

.....
論 文
.....

가열주형식 연속주조법에 의한 Al-Si합금의 응고조직에 관한 연구

김원태, 문정탁, 김명한, 조형호*

A Study on the Solidification Structure of Al-Si Alloy by the Continuous Casting with the Heated Mold

Won-Tae Kim, Jeong-Tak Moon, Myung-Han Kim and Hyung-Ho Jo*

Abstract

The horizontal continuous casting method with the heated mold was applied to study the solidification structures of the pure Al and Al-0.5wt%Si and Al-1.0wt%Si alloy rods. The results could be summarized as follows:

1. The S/L interface structures of pure Al represented the hexagonal cells at the casting speed of 590 and 350mm/min, respectively. However, the hexagonal cells became irregular as the casting speed and(or) Si amount increased.
2. The striation increased as the Si amount and casting speed increased and was found to result from the occurrence of growth twin crystals by XRD analysis.
3. The striation did not affect the mechanical and electrical property of the drawn wire from the casted rod. This means the striation is not a serious defect which has to consider in the production of micro-sized fine wire in the drawing process.

(Received June 30, 1994)

1. 서 론

가열주형 연속주조법은 주형의 온도를 주조 금속의 용융점 이상으로 가열시켜 주괴를 인출하는 방법이다. 이 방법에 의해 주형 벽면상에서 생성되는 결정핵의 근원을 제거하여 주형 선단에서 열류의 반대방향으로 핵을 성장시켜 경면의 긴 일방향 응고조직 또는 단결정을 얻을 수 있고, 이러한 주괴는 고급 전자 재료용으로 사용되고 있다[1-4].

반도체의 IC, LCD 등의 본딩와이어 소재로 이용되고 있는 순 Al 및 Al-1wt%Si 합금을 일방향응고 또는 단결정 조직으로 제어된 주괴로 제조할 경우, 이들 조직이 100 μ m이하의 극세선 가공에 매우 유리할 것으로 예상되지만, 실제 극세

선선가공 조건이나 가공 열처리 온도설정에 어떠한 영향을 미치는가에 대해서는 현재까지 연구가 된 바가 별로 없다. 또한 이들 소재를 연속주조할 경우 발생하는 줄무늬(striation) 조직은 단지 growth twinning에 기인하는 것으로 추정하고 있을 뿐[2] 아직 이에 대한 자세한 연구는 발표되고 있지 않다.

본 연구에서는 수평식 가열주형 연속주조법에 의해 형성되는 Al 및 Al-Si합금주괴의 응고조직에 미치는 Si함량 및 주조속도의 영향을 조사하기 위해 decant법에 의한 고·액계면의 관찰을 시도하였으며, 줄무늬(striation)조직의 존재가 재료의 전기적 기계적 성질에 미치는 영향에 대해서도 조사를 행하였다.

충북대학교 재료공학과(Dept. of Materials Eng., Chungbuk National Univ.), 급속응고신소재연구소 (RASOM)

*생산기술연구원(Korea Academy of Industrial Technology)

2. 실험방법

주괴제조는 고순도 Al(4N) 및 Si(5N)를 사용하여 제조하였으며, Fig. 1에 나타난 수평식 연속 주조장치를 이용하여 직경 4mm의 Al-Si합금(Si : 0, 0.25, 0.5, 0.75 및 1wt%)의 일방향응고 주괴를 제조했다.

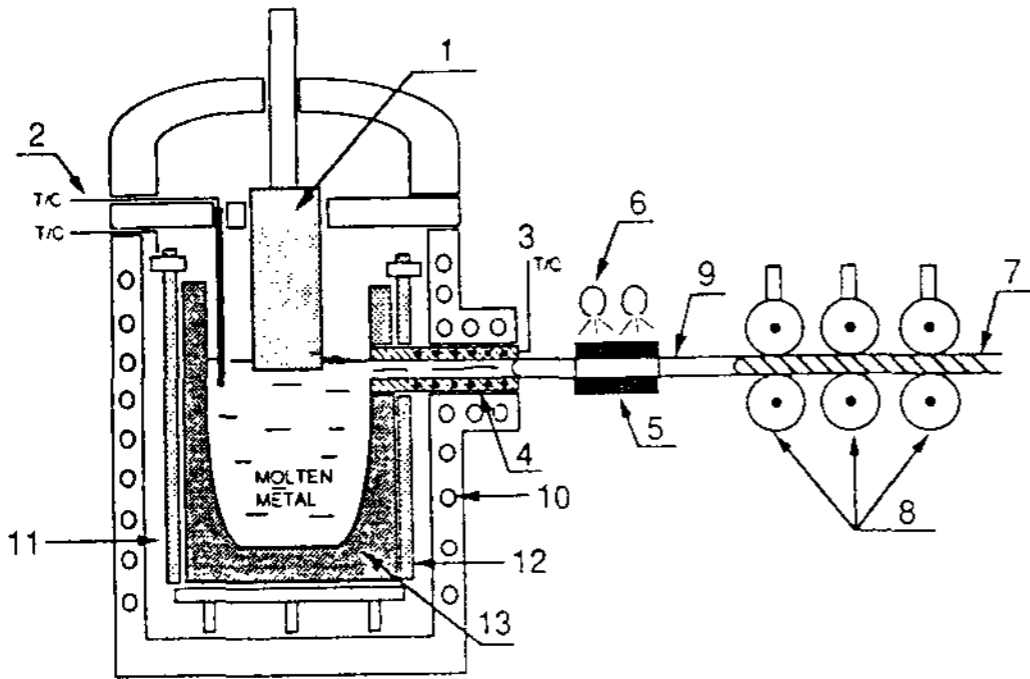


Fig. 1. The horizontal continuous casting apparatus with the heated mold.

주형의 온도는 주형끝단에서부터 주형안쪽 10mm에 위치한 곳에서 측정되었으며, 주형끝단과 냉각수가 주괴에 닿는 부위 사이를 냉각 거리로 하였다. 주괴의 제조 조건은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. The casting conditions for pure Al, Al-0.5wt%Si and Al-1.0wt%Si rod.

Casting Speed	50~650mm/min
Melt Temperature	700°C
Mold Temperature	690°C
Flow Rate of Cooling Water	0~0.6 l /min
Mold-Cooler Distance	15mm
Cast Rod Diameter	4mm

Decantation법에 의해 얻어진 주괴의 고액계면은 광학현미경을 이용하여 계면 조직을 관찰하였다. 주조 속도 및 Si함량에 따른 제조된 인출 주괴의 거시조직은 왕수부식액(HNO₃ : HCl : C₃H₈O₃=1 : 3 : 2) 및 Viella 에칭시약(HNO₃ : HF : C₃H₈O₃=1 : 1 : 3)으로 부식한 후 접사촬영으로 관찰하였으며, 동시에 줄무늬(striation)

도 관찰하였다. 줄무늬 수에 따른 기계적, 전기적 성질의 변화를 알아보기 위해 경면주괴를 50% 가공율로 신선가공한 후 Vickers 경도계를 이용하여 경도를 측정하였으며, 99% 가공하여 얻은 400 μ m 직경의 세션을 이용하여, 25°C의 실온하에서 4단지법에 의하여 전기 비저항 값을 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 Dacant법에 의한 고액계면 조직

Photo 1, 2 및 3은 4mm 직경의 순 Al, Al-0.5wt%Si 및 Al-1.0wt%Si 합금을 연속주조할 경우 주조 속도에 따른 고액계면 형상을 decantion법에 의해 얻고, 이를 광학 현미경으로 관찰한 결과이다.

Photo 1의 순 Al의 경우 주조 속도가 50mm/min으로부터 650mm/min로 증가함에 따라 조대한 cellular조직이 미세한 cellular조직으로 변화하는 것을 볼 수 있다. 그러나, 50 및 350mm/min의 주조 속도하에서는 대체로 육각형의 regular cellular조직(hexagonal cells)이 형성되고 있음을 관찰할 수 있었다. Photo 2 및 3의 Al-0.5wt% 및 Al-1.0wt%Si 합금의 경우 순 Al의 경우와 마찬가지로 주조속도가 증가함에 따라 조대한 cellular조직이 미세한 cellular조직으로 천이되고 있으며, cell 형상은 순 Al에 비해 불규칙하였다. 그러나 주조 속도 및 Si함량의 증가에도 불구하고 cellular조직으로부터 dendrite조직으로의 천이는 발견되지 않았다. Si함량이 0.5 및 1.0wt% 첨가된 경우, 50mm/min의 주조 속도하에서의 cell계면은 부분적으로 용융되어 불규칙적인 형상으로 돌출되어 있는 것을 관찰할 수 있으나, 순 Al의 경우에는 이러한 현상을 관찰할 수 없었다. 이것은 조대한 cell계면에 Si이 집중적으로 편석되어 용융온도가 주위 온도보다 낮아지기 때문인 것으로 사료된다. 실제, 50mm/min 주조 속도에서 제조된 Al-1.0wt%Si 합금주괴의 cell계면을 EDX로 분석한 결과 matrix보다 Si함량이 훨씬 큰 2.98wt%를 나타내고 있어, 이러한 사실을 뒷바침해 주고 있다.

Fig. 2는 Photo 1의 순 Al에서 관찰된 결과를

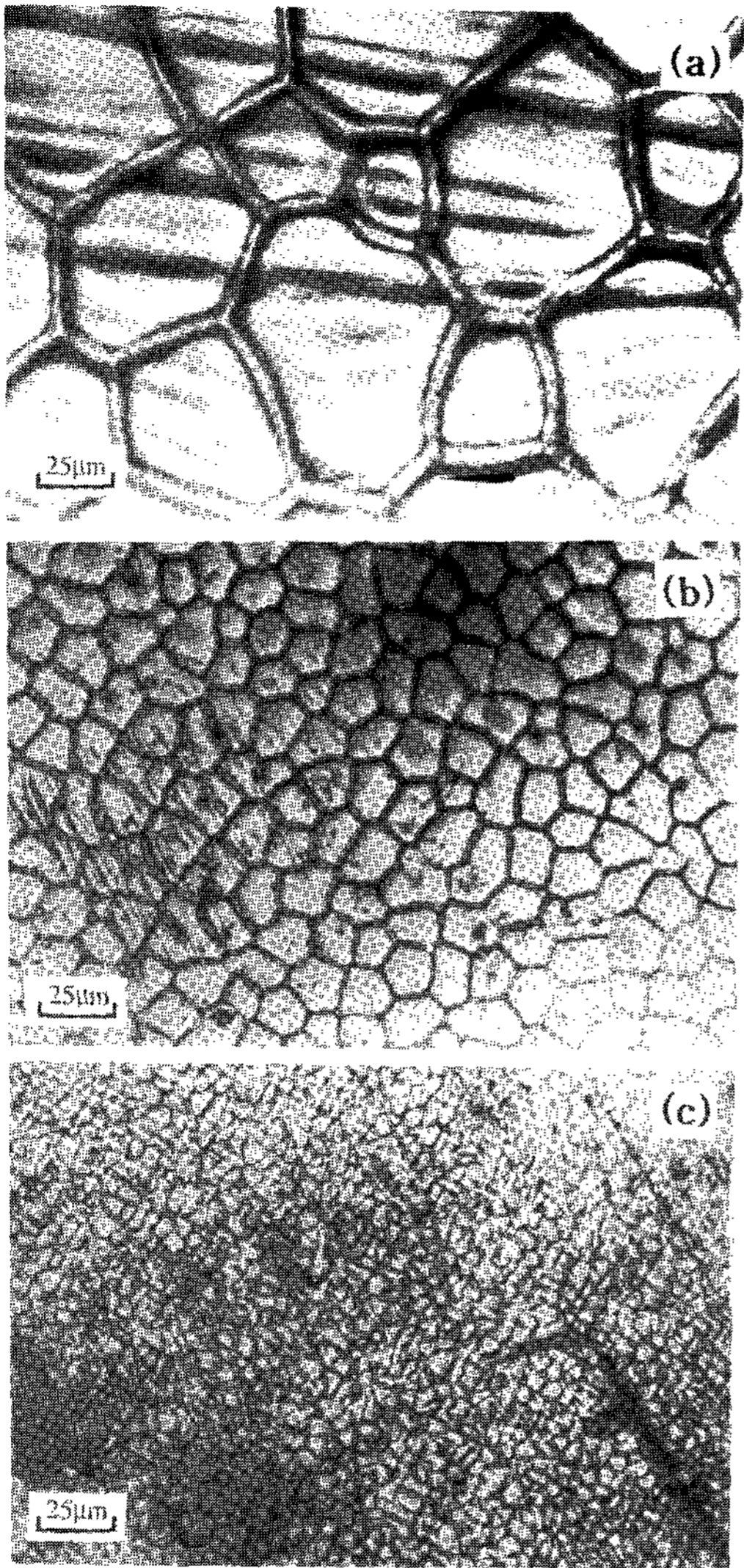


Photo 1. The decanted interface at the casting speed of (a) 50, (b) 350 and (c) 650mm/min, respectively, in pure Al(×400)

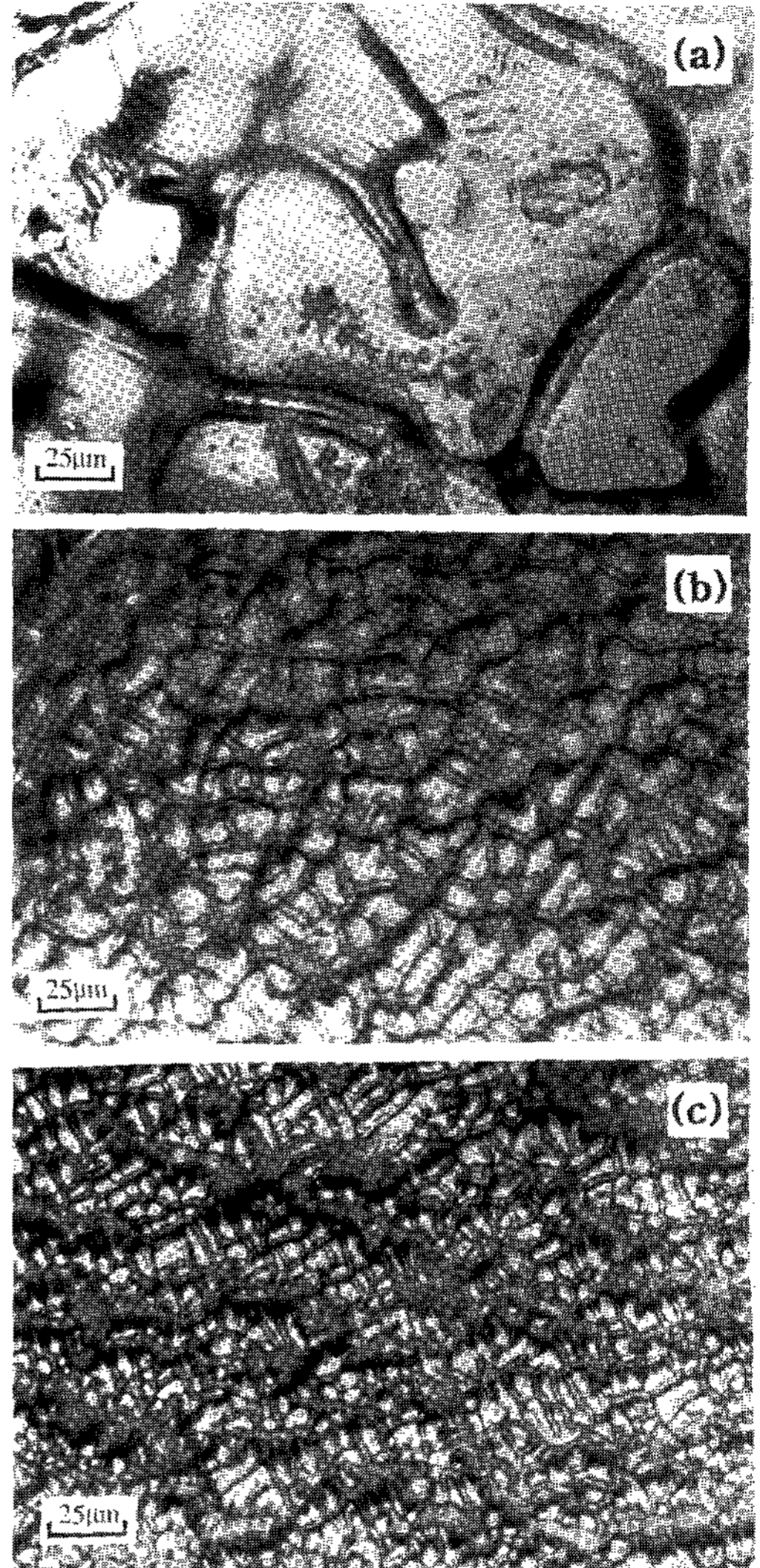


Photo 2. The decanted interface at the casting speed of (a) 50, (b) 350 and (c) 650mm/min, respectively, in Al-0.5wt%Si(×400)

토대로 하여 cell간격 λ 와 주조속도 R과의 관계를 나타낸 것이다. 본 연구에서 적용된 수평식 가열주형 연속주조 장치에서 온도구배 G는 주조속도 R에 비해 그 변화율이 매우 적어[5] 상수로 취급될 수 있고, cell spacing λ 는 Fig. 2와 같이 $1/\sqrt{R}$ 에 비례함을 보이게 되는데 이는 cell spacing λ 가 \sqrt{GR} 에 역비례한다는 타 연구자[6]의 결과와 일치함을 보이고 있다.

Fig. 3은 Si함량과 주조속도에 따라 형성된 응

고조직별 영역을 표시한 것으로 Si함량이 증가할수록, 그리고 주조속도가 증가할수록 계면이 불안정하여 hexagonal cellular조직이 irregular cellular조직으로 변화하고 있으며, 그 경계가 존재함을 알 수 있다.

그림의 좌측 최하단부에 표시되어 있는 바와 같이 순 Al의 경우, 주조속도가 20mm/min정도로 매우 느릴 때만 평활계면이 얻어졌다. 이것은 순도가 높고, 주조속도가 매우 느린 극히 제한적

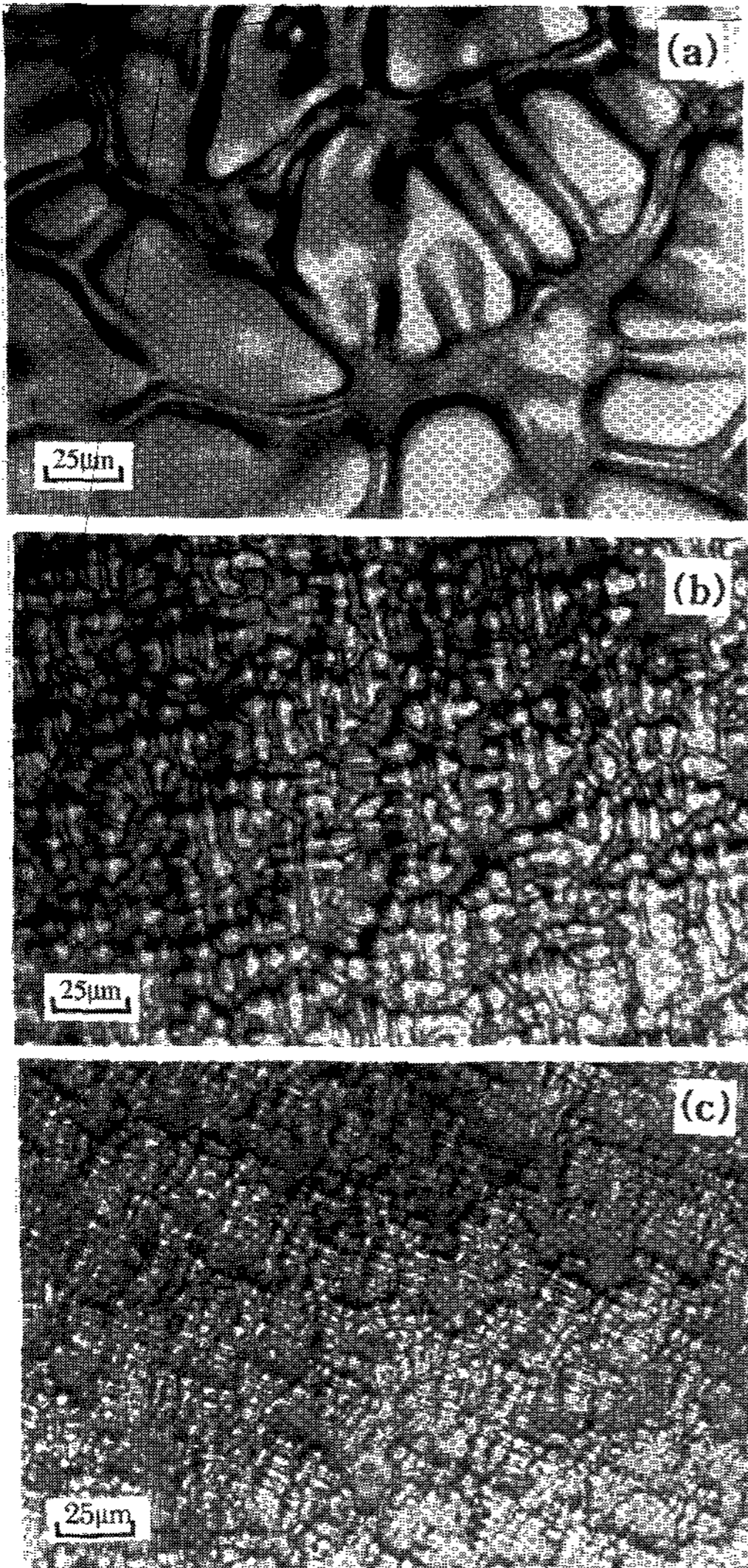


Photo 3. The decanted interface at the casting speed of (a) 50, (b) 350 and (c) 650mm/min, respectively, in Al-1.0wt%Si (×400)

인 영역내에서만 평활계면이 형성된다는 것을 시사하는 것이다.

3.2 줄무늬 조직 발생에 미치는 주조속도 및 Si함량

Photo 4는 순 Al주괴의 종단면 조직사진으로 주조속도가 50mm/min의 경우 2개의 긴 주상정이 존재함을 알 수 있다. 그러나 주조속도가 클

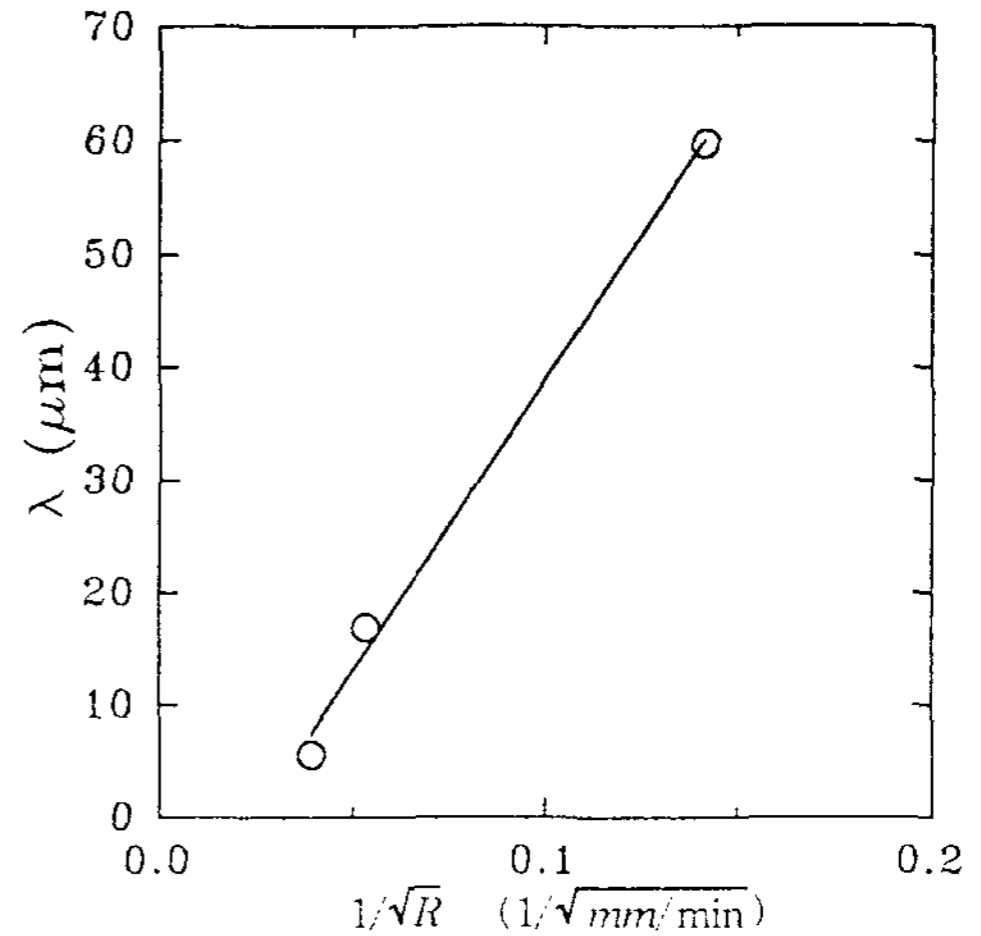


Fig. 2. Cell spacing λ vs. casting speed R in cellularly solidified pure Al. G_L was about $10^\circ\text{C}/\text{mm}$ at the casting speed of 350mm/min.

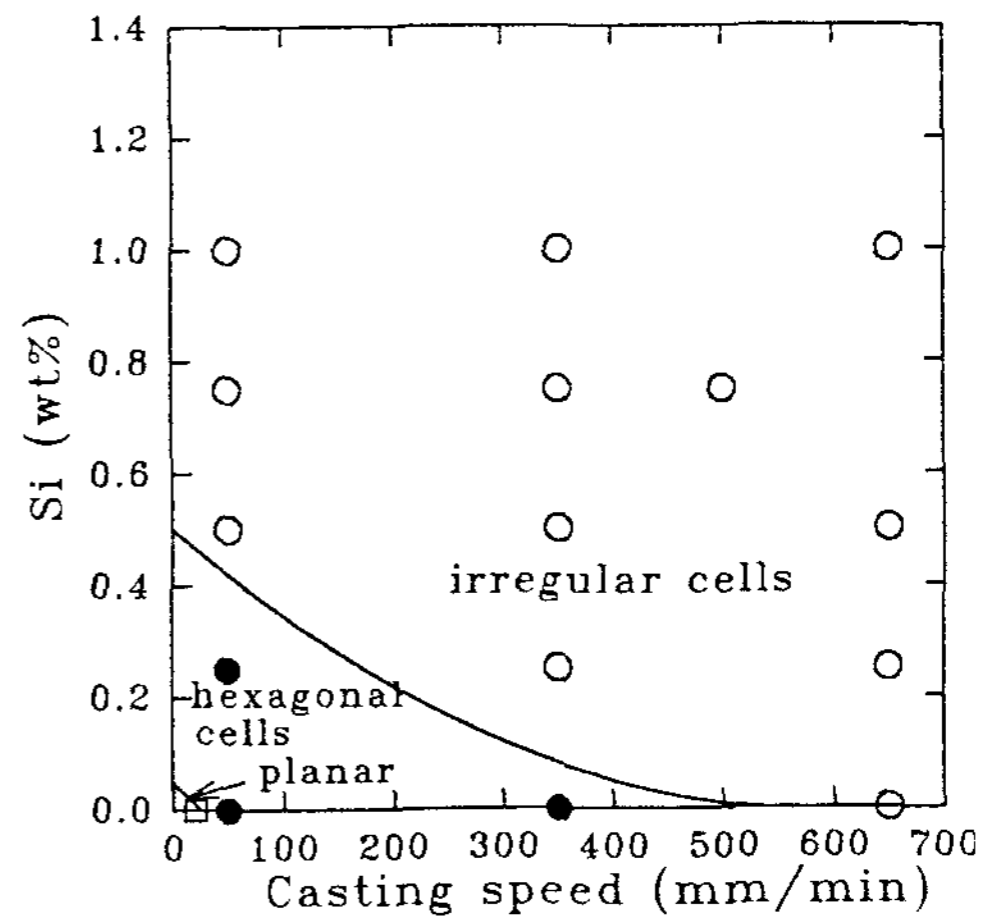


Fig. 3. The transition of hexagonal cells to irregular cells according to the Si amount(wt%) and casting speed.

수록 Si함량이 커질수록 인출방향과 수평으로 많은 줄무늬가 발생하고 있고, 결정입계의 관찰을 어렵게 하고 있다.

이러한 줄무늬는 growth twinning에 기인된다고 보고[2]하고 있는데, Fig. 4는 이를 확인하기 위해 XRD조사를 실시한 결과를 나타낸 것이다.

순 Al 및 Al-1.0wt%Si합금 모두에게 기대한 바와같이 결정성장 방향인 [100]방향에 수직인

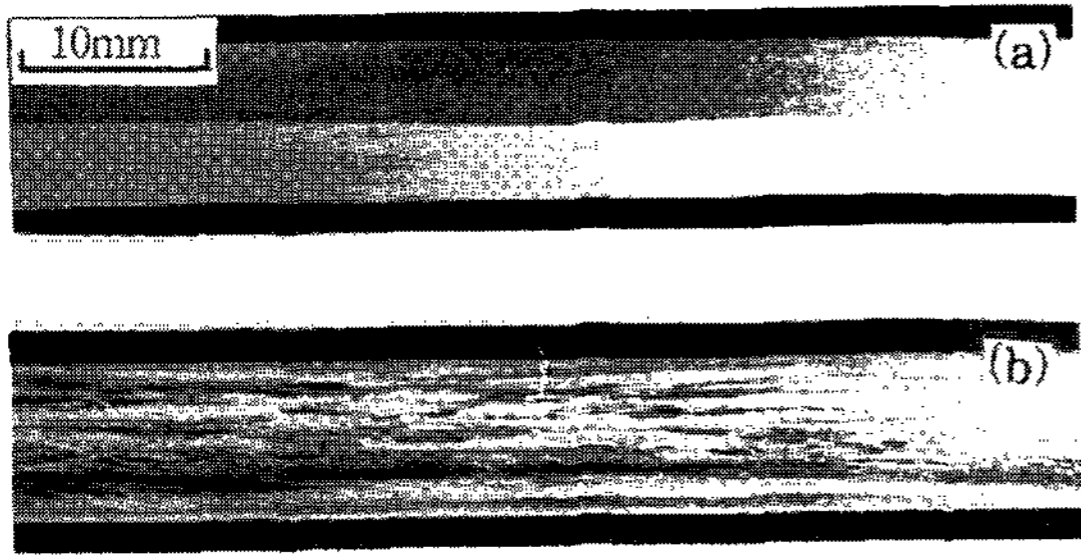


Photo 4. Longitudinal macrostructures of pure Al rod with 4mm in diameter : (a) 50mm/min casting speed and (b) 650mm/min casting speed.

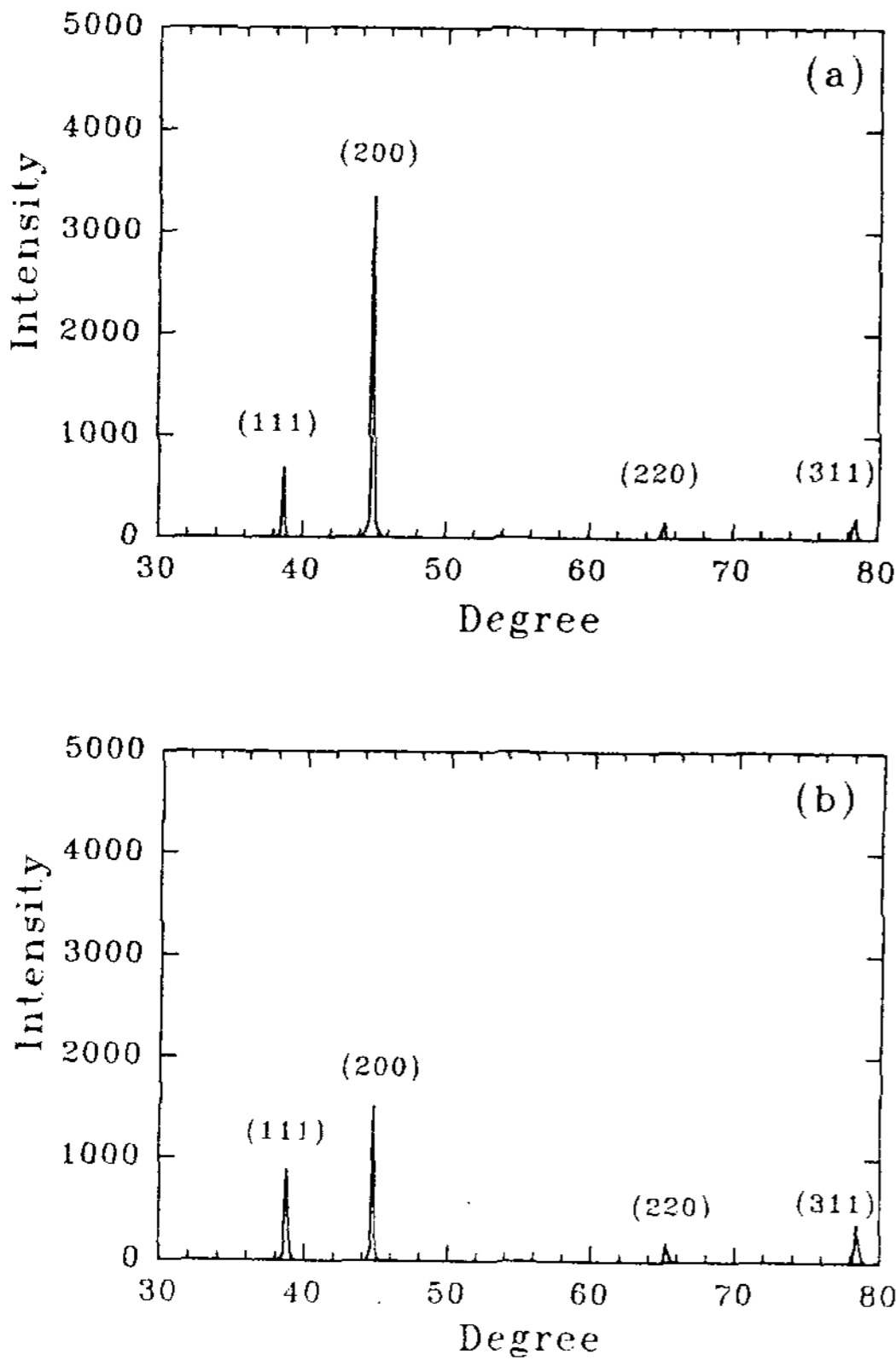


Fig. 4. X-ray diffraction analysis of (a) pure Al and (b) Al-1.0wt%Si rod casted under the casting speed of 50mm/min

(200)면에 큰 피이크를 확인할 수 있었다. 그러나 Al의 쌍정결정에 대응하는 (111)면의 피이크가 나타났으며, 이것으로 줄무늬는 growth twin-

ning과 관련이 있음을 보여주고 있다. Al-1wt% Si합금의 경우 순 Al에 비교하여 (200)면의 피이크가 (111)면의 피이크보다 상대적으로 큰 것으로 보아 줄무늬의 존재가 많으리라 예측되고, 이는 Fig. 5에서 확인되었다. 한편 통상 다결정 Al에 나타나는 피이크와 동등한 피이크가 확인되고 있는데, 이것은 본 연구에서 제조된 일방향 응고재가 완전한 단결정으로 이루어지지 않았다는 것을 보여주는 것이다.

Fig. 5는 Si함량과 주조속도에 따른 줄무늬 발생수를 나타낸 것이다.

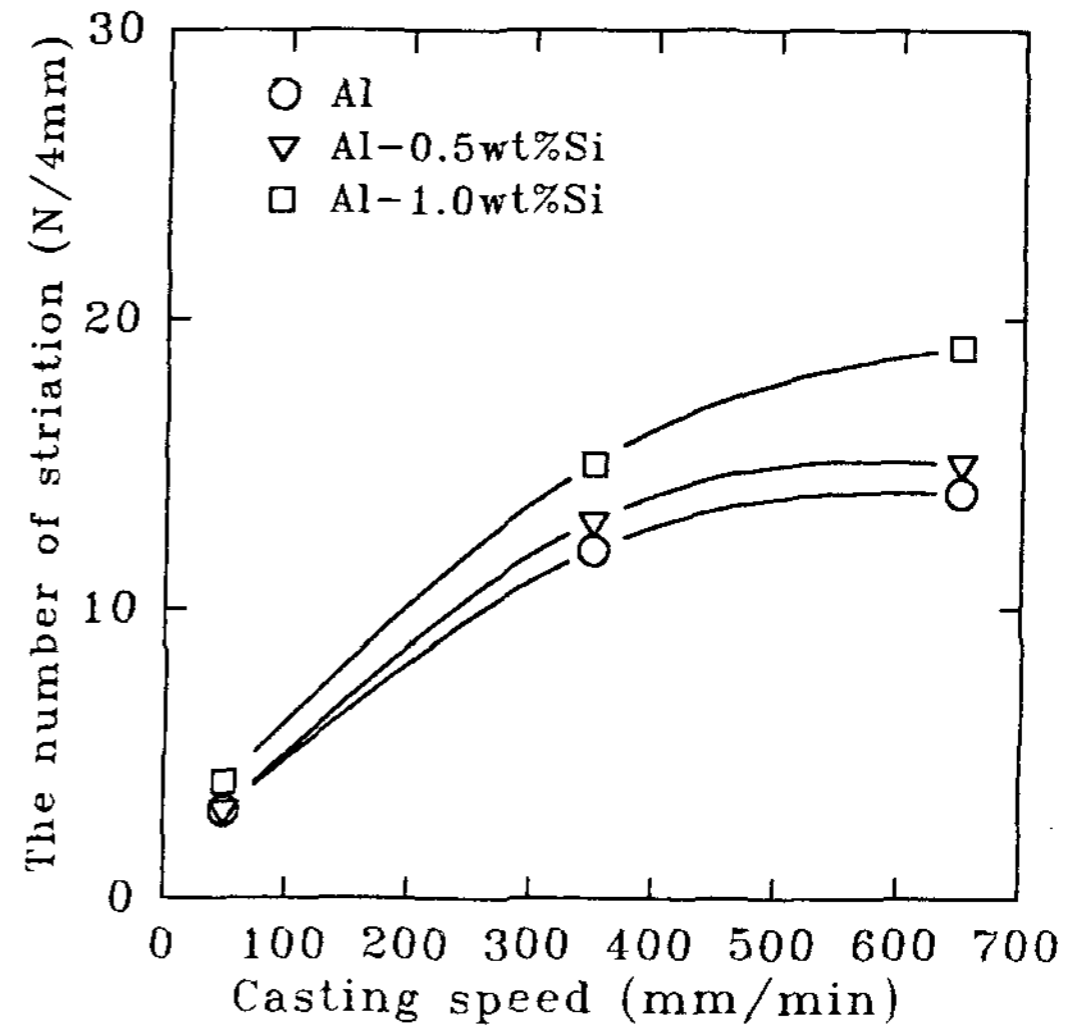


Fig. 5. Number of striation vs. casting speed at the horizontal cross-section of pure Al, Al-0.5wt%Si and Al-1.0wt%Si rod, respectively.

줄무늬 수는 주조속도가 증가할수록, 그리고 Si함량이 증가할수록 증가하는 현상을 보여주고 있다. 이처럼 주조속도와 Si함량에 따라 줄무늬가 증가하게 되는 원인은 아직 확실하게 규명되어 있지 않으나, 주조속도에 비례하여 열응력이 증가하게 되고, 또 Si함량에 비례하여 공정 Si상 주위의 응력이 증가하기때문으로 추정할 수 있다. 또한 줄무늬수가 Si함량 및 주조속도에 비례적으로 증가하고 있는 사실은 Fig. 3에 표시한 hexagonal cellular조직이 irregular cellular조직으로의 천이과정에 따른 계면의 불안정과 일치하고 있다.

주조 직후에는 전혀 줄무늬가 없는 일방향 응

고조직을 한 순 Al주괴를 실온에서 30일간 방치 하였을 때에도 다량의 줄무늬가 발생되었으며, 이러한 현상은 줄무늬가 액상Al에서 고상Al으로의 응고시에만 발생하는 것은 아니며, 응고중에 생성된 내부 응력 등에 의해 발생할 수 있다는 것을 표시하고 있다. 금후 이러한 결과를 토대로 줄무늬 조직의 발생원인을 더욱 상세하게 규명할 필요가 있다.

3.3 줄무늬 조직과 선재의 전기적, 기계적 성질과의 관계

Fig. 6 및 7은 순 Al 및 Al-Si합금에 존재하는 줄무늬와 전기적 및 기계적 성질과의 관계를 나타낸 것이다.

Fig. 6에서 알수 있듯이 순 Al의 경우, 줄무늬 수가 5에서 15로 증가함에 따라 전기저항은 $3.6 \times 10^{-2} \Omega \text{mm}^2/\text{m}$ 에서 $3.9 \times 10^{-2} \Omega \text{mm}^2/\text{m}$ 로 약간 증가하고 있으나 Al-0.5wt%Si 및 Al-1.0wt%Si합금의 경우, 줄무늬 수의 증가에 따른 전기비저항의 증가는 극히 미미함을 알 수 있다.

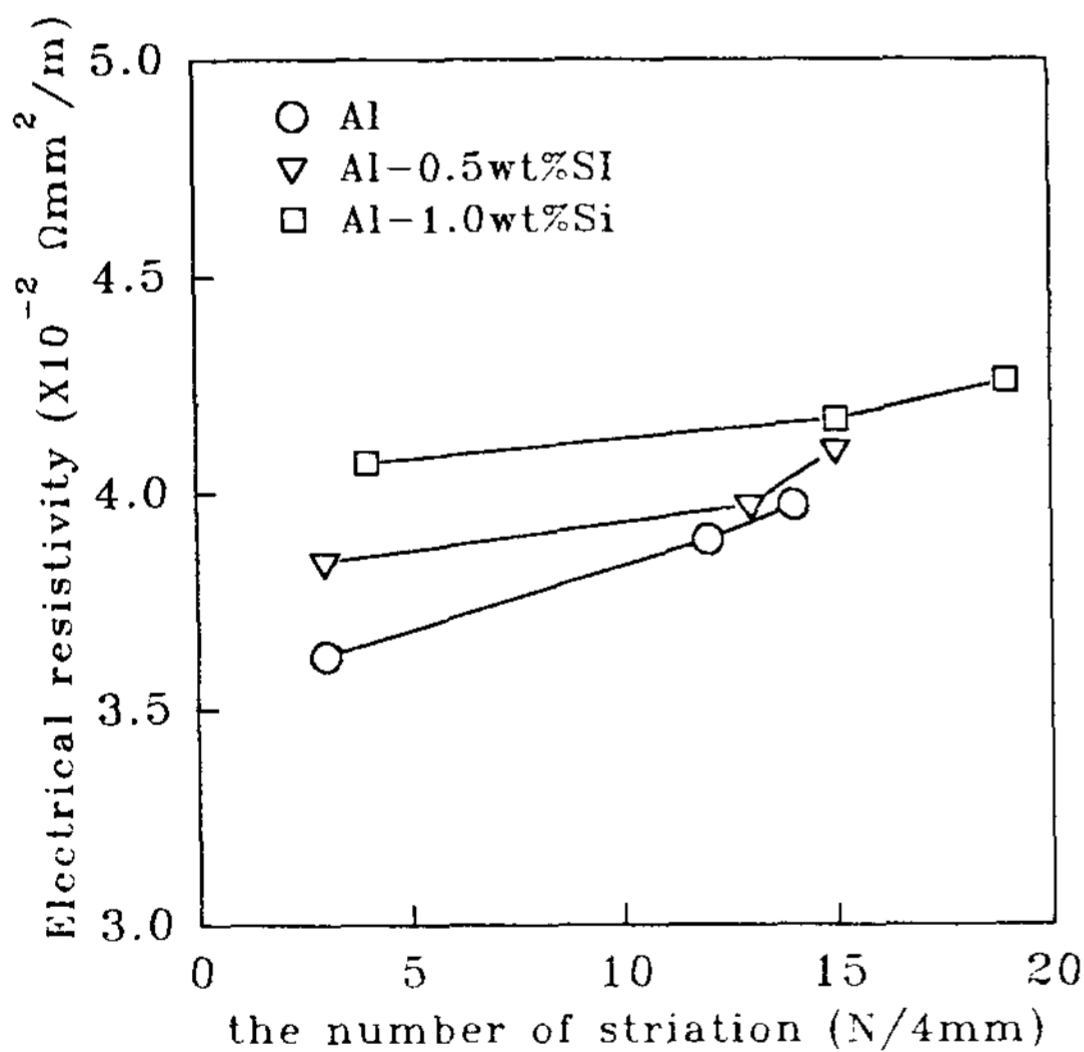


Fig. 6. Number of striation vs. electrical resistivity of the pure Al, Al-0.5wt%Si and Al-1.0wt%Si rod, respectively.

Fig. 7은 Al-1.0wt%Si 합금주괴를 50% 가공율로 가공한 후 줄무늬 수에 따른 미세경도 변화를 나타낸 것으로, 줄무늬 증가에 따른 경도의 변화

를 발견할 수 없었다. Fig. 6 및 7의 결과에서 알 수 있듯이 가열주형을 이용하여 응고조직을 제어할 경우, 경면주괴상에서 결합의 일종으로 알려져 있는 줄무늬의 존재가 전기적 및 기계적 성질에는 거의 영향을 미치지 않는다. 따라서, 가열주형을 이용하여 일방향응고 또는 단결정조직으로 제어된 주괴를 제조할 경우, 형성된 줄무늬의 수가 주조속도에 따라 증가한다 하더라도, 신선 등의 가공상에 고려되어야 할 만큼 중요한 결합이 아님을 시사하고 있다.

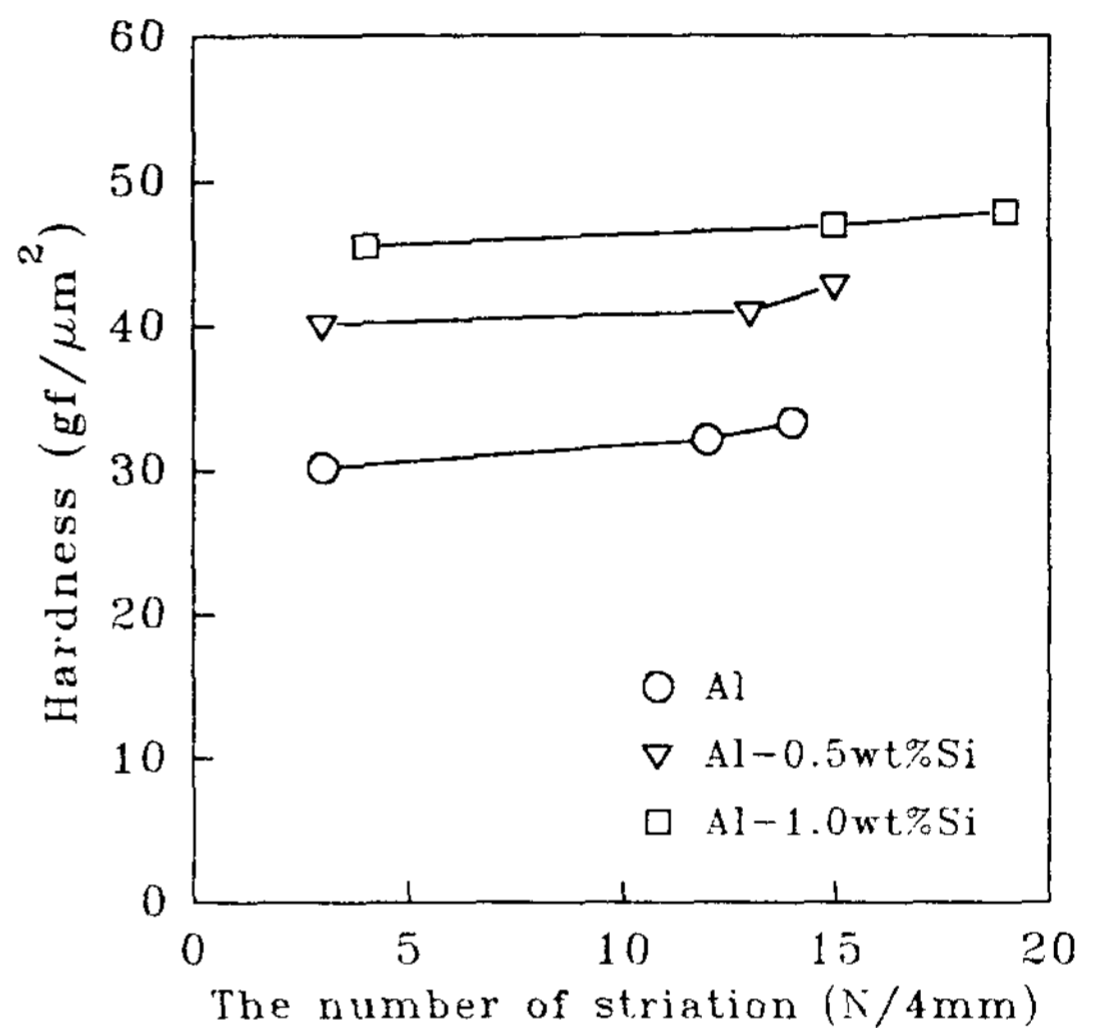


Fig. 7. Number of striation vs. hardness of the pure Al, Al-0.5wt%Si and Al-1.0wt%Si rod, respectively.

4. 결 론

가열주형 수평식 연속주조법을 이용하여 4mm 직경의 순 Al, Al-0.5wt%Si 및 Al-1.0wt%Si 합금주괴를 제조하였다. 그 응고조직 및 신선된 선재 및 전기 및 기계적 성질을 측정 조사분석하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 고액계면 조직은 순 Al의 경우 50 및 350mm/min주조속도에서는 비교적 규칙적인 hexagonal cellular조직을 갖고 있고, 주조속도의 증가에 따라 cellular조직은 미세화되었다. 그러나 Si함량 및 주조속도가 증가함에 따라 hexagonal cellular 조직은 irregular cellular조직으로 천

이되었고, 본 주조장치를 사용한 경우 극히 제한된 좁은 범위에서만 평활계면을 얻는 것이 가능함을 알 수 있다.

2. 주조속도 및 Si함량의 증가에 따라 주괴의 인출방향인 수평으로 줄무늬 결함이 증가되고 있고 이는 growth twin crystal의 생성에 기인된다는 사실이 확인되었다.

3. 줄무늬조직의 발생은 전기저항을 다소 감소시키고 경도를 다소 증가시키나 그 영향은 거의 무시할 수 있을 정도이었다. 이는 수평식 가열주형 연속주조법을 이용하여 일방향 또는 단결정 주괴를 제조할 경우 줄무늬의 존재가 신선 등 가공상에 고려되어야 할 만큼 심각한 결함이 아니라는 것을 시사한다.

후 기

본 연구의 일부는 1993년도 사단법인 한국주조공회회의 연구비 지원으로 행해졌으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 大野篤美 : 素形材, 12 (1986) 21
- [2] A. Ohno : J. of Metals, 1 (1986) 14
- [3] A. Ohno : J. of Metals, 1 (1991) 14
- [4] H. Soda, F. Chabchoub, W. H. Lam, S. A. Argyropoulos and A. McLean : Cast Metals, 4 (1991) 12
- [5] 김상동, 조형호, 김명한 : 주조, 13 (1993) 532
- [6] T. S. Plaskett, W. C. Winegard : Can. J. Phys., 38 (1960) 1077