

논문

전자기력을 이용한 Al scrap 으로부터 과공정 Al-Si 합금의 제조

윤지현 · 문광호* · 김용현** · 이광학†

Manufacturing Al-scrap into Hypereutectic Al-Si Alloy by Using Electromagnetic Force

Ji-Hyun Yoon, Kwang-Ho Moon, Yong-Hyun Kim and Kwang-Hak Lee

Abstract

The objective of this study is to investigate on manufacturing Al-scrap into hypereutectic Al-Si alloy by using electromagnetic force. The Fe element in the aluminium scrap was controlled by intermetallic compound method and using EMF(electromagnetic force). The most lumped compound was found after 10min holding at 690C. A number of segregated compound was revealed when imposed to EMF at 30A. The refinement of primary Si particles was achieved by EMF stirring. Primary Si particles were refined and spheroidized most of all with the magnetic intensity of 180G for 10 min. (Received October 18, 2001)

Keywords : Al-scrap, Electromagnetic force, Refinement of primary Si particles, Spheroidized

1. 서 론

Al 합금은 대표적인 경량소재로서 근래에 와서 그 사용 범위가 대단히 넓어지고 있다. 그에 따라 한정된 자원의 절약과 자원재활용의 측면에서, 최근들어 알루미늄 리사이클링에 대한 요구가 증가하고 있으나, 아직까지 알루미늄 2차지급 생산은 비효율적인 수준에 머물러 있어서 고품질의 재생 알루미늄합금 제조를 위한 경제적이고 효율적인 방법이 절실히 요구되고 있다.

현재 알루미늄 2차지급 제조시 사용되는 알루미늄 스크랩에는 합금의 사용용도에 따라 첨가되어진 Fe, Mg, Cu, Zn 등 여러 불순물들을 함유하고 있으며, 이들 불순물의 농도를 용탕내에서 효율적으로 관리하는데 상당한 어려움을 가지고 있다[1].

특히, 주조용 합금으로 가장 널리 사용되고 있는 Al-Si계 합금의 경우, 다이캐스팅시 다이의 소착방지를 위해 소량 첨가되어지는 Fe[2]는 일정량 이상이 합금

에 함유되면 합금 중에 Al-Si-Fe의 3원계 침상의 금속간화합물을 형성하게 되는데, 이 금속간화합물은 기지와 결합력이 약하여 재료취화의 주원인이 될 뿐만 아니라, 주조시 액상의 흐름을 방해하는 등 여러 가지 악영향을 유발하게 되므로 Al-Si 합금 제조시 Fe원소의 효율적인 함량제어가 필요하다[3-5].

알루미늄 용탕 내에서 Fe를 제거하기 위한 방법으로 결정분별법, 금속간화합물법, 반응고 정제법, 그리고 여과법 등의 여러 가지 방법들이 연구되어 왔으며, 그 외에 침상형태로 정출되는 Fe 금속간화합물의 모양을 개량처리 하여 그 악영향을 줄이기 위한 여러가지 연구[6,7]가 진행되어 왔으나, 지금까지의 연구들이 실제 산업에 적용하기에는 많은 문제점들을 안고 있어서 아직까지 실험실 수준의 연구에 머무르고 있는 실정이다. 그중 Fe가 다량 함유된 Al 용탕내에 Mn을 첨가하여 금속간 화합물의 형태를 침상형태에서 괴상형태로 변화시키는 금속간화합물법의 경우, 불순물의 농도가 높

울산대학교 첨단소재공학부(The school of materials science and engineering, University of Ulsan)

*한양공업고등학교(Hanyang technical high school)

**영동전문대 신소재공학과(The Dept. of Advanced materials science, Yeong Dong College)

†E-mail : kwanghak@uou.ulsan.ac.kr

은 경우에도 적용할 수 있는 장점이 있으며 Mn 첨가에 의해 새롭게 형성된 금속간화합물은 비중이 크기 때문에 주어진 온도에서 용탕을 장시간 유지하면 중력 방향으로 침강하여 편석되는 특징을 보인다[8-10]. 그러나, 이 방법 또한 용탕을 고온에서 장시간 유지해야 하기 때문에 경제적인 측면을 고려 할 때 아직까지는 실제 조업에 적용하기에는 부적합하다. 따라서 현재 대부분의 Al 2차지금 생산현장에서는 Fe원소의 함량제어를 위해 고순도 Al지금을 용탕에 추가로 용해하여 Fe 함량을 조절하는 희석에 의한 방법에 의존하고 있는 실정이다.

한편, Al-Si계 합금 중 과공정 Al-Si 합금은 내마모성이 우수하여 고강도를 요구하는 각종기계 부품에 널리 사용되고 있지만, 합금이 응고시 조대하게 정출하는 초정 Si로 인하여 재료의 강도와 신율을 저하시키고, 기계가공성이 나빠지게 되는 단점을 안고 있어서 내마모성과 강도가 동시에 요구되는 부품에는 적합하지 않은 소재로서의 문제점을 안고 있다[11].

이러한 이유로 과공정 Al-Si 합금 제조시 문제가 되고 있는 조대한 초정 Si의 입자 미세화를 위하여 지금까지 불순원소 첨가 방법을 중심으로 초정 Si의 입자 미세화에 대한 많은 연구가 진행되어 왔으며, 그 중 현재 가장 많이 사용되고 있는 방법중의 하나인 P를 주성분으로 하는 불순물 첨가법의 경우 Si 입자 크기를 미세화 시키는 것이 가능하지만 입자의 형상을 제어하지는 못하는 단점을 가지고 있다. 또한, 불순원소 첨가에 의한 방법은 그 효과나 첨가량의 결정 등이 합금의 조성이나 온도 등에 따라 많은 차이를 보이고 있어서 실제 조업시 현장의 경험이나 노하우 등에 의해 합금제조가 이루어지고 있다.

따라서, 본 연구에서는 실제 알루미늄 스크랩을 용해하여 Fe원소의 함량이 제어된 Al 2차 지금을 제조하고, 이 합금으로 초정 Si의 입자크기와 형상을 개량시킨 과공정 Al-Si 합금을 제조하기 위한 실험을 전자기력을 응용하여 진행하였다. 먼저 알루미늄 스크랩 용탕으로 부터 Fe의 함량제어를 위해 알루미늄 스크랩 용탕에 Mn을 첨가하여 금속간화합물의 형태를 침상에

서 비중이 큰 과상형태로 변화시켜 중력방향으로 침강시키고 용탕에 전자기력을 인가하여 금속간화합물의 편석을 극대화시켜 불순원소가 많이 함유된 편석부위를 제거하고 건전한 주물을 얻고자 하였으며, 과공정 Al-Si 합금 제조시 문제가 되었던 초정 Si의 입자크기와 형태는 합금을 반응고 상태에서 전자기력을 이용하여 강한 교반력을 부여함으로써 초정 Si 입자를 미세화 및 구상화시킨 합금을 제조하고자 하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는 알루미늄 스크랩으로부터 고품질의 Al 2차 지금을 생산하기 위하여 용탕에 전자기력을 인가하여 Fe를 제거하기 위한 실험과 전자기력을 이용하여 용탕을 교반 시킴으로써 초정 Si 입자를 미세화 시켜 과공정 Al-Si 합금을 제조하고자 하였다. 실험에 사용된 알루미늄 스크랩을 용해하여 분석한 결과 Table 1에 나타낸 것처럼 Fe 농도가 2% 안팎으로 높게 나타났으며, 이 알루미늄 스크랩 중의 Fe 함량을 각각 조사한 후 용탕에 Mn을 첨가하여 금속간화합물의 형태를 Al-Fe-Si 3원계 침상형에서 Al-(Fe,Mn)-Si의 4원계 금속간화합물로 변화시켜 중력침강 시키고자 하였다. 이때 중력방향으로 과상의 금속간화합물의 침강을 도와 그 편석이 최대가 되도록 전자기력을 인가하였으며, 이후 금속간화합물이 편석된 부위를 제거하여 건전한 Al 2차 지금을 얻는 방법으로 실험을 진행하였다. 첨가되는 Mn량은 Fe와 Mn의 비가 1:1일 때 가장 많은 과상 화합물을 형성하며, 그 온도는 690°C인 점을 응용하여 본 실험에서는 모합금에 Fe와 Mn의 중량비가 1:1이 되도록 Mn을 첨가한 후 690°C에서 용탕을 1, 5, 10 및 20분간 유지하고 급냉하여 시편의 상부와 하부의 미세조직을 광학현미경으로 관찰하여 과상 금속간 화합물의 형성에 필요한 적절한 유지시간을 결정하였다.

Mn이 첨가된 Al합금 용탕을 Fig. 1에 나타낸 전자기력 인가장치에 주입하고 690°C에서 과상의 금속간화합물 형성을 위해 충분히 유지한 후 인가자장을

Table 1. Chemical composition of Al-Fe-Si alloys(wt.%).

Si	Cu	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Al	z	
Eutectic	Al-Si alloy	9.6~12.0	1.5~3.5	0.3 ↓	1.0 ↓	1.3 ↓	0.5 ↓	0.5 ↓	bal.
Alscrap	11.5~12.5	4.5~5.0	0.3 ↓	0.8 ↓	1.8~2.2	0.4 ↓	0.3 ↓	bal.	

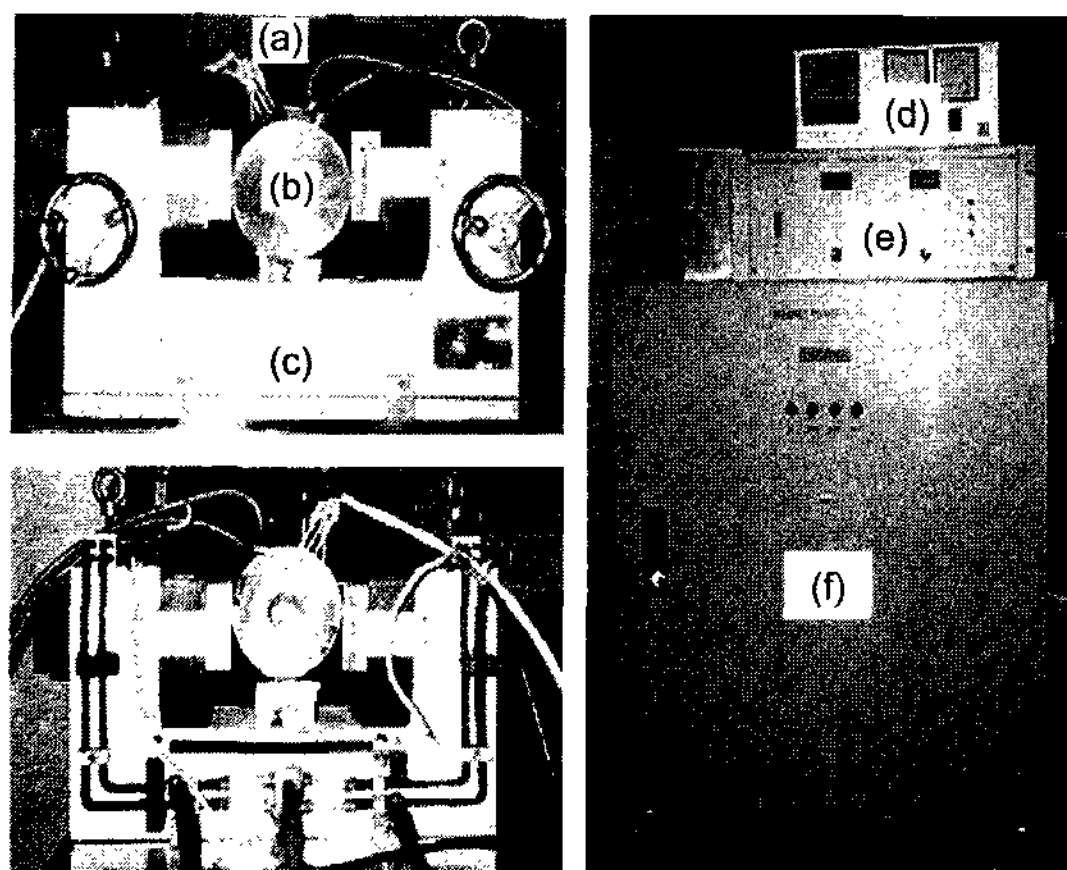


Fig. 1. Experiment apparatus for direct current electromagnetics. (a) electromagnet (b) furnace (c) pole (d) furnace power supply (e) current power supply (f) electromagnet power supply.

0.2Tesar로 고정하고 전류를 10A, 20A, 30A 및 40A로 각각 변화 시키면서 전자기력을 2분간 인가한 후 급냉하여 각각의 거시조직과 미세조직을 광학현미경으로 관찰하여 적절한 전류량을 구하였다.

한편, Fe 금속간화합물이 편석된 부위를 제거하고 난 후 시편의 전전한 부분을 Spark Emission Spectrometer (Atom Comp 181, Thermo Jarrell Ash Corp., USA)로 분석하여 초기의 Fe 농도와 Fe 화합물을 편석 제거한 후의 Fe 농도를 비교함으로써 Fe의 제거 효율을 알아보았다.

또한, 과공정 Al-Si합금에서 초정 Si의 입자제어를 위한 실험은 앞선 실험에서 금속간화합물의 편석부를 제외한 전전한 부위의 화학적 조성이 상용 ADC12합금과 매우 유사하여 알루미늄 스크랩에서 Fe원소가 제거된 합금에 Si를 추가로 용해하여 과공정 Al-Si합금을 제조 하였다. 이 합금에 Si 함량이 18%가 되도록 용해하여 미리 예열된 3상 2극의 전자기력 교반기내의 금형에 주입한 후 전자장에 의한 교반을 실시하였으며 그 장치를 Fig. 2에 나타내었다. 먼저 교반속도에 대한 영향을 알아보기 위하여 교반장치내 중심부 최대 자장을 180G, 280G 및 380G로 변화시켜 보았으며, 이중 최적의 교반속도로 공정온도인 580°C에서 1, 3, 5, 10 및 30분간 각각 교반을 실시하였으며, 각각의 시편에 대한 미세조직을 관찰하여 이들의 입자크기를 비교함으로써 미세화 정도를 판단하고 입자형상의 변화를 살펴 보았다.

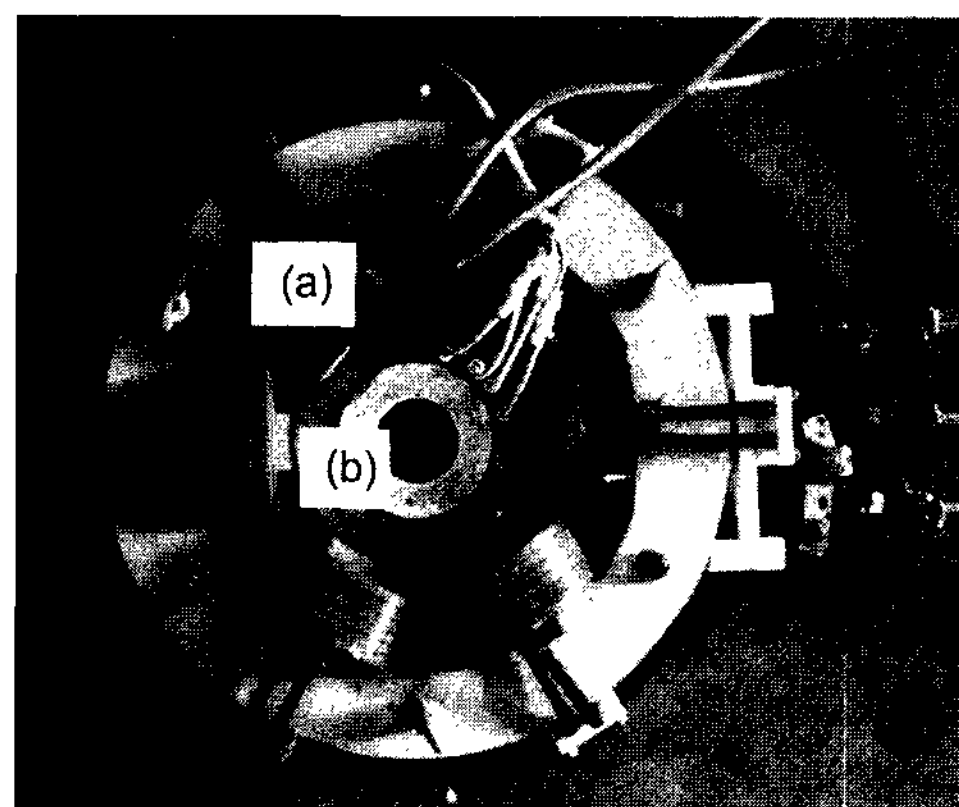


Fig. 2. Apparatus of stirrer by electromagnetic force. (a) electro-magnet (b) furnace.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 용탕중 Fe 원소 제거

본 실험에 사용한 알루미늄 스크랩을 용해 주조한 후의 미세조직과 일반적으로 상용되는 공정 Al-Si 합금의 미세조직을 Fig. 3에 나타내었다. 이 조직사진에서 알 수 있듯이, Fe원소가 1%이하로 제어된 상용합금에 비하여 Fe원소가 2%내외로 다량 함유된 알루미늄 스크랩의 경우, 조대한 침상의 금속간 화합물을 형성하고 있음을 관찰할 수 있다.

Fig. 3의 조직사진에서 볼 수 있듯이, 다이캐스팅용 합금의 경우 다이의 소착방지를 위해 일부 첨가되어지는 Fe 원소가 다량함유 되면, Al-Fe-Si의 금속간화합물이 조대한 침상으로 정출되며, 이렇게 정출된 3원계 Fe 금속간화합물은 기지와 결합력이 약하여 재료취성의 원인이 되며 용탕의 유동성을 저해하므로[5], 본 연구에서는 Fe 함량 제어를 위하여 Mn을 첨가하여 금속간화합물의 형태를 변화시키는 동시에 중력방향으로 침강시키는 방법과 전자기력을 이용하여 중력방향으로의 편석을 극대화하는 방법을 병행하여 실험을 진행하였다.

Al 용탕에 Mn을 첨가하면 Al-(Fe,Mn)-Si의 4원계 과상 금속간화합물이 형성되며, 이 화합물은 비중 2.56의 알루미늄 용탕 내에서 비중이 큰 Fe와 Mn에 의해 중력방향으로 침강하게 된다. 따라서, Mn의 첨가량을 Fe와의 중량비 1:1로 하여 첨가한 후 690°C에서 각각 1, 5, 10 및 20분간 유지한 후 급냉한 조직을 Fig. 4에 시편의 하부와 상부를 광학현미경으로 관찰하여 나

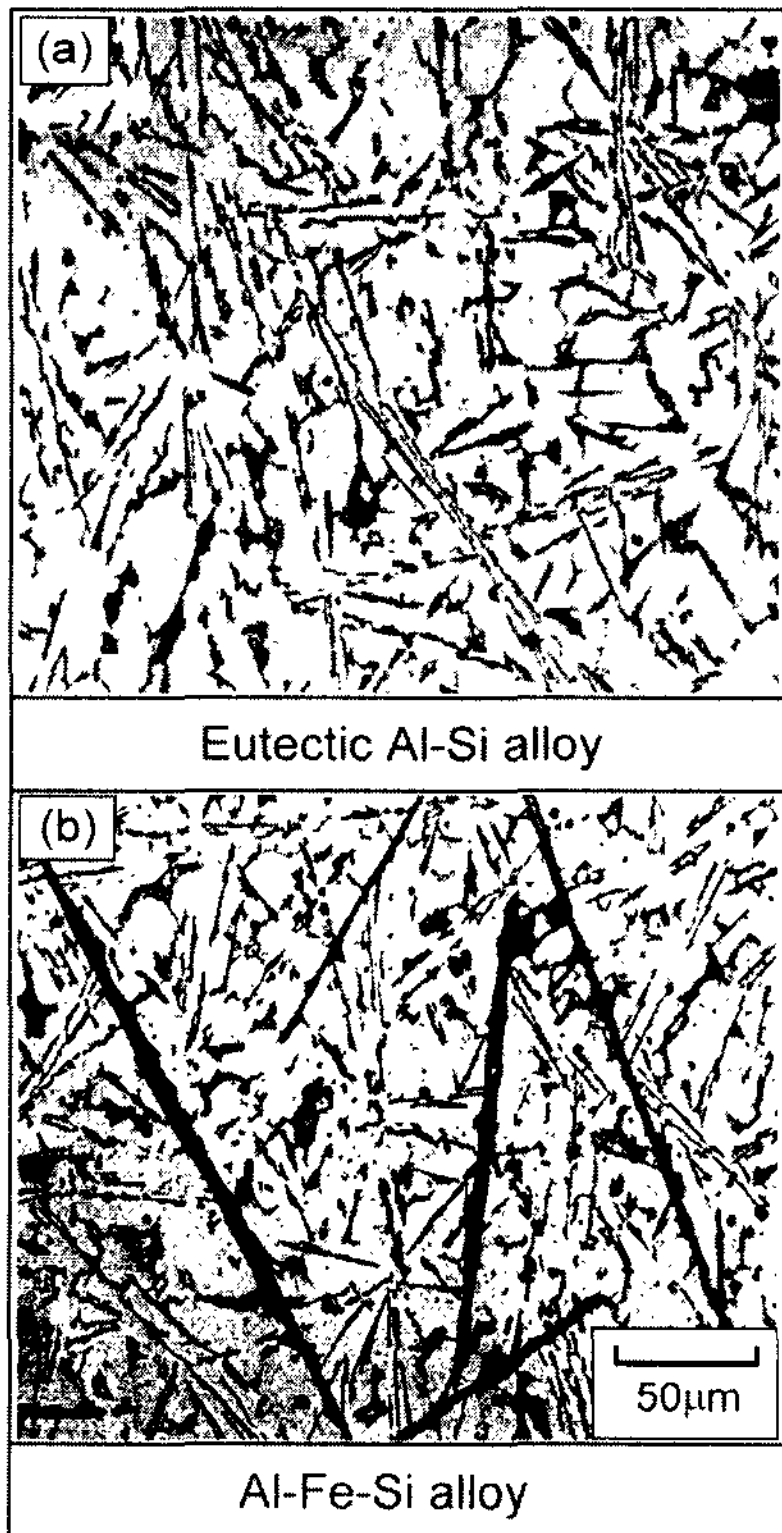


Fig. 3. Microstructure of eutectic Al-Si alloy and Al scrap ingot.

타내었다.

Fig. 4에서 알 수 있듯이, 용탕의 유지시간이 길수록 시편 하부에 정출된 괴상의 금속간화합물의 양은 증가됨을 관찰할 수 있었으며, 본 실험에서는 20분 가량 유지시켰을 경우 괴상형태로 변화된 금속간화합물이 시편하부에 가장 많은 침강 현상을 보이고 있다. 그러나, 용탕의 유지시간이 10분이 경과한 이후로는 더 이상의 금속간화합물의 형태변화는 거의 없는 것으로 관찰됨에 따라 용탕의 유지시간이 10분 일때 3원계 침강의 금속간화합물에서 4원계 괴상의 금속간화합물의 형성 반응이 종료됨을 관찰 할 수 있었으며 따라서, 본 실험에서 4원계 괴상 금속간 화합물을 형성하기 위한 용탕의 유지시간은 10분일 때가 가장 적절하다고 판단하였다.

Fig. 5는 중력 침강된 괴상 화합물에 대한 X선 특성 분석 결과로 EPMA (Electron Probe Micro Analyzer, EPMA-1400, SHIMADZU, Japan)로 선분석을 한 결과 침강한 괴상화합물은 Al-(Fe,Mn)-Si의 4원계 금속

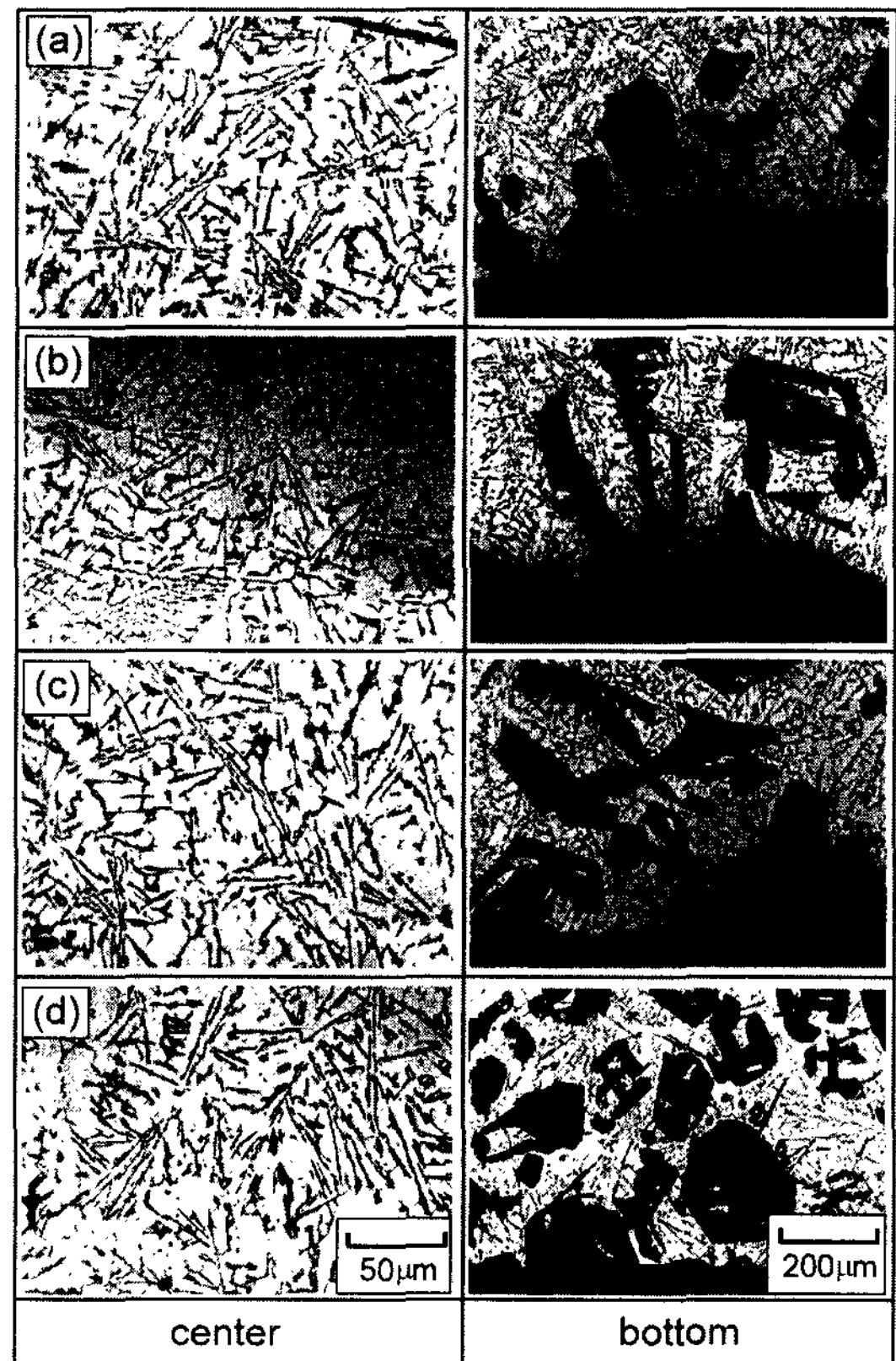


Fig. 4. Variation of microstructures with holding time at 690°C holding temperature. (a) 1 min (b) 5 min (c) 10 min (d) 20 min.

간화합물임을 확인할 수 있었다.

이후 전자기력을 인가하는 실험에서는 알루미늄과 금속간화합물의 전기전도도차[12-14]를 이용하여 Al 용탕에 먼저 Mn을 첨가한 후 충분히 유지시켜 괴상 화합물을 정출시키고 전자기력을 인가하였다. 전자기력 인가는, 중력의 반대방향을 향하도록 전자기력을 인가하고, 자장의 세기는 0.2 Tesla로 하고 전류를 10, 20, 30 및 40A로 각각 변화를 시키면서 실험을 행하였으며 이들 시편에 대한 현미경조직을 Fig. 6 및 Fig. 7에 각각 나타내었다. Fig. 6의 거시조직과 Fig. 7의 미세조직 사진에서 알 수 있듯이, 인가 전류의 세기가 10A와 20A에서는 20분 가량 중력편석 시킨 정도의 편석효과가 일어났으며, 30A 이상의 전류를 통전한 결과 괴상의 금속간화합물이 극심한 편석을 일으키고 있음을 알 수 있었다. 반면 편석부를 제외한 부분의 시편은 매우 건전한 미세조직을 관찰할 수 있었다.

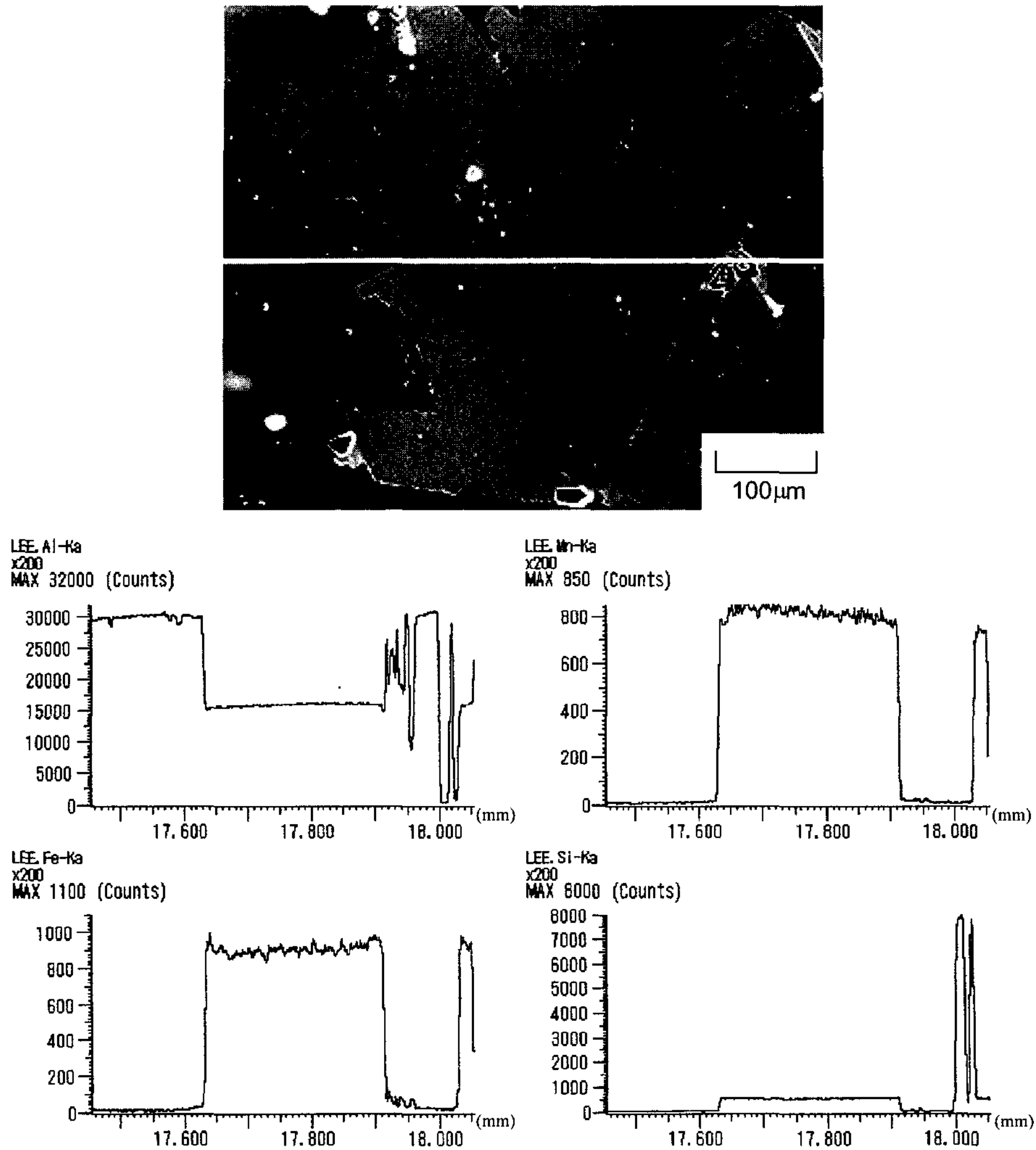


Fig. 5. EPMA line analysis for the Al-Si-Mn-Fe system intermetallic compounds.

이는 Al 용탕과 금속간화합물간의 전기전도도 차이로 인하여 Al 용탕이 전자기력의 방향을 따라 이동함에 따른 반작용으로 금속간화합물이 미세입자까지 완전히 전자기력의 반대방향으로 이동한 것으로 판단된다.

금속간화합물을 중력과 전자기력을 이용해 편석시키고 난 후 편석 부위를 제거하고 난 후 시편의 화학조성을 spark emission으로 분석결과 Fe 함량이 초기 2%에서 0.5%로 나타나 약 75% 정도의 Fe 제거 효과가 있음을 알 수 있었으며, Si가 11%로 나타나고 Cu 2%, 그리고 Mg, Zn, Mn 등의 원소는 0.03% 이하로 나타나는 등 그 원소함량이 상용 다이캐스팅용 합금인 ADC12합금과 그 조성이 매우 유사하였다.

3.2. 전자기력을 이용한 초정 Si의 미세화

알루미늄 스크랩으로 부터 전자기력을 이용하여 Fe를 편석 제거한 시편에서, Fe의 편석부위를 제거하고 난 나머지 건전한 부위의 조성이 상용 알루미늄 합금인 ADC12와 화학적 조성이 거의 유사하여, 내마모용 과공정 Al-Si 합금의 제조를 위하여 ADC12 합금을 용해 한 후 metal silicon을 추가로 용해하여 Al-18%Si 합금을 제조하였다.

Al에 Si이 12.6%이상 첨가된 과공정 Al-Si 합금은 경질의 Si로 인하여 우수한 내마모성을 가져 고기능성 경량소재로 상당히 주목받고 있는 합금이다. 그러나 응고과정 중 조대하게 정출하는 초정 Si로 인해 기계가

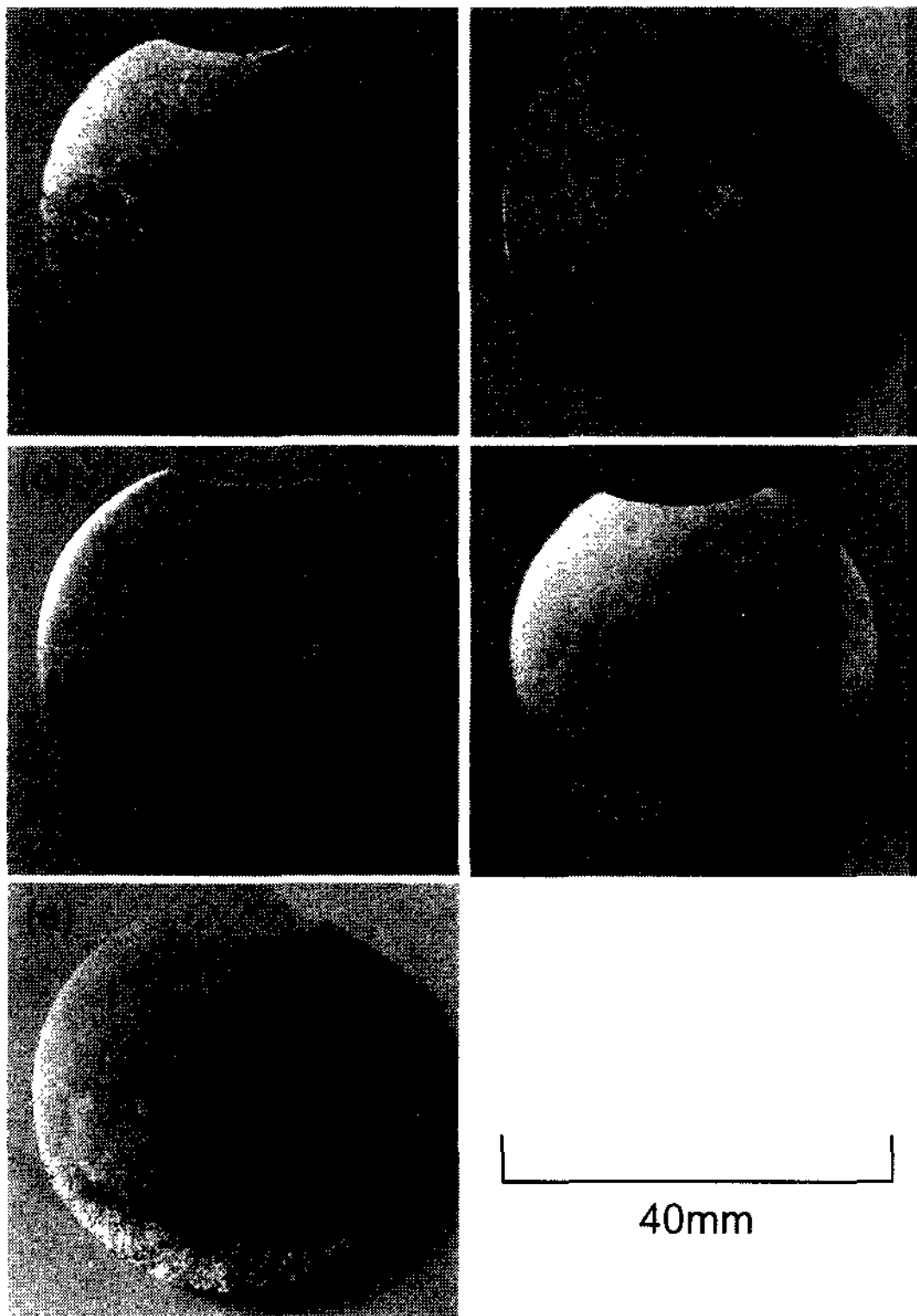


Fig. 6. Variation of the macrostructure of specimens with EMF current. (a) 0A (b) 10A (c) 20A (d) 30A (e) 40A (electromagnetic force : 0.2T, holding time : 20 min at 690°C)

공성이 나빠지게 되는 단점을 가지므로 초정 Si의 입자크기와 형상을 제어해야할 필요가 있으며, 지금까지는 P를 주성분으로 하는 불순물을 첨가하는 방법이 주로 이용되어 왔으나, 판상 또는 다각형의 초정 Si의 크기는 제어 할 수 있지만 그 형상은 제어하기 힘든 한계를 지니고 있었다. 따라서 본 연구에서는 용탕의 응고과정 중에 전자기력을 이용한 강한 교반력을 용탕에 부여하여 초정 Si입자의 크기를 미세화 시키는 한편 입자의 형상을 구형화 시키고자 하는 실험을 진행하였으며, 그 각각에 대한 기계적 특성을 평가하였다.

먼저 교반력에 따른 영향을 알아보기 위하여 중심부 최대 자장의 세기를 180G, 280G 및 380G의 세 단계로 변화를 주었으며, 공정온도(580°C)에서 10분간 교반한 후 수냉하였다.

교반력에 따른 미세조직의 변화는 Fig. 8에 나타난 것처럼 180G의 교반력에서는 초정 Si의 입자가 비교적 균일한 분포를 보이고 있지만, 그 이상의 교반력에

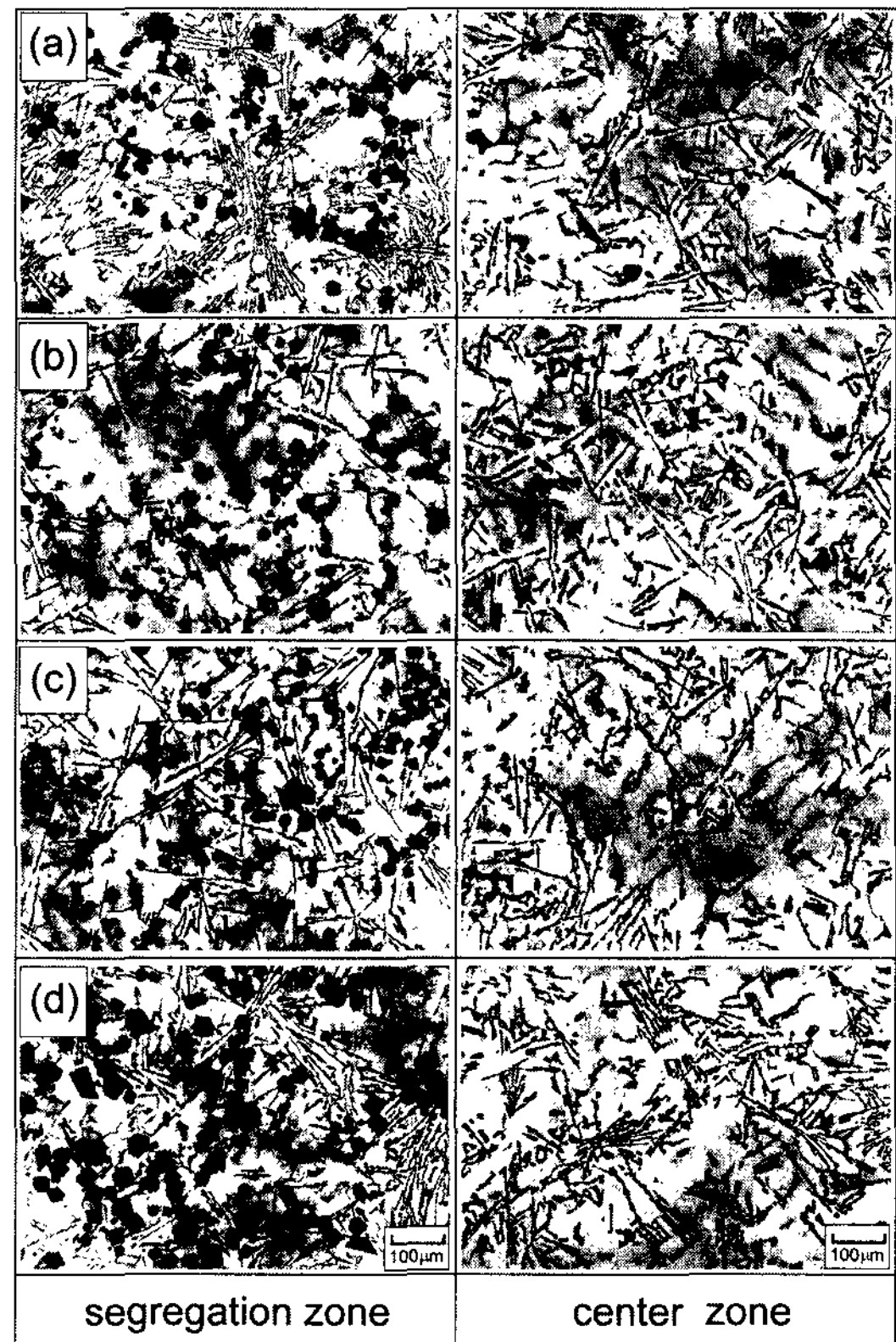


Fig. 7. Variation of microstructure of specimens with EMF current. (a) 10A (b) 20A (c) 30A (d) 40A (electromagnetic force : 0.2T, holding time : 20 min at 690°C)

서는 비중이 낮은 Si 입자가 ingot 상부와 가장자리에 편석되고, 정출된 초정 Si이 원심력에 따른 입자들간의 응집력 때문에 조대하게 성장해 있음을 볼 수 있었다.

따라서 본 연구에서는 합금 용탕을 공정온도까지 공냉한 후 180G의 자장세기로 1, 3, 5, 10 및 30분간 교반하여 교반시간의 증가에 따른 초정 Si의 형상변화를 관찰하였으며, 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

Fig. 9의 조직사진에서 알 수 있듯이 교반시간이 5분이상이 되면 초정 Si 입자는 50µm 이하로 미세화됨과 동시에 구형화됨을 알 수 있으며, 10분간 교반을 실시하면 가장 미세하고 구형화된 초정 Si 입자를 얻을 수 있었다.

그 이상 교반을 진행하여도 더 이상의 미세화나 구형화는 나타나지 않았으며, 이같은 현상은 교반에 따라 초정 Si 입자들간의 충돌 빈도 증가로 인해 파괴가 진행되어 초정 Si 입자 미세화가 이루어졌으며, 미세화

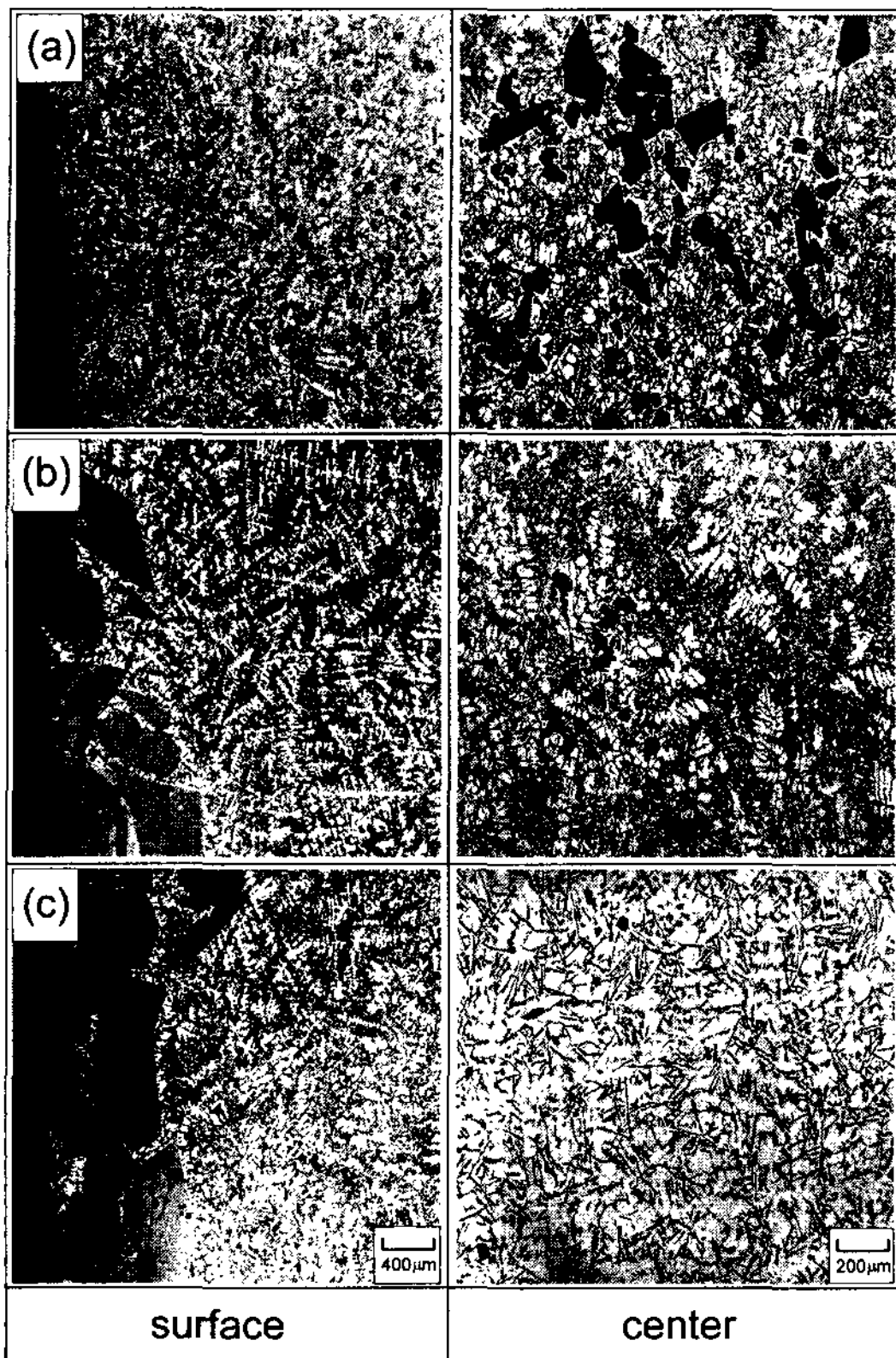


Fig. 8. Microstructural changes of primary silicon particles with stirring force. (a) 180G (b) 280G (c) 380G

된 입자들 상호간의 마멸작용으로 그 계면이 구형화된 것으로 판단된다.

4. 결 론

전자기력을 이용하여 Al-scrap내의 Fe함량을 편석시켜 제거하고 과공정 Al-Si 합금을 제조하기 위한 연구를 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Al-scrap 용탕에 Mn을 첨가한 후 690°C에서 10분간 유지하였을 때 괴상의 금속간화합물 형성이 거의 완료되었다.

2. Mn이 첨가된 용탕에 전자기력을 인가할 경우, 인가전류량이 30A 이상일 때 우수한 편석을 나타내었으며, 편석부를 제외한 부분은 건전한 미세조직을 나타내었다.

3. 초정 Si입자 미세화를 위해 Al 용탕에 전자장 교반을 실시한 결과 전자장의 세기가 180G일 때 초정Si

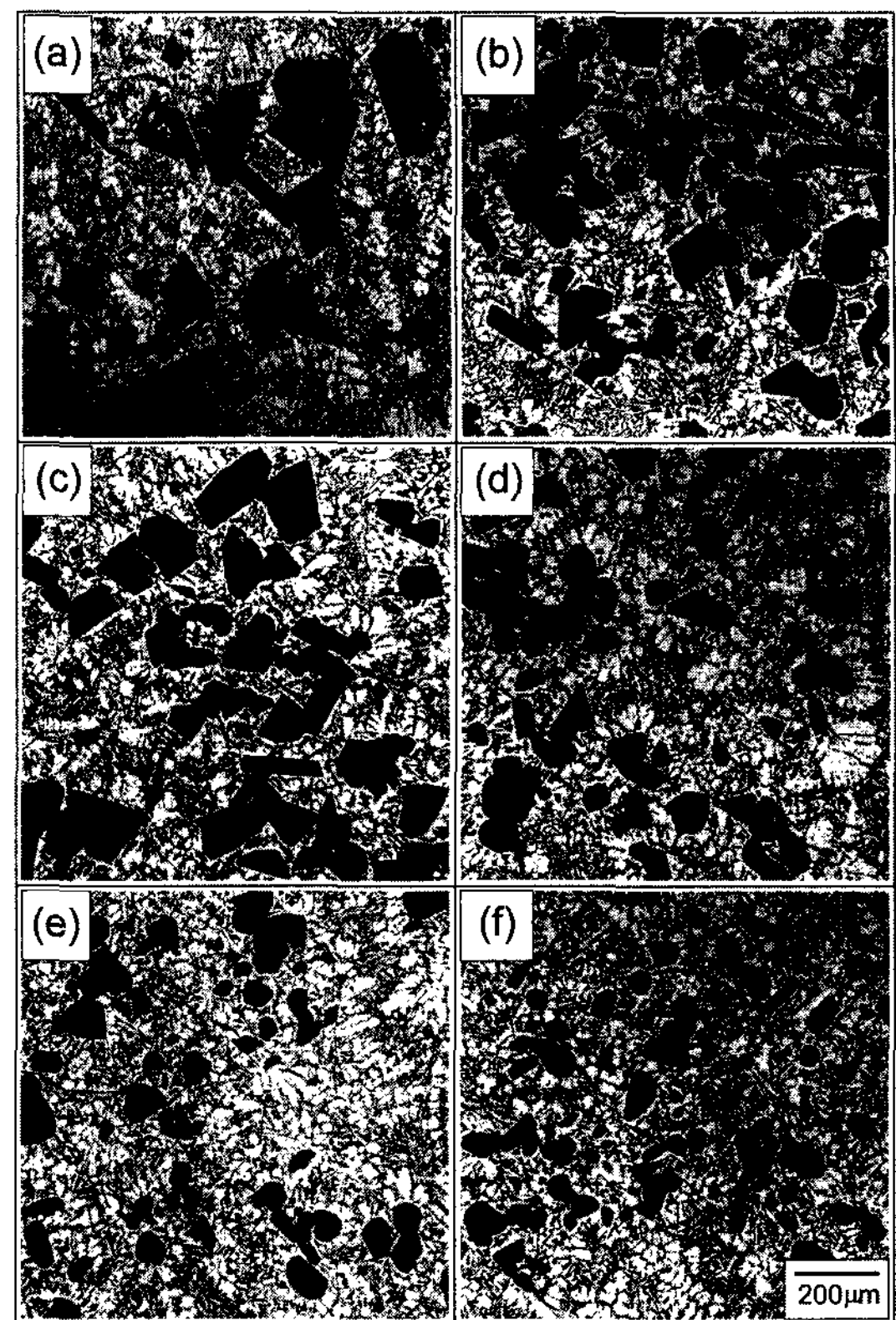


Fig. 9. Variation of microstructure with stirring time. (a) gravity casting (b) 1 min (c) 3 min (d) 5 min (e) 10 min (f) 30 min (electromagnetic force : 180G, stirring temperature : 580°C)

입자가 고르게 분포되었으나, 280G와 380G의 경우 편석이 심하였다.

4. Al합금 용탕에 180G의 자장세기로 10분간 교반하였을 경우 가장 미세하고 구상화된 초정Si를 관찰할 수 있었으며, 그 이후 큰 변화가 없었다.

후 기

본 연구는 "과학기술부-한국과학재단 지정 울산대학교 기계부품 및 소재 특성평가 연구 센터"의 지원에 의한 것이며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] J. H. Kim, H. S. Park, K. M. Kim and E. P. Yoon : J. of the Korean Foundrymen's Society, 18(1998) 139

- [2] The microstructure and property of aluminium: Japan Institute of Light Metals, 242
- [3] TSUKUDA Makoto, HARADA Masayuki, SUZUK Tashio, KOIKE Susumu : J. of Japan Institute of Light Metals, Vol. 28 (1978) 109
- [4] Eiji Kato, Yoshie Shinada, Satoru Nurakawa : J. of the Japan Foundrymen's Society, Vol. 64 (1992) 531
- [5] J. of the Japan Foundrymen's Society, Vol. 60 (1989) 590
- [6] L. Anantha Narayanan, F. H. Samuel and J. E. Gruzleski : Metall. Trans. A, Vol. 25A (1994) 1761
- [7] J. Iglessis, C. Frantz, and M. Gantois : Mem. Sci. Rev. Metall., (1977) 237
- [8] A. Floeres, J. Escobedo, J. M. ndez and M. M. ndez : Light Metals (1992) 845
- [9] Harumi KOSUGE : J. of Japan Institute of Light Metals, Vol. 30 (1980) 217
- [10] J. H. Kim, H. S. Park, K. M. Kim and E. P. Yoon : J. of the Korean Foundrymen's Society, 18 (1998) 139-145
- [11] S. Das, A. H. Yegneswaran, P. K. Rohatgi : J. Met. Sci., 22 (1987) 3173
- [12] Ch. Vives and R. Ricou : The 3rd Int. Seminar on Magneto-hydrodynamic Flows and Turbulence, (1987) 387
- [13] Anatoliy Fedorovich Kolesnichenko : ISIJ International, 30 (1990) 8
- [14] Daniel Leenov and Alexander Kolin : J. of Chemical Physics, 22 (1954) 683