

.....  
 論 文  
 .....

## 영구자석의 회전을 이용한 Al-Si합금계의 반응고합금 제조공정 연구

송인혁\*, 한유동\*, 윤중열\*, 안중호\*\*

### Study on Semi-Solid Processing of Al-Si Alloys by Rotation of Permanent Magnets

In-Hyuck Song\*, Yoo-Dong Hahn\*, Jung-Yeul Yun\* and Jung-Ho Ahn\*\*

#### Abstract

The semisolid processing of two Al-Si alloys, A356 and Al-25wt%Si, was studied with using the rotor composed of permanent magnets. The semisolid slurry was agitated by the electromagnetic force induced from the rotating permanent magnets.

The round shaped primary  $\alpha$  phases were formed in A356 alloy as a result of agitation. In Al-25wt%Si alloy, spherodization of primary Si particles was not observed with the rotation of the magnets. The primary Si particles were segregated to the outer surface area of sample, which became pronounced with increasing the rotating speed of magnets. (Received October 2, 1996)

#### 1. 서 론

산업이 점차 발달됨에 따라 요구되는 구조재료의 특성들은 점차 엄격해지고 있다. 특히 주조재의 경우 품질 향상을 위해 대표적인 결함의 유발요인인 편석(segregation) 및 수지상(dendrite) 조직의 조절 방법이 점차 요구되고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 하나의 방법으로 1970년대 초반에 D. B. Spencer는 반응고 합금(Semi-solid alloy)기술을 창안[1-2]하였다. 그 기본 공정원리는 합금을 고상과 액상이 공존하는 온도 범위에서 심하게 교반하여 dendrite조직을 소멸시킨 후 성형하는 것으로, 기술상으로는 반응고 합금의 제조와 성형의 두 분야로 대별되어질 수 있다. 이와 같은 반응고합금 공정은 기존의 주조와 단조 공정의 장점만을 선택하여 고품질 제품을 제조할 수 있는 특징을 갖고 있다. 일반적으로 복잡한 형상의 부품은 주조를 통하여 제조하

는 것이 이상적이거나 주조품은 기공 그리고 편석 등의 많은 미세조직상의 결함을 가지고 있기 때문에 구조용 기계부품으로의 사용에는 제한성이 있다. 반면 단조, 압출 등과 같은 고체상태에서의 성형 가공은 주조품의 미세 결함을 제거하여 기계적 특성을 향상시킬 수 있는 장점은 있으나, 정밀 복잡부품의 성형이 어려우며 절삭 등의 후가공으로 인한 원자재의 손실이 뒤따른다. 이러한 주조와 단조의 결함을 보완하기 위해 용탕단조와 같은 방법이 시도되고 있으나 완전 액상으로 이루어지는 공정인 관계로 응고시의 수축에 따른 문제, 금형수명의 감소 등 많은 문제점이 상존하게 된다. 반응고 합금 공정은 용탕단조와 달리 고상이 50% 이상인 점에서 행한다는 점과 합금의 격심한 교반을 통해 dendrite 조직을 완전 파쇄한다는 점에서 크게 구분되어 진다.

일반적으로 반응고 합금을 제조하기 위한 방법으로는 실험실적으로 기계적 교반법[3-6]이 보

\*한국기계연구원 재료공정연구부(Dept. of Materials Processing, Korea Institute of Machinery & Materials)

\*\*안동대학교 재료공학과(Dept. of Materials Engineering, Andong University)

편적으로 사용되고 있다. 기계적 교반법은 간단한 원리로 높은 전단력을 낼 수 있고 구형화된 조직을 쉽게 얻을 수 있다는 장점은 있으나 교반시 교반자에 의한 마모에 따른 오염, 공정제어의 어려움, 경제적인 측면에서 제약이 있다. 그러므로 점차 전자기력을 이용한 교반법을 사용함으로써 기계적 교반의 단점을 보완하고자 하는 추세 [7-10]이다. 즉, 전자기력을 이용한 교반기의 경우 회전축과 용융금속이 접촉하지 않으므로 불순물의 개입을 방지할 수 있고 교반강도를 용이하게 조절할 수 있다. 그러나 전자기적 교반 효과가 교반용기 안의 용탕내부까지 충분히 미치기 위해서는 막대한 양의 전력 소모가 요구되어 반응고 합금의 제조원가가 커지는 문제가 제기되었다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 1992년 프랑스의 C. Vives는 영구자석을 이용한 용탕의 교반법을 제안[11]하였다. 이 방법은 교반을 위해서 단순히 영구자석을 회전시키는 방법으로서 전자기적 교반 장치와는 비교가 되지 않을 정도로 전력소모가 작으며 부피가 작기 때문에 전기시설 및 장치 자체가 간단해 지는 장점이 있다.

본 연구에서는 이와 같은 장점을 지니고 있는 영구자석을 이용한 용탕의 교반법을 Al-Si합금계에 도입하기 위하여 영구자석에 의한 반응고 교반 장치를 제작하였다. 그리고 영구자석의 회전력에 의한 교반시 아공정 조성인 A356과 과공정 조성인 Al-25wt%Si을 이용하여 구형화양상 및 고액 공존구간에서 반응고 거동을 고찰하였다.

## 2. 실험방법 및 교반원리

### 2.1 원재료 및 공정변수

본 실험에서는 아공정 조성인 A356합금과 과공정 조성인 Al-25wt%Si조성의 모합금을 사용하였다. 교반기에 주입시 용탕의 온도는 A356합금의 경우 800℃이며, Al-25%Si합금의 경우 850℃이다. 본 실험에서는 공정변수를 단순화하기 위하여 탈가스제 및 조직 미세화제 등의 처리를 하지 않았다. 또한 1회 장입량은 600g이며, 냉각방법은 공냉 및 공정온도 직상에서 수냉법을 사용하였다. 영구자석 rotor의 교반속도는 1000, 2000, 3000rpm으로 변화를 주었으며, 교반하는

동안 시편의 중앙부에 K type 열전대를 사용하여 온도를 측정하였다. Table 1은 본 실험에 사용된 A356합금의 화학조성이다.

Table 1. Composition of A356 alloy(wt%).

Al	Si	Cu	Fe	Mg
balance	7.13	0.01	0.11	0.25

### 2.2 교반기 제작

Fig. 1은 본 실험에 사용된 영구자석의 회전에 의한 반응고합금 제조용 교반기의 개략도이다. 용해로에서 용해된 용탕은 교반장치의 윗부분을 통하여 지름 60mm의 원통형 교반용기로 주입되며, 주입된 용탕은 회전하는 영구자석에 의해 교반하게 된다. 회전용 영구자석은 30×24×24(mm)크기의 소형 자석들이 8개의 수직열로 배열되었으며, 1열에 각각 10개씩 총 80개로 구성되어 있다. 각 수직열은 동극의 자석으로 되어 있으며, 회전기의 위에서 볼 때 N-S극이 교차하도록 되어있는 총 4쌍의 자극으로 구성되어 있다. 본 교반기에 사용된 영구자석은 (주)태평양 금속에서 구입한 Alnico자석으로서 자성 특성은 Table 2와 같다.

### 2.3 교반원리

영구자석의 회전에 의하여 금속 용탕 slurry를

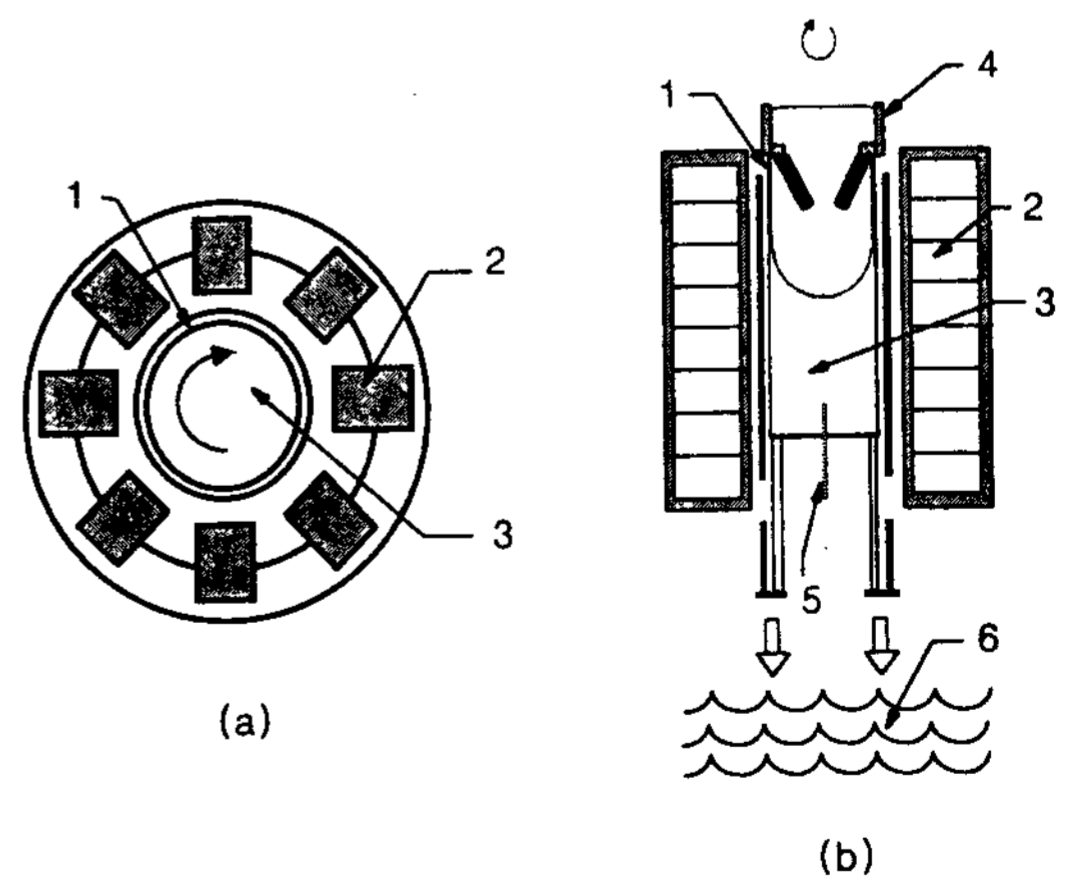


Fig. 1. Schematic sketch of the permanent magnet rheocaster :

- (1. ingot mold 2. magnets 3. metal slurry
- 4. spout 5. thermocouple 6. cooling water)
- (a) top view (b) front view

Table 2. Characteristics of ALNICO magnets

$B_r$ (Residual Flux Density)	12,500-13,000(gauss)
$H_c$ (Coersive Force)	600-660(Oersted)
$(BH)_{max}$ (Energy product)	4.8-5.5(MG Oe)

교반시키는 원리는 유도전류와 자장과의 상호작용을 이용하는 전자기력(Lorentz force)를 이용하는 것이다. 이와같은 원리는 기존의 반응고합금 제조용 전자기력 교반기(EMC)가 코일에 고주파 전류를 흐르게 하여 주괴표면에 역위상의 전류 및 교류자장을 흐르게 함으로서, 이에 따른 전자기력(Lorentz force)를 이용하는 것과 유사한 원리이다. 즉 영구자석의 회전에 의하여 금속 용탕 slurry를 교반시키는 원리[11]는 Fig. 1과 Fig. 2에서 보는 바와 같이 모터에 의해 회전하는 영구자석이 용탕안쪽에서  $\omega_0$ 의 각속도를 가지고 있다면, 용탕에는 수평면에서 볼 때  $B_r$ (radial component)과  $B_\theta$ (azimuthal component)로 분해 가능한 자장이 작용하게 된다. 영구자석이 회전할 때 용융금속의 각 지점은 가변적 자장하에 놓이게 되며 따라서 전류가 유도된다. 그 전류의 주된 요소는 회전축방향의  $J_z$ 이며, 용융금속은 전류  $J_z$ 과 자기장의 radial요소인  $B_r$ 의 상호작용에서 유발된 azimuthal time-mean electromagnetic body force( $F_1$ )에 의하여 1차적으로 회전한다. 한편,  $J_z$ 과  $B_\theta$ 의 반응에 의하여 radial time-smoothed electromagnetic body force( $F_2$ )를 유발시키는데 이는 중심부와 수직 수평방향으로 강한 2차 흐름을 유발시킨다. 결국 이상과 같은 두 종의 힘으로 인해 용탕안에는 강한 3차원의 나선형의 유동이 발생하게 되어 교반효과를 얻게 된다.

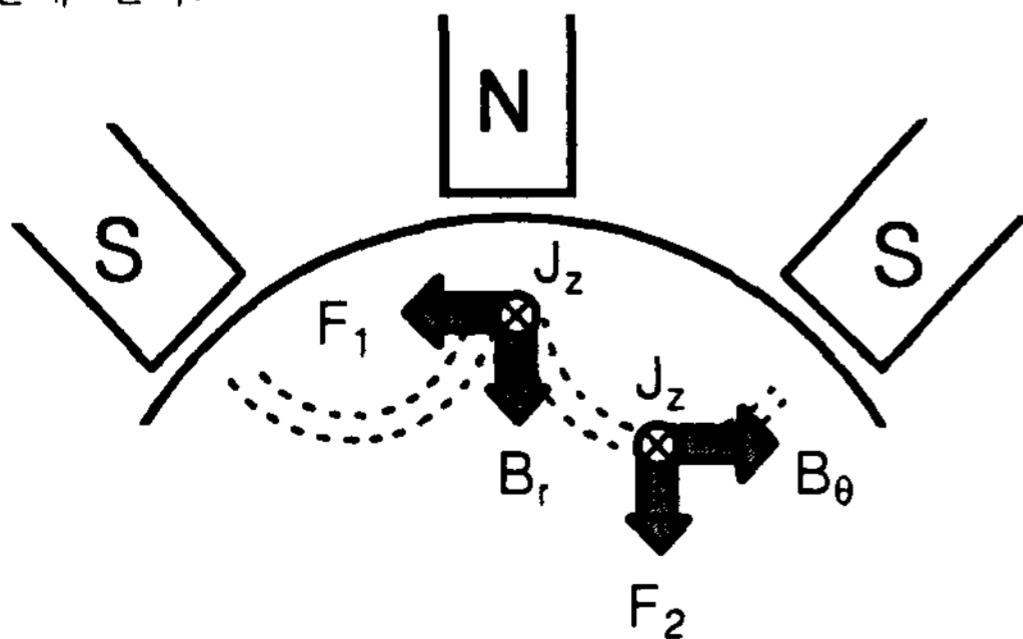


Fig. 2. Schematic sketch of the Lorentz effect in permanent magnet rheocaster.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 미세구조적 측면

##### 3.1.1 A356합금

Fig. 3은 A356합금을 영구자석 회전에 의한 교반유무에 따라 관찰한 시편의 단면사진이다. 영구자석의 회전에 의한 교반실험을 실시할 경우 회전 원심력에 의해 용탕이 좌우로 밀려나 있는 경향을 보여 주고 있다. 이는 영구자석의 회전에 의한 유도교반력이 수지상정조직을 파괴하여 구형의 입자형태를 만들기에 충분할 것으로 판단된다. 또한 영구자석 회전에 의해 교반된 시편이 교반되지 않은 시편에 비해 재료내부의 기공이 감소하는 현상을 보여주고 있다. 이는 탈가스제를 첨가하지 않았음에도 불구하고 나타나는 현상으로서 유도교반력에 의해 기공이 빠져나가면서 시편 내부의 기공이 감소하는 경향을 보여 주고 있다.

Fig. 4는 영구자석의 회전에 의해 공정온도까지 교반후 공정온도에서 공냉한 조직이며, Fig. 5는 영구자석의 회전에 의해 공정온도까지 교반후 공정온도에서 수냉한 조직이다. 공냉시 냉각속도는 약 0.3°C/sec이며, 수냉시 냉각속도는 약 7°C/sec이다. 공냉시는 영구자석의 회전속도에 따라 교반조직이 큰 차이를 보이지 않고 있다. 그러나 공정온도에서 수냉한 조직은 영구자석의 회전속도가 증가함에 따라 수지상정 조직이 파괴되고 구형화되는 경향을 뚜렷이 관찰할 수 있었다. 이는 우선 영구자석의 교반에 의한 회전력에 의해 수지상정 조직이 파괴되고 구형의 입자를 만들기에 충분한 전단 변형력을 가지고 있음을 나타내는 것이다.

##### 3.1.2 Al-25wt%Si합금

Fig. 6은 Al-25wt%Si합금을 영구자석 회전에 의한 교반유무에 따라 관찰한 시편의 단면사진이다. 영구자석의 회전에 의한 교반을 하지 않고 공냉한 Fig. 6(a)의 경우 초정 Si입자들이 시편 내에 고르게 분산되는 경향을 보여 주고 있다. 반면에 영구자석의 회전에 의해 교반을 한 경우 Fig. 6(b)와 같이 초정 Si입자들이 재료의 바깥 쪽으로 편재 분리되고 재료내부의 기공이 감소하는 현상을 보여주고 있다.



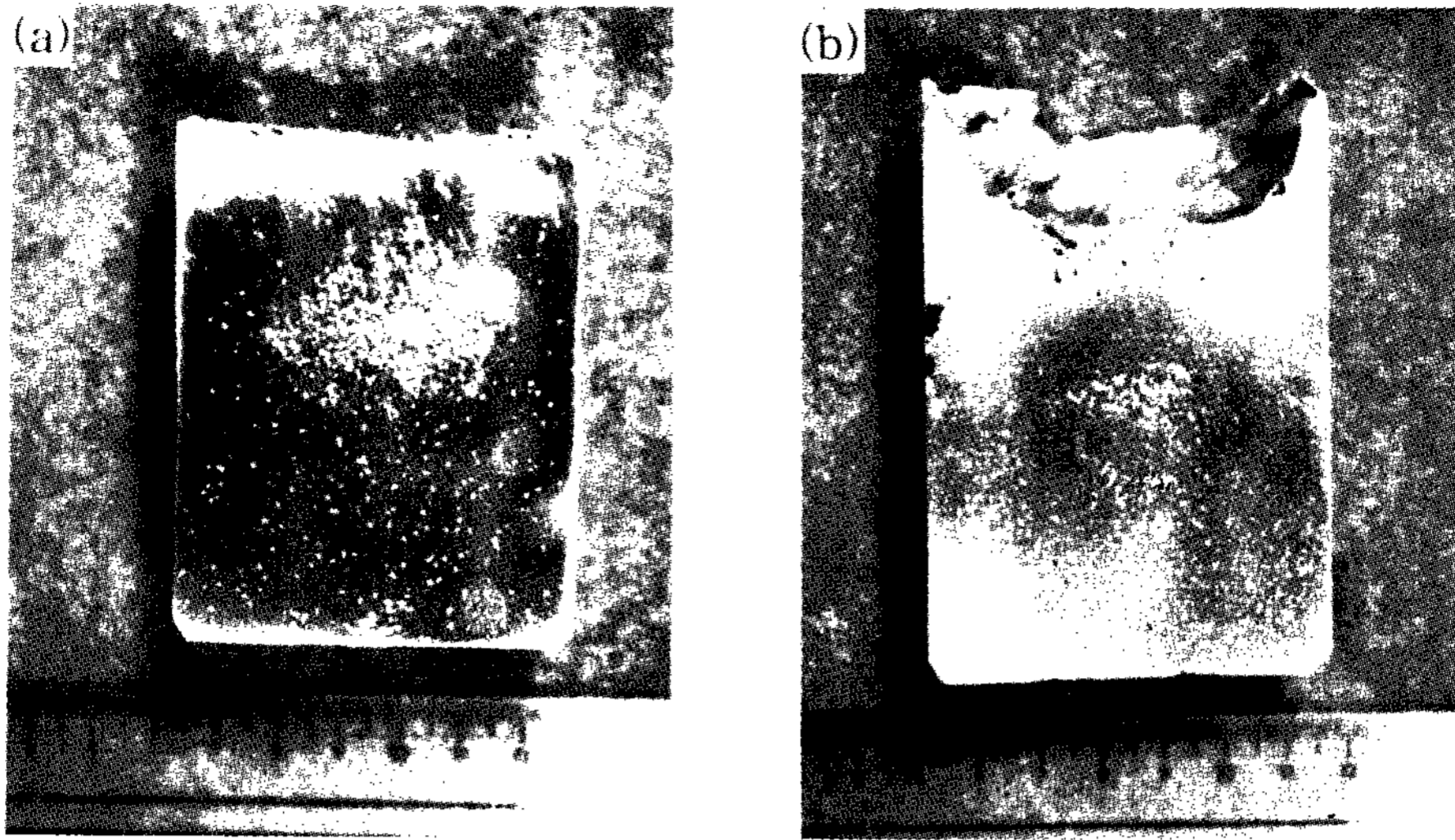


Fig. 3. Longitudinal cross section of A356 alloy as a function of rotating speed of permanent magnet.  
(a) 0rpm (b) 3000rpm

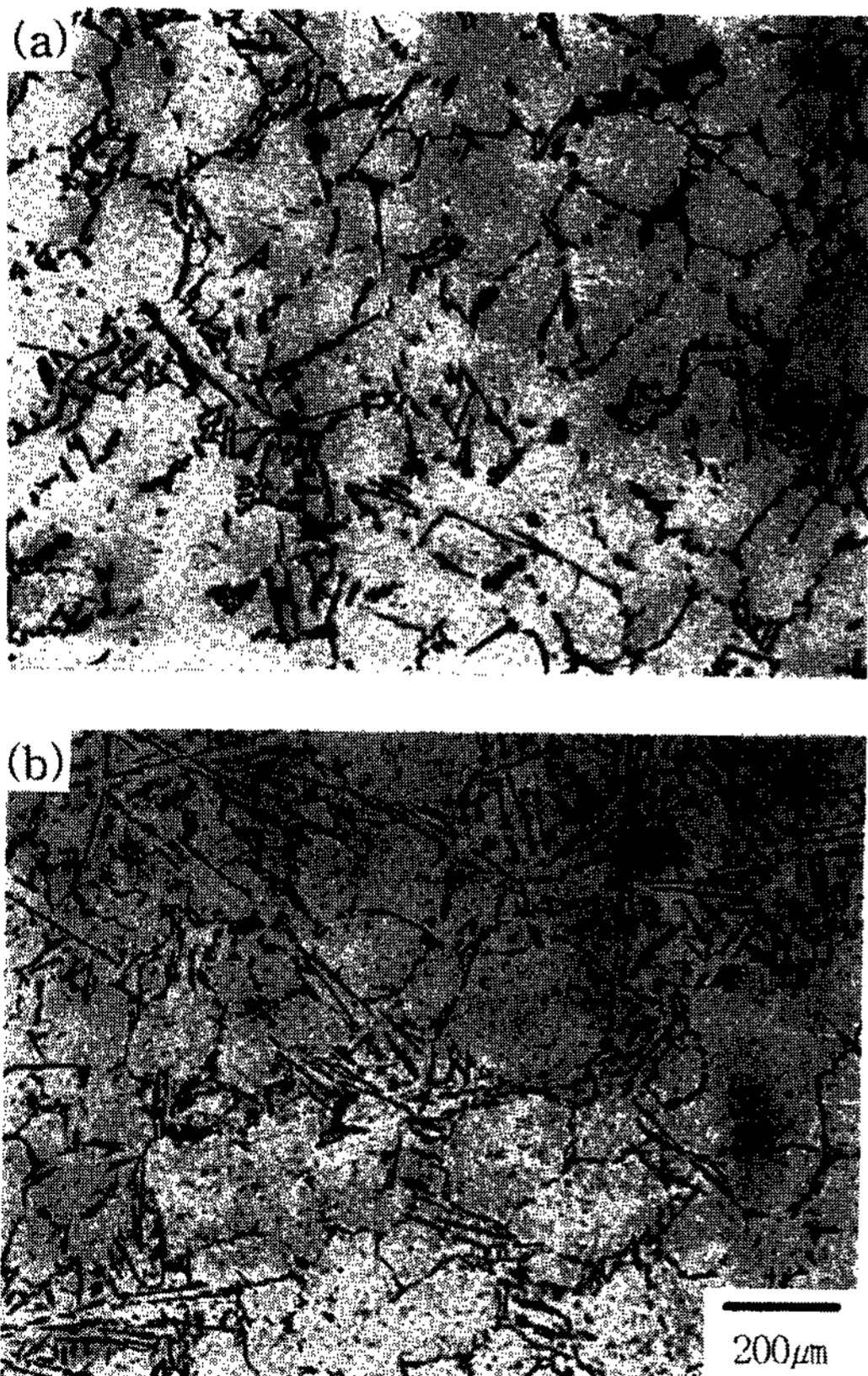


Fig. 4. Microstructures of A356 alloy as a function of rotating speed of permanent magnet in air cooling.  
(a) 0rpm (b) 3000rpm

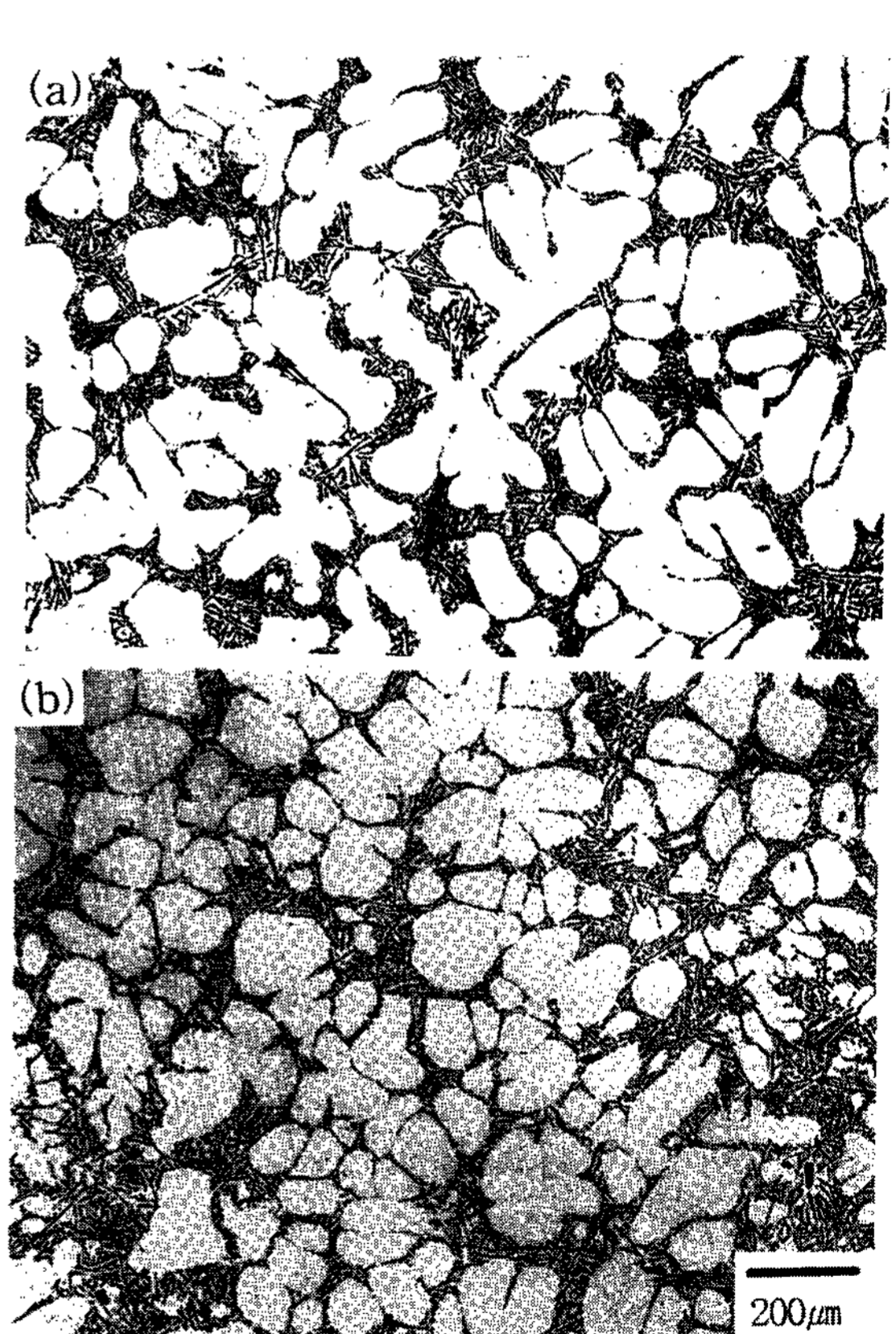


Fig. 5. Microstructures of A356 alloy as a function of rotating speed of permanent magnet in water cooling.  
(a) 0rpm (b) 3000rpm

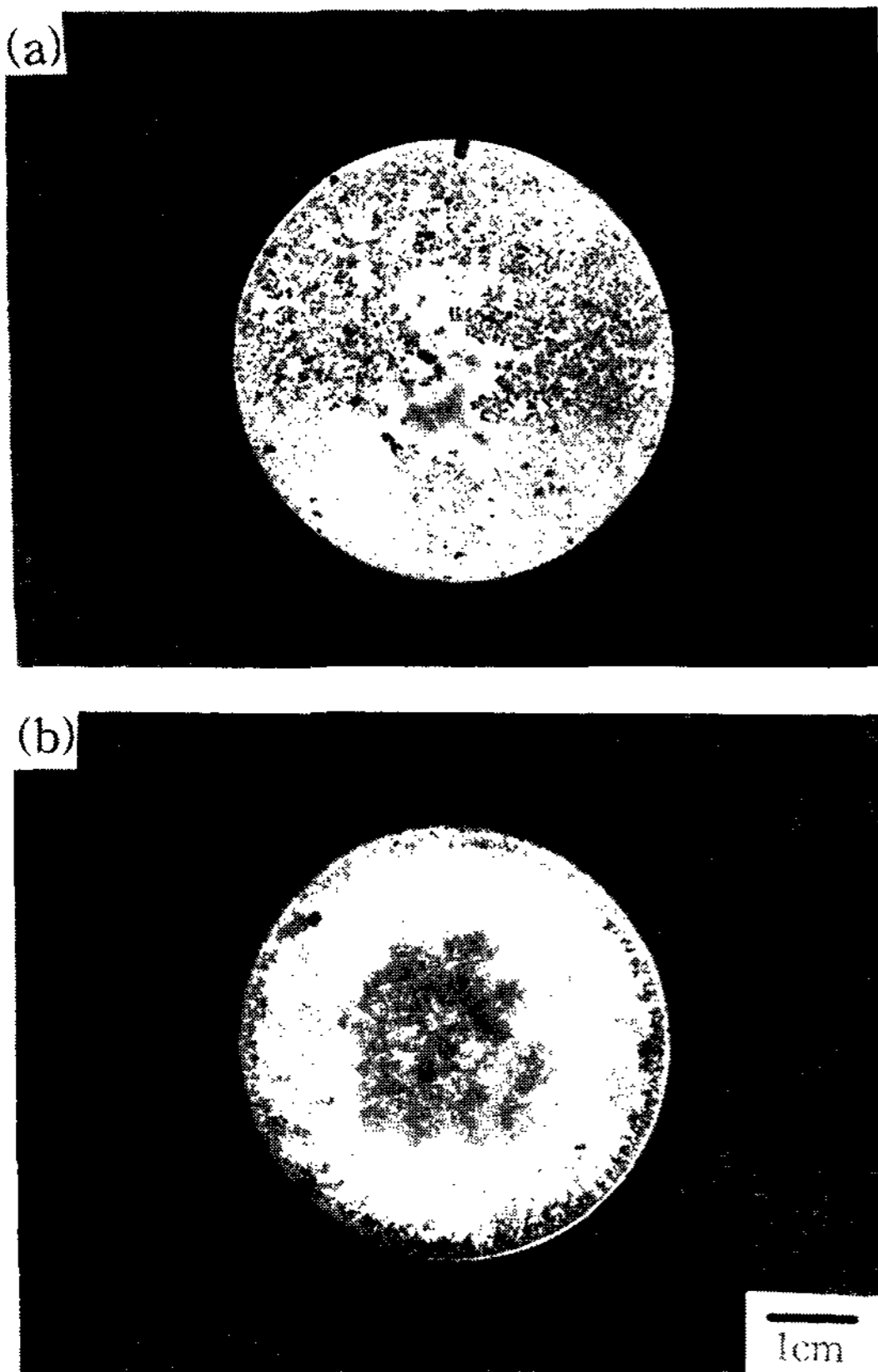


Fig. 6. Horizontal cross section of Al-25wt%Si alloy as a function of rotating speed of permanent magnet.

(a) 0rpm (b) 3000rpm

Fig. 7은 영구자석의 회전에 의한 교반을 실시하지 않은 상태에서 공냉한 조직이며, Fig. 8은 영구자석의 회전에 의해 3000rpm으로 공정온도까지 교반후 공냉한 경우의 부위별 조직사진이다. Fig. 7의 영구자석의 회전에 의한 교반을 하지 않았을 경우 초정 Si입자의 형상이 부위별로 큰 차이를 보이지 않고 균일하고 조대하게 분포되어 있다. 그러나 Fig. 8의 영구자석의 회전(3000rpm)에 의해 교반한 경우 Fig. 6(b)에서와 같이 초정 Si입자가 바깥쪽으로 편재된 경향을 보여 주며, 주조재의 가운데 부위에서는 초정 Si입자가 관찰되지 않고 초정 α조직이 존재하는 아공정조직을 보여 주고 있다. Fig. 9는 영구자석의 회전(3000rpm)에 의해 공정온도까지 교반후 공정온도에서 수냉한 조직이다. 전체적으로 공냉한 조직과 비슷한 양상을 보이고 있으며, 특

히 주조재의 가운데 부위에서는 초정 Si입자는 관찰되지 않고 미세한 공정조직내에 초정 α조직이 잘 발달된 모습을 보여 준다.

Al-25wt%Si조성의 경우 초정 Si입자가 외벽으로 몰리는 원인으로 첫째, 반응고 온도구간에서 구성물질의 비중차이에 따른 분리, 둘째, 용기의 외벽에 의한 과냉효과, 셋째, 반응고합금 구성물질의 자성특성 차이에 따른 분리 등을 예상할 수 있다. 이중 첫째, 비중차이에 따른 분리를 고려해 보면 Al은 2.70g/cm<sup>3</sup>, Si은 2.33g/cm<sup>3</sup>의 비중을 갖고 있으며, 비중에 따라서 분리된다면 회전에 의한 원심력으로서 비중이 낮은 초정 Si입자가 외벽이 아닌 중간부위로 몰려있어야 함으로 비중에 의한 분리현상은 아닌 것으로 판단된다. 둘째, 용기의 외벽에 의한 과냉효과를 고려해 보면 Fig. 6(a)의 교반속도가 0인 경우에

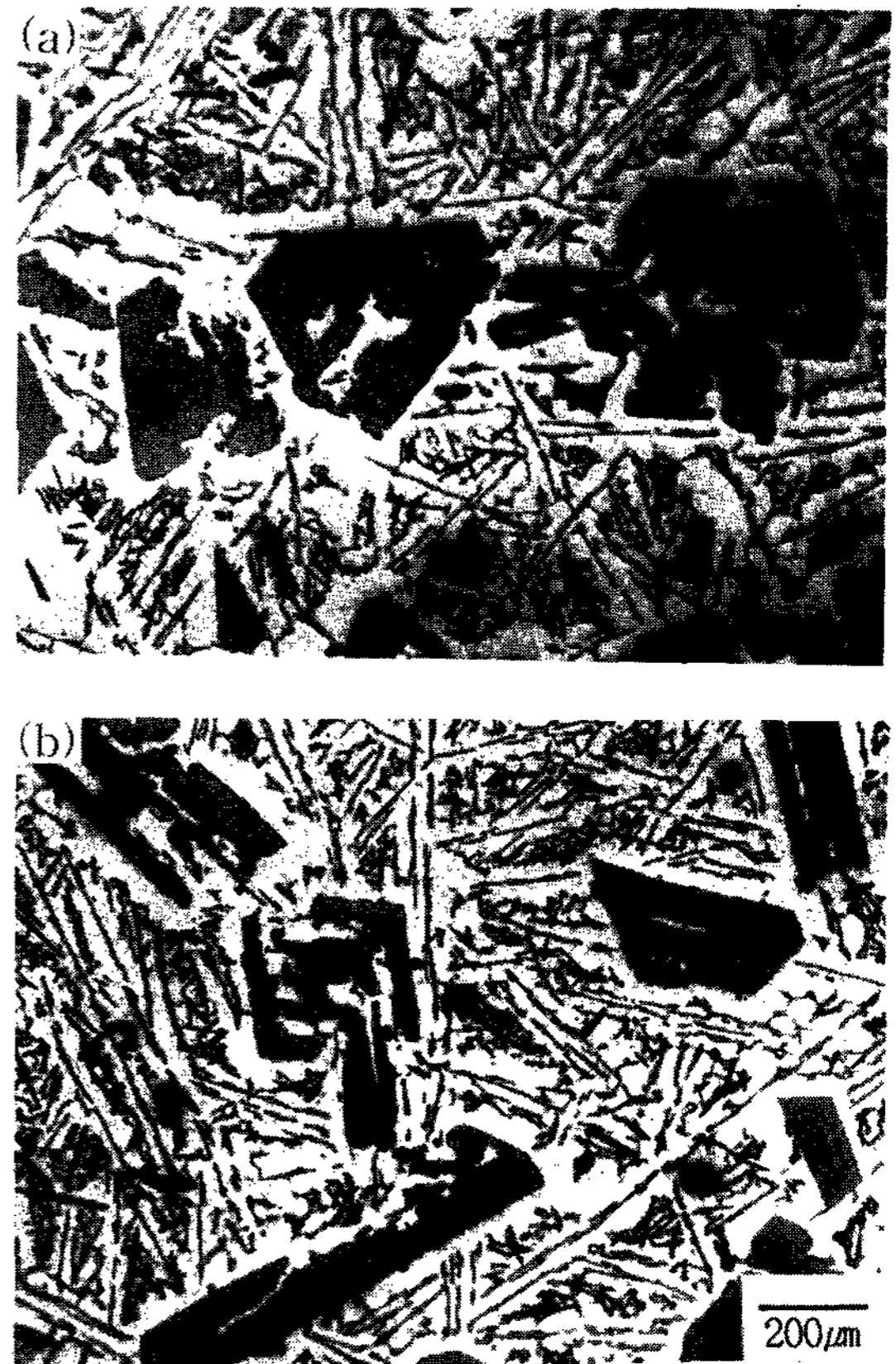
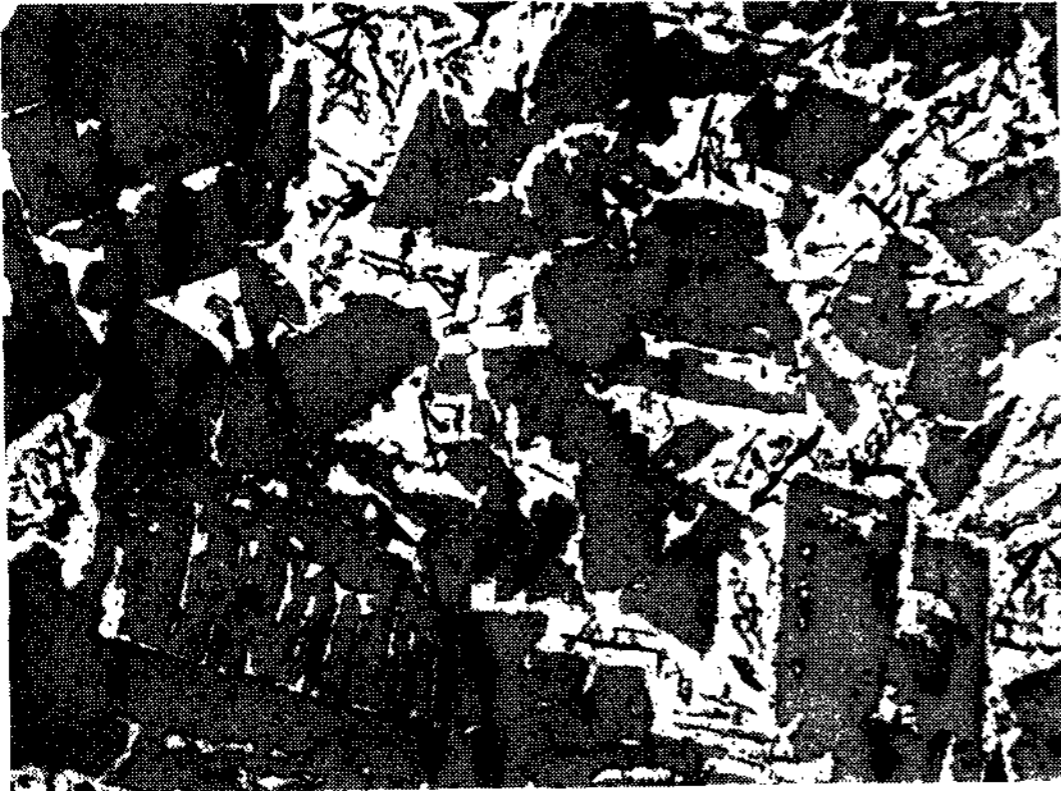


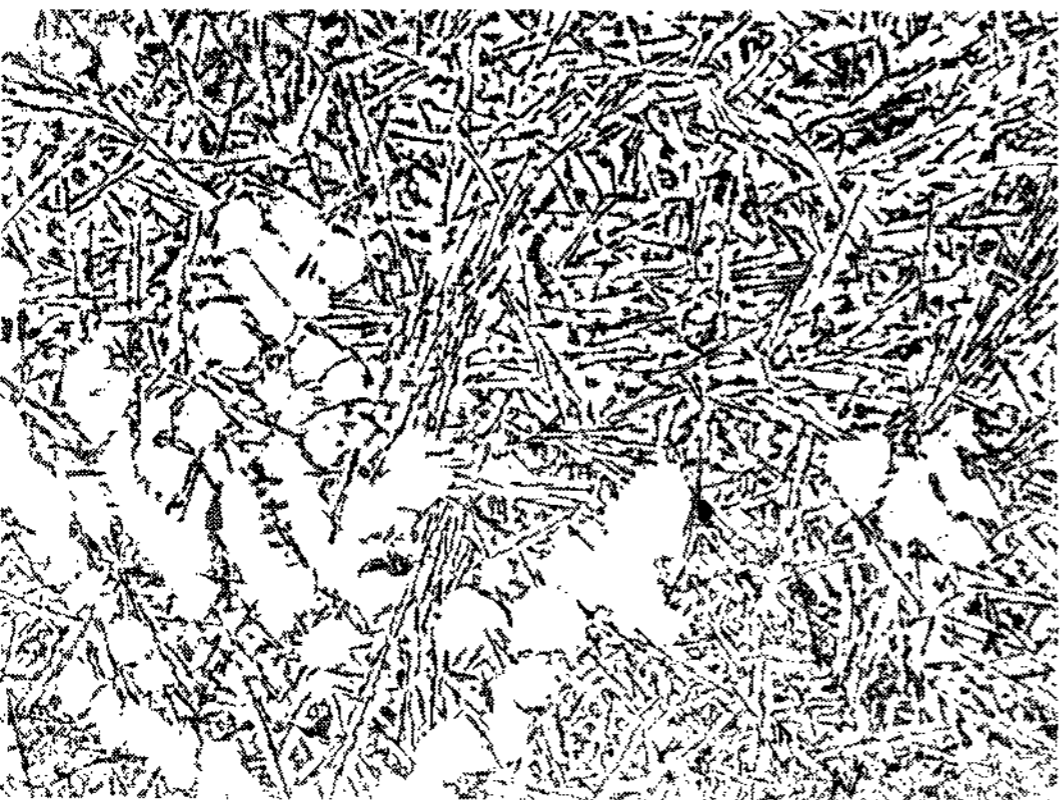
Fig. 7. Microstructures of Al-25wt%Si alloy air-cooled without agitation.

(a) center part (b) surface part

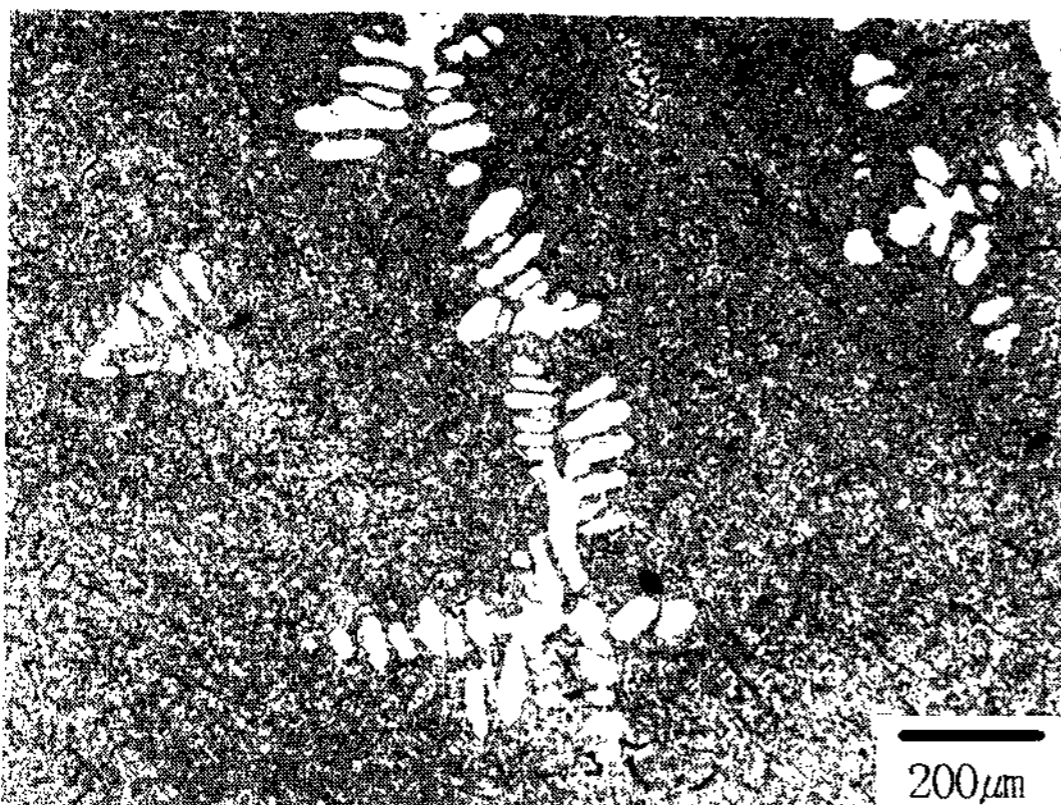




(a)



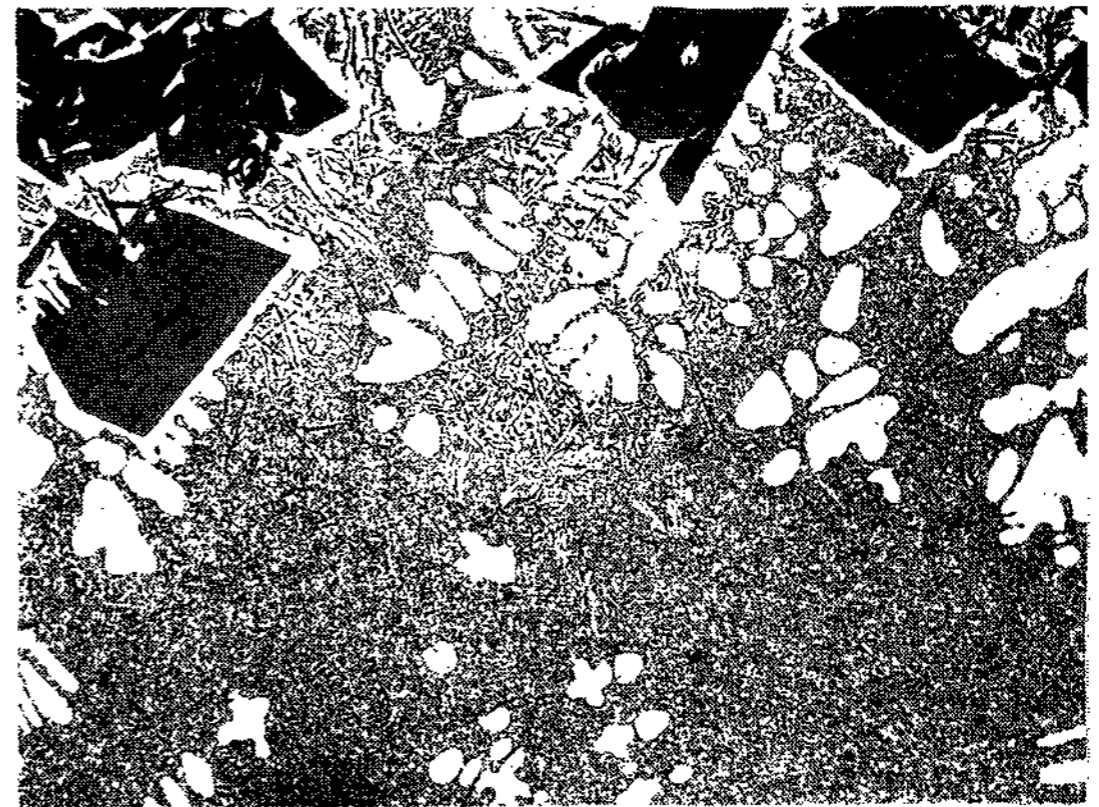
(b)



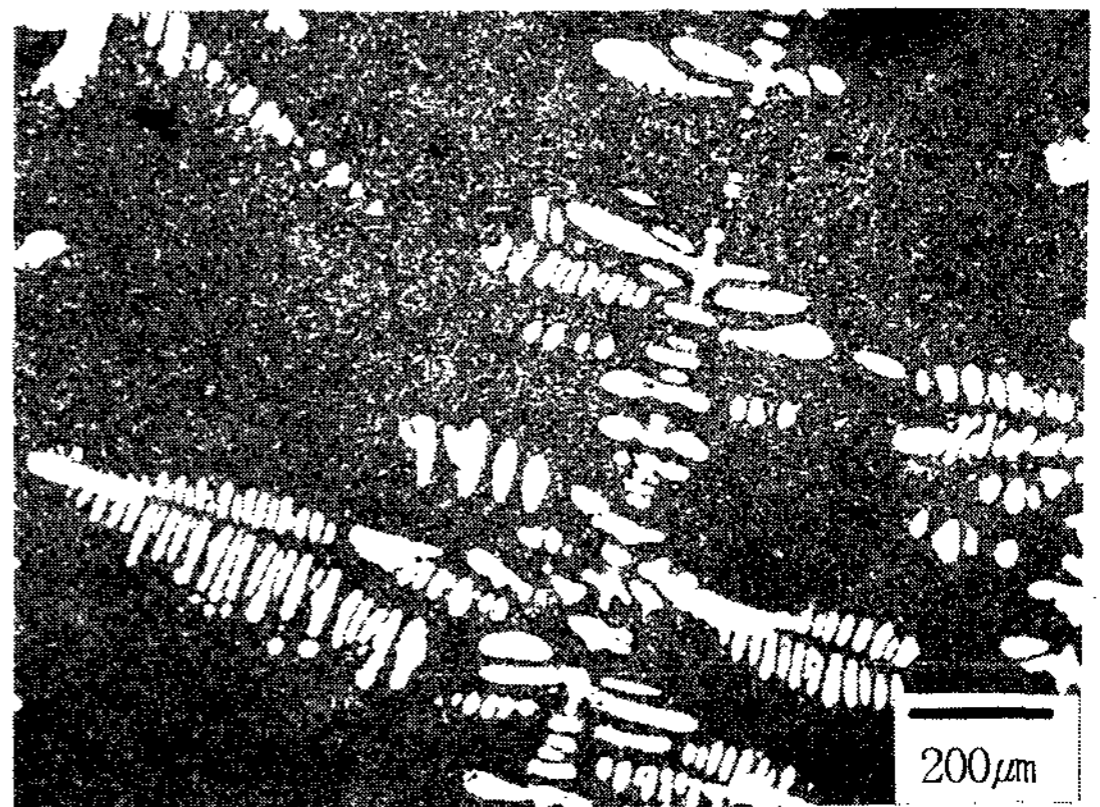
(c)

Fig. 8. Microstructures of Al-25wt%Si alloy at 3000rpm in air cooling.

(a) surface part (b) middle part  
(c) center part



(a)



(b)

Fig. 9. Microstructures of Al-25wt%Si alloy at 3000 rpm in water cooling.

(a) surface part (b) center part

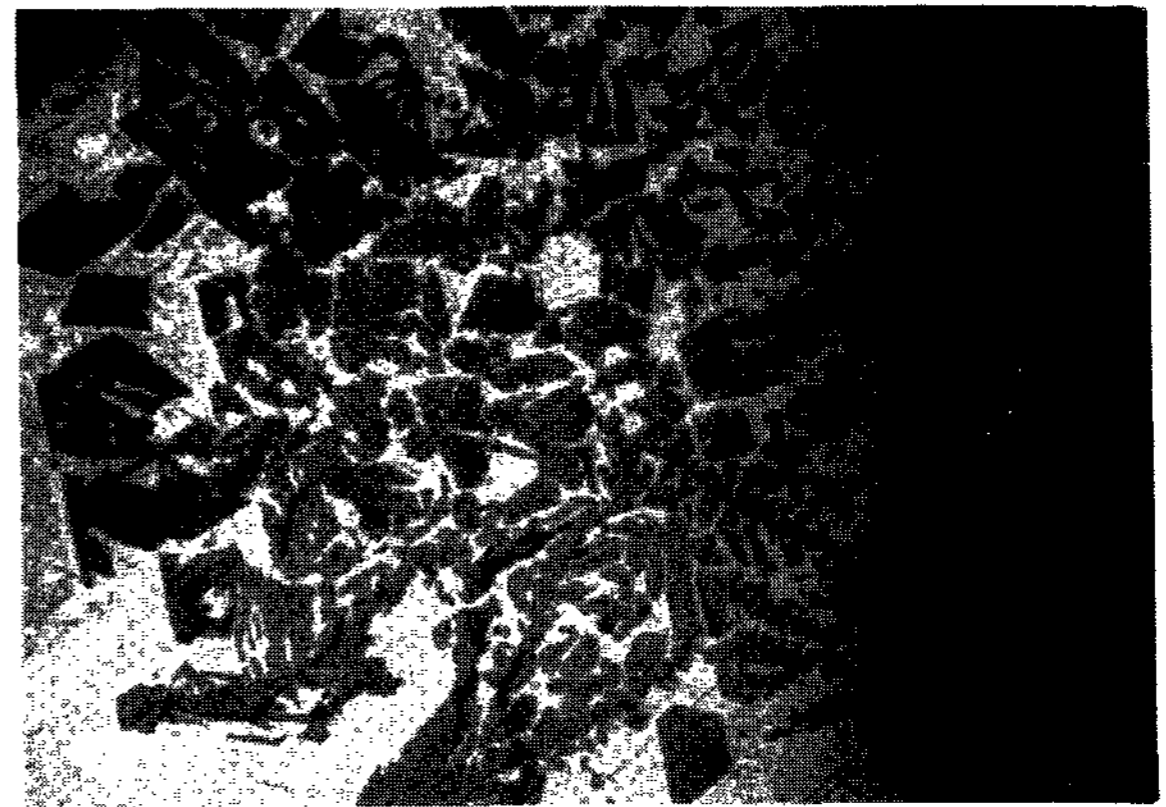
있어서 교반이 수행되었을 때와 동일한 과냉효과를 가지는 데도 불구하고 분리현상이 나타나지 않는 것으로 미루어 과냉에 의한 현상도 아닌 것으로 판단되어 진다. 따라서 본 연구에 의한 초정 Si입자의 분리현상을 반응고합금 구성성분의 자성 특성차이에 의한 분리로 판단될 수 있다. 淺井滋生[12]도 전자기력을 이용한 Al합금의 주조실험에서 유사한 현상을 보고 하였다. 앞절의 교반원리(Fig. 2)에서도 언급된 바와 같이 영구자석의 회전에 의하여 금속 slurry에는 크게 두 방향으로 전자기력 유도력이 발생된다. 즉 회전력을 유발하는 힘  $F_1$  이외에  $J_z$ 과  $B_\theta$ 에 의한 전자기력에 의해  $F_2$ 가 발생하며, 이  $F_2$ 의 주된 작용방향이 용탕의 내부방향, 즉 중심방향으로 향

하게 된다. 또한 금속과 초정 Si입자사이에서 금속에는 전자기력이 작용하지만 전기전도도가 작은 초정 Si입자에는 전류가 흐르지 않기때문에 전자기력이 작용하지 않는다. 그러므로 초정 Si입자는 그것을 둘러싸는 금속에서 전자 아르키메데스력을 받아 중심으로 향하는 전자기력 방향과 역방향으로 이동한다. 즉, 초정 Si입자가 전자기력 인가방향과는 역방향인 바깥쪽으로 편재하게 된다. 이와같은 원리는 초정 Si입자가 바깥쪽으로 물리는 이유에 대한 해석으로 가장 적절한 것으로 판단되며, 이와같은 초정 Si입자의 편재현상은 추후 내마모 특성이 요구되는 재료의 개발 또는 응용시 각광을 받을 것으로 예상된다. Fig. 10은 영구자석의 회전속도 변화에 따른 초정 Si입자 편재 거동을 나타낸 조직사진이다. 영구자석의 회전속도가 1000rpm에 비하여 2000rpm과 3000rpm으로 증가함에 따라 전자기적 유도력( $F_2$ )의 증가로 인하여 초정 Si입자가 편재되는 두께층은 조밀화가 진행되는 경향을 보여준다. 또한 초정 Si입자가 편재된 부위에서의 초정 Si입자 크기는 바깥 벽면부위 쪽이 내부 slurry부위쪽에 비하여 작은 것을 관찰할 수 있었다. 그리고 회전속도의 증가시 초정 Si내부에 slurry회전방향으로 crack 등의 결함이 증가하는 현상을 볼 수 있었으며, 이는 영구자석의 회전속도가 증가함에 따라 교반력의 증가로 인하여 초정 Si의 파쇄경향이 증가하기 때문으로 판단된다.

### 3.2 응고시 열분석

본 실험에서는 A356합금과 Al-25wt%Si합금을 영구자석의 회전에 의한 교반에 의하여 고액공존구간에서 교반시 냉각거동을 고찰하였다. 이때 온도측정은 mold의 하부 중심부에서 20mm의 높이에서 직경 0.55mm, K type열전대를 이용하여 측정하였다. 영구자석의 회전에 의한 교반을 하지않은 상태에서 냉각곡선을 측정한 결과 A356합금은 액상선온도(liquidus temperature)가 612℃, 고상선온도(solidus temperature)가 572℃이며, Al-25wt%Si합금은 액상선온도(liquidus temperature)가 734℃, 고상선온도(solidus temperature)가 575℃ 이다.

Fig. 11과 Fig. 12는 A356합금과 Al-25wt%Si합금을 영구자석의 회전에 의한 교반시 응고시



(a)



(b)

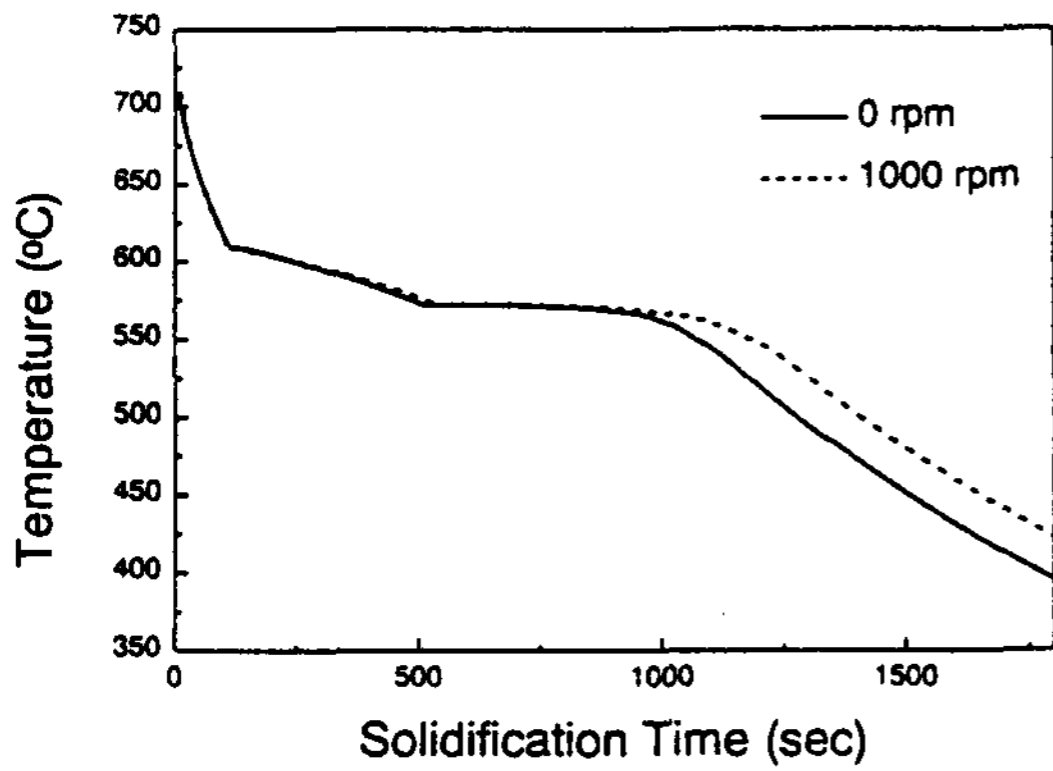


(c)

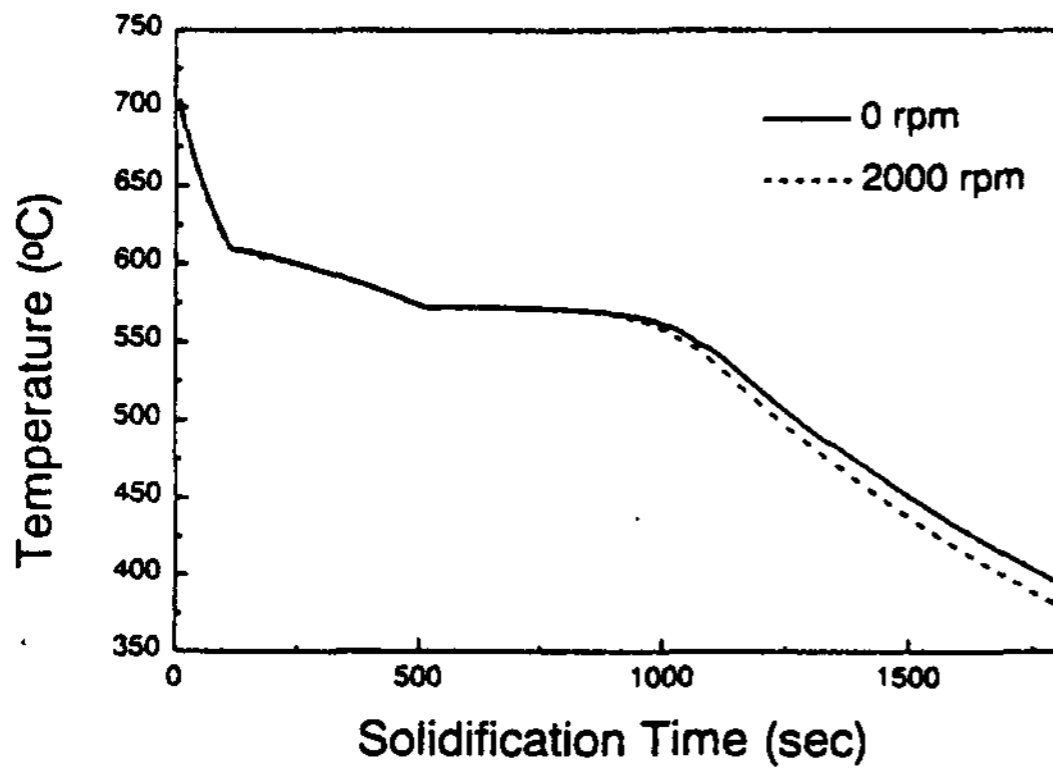
Fig. 10. Detailed microstructures of surface part in Al-25wt%Si alloy with increasing rotating speed of permanent magnet.

(a) 1000rpm (b) 2000rpm (c) 3000rpm

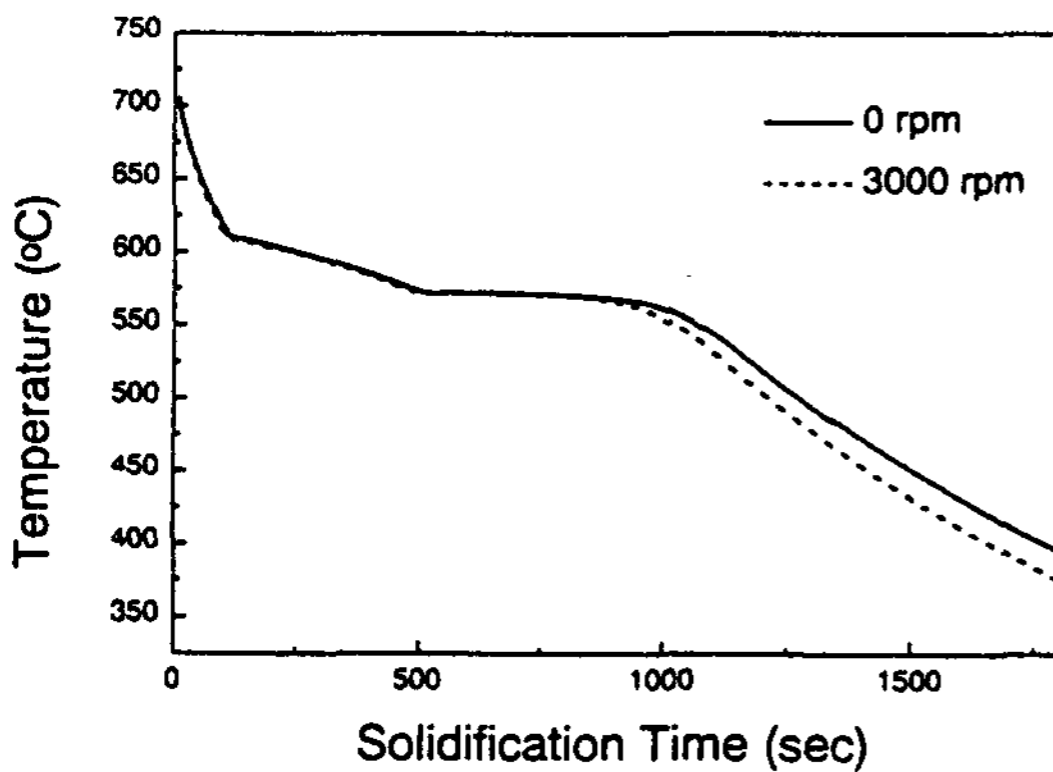




(a)

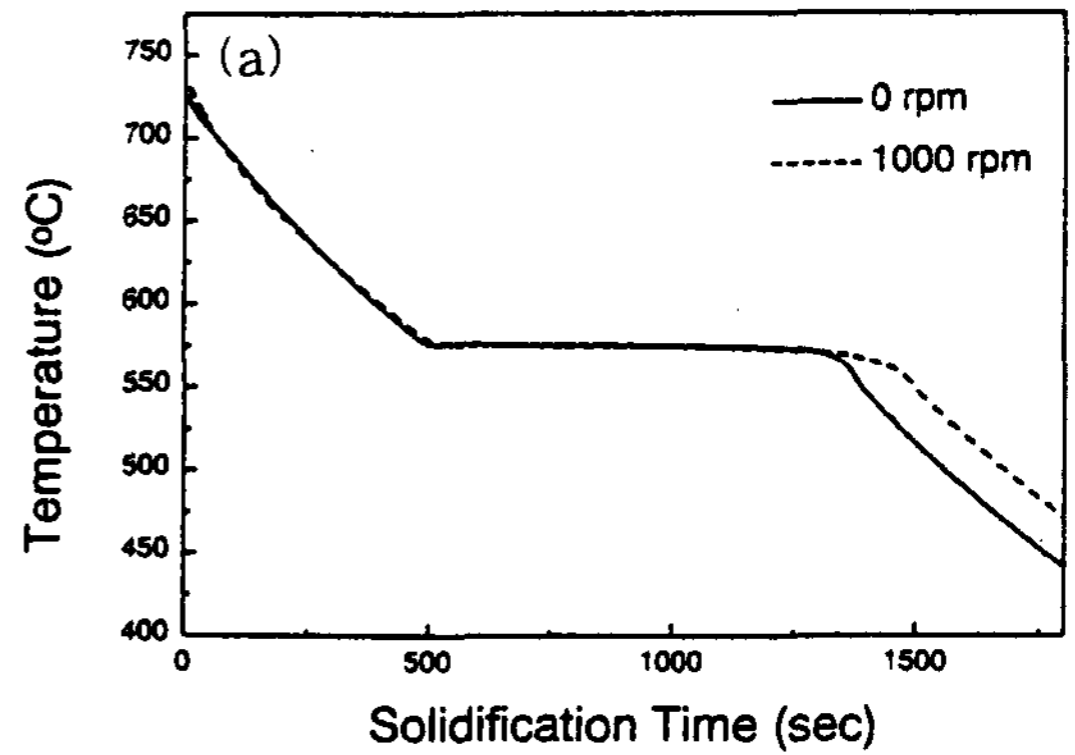


(b)

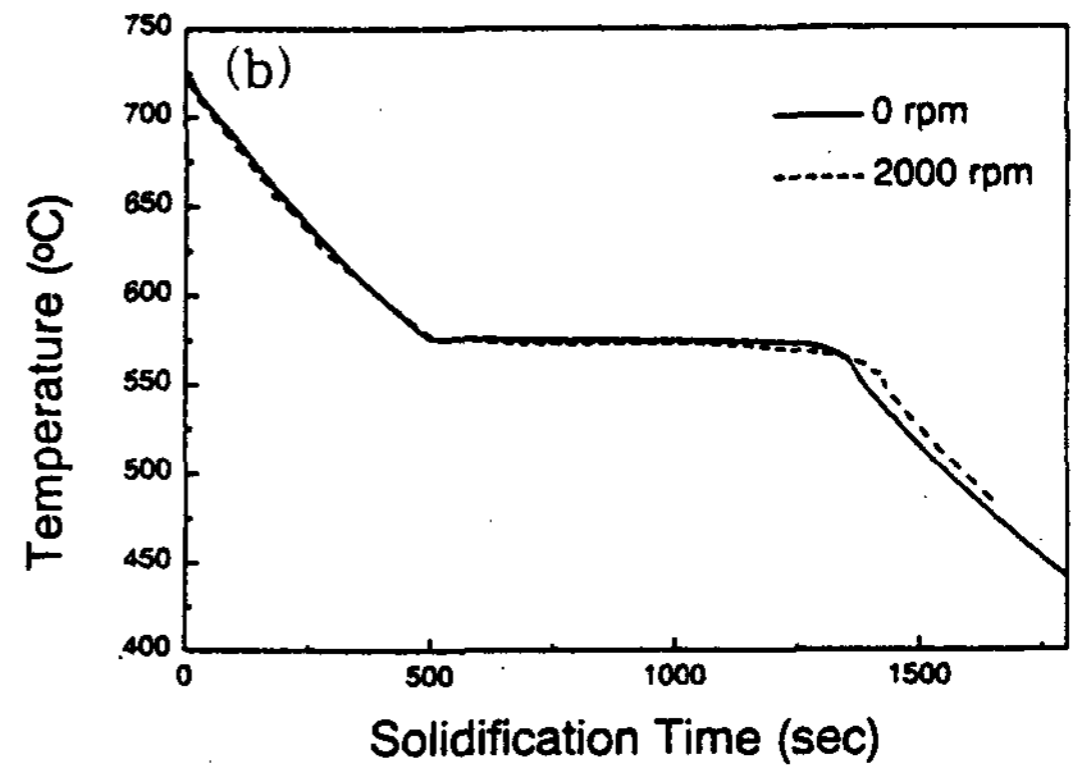


(c)

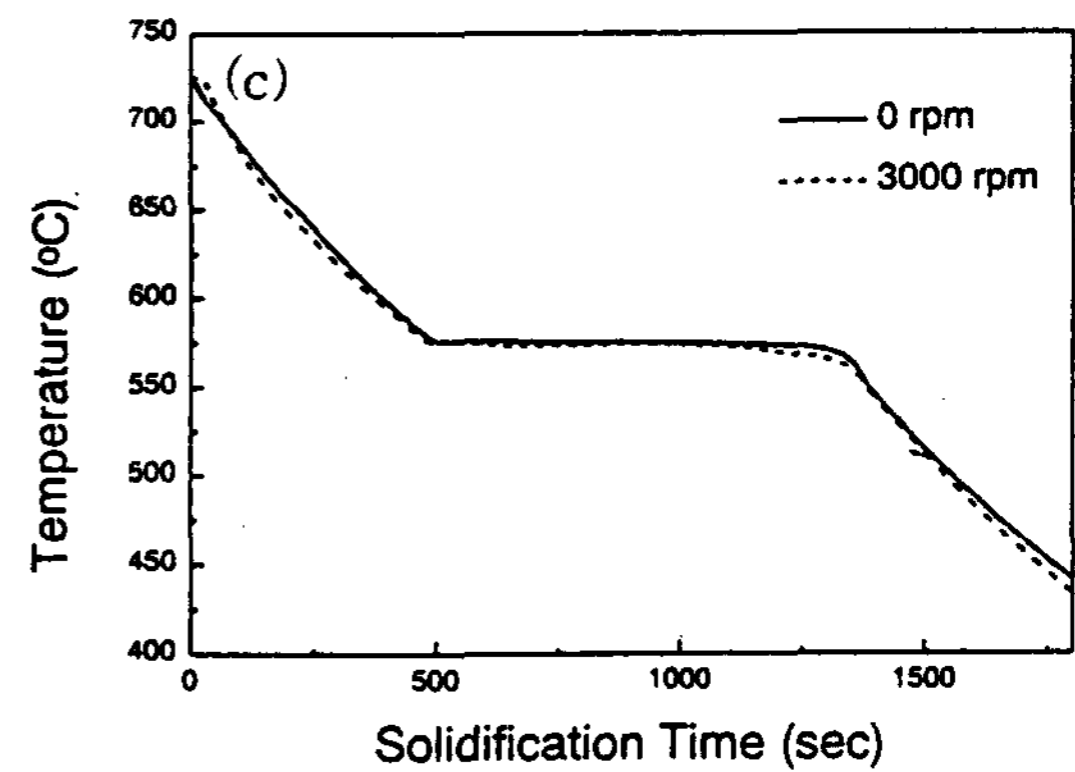
Fig. 11. Cooling curves of A356 alloy with increasing rotating speed of permanent magnet.  
(a) 0rpm and 1000rpm  
(b) 0rpm and 2000rpm  
(c) 0rpm and 3000rpm



(a)



(b)



(c)

Fig. 12. Cooling curves of Al-25wt%Si alloy with increasing rotating speed of permanent magnet.  
(a) 0rpm and 1000rpm  
(b) 0rpm and 2000rpm  
(c) 0rpm and 3000rpm



간에 따른 온도 변화를 나타낸 것이다. 측정결과 A356합금의 경우 영구자석의 회전속도가 0일때에 비하여 회전속도가 1000rpm인 경우 응고속도가 감소하였으며, 2000rpm과 3000rpm으로 영구자석의 회전속도가 증가함에 따라 응고속도는 다시 증가하는 경향을 보여 주고 있다. 그리고 이와 같은 경향은 Al-25wt%Si합금의 경우에도 유사한 경향을 나타내고 있음을 Fig. 12에서 알 수 있다. 또한 응고시 공정온도는 영구자석의 회전속도의 변화에 따라 큰 변화를 보이지는 않고 일정한 값을 나타낸다. 기존의 결과[11]에 의하면 영구자석의 회전속도가 증가할수록 응고속도는 점차 감소하는 경향을 보이는 것으로 알려지고 있다. 즉, 회전자의 회전속도가 증가함에 따라 비례하여 증가하는 자속변화에 의해 유도 전류값이 증가하고 이에따른 Joule열의 발생이 증가함에 의해 응고속도가 지연되는 것으로 설명되고 있다. 본 실험에서는 영구자석의 회전속도가 1000rpm 일때는 응고속도가 지연되었으나, 2000rpm이상에서는 응고속도가 증가하였다. 이러한 현상은 반응용 합금내부에서 발생하는 Joule 이외에 다른 영향이 함께 나타나는 것으로 추측되며, 향후 이에 대한 연구가 필요하리라 생각된다.

#### 4. 결 론

영구자석의 회전에 의한 반응고 합금제조시 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) Alnico영구자석을 이용하여 회전속도가 최대 3000rpm인 반응고합금 제조장비를 제작하여 용탕의 교반시 용탕의 응고거동을 고찰하였다.
- 2) 영구자석의 회전속도가 증가됨에 따라 교반효과가 증가하였으며, 내부 미세기공이 감소하였다.
- 3) 아공정 조성인 A356합금의 경우 영구자석의 회전에 의한 교반시 수지상정조직이 구형화되는 경향을 보여 주었다.

4) 과공정 조성인 Al-25%Si합금의 경우 영구자석의 회전에 의한 교반시 전자기적인 힘에 의하여 초정 Si이 용탕의 바깥쪽으로 분리되었다.

5) 영구자석의 회전에 의한 교반시 회전속도가 0인 경우에 비하여 회전속도가 1000rpm인 경우 응고속도가 감소되었으며, 3000rpm으로 증가됨에 따라 응고속도가 다시 증가되었다.

#### 참 고 문 헌

- [ 1 ] D. B. Spencer : Ph. D. Thesis, Massachusetts Inst. of Technology, Cambridge, MA, (1971)
- [ 2 ] D. B. Spencer, R. Mehrabian and M. C. Flemings : Metall. Trans., 3 (1972) 1925-1932
- [ 3 ] P. A. Joly, Ph. D. Thesis, Massachusetts Inst. of Technology, Cambridge, MA, (1974)
- [ 4 ] P. A. Joly and R. Mehrabian : J. Mater. Sci., 11 (1976) 1393-1418
- [ 5 ] M. C. Flemings, R. G. Riek and K. P. Young : Mater. Sci. Eng., 25 (1976) 103
- [ 6 ] V. Laxmanan and M. C. Flemings : Metall. Trans. A, 11A (1980) 1927-1937
- [ 7 ] J. Winter, J. A. Dantzig and D. E. Tyler : UK Patent GB 2042 386 A (1980)
- [ 8 ] K. P. Young, D. E. Tyler, H. P. Cheskis and W. G. Watson : U. S. Patent 4, 482, 012, (1984)
- [ 9 ] J. E. Kelley, K. E. Blazek and K. P. Young : U. S. Patent 5, 178, 204 (1993)
- [ 10 ] J. L. Meyer : U. S. Patent 5,219,018 (1993) 4, 482, 012, (1984)
- [ 11 ] Charles Vives : Metall. Trans. B, vol.23B (1992) 189-206
- [ 12 ] 淺井滋生 : 新素材, (1995) 7월호 11-14