

■■■■■■■■■■  
**論 文**  
 ■■■■■■■■■■

## 아공정 Al-Si 합금에 있어서 공정 Si 크기에 미치는 전자기진동의 영향

최정평<sup>†</sup> · 윤의박 · 남태운<sup>\*</sup>

### The Effect of Electromagnetic Vibration on Eutectic Si Size in Hypoeutectic Al-Si alloys

Jung-Pyung Choi<sup>†</sup>, Eui-Pak Yoon and Tae-Woon Nam<sup>\*</sup>

#### Abstract

In this study, the electromagnetic vibration is adopted for modifying eutectic Si phase and reducing its size. The higher the current density and frequency of electromagnetic vibration(EMV), the finer the size of eutectic Si phase. The tensile strength and elongation of EMVed alloy were highly improved. Measured twin probability of EMVed alloy at a frequency of 1000 Hz was approximately six times as high as that of the normal alloy. The mechanism for the increase in twin density due to EMV during solidification could be supposed from the fact that the preferential growth along <112> in silicon was suppressed by preventing Si atom from attaching to the growing interface of Si phase and by changing the solid/liquid interfacial energy of silicon. According to the result of UTS test, because of modification of eutectic Si, UTS and elongation are highly increased.

**Key words :** Hypoeutectic, Al-Si alloy, Electromagnetic vibration, Eutectic Si

(Received November 10, 2003 ; Accepted April 5, 2004)

#### 1. 서 론

Si의 크기와 모양을 조절하는 것은 합금의 특성을 결정하는 중요한 요인으로 작용한다. 일반적으로 공정 Si는 판상으로 되어있으며, Si의 높은 경도와 취성으로 인하여 내부 에너지의 집중을 일으킨다. 따라서, 이곳에서 파괴가 시작하는 크랙이 생기고, 낮은 인성을 일으킨다[1-5]. 용탕의 진동은 응고된 조직을 미세화 시키거나, 내부 가스를 줄이거나, 응고 수축공이나, 용질의 편석에 영향을 주는 것으로 알려지고 있다[6]. 최근, 비접촉방식인 전자기장을 용융금속에 이용하는 연구가 관심을 끌고 있다. 여러 가지 진동을 주는 연구 중에 전자기 진동연구가 가지는 장점을 보면, 몰드를 직접 흔들어주는 기계적인 진동 방법이나, 용탕에 진동자를 넣어 초음파진동을 시키는 방법에 비해 용융금속 전체에 진동을 골고루 줄 수 있으며, 그때의 세기와 주파수를

쉽게 변경 가능하다는 것이다. 본 연구에서는 직류 자장에 교류전류를 직접 인가해주는 직접인가 방식을 채택하여 실험을 수행하였다. 입력 전류와 입력 주파수를 변경해 주면서 공정에서의 Si모양과 크기의 변화를 살펴보고, 처리 공정의 최적 조건들을 알아보았다. 또한, 기계적인 성질 변화를 알아보고, 전자기 진동 영향에 대해 고찰을 하였다. 본 실험은, 연속적으로 계속 냉각해 주고 있는 분위기에서 행한 것으로, 일반 주조 공정 시와 같이 용탕을 몰드에 부어주고, 전자기 진동을 응고가 끝날 때까지 적용해주는 것과 같이 실험을 하였다.

#### 2. 실험 방법

본 연구에 사용한 아공정 Al-Si합금은 상업용으로 시판되는 A356합금으로 그 조성은 Table 1과 같다. 전

한양대학교 금속재료공학과(Dept. of Metallurgical Engineering Hanyang University, Seoul 133-861, Korea)

\*한양대학교 금속재료공학과(Dept. of Metallurgical Engineering Hanyang University, Ansan 426-822, Korea)

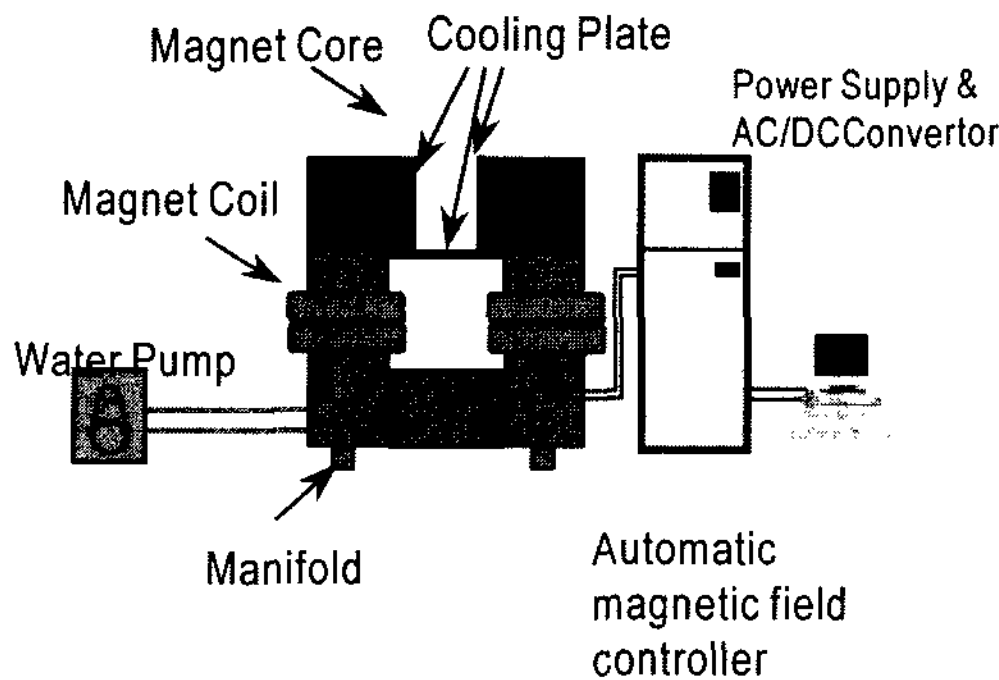
<sup>†</sup>E-mail : casaphd@ihanyang.ac.kr

Table 1. Chemical composition of A356 alloy (wt%)

Alloying elements	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
Composition (wt%)	7.0	0.08	0.04	0.00<	0.35	0.01	0.15	Bal.



(a) photograph



(b) schematic draw

Fig. 1. Photograph and schematic draw of a magnetic field control system.

자기 실험에 사용된 장비는 직류전류 자장 발생장치와 교류전류 발생장치이다. 이 장치는 Fig. 1에 표시하였다. 이때 사용된 자속밀도는 0.5T이다. Fig. 2(b)에 시편제조 몰드를 나타내었다. 이 몰드를 Fig. 2(a)에 보여지는 것과 같이, 자석 사이에 장치를 하여 973 K가 될 때까지 가열하고 용융금속을 채워 넣는다. 그리고 923 K가 되면 전자기장을 걸어 주었다. 이때 전류 밀도를 변화시키고, 주파수를 변경시키며 각각 실험을 하였다. 용융금속내에 넣어진 K-Type 열전대를 통하여, 공정온도 이하 573 K가 될 때까지 연속적으로 냉각을

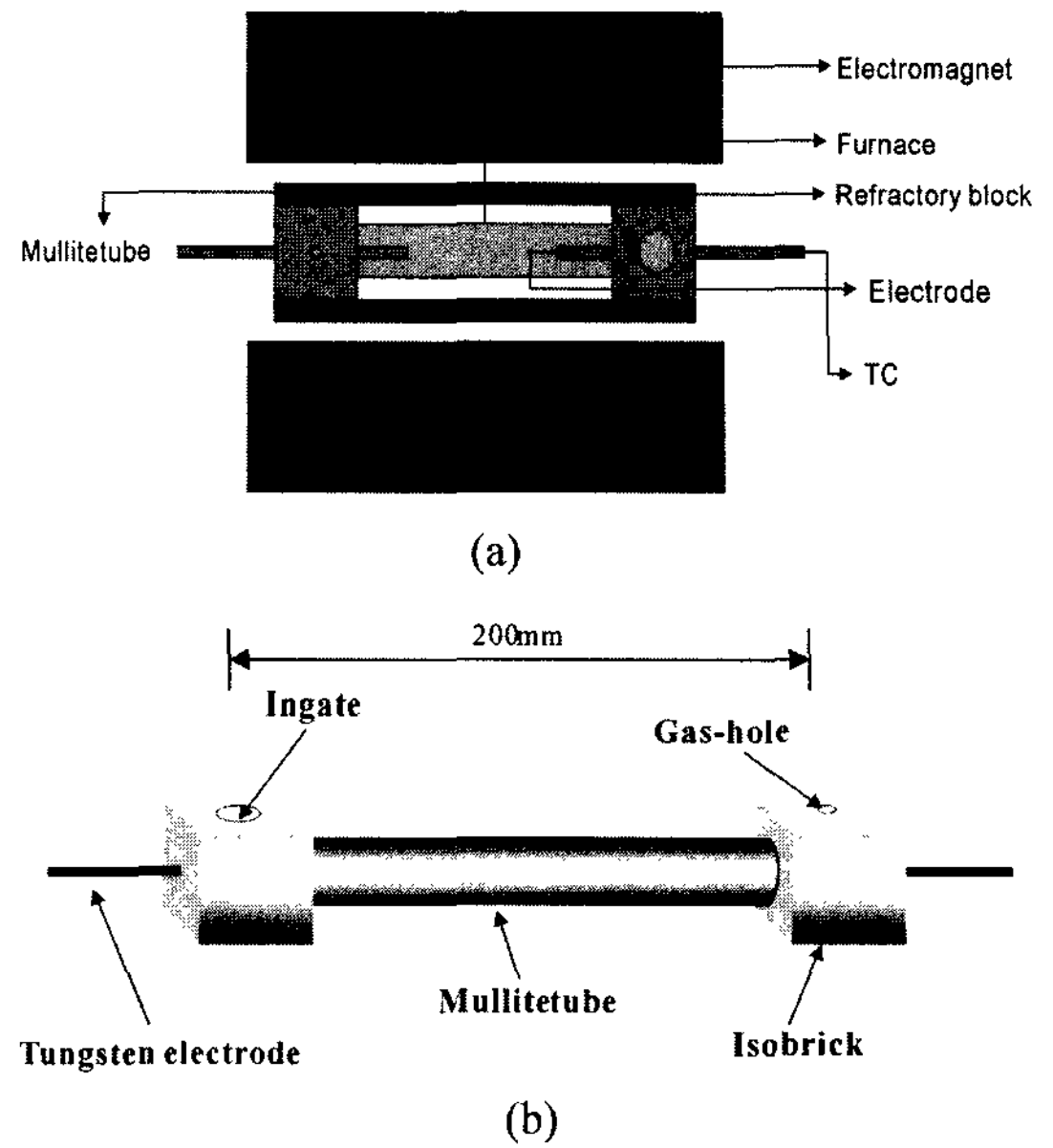


Fig. 2. The schematic sketch of the experimental device (a) inside of the yoke (b) mullite tube configuration

시켰다. 제조되어진 시편은, 가운데 부분을 잘라서 일반 현미경으로 조직을 관찰하였다. 이때 공정 Si의 조직을 자세히 관찰하기 위해 1 mol의 NaOH용액에 10분간 etching을 하고, SEM으로 공정 Si조직을 관찰하였다. 그리고 공정 Si 크기의 변화를 알아보기 위해서 이미지 분석기(IIP: Image Pro Plus)를 이용하여 공정 Si의 평균 크기 측정을 하였다. 기본적으로 공정 Si의 크기가 변화됨에 따라 기계적인 성질이 어떻게 변하는가를 알아보기 위해 인장실험을 실시하였다. 이때 사용된 시편은 ASTM E8M규격을 적용하여 제작하였다. 인장실험을 통해 인장강도와 연신율을 측정하고, 파단면을 SEM을 통하여 관찰하였다. 또한 공정 Si의 모양과 크기가 변하는 것에 대해 어떠한 변수의 영향이 있는가를 알아보기 위해 가장 유력하게 생각되어 지는 확산억제에 의한 Si 용질의 계면 부착 성장 방해를 검토해 보았다. 이를 위해 XRD를 이용하여 twin이 일어날 확률을 계산해 보았다[7,8].

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 전자기 진동을 이용한 공정 Si의 미세화

Fig. 3은 as cast의 사진으로, 전자기 진동 없이 주조되어진 시편이다. Fig. 3(a)는 500배 확대되어진 현

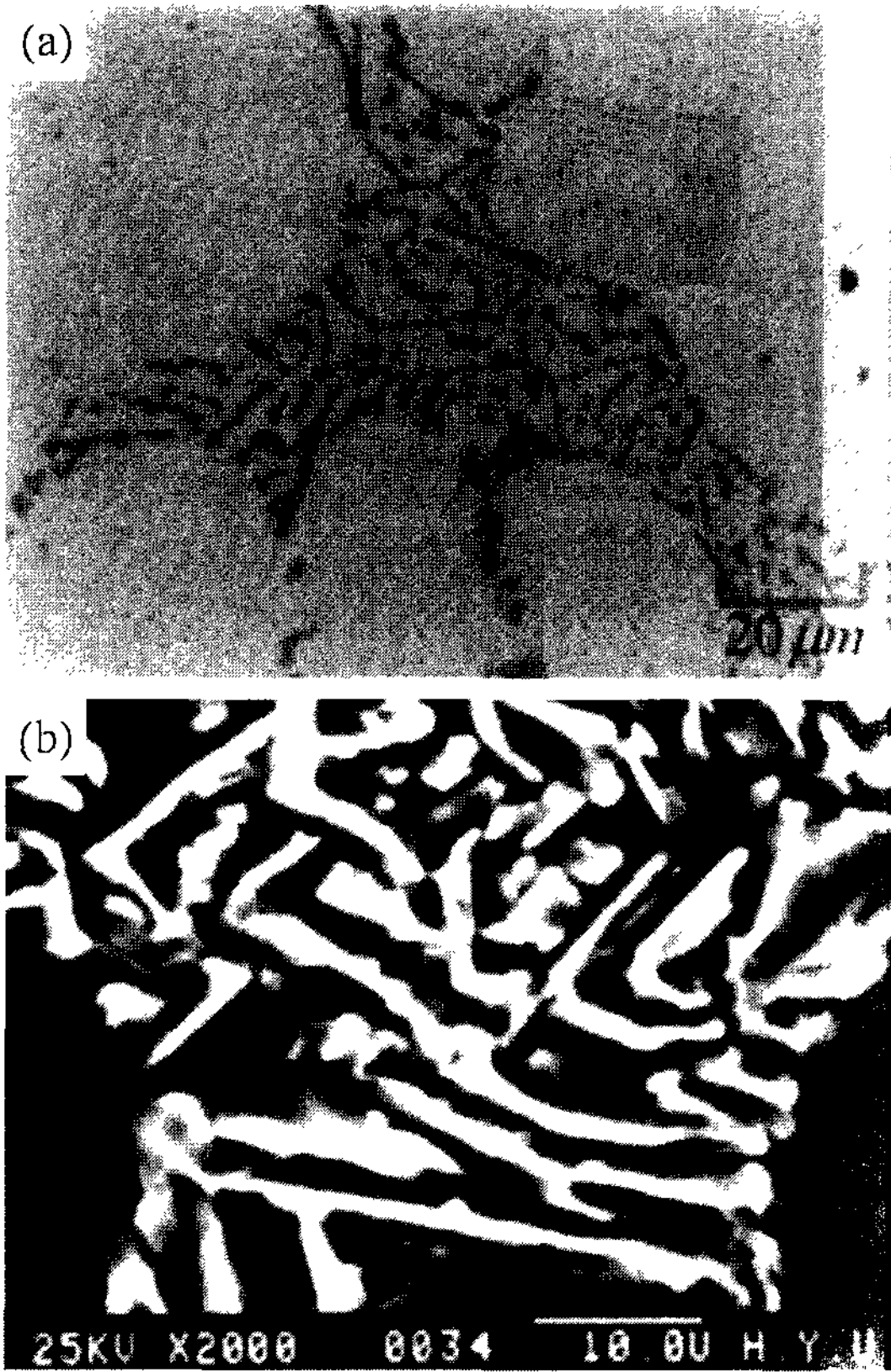


Fig. 3. Microstructure of A356 as-cast : (a) Optical Microscope(OM), (b) Scanning Electron Microscope (SEM)

미경사진(OM)이고, Fig. 3(b)는 2000배 확대되어진 SEM사진이다. as cast 상태에서의 공정 Si는 조대하고 평판 형상을 보임을 알 수 있다. Fig. 4, 5에  $1.05E6A/m^2$ 의 전류밀도에서 각각의 주파수 변화에 대한 공정조직 사진을 나타내었다. Fig. 4(a)와 (b)는 60 Hz의 주파수를 가질 때의 사진이다. 이것은 as cast 일 때와 크게 다른 것을 발견할 수 없었다. 이것은 낮은 Hz 구역에서는 공정 Si에 대하여 어떠한 영향도 주지 못함을 알 수 있었다. Fig. 4(c)와 (d)는 주파수가 200 Hz 일 때의 사진이다. 여기에는 공정 Si의 크기와 모양에 상당히 큰 변화가 있음을 알 수 있다. Fig. 4(e)와 (f)는 300 Hz에서의 사진인데 역시 크기와 모양에 변화가 있음을 알 수 있다. Fig. 5에는 500, 700, 1000 Hz에서의 공정 Si 사진을 보여주고 있다. 여기서 잘 알 수 있듯이 주파수가 증가하면 증가할수록 공정 Si의 크기가 작아지며, 형상도 조대한 판상 구조에서 작은 섬유상 조직으로 바뀌어 가고 있음을

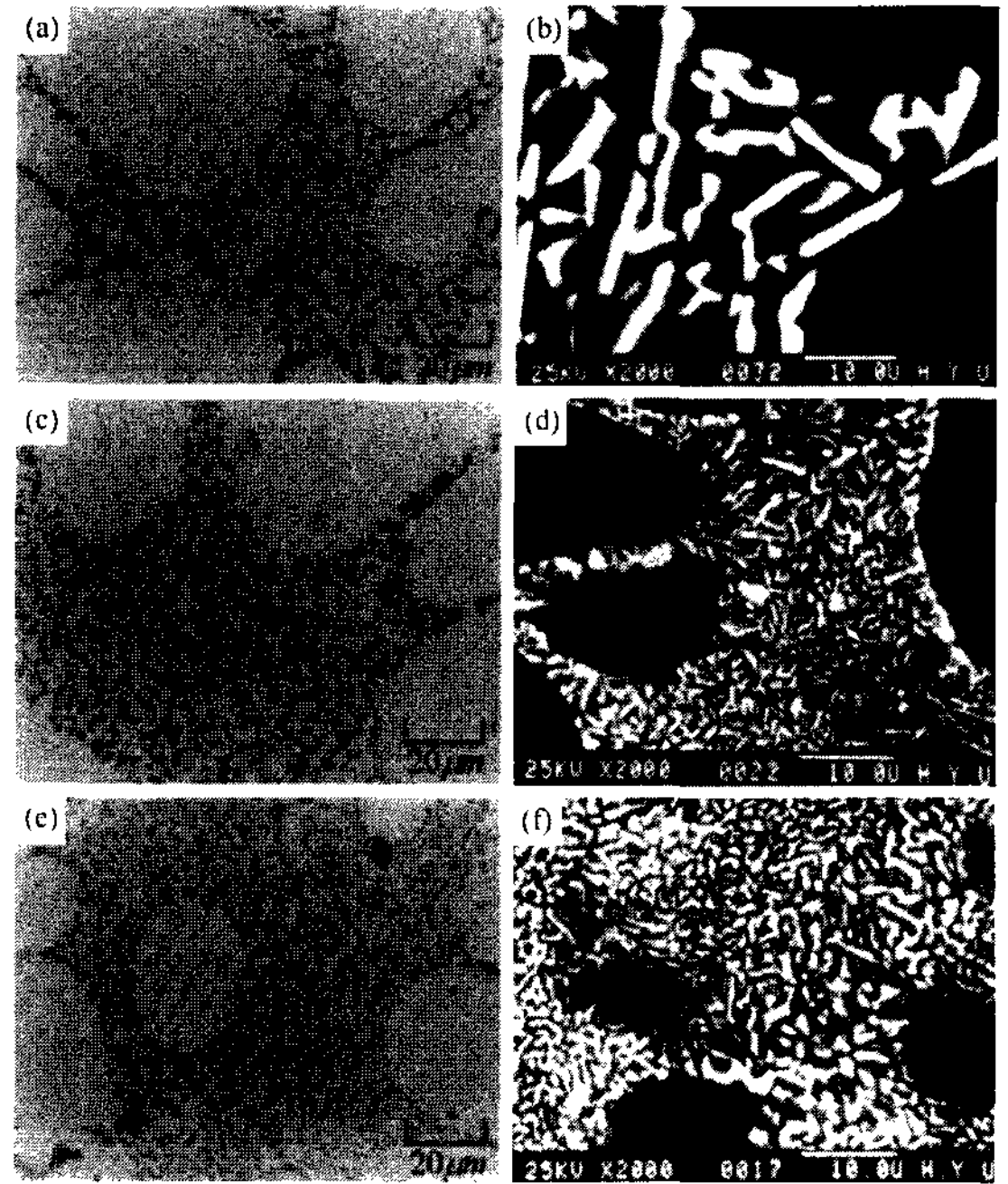


Fig. 4. Microstructures of A356 alloy varies with frequency at  $1.05E6A/m^2$ . (a) and (b) : OM and SEM with 60Hz, (c) and (d) : OM and SEM with 200Hz, (e) and (f) : OM and SEM with 300Hz

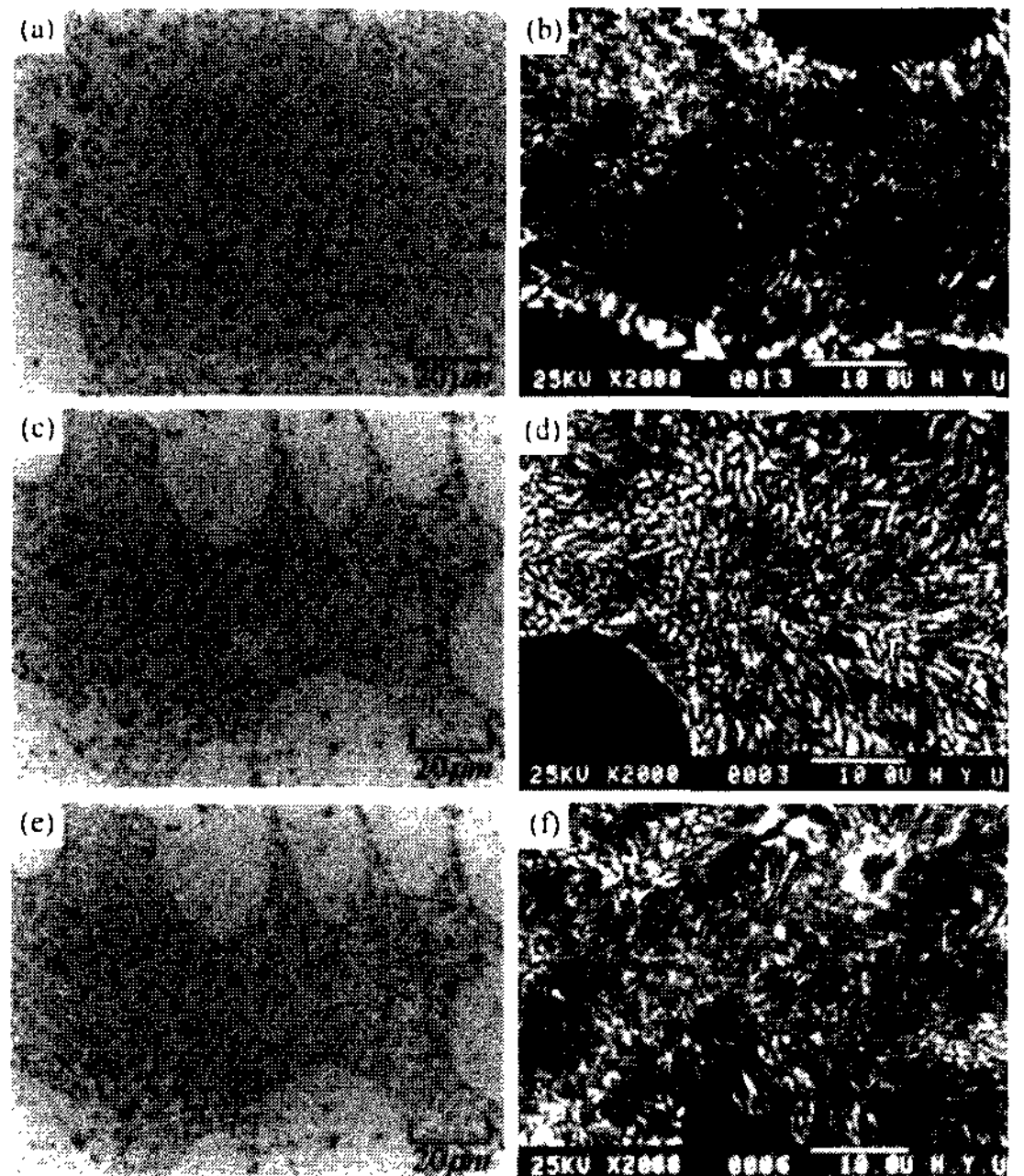


Fig. 5. Microstructures of A356 alloy varies with frequency at  $1.05E6A/m^2$ . (a) and (b) : OM and SEM with 500Hz, (c) and (d) : OM and SEM with 700Hz, (e) and (f) : OM and SEM with 1000Hz

알 수 있었다. 이는 높아지는 주파수에 따라 용질들의 진동거리 및 진동할 때의 속도가 줄어들어 용질들의 확산을 방해하는 효과를 가져온다고 사료되어진다. 보통 초음파 진동에서는 캐비테이션(cavitation) 효과를 주로 주장하고 있으나 이는 20 kHz 이상의 주파수와 높은 압력에서 가능하다고 보고되어지고 있다. 따라서 본 실험에서는 캐비테이션(cavitation)의 영향은 발견할 수 없었다.

정량적으로 크기변화를 보기 위해 이미지분석을 한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 공정 Si에서의 평균 크기는 주파수가 증가할수록 작아짐을 확연히 알 수 있다.

### 3.2 기계적인 특성 실험

Fig. 7는 주파수변화에 따른 인장특성 변화를 나타내고 있다. 최대인장 강도는 주파수 변화에 따라 126.5 MPa에서 186.9 MPa로 47%의 인장강도 증가가 일어났음을 보여주고 있다. 특히 연신율은 as cast에서 1%를 보이다가 1000 Hz에서 8.5%의 연신율을 보였다. 이는 750%의 연신율의 증가로 이는 공정 Si의 크기가 작아지면서 공정 Si와 알루미늄 사이의 파괴 형태가 취성에서 연성으로 넘어감을 간접적으로 알 수 있다. Fig. 8에 이것을 확인하기 위하여 주파수에 따른 파단면을 SEM으로 사진을 찍어놓았다. Fig. 8(a)는 60 Hz에서의 파단면을 보여주고 있다. 여기서 알 수 있듯이 조대한 판상 공정 Si상이 존재함으로써 취성 파괴가 주를 이루는 것을 알 수 있다. Fig. 8(b-f)는 각각 200, 300, 500, 700, 1000 Hz에서의 파단면 사진을 보여주고 있다. 앞에서 보았듯이 주파수가 증가

할수록 공정 Si의 크기가 작아지면서 판상에서 섬유상으로 넘어가고 있음을 알 수 있었다. 따라서 파단면 사진을 봐도 주파수가 높아질수록 취성 파괴에서 연성 파괴로 넘어가고 있음을 알 수 있다. 높은 주파수 영역의 파단면을 보면 연성 파괴가 주된 파괴 기구로 작용함을 알 수 있다.

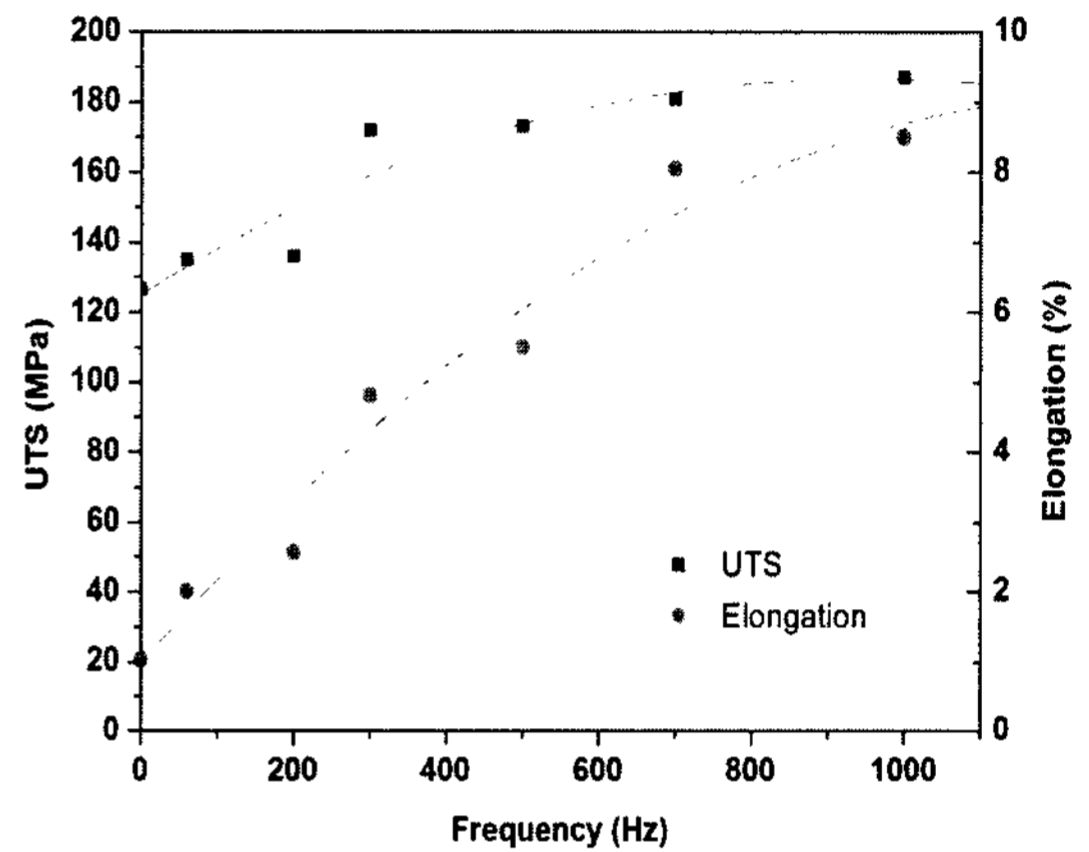


Fig. 7. Variation of the mechanical properties with frequency.

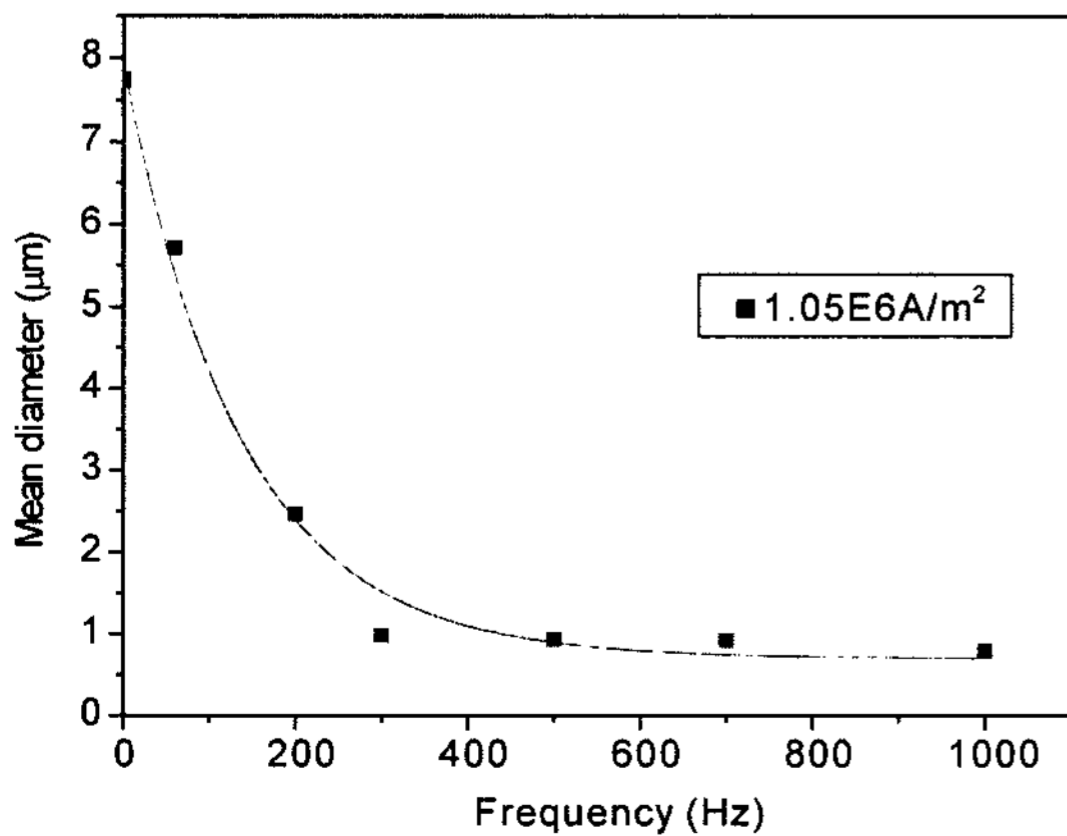


Fig. 6. Size of the eutectic Si with frequency and current density.

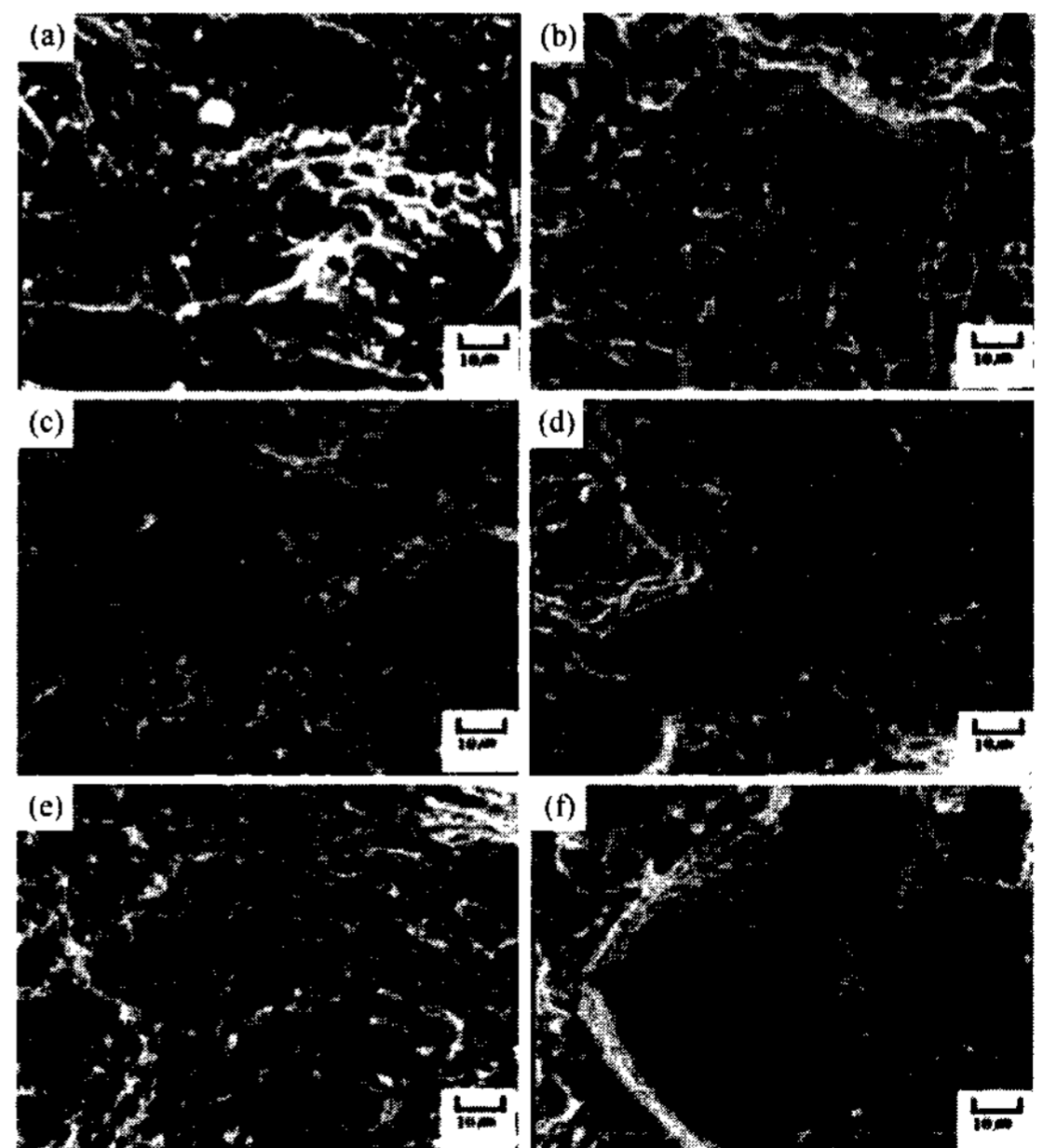


Fig. 8. Fracture surface with frequency at 1.05E6A/m<sup>2</sup>. (a): 60Hz, (b): 200Hz, (c): 300Hz, (d): 500Hz, (e): 700Hz, (f): 1000Hz

### 3.3 공정 Si에서의 twin 확률의 측정

전자기 진동에 의해 확산이 억제되어 성장 계면에서의 용질의 부착이 방해받는다면, IIT(Impurity Induced Twinning)와 같이 공정 Si의 성장이 이루어진다고 가정을 할 수 있다. 전자기 진동에서는 IIT모델과 달리 공정 Si의 성장을 방해할 원소는 존재하지 않지만, 방해하는 원소가 용질의 부착을 억제시킨다는 측면에서 비슷하여 이렇게 가정을 하였다. 우선 가정이 타당성이 있는가를 실험하기 위해서는 IIT모델에서 twin 확률이 증가함을 설명하고 있다. 따라서 본 전자기 진동에 의한 실험에서도 twin 확률을 측정하여, 과연 확산이 억제되어 성장계면에서의 용질의 부착이 방해받아 twin 확률이 높아지는지 확인을 하였다. 이때 twin 확률을 측정하기 위하여 XRD실험을 하였다. Fig. 9는 as cast, 500 Hz, 1000 Hz의 공정 Si에서의 XRD 스펙트라를 보여주고 있다. 일반적인 Si의 (220)반사는  $2\theta = 46^\circ$ 이고, (400)은  $2\theta = 69^\circ$ 이므로,  $2\theta = 45^\circ$ 에서  $72^\circ$ 까지 주사를 하였다. Fig. 10은 주파수에 따른 (220)-(311)과 (400)-(311)의 최대치 분리를 나타내고 있다. 주파수가 증가 될수록 약간의 감소된 (220)-(311) 분리 값을 볼 수 있다. 일반적으로 (220)-(311)분리가 (400)-(311)분리 보다 정확하다. 이유는 (400) 반사가 높은 각도에서 일어남으로 최대치를 찾아내기가 어려워지기 때문이다. Table 2에 (220), (311), (400)에서의  $2\theta$  값과 최대치 분리, twin 확률( $\alpha$ ),  $1/\alpha$ 와 평균 twin 거리( $\lambda$ )를 표시하고 있다. 전자기 진동에 의해 공정 Si가 미세화된 합금의 최대치 분리는 500Hz에서  $-0.06^\circ$ , 1000 Hz에서  $-0.1^\circ$ 로 나타났다. 이때 주파수가 올라갈수록 twin 확률이 증가함을 알 수 있다. 이로써 주파수가 증가할수록 IIT모델에 의한 twin 확률 증가와 같은 경향으로 twin 확률이 증가됨을 알 수 있다. Sr으로 개량화된 합금보다 평균 twin 간격이 낮은 것으로 봐서[9] 완전히 IIT모델과 같이 계면 성장을 방해하지는 못하는 것으로 생각되어지며, 다만 확산 억제에 따른 계면성장 방해는 타당한 것으로 사료된다.

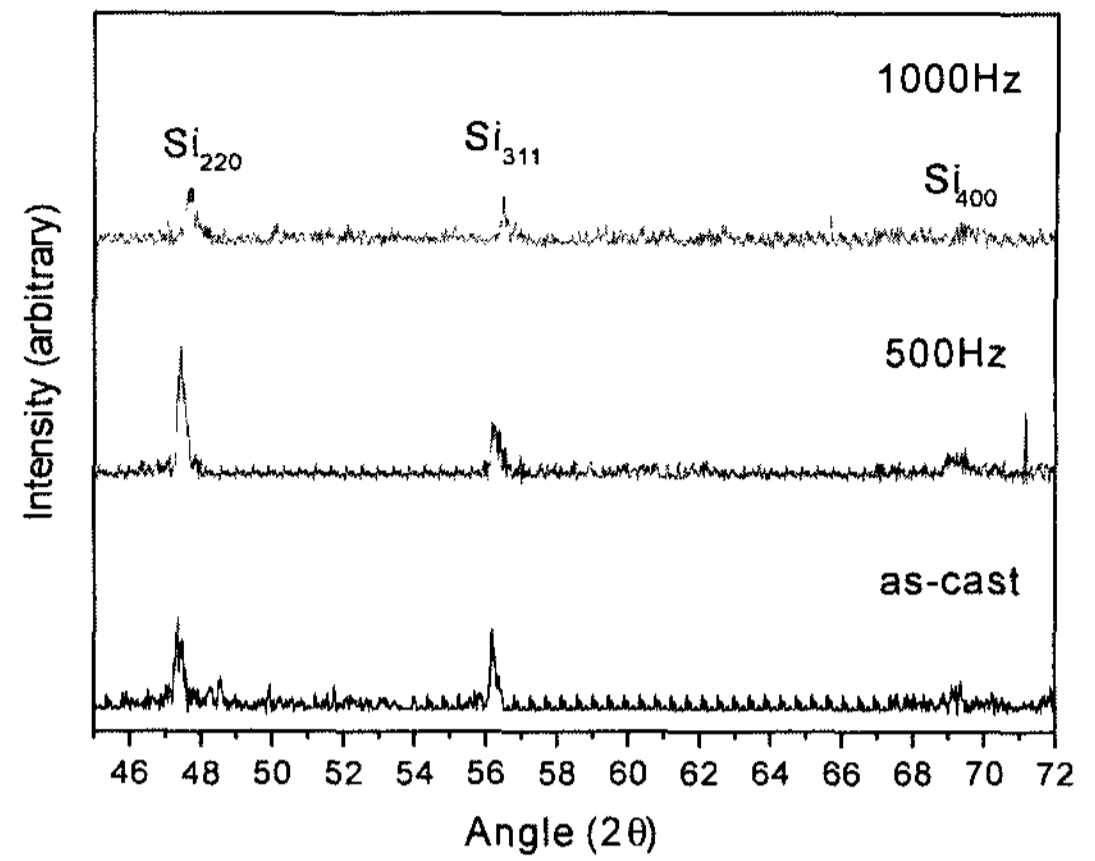


Fig. 9. X-ray diffraction spectra of the normal, 500 Hz and 1000 Hz alloys

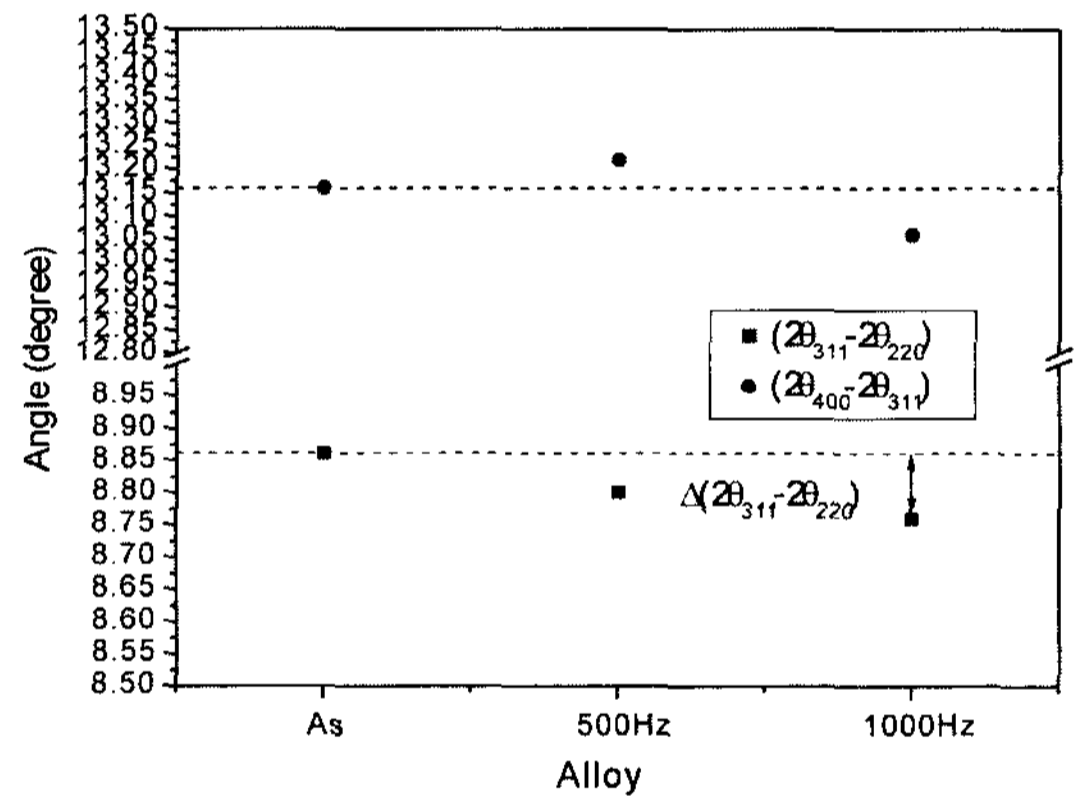


Fig. 10. Peak separations of (311)-(220) and (400)-(311) for normal, EMV modified and strontium modified alloys

## 4. 결 론

1. 전자기 진동 실험시, 고주파 영역에서 공정 Si의 크기가 작아지며, 모양이 조대한 판상 모양에서 미세한 섬유상 조직으로 변화 되었다.

Table 2. Measured diffraction angle ( $2\theta$ ), peak separation, twinning probability( $\alpha$ ) and average twin spacing of alloys

	$2\theta_{220}$	$2\theta_{311}$	$2\theta_{400}$	Peak separation ( $\Delta 2\theta_{311-200}$ )	$\alpha$	$1/\alpha$	Average twin spacing (nm)
Normal	47.34	56.2	69.36	0	0	0	0
500Hz	47.44	56.24	69.46	-0.06	0.0093	107.5	67.4
1000Hz	47.7	56.46	69.52	-0.1	0.015	66.7	41.8
Sr	-	-	-	-	-	-	30

2. 고주파 영역에서의 전자기 진동 처리가 된 합금의 인장강도와 연신율이 증가하였다. 1000 Hz에서 처리된 합금은 187 MPa의 인장강도 증가와 8.5%의 연신율을 보였다. 이는 계면에서의 취성파괴가 연성파괴로 변하면서 이루어지는 것을 알 수 있었다.

3. 전자기 진동의 주파수가 높아질수록 twinning 확률이 증가함을 XRD실험으로 확인할 수 있었으며, 이는 주파수가 높은 영역에서 용질의 확산을 억제시켜 계면성장을 방해한다는 가정을 입증한다고 사료된다.

### 참 고 문 헌

[1] F. R. Mollard, M. C. Flemings and E. F. Niyama : Journal of Metals., Nov. , (1987) 34-37.

[2] I. J. Polmear : Metals Handbook, ASM, Metals Park, OH, 2, (1979) 164.

[3] I. J. Polmear : Light Alloys, "Metallurgy of the light metals", Third edition, (1995).

[4] L. F. Mondolfo : "Aluminum Alloys Structure and Properties", Butterworth & Co. Ltd., (1976) 370.

[5] J. H. Kim, J. W. Choi, J. P. Choi, C. H. Lee, E. P. Yoon : Journal of materials science letters, " A study on the variation of solidification contraction of A356 aluminum alloy with Sr addition", 19, (2000) 1395-1398.

[6] R. S. Richards and Rostoker : The Thirty-Seventh Annual Convection of the Society, held in Philadelphia, October, (1955) 17-21.

[7] M. S. Paterson : Journal of Applied Physics, "X-Ray Diffraction by Face-Centered Cubic Crystals with Deformation Faults", 23, (1952) 805-811.

[8] B. E. Warren : Journal of Applied Physics, "X-Ray Measurement of Stacking Fault Widths in fcc Metals", 32, (1961) 2428-2431.

[9] S.-Z. Lu and A. Hellawell : Metallurgical Transactions A, "The Mechanism of Silicon Modiffication in Aluminum-Silicon Alloys : Impurity Induced Twinning", 18A, (1987) 1721-1733.