

|||||||
論 文
 |||||

가열주형 연속주조시 발생하는 줄무늬 결함에 관한 연구

안기성 · 송태석 · 지태구* · 조형호** · 김명한

A Study on the Occurrence of the Striation Defect during the Continuous Casting with the Heated Mold

Ki-Sung An, Tae-Seck Song, Tae-Gu Ji, Hyung-Ho Jo and Myung-Han Kim

Abstract

The striations parallel to the casting direction are the characteristic defects occurring during the unidirectional solidification of nonferrous metals such as pure Al and Sn. It has been known that the defects affect the recrystallization temperature as well as the mechanical and electrical properties of Al. However, it has not been still known about the effect of casting factors such as the casting speed, rod diameter of cast metals, and alloying elements on the occurrence of striations. In the present study, these casting factors affecting the occurrence of striation were investigated by adopting the quantitative examination of striations. Also, the relation between striation defects and feathery grain, which are very similar to the striation defects, was studied. (Received January 10, 1997)

1. 서 론

Al 및 Sn합금 등의 일방향 응고주괴를 제조할 때 인출방향과 평행하게 줄무늬(Striation)가 발생된다. 이러한 줄무늬는 Al 및 Sn등 몇몇 금속 및 그 합금에서만 나타나고 주조금속의 순도가 높을수록, 주조속도가 증가할수록 발생량이 증가하고 있다[1-3].

Ohno[3]는 이러한 줄무늬가 주괴제조시 발생하는 thermal strain의 결과 발생하는 일종의 결함이라고만 간단히 설명하고 있다. 또한, Kim[1,4]은 이러한 줄무늬가 주조속도가 증가할수록 많아지고 또한 줄무늬가 재결정에 영향을 미침을 밝힌바 있다. 그러나 아직 이 줄무늬 발생을 좌우하는 주조조건, 주조금속 등을 포함한 제 요인과 결함의 일종으로서의 줄무늬의 정체에 대해 자세히 규명된 바는 없다.

본 연구에서는 가열주형 연속주조장치[1-2]를 이용하여 순 Al, Sn금속 및 그 합금의 일방향 응고주괴를 제조하고 그 조직 및 특성을 분석함으로써 줄무늬 발생에 영향을 주는 제 요인 및 줄무늬의 정체를 규명하

고 아울러 줄무늬의 존재가 주괴의 물성특성에 끼치는 영향을 연구함으로써 가열주형 연속주조장치를 이용한 고품위 주괴의 제조조건 확립에 기여하고자 한다.

2. 실험방법

가열주형 수평식 연속주조장치(진공용해, 1회용해 용량 Al기준 1.4kg)를 사용하여 4~8 mmφ Al (99.993%), Sn (99.9%), Al-Ti, Al-Cu 및 Sn-Bi합금 주괴를 제조하였고 그 제조 조건은 표1과 같다.

제조된 주괴는 인출 방향으로의 단면을 절단하여 연마하였고, 에칭은 아래와 같은 방법으로 실시한 후 광학현미경, SEM(Hitachi사, H2550C모델) 등을 이용하여 거시 및 미시 조직을 관찰하였다.

2.1 에칭방법

- ① Al 및 Al 합금 : 왕수시약($\text{HNO}_3:\text{HCl}:\text{C}_2\text{H}_5\text{O}_3=1:3:2$)으로 수십초간 Immerse.
- ② Sn 및 Sn 합금 : $\text{HCl}(5\%), \text{H}_2\text{O}(95\% : 50\sim 60^\circ\text{C})$ -

충북대학교 공과대학 재료공학과, 금속응고신소재연구소

(Dept. of Materials Eng., Chungbuk Nat'l Univ., Cheongju 367-900 and RASOM)

*홍익대학교 과학기술대학 금속과 (Dept. of Metallurgy, Hongik Univ., Chochiwon 339-800)

**생산기술연구원 (Academy of Industrial Engineering, Incheon 404-254)

수십초~수분간 Immerse or swab.

제조된 순 Al과 Al-0.1wt%Ti 합금의 주괴를 인출방향과 평행한 단면을 취하여 XRD(Scintag사의 XDS 200모델)분석을 행하였다.

또한 50, 350 및 650 mm/min 주조 속도에서 제조된 4mmφ 순 Al주괴를 25, 50, 75%의 단면 수축율로 인발가공후 250~450°C온도에서 1시간 열처리하여 열처리 조건에 따른 재결정율을 Image analyzer (Cambridge Instrument사, Quantimet 520모델)를 이용하여 조사하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 줄무늬의 거시 및 미시조직 관찰

Photo 1 및 2는 각각 주조 속도 100 mm/min에서 제조된 8 mmφ 순 Al 및 6 mmφ 순 Sn 주괴의 인출방향

단면을 접사촬영하여 얻은 거시적 조직이다. 각 사진에서 인출방향과 평행하게 많은 줄무늬가 발생된 것을 관찰할 수 있고 주조 금속 종류에 따른 줄무늬의 발생수는 다소 차이는 있지만 줄무늬의 거시적 형상에서는 큰 차이를 보이지 않고 있다. Photo 3은 Photo 1에 나타난 고순도 Al 주괴 단면을 광학현미경을 이용하여 조사한 사진으로 화살표 부위의 두께 150~200 μm, 길이 10 cm 이상의 띠가 줄무늬에 해당된다.

이 줄무늬는 에칭시 우선적으로 부식되어 오목하게 파인 것을 알 수 있다. Photo 4는 직경 6 mmφ의 고순도 Sn 주괴의 미시적 단면조직 사진으로 화살표 부위에 검은 띠가 거시적 단면조직의 줄무늬 부위에 해당된다.

이 부위 역시 Al의 경우와 같이 에칭시 우선적으로 부식되어 오목하게 파여 있다. 한편, 화살표 부위에 길이 10 cm 이상의 긴 줄무늬 이외에 짧은 줄무늬가 존재하고 있음을 볼 수 있는데, 이러한 짧은 줄무늬는

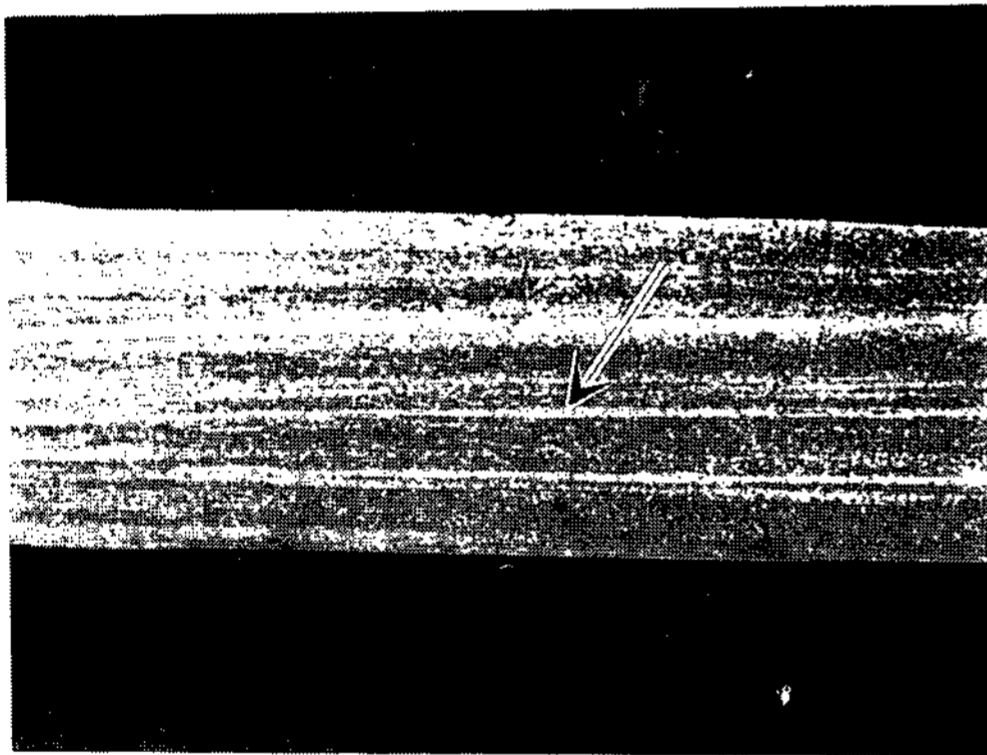


Photo. 1. The macrostructure of longitudinal cross-section of 8 mm dia. pure Al rod.

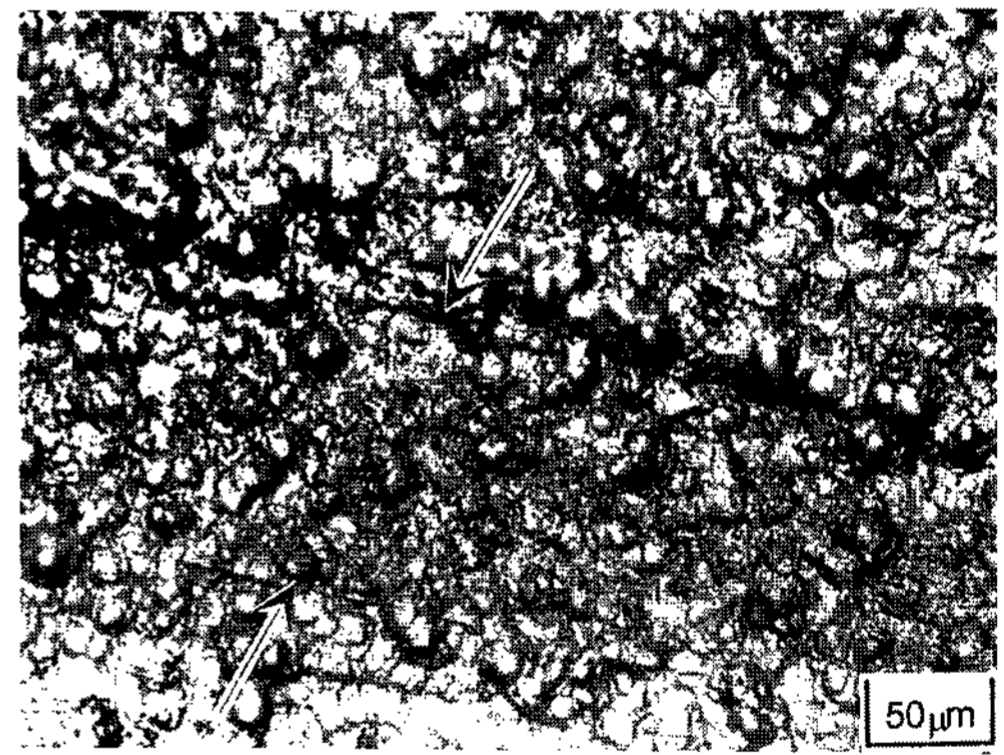


Photo. 3. The microstructure of longitudinal cross-section of 8 mm dia. pure Al rod.

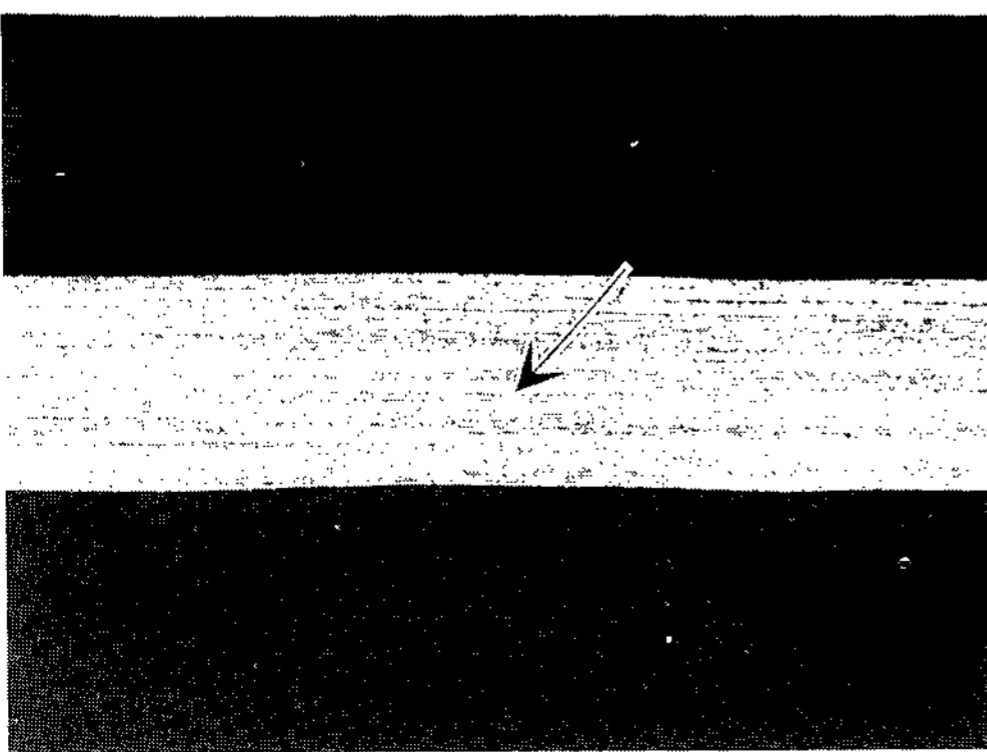


Photo. 2. The macrostructure of longitudinal cross-section of 6 mm dia. pure Sn rod.

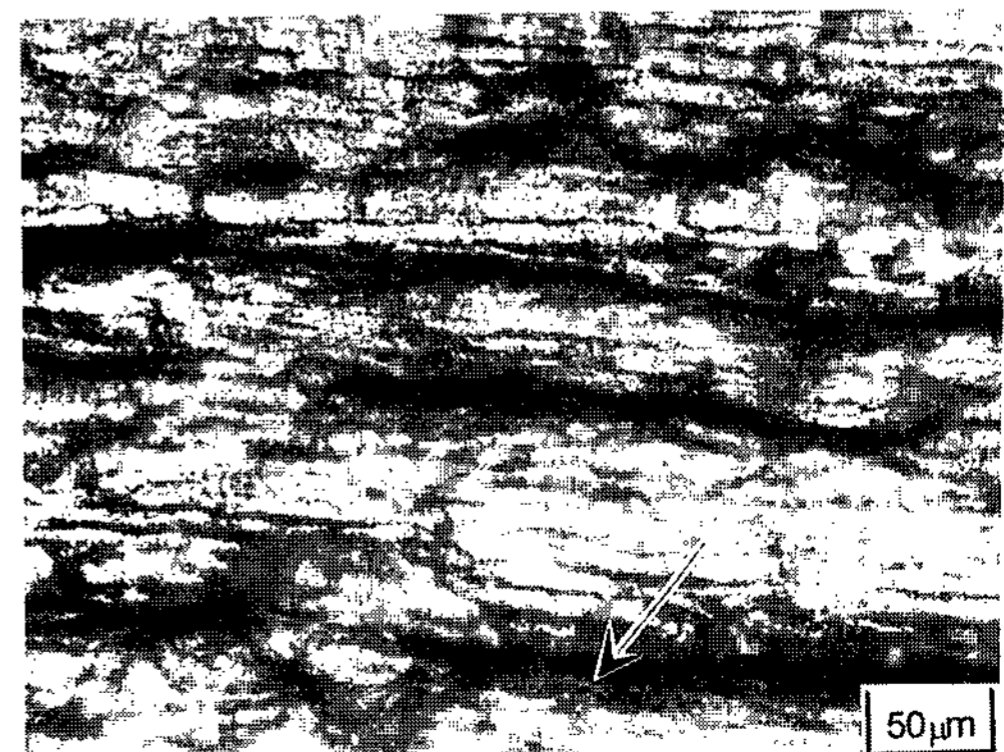


Photo. 4. The microstructure of longitudinal cross-section of 6 mm dia. pure Sn rod.

거시적 조직에서는 관찰되지 않는다. Photo 5는 Al-0.1wt%Cu 주괴의 길이방향 단면의 미시조직으로, 인출방향과 평행하게 블록 튀어나온 줄무늬를 볼 수 있고 화살표 부위의 몇 개의 줄무늬가 거시적으로 볼 때 한개의 줄무늬로 관찰되고 있다.

Photo 6은 Al-0.1wt%Ti 주괴 단면의 미시조직을 관찰한 것으로 거시조직에서는 순 Al이나 Sn 주괴에서 볼 수 있는 동일한 형태의 줄무늬가 나타나나 미시조직은 이들 금속과 구분이 되는 우모상조직이 관찰되고 있다. 사진에서 화살표로 나타난 3줄의 우모상조직은 거시조직에서 하나의 줄무늬로 관찰된다.

3.2 줄무늬 발생에 미치는 주괴 직경의 영향

Fig. 1은 4 및 8 mm 직경의 순 Al 주괴에서 주조 속도에 따른 거시적 줄무늬수의 변화를 나타낸 것으로 4

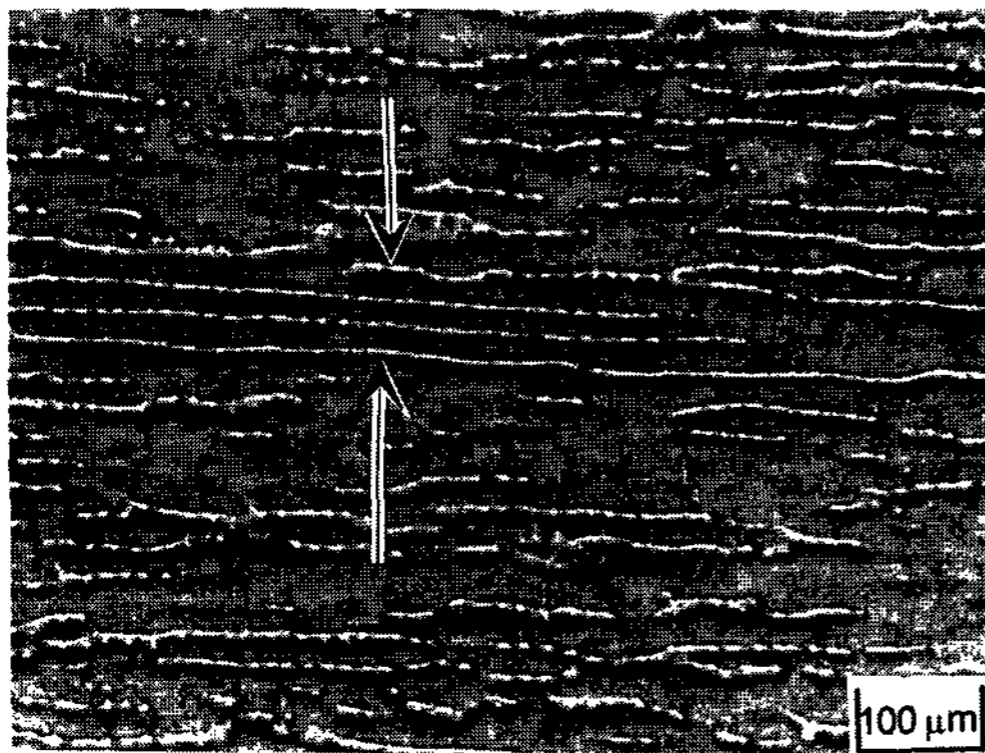


Photo. 5. The microstructure of longitudinal cross-section of 8 mm dia. Al-0.1wt%Cu rod.

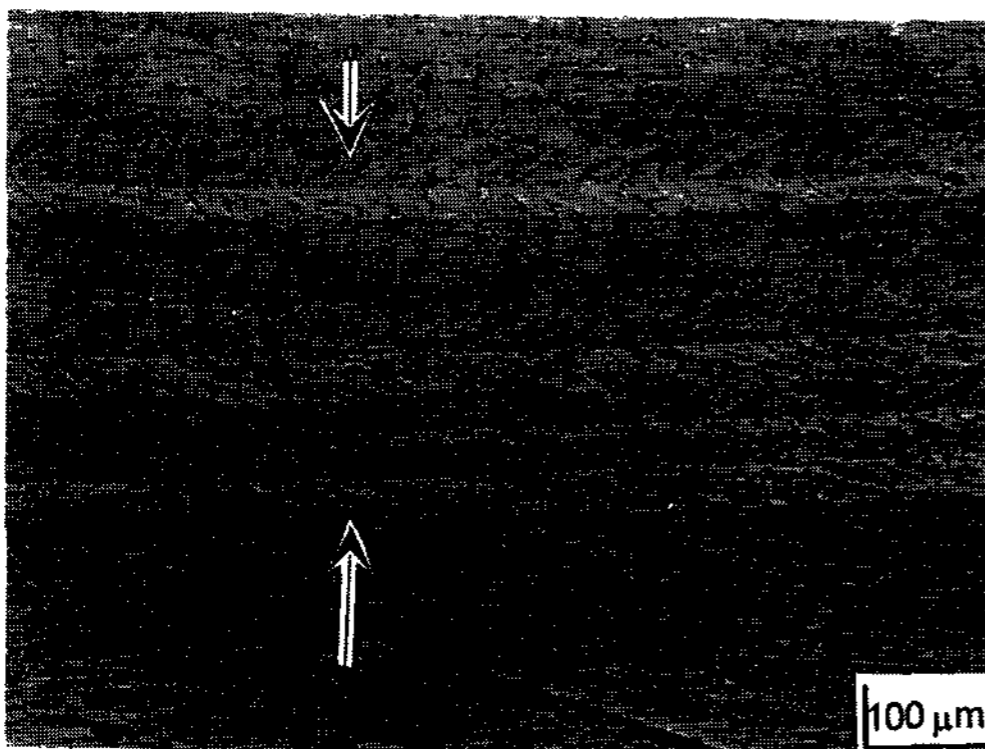


Photo. 6. The microstructure of longitudinal cross-section of 8 mm dia. Al-0.1wt%Ti rod casted at the speed of 50 mm/min.

및 8 mm 직경의 주괴 모두에서 주조 속도에 따라 줄무늬 수가 증가함을 알 수 있다. 이 그림에서 Y축은 주괴직경의 단위길이(1 mm)당 줄무늬수를 나타낸다.

이러한 결과는 주조 속도의 증가에 따라 냉각 속도가 증가되고 이에 따른 큰 열응력이 줄무늬 결함을 증가시키기 때문인 것으로 사려된다. 주괴직경의 단위 길이당 발생하는 줄무늬 수는 주괴직경에 큰 영향을 받지 않는데 이는 Al 금속의 경우 열전도도가 빨라 직경에 따른 냉각속도의 차이가 없기 때문이다.

Fig. 2는 줄무늬 발생에 미치는 주조 금속의 영향을 나타낸 것으로 직경이 6 mmφ인 Sn의 경우 4 mmφ인

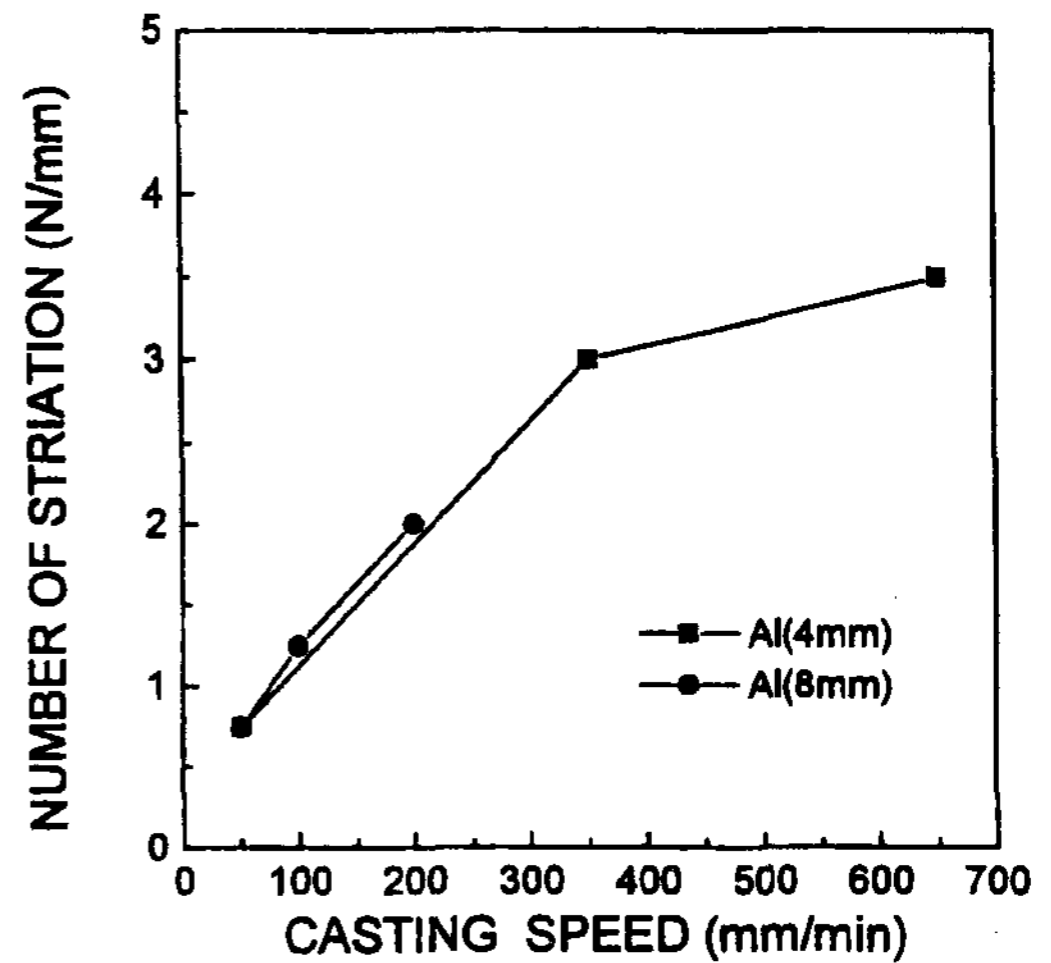


Fig. 1. The effect of cast rod diameter on the occurrence of striation.

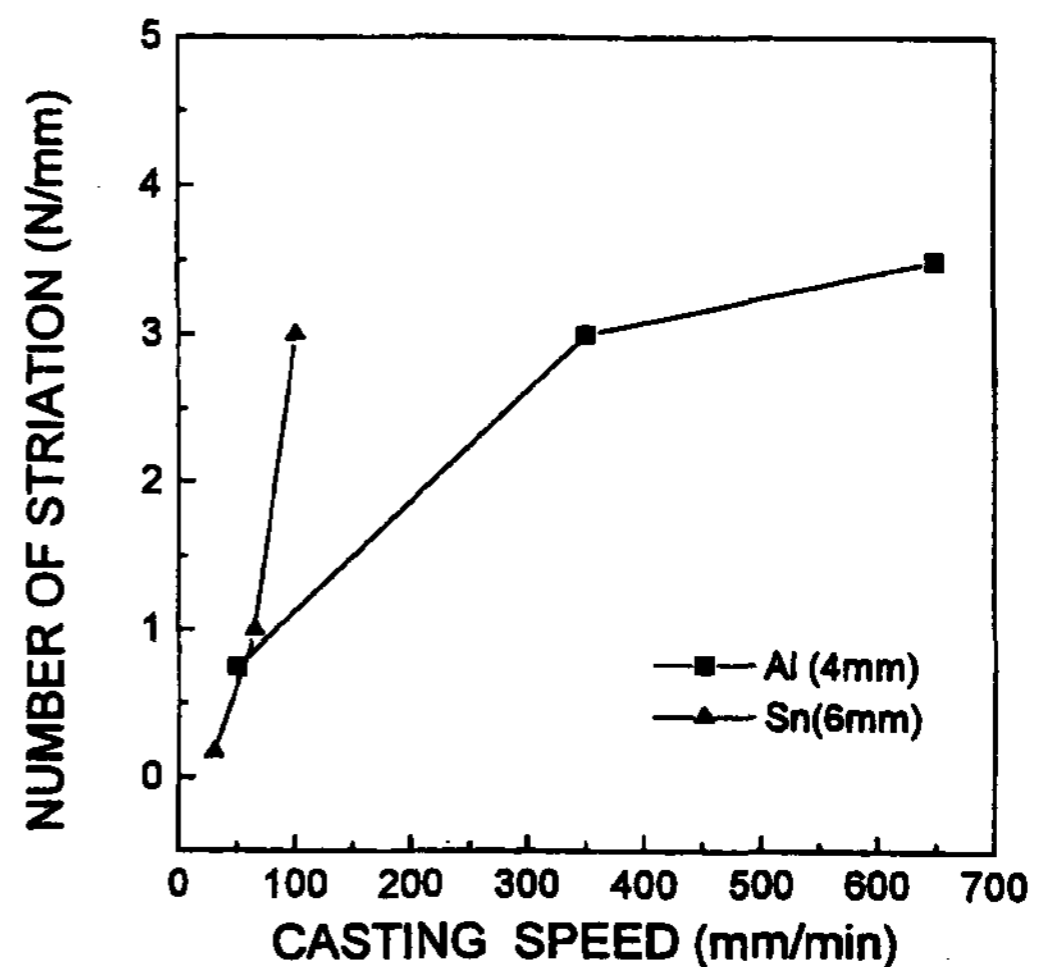


Fig. 2. The effect of cast metal on the occurrence of striation.

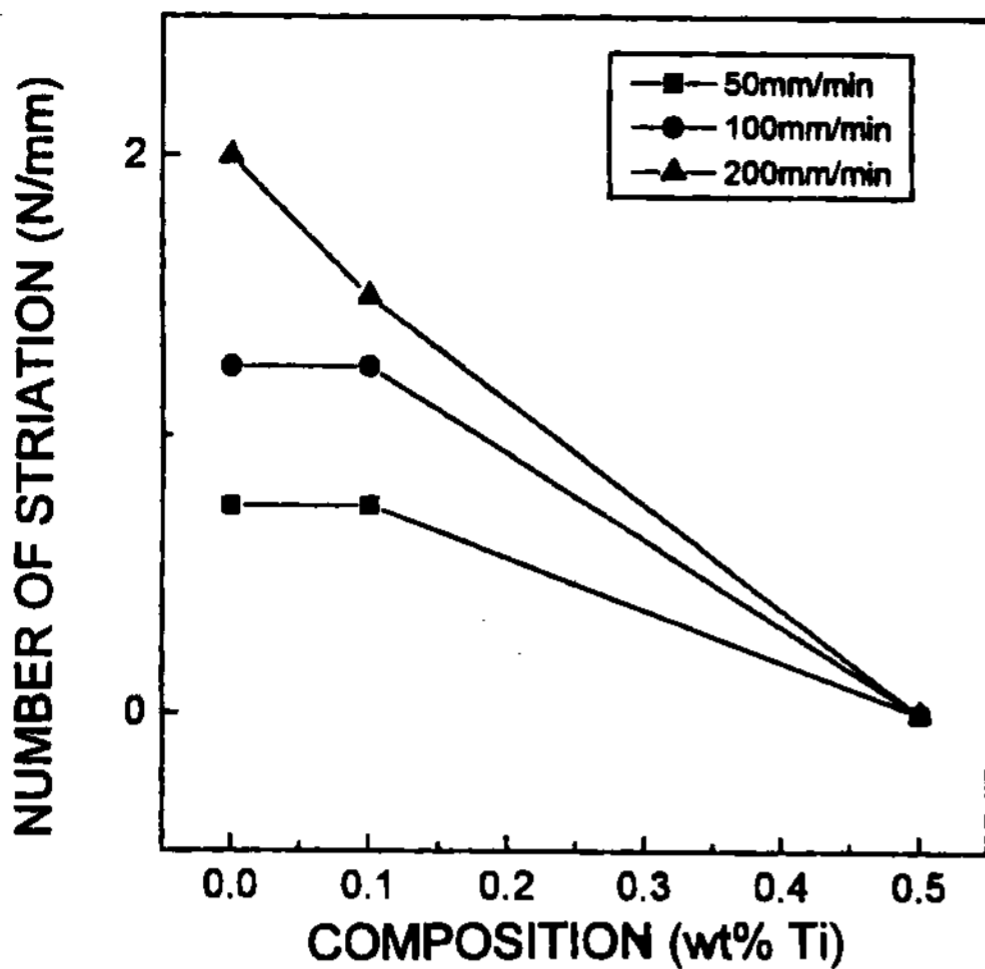


Fig. 3. The effect of Ti amount on the occurrence of striation in Al-Ti alloy (8 mmφ rod).

Al에 비해 주조 속도에 따른 단위직경(mmφ)당 줄무늬 발생 수가 더 급격히 증가하는 것을 알 수 있다.

이는 Sn의 경우 열응력의 증가가 줄무늬 수를 매우 민감하게 증가시킴을 알 수 있고 Sn이 Al에 비해 기계적 강도가 낮아 열응력에 의한 변형(줄무늬의 형태로 나타남)이 가장 크게 된 것으로 사려되나 주조금속별 줄무늬 발생여부 및 발생빈도에 관해서는 추후 계속적인 연구가 필요하다.

3.3 합금원소 첨가가 줄무늬 발생에 미치는 영향

Fig. 3은 Al합금에서 Ti 함량이 줄무늬 발생에 미치는 영향을 나타낸 것으로 50, 100 및 200 mm/min의 모든 주조 속도에서 Ti의 함량이 증가함에 따라 줄무늬 수는 감소하는 것을 보여주고 있다.

특히 Ti 함량이 0.5%로 증가하게 되면 줄무늬는 사라지고 주괴 전체에 걸쳐 미세한 등축정이 관찰되고 있다(Photo 7).

이러한 결과는 Ti 첨가에 따른 입자미세화 효과가 줄무늬 발생을 억제시킴을 의미한다. Fig. 4는 순 Al과 Al-0.1wt%Ti 합금주괴의 XRD 결과이다. 여기서 순 Al에 비해 Al-0.1wt%Ti 합금의 경우 줄무늬의 존재를 나타내는 (111) peak[1,4]가 매우 작은 것을 알 수 있고, 이는 Ti의 첨가에 의해 줄무늬의 발생이 억제되었음을 나타내는 또 다른 결과이다.

Fig. 5의 Al-Cu 합금의 경우는 Al-Ti의 경우와 마찬가지로 주조속도가 감소하고, Cu함량이 증가함에 따

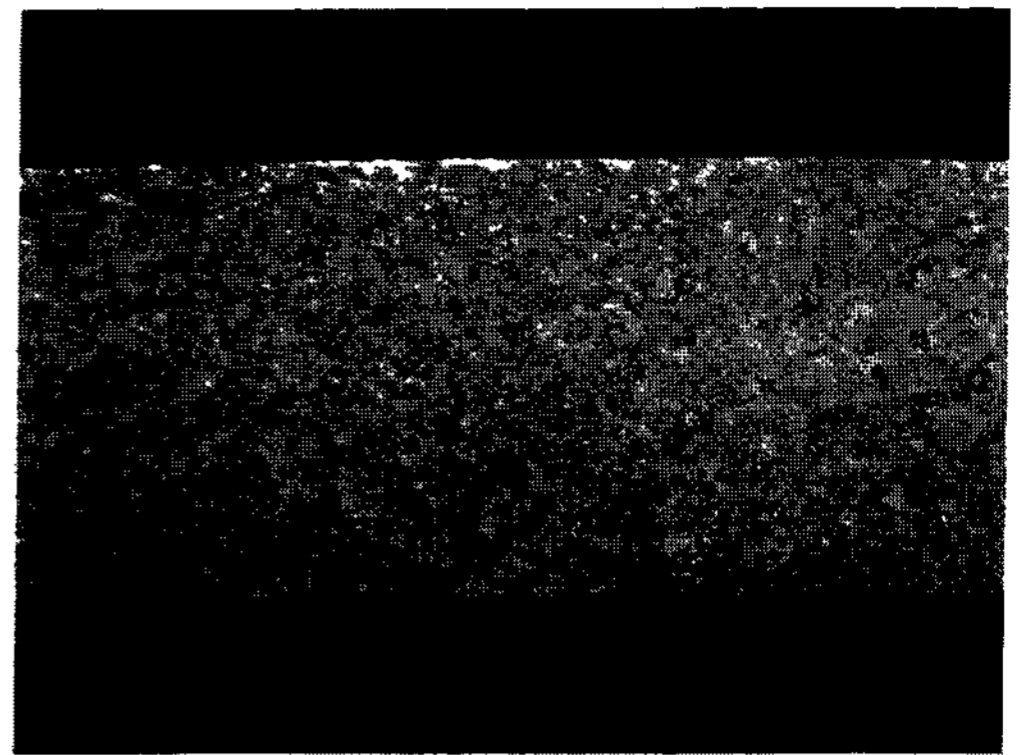
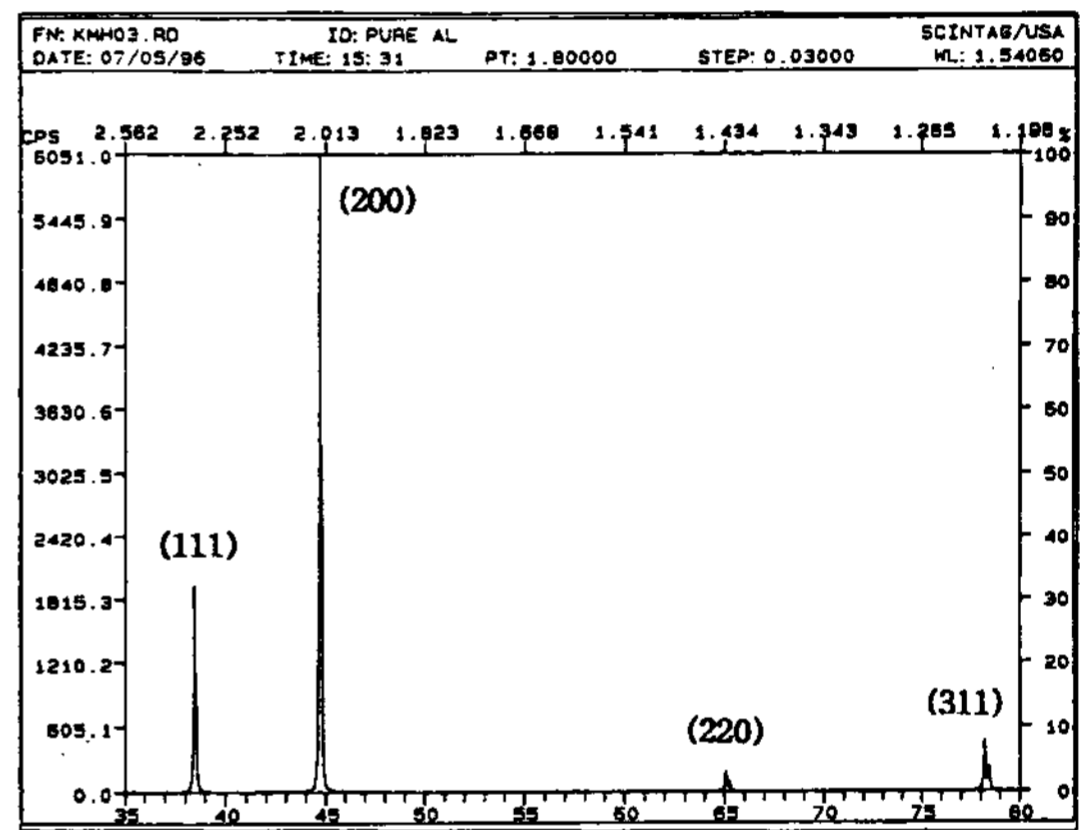
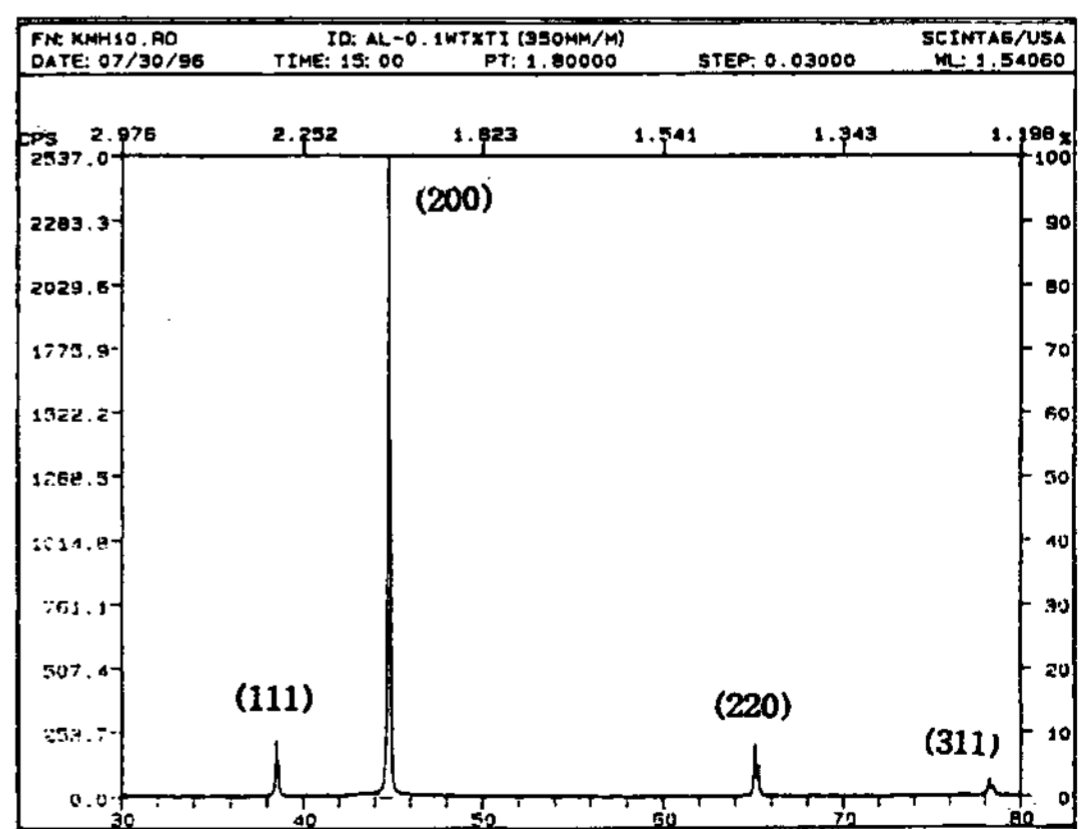


Photo. 7. The macrostructure of longitudinal cross-section of 8mm dia. Al-0.5wt%Ti rod casted at the speed of 50 mm/min (× 200).



(a)



(b)

Fig. 4. The XRD analysis of pure Al and Al-0.1wt%Ti alloys.

라 줄무늬 발생수가 감소하고 있다.

Fig. 6은 순 Al과 여기에 Ti 및 Cu원소를 0.5wt% 첨

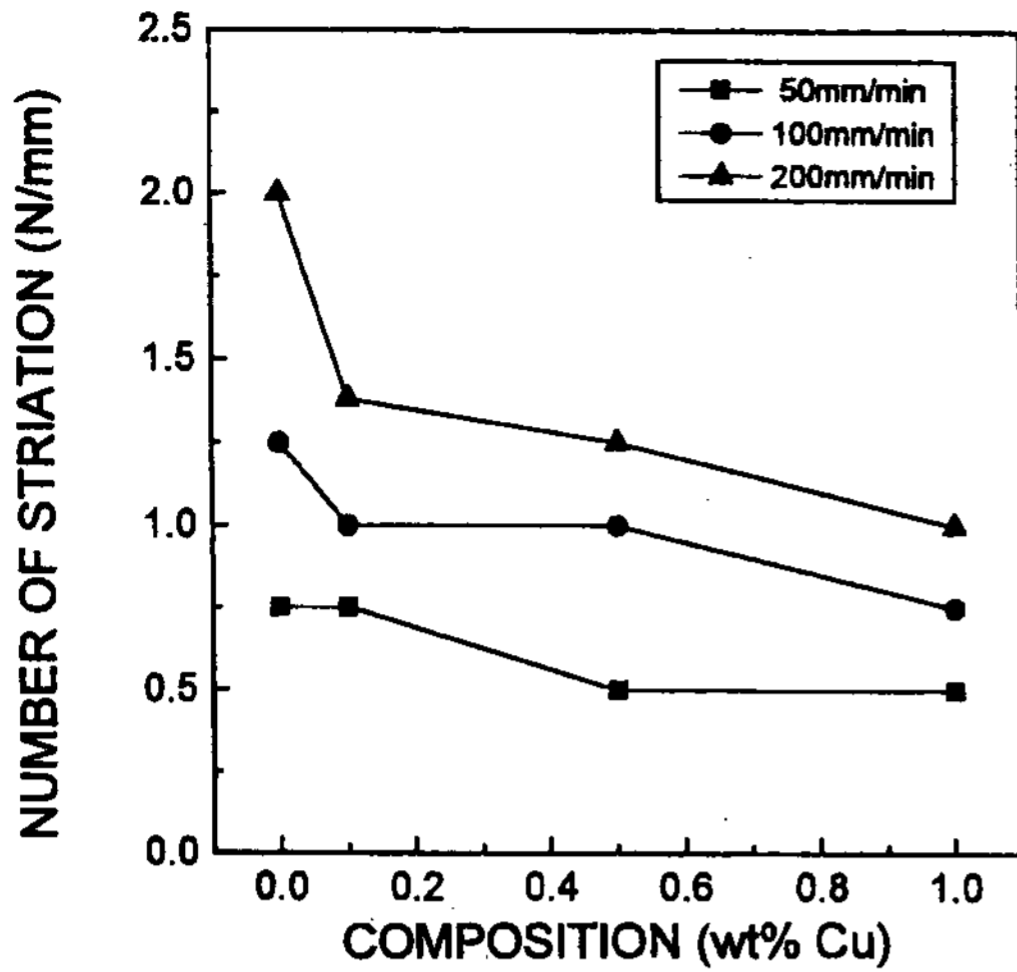


Fig. 5. The effect of Cu amount on the occurrence of striation in Al-Cu alloy (8 mmφ rod).

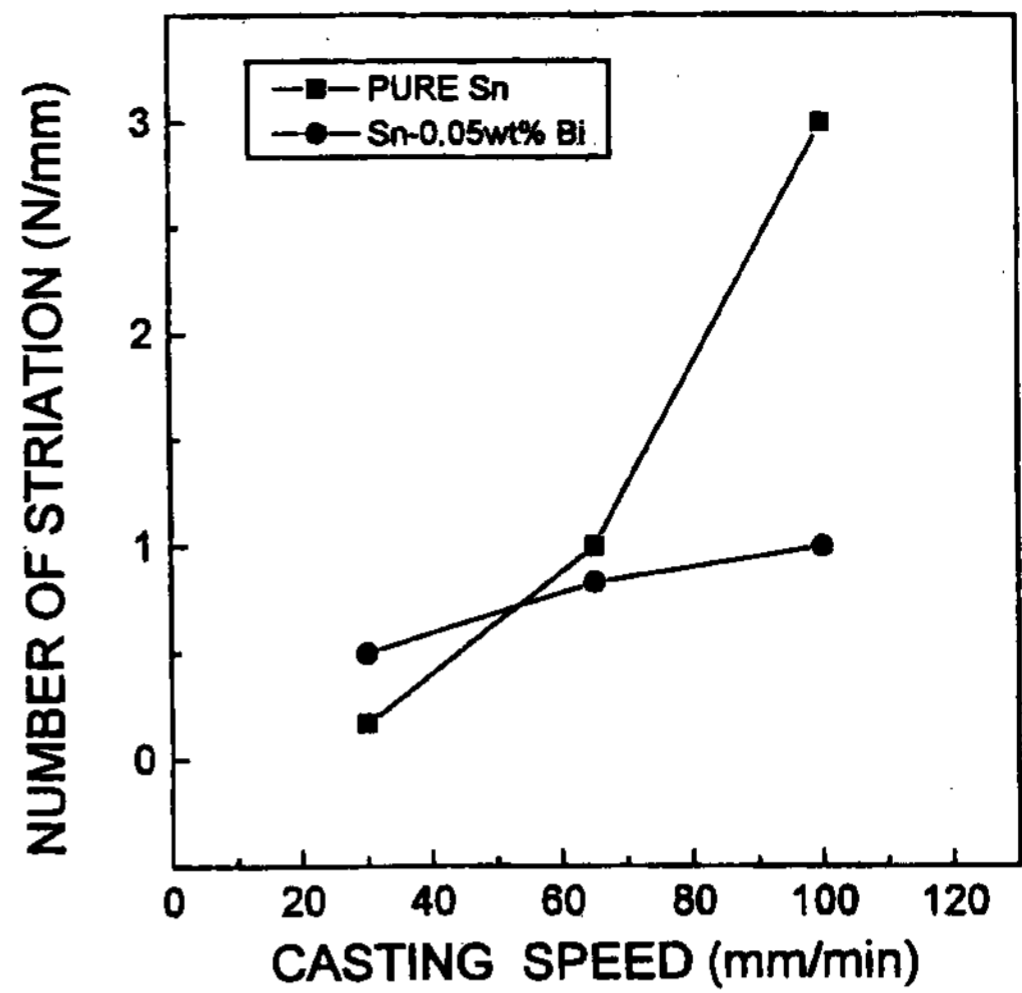


Fig. 7. The effect of casting speed on the occurrence of striation in pure Sn and Sn-0.05wt%Bi, respectively (6 mmφ rod).

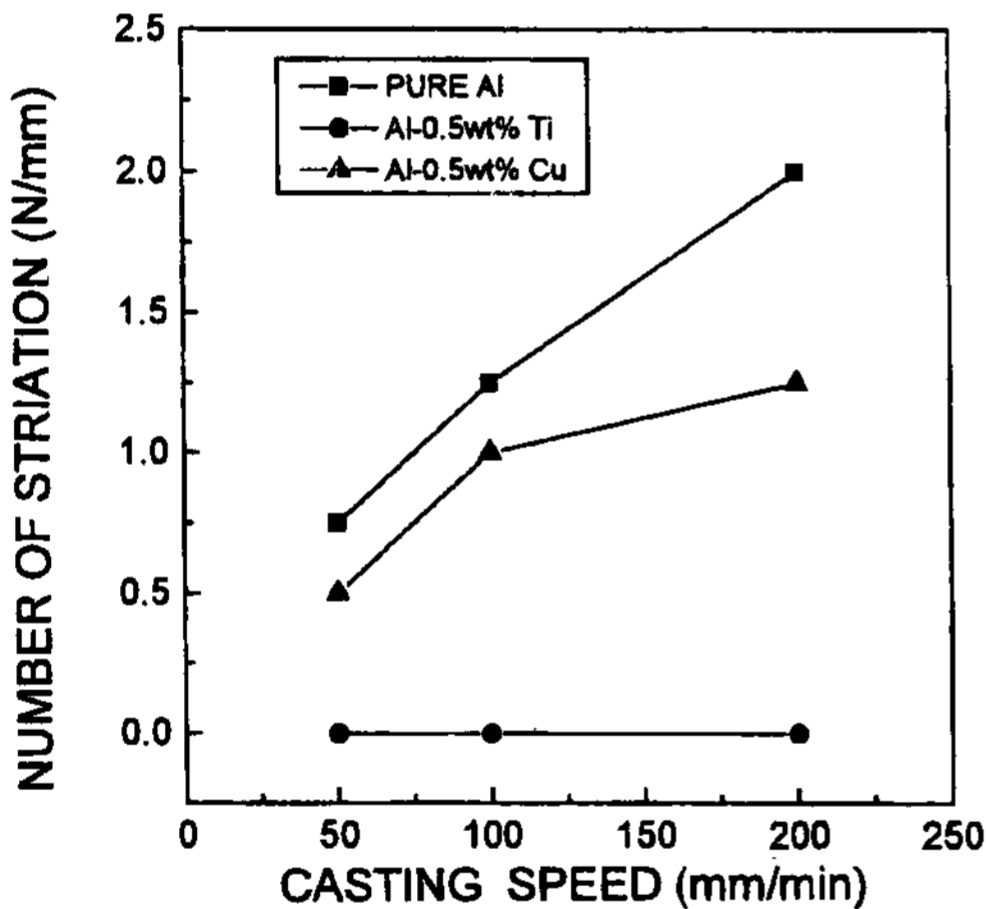


Fig. 6. The effect of added elements in Al on the occurrence of striation (8 mmφ rod).

가한 합금 주괴 (8 mmφ)에서 주조 속도에 따른 줄무늬 수를 조사 한 것으로서 합금 원소가 줄무늬 발생에 미치는 영향을 조사하기 위한 것이다.

여기서 순 Al의 경우 주조 속도 증가에 따른 줄무늬 수의 증가가 가장 크고, 모든 주조 속도에서 Al-Ti 및 Al-Cu 합금보다 줄무늬 수가 많다. 또한 Al-Cu 합금에 비교해서 Al-Ti의 경우 주조 속도 증가에도 불구하고 줄무늬 발생이 전혀 안되고 있음을 알 수 있다. 즉, 입자미세화 효과가 큰 Ti금속이 Cu금속에 비해 줄무늬 발생을 저지시키는 효과가 큼을 알 수 있다. Fig. 7은 순 Sn 및 Sn-Bi 금속에서 주조 속도에 따른 줄무늬 수

의 변화를 나타낸 것으로 순 Sn의 경우 주조 속도의 증가에 따른 큰 줄무늬 수의 증가를 알 수 있었다.

그러나 순 Sn 금속에 0.05wt%Bi를 첨가한 경우 주조속도의 증가에 따른 줄무늬 발생 수의 변화는 크지 않음을 알 수 있다. 이러한 현상은 순 Al과 Al-Ti 및 Al-Cu 합금의 경우와 유사한 결과로 Bi첨가에 따른 효과 때문이라 사려된다.

3.4 줄무늬와 우모상조직

Al-0.1wt%Ti 합금주괴에서 줄무늬가 미시조직에서는 우모상조직으로 관찰되고 있음을 확인할 수 있었다. 일반적으로 Feathery grain은 Al합금의 일방향 응고시 나타나는 특징적인 조직으로서 일반적으로 Al은 일방향 응고시 [100] 방향으로 Dendrite가 성장하는데 비해 Feathery grain은 (111) Twin plane을 갖고 [110] 방향으로 성장되고 있다. 이 조직은 응고시 G_L 이나 냉각속도가 클 때, 합금 또는 불순원소의 존재 및 입자미세화 경향이 작을 때 잘 발생된다고 알려져 있고, 이러한 조건이 구비될 때 액상금속에서 Feathery grain으로 성장하는 Twinned crystal이 핵생성되어 성장하거나 또는 액상금속의 갑작스러운 냉각에 의한 수축으로 인한 열응력에 의해 Twin Deformation이 발생된다고 한다[5,6]. 본 연구의 Al-0.1 wt%Ti 합금주괴 제조시 발생된 줄무늬(미시적 조직에서는 Feathery grain이다)가 이러한 일반적으로 정립된 개념의 Feathery grain과 동

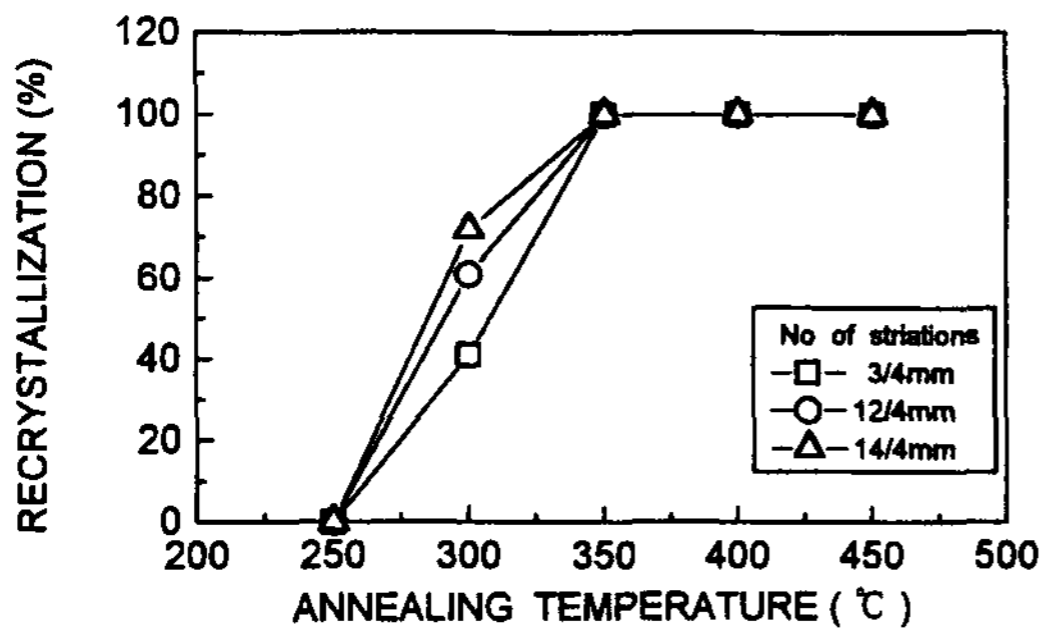


Fig. 8. The effect of striation on recrystallization in pure Al when the amount of working is fixed to 50%.

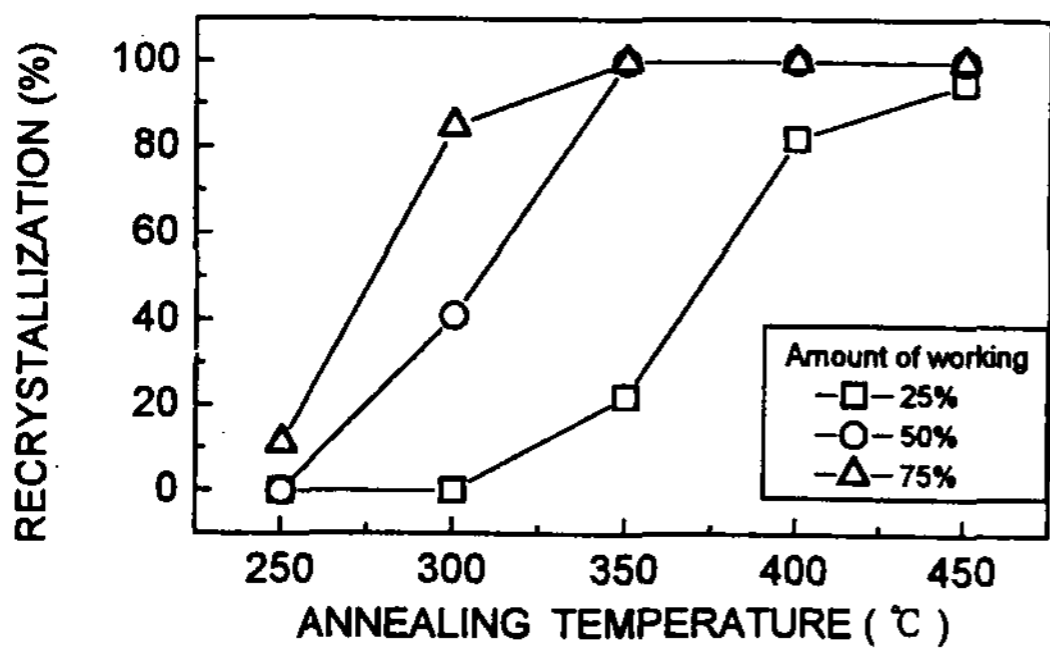


Fig. 9. The effect of amount of working on recrystallization in pure Al when the casting speed is fixed to 50 mm/min.

일한지는 아직 좀더 규명을 해야 하겠지만 본 연구의 순 Al, Sn 및 그들의 합금에서 관찰된 줄무늬의 생성을 조장하는 요인은 상기에서 언급한 Feathery grain 생성을 조장하는 요인과 대부분 일치하고 있다. 다만 Feathery grain은 불순물이 어느 정도 존재해야만 생성된다고 하는데 이는 순도가 높을수록 줄무늬 발생이 증가되는 본 연구결과와 일치하지 않고 있다.

3.5 줄무늬가 재결정화에 미치는 영향

줄무늬가 재결정화를 촉진시킨다는 것은 이미 연구된바 있다[1,4]. Fig. 8은 4 mmφ 순 Al 주괴의 단면에 발생한 줄무늬 수가 재결정화에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 여기서 줄무늬 수의 증가에 따라 250~350°C 열처리 온도에서 재결정이 증가된 것을 알 수 있다(350°C이상에서는 100% 재결정화).

이와 같이 줄무늬가 재결정을 촉진시키는 현상은 Fig. 9의 가공도가 재결정에 미치는 영향에 비하면 그 효과가 작으나 무시할 수 없는 크기이고 순 Al의 극세

선 가공의 소둔 열처리시 열처리온도 설정에 이를 고려해 주어야 할 것이다.

4. 결 론

가열주형 수평식 연속주조법을 이용해서 순 Al, Sn 금속 및 그 합금의 일방향 응고주괴 제조시 발생하는 줄무늬결함에 관한 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Al이나 Sn금속에서 줄무늬는 순도가 높을수록, 그리고 주조속도가 증가할수록 잘 발생된다.
- 2) 합금의 경우 순금속보다 줄무늬가 감소하는 이유는 합금원소의 첨가에 따른 재료의 입자미세화효과에 기인되고, 주조속도의 증가에 따른 줄무늬 증가현상은 주조속도가 증가함에 따라 급격한 수축이 발생되고, 그 결과 발생하는 열응력에 기인된다고 사려된다.
- 3) 순 Al의 경우 Ti을 0.1 및 0.2wt%로 증가시킬 경우, 이때 발생된 줄무늬(거시적으로 보았을 경우)는 미시적 관찰에서 Feathery grain임이 확인되었고, 이러한 Feathery grain은 통상적으로 Al합금 일방향 응고주괴 제조시 발생하는 Feathery grain과 많은 공통점을 나타내고 있다.
- 4) 줄무늬의 존재는 가공도의 영향보다는 그 효과가 작으나 재결정온도를 낮추는 효과가 있다.

후 기

본 연구는 1995년도 한국학술진흥재단 공모과제의 연구비로서 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 이유재, 조형호, 김명한 : 대한금속학회지, 31 (1993) 906
- [2] 김원태, 문정탁, 김명한, 조형호 : 주조, 14 (1994) 464
- [3] A. Ohno : Journal of Metals, 38 (1986) 14
- [4] M. H. Kim, H. H. Jo, C. S. Kang, C. R. Loper, Jr. : AFS Trans. 116 (1994) 843
- [5] L. R. Morris, J. R. Carruthers, A. Plumtree, W. C. Winegard : Trans. of the Met. Soc. of AIME, 236 (1966) 1287
- [6] L. Bäckerud, E. Król, J. Tamminen : Solidification Characteristics of Aluminium Alloys, Skanaluminium, 1986, pp 39-48