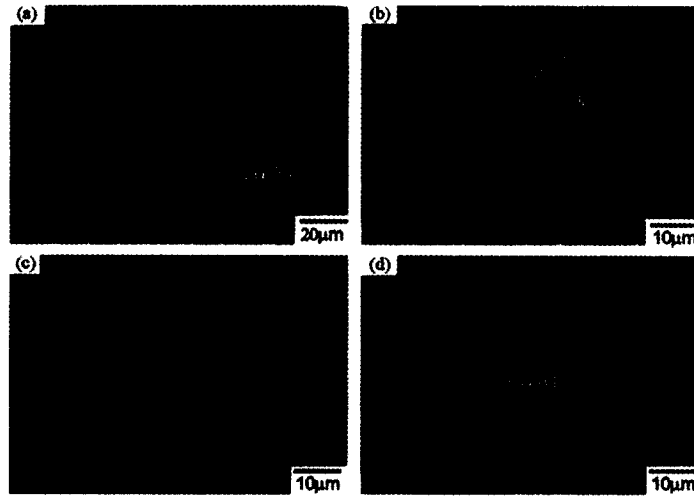


Fig. 2. SEM photographs showing typical microstructure and intermetallic phases in the alloy of 0.85wt.% Fe.; (a) Typical microstructure (b) Shape of α phase (c) Shape of β phase (d) Shape of CuAl_2

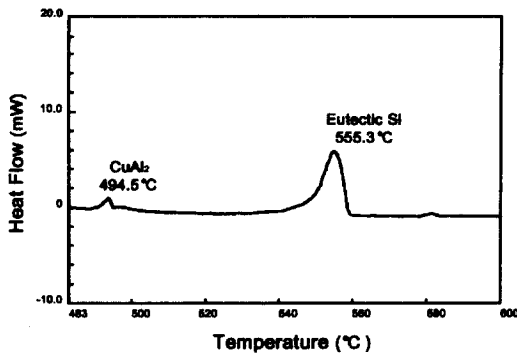


Fig. 3. DSC analysis for Al-5.5wt.%Si-3.0wt.%Cu alloy.

량화제의 첨가로 미세한 깃털상의 형태를 나타내었다. α 화합물상은 Chinese script 형상으로 공정 Si상에 비하여 모서리가 완만하고 연한 농도의 형상을 가진다. CuAl_2 상은 더욱 연한 색채로 불규칙 형상을 가진 화합물상이며, β 상은 냉각속도가 느릴수록 막대모양의 조대한 침상의 화합물로 나타났다.

3.2. 공정Si의 비평형 열처리 영향

Al-Si-Cu합금에서 일반적인 열처리는 Cu공정온도 직하에서 실시하나, 비평형 열처리는 이 보다 높은 Si 공정온도 직하에서 행한다[14]. 비평형 열처리 유지온도를 결정하기 위해 Fig. 3과 같이 시료를 DSC 열분석한 결과, 시료의 Si 공정온도는 555.3°C, Cu 공정온도는 494.5°C이었다.

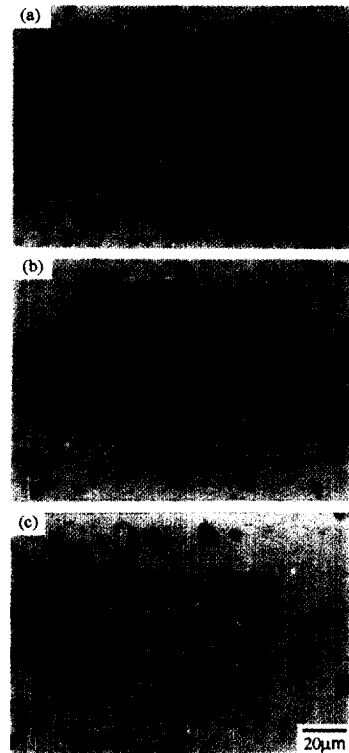


Fig. 4. Variation of shape of eutectic Si with nonequilibrium heat treatment conditions in the alloy of 0.33wt.%Fe; (a) 505°C 2 hr (b) 515°C 2 hr (c) 525°C 2 hr.

비평형 열처리 온도를 설정하기 위해 0.33wt.% Fe합금 시편을 대상으로 각각 다른 온도에서 2시간 유지시

켰을 때 나타나는 조직변화를 Fig. 4에 나타내었다. 유지온도가 505°C 보다 높아짐에 따라 공정Si가 합체되어 조대화되는 경향을 나타낸다. 유지온도 505°C는 Fig. 4와 같이 공정Si이 입상으로 형상이 변화되는 충분한 온도도로, 본 실험에서 비평형 열처리 조건을 505°C, 2시간 유지로 결정하였다.

Al-Si-Cu합금에서 Si 공정온도 직하에서 행한 비평형 열처리는 침상의 β상을 부분적인 용해로 단락시킬 뿐만 아니라 공정Si을 입상으로 변화시키는 효과를 수반하여 비평형 열처리에 의한 공정Si 형상 개량이 이루어졌다. 즉, 침상 혹은 깃털모양의 공정Si들은 모서리가 둥근 입자형상으로 변화되었다.

Fig. 5와 Fig. 6은 각각 0.33wt.% Fe, 0.85wt.% Fe 함유 시편의 주방상태와 비평형 열처리 후의 공정Si aspect ratio를 Ca함량에 따라 비교한 것이다. 주방상태 시편의 Ca함량에 따른 공정Si aspect ratio 변화를 살펴보면, 첨가된 Ca는 공정Si를 개량화 시키는 효과가 있다[13, 15]. 또한, 비평형 열처리에 의해 시편의 Ca함량과 Fe 함량에 상관없이 공정Si aspect ratio는 1.0에 근접되어, 비평형 열처리가 공정Si의 형상개량에도 효과가 있음을 알 수 있다.

이와 같은 비평형 열처리의 공정Si 형상개량 효과는 Fe함량이 상대적으로 낮아 β상이 거의 관찰되지 않는 Fe 0.33wt.% 함유 시편의 인장파괴 거동에도 영향을

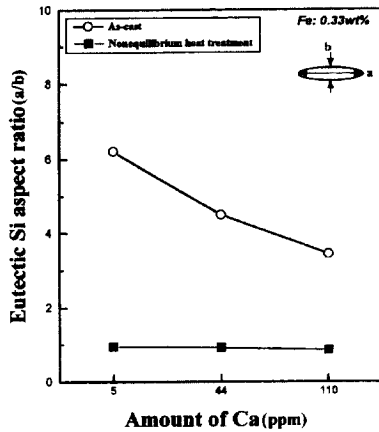


Fig. 5. Effect of amount of Ca on eutectic Si aspect ratio in the alloys of different Ca amount and 0.33wt.% Fe.

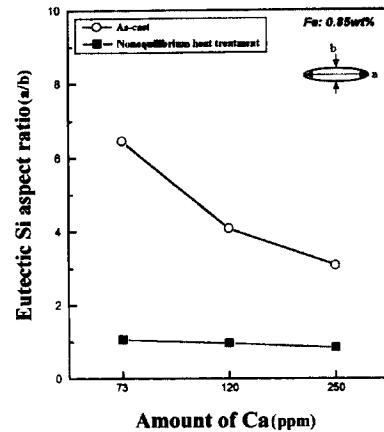


Fig. 6. Effect of amount of Ca on eutectic Si aspect ratio in the alloys of different Ca amount and 0.85wt.% Fe.

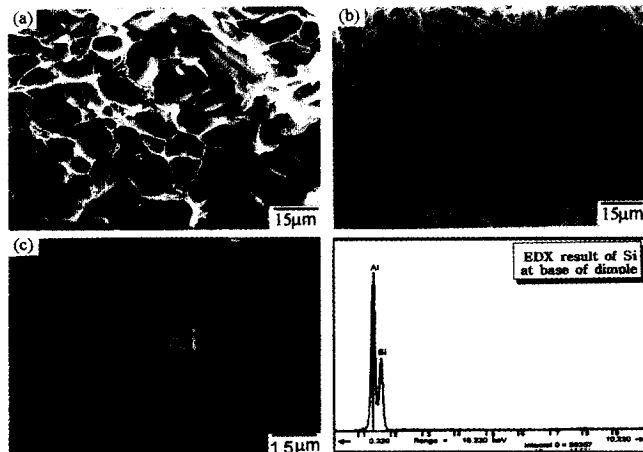


Fig. 7. Variation of dimple size with nonequilibrium heat treatment on the tensile specimen of 0.33wt.% Fe.; (a) As-cast specimen (b)Nonequilibrium heat treated(505°C, 2 hr) specimen (c) Eutectic Si at base of dimple and EDX analysis.

줄 수 있다[12]. Fig. 7은 0.33wt.% Fe함유 시편에서 주방상태 시편과 비평형 열처리를 실시한 시편의 인장 파 단면을 구성하는 대표적인 덩플(dimple)의 크기를 나타 내고 있다.

Fig. 8과 Fig. 9는 각각 Fe함량 0.33wt.% Fe와 0.85 wt.% Fe함유 시편에서 주방상태와 비평형 열처리한 시 편의 연신을 변화를 나타낸 것으로, 공정Si의 aspect ratio 변화를 첨부하였다. 초기 인장하중에서 취성적인 균열 발생원이 되는 β 상이 많이 존재하는 0.85wt.% Fe 시편보다 0.33wt.% Fe 시편의 연신율이 두드러지게 향상되었다. 이것은 0.33wt.% Fe함유 시편과 같은 연 성재료에서 인장하중을 받으면, 공정 Si에서 응력이 집

중되면서 미소 보이드가 발생하고 덩플로 성장, 합체되 면서 인장시편의 전반적인 파괴로 이행된다. 이때, 비평 형 열처리를 행한 시편은 주방상태의 시편에 비해 공정 Si의 aspect ratio가 작으므로 입자 주위의 응력집중이 완화된다[16]. 이와 같은 응력집중 완화는 연성과파괴 과 정에서, 덩플형상의 균열을 발생시키는 임계 공정Si 입 자크기를 감소시켜[17] 다수의 덩플이 형성되어 인장 파단면을 구성하는 덩플의 크기를 감소시킨다. 또한, 응 력집중 완화는 생성된 덩플이 합체로 이행되기 전의 과 정을 연장시켜 연성증가를 가져온 것으로 사료된다.

3.3. Fe 금속간 화합물의 비평형 열처리 영향

Fe함량이 높은 주방상태의 시편에서 연성인 기지조직 내에 분포하고 있는 β 상은 취약한 금속간 화합물로 aspect ratio가 큰 침상으로 존재한다. 외부응력이 가해 지면 낮은 변형 상태에서 기지금속 내의 변형이 연속적 이지 못한 β 상에 응력이 집중되면서 Fig. 10과 같이 β 상이 부러지거나, 기지금속과 β 상 계면이 분리되면서 균 열발생원과 균열전파 경로로 작용하여 재료의 기계적 특성을 저하시키는 원인이 된다[13].

비평형열처리에 의한 β 상의 형상개량화 효과를 살펴보 았다. Fig. 11은 0.85wt.% Fe함유 시편의 주방조직과 비평형 열처리 조직의 SEM 조직사진으로, 505°C, 2시 간 유지의 비평형 열처리에 의해 β 상이 효과적으로 단 락 되었음을 알 수 있다.

Fig. 12는 0.85wt.% Fe함유 시편에서 주방상태와 비 평형 열처리 조직에서 β 상의 크기를 Ca함량에 따라 비 교한 것이다. 주방상태와 비평형 열처리 후의 시편 모

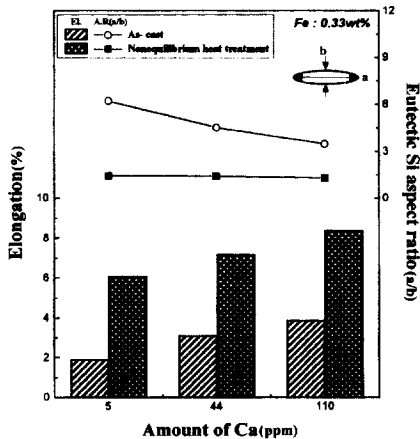


Fig. 8. Variation of elongation with eutectic Si aspect ratio in the alloys of different Ca amount and 0.33wt.% Fe.

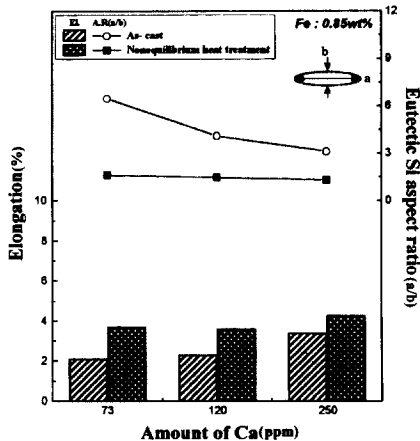


Fig. 9. Variation of elongation with eutectic Si aspect ratio in the alloys of different Ca amount and 0.85wt.% Fe.

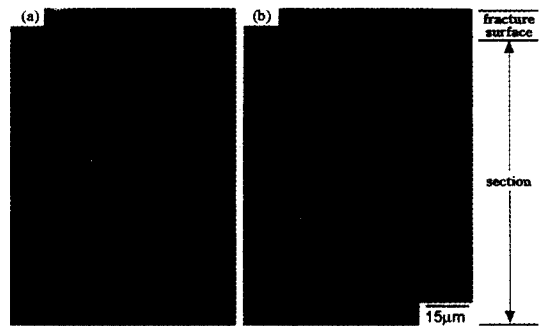


Fig. 10. SEM micrographs showing the crack propagation along β -phase in the alloy on 0.85wt.% Fe; (a) Section perpendicular to the fracture surface of Charpy specimen, (b) Section perpendicular to the fracture surface of tensile specimen.

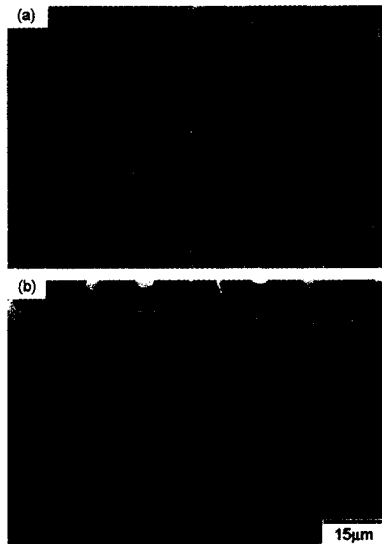


Fig. 11. Variation of shape of β phase with non-equilibrium heat treatment in the alloy of 0.85wt.% Fe.; (a) β phase in as-cast structure (b) β phase in nonequilibrium heat treated (505°C 2 hr) structure.

두 Ca량 증가에 따라 β 상의 길이가 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 비평형 열처리에 의해 β 상의 길이가 50% 정도 감소되었다. 이와 같이 Fe함량이 높아 β 상이 다수 존재하는 시편은 비평형 열처리로 조대한 침상의 β 상을 단락시켜 기계적 특성을 향상시킬 수 있다[11, 14].

Fig. 13은 0.85wt.% Fe함유 시편에서 주방상태와 비평형 열처리를 실시한 시편의 인장파단면을 비교한 것

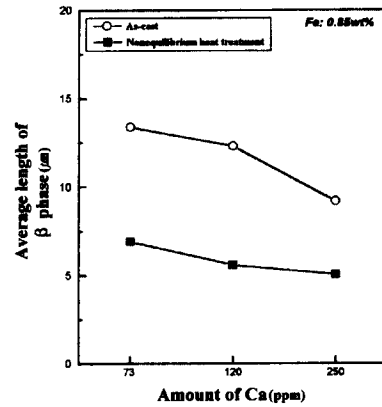


Fig. 12. Effect of non-equilibrium heat treatment on average length of β phase in the alloys of different Ca amount and 0.85wt.% Fe.

이다. 주방상태의 시편에 존재하는 조대한 β 상은 높은 응력집중으로 인장변형의 초기과정에 취성적 벽개파면을 형성시키면서 인장시편의 전반적인 파괴를 유도하므로, 비평형 열처리 시편의 인장보다 취성 벽개파면이 많이 나타난다.

Fig. 14와 Fig. 15는 각각 0.33wt.% Fe와 0.85wt.% Fe함유의 주방조직과 비평형 열처리 시편으로부터 측정된 인장강도를 Ca함량에 따라 비교한 것이다. β 상이 존재하지 않아 β 상 단락효과가 나타나지 않는 0.33 wt.% Fe함유 시편과는 달리, 0.85wt.% Fe함유 시편은 비평형 열처리에 의해 β 상이 단락되면서 인장강도가 증가되었다. β 상이 거의 존재하지 않는 0.33wt.% Fe함유

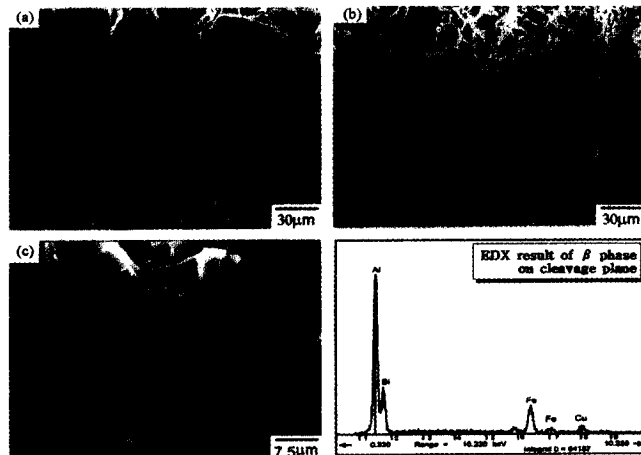


Fig. 13. Effect of non-equilibrium heat treatment on the fracture of tensile specimen of 0.85wt.%Fe.; (a) As-cast specimen (b) Nonequilibrium heat treated (505°C, 2 hr) specimen (c) EDX analysis of β phase on cleavage plane.

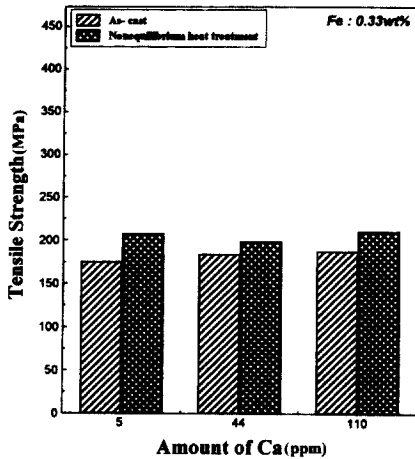


Fig. 14. Variation of tensile strength with amount of Ca in the alloys of different Ca amount and 0.33wt.% Fe.

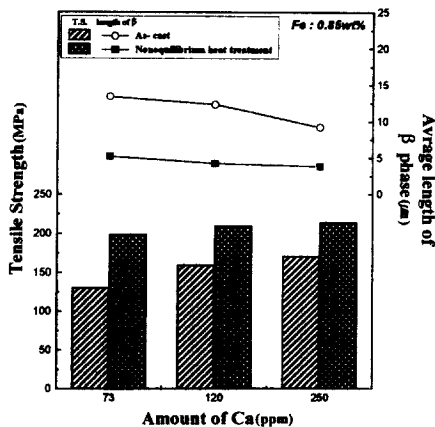


Fig. 15. Variation of tensile strength and average length of β phase with amount of Ca in the alloys of different Ca amount and 0.85wt.% Fe.

시편에서, 비평형 열처리는 공정Si를 형상개량시키고 인장 변형 거동에 영향을 미쳐 연성증가의 결과를 나타내었다.

그러나, 0.85wt.% Fe합유 시편에서 나타나는 β 상은 크기나 침상의 형상으로 보아 공정Si보다 훨씬 높은 응력집중 효과를 나타낼 수 있다. 따라서, 조대한 침상 β 상의 존재는 인장시험 초기의 하중에 의해 β 상이 부러지거나, 계면이 분리되면서 균열발생을 촉진시켜 인장강도를 저하시킨 것으로 사료된다[6, 13].

Fe합유 Al-Si-Cu합금의 기계적 특성 향상을 위한 비평형 열처리로 공정Si 형상개량과 Fe합유 금속간 화합물 β 상 형상개량 효과를 얻은 실험을 통하여 다음의 결과를 얻었다.

1. Fe합유 Al-Si-Cu합금을 505°C에서 2시간 유지한 비평형 열처리 조건은 공정Si 형상개량과 Fe합유 금속간 화합물, β 상 형상개량에 효과적이었다.

2. Fe합량 0.33wt.%시편에서 505°C, 2시간 유지한 비평형 열처리는 공정Si의 aspect ratio를 감소시켜 연신율이 2배 이상 향상되었다.

3. Fe합량 0.85wt.%시편에서 505°C, 2시간 유지한 비평형 열처리는 침상 β 상 길이를 50% 정도 감소시켜 인장강도를 25%-54% 증가시켰다.

참고문헌

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. Narayanan L. Anantha, Samuel, F. H., Gruzleski, J. E.: Metall. Trans., 25A(1994)1761.
4. G. Gustafsson, T. Thorvaldsson, G. L. Dunlop: Metall. Trans., 17A(1986)45.
5. Anantha N. Lakshmanan, Saeed G. Shabestari, John E. Gruzleski: Z. Metallkd., 86(1995)7.
6. A. Couture: AFS Int. Cast Met. J., (1981)9.
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., Jiayi, M.: Cast Metals, 51(1992)39.
11. L. Anantha Narayanan, F. H. Samuel and J. E. Gruzleski: Metall. And Mater. Trans., 26A(1995)2161.
12. P. Jonason: AFS Trans., 100(1992)601.
13. T. Kobayashi, H. J. Kim and M. Niinomi: Mater. Sci. & Tech., 13(1997)497.
14. Y. Shimizu, Y. Awano, M. Nakamura: 96th Casting Congress, Milwaukee, WI, 1992, AFS no.92-135.
15. T. Kobayashi, M. Niinomi, M. Yamaoka, Y. Shimomura and T. Harata: J. Jpn Inst. Light Met., 43(1993)581-587.
16. M. K. Kanninen, W. F. Adler, A. Rosenfield and R. I. Jaffee: Inelastic Behavior of Solid, McGraw-Hill, N. Y., (1970)641.
17. H. J. Kim, T. Kobayashi, H. S. Yoon and E. P. Yoon: Mater. Sci. & Eng., A154(1992)35.