

## 경사냉각판으로 제조된 반응고금속의 미세조직

김 권 섭, 임 수 근

경상대학교 재료공학부

항공기부품기술연구센터

### 1. 서론

최근, 지구환경문제 등으로 인하여 재료의 경량화, 고강도화 및 리사이클성에 대한 요구가 크게 부각되고 있으며 이에 부응하는 기술로서 고액공존상태에서 가공하는 반응용/반응고 가공기술에 대한 기대가 높아지고 있다. 액상과 고상이 공존하는 온도영역에서 금속재료를 성형하는 기술인 반응고금속 성형기술(semi-solid metal forming)은 1970년대 초 미국 M.I.T의 Flemings등에 의해 본격적으로 개발되기 시작하였는데 [1,2] 용융 금속을 응고시키는 도중에 강한 교반력을 가하여 수지상 조직을 파괴하고, 구형에 가까운 미세한 초정 고상 입자들이 균일하게 분산된 고액 공존의 슬러리 상태에서 성형 가공하는 기술이다. [3]

반응고금속을 제조하는 방법 [4-6] 으로는 기계적 교반법, 전자기적 교반법이 주로 이용되고 있고 이외에도 SIMA법, 진동법, 급냉응고법 등이 있는 것으로 보고되어지고 있다. 기계적 교반법은 간단한 원리로 높은 전단력을 낼수 있고 구형화 조직을 쉽게 얻을수 있는 등의 장점은 있으나 교반자의 마모, 불순물의 개입, 품질의 저하, 공정제어의 난이성 등에서 제약이 있다. 전자기적 교반법은 불순물 및 산화물등의 개입을 억제할 수 있고 정확한 전단력을 억제할 수 있지만 막대한 양의 전력소모가 요구되어 반응고 합금의 제조원가가 커지는 단점이 있다.

따라서, 본 연구에서는 기존의 반응고금속 제조방법보다 간단한 방법으로 미세한 입상의 초정을 생성시켜 텍소캐스팅에 제공할 수 있는 주괴의 제조 조건을 확립하고자 하였다. 즉, 경사냉각판에 용탕을 흘려 균질 미세한 입상의 초정을 유리시키기 위한 조건으로서 냉각판 각도, 주조온도, 용탕통과길이 등을 변화시켜 최적의 주괴제조 조건을 조사 하였다.

### 2. 실험방법

본 연구에서는 반응고금속 제조장치를 독자적으로 설계 및 제작하였다. 장치는 크게 용해로, 냉각판, 연속주조장치로 구분되며 냉각판을 통과하여 만들어진 입상의 초정을 연속주조장치를 이용하여 원주형의 반응고금속을 제조하는 것이다.

Fig. 1에서 본 연구에 이용된 장치의 모식도를 나타내었다. 용해로는 저항식 전기로를 이

용하였고 로내의 용탕의 온도는 직접 열전대를 용탕에 삽입하여 그 온도를 측정하였다. 냉각판은 두께 5mm의 Cu를 이용하여 만들었고 냉각판의 밑부분은 Cu로 된 직경 5mm의 파이프를 부착시켜 냉각수 7~8 l/min를 흘러주었다. 연속주조장치는 수직형으로 제작을 하였으며 원활한 연속주조를 위하여 dummy bar의 속도를 조절 할 수 있게 되어있다. 연속주조된 빌렛은 Cu주형에서 1차 냉각하고 수조에서 2차냉각 하였다. 이 장치는 결정유리설 [7] 을 응용한 것으로서 먼저 일정 용융온도 까지 가열된 용탕이 탕면제어봉의 작용으로 급탕관으로 밀려나게 되어 경사진 냉각판상을 타고 흐르면서 냉각판상에서 결정이 유리되고 초정이 정출하여 골고루 퍼지게 되는 것이다. 냉각판상을 타고 흐른 용탕은 일차적으로 텀디쉬에서 일정높이 까지 유지가 된 후 연속주조장치를 통하여 연속으로 빌렛이 뽑혀져 나오는 것이다. 연구에 이용된 시편은 현재 상업적으로 많이 이용되고 있는 A356알루미늄 합금을 이용하였다. Table 1에 그 화학조성을 나타내었다.

균질 미세한 구형의 용고조직을 가지는 빌렛을 제작하기 위한 최적의 주조조건을 조사하기 위하여 실험의 방법을 크게 두가지로 나누었다. 첫 번째로 주조온도를 700℃, 냉각판과 용탕의 접촉길이를 30cm로 일정하게 하고 냉각판의 각도의 변화 및 냉각판상에 B.N(Boron nitride)의 도포 유·무에 따른 조직의 변화를 관찰하였다. 이때, 냉각판의 각도는 각각 40°, 50°, 60° 로 변화시켜 실험을 하였다. 두 번째는 냉각판상에 B.N을 도포하고 냉각판의 각도를 50°, 냉각판과 용탕이 접촉하는 길이를 20cm로 일정하게 하고 주조온도를 630℃, 640℃, 650℃로 변화시켜 실험을 하였다. 그리고 제조한 빌렛을 이용하여 반응고 온도 까지 가열, 등온 유지하여 조직변화를 관찰하였다.

미세조직은 빌렛의 하단에서부터 50mm위치에서 절단하여 연마한 다음 0.5% HF의 부식액으로 수초간 부식시켜 광학현미경(NIKON, KPIPHOT)으로 빌렛 표면부에서 중심부까지의 조직을 비교 관찰하였다. 경도 시험은 미세경도 시험기(AKASHI, MVK-E3)를 이용하여 하중 100g, 시간 10초의 조건에서 경도를 측정하였다. 경도는 동일 조건당 5회 측정하여 최대 및 최소치를 제외한 나머지 값의 평균치로 경도값을 구하였다.

Image analyzer를 사용하여 초정  $\alpha$  상의 면적을 구하여 동일한 면적의 원으로 환산한 뒤 그 원의 지름의 평균값을 구하여 초정  $\alpha$  상의 크기를 나타내는 척도로 사용하였다. 구상화정도는 입자의 단축과 장축의 비(aspect ratio)로 나타내었다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1. B.N을 도포한 냉각판의 경사각의 영향

Fig.2에 주조온도를 700℃, 냉각판과 용탕의 접촉 길이를 30cm로 일정하게 하고 B.N을 도포한 냉각판의 각도에 따른 미세조직의 변화를 나타내었다. 냉각판에 B.N을 바른 경우의 내부 미세조직은 전체적으로 구형의 형태를 가지지 못하고 rosette형상을 띄는 것으로 나타났

으며 초정  $\alpha$ 의 크기는 각도의 변화에 따라 큰 차이는 보이지 않았지만  $40^\circ$ 에서는 약  $64\mu\text{m}$ 이고  $50^\circ$ 에서는  $66\mu\text{m}$ ,  $60^\circ$ 에서는  $67\mu\text{m}$ 로서 각도가 작을수록 조금은 미세해지는 것으로 나타났다. 이것은 용탕의 온도가 높고 냉각관상에 B.N을 바름으로 인해서 상대적으로 냉각관에 냉각수를 흘려주더라도 과냉의 효과를 덜 받아서 많은 양의 초정이 정출하지 못한 것으로 생각된다. 그리고 냉각관의 각도가 작을수록 초정의 크기가 조금 미세해진 것은 용탕이 냉각관상에서 흘러내리는 속도가 늦기 때문에 냉각효과가 더욱 크게 된 것으로 생각한다.

냉각관의 각도에 따른 초정의 크기 및 경도값을 Fig.3에 나타내었다. 경도값은 냉각관의 각도가 작을수록 초정의 크기에 반비례하여 증가함을 보였다. Fig.4는 초정의 구형화 정도를 나타낸 것으로서 각도가 작은  $40^\circ$ 에서 1.48로 이들중 구형화 정도가 좋게 나타났다. 이것 역시 생성된 초정이 냉각관상에 접촉시간이 길어진 것에 기인하는 것으로 생각된다.

### 3.2. B.N을 도포하지 않은 냉각관의 경사각의 영향

Fig.5는 주조온도  $700^\circ\text{C}$ , 냉각관과 용탕의 접촉길이를  $30\text{cm}$ 로 일정하게 하고 B.N을 도포하지 않은 냉각관의 각도 변화에 따른 미세조직의 변화를 나타낸 것이다. 냉각관에 B.N을 도포한 경우와 비교하여, 미세한 구형의 초정이 생성된 것을 알 수 있으며 이것은 냉각관상에서 과냉의 효과에 의하여 초정이 더욱 많이 정출한 것으로 생각된다. 그러나, 냉각관상에 B.N을 바르지 않은 경우는 냉각관상에서 용탕이 일부 굳어버리는 현상이 나타나서 연속주조를 하는데 문제점으로 발생하였다. 이것은 냉각관상의 냉각속도가 빨라서 용탕의 점성이 증가하고 냉각관과 용탕의 접촉길이가 길기 때문에 냉각관 하부에 응고셀이 형성되고 정출한 초정은 용탕의 점성에 의해 이동이 어려워져서 응고셀이 더욱더 커지기 때문이다. 냉각관 각도에 따른 초정의 크기변화는 냉각관상에 B.N을 도포하지 않은 경우는 각도가 큰  $60^\circ$ 에서 가장 미세해 졌는데 이와 같이 냉각관의 경사각이 클수록 초정이 미세해 지는 것은 용탕이 냉각관상을 흘러내리면서 과냉의 효과와 냉각관의 각도가 크기 때문에 상대적으로 냉각관상에서 굳어버리는 양이 적었기 때문이다. Fig.6에 초정의 크기와 경도값의 변화를 그래프로 나타내었는데 초정의 크기는 각도가  $40^\circ$ 에서  $60\mu\text{m}$ ,  $50^\circ$ 에서  $54\mu\text{m}$ ,  $60^\circ$ 에서  $53\mu\text{m}$ 로 나타났으며 경도값은 초정의 크기가 작은  $60^\circ$ 에서 약 76Hv로 나타났다. 그리고 Fig.7에 초정의 구형화 정도를 나타내었는데 전체적으로 B.N을 바른 경우에 비해서 구형화가 상당히 진전이 있었고 냉각관의 각도가  $60^\circ$ 에서 1.36으로 좋은 구형도를 나타내었다.

Fig.8에 냉각관에 B.N을 도포한 경우와 도포하지 않은 경우의 냉각관상에서의 슬러리의 형상을 나타내었다.

### 3.3. 주조온도의 영향

경사냉각관에서 초정의 생성을 많게 하기 위해서는 냉각관상에서 응고셀의 생성을 방지하고 입상결정의 유리를 촉진시키는 능력이 필요하다. 냉각관의 길이가 길면 냉각관 하부에서 응고셀이 형성되고 정출한 초정이 응고셀에 걸려들게 되어 턴디쉬내로 흘러들어가는 유

리초정의 수가 감소하고 그 길이가 짧으면 냉각판상에서의 용탕의 냉각시간이 짧기 때문에 초정의 정출이 일어나기 힘든 것으로 생각된다. 따라서 냉각판상의 응고셀의 형성을 방지하기 위해서는 냉각판상에 B.N을 바르는 것이 보다 효과적인 것으로 생각된다.

Fig.9는 주조온도가 높음으로 인해서 발생하는 초정의 조대화 및 rosette형상을 방지하기 위하여 냉각판의 각도를  $50^\circ$ , 냉각판과 용탕이 접촉하는 길이를  $20\text{cm}$ 로 일정하게 하여 주조온도를  $630^\circ\text{C}$ ,  $640^\circ\text{C}$ ,  $650^\circ\text{C}$ 로 변화시켰을때의 미세조직변화를 나타낸 것이다. 이때, 냉각판을 사용함으로써 인해서 가스의 유입을 일으키고 용탕중에 흡수되어 있는 가스가 빌렛내부의 핀홀을 생성시키기 때문에 로내에서 용탕의 탈가스처리가 이루어져서 빌렛내부의 기공율을 감소시킬 필요가 있기 때문에 탈가스제를 약 0.3%첨가를 하였다. 탈가스처리는 용탕을 과열처리후 주조온도로 로냉할 때 하였다. 주조온도가 낮을수록 초정이 미세해 지며, 냉각판에서 용탕의 접촉길이를 짧게 함으로써 조직의 미세화와 구형화가 상당히 진전됨을 알 수 있었다. 이로서 냉각판상에 B.N을 바를 경우에는 주조온도를 낮추는 것이 유리하다는 것을 알 수 있다.

Fig.10에 초정의 크기와 경도값의 변화를 그래프로 나타내었다. 초정의 크기는 주조온도  $630^\circ\text{C}$ 에서  $53\mu\text{m}$ ,  $640^\circ\text{C}$ 에서  $56\mu\text{m}$  그리고  $650^\circ\text{C}$ 에서  $61\mu\text{m}$ 였으며 경도값은  $630^\circ\text{C}$ 에서 72Hv로 나타났다. 그리고 Fig. 11에 구형화 정도를 표시하였는데  $630^\circ\text{C}$ 에서 구형도가 1.4로 초정의 크기가 작을수록 구형화도 더 잘된 것으로 나타났다.

### 3.4. 재가열 · 등온유지

제작한 텍소캐스팅용 빌렛을 다이캐스팅하기 위해서는 재가열 할 필요가 있다. 따라서, 재가열 처리를 행한 후의 조직 및 초정  $\alpha$ 의 크기, 구형화의 변화에 관하여 조사하였다. 재가열 처리실험은 시료를 로의 내부에 넣어서 고상율이 50%가 되는  $582^\circ\text{C}$ 까지 가열후 수냉을 하였다. 등온 유지 실험은  $582^\circ\text{C}$ 에서 5, 15, 30분 유지후 수냉을 하였다. 재가열 전 · 후의 조직을 비교해 보면 내부의 응고조직은 초정  $\alpha$ 상의 조대화 및 입상화가 진전되었다. 또, 유지시간의 증가에 따라서 초정  $\alpha$ 상은 조대화 하였다. 그것은 재가열전에 비하여 서로 이웃한  $\alpha$ 상 및 가열시 합체한  $\alpha$ 상간의 공정상이 공정온도 이상으로 가열시킴으로 인하여 용해하고, 그 용해 초기에 공정상이  $\alpha$ 상입자를 덮어서 가두는 역할을 하는 것으로 생각된다. 또, 재가열 후의 초정은 대부분 입상화 하고 있기 때문에 다이캐스팅 시의 유동성도 양호할 것으로 생각된다.

Fig. 12에 재가열 전 · 후에서의 빌렛의 미세조직을 나타내었다. 가열 전에는  $53\mu\text{m}$ 였던 조직이 가열후 곧바로 수냉을 했을 경우에는  $75\mu\text{m}$ 였으며, 5분 유지한 경우는  $100\mu\text{m}$ , 15분 유지한 경우는  $110\mu\text{m}$ , 30분 유지한 경우는  $120\mu\text{m}$ 이 되었다. 그리고, Fig.13에 초정  $\alpha$ 의 크기 및 구형화정도를 표시했는데 조직이 조대해짐으로 인하여 구형화도 잘 된 것을 알 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 균질미세한 입상조직을 가지는 티스캐스팅용 빌렛을 제작하기 위하여 용탕을 경사냉각판을 통과시켜 초정을 정출시키고 턴디쉬내에서 용탕을 반응고상상태로 유지한 다음 연속주조 장치를 통하여 전전한 빌렛을 만드는 주조조건을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 경사진 냉각판에 용탕을 통과시킴으로서 간단하게 균질미세한 입상의 초정이 생성됨이 입증되었다.
- (2) 주조온도와 냉각판의 용탕이 흐르는 길이를 일정하게 하고 냉각판의 각도를 변화시켰을 때 냉각판에 B.N을 바른 경우와 B.N을 바르지 않은 경우를 비교해 보면 B.N을 바르지 않은 경우가 냉각판에서 과냉의 효과가 커서 초정이 더 미세했지만 냉각판 밑부분에서 일부 용탕이 굳어버리는 현상이 발생하였다.
- (4) 냉각판에 B.N을 바르고 주조온도를 변화시킨 실험에서는 주조온도가 낮은 630℃에서 초정의 크기가 53 $\mu\text{m}$ 로 가장 미세하였으며 구형화도는 1.4였다.
- (5) 재가열을 통한 고·액 공존영역에서 등온유지한 경우는 등온 유지시간이 증가할수록 초정  $\alpha$ 의 조대화와 구형화도가 증가함을 보였다.
- (6) 실험을 통하여 각 조건에서 고상율은 전체적으로 60~70%를 유지하는 것으로 밝혀졌다.

#### 5. 참고문헌

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. J. C. Lee, S. C. Lim, E. P. Yoon : Jujo, Vol. 16, No.1(1996) 76
4. D. H. Kirkwood and P. Kapranos : Proc. 4th Int. Conf. on Semi-solid processing of Alloys and Composites, The University of Sheffield (1996) 193
5. P. A. Joly and R. Mehrabian : J. Master. Sci., Vol. 11 (1976) 1393
6. P. A. Joly, Ph. D. Thesis, Massachusetts Inst. of Technology, Cambridge, MA (1974)
7. Atsumi Ohno, Ph. D., Dr. Eng. : The Solidification of Metals, Japan (1976)
8. M. M. Guzowski, G. K. Sigworth and D. A. Sentner : "The Role of Boron in the Grain Refinement of Aluminum with Titanium," Metall. Trans., Vol. 18A (1987) 603
9. Akihiko Kamio : J. of Japan Foundry Engineering Society, Vol. 69, No. 12 (1996) 1075
10. W. B. Kim, J. H. Kim, B. J. Ye : Jujo, Vol. 18, No. 6 (1998) 604
11. S. B. Brown and M. C. Flemings : Advanced Mat. & Process 1/93 (1993) 36
12. D. G. Backman, R. Mehrabian and M. C. Flemings : Metall. Trans. B, 8 (1977) 471

Table 1. Chemical composition of A356 Al alloy.

Al	Si	Mg	Fe	Ti	Cu	Zn	Mn
Bal.	7.0	0.27	0.12	0.13	0.2	0.1	0.1

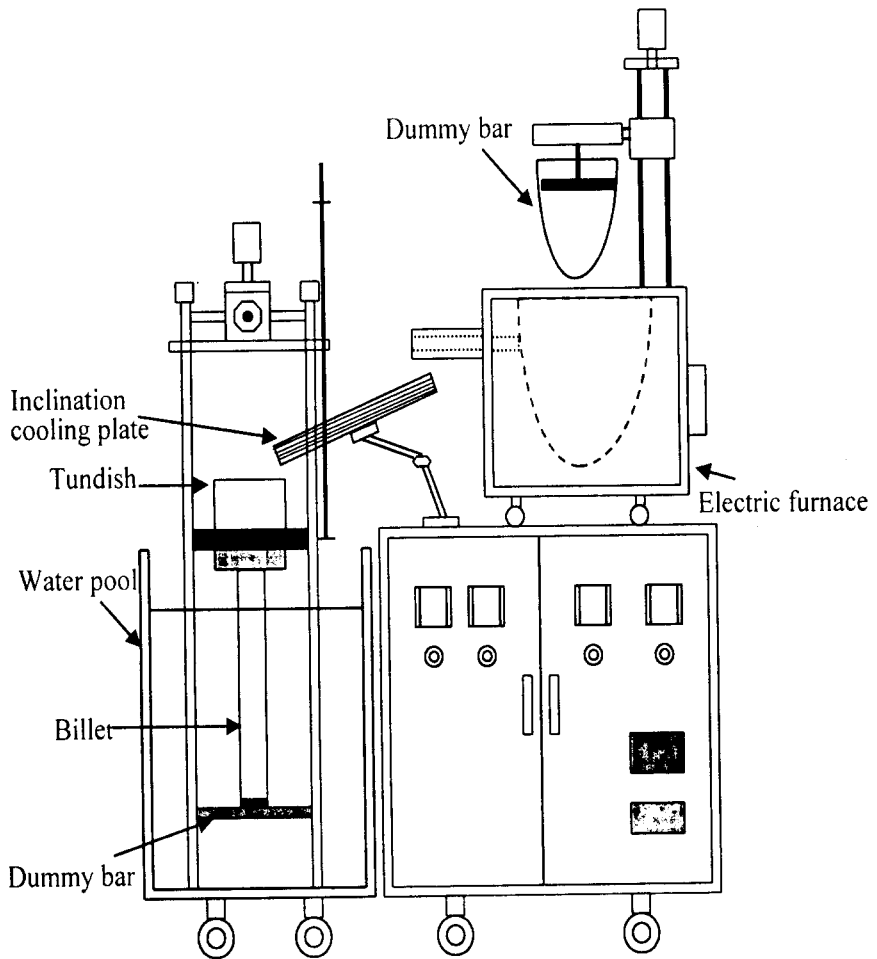


Fig. 1. Continuous casting apparatus of semi-solid metal.

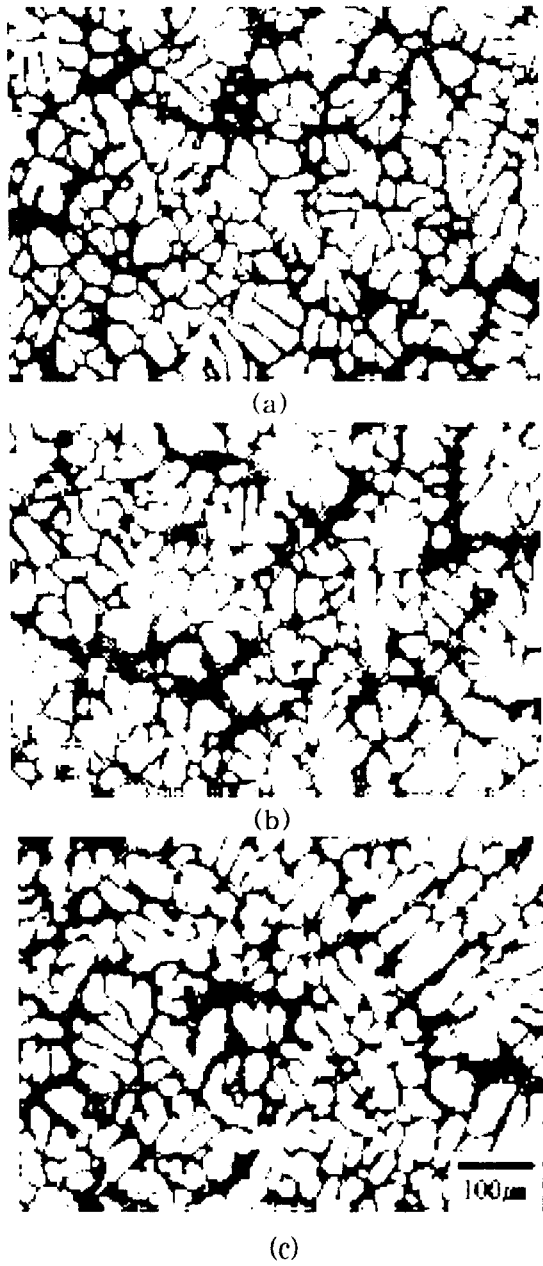


Fig. 2. Microstructures of A356 Al alloy with different angle.  
(cooling plate was coated with B.N)

(a) 40°      (b) 50°      (c)

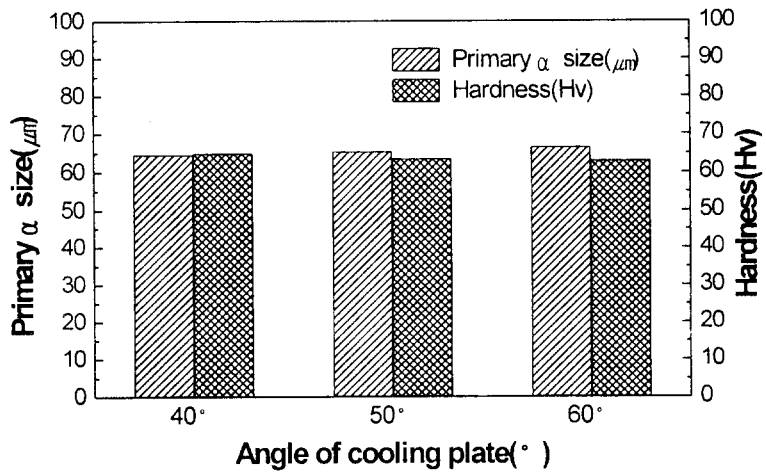


Fig. 3. Primary  $\alpha$  size and hardness of A356 Al alloy with different angle. (cooling plate was coated with B.N)

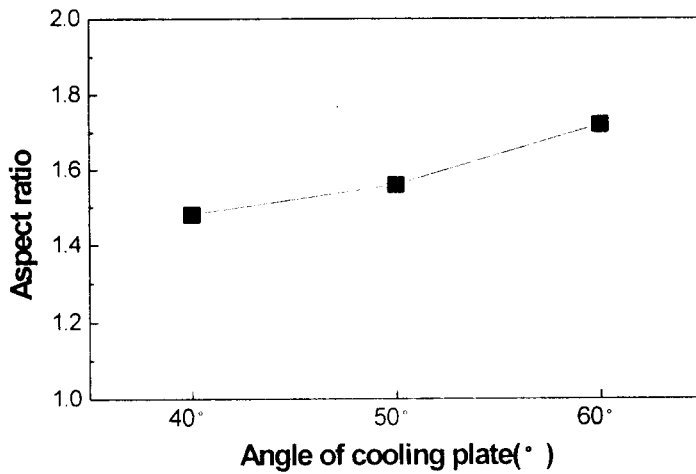
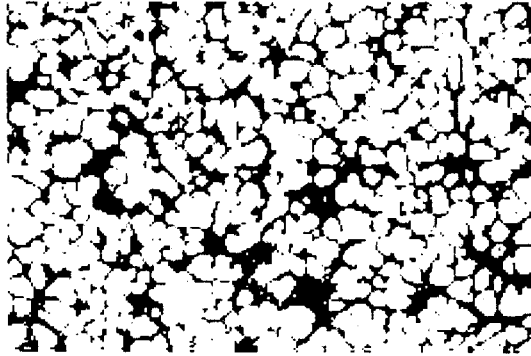
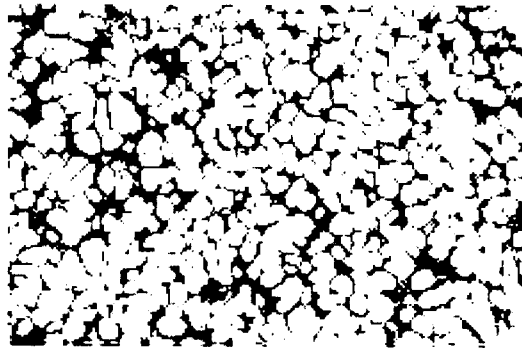


Fig. 4. Aspect ratio of A356 Al alloy with different angle. (cooling plate was coated with B.N)

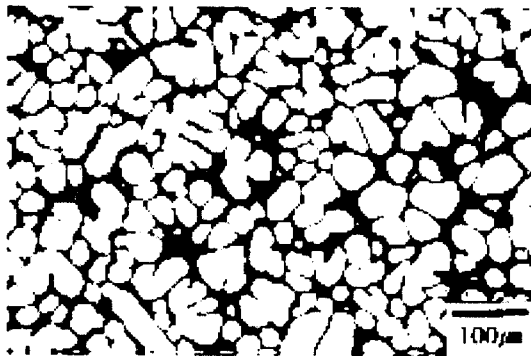




(a)



(b)



(c)

Fig. 5. Microstructures of A356 Al alloy with different angle.  
(cooling plate was un-coated with B.N)

(a) 40°      (b) 50°      (c) 60°

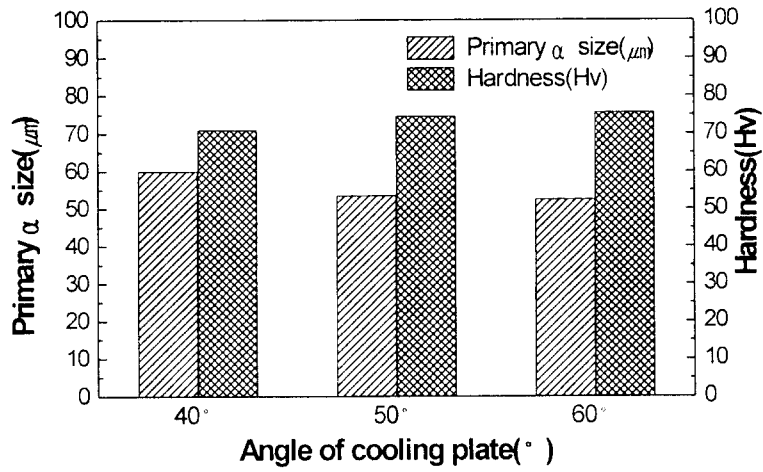


Fig. 6. Primary  $\alpha$  size and hardness of A356 Al alloy with different angle. (cooling plate was un-coated with B.N)

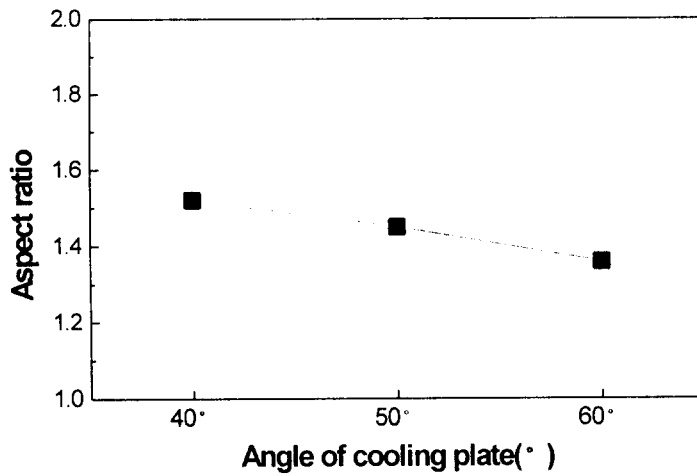
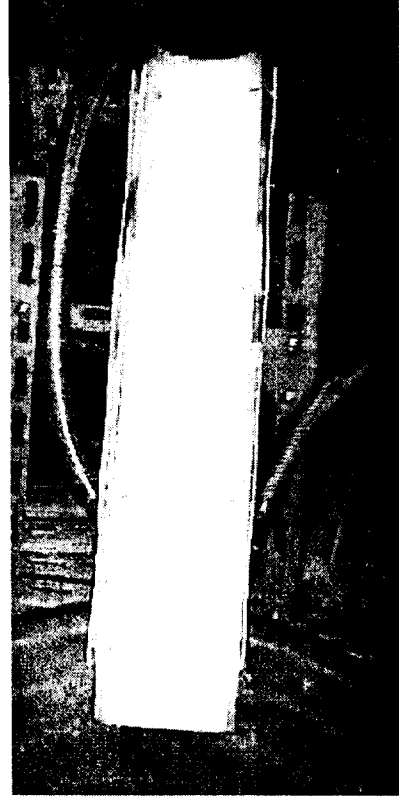


Fig. 7. Aspect ratio of A356 Al alloy with different angle. (cooling plate was un-coated with B.N)



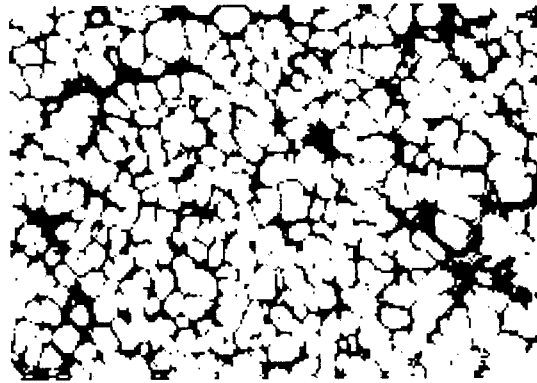
(a)



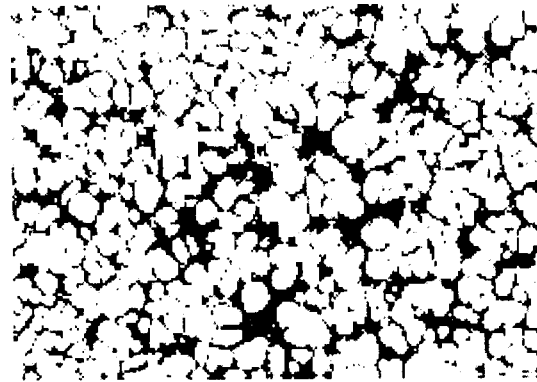
(b)

Fig. 8. Shape of slurry on the cooling plate.

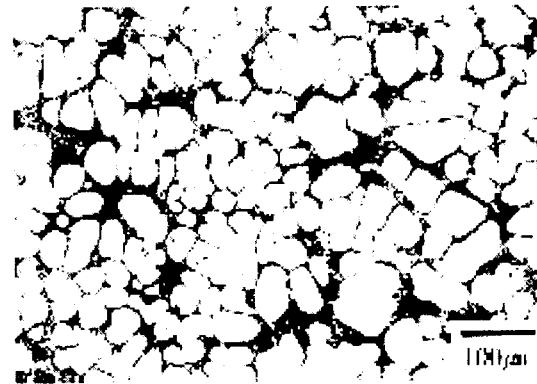
(a) un-coated with B.N (b) coated with B.N



(a)



(b)



(c)

Fig. 9. Microstructures of A356 Al alloy with different casting temperatures.

(a) 630°C      (b) 640°C      (c) 650°C

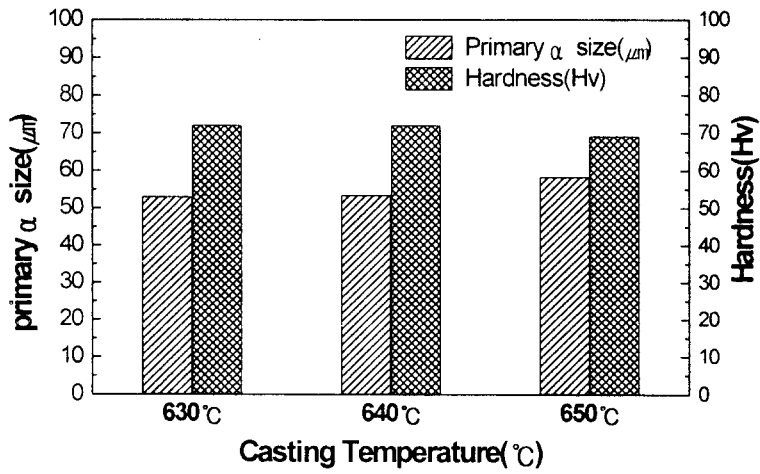


Fig. 10 Primary  $\alpha$  size and hardness of A356 Al alloy with different casting temperature.

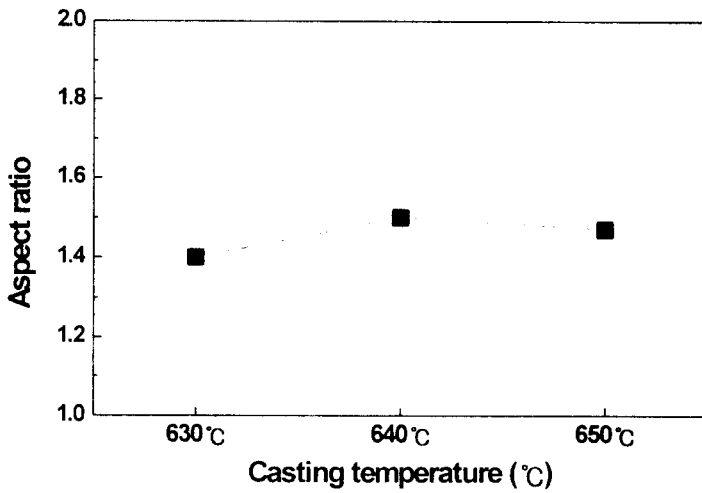


Fig. 11. Aspect ratio of A356 Al alloy with different casting temperature.

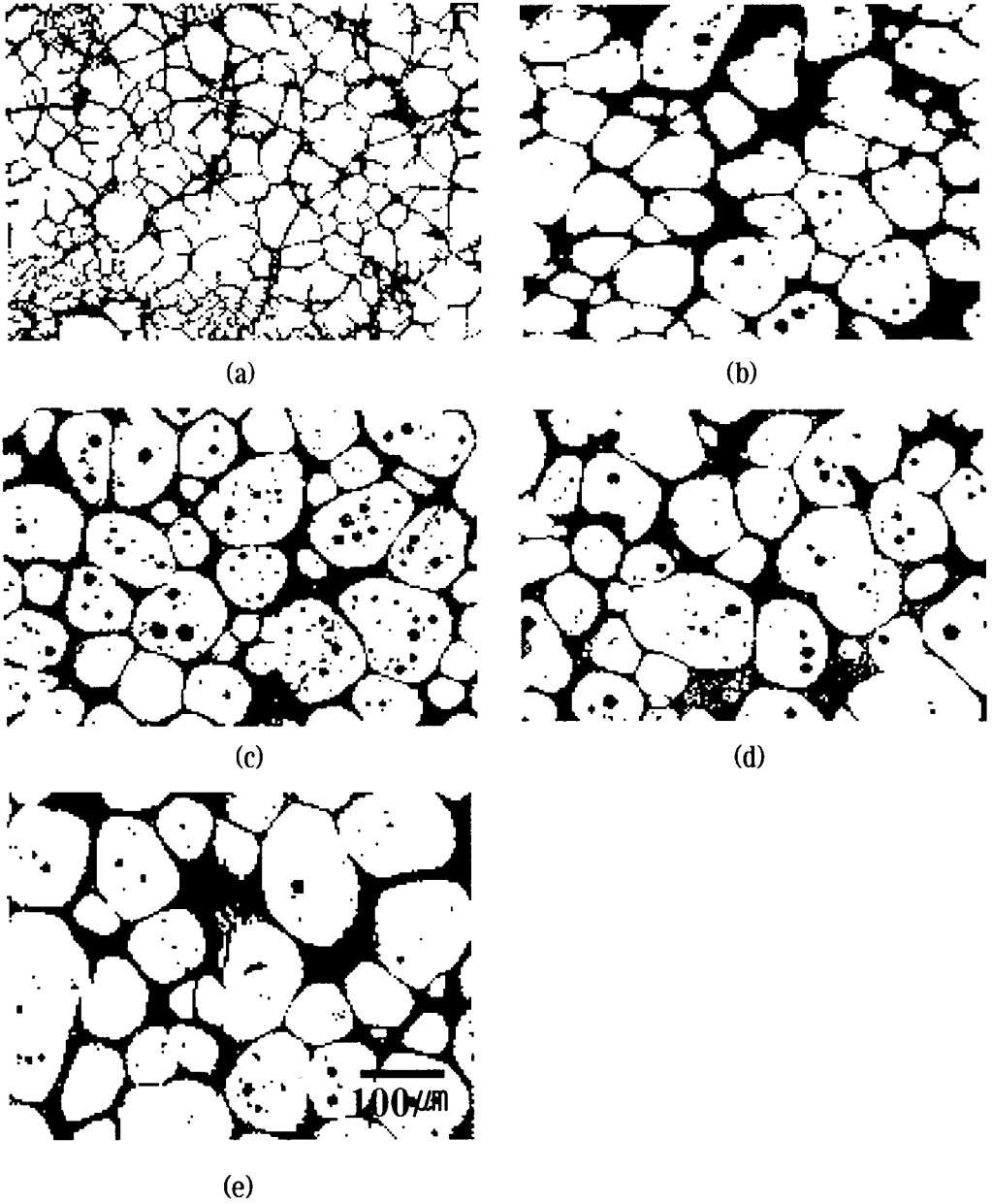


Fig. 12. Microstructural evolution of A356 Al alloy with different holding times in the semi-solid state.

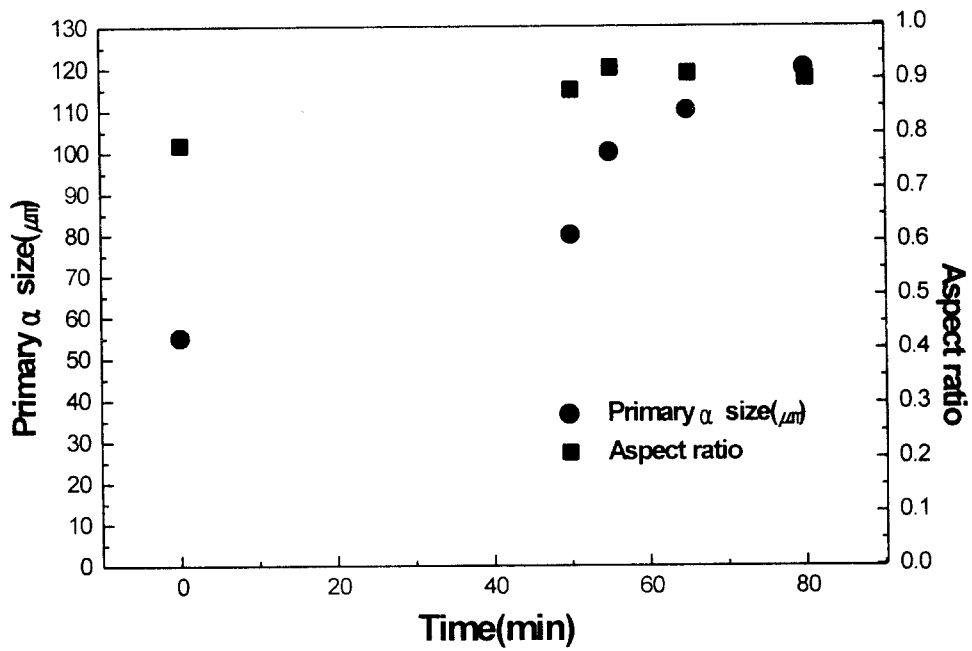


Fig. 13. Primary  $\alpha$  size and aspect ratio of A356 Al alloy with different holding times in the semi-solid state.