

냉각판을 이용한 반응고 A356합금의 미세조직

엄정필, 장동훈, *김득규, **윤병은, 임수근
경상대학교 재료공학부, 생산기술연구소
*두레금속(주), **현대자동차(주)

Microstructure of Semi-solid A356 Alloys made Using Cooling Plate

Jeong-Pil Eom, Dong-Hun Jang, *Deug-Gyu Kim, **Byong-Eun Yoon, Su-Gun Lim

Division of Materials Sci. and Eng. Gyeong Sang National Uni., Research Inst. of Ind.

**Dooray Metal Ind., Ltd, **Hyundai Moter Com.*

Abstract In this study, microstructure, size of primary α , solid fraction and hardness of A356 Al alloy, were investigated. Semi-solid A356 allos were obtained by semi-solid continuous casting apparatus consists of melting furnace, formation apparatus of granular primary α and continuous casting apparatus. Size of primary α and fraction solid were decreased with decreasing temperature, and with increasing volume of cooling water. At the cooling water temperature of 15°C and cooling water volume of 18.2 l/min, the sizes of primary α phases were decreased up to 40 μ m, and fraction solid was 0.68.

1. 서 론

1970년대초 미국 M.I.T의 M. C. Flemings에 의해 개발된 레오캐스팅법(Rheo-casting method)¹⁾을 시작으로 현재에도 많은 사람들이 반응고가공법(Semi-solid processing)을 통한 미세조직과 기계적 성질의 향상에 대하여 연구하고 있다¹⁻⁵⁾. 최근의 이러한 기술적 동향은, 주조재가 가지는 기공과 같은 주조결함과 단조재에 있어서의 성형시 높은 용력이 필요하고 복잡한 형상의 부품제도가 힘들다는 두 공정의 단점을 최소화하고 또한, 양공정의 장점을 극대화할 수 있기 때문이다⁶⁻⁷⁾.

고온에서의 분말소결이나 가공과 유사한, 혼합 고체입자를 가열하여 반응용상태에서 가공하는 방법⁸⁻¹¹⁾과 반응고용탕단조나 레오캐스팅과 같이 액상을 냉각하여 고액 공존상태에서 가공을 하는 반응고가공법³⁻⁵⁾으로 크게 구별되며, 이러한 반응고가공법은 용고 온도범위가 낮고, 고액공존영역이 비교적 넓은 합금계에서 연구되어지고 있으며 주조공정과 열간가공공정을 효과적으로 결합시킨 새로운 가공법이라 할 수 있다. 이러한 반고체금속 가공법을 하기 위해서는 입상의 초정을 가진 금속소재가 필수적이며 이 소재의 제조방법은 고체와 액체가 공존하는 영역에서 교반하여 수지상정(Dendrite)을 미세한 입상(Granular)조직을 가진 슬러리(Slury)로 제조하는 것이다. 이러한 금속합금의 슬러리와 빌렛을 생산하는 방법에는 기계적인 교반법¹²⁻¹³⁾과 전자기적교반법¹⁴⁻¹⁷⁾이 있다.

기계적인 교반법은 지금까지의 실험실적인 규모의 작은 실험장치로서 시작 단계에 머물러 있었지만 최근, 실용적인 장치를 개발하여 점차 실용화하려는 방향으로 전개 되어지고 있다. 그러나, 이와같은 기계적인 교반법은 간단한 원리로 높은 변형속도에 의한 미세하고 구형화된 조직을 얻

을 수 있다는 장점에도 불구하고 용탕내에서의 교반자의 침식에 의한 용탕의 오염, 공정제어의 어려움 및 경제적인 측면에서의 낮은 생산성이라는 단점을 가지고 있다^{12,18)}. 반면에 전자기적 교반법은 액상금속과 교반자간의 접촉이 없으므로 불순물의 개입을 방지할 수 있으며, 교반 강도를 용이하게 조절할 수 있고 금속전체가 액상의 흐름을 갖게 되어 고액공존영역(Mush zone)을 효율적으로 교반할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 전자기적인 교반효과가 교반용기안의 용탕 내부까지 충분히 미치기 위해서는 막대한 양의 전력소모가 요구되어 반응고 합금의 제조원가가 커지는 문제가 제기되었다.

이상과 같이 기존의 반응고 금속 제조법은 교반중의 금속산화물 방지하기 위한 분위기 조절, 입상으로 만들기 위한 긴 시간 교반, 고·액 공존상태 유지를 위한 온도조절 등 많은 부대장치와 시간이 필요함으로 인한 제조단가가 고가인 단점이 있다.

본 연구에서는 이와 같은 단점을 극복하고 또한, 연속적으로 반고체금속을 제조하기 위하여 독자의 제조장치를 설계·제작하여 반고체금속의 제조기술을 확립하는 것이다. 즉, 결정유리설을 응용한 제조방법으로서, 용탕을 특수장치(입상성장장치)를 통과함으로써 만들어진 in-situ 입상 초정을 기존의 연속주조장치를 이용하여 원주형의 반고체금속 주피를 연속주조로서 제조하기에 앞서 최적의 제조 조건을 알아보기 위한 예비실험으로서 여러 가지 조건에서 입상 초정 성장장치를 통과한 주피를 제조하여 각 조건에서의 초정의 크기, 고상률, 경도 및 형상을 평가하여 제조기술을 확립하는데 그 목적이 있다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 기존의 반고체 금속제조 장치의 단점을 극복하기 위하여, 반고체 금속 연속 주조장치를 독자적으로 설계·제작하였다. 본 장치는 크게 용해로, 입상초정 생성장치, 연속주조장치로 구분되며 용탕을 입상 생성장치를 통과함으로써 만들어진 입상초정을 기존의 연속 주조장치를 이용하여 원주형의 반고체 금속 주피를 제조하는 것이다. Fig. 1은 자체 설계 및 제작한 실험 장치의 전경을 나타낸 것이다. 본 실험에 이용한 시험편은 시판중인 A356 알루미늄 합금을 사용해 용융 제조 하였으며, table 1에 A356 알루미늄 합금의 화학조성을 나타내었다. Fig. 2는 입상 초정 생성장치의 개략도와 함께 용탕을 주조하는 부분을 나타낸 그림으로서, 본 실험에서는 (a) 윗부분 및 (b) 중간부분에서 주조하였다. 또한 본 실험과의 비교를 위하여 Pechieny社에서 시판 중인 반고체 A356 알루미늄 합금의 조직, 고상률, 결정립크기 및 경도값을 측정하였다. 시험편의 용해는 자체 제작한 저항식 전기로를 이용하여 680℃에서 주조하였다. 반고체 A356 알루미늄 합금 시험편의 크기는, 예비 실험시에는 직경 78mm, 길이 100mm의 주피를 제조하여 반고체금속 제조 가능성을 검토하였으며, 연속주조 시에는 직경 53mm, 길이 200~400mm의 환봉을 주조하였다.

반고체금속의 제조조건은 table 2에서와 같이 냉각수 온도, 입상 초정 생성 장치의 냉각수 유량 및 용탕주조부를 변화시켜 제조하였다. 이렇게 제조한 시험편의 미세조직을 관찰하기 위하여 3 μ m의 Diamond paste로 연마한 후, 5% HF용액을 부식액으로 사용하여 부식시킨 후 광학현미경(NIKON, KPIPHOT)으로 주형 표면부에서 중심부로 관찰하였으며 경도 시험은 시험편의 표면을 깨끗이 연마한후 미세경도 시험기(AKASHI, MVK-E3)를 이용하여 하중 100g, 시간 10초의 조건에서 경도를 측정하였다. 경도는 동일 조건하에서 주형의 표면부에서 중심부로 2mm 간격으로 5회 측정 후 평균값을 산출하였다. 또한 고상률은 미세조직사진을 이용하여 주형의 표면부분에서부터 내부까지의 조직사진을 이용해서 면적 비율로서 측정하였으며, 초정 α 상의 크기는 선분석법으로써 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

미세 조직변화

Fig. 3은 수입한 SSM A356 알루미늄 합금의 미세조직 사진을 나타낸 것으로 그림에서 보는 바와 같이 결정립이 표면(a)에서 내부(e)로 갈수록 점차 구형화되어 가고 있으나, 덴드라이트상의 조직은 여전히 잔존하고 있다. 결정립 크기는 약 $\sim 30\mu\text{m}$ 이며, 초정의 고상률은 0.75 정도임을 알 수 있다.

Fig. 4는 A356 알루미늄 합금을 입상 초정 생성 장치를 통과시키지 않고, 금형에 주조한 후 공냉시킨 주방상태의 조직사진으로 초정 α 상의 크기는 표면이 $110\mu\text{m}$, 내부는 $132\mu\text{m}$ 의 조대한 덴드라이트 조직이 나타났으며, 초정의 고상률은 표면이 0.78, 내부가 0.86으로 아주 높게 나타났다.

Fig. 5는 입상 초정 생성 장치에 냉각수를 흘리지 않고 공냉한 조직사진으로서 초정 α 상의 크기는 표면이 $82\mu\text{m}$, 내부가 $99\mu\text{m}$ 로서 Fig. 4에 비하여 크게 감소하였으며 초정의 고상률은 표면이 0.69이며 내부가 0.86으로서 표면과 내부의 고상률의 차가 크게 나타났으며 여전히 높은 고상률을 나타내었다. 그러나, 전체적으로 덴드라이트 조직이 와해된 구형의 초정입자가 관찰됨을 알 수 있다. Fig. 6과 7은 금형의 온도를 22°C 로 유지하며 입상초정 생성장치의 냉각수량을 12.9 l/min 로 하여 조직을 관찰한 사진으로 전체적으로 균일하게 구형의 초정입자가 생성됨을 알 수 있으며 초정 α 상의 크기는 $51\mu\text{m}$ 로 입상 초정 생성 장치의 냉각수량이 작은 조건들에 비하여 초정 α 상의 크기가 아주 미세해짐을 알 수 있다. 그러므로, 냉각수량을 크게 하고 금형의 냉각수 온도를 낮춤으로써 해서 미세한 초정 α 상과 양호한 구형의 초정형상을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

경도시험결과

시험편의 바깥 부분에서부터 2mm 간격으로 5회 미세 경도시험기를 사용하여 표 2의 여러 조건에서의 경도를 측정된 결과, 주방상태에서는 경도값이 Hv 63으로 나타났으며 입상 초정 생성 장치를 통과하여 제조한 시험편의 경우에는 경도값이 약 Hv 64~70으로 주방상태에 비하여 높게 나타남을 알 수 있다. 입상초정 생성장치의 냉각수량과 금형의 냉각수의 온도에 따른 경도값의 변화를 관찰한 결과, 주방상태, 공냉상태의 조건에서보다 금형에 냉각수를 흘려줌으로서 경도값이 Hv 65~67로 높게 나타남을 알 수 있다. 이것은 냉각수에 의한 급냉효과로 생각되며, 조건 3과 4의 경우에 있어서는, 주형의 길이가 조건 2와 5에 비하여 조건 3이 상대적으로 짧기 때문에 급냉효과에 의한 경도 증가가 있었으며, 조건 4의 경우에는 주형의 길이가 아주 길었기 때문에 상대적으로 평균한 경도값이 낮게 나타났다. Fig. 8은 이상의 결과를 도식적으로 나타낸 것이다. 위의 결과로부터, 입상 초정 생성 장치의 냉각수량을 크게하고 주형의 냉각수 온도를 낮추었을 때 급냉효과로 인하여 높은 경도값이 나타남을 알 수 있다.

초정 고상률 측정결과

Fig. 8에 각 조건에서의 시험편의 초정의 고상률을 측정된 값을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 주방상태와 공냉상태에서는 고상률이 약 0.8과 0.77정도로 나타났으며, 수냉상태에서는 고상률이 약 0.64~0.7이었다. 그러므로, 주조시 입상초정 생성장치에 냉각수를 흘리고 금형이 충분히 냉각되도록 냉각수를 흘리므로 해서 본 실험에 부합하는 양호한 고상률을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

초정 α 상의 크기 측정결과

각 조건에서의 초정 α 상의 크기의 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 주방상태에서는 초정 α 상 약 $120\mu\text{m}$ 로 아주 조대하였으나, 입상 초정 생성 장치를 통과하여 주조한 공냉상태에서는 초정 α 상의 크기가 약 $90\mu\text{m}$ 로 감소함을 알 수 있다. 이것으로부터 입상 초정 생성 장치를 통과함으로써 초정 α 상의 크기가 감소한다는 것을 알 수 있다. 입상 초정 생성 장치의 냉각수 유속에 따른 미세화효과는, 초정 α 상의 크기가 약 $46\sim 60\mu\text{m}$ 로 공냉상태의 조직보다 더 미세하게 나타났다. 이것

은 금형에 냉각수를 흘려준 결과로서, 냉각수의 온도를 낮게함으로서 급냉효과로 인한 초정 α 상의 미세화 효과가 더 크게 나타났음을 알 수 있다. 또한, 입상초정 생성장치의 냉각수량을 증가함으로서 초정 α 상의 크기가 감소함을 알 수 있다. 조건 1의 경우에는 제조한 시험편의 크기가 다른 조건에 비하여 상대적으로 아주 작으므로 해서, 냉각수에 의한 급냉효과에 의하여 입상 초정 생성 장치에 냉각수를 흘리지 않아도 초정 α 상이 미세하게 나타난 것으로 생각된다.

4. 결 론

A356 알루미늄 합금을 용해하여 입상 초정 생성 장치를 통과시켜 반응용 금속을 제조하여 조사한 결과는 다음과 같다.

- 1) 입상 초정 생성 장치를 사용하여 제조한 모든 A356 Al 합금에서 구형화된 초정 α 상을 관찰하였다.
- 2) 입상 초정 생성 장치의 냉각수량을 증가함으로서 초정 α 상의 크기와 고상률이 감소하였다.
- 3) 금형의 냉각수의 온도가 저온인 경우, 초정 α 상의 크기와 고상률이 감소하였다.
- 4) 60~70% 수준의 고상률과, 초정 α 의 크기가 30~40 μ m인 시험편을 얻고자 할 때, 최적의 조건은 입상 초정 생성 장치의 냉각수량을 크게하고 금형의 냉각수의 온도를 낮추는 것이 가장 효과적인 조건이라는 것을 알 수 있다.

5. 참 고 문 헌

- 1) M. C. Flemings, R. G. Riek and K. P. Young, Mat. Sci. Eng., 25 (1976) 103
- 2) D. B. Spencer, R. Mehrabian and M. C. Flemings, Metall. Trans., 3 (1972) 1925
- 3) 木内 學, 日本金屬學會會報, 21 (1982) 687
- 4) 市川 洵, 鐵 と 鋼, 74 (1988) 51
- 5) 難波明彦, 市川 洵, 金屬, 79 (1989) 54
- 6) S. B. Brown and M. C. Flemings, Advanced Mat. & Process 1/93 (1993) 36
- 7) 趙鍾孝, 대한금속학회회보, Vol.9, No2 (1996) 147
- 8) D. G. Backman, R. Mehrabian and M. C. Flemings, Metall. Trans. B, 8 (1977) 471
- 9) S. D. e. Ramati, G. J. Abbaschian and R. Mehrabian, Metall. Trans. B, 9 (1978) 241
- 10) C. Y. Chen, J. A. Sekhar, D. G. Backman and R. Mehrabian, Mater. Sci. Eng. 40 (1979) 265
- 11) V. Laxmanan and M. C. Flemings, Metall. Trans. A, 11 (1980) 1927
- 12) M. C. Flemings, Metall. Trans. A, 22 (1991) 957
- 13) M. H. Rovert, "Partial Melting as Efficient Method to Produce Rheocast Alloy Slurries" (1993) 45
- 14) A. Joly and R. Mehrabian, J. of Met. Sci., 11 (1976) 1393
- 15) M. Tsunoi, N. Kawada and Yasuo Fujikawa, Tec. Rev. 10 (1979) 202
- 16) C. Viv'es and R. Ricou, Met. Trans. 16B (1985) 377
- 17) O. Tsubakihara, A. Kusano and T. Terada, Trans. ISIJ 25 (1985) 686
- 18) C. Viv'es, Met. Trans. 23B (1992) 189

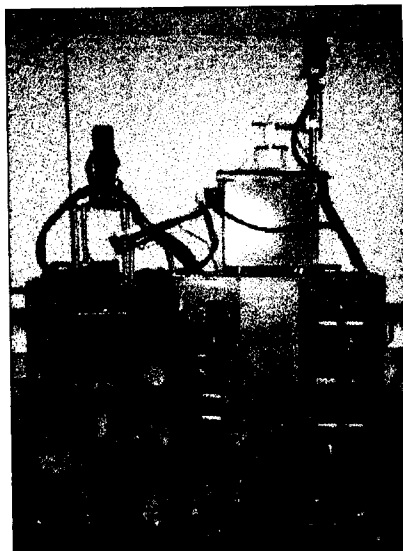


Fig. 1 Apparatus of Semi-solid metal.

Table 1. Composition of A356 Al alloy.

Element	Al	Cu	Si	Fe	Mg	Zn	Ti
wt.%	Bal.	0.20 <	6.5~7.5	0.20 <	0.25~0.45	0.10 <	0.20 <

Table 2. Condition of fabrication in Semi-solid metal.

Condition	Temperature of cooling water (°C)	Quantity of cooling water in cooling plate(ℓ/min)	Casting part of molten metal in cooling plate
Cond. 1	22	-	Upper part
Cond. 2	22	12.9	"
Cond. 3	22	4.7	"
Cond. 4	22	10	Middle part
Cond. 5	15	18.2	Upper part

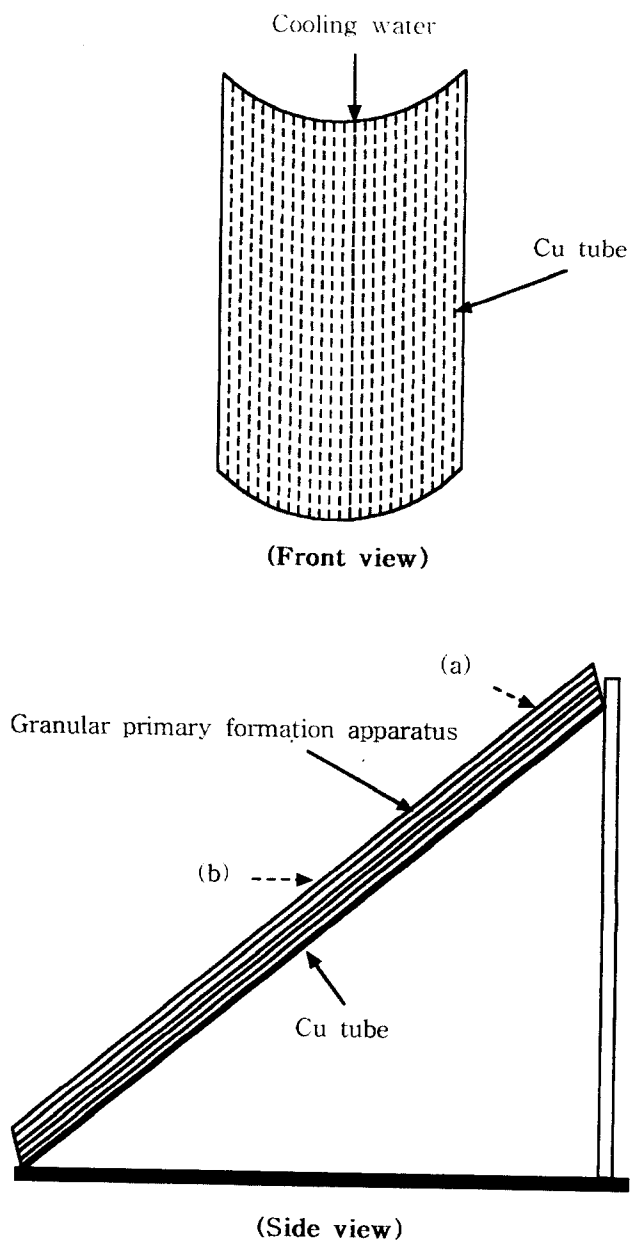


Fig. 2 Casting part of molten metal in granular primary formation apparatus.

(a) Upper part (b) Middle part

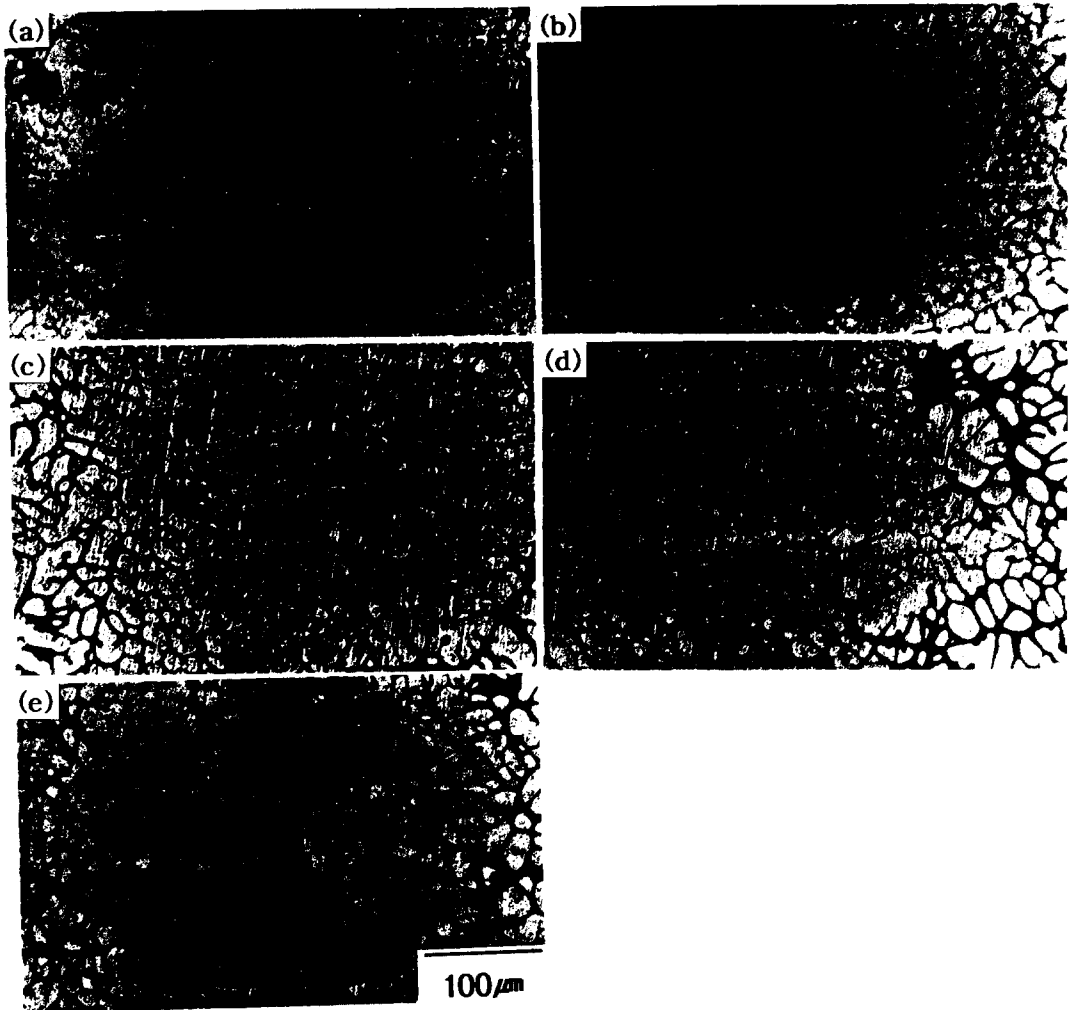


Fig. 3 Microstructure of imported SSM A356 Al alloy.

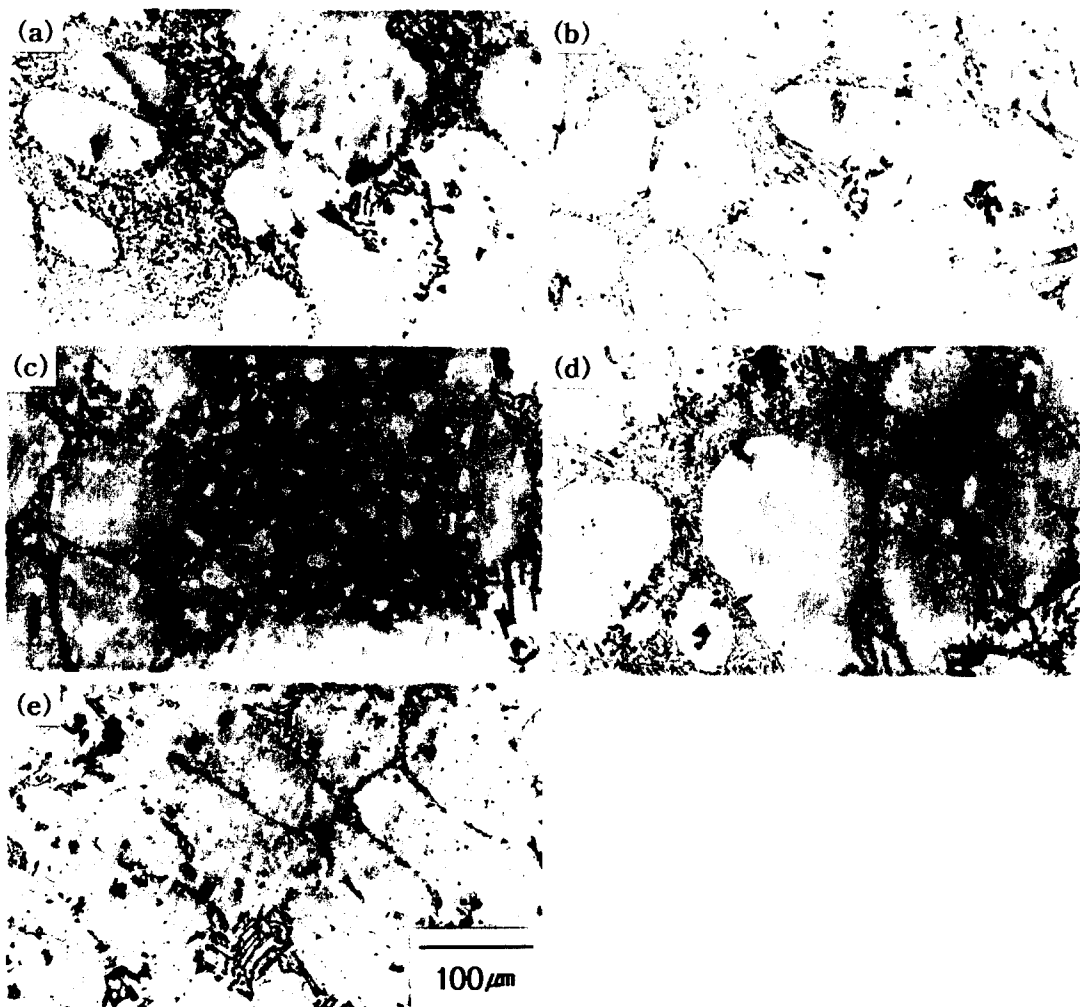


Fig. 4 Microstructure of A356 Al alloy in as-cast.

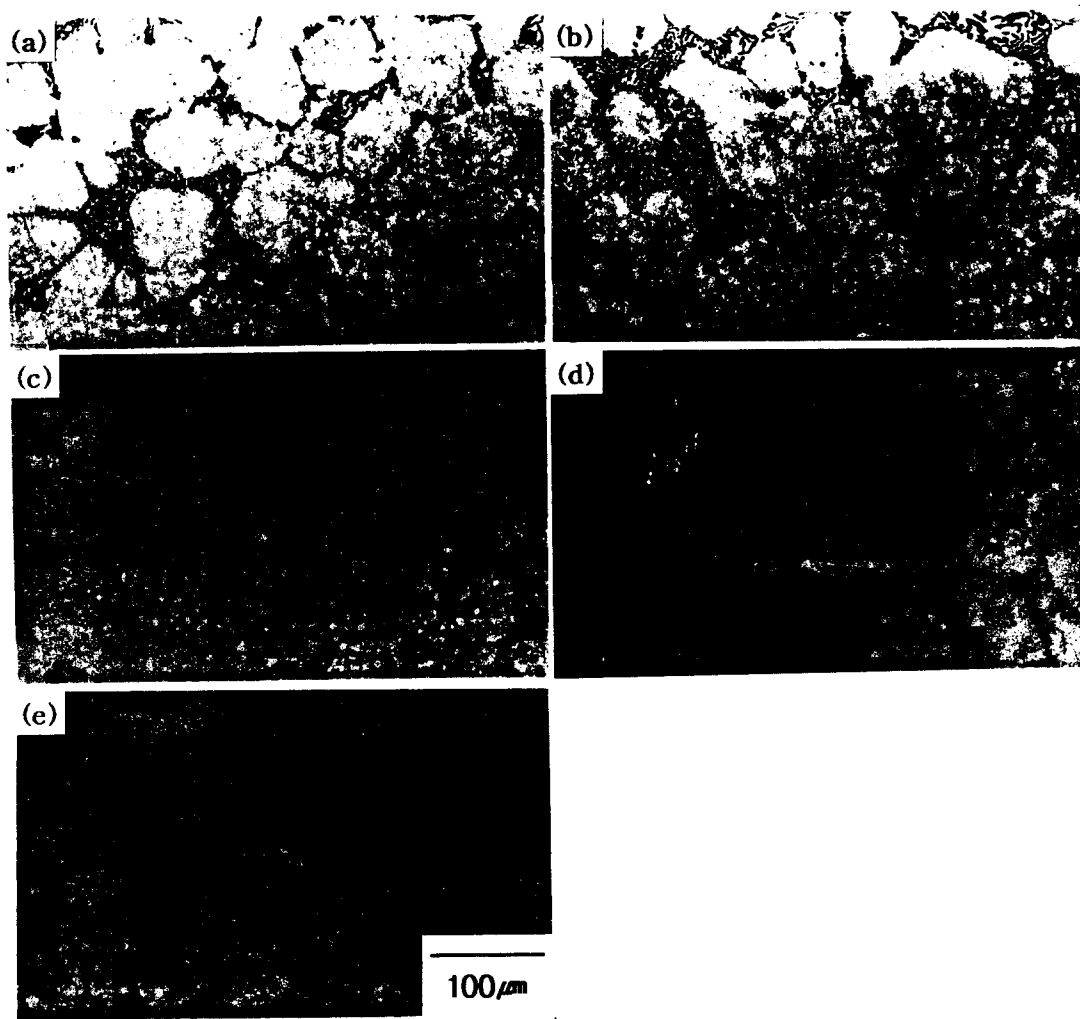


Fig. 5 Microstructure of A356 Al alloy with air-cooling manufactured granular primary formation apparatus.

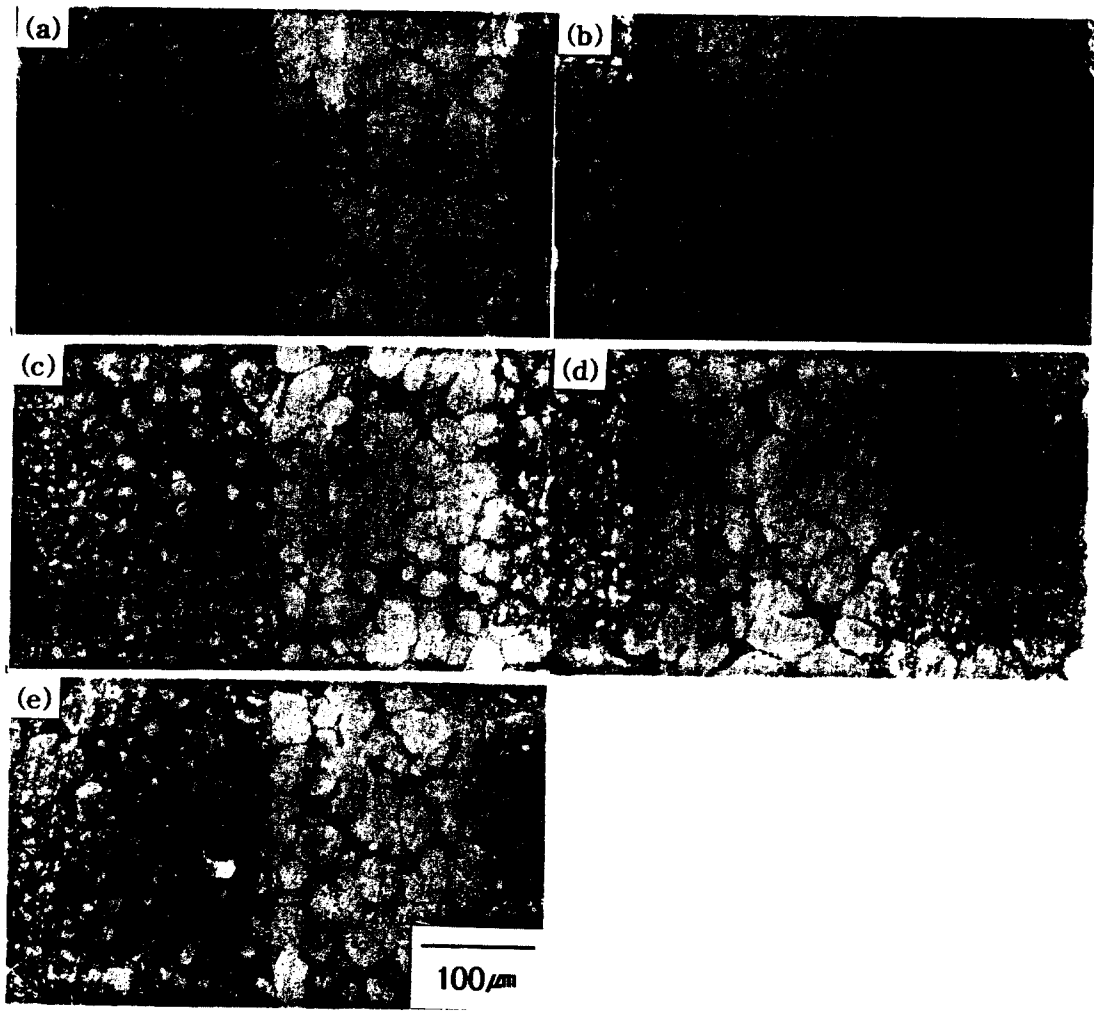


Fig. 6 Microstructure of A356 Al alloy with water cooling in granular primary formation apparatus ; 12.9 l /min, at bottom part.

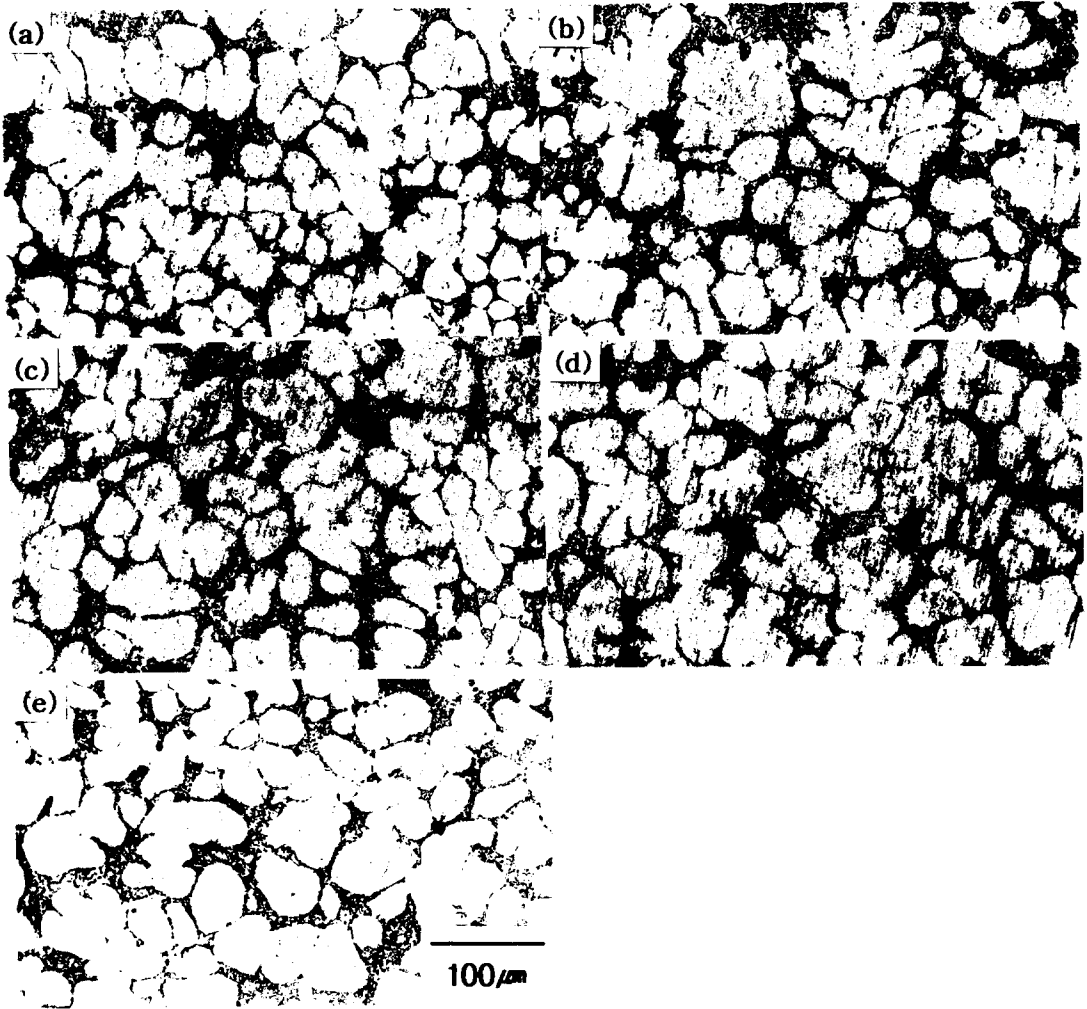
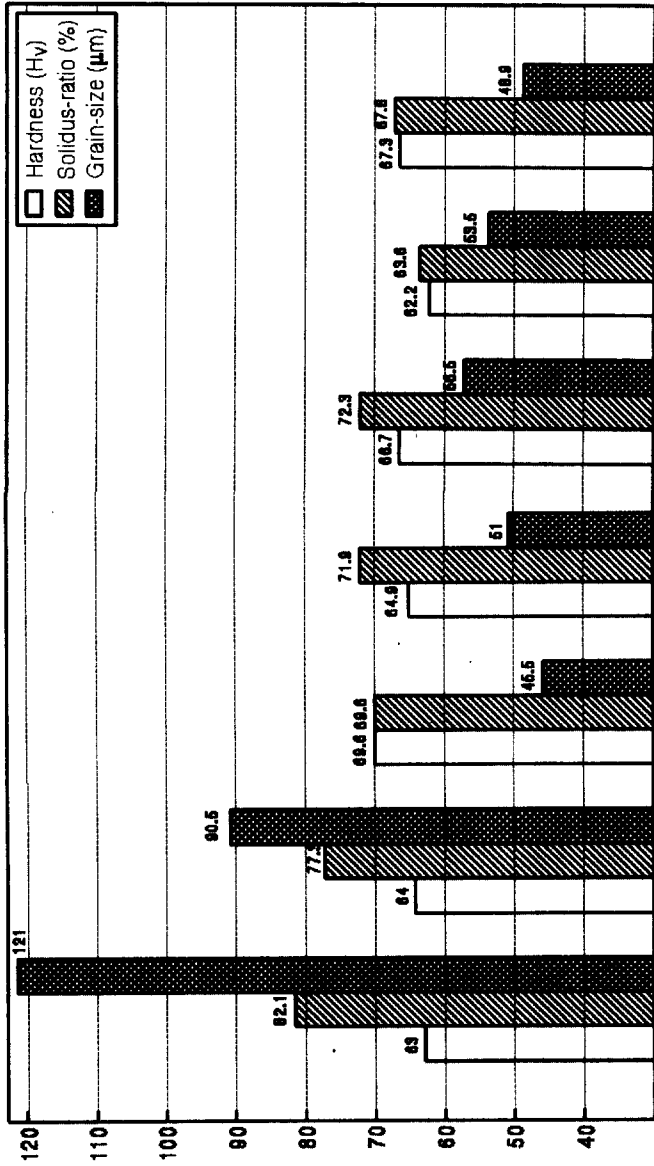


Fig. 7 Microstructure of A356 Al alloy with water cooling in granular primary formation apparatus ; 12.9 ℓ /min, at middle part.



as-cast air-cooling cond. 1 cond. 2 cond. 3 cond. 4 cond. 5

Fig. 8 Size of primary α phase, solid fraction and hardness of A356 Al alloy in various condition.