

論 文

# Pb-20wt%Cu 합금의 일방향 응고시 Cu 수지상 결정성장에 대한 시험편의 회전효과

김 신 우

## The Effects of Sample Rotation on Cu-Dendritic Growth During the Directional Solidification of Pb-20wt%Cu Alloy

Shin-Woo Kim

### Abstract

For Pb-20wt%Cu alloys, severe macrosegregation due to density difference of the resulting phases in normal directional solidification has been minimized and a uniformly aligned dendritic structure has been produced by axially rotating the sample of 5mm diameter in conjunction with horizontal directional solidification. Under the constant growth velocity of 20 $\mu$ m/sec, increasing the rotation rate from 0.18 to 12rpm results in a transition from an aligned columnar to an equiaxed Cu-dendritic structure. With a constant rotation rate of 0.18rpm, increasing the growth velocity from 10 to 50 $\mu$ m/sec also has promoted a transition from columnar to equiaxed structure. (Received July 22, 1994)

### 1. 서 론

주조품의 재료의 성질이 응고조건에 따라서 형성되는 미세구조의 크기와 구성하고 있는 각상의 분포에 밀접하게 연관되어지는 것은 잘 알려져 있다. 예를 들면 대표적인 응고변수들(응고속도, 온도기울기, 조성)과 수지상 결정가지의 간격들(primary and secondary dendrite arm spacings) 사이의 관계식, 그리고 기계적 성질과의 관계식들이 오래전부터 이론적 및 실험적으로 많은 사람들에 의하여 연구되어져 왔다[1-8]. 그리고 밀도의 차이가 큰 두상으로 이루어진 재료의 응고에서는 지구중력이 응고조직의 균일성에 큰 영향을 준다. Bridgman형의 일방향로에서 온도와 조성의 밀도기울기에 따라서, 즉 중력에 대한 응고방향에 따라서 수지상 결정의 응집(dendrite clustering)과 응고계면의 첨탑현상(steepling)으로 편석이 나타나는 것이 J. D. Verhoeven et al.

과 M. D. Dupouy et al.에 의하여 체계적으로 잘 보고되고 졌다[9,10]. 이러한 중력의 효과는 물론 우주왕복선의 출현으로 손쉽게 얻어질 수 있는 미소중력(microgravity)하에서 거의 제거되어 균일한 응고조직이 얻어지는 것으로 보고되어 있으나[11] 아직은 비용이 매우 비싸며 실험이 어렵고 복잡한 실정이다. 그래서 본 연구에서는 지구중력하에서 Pb기지내에 잘 배열되고 연속적인 초정 Cu 수지상 결정을 효과적으로 성장시키기 위한 방법을 찾기 위하여 Pb-20wt%Cu 합금을 이용하였다. 중력에 대하여 응고방향을 변화시켜서 얻어진 응고조직은 Pb상과 초정 Cu상의 밀도차에 의한 중력의 효과로 거의 모두 불균일한 것으로 보고되어 있으나[12] 이것을 제거하기 위하여 일방향응고시 샘플에 적당한 회전을 가하여 불균일하게 분포된 Cu상에 미치는 영향을 조사하는 것이 본 연구의 주된 목적이다.

호서대학교 공과대학 재료공학과(Dept. of Materials Science and Engineering, Hoseo University)

### 2. 실험방법

기존의 자동차용 축전지 극판재료의 전기적 및 기계적 성질과 중량문제를 향상시키기 위한 시도로서 Pb기지내에 잘 배열된 초정 Cu상을 성장시킨 복합재료를 만들기 위하여 Pb-20wt%Cu 합금을 이용하여 일방향온도 시켰다. 불활성 기체인 아르곤가스 분위기하에서 고순도의 Pb와 Cu 금속을 용해하고서 진공에 연결된 석영관으로 직접 빨아들여 긴 봉모양의 일방향응고용 시험편을 만들었다. 이렇게 하여 얻어진 합금봉의 표면을 깨끗이 하고 길이 380mm 크기로 절단하여 한쪽 끝이 막힌 알루미나관(내직경 5mm)에 집어 넣었다. 알루미나관의 안쪽은 일방향응고후 시험편을 쉽게 분리하기 위하여 콜로이드상의 탄소용액으로 코팅한 후 건조되었다. 이렇게 준비된 알루미나관을 Fig. 1과 같이 중력방향에 대하여 임의

의 각도로 회전시킬 수 있도록 설계된 Bridgman형의 일방향응고로에 기계적인 방법으로 집어 넣은 후 30분정도 유지하고 일정한 응고속도들로(50,20,10 $\mu$ m/sec) 위쪽, 아래쪽 그리고 수평방향으로 (실제는 응고계면에 액상공급을 위하여 Fig. 2와 같이 10°의 기울기를 줌) 각각 응고시켰다. 동시에 작은 모터를 시험편의 알루미나관 끝에 연결시켜서 일정한 임의의 회전속도들을(0.18, 1, 12rpm) 가하면서 일방향응고시켰다. 고상과 액상계면에서의 온도기울기는 시험편내에 삽입된 지름 0.076mm Pt/Pt-13%Rh 열전대를 이용하여 측정하였으며 4.5 $\pm$ 0.5K/mm가 얻어졌다. 일방향응고된 시험편의 길이 중간부분을 응고방향에 수직방향과, 평행방향으로 절단하여 연마한 후 광학현미경을 이용하여 응고조직을 조사하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

Pb-20wt%Cu 합금을 시험편의 회전을 가하지 않고 단지 중력방향에 대한 일방향 응고방향을 변화시키는 것은 Cu와 Pb상의 밀도차에 의하여 만족스러운 균일한 응고조직을 보여주지 못하는 것으로 판명되었으며[12] Fig. 3과 같이 횡단면에서 전형적인 Cu수지상결정의 응집현상을 보여준다. 고전적인 구조에서 응고시에 주형을 기울이고 편심축에 대하여 회전시키므로 'A'와 'V' 편석을 줄이는 결과를 얻는 것과 같이[13,14] 이러한 불균일한 Cu수지상의 응고분포를 균일하게 하기 위하여 일방향 응고와 동시에 시험편의 회전을 가하는 것이 시도되었다. 그러나 중력방향에 반대방향(위쪽으로 응고)으로 일방향응고시에 시험편의 회전을 가하였을 때는 회전을 가하지 않았을 때와 같이 Cu상의 응집현상이 거의

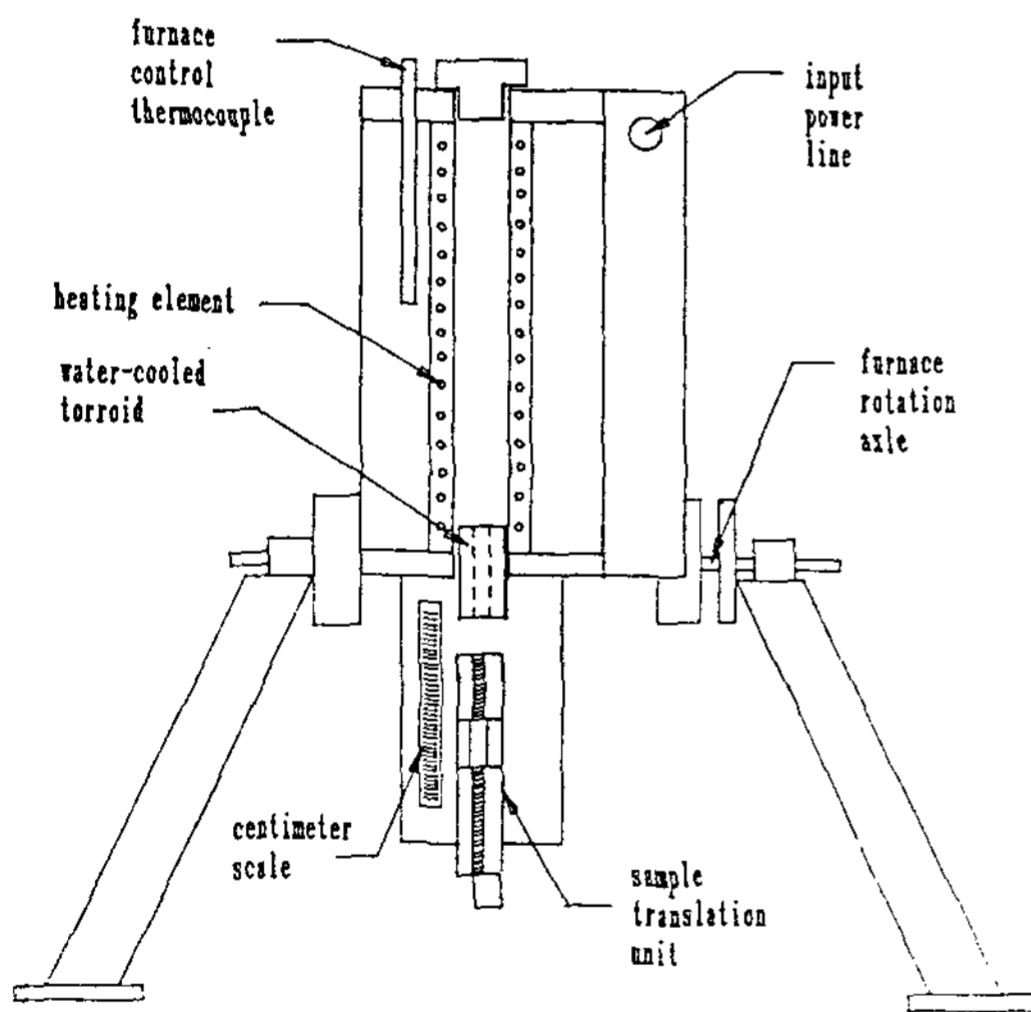


Fig. 1. Schematic of the directional solidification furnace used in this study.

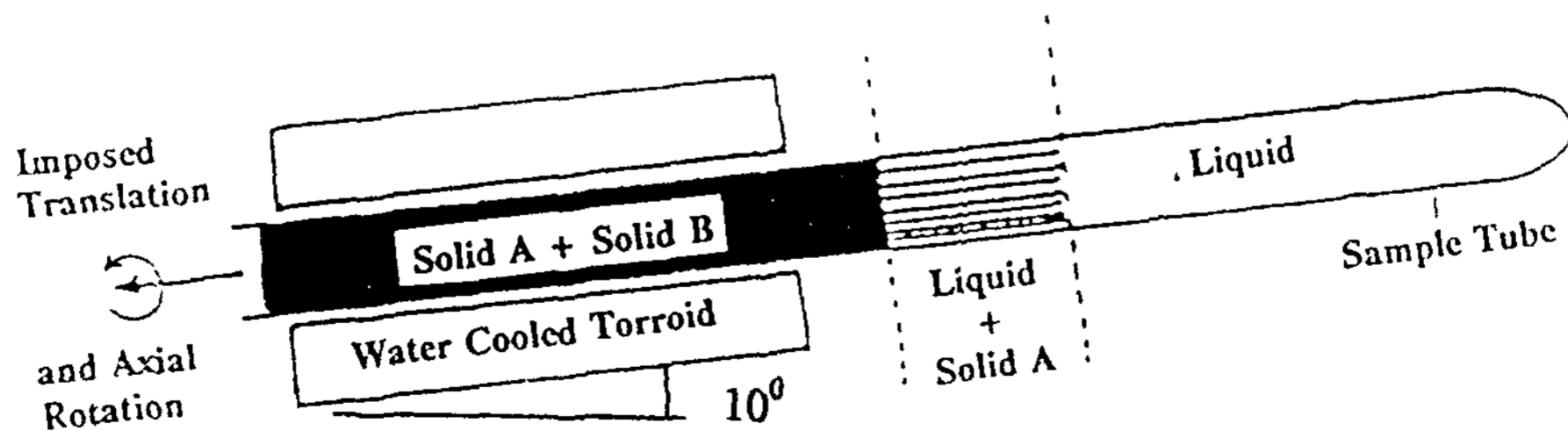


Fig. 2. Schematic of the horizontal directional solidification in conjunction with axial rotation.

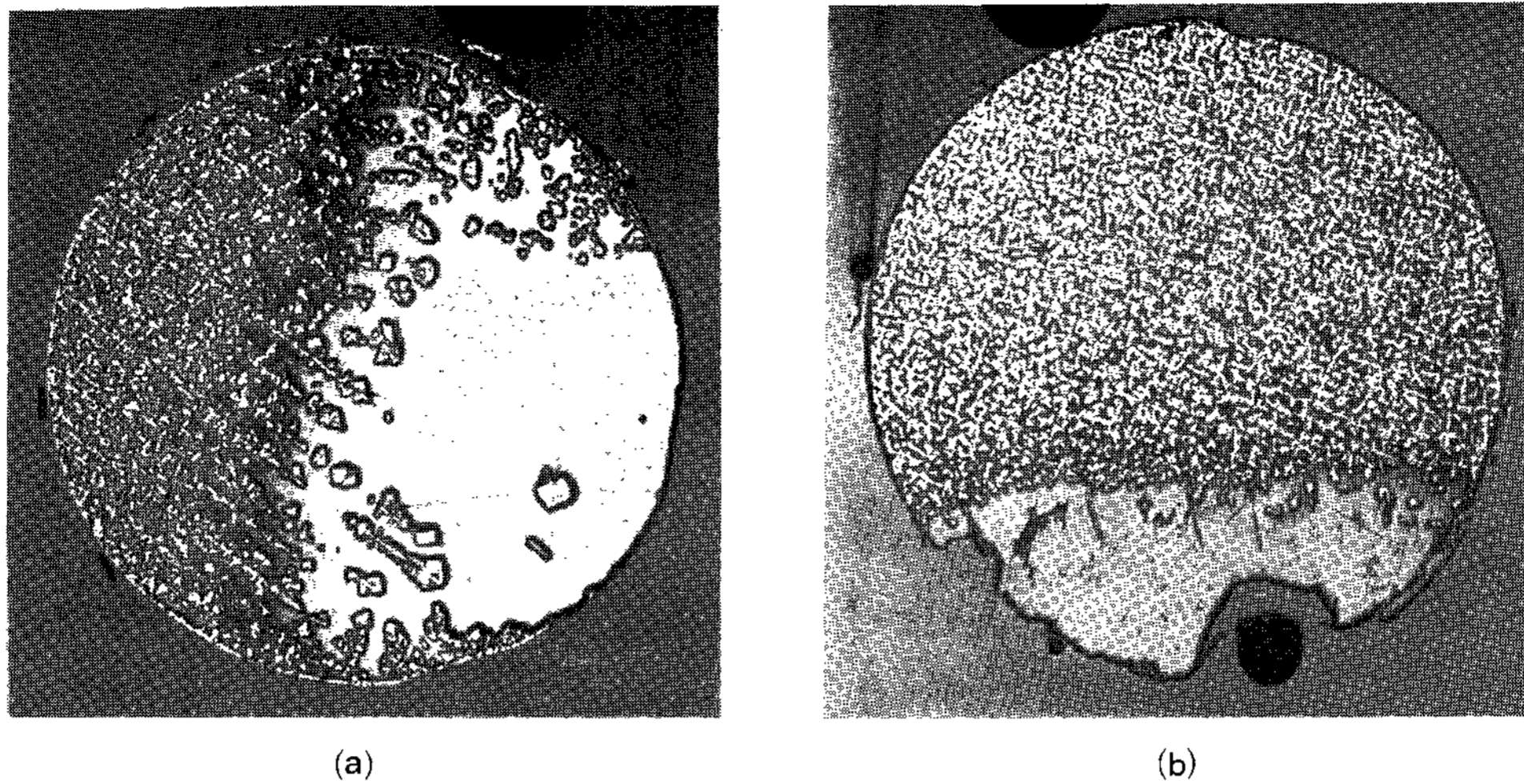
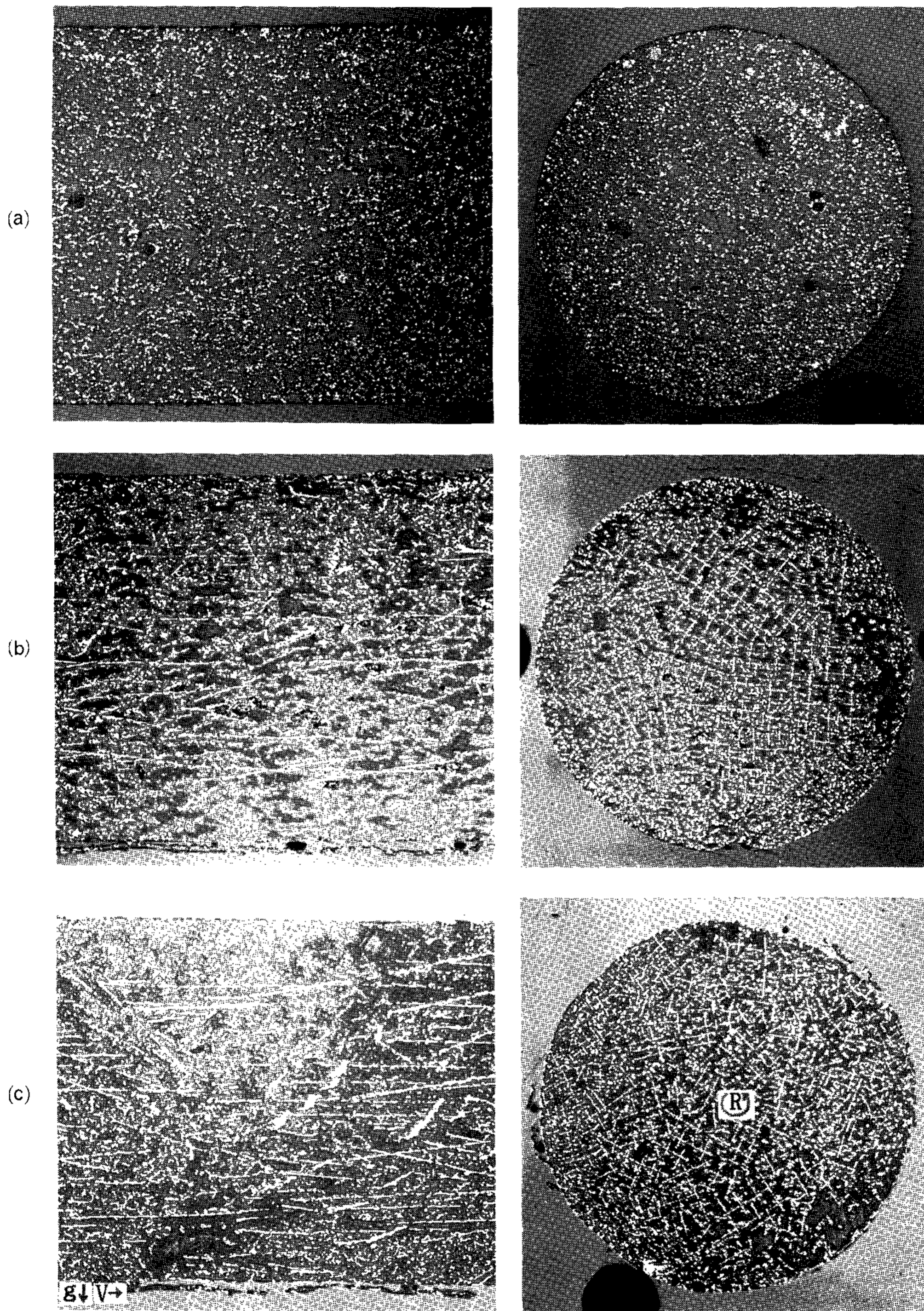


Fig. 3. Micrographs of transverse sections from Pb -20wt%Cu samples(diameter:5mm) directionally solidified at a growth velocity,  $5\mu\text{m}/\text{sec}$  : (a) vertically upward (b) horizontally.

개선되지 않았으나 중력방향에 수직방향(수평으로 응고)으로 응고시에는 Cu수지상 결정이 균일하게 분포되어 응고되는 결과가 Fig. 4와 같이 얻어졌다. 즉 수평방향의 일방향 응고와 함께 시험편의 축회전은 밀도차에 기인한 Cu상의 부상과 응집을 감소시키는 것으로 생각된다. 유사한 결과가 Sn-15wt%Al 합금에서 얻어지는 것으로 보고되었다[15]. 그래서 이 결과로부터 회전속도가 일방향 응고에서 기존의 응고변수들(응고속도, 온도기울기, 합금조성) 그리고 응고방향과 함께 중요한 새로운 응고변수로 고려되어 질 수 있다. Yang et al.[16]은 수평한 실린더에서 자연 대류현상에 대한 회전효과의 수치해석 결과에서 온도분포와 부력에 의한 흐름의 세기가 회전속도를 증가시킴에 따라 감소된다고 보고하였다. 즉, 어떤 회전속도 이하에서는 부력에 의한 힘이 중요하게 되는 것이다. 이러한 계산결과로 본 Pb-Cu합금의 실험결과를 잘 예상할 수 있을 것 같다. Fig. 4와 같이 일정한 응고속도,  $20\mu\text{m}/\text{sec}$ 에서 회전속도 0.18, 1, 12rpm으로 변화시에 모두 균일한 응고조직을 보여주었다. 그러나 0.1rpm이하의 훨씬 작은 회전속도에서는 부력의 영향이 커져서 불균일한 응고조직이 다시 나타날 것이며, 또한 아주 고속의 회전속도에서는 Cu와 Pb의 밀도차에 의한 원심력의 차가 커져서 중심에 Cu상이 몰리는 현상이 나타날 것으로 생각된

다. 한편, Fig. 4의 종단면에서 보는 것과 같이 회전속도가 증가함에 따라서 Cu수지상 결정이 주상에서 등축형으로 천이하는 것을 알 수 있다. 이것은 회전속도의 증가로 Cu수지상 결정의 응고선단과 고액영역에서 액상의 회전선속도( $V = R\omega$ , R: 시험편의 반경,  $\omega$ : 각속도)가 증가하여 축방향으로 성장하는 수지상이 부러지거나 재용해하는데 기인한 것으로 생각된다. 또한 같은 이유로(회전선속도가 시험편반경에 비례함) 동일한 시험편의 중심영역에서 바깥 원주영역보다 더 잘 발달된 주상 수지상 결정이 형성되는 것을 볼 수 있다. 그래서 본Pb-Cu합금의 5mm 시험편에서 사용된 0.1-10rpm 범위의 속도가 균일한 응고조직을 보여주는 회전속도로 생각되며 연속적인(주상결정) Cu상을 얻기 위해서는 가능한 적은 회전속도를 사용해야 한다. 이러한 주상의 균일한 응고조직을 얻기위한 적절한 회전속도는 합금의 종류와 샘플의 직경에 따라 달라지는 것으로 이론적 및 실험적으로 구해져야 한다.

Fig. 5에서는 연속적이고 균일한 Cu 응고조직을 보여주는 0.18rpm의 일정한 회전속도하에서 응고속도를 변화했을 때의 실험결과를 보여준다. 3가지 응고속도 모두 균일한 Cu상의 분포를 보여주고 있으나 응고속도가 감소됨에 따라 등축형에서 잘 배열된 주상형 Cu수지상으로 천이하는 것을 알 수 있으며 일방향 응고에서 응고속도에



**Fig. 4.** Micrographs of longitudinal and transverse sections from Pb-20wt%Cu samples directionally solidified horizontally at a fixed growth velocity of  $20\mu\text{m}/\text{sec}$  and 3 different rotation rates (g:gravity vector, V:growth direction, R:rotation direction); (a) 12 (b) 1 (c) 0.18rpm.

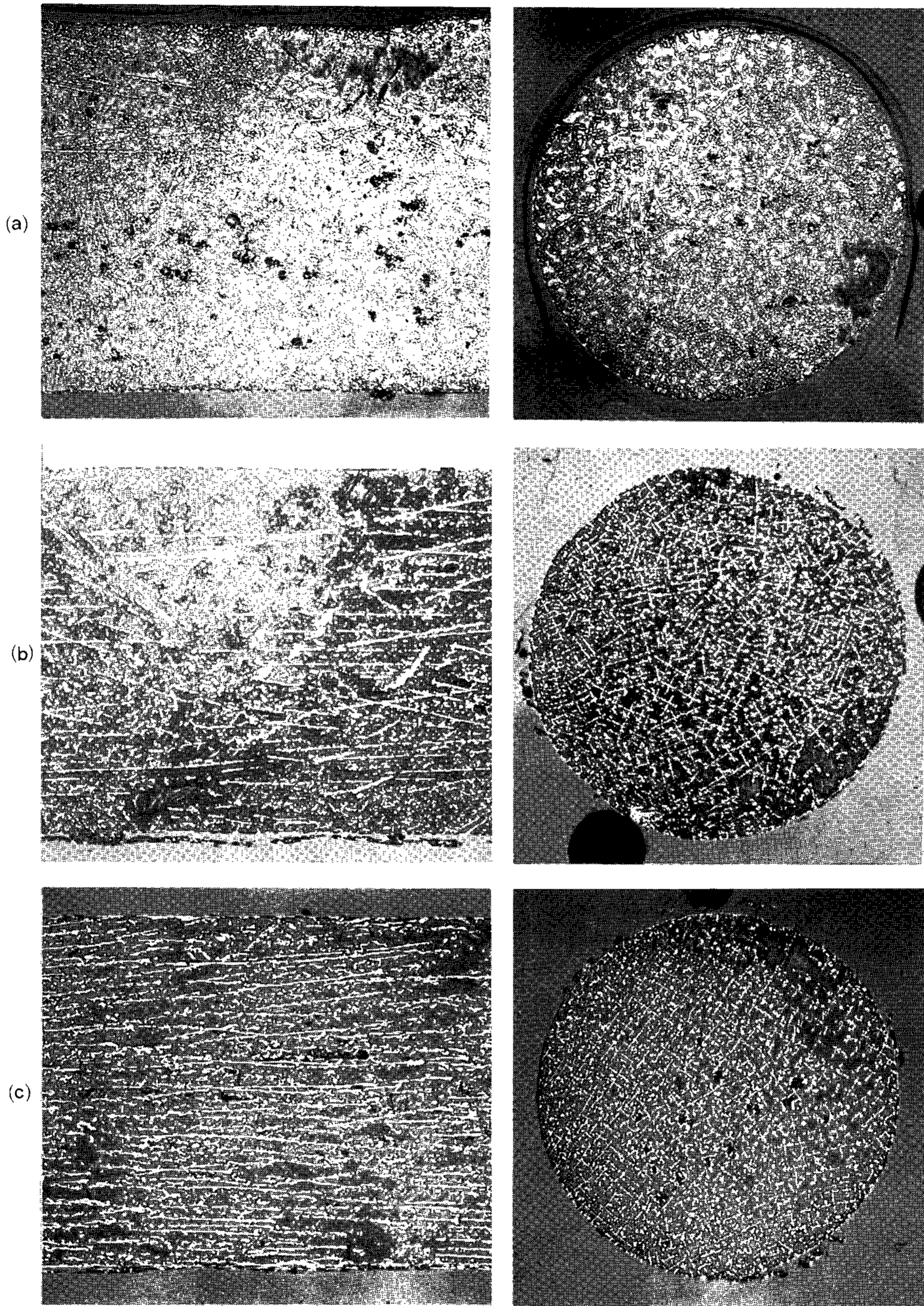


Fig. 5. Micrographs of longitudinal and transverse sections from Pb-20wt%Cu samples directionally solidified horizontally at a fixed rotation rate of 0.18rpm and 3 different growth velocities; (a) 50 (b) 20 (c) 10 $\mu$ m/sec.

따른 등축-주상 천이조건에 이론적 계산결과는 이미 잘 보고되어져 있다[17].

#### 4. 결 론

Pb-20wt%Cu합금의 일방향 응고시에 시험편의 축방향 회전을 동시에 가하여 얻어지는 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 중력방향에 평행하게 일방향 응고시에는 시험편의 축방향 회전이 관계없이 불균일한 Cu 응고조직을 얻었다.

2) 중력방향에 수직하게 일방향 응고시에는 적절한 시험편회전을 가하여 불균일한 Cu 응고분포를 거의 제거하였다.

3) 시험편 회전속도는 중요한 응고변수의 하나로 생각되며 본 Pb-Cu합금의 5mm 시험편에서 사용된 0.18-12rpm 범위의 회전속도는 균일한 응고조직을 보여주었으며 합금의 종류와 시험편의 직경에 따라 적절한 회전속도가 구해져야 한다.

4) 일정한 응고속도에서 회전속도를 증가함에 따라 액상의 회전속도( $V=R\omega$ )가 증가하여 주상에서 등축형의 Cu수지상으로 천이하였다. 또한 동일한 시험편에서도 같은 이유로(V는 R에 비례함) 중심영역에서 원주영역으로 주상-등축천이가 이루어졌다.

5) 일정한 회전속도(0.18rpm)에서 응고속도가 증가함에 따라 역시 Cu의 주상-등축천이가 나타났다.

#### 참 고 문 헌

[ 1 ] M. C. Flemings : Solidification Processing, McGraw-Hill, New York, (1974) 146  
 [ 2 ] J. D. Hunt : Solidification and Casting of

Metals, Book 192, The Metals Society, London, (1979) 3

[ 3 ] W. Kurz and D. J. Fisher : Acta Metall., 29 (1981) 11  
 [ 4 ] R. Trivedi : Metall. Trans. A, 15A, (1984) 977  
 [ 5 ] K. Young and D. Kirkwood : Metall. Trans. A, 6A, (1975) 137  
 [ 6 ] T. Okamoto and K. Kishitake : J. of Crystal Growth, 29 (1975) 137  
 [ 7 ] H. Jacobi and K. Schwerdtfeger : Metall. Trans. A, 7A (1976) 811  
 [ 8 ] M. C. Flemings and H. F. Taylor : Aerospace Eng., July (1962) 10  
 [ 9 ] J. D. Verhoeven, J. T. Mason and R. Trivedi : Metall. Trans. A, 17A, (1986) 991  
 [10] M. D. Dupouy, D. Camel and J. Favier : Acta Metall., 37, (1989) 1143  
 [11] D. Camel, J. J. Favier, M. D. Dupouy and R. LeMaguet : Scientific Results of the German Spacelab Mission D1, Norderney Symp., Cologne, Germany, (1986) 236  
 [12] 김신우 : 대한금속학회지, 투고중  
 [13] A. K. Sample and A. Hellawell : Metall. Trans. A, 19A, (1984) 2163  
 [14] J. R. Sarazin and A. Hellawell : Metall. Trans. A, 19A, (1988) 1861  
 [15] R. N. Grugel, Shinwoo Kim, Tracey Woodward and T. G. Wang : J. of Crystal Growth, (1992) 599  
 [16] H. Q. Yang, K. T. Yang and J. R. Lloyd : AIChE Journal, 34 (1988) 1627  
 [17] Shinwoo Kim and R. N. Grugel : Metall. Trans. A, 23A (1992) 1857