

논문

전자교반시 Al-7wt%Si합금의 초정입자에 미치는 유동의 영향

임성철, 윤의박

The Effect of Fluid Flow on the Primary Particle of Al-7wt%Si Alloy in Electromagnetic Stirring

Sung-Chul Lim and Eui-Pak Yoon

Abstract

In this study, to gain the semi-solid alloy we employed the electromagnetic rotation by a induction motor of 3-phases and 2-poles for Al-7wt%Si alloy and observed the size of primary solid particle, distribution state of primary solid particle, the degree of sphericity, and fraction of primary solid for the evaluation of its results. The size of primary solid particle increases from 98 μ m to 118 μ m as solid fraction increases from 0.2 to 0.5. The degree of sphericity increased as the solid fraction increased. Solid particles obtained from the microstructures of isothermally held sample were coarsened and the degree of sphericity was enhanced as isothermal holding time increased. However, when the sample was stirred for more than 40min, solid particles merged together and liquid phase was entrapped within the cluster of solid particles. The size of primary solid particle was not changed significantly with the variation of input voltages by 160V over which solid particles began to merge together to be a large cluster of about 170 μ m at 180V. The standard deviation and the degree of sphericity were not changed significantly with the variation of input voltage.

(Received October 7, 1996)

1. 서론

1970년대 초 미국 MIT의 Flemings 등에 의해 본격적으로 개발되기 시작한 반응고 가공 프로세서(Semi-solid state processing)[1,2]는 용탕을 교반하면서 냉각시켜, 생겨난 수지상을 미세한 입자로 용탕중에 분산시킴으로써 용탕과 고상입자가 혼합된 슬러리상태의 금속과 합금으로 주조하는 기술을 말한다. 이와 같은 반응고가공 프로세스는 에너지 소모를 적게 할 수 있고, 공정의 사이클 시간을 짧게 할 수 있으며, 다이의 수명을 길게 하고 산화물이나 공기에 의한 개재물의 발생을 줄이는 장점을 가지고 있다.[3] 또한 공

정 편석이 덜 생성되며 기계적 성질을 향상시킬 수 있고, 표면이 깨끗하며 내마모성이 좋은 재료를 만들 수 있다는 것이다.

반응고금속의 제조방법으로는 기계적인 교반법[4,5], 전자교반법[6,7,8,9], 기계진동법 혹은 초음파진동법[10], 위의 방법을 조합시킨 복합법 등등이 있어 기초, 응용의 측면에서 연구되고 있는데 용탕을 교반하면서 냉각하여 수지상조직을 미세하고 구형화된 고상입자로 만들어 이를 용탕중에 분산시킨다는 기본적인 고찰의 방향은 동일한 것이다.

기계적인 교반법은 지금까지 작은 실험장치에 의한 실험실 규모의 시작연구에 머물러 있었지만

한양대학교 금속공학과(Dept. of Metallurgical Eng., Hanyang University)

근년에는 실용규모의 시작장치를 개발하여 실용화하는 방향으로 새로운 전개가 시작되고 있다. 각종의 금속(합금)에 대해 냉각속도와 교반속도가 최종결정입도에 미치는 영향[11,12]과 고상율과 결보기 점도와의 관계 등에 관한 연구[13]들이 폭넓게 진행되어 왔다. 이와 같은 기계적 교반법은 높은 변형속도에 의한 미세하고 구형화된 조직을 얻을 수 있다는 장점에도 불구하고 낮은 생산성과 용탕 내에서의 교반자의 침식에 의해서 용탕이 오염된다는 단점을 갖고 있다.[3,6]

반면에, 전자교반법은 액상금속과 교반자간의 접촉이 없으며 반응고상태의 금속전체가 액상의 흐름을 갖게 되어 고액공존구역(Mushy zone)을 효율적으로 교반을 할 수 있다는 장점을 갖고 있다. 이와 같은 전자교반법은 철강의 연속주조의 분야로서 조직의 등축정화, 중심편석의 감소, 몰드 내의 불균일 응고점질의 성장의 방지, 몰드에서의 발열량의 향상, 최종응고영역에서의 v 편석 방지 등을 촉진하는 수단으로 크게 활용되고 있다.[7,8,14,15,16]

이와 같은 반응고금속의 제조에 있어서 교반된 초정입자의 크기를 평균 입경 $10\mu\text{m}$ 정도로 미세화를 할 수 있다면 최종제품의 기계적 특성을 크게 개선시킬 수 있으리라 예상되어지므로 현재 이 목표를 향하여 교반, 냉각기술에 관한 각종 요소기술의 개발노력이 진행되고 있다. 미세하게 분포된 미세조직은 낮은 온도에서 높은 강도를 나타내고 이방성이 줄어들고 피로성질이 향상된다. 응고중에 미세조직을 얻는 방법으로 압력의 응용, 핵생성속도를 높이기 위한 과냉, 불균일핵생성의 수를 증가하기 위한 미세화제의 첨가, 핵생성의 가능성을 증가시키기 위한 초음파진동 또는 과냉, 미세분말을 이용한 급냉등의 방법이 있다.

이와 같은 반응고가공프로세스에 관한 기초연구에서 비수지상 조직의 생성기구와 초정고상입자들의 크기나 모양을 제어하는 인자들에 대한 연구는 주로 용점이 낮은 Pb-Sn합금과 Al-Cu 2원계합금을 이용한 기계적 교반법에서의 연구가 대부분이었다. 그러나 전자교반법에서 특히 Al-Si합금계를 이용한 연구는 극히 미미한 실정이다.

그러므로, 본 연구에서는 현재 공업적 응용가

능성이 높은 Al-Si합금계 중 Al-7wt%Si합금을 3상 2극의 회전자계형 전자교반장치를 사용하여 전자교반시 초정입자에 미치는 교반방법, 교반속도(입력전압), 교반유지시간에 따른 용탕유동의 변화에 따른 초정입자의 변화를 관찰하였다.

2. 실험방법

전자기력에 의해서 전도재료를 구동시키는 힘은 회전자계가 전도재료 주위에 형성되면 로렌츠 힘(Lorentz force)에 의해서 얻을 수 있다. 이 힘은 플레밍원손법칙에 의하여 전류밀도(J)와 자속밀도(B)가 정하여지면 힘의 작용방향이 정하여지고 이 힘에 의해서 전도금속인 알루미늄합금용탕은 회전을 하게 되어 교반을 하게 된다.

Fig. 1은 본 실험에 사용된 실험장치의 개략도이다. 3상 2극의 유도전동기를 이용하여 수평형(horizontal type)의 교반을 행하였다. 전자교반장치의 고정자(stator) 크기는 내경, 외경 그리고 높이가 각각 400, 440, 400mm이었다. 본 실험에 사용된 교반장치내의 자속밀도의 측정을 위

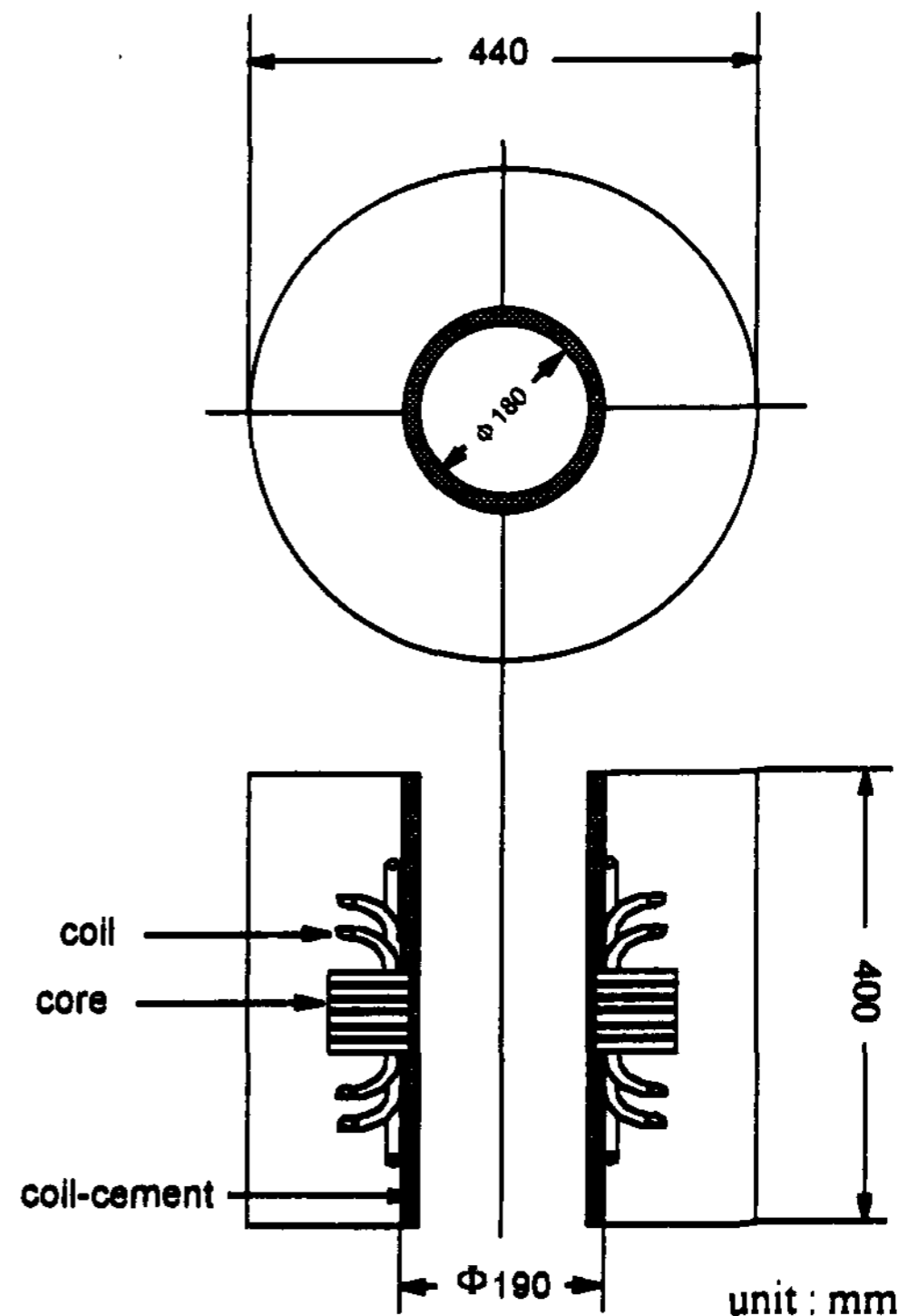


Fig. 1. Schematic diagram of E. M. S apparatus.

해서 가우스메타를 이용하였다.

Al-7wt%Si합금을 제조하기 위하여 고순도알루미늄(99.99%)과 Al-25wt%Si합금을 사용한다. Ar분위기하의 고주파유도로에서 용해한 후 주철금형에 주조하여 모합금을 제조한다. 제조된 Al-7wt%Si합금은 오실로그래픽 기록계(Oscillographic recorder)를 이용하여 도가니내의 용탕에 열전대를 꽂아 무교반, 교반, 각각의 냉각조건에서 열분석을 하였다. 온도측정을 위한 열전대는 전자교반실험을 위해 특별히 제작하였으며, 용융금속의 흐름에 방해가 되지 않도록 도가니 중앙, 밑에서 20mm 위치에 오도록 하여 실험을 행하였다.

Al-7wt%Si합금 250g을 전기로에서 용해한 후, 750℃로 과열처리하여 10분간 유지하고 730℃까지 로냉하며 이 온도에서 전기로로부터 꺼내어 전자장 교반장치에 넣고 교반한다. 교반 조건으로는 일정냉각속도로 전자교반을 고시킴으로써 고상율, 등온유지시간 그리고 교반장치의 입력전압을 변화시키며 실험을 행하였다. 실험에 사용한 고상율(fs)은 다음과 같이 샤일방정식(Scheil eq.)에 의해 예측하였다. 용융금속은 계속 교반을 하면서 냉각시키고 샤일방정식으로 얻은 각 고상분율에 해당하는 온도에 이르렀을 때, 수조에 급랭시켜 조직을 관찰한다.

미세조직의 변화를 알아보기 위하여 교반에 의해 제조된 시편을 하단부로부터 25mm되는 곳의 횡단면을 관찰한다. 이때 얻어진 시편의 미세조직에 미치는 교반조건의 영향을 알아보기 위하여 광학현미경으로 미세조직을 관찰하였고 화상분석기(Image analyzer)를 이용하여 고상율, 초정고상입자의 크기와 표준편차 그리고 구형화정도(Degree of sphericity)를 측정하였다. 이때 구형화정도는 초정고상입자의 장축과 단축의 비로 정의하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 고정자 안에 용탕이 없을 때의 입력전압에 따른 자속밀도와 관계를 나타내고 있다. 가우스메타를 이용하여 측정한 결과, 고정자의 중심에서 외부로 갈수록 자속밀도는 높은 값을 나타내었으며 입력전압이 220V일 때 중심부

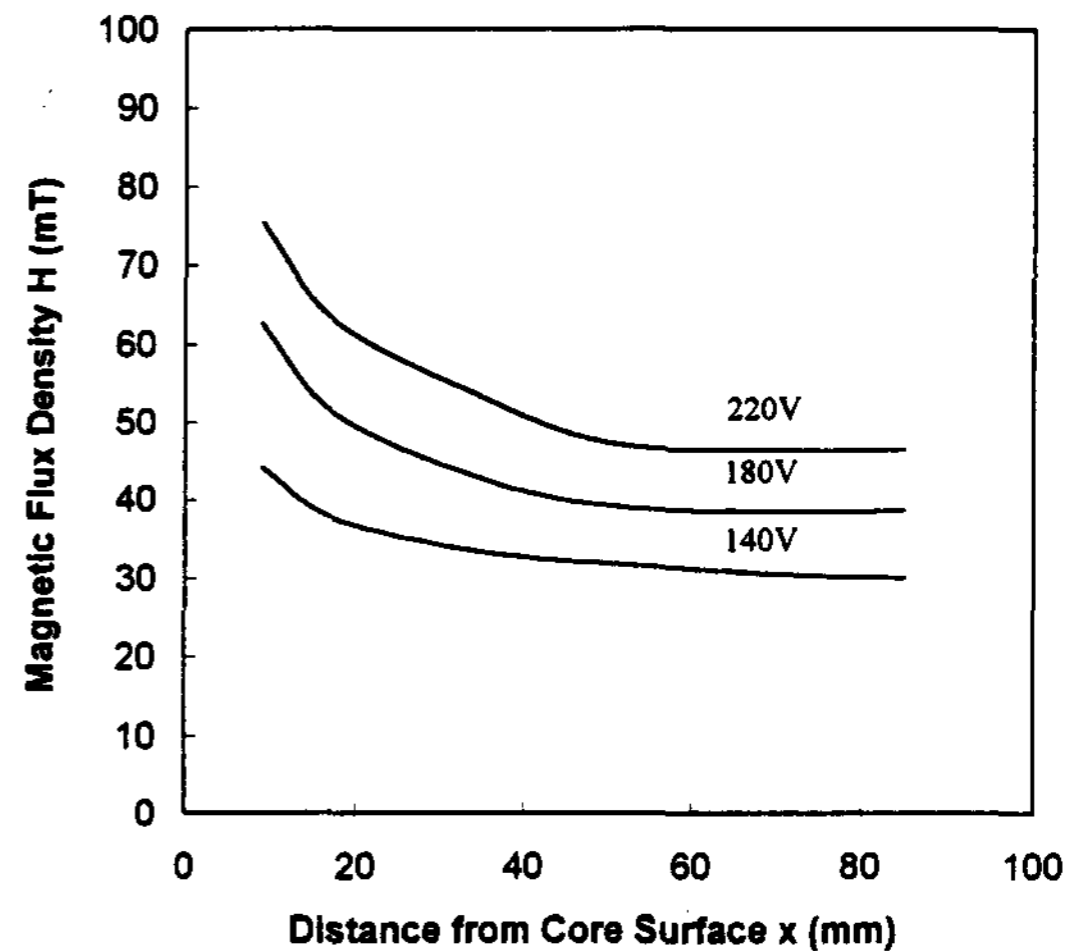


Fig. 2. Relationship of magnetic flux density as distance from the core surface at voltages of 140, 180 and 220V in the E. M. S apparatus without the melt.

의 자속밀도는 50mT이었다.

Fig. 3의 (a)는 용탕의 냉각속도를 0.04℃/s로 하여 고상율 0.4일 때까지 교반없이 냉각시킨 후 수조에 수냉시킨 Al-7wt%Si합금의 미세조직을 나타내고 있으며, Fig. 3의 (b)-(d)는 냉각속도를 0.04℃/s, 고상율이 0.4에서 입력전압을 160V로 하여 전자교반시키며 교반유지시간을 1, 5, 10분까지 변화시킨 후 수조에서 수냉시킨 미세조직을 나타낸다. Fig. 3(a)의 조직사진은 일반적인 주조에서 보여지는 전형적인 커다란 수지상조직(dendrite structure)을 나타낸다. 하지만 Fig. 3의 (b)에서 보여지는 것과 같이 1분 동안 교반유지시킬 경우 수지상은 파괴되어짐을 관찰할 수 있고 교반유지시간이 5, 10분으로 증가할수록 입자는 점점 구형화되고 더욱 작게 부스러지는 것을 알 수 있다. 하지만 (d)에서 보듯이 덜 깨어진 수지상이 아직도 남아 있어 교반효과에 한계가 있음을 알 수 있었다. 그래서 본 실험에서는 전자교반의 시작점을 일정한 고상율이 되었을 때 교반하는 것이 아니라 액상선직상의 온도에서부터 용탕에 교반을 가하며 고상율과 유지시간을 변화시키며 실험을 행하였다.

Fig. 4는 입력전압을 160V, 용탕의 냉각속도를 0.04℃/s로 하여 용탕을 일정한 고상율까지 전자교반시킨 후 수조에 급랭시킨 경우의 Al-

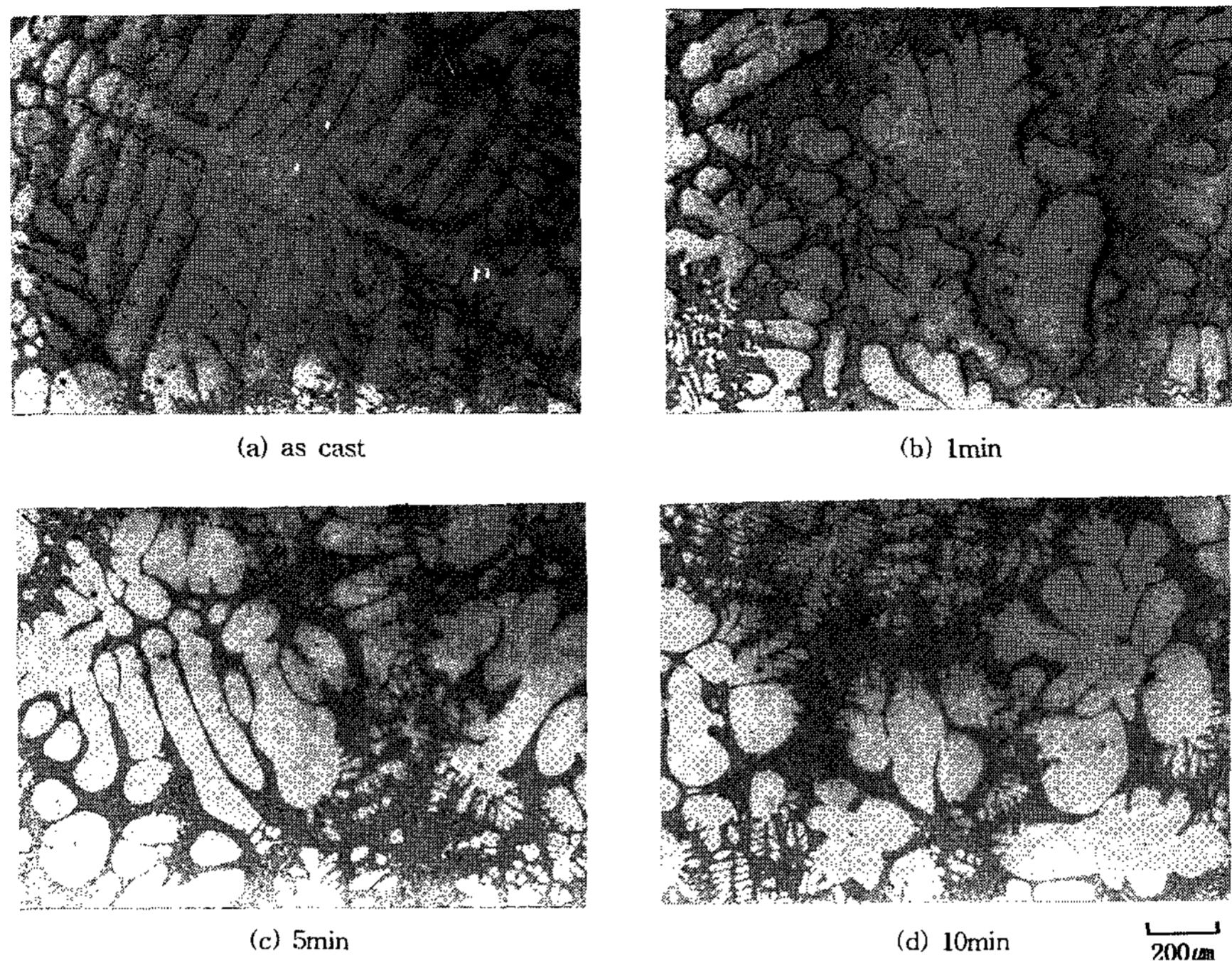


Fig. 3. Microstructures of the Al-7wt%Si alloy with the various holding time at the solid fraction, $f_s=0.4$. (cooling rate=0.04 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$; input voltage=160V)

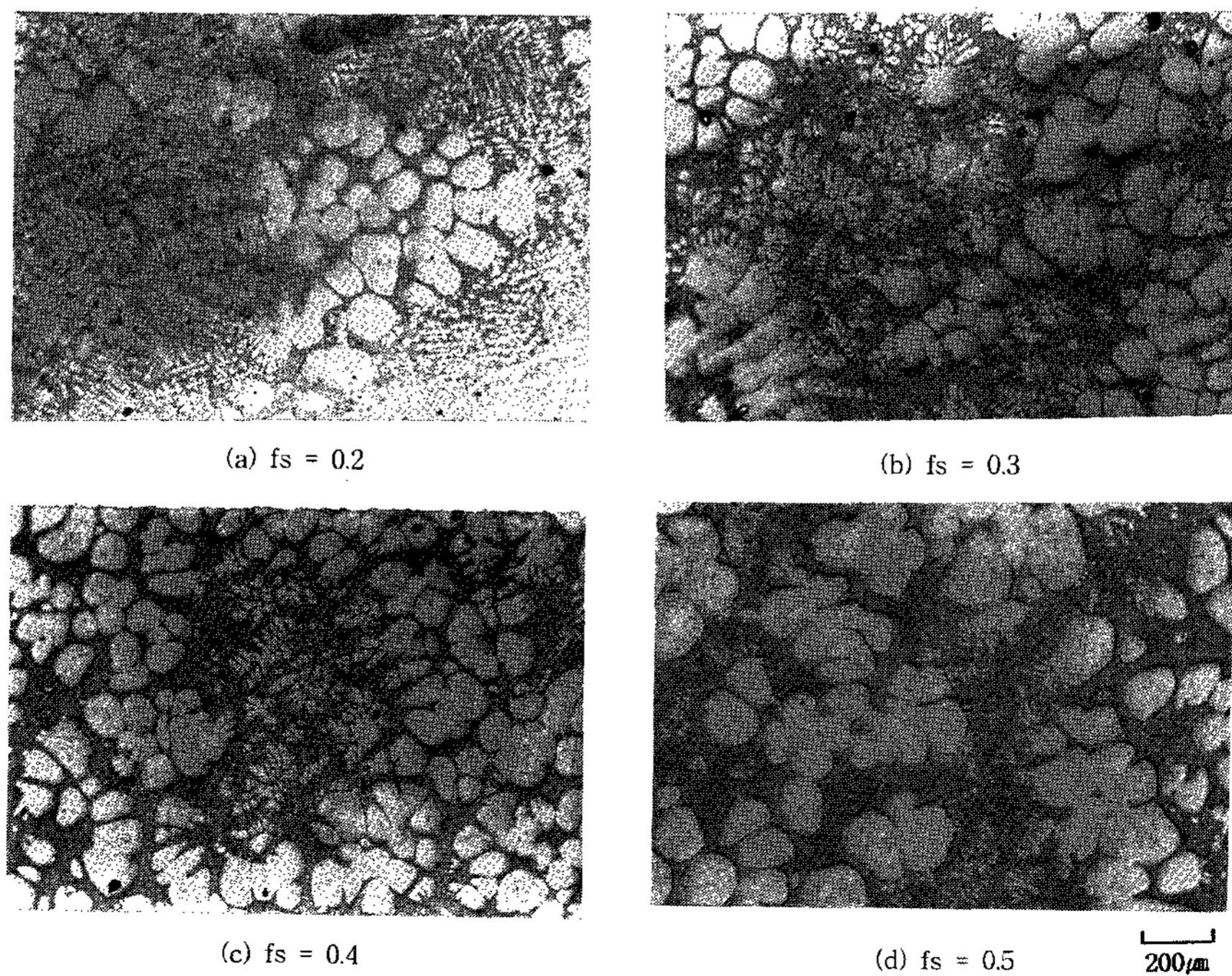


Fig. 4. Microstructures of the Al-7wt%Si alloy with the various the solid fraction. (cooling rate=0.04 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$; holding time=0min; input voltage=160V)

7wt%Si합금의 미세조직을 나타내는 조직사진이다. Fig. 3의 경우와는 다르게 전체적으로 교반력에 의해 수지상이 없어지고 미세하고 구형화된 초정고상입자들이 액상중에 균일하게 분산된 형태이며 교반후 급랭에 의해 액상중에서 미세한 수지상조직을 관찰할 수 있고 고상율이 증가함에 따라서 초정고상입자들의 크기는 증가하였으며 구형화정도는 좋아지는 것을 알 수 있다. 이것은 고상율이 증가할수록 초정고상입자의 성장시간이 증가하고 초정입자들간의 상호충돌확률 가능성이 높아짐에 기인한 고상입자들간의 응집이 일어나기 쉽기 때문이라고 생각된다.

Fig. 5는 화상분석기(image analyzer)를 이용하여 Fig. 4에서의 미세조직으로부터 얻어진 초정고상입자의 크기, 표준편차 그리고 구형화정도를 나타내는 그래프이고 Fig. 6은 초정고상입자의 분포도를 나타내었다. 고상율이 0.2에서 0.4로 증가할수록 초정고상입자의 평균 크기는 각각 $98\mu\text{m}$ 에서 $118\mu\text{m}$ 으로 증가하였다. 그리고 구형화정도는 고상율이 증가할수록 좋아짐을 알 수 있다.

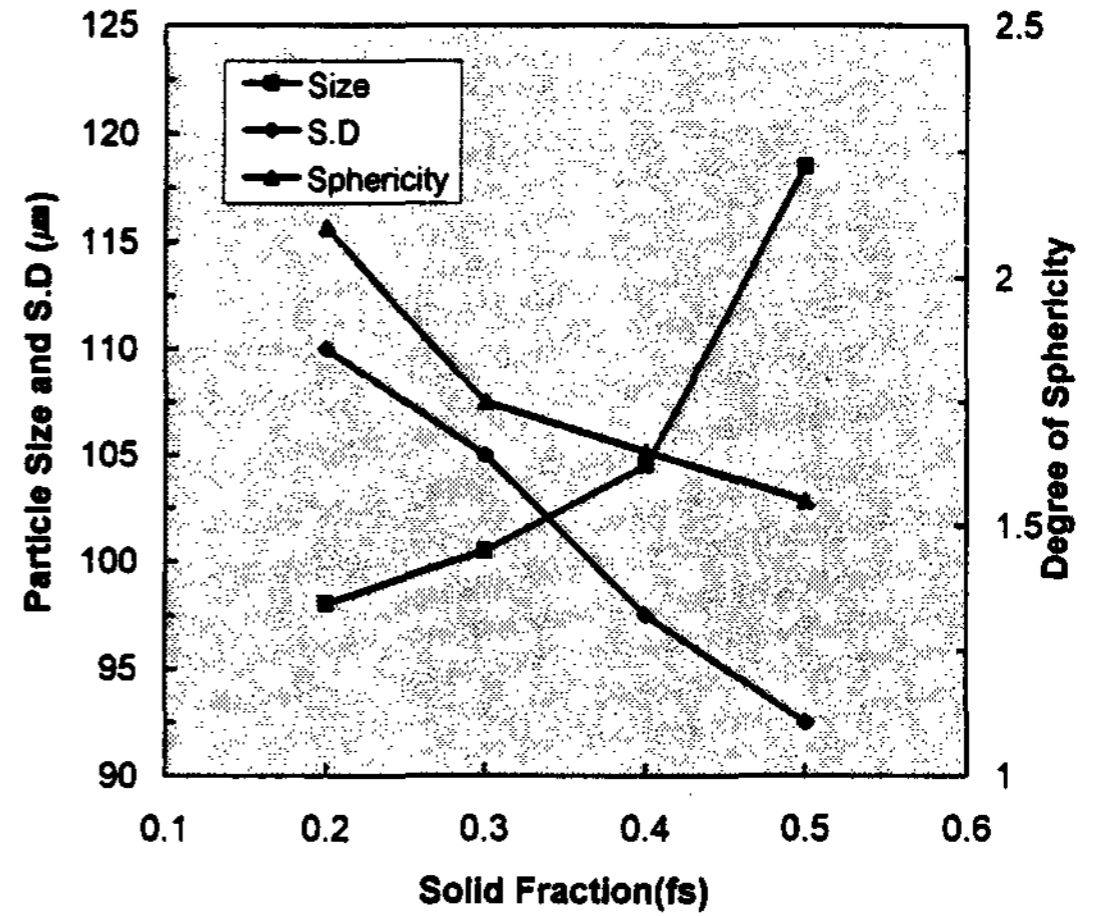


Fig. 5. Variations of the average size of primary particle, its standard deviation and the degree of sphericity in the Al-7wt%Si alloy with various solid fractions. Here, the degree of sphericity is the ratio of the largest to the smallest radius of a particle.(cooling rate=0.04°C/s; holding time=0min; input voltage=160V)

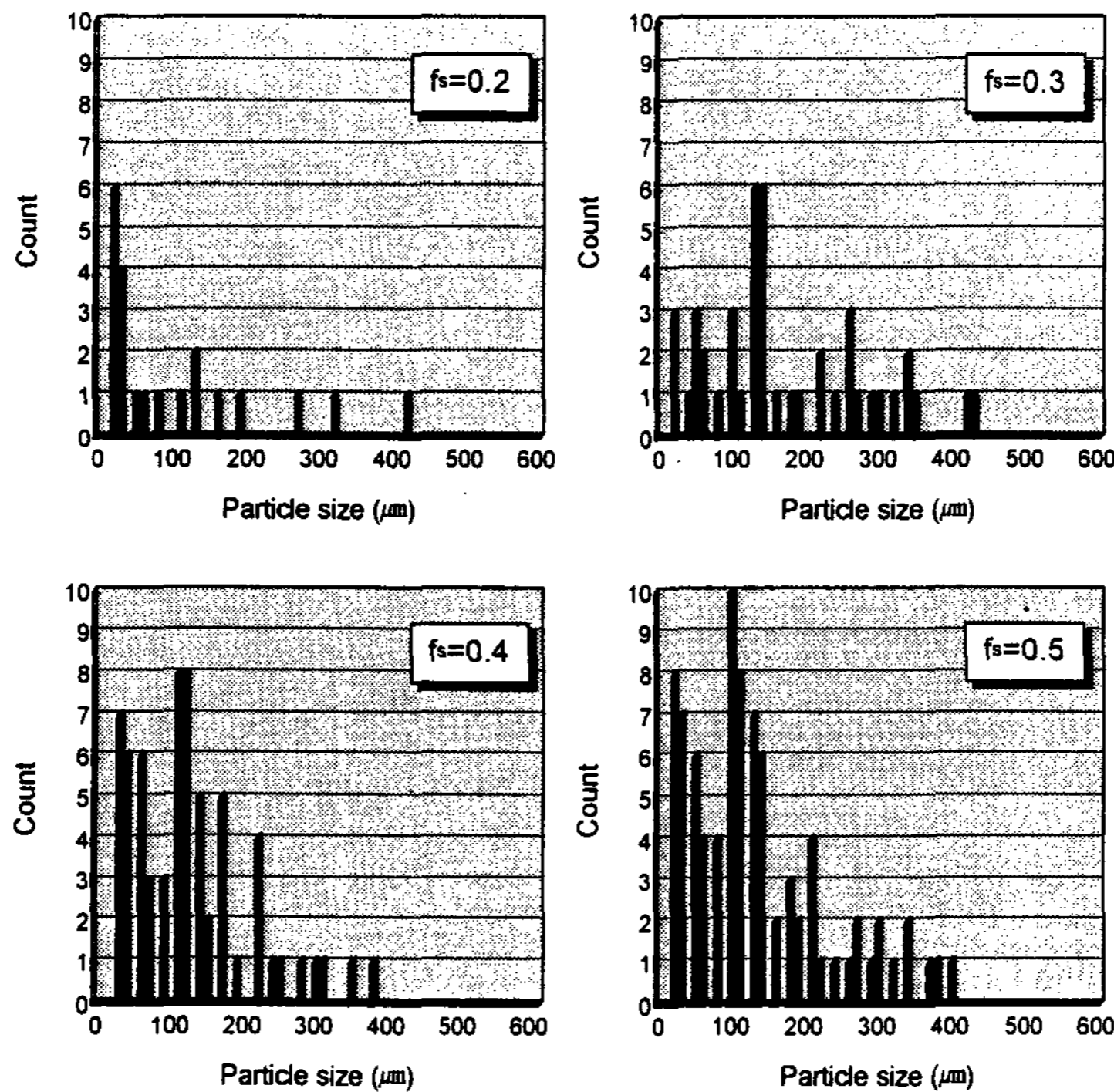


Fig. 6. Distribution of the size of primary solid particle in the Al-7wt%Si alloy with various solid fractions. (cooling rate=0.04°C/s; holding time=0min; input voltage=160V)

Fig. 7은 입력전압을 160V, 용탕의 냉각속도를 0.04°C/s로 하여 고상율이 0.4가 될 때까지 전자교반시킨후 고상율 0.4를 유지하면서 교반유지시간을 변화시켰을 때의 미세조직을 나타내는 사진이다. 교반유지시간이 0분에서 20분까지 증가함에 따라 초정고상입자의 크기는 조대화되고 구형화정도는 향상되어 구형에 가까운 입자 형태를 얻었다. 하지만 교반유지시간이 40min에서는 다시 고상입자들이 합체되는 현상이 일어났으며 합체되는 입자들 사이에 액상이 포획(entrapping)되는 현상이 나타났다. 이것은 입자의 구상화는 입자들간의 마멸과 조대화의 결과로 점진적

으로 나타나고 또 고상입자는 다른 것과 완전히 독립되어 존재하는 것이 아니라 응집되어 존재하며 이 응집의 정도는 전단변형속도와 전단변형이 가해지는 시간에 의존한다는 Flemings[14] 등의 보고와 같은 경향을 나타내었다.

Fig. 8은 화상분석기를 이용하여 Fig. 7에서의 미세조직으로부터 얻어진 초정고상입자의 크기, 표준편차 그리고 구형화정도를 나타내는 그래프이고 Fig. 9는 초정고상입자의 분포도를 나타내었다. 초정고상입자의 크기는 유지시간 0분일 때 평균 105µm, 5분일 때 140µm으로 급격히 증가하다가 유지시간 10-20min에서는 평균 150µm로

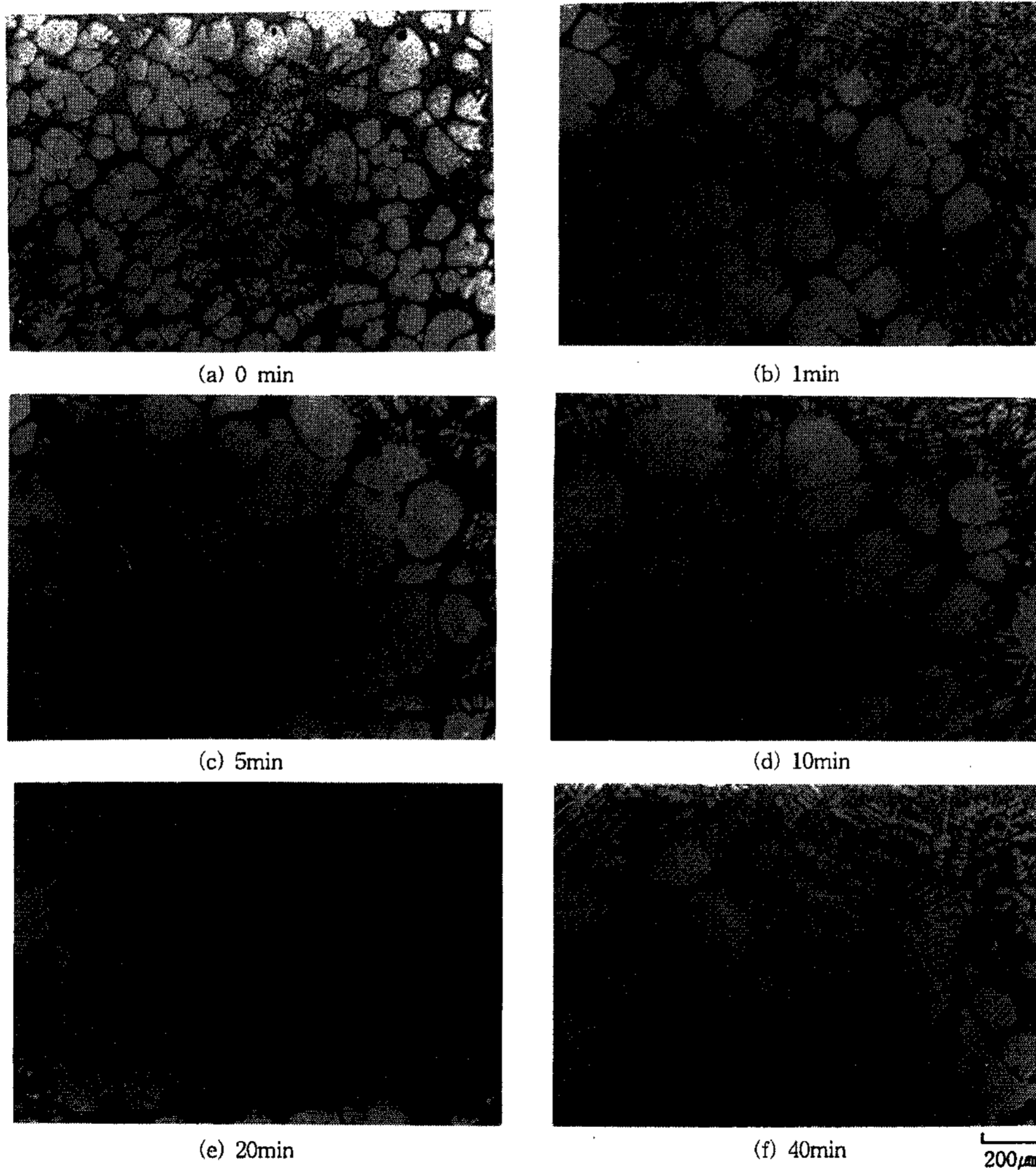


Fig. 7. Microstructures of the Al-7wt%Si alloy with the various holding time. (cooling rate=0.04°C/s; solid fraction=0.4; input voltage=160V)

어느 정도 일정하게 되고 유지시간이 40분일 경우 고상입자의 합체와 조대화로 인하여 평균 200 μm 까지 다시 증가함을 알 수 있다. 이 결과는 응고초기에는 Wan[17] 등의 연구결과와 다소 차이가 있으나 이후의 결과는 거의 일치하는 경향을 나타내고 있다. 응고초기의 결과가 다른 것은 본 실험에서는 교반의 시작을 액상선 위에서 부터 시작하였기 때문에 초정의 입자가 수지상으로 충분히 자라지 못하고 응고초기부터 작은 비수지상(non-dendrite)으로 자라기 때문이라고 생각된다. 표준편차는 교반유지 초기에 약간 증가하다 다시 감소함을 알 수 있으며 구형화정도는 좋아짐을 알 수 있다.

Fig. 10은 용탕의 냉각속도를 0.04 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 로 하여 고상율이 0.4가 될 때까지 전자교반시킨후 고상율 0.4를 유지하면서 20분 동안 교반유지시킬 때 입력전압의 변화에 따른 미세조직을 나타내는 사진이다. 입력전압이 140V 일 때(a)와 160V

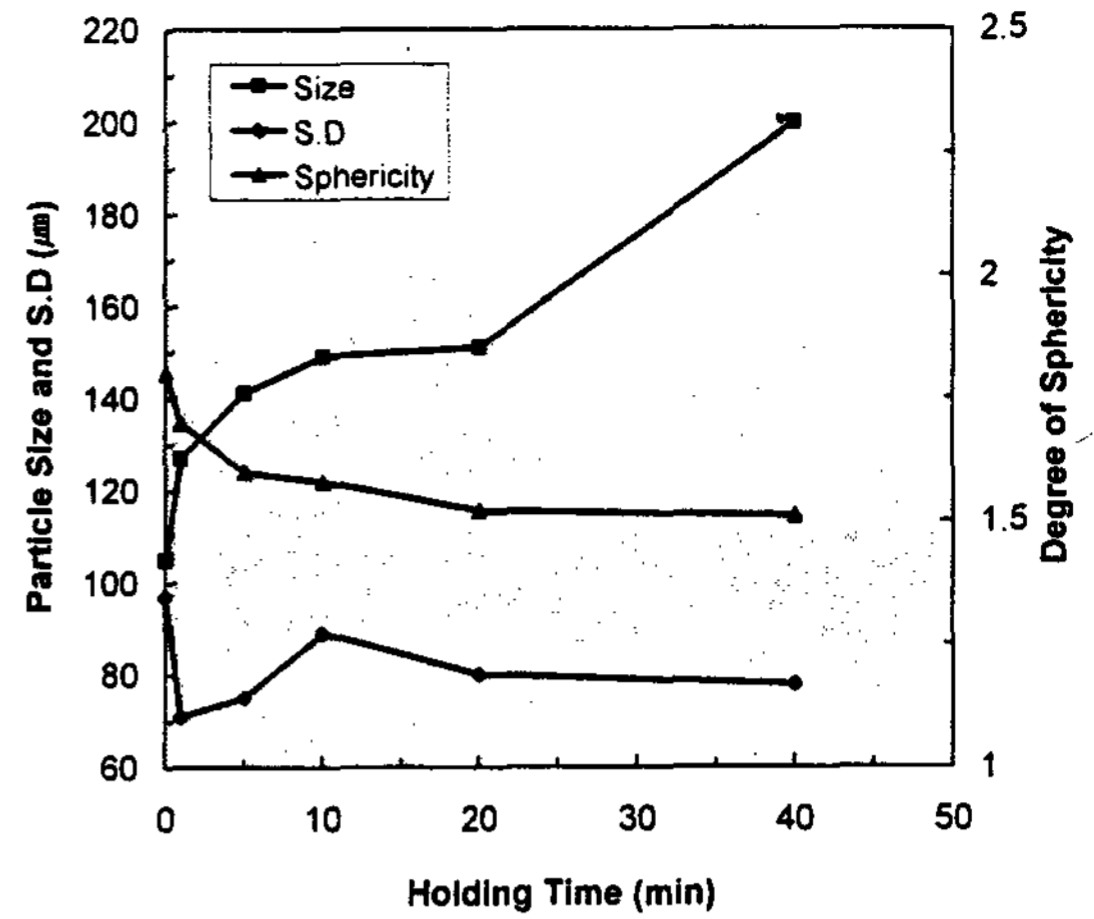


Fig. 8. Variations of the average size of primary particle, its standard deviation and the degree of sphericity in the Al-7wt%Si alloy with holding time.(cooling rate=0.04 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$; solid fraction=0.4; input voltage=160V)

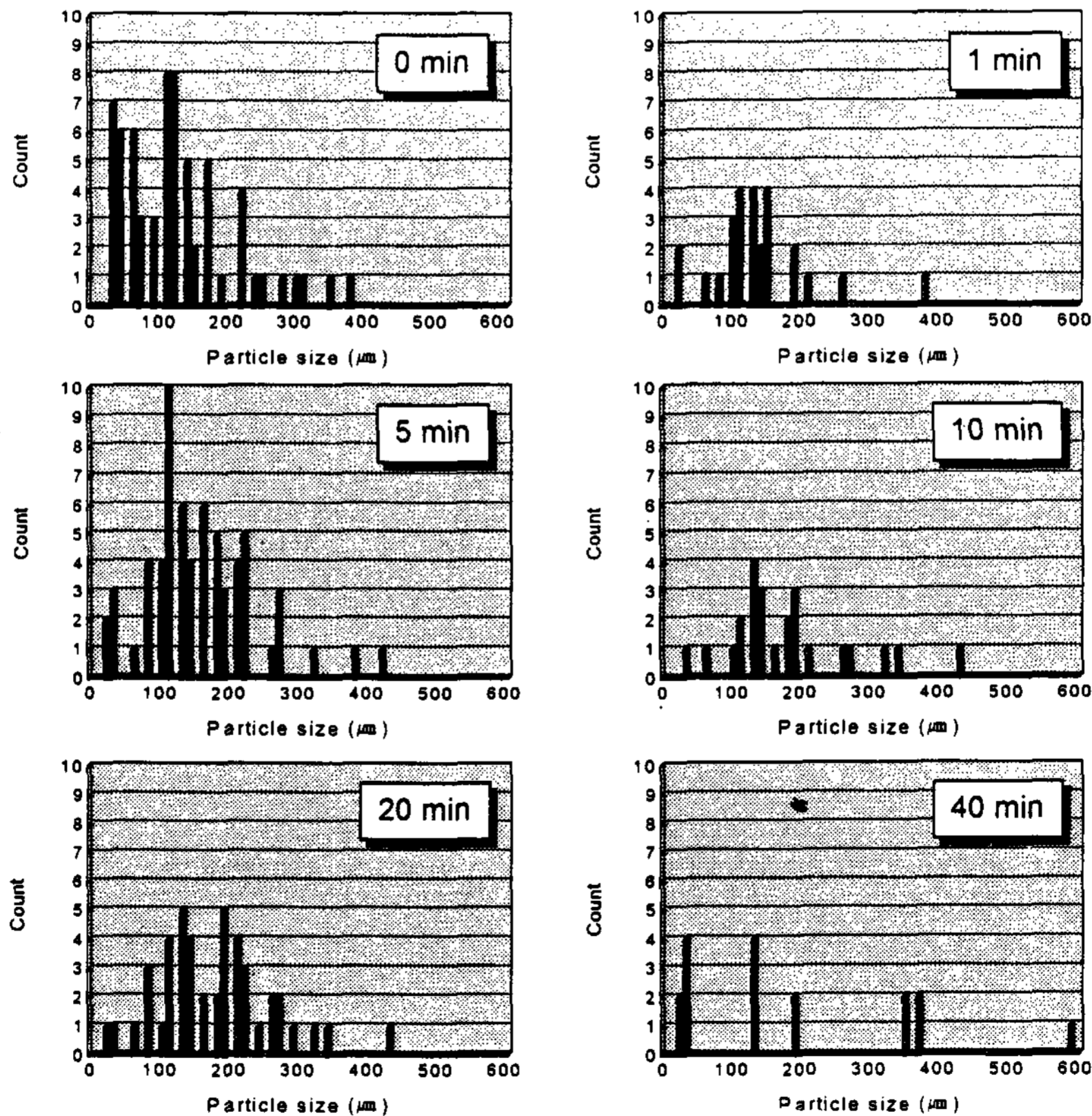


Fig. 9. Distribution of the size of primary solid particle in the Al-7wt%Si alloy with various holding time. (cooling rate=0.04 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$; solid fraction=0.4; input voltage=160V)

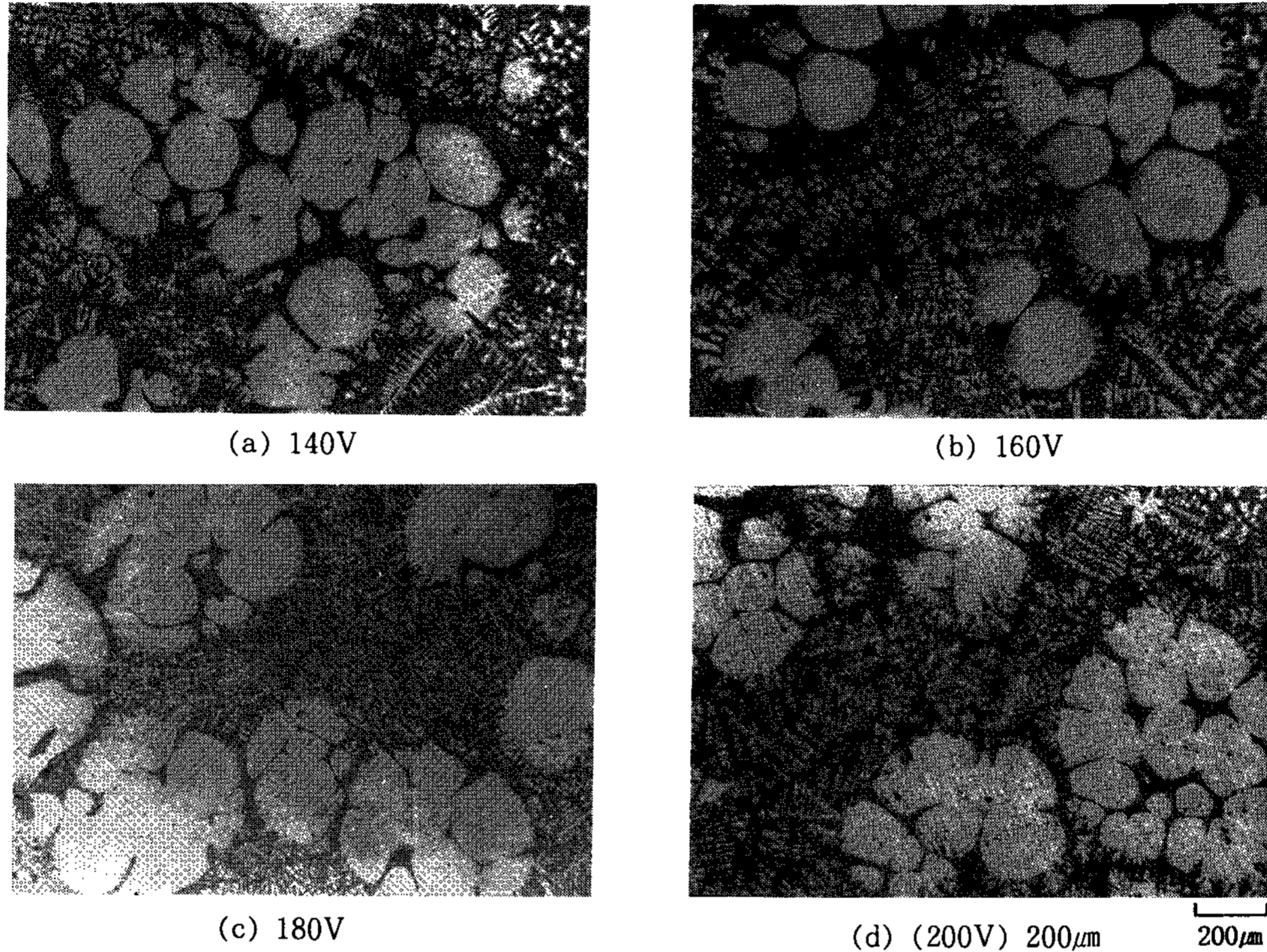


Fig. 10. Microstructures of the Al-7wt%Si alloy with various input voltages. (cooling rate=0.04 °C/s; solid fraction=0.4; holding time=20min)

일때(b) 초정고상입자의 크기는 크게 변화하지 않지만 140V에서 보다 160V일때 좀더 구형화된 입자들이 관찰된다. 그러나 180V이상에서는 몇 개의 입자들이 함께 뭉쳐서 하나의 입자처럼 거동함을 알 수 있고 200V에서는 더 많은 입자들이 응집되고 있음을 보여준다. 그리고 여러 개의 고상입자들이 응집되는 경우에 사진에서처럼 액상이 포획되는 경우도 있음을 알 수 있다. 이와 같이 여러개의 고상입자가 뭉쳐서 거동하는 현상은 유동의 세기와 관계가 있을 것으로 사료되며 앞으로 계속 연구가 진행되어야 할 것 같다. Fig. 11은 화상분석기를 이용하여 Fig. 10에서의 미세조직으로부터 얻어진 초정고상입자의 크기, 표준편차 그리고 구형화정도를 나타내는 그래프로 초정입자의 크기를 입자 하나의 크기와 여러 개의 고상입자가 뭉쳐 하나의 입자처럼 거동하는 큰 입자의 크기를 각각 나타내었다. 그 결과 초정입자 하나의 크기는 입력전압이 140V일때 평균 152µm이었고 입력전압이 증가할 수록 작아져서 200V일 때 평균 117µm이었다. 하지만 180V

이상에서는 몇 개의 초정들이 뭉쳐지는 현상이 나타나고 그때의 뭉쳐진 큰 입자의 크기는 평균 320µm이었으며 200V일때 400µm이었다. Fig. 12는 초정고상입자의 분포도를 나타낸 것이다.

본 연구에서 입력전압에 의해 발생하는 용탕내의 유동의 유속을 구하여 보았다. 한쪽 또는 두 원통이 모두 일정각속도로 회전할 때, 두동심원통사이에서의 유동의 속도는

$$v_{\theta}(r) = \frac{1}{r_0^2 - r_i^2} [(w_o r_0^2 - w_i r_i^2 r - w r) r - r_0^2 - r_i^2 (w - w) \frac{1}{r}]$$

와 같이 분포한다.

여기서 r_o , r_i 는 각각 외, 내원통의 반지름이고 w_o , w_i 는 각각 외, 내원통의 회전속도이다. 본 실험에서는 $r_o=2.5\text{cm}$, $r_i=0.5\text{cm}$ 이고 내부의 냉각봉이 회전을 하지 않으므로 $w_i=0$ 으로 하여 계산하였다. 이렇게 하여 입력전압의 변화에 대한 즉 용탕의 회전속도의 변화시 전자교반장치안의 도가니와 수냉장치의 두 실린더 사이의 속도의 분포를 Fig. 13에 나타내었다. 외부 도가니에서 내부 냉각봉으로 갈수록 속도는 점점 낮아짐 알

수 있고 입력전압의 변화에 따른 회전속도의 증가에 의해서 속도는 증가하였다.

본 연구의 전자교반의 경우와 같이 일정한 전단변형 영역에서 떠다니는 입자 주위의 유동은 외부에서 가해지는 유동 ν^0 와 부가적인 유동 ν' 의 혼합으로써 나타낼 수 있다. 따라서 아래와 같이 연속조건은 입자 표면에서와 액상내의 어디에서도 적용된다.

$$\nabla \cdot \nu = \nabla \cdot (\nu^0 + \nu') = 0$$

일정한 전단변형영역에서 구(sphere)의 경우 Molenaar[11] 등은 용탕내의 방사선성분의 속도를 다음의 식으로 나타내었다.

$$V_r^* = r \frac{r}{2} \sin(2\phi) \sin^2\theta \left[1 - \frac{5}{2} \frac{R^3}{r^3} + \frac{3}{2} \frac{R^5}{r^5} \right]$$

여기서 r 는 전단변형속도, R 은 구의 반지름, r 은 구의 표면에서 임의의 점까지의 거리이다. 이 식에서 알 수 있듯이 부유하는 입자주위의 유동은 전단변형속도에 의해서 지배됨을 알 수 있다. 즉 교반속도(입력전압)의 증가에 의하여 전단변

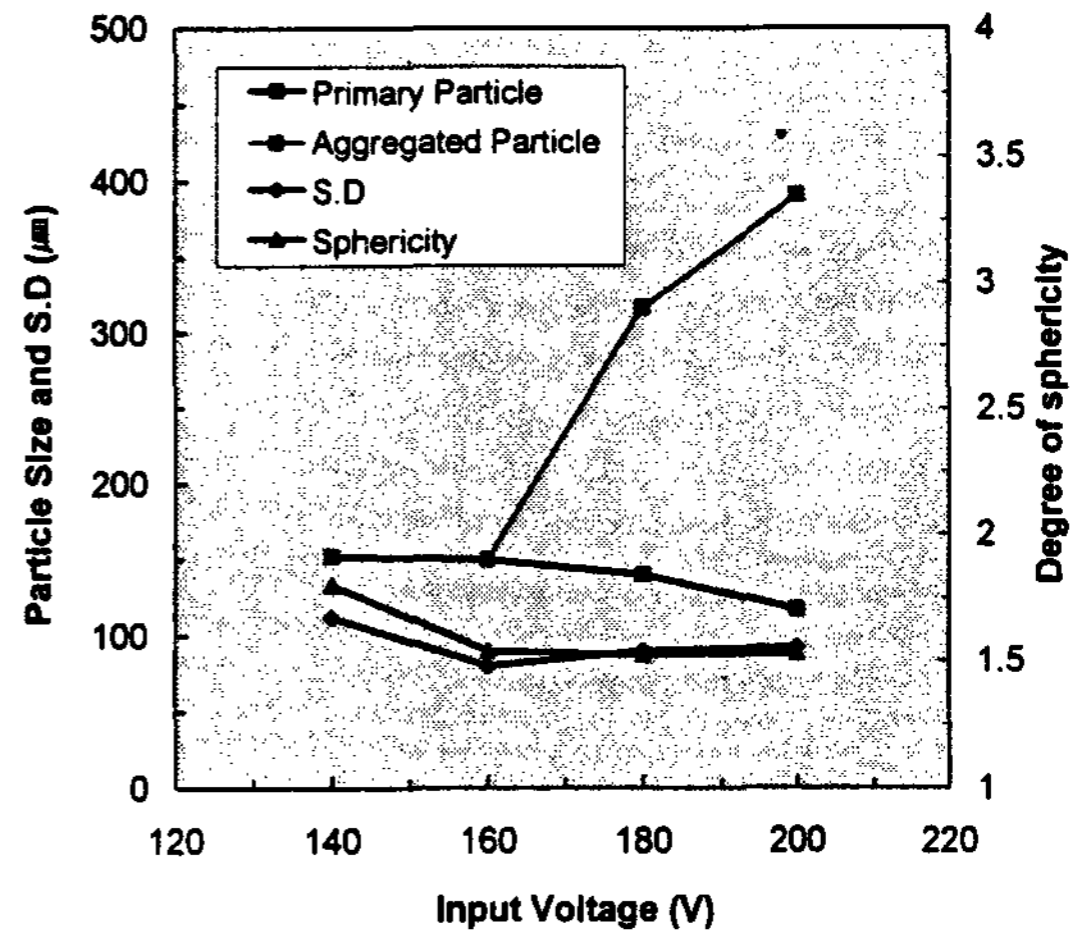


Fig. 11. Variations of the average size of primary particle, its standard deviation and the degree of sphericity in the Al-7wt%Si alloy with various input voltages.(cooling rate=0.04°C/s; solid fraction=0.4; holding time=20min)

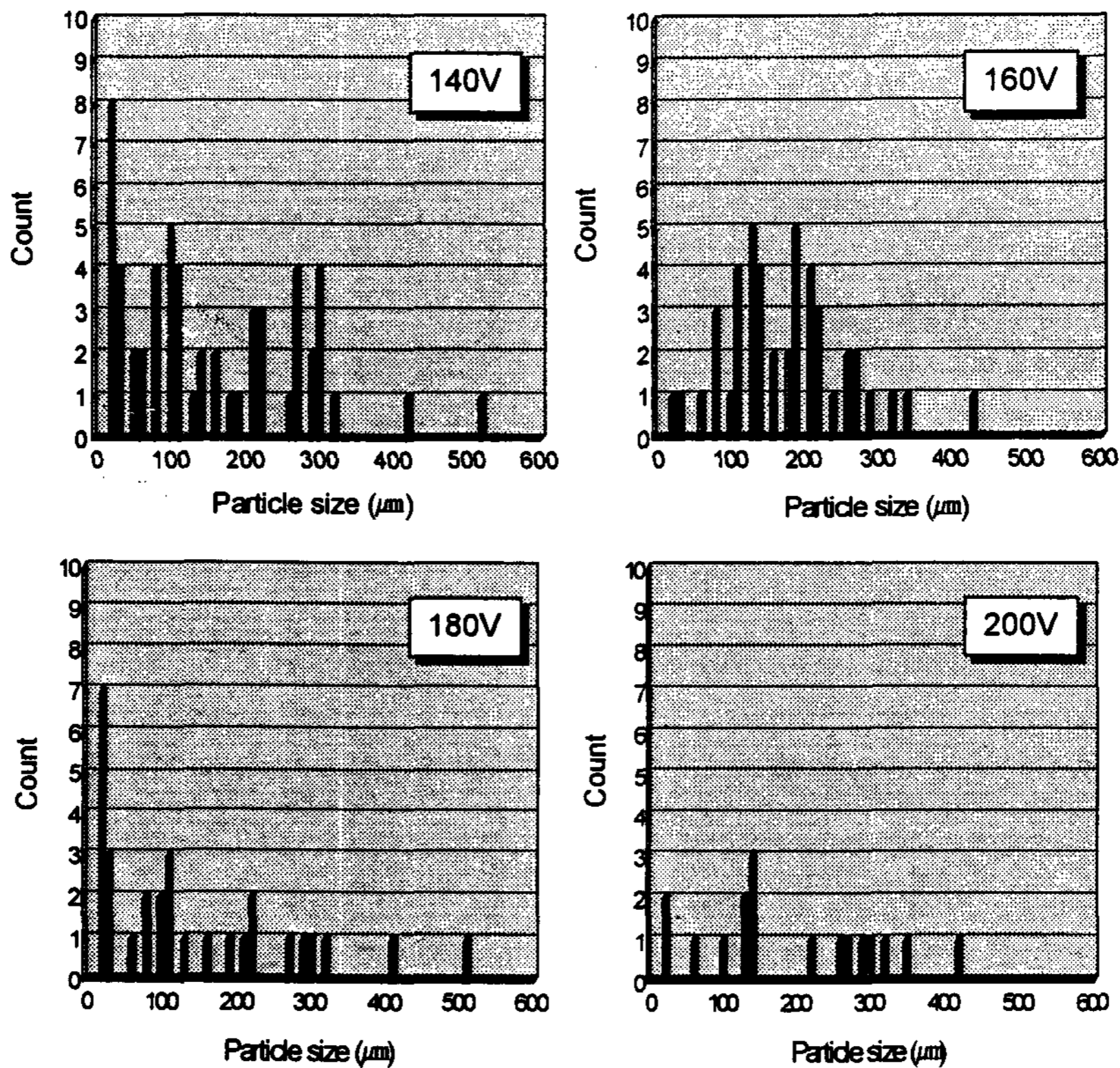


Fig. 12. Distribution of the size of primary solid particle in the Al-7wt%Si alloy with various input voltages. (cooling rate=0.04°C/s; solid fraction=0.4; holding time=20min)

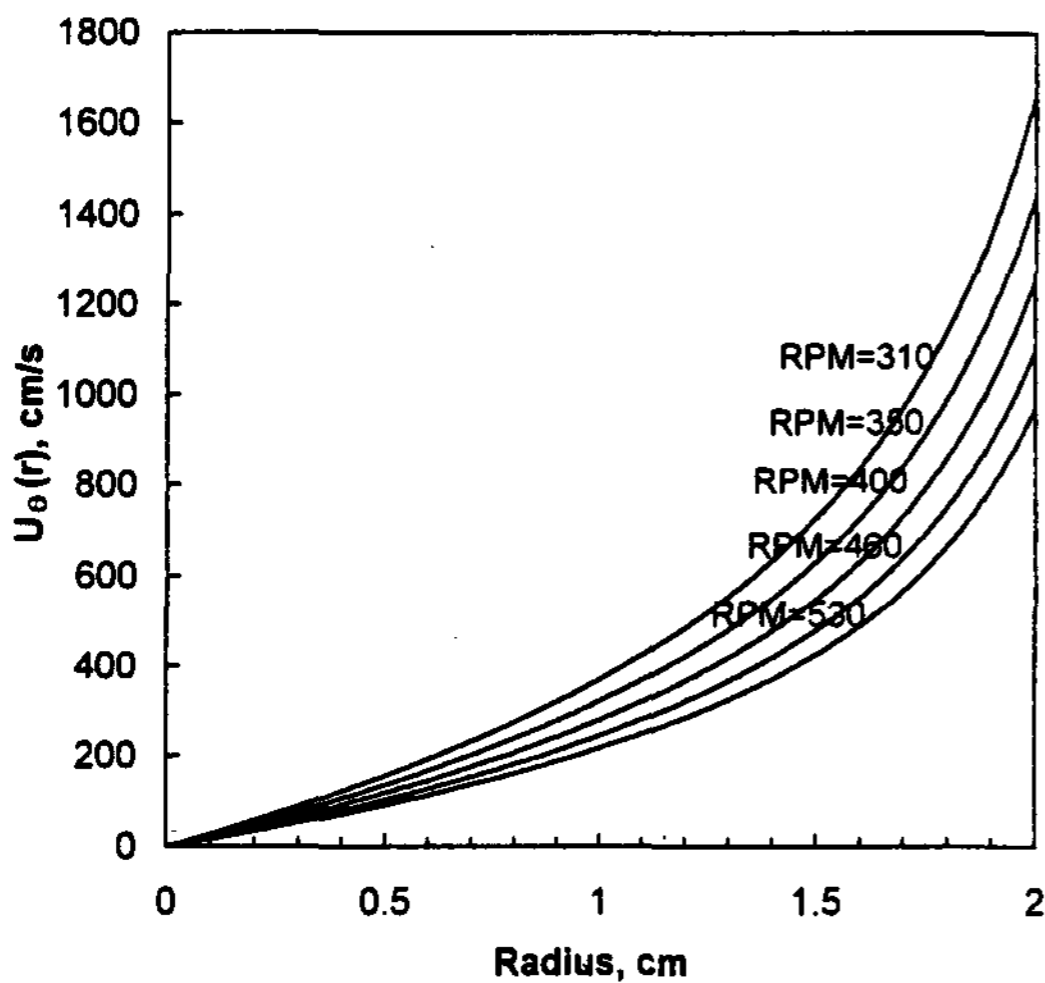


Fig. 13. Tangential velocity profile with radius at 310, 350, 400, 530rpm.

형속도는 증가하고 따라서 입자주위에 미치는 유동은 입자의 고액계면전방의 열 및 용질전달에 영향을 주어서 초정고상입자의 거동이 변하게 된다고 생각된다. 즉 교반시와 무교반(directional)시 응고에 있어서 열유동의 차이점은, 무교반시에는 액체로부터 고체쪽으로 일방향적이어서 계면에서 thermal gradient가 positive인 반면, 교반시에는 액상내에서 성장하는 초정입자는 주위 액상의 온도를 약간 웃도는 온도를 가진다. 즉 방출된 잠열이 고체입자로부터 액체로 이동하기 위해 액체는 과냉 되어야 하므로 계면에서 thermal gradient는 negative가 된다. 그런데 금속과 같이 Prantl-number가 1보다 작은 경우(~ 0.01)는 thermal boundary layer thickness가 hydrodynamic boundary layer thickness보다 훨씬 크다는 것을 의미한다. 결과적으로 교반되는 액상내에서 성장하는 초정입자의 고액계면에서 thermal gradient는 교반에 의해서 작게 되어 수지상성장을 하지 않고 구형화된 형태로 자라게 될 것으로 사료된다.

4. 결 론

1) 일정고상율까지 응고시킨 후 전자교반을 행한 초정고상입자보다 액상에서 부터 전자교반을 한 후 일정 고상율에서 급랭한 초정입자의 크기가 더 미세하고 구형화되었다.

2) 전자교반된 Al-7wt%Si합금의 미세조직에서 고상율이 0.2에서 0.4로 증가함에 따라서 초정고상입자의 크기는 $98\mu\text{m}$ 에서 $118\mu\text{m}$ 으로 증가하였다. 구형화정도는 고상율이 증가할수록 좋아짐을 알 수 있다

3) 교반유지시간이 20min 까지 증가함에 따라 초정고상입자는 조대화되며 구형화정도는 향상되어 구형에 가까운 입자 형태를 얻었다. 하지만 교반유지시간이 40min에서는 다시 고상입자들이 합체되는 현상이 일어났으며 합체되는 입자들 사이에 액상이 포획(entrapping)되는 현상이 나타났다.

4) 입력전압이 증가할수록 하나 하나의 초정입자는 감소하였으나 180V이상에서는 몇 개의 입자들이 함께 뭉쳐서 하나의 큰 입자처럼 거동함을 알 수 있었고 200V에서는 더 많은 입자들이 응집되었으며 여러 개의 고상입자들이 응집될 때 액상이 포획되는 경우도 있음을 알 수 있다.

후 기

이 논문은 1996년도 한국학술진흥재단의 공모 과제 연구비에 의하여 연구되었습니다. 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] M. C. Flemings, R. G. Riek and K. P. Young, Mat. Sci. Eng., 25 (1976) 103
- [2] P. A. Joly and R. Mehrabian, J. of Met. Sci., 11 (1976) 1393
- [3] M. C. Flemings, Met. Trans., 22A (1987) 957
- [4] A. Hellawell, The Metal Society (1979)
- [5] M. H. Rovert, "Partial Melting as an Efficient Method to Produce Rheocast Alloy Slurries" (1993) 45
- [6] C. Viv'es, Met. Trans. 23B (1992) 189
- [7] O. Tsubakihara, A. Kusano and T. Terada, Trans. ISIJ 25 (1985) 686
- [8] M. Tsunoi, N. Kawada and Yasuo Fujikawa, Tec. Rev. 10 (1979) 202
- [9] C. Viv'es and R. Ricou, Met. Trans. 16B

- (1985) 377
- [10] R. T. Southin, J. of the Inst. of Metals, 94 (1966) 401
- [11] J. M. M. Molenaar, L. Katgerman, W. H. Kool, J. of Mat. Sci., 21 (1986) 389-394
- [12] Toshio Suzuki and Yasunori Miyata, 鐵と鋼 第74年 (1988) 第12
- [13] Ferguson, J. and Kemblowski, Z. Elsevier Applied Science, U. K., ISBN : 1-85166-588-9 (1991)
- [14] H. Iwata, K. Yamada, T. Fujita and K. Hayashi, Iron and Steel 11 (1978) 2972
- [15] K. Sasaki, Y. Suhitani, S. Kobayashi and S. Ishimura, Iron and Steel 4 (1976) 60
- [16] K. H. Spitzer and K. Schwerdtfeger, I&SM (1989) 57
- [17] G. Wan and P. R. Sahm, Acta Metall. 38 (1990) 2367