

.....
論 文
.....

PFC법에 있어서의 Al-Cu 다결정리본의 응고특성

이경구, 이상목, 홍준표*

Solidification Characteristics of Al-Cu Polycrystalline Ribbons in Planar Flow Casting

Kyung-Ku Lee, Sang-Mok Lee and Chun-Pyo Hong*

Abstract

Polycrystalline Al-Cu ribbons were produced by planar flow casting(PFC). Solidification behavior and microstructural changes of the ribbons have been investigated as a function of ribbon thickness and processing parameters. The solidification front velocity, V varies within the ribbon, decreasing with increasing the distance, S from the wheel-contact surface, as $V=17.6S^{-1}$. In Al-4.5wt%Cu alloy, rapid decrease in solidification velocity toward the free surface causes a change in solidification morphology from planar to cellular, and finally, to dendritic. The length and inclination of columnar grains solidified with planar front were related to the wheel velocity. The transition from particulate degenerate eutectic structure to regular lamellar eutectic structure was observed to be caused by a difference of the relative growth velocities of α -Al and θ during solidification in the Al-Cu eutectic alloy.

1. 서론

급냉응고에 의해 제조된 소재는 기존의 재료와 비교하여 조직의 미세화, 편석의 감소, 용질고용도의 증가, 비평형상이나 비정질상 등을 형성하는 장점으로 인하여 우수한 기계적, 자기적, 전기 화학적 특성을 가지고 있다. 따라서 초합금재료, 자성재료, 전자재료, 펌프용재료, 내부식재료, 에너지전환재료 등에서 새로운 미세조직, 조성, 특성 등을 가지는 합금소재의 개발[1,2]과 급냉응고시 응고현상에 관하여 많은 연구가 수행되고 있다.

여러가지 급냉응고법중에서 PFC(planar flow casting)법은 용융금속으로부터 박판이나 리본을 직접 제조하므로써 제조비용을 절감할 수 있고 공정변수제어에 따른 응고조직특성의 변화로 기

존의 재료에서는 얻을 수 없는 특성을 보유한 리본소재를 연속적으로 제조할 수 있는 유망한 방법으로 평가받고 있다[3,4]. PFC법은 가열주형의 하부에 위치한 직사각형의 slot를 통하여 용융금속이 불활성기체에 의해 회전하는 냉각휠위로 분사되어 접선방향으로 리본이 구조되어 나가게 된다. 회전하는 휠과 노즐과의 간격이 0.1~1 mm정도로 매우 작으므로 puddle내에서 용융금속의 흐름을 최대한 안정화시켜 두께가 균일하고 폭이 넓은 리본이나 박판소재를 제조할 수 있는 장점을 가지고 있다.

현재까지 비정질합금을 비롯하여 두께가 비교적 두꺼운 다결정리본에 관한 제조법을 확립하고 제조된 리본의 특성평가에 관한 연구가 활발히 수행되어 왔으나, 최종 응고조직을 결정하는 과냉, 냉각속도, 응고속도와 같은 변수들을 실험적

연세대학교 금속공학과(Dept. of Metallurgical Eng., Yonsei University)

*급속응고신소재연구소(RASOM)

으로 측정하고 제어하는데 있어서의 어려움으로 인하여 리본의 제조시 응고현상 및 리본의 미세조직특성에 대해서 완전히 이해되지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 PFC법을 이용하여 적정 주조조건하에서 Al-Cu다결정리본을 연속적으로 제조하였으며 리본제조시의 응고거동을 고찰한 후, 합금조성과 공정변수의 변화에 따른 미세조직 특성을 조사하고 고찰하였다.

2. 실험방법

고순도 Al(99.99%)과 전해 Cu(99.99%)를 대기고주파가열로에서 지름 15mm, 길이 120mm의 봉상시편으로 제조한 후 PFC장치의 quartz주형에 장입하고 용해하여 리본을 주조하였다. 본 실험에서 사용한 PFC장치는 그림 1의 모식도에 나타낸 것과 같이 Kanthal선을 사용한 전기저항가열로, 노즐/slot부위, 냉각용 회전휠, 온도조절장치로 구성되어 있으며, 냉각용 회전휠은 직경 30cm, 폭 6cm인 Cu휠을 사용하였다. 주형하단부 slot의 크기는 폭 10mm, 두께 0.5~0.8mm의 직사각형 형태이고, slot위를 원형태로 하여 용융금속이 잘 흘러 들어갈 수 있도록 고안하였다. 휠과

slot과의 간격은 0.1~1.0mm로 제한하였고 휠의 회전속도는 1.57m/s(100rpm)에서 47.1m/s(3000rpm)까지 속도조절이 가능하였으며, 용융금속을 분사시키는 Ar가스의 가압압력은 휠의 회전속도가 15.7m/s(1000rpm)이하에서 20KPa, 15.7~47.1m/s(1000~3000rpm에서는 60KPa로 조정하였다. 리본제조시 리본형성의 안정조건이 구비되지 않는 경우 용탕이 불연속적으로 테이프나 섬유형태로 흘러져 나오거나 노즐부위에서 부분적으로 응고되므로 건전한 리본을 연속적으로 제조하기 위해서는 적정주조변수의 제어가 필수적이다[5].

리본의 평균두께는 질량, 길이, 폭, 밀도로부터 간접적으로 구하였으며 미세조직사진으로도 직접 측정하였다. 리본의 두께방향에 따른 미세조직의 변화양상을 고찰하기 위하여 리본의 종단면을 연마한 후 증류수 93ml+HNO₃ 5ml+HF 2ml용액을 사용하여 수초간 부식시킨 후 광학현미경 관찰을 행하였다. 또한 Al-4.5wt%Cu조성과 공정조성의 합금에서의 리본의 각 단면부위의 미세조직을 TEM으로 관찰하였으며, TEM분석을 위한 시편은 휠의 접촉면과 자유표면쪽에서 관찰하고자 하는 부위의 반대쪽을 기계적 연마로써 제거한 후 -30℃의 25% HNO₃+75% methanol 전해액에서 전해연마하여 준비하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 리본의 기하학적 형상

PFC법에 의한 리본주조시 주요한 공정변수는 휠의 회전속도, 가압압력, slot단면의 크기, slot과 휠간의 간격 등을 들 수 있으며 그 밖에도 휠 표면재료, 용융금속의 과열, 가압하는 시간, 제조되는 리본의 포집, 주형노즐부위에서의 온도구배, 휠의 표면거칠기도 고려되어야 한다. 기하학적으로 균일하고 건전한 리본을 주조하기 위해서는 이러한 공정변수들이 상호 안정화범위에 있어야 하고, 리본제조시 용융금속이 냉각휠과 접촉하여 생성되는 melt puddle의 형상이 안정하며 정상상태를 유지할 때 건전한 Al-Cu다결정 리본을 연속적으로 얻을 수 있었다. 제조된 리본의 폭은 10mm, 두께는 수십~수백 μ m범위에서 조절할 수 있었으며, 노즐slot부위의 폭에 의

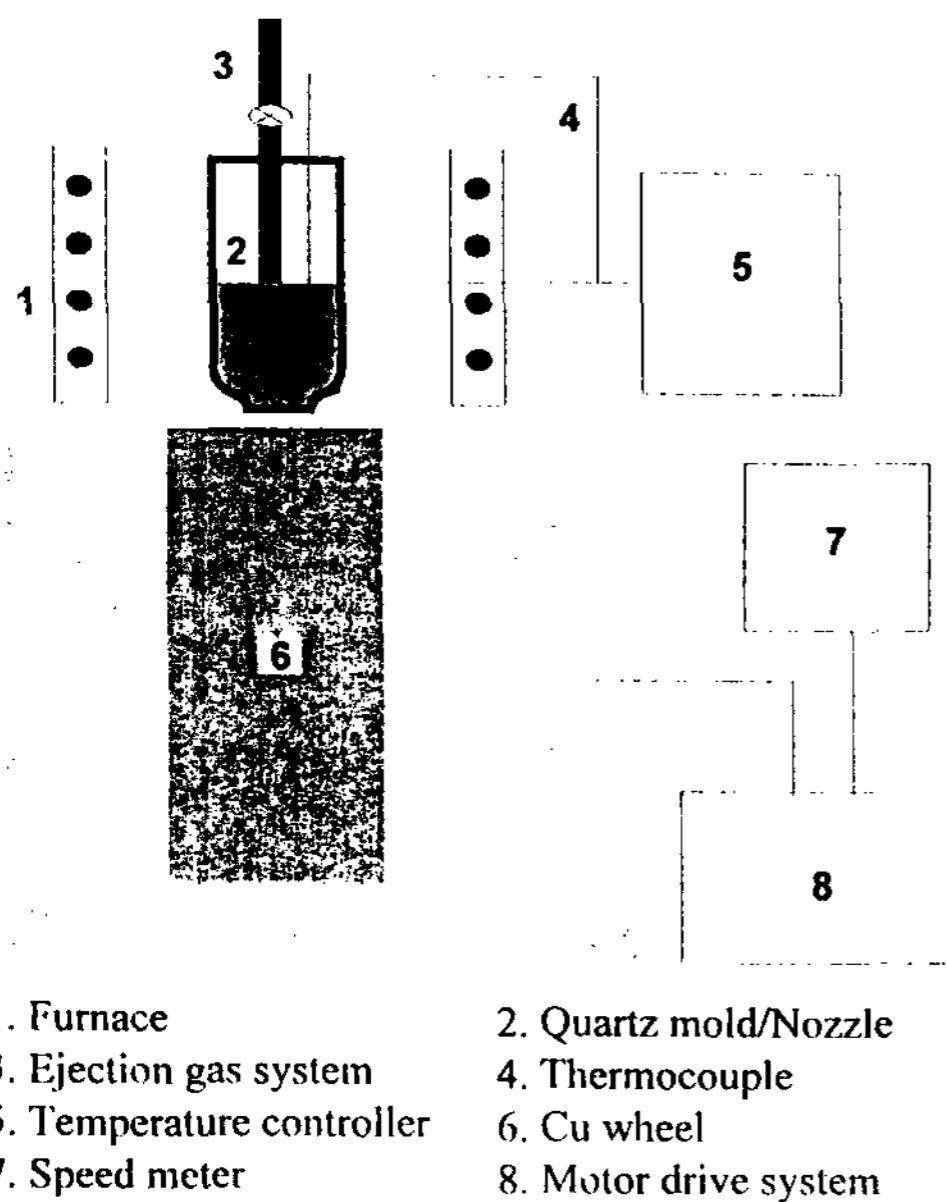


Fig. 1. Schematic drawing of experimental apparatus for PFC.

해 리본의 폭이 결정되므로 주형재료의 선정 및 가압방식의 개선에 의해 더 넓은 광폭 리본제조가 가능할 것으로 생각된다. 용융금속의 흐름속도 Q 는 외관이 찢어짐이나 기공이 없는 안정조건하에서 주조되었을 경우 질량보존의 관계로부터 $Q = t \cdot w \cdot v$ 의 관계를 만족시키게 된다. 여기서 w 는 리본의 폭, v 는 휠의 속도를 나타내며 리본의 폭이 slot의 폭에 의해 일정한 값을 가지므로 두께는 Q/v 에 비례하게 된다.

리본의 형성과정에서 용융금속과 휠간의 계면상태는 용융금속이 회전하는 휠위에 퍼져서 젖는 젖음성 거동에 큰 영향을 주기 때문에 매우 중요하다. 이러한 젖음성은 조업분위기, 용융금속과 휠간의 얇은 표면적과 화학적조성의 유사성에 의해 영향을 받게 된다. 불활성분위기나 대기하에서 주조하였을 때 보다 진공분위기에서, 그리고 용융금속과 휠재료간의 상호용해도가 클수록 젖음성거동이 좋아진다고[6] 보고되고 있으며, 이러한 젖음성은 리본제조시 용융금속과 휠간의 열전달을 최대한 크게하고 균일한 리본을 제조하기 위해서 필수적인 인자이다. Al-4.5wt%Cu 합금에서 용융금속이 응고할 때 휠과 접촉하지 않은 부분에서 생긴 미세조직의 변화를 그림 2에 나타내었으며 휠표면과 접촉하지 않은 부분은 국부적으로 작은 계면열전달효과를 보이면서 응고과정을 지연시키게 되고 열전달의 방향이 변화되어 휠 접촉면에서 급냉된 주상정대신 자유표면쪽과 같은 수지상조직을 관찰할 수 있었다.

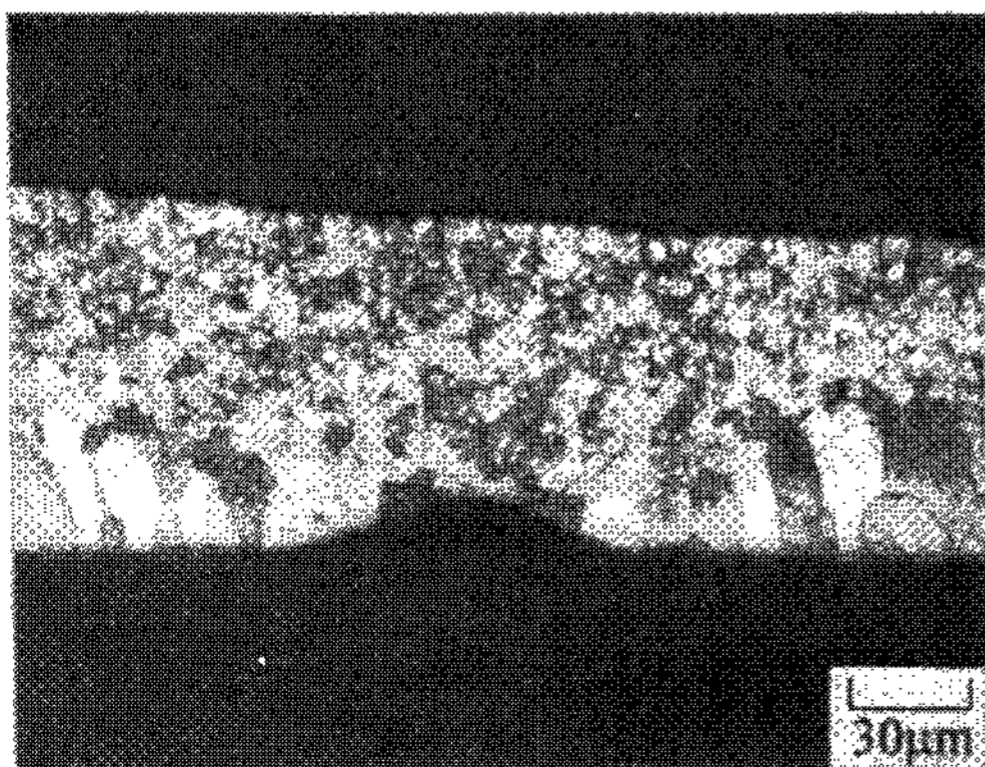


Fig. 2. Non-contact area showing a locally different microstructure in Al-4.5wt%Cu ribbon solidified with a wheel velocity of 15.7m/s.

3.2 리본 제조시의 응고 거동

용융금속이 냉각휠과 접촉할 때 휠과 맞닿은 지역에서 melt puddle이 생성되며 리본을 연속적으로 생성, 냉각시키는 국부적인 저장소의 역할을 한다. PFC공정중에서 가장 중요한 인자인 puddle의 형상과 안정성은 리본의 응고양상 및 생성되는 결함들에 크게 영향을 주고 제조되는 리본의 특성을 결정하게 되므로 puddle의 모양 및 역학에 대하여 많은 연구가 수행되어 왔다[4, 7]. puddle의 길이 l 은 고속사진기법을 사용하여 puddle내에서 직접 측정하는 방법이 있지만, 본 연구에서는 용융금속이 휠 위에 거주하는 시간 t 와 휠 회전속도 V 에 관한 Katgerman등[8]의 경험식 $t = 8.61 \times 10^{-3} V_s^{-1.42} \text{sec}$ 으로부터 액체 금속이 휠 위에 거주하는 시간 t 를 계산한 후 puddle의 길이 $l = tV$ 의 관계에 의해 l 값을 추정하였다.

이러한 puddle의 길이와 리본 두께와의 관계를 이용하여 응고시 고-액계면의 전진 속도를 간접적으로 구할 수 있다[9]. 각각의 회전속도에서 측정된 리본 두께 S 와 용융금속의 puddle 거주 시간 t 의 관계를 최소자승법에 의해 경험적으로 구하면 다음식과 같다.

$$S = 5.93t^{1/2} (\text{mm/s}^{1/2}) \quad (1)$$

식 (1)에서 액체 금속이 회전하는 휠 위에 거주하는 시간이 길수록 리본의 두께는 증가하는 것을 알 수 있으며, 고-액 계면의 전진 속도 V 는 $V = dS/dt$ 의 관계를 이용하여 식 (1)에서 직접 구할 수 있다.

$$V = 17.6S^{-1} (\text{mm}^2/\text{s}) \quad (2)$$

식 (2)는 용융금속의 거주 시간 및 리본 두께에 대한 측정의 불확실성으로 인하여 약 20% 정도의 오차내에서 유용하게 사용되어질 수 있다. 한편, 고-액 계면에서 액상의 온도구배 G_1 은 열적 평형 조건에 의해 다음식으로 표현되어지며,

$$G_1 = \frac{1}{\alpha} (T_o - T_s) V \quad (3)$$

α 는 열확산도, T_o 는 분산전의 용융금속의 온도, T_s 는 고-액 계면의 온도를 의미한다. Al-4.5wt%Cu합금의 경우 α 를 $67.3 \text{mm}^2/\text{s}$ [10], $T_o - T_s$ 를 100K라 하면, 리본의 국부 냉각 속도는 T

=VG₁로 표시되고 식 (2)와 (3)으로 부터 다음 관계식을 구할 수 있다.

$$T=460.3S^{-2} \text{ (Kmm}^2\text{/s)} \quad (4)$$

윗식으로부터 리본의 특정위치에서의 냉각 속도를 열물성치 없이도 간접적으로 추정할 수 있으며 150 μ m 두께에서는 약 10⁴ K/s정도의 값을 가지게 된다. 표 1에 각각의 회전수에 따른 리본의 puddle특성을 포함한 자유표면쪽의 국부 고-액 계면 전진 속도와 냉각 속도를 나타내었다. 자유표면쪽의 냉각 속도는 대략 10⁴~10⁵ K/s정도이고, 휠 접촉면으로 갈수록 식 (4)에 의해 냉각 속도는 더욱 커지게 된다. 따라서 절대안정론에 의해 응고속도가 큰 휠 접촉면에서는 평활 응고 계면을 가지는 주상정조직이 나타나고 응고가 진행됨에 따라 국부 냉각 속도가 점차 감소하므로 cellular혹은 수지상정으로 천이하게 된다.

3.3 리본의 미세 조직 특성

Al-4.5wt%Cu 다결정 리본 종단면의 미세 조직을 그림 3에 나타내었으며 휠의 회전 방향을 화살표로 표시하였고 밑부분이 휠과의 접촉면, 윗부분이 대기와 접촉하고 있는 자유 표면쪽이다. 휠과 접촉하고 있는 리본의 저부에서는 평활 응고 계면을 가지고 성장하는 주상정 chill zone이 존재하고, 윗쪽으로 올라갈수록 점차적으로 방향성을 지니는 cellular형태가 나타나며 공기와 접하고 있는 자유 표면쪽으로 갈수록 잘 발달된 수지상조직으로 이루어져 있다. 즉 리본의 자유 표면쪽으로 응고가 진행될수록 용융금속의 응고 잠열 방출과 더불어 휠과 액체 금속사이의 계면 열전달의 한계로 인하여 응고 속도가 점차 감소하게 되고, 절대안정론에 부합하여 고-액 계면의 안정성이 감소하므로 평활응고계면에서 cellular 그리고 수지상조직으로 천이가 일어난다[11]. 휠과 접촉하고 있는 리본의 저부에서 평활응고계면

을 유지하며 성장한 주상정층은 부식액에 의해 그 특성이 명확하게 나타나지 않는 chill zone으로서 featureless zone이라고도 불리우며 휠의 표면과 용융금속과의 접촉 상태에 따라 그 존재 여부 및 크기가 다소 달라질 수 있다.

리본의 두께에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 휠의 회전 속도로서 속도가 증가할수록 두께는 감소하게 되므로 냉각속도에 영향을 미쳐 리본의 미세조직과 특성을 결정하게 된다. Al-4.5wt% Cu에서 휠의 회전 속도가 15.7m/s(1000rpm)에서 47.1m/s(3000rpm)으로 증가하였을 때 리본

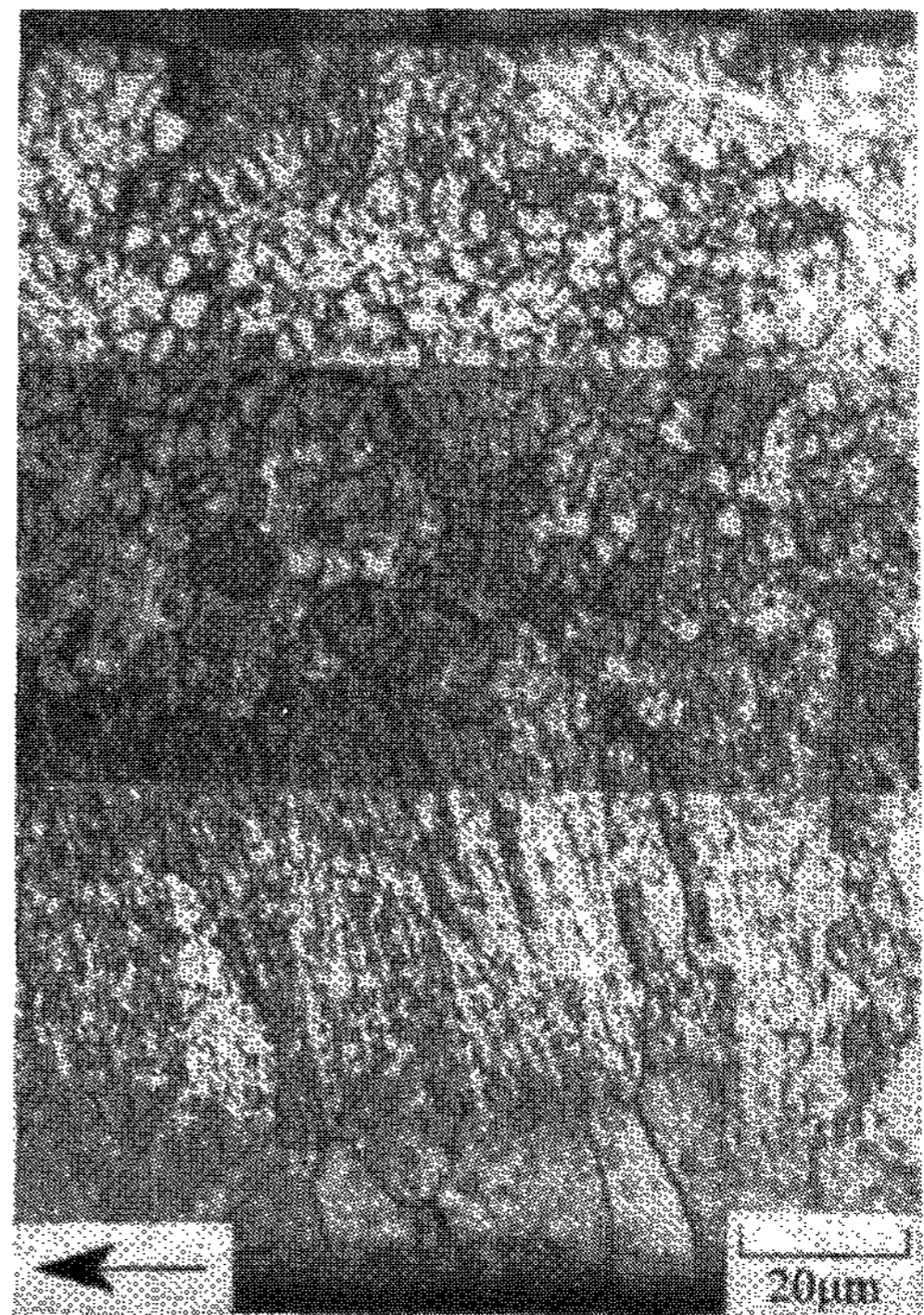


Fig. 3. Variation in microstructure across the thickness of Al-4.5wt%Cu ribbon solidified with a wheel velocity of 7.9m/s.

Table 1. Solidification characteristics of Al-4.5wt%Cu ribbon with various wheel velocities

wheel velocity (m/s)	thickness (μ m)	dwel time (sec)	puddle length (mm)	S/L velocity of air-side(mm/s)	cooling rate of air-side(K/s)
3.93(250rpm)	206.0	0.00123	4.8	85.43	1.08 \times 10 ⁴
7.07(450rpm)	125.1	0.00054	3.8	140.69	2.94 \times 10 ⁴
9.42(600rpm)	70.5	0.00035	3.3	249.64	9.26 \times 10 ⁴
12.57(800rpm)	58.6	0.00023	2.9	300.34	1.34 \times 10 ⁵

종단면의 미세 조직의 변화 양상을 그림 4에 나타내었으며, 15.7m/s의 저속에서는 리본 전체를 통하여 cellular 혹은 수지상 조직이 관찰되고 휠의 속도가 점차 증가함에 따라 높은 냉각 속도와 휠과의 접촉 거동이 양호하여[12] 부식액에 그 특성이 명확하게 나타나지 않는 급냉된 주상정구역이 차지하는 두께가 점차 증가하는 것을 알 수 있었다. 주상정의 평균 결정립 크기는 상대적으로 휠의 속도가 빠를수록 다소 미세해졌으며, 휠 표면과 주상정간의 각도는 용탕의 흐름에 기인하여 휠의 회전 방향으로 경사를 가지면서 성장하는 것을 관찰할 수 있었다.

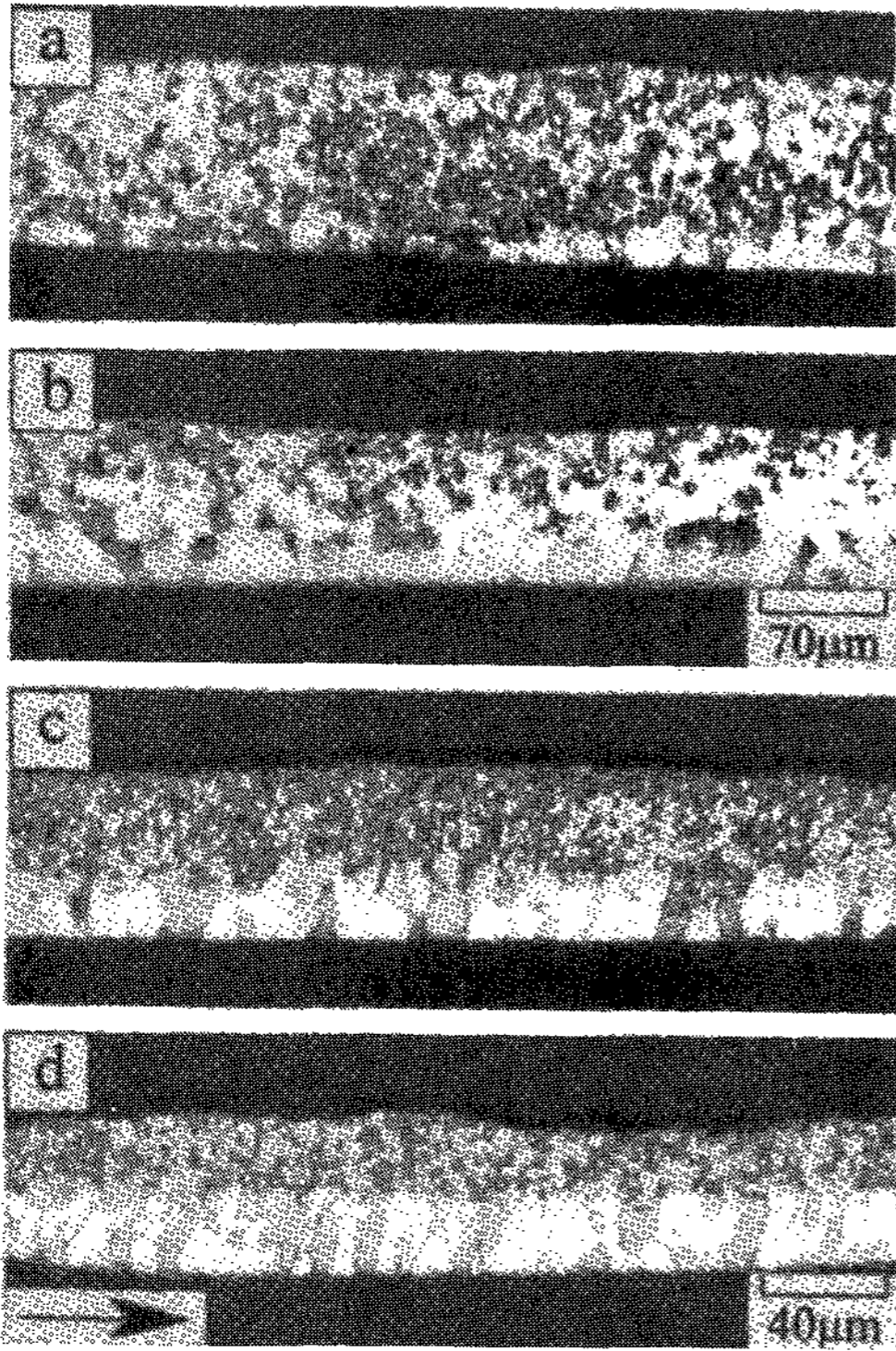


Fig. 4. Variation in microstructure across the thickness of Al-4.5wt%Cu ribbon as a function of the wheel velocity : (a)15.7m/s, (b) 23.6m/s, (c) 39.3m/s, and (d) 47.1m/s.

투과전자현미경으로 관찰한 Al-4.5wt%Cu 리본의 휠 접촉면과 자유 표면쪽의 미세 조직을 그림 5에 나타내었으며, 리본의 휠 접촉면은 직선에 가까운 모서리를 가지는 다각형결정립들이 존재하였고 그림 4에서 보여주는 바와 같이 무분

배응고가 일어나거나 혹은 적은 양의 Al₂Cu 상이 입계와 입내에 미세하게 존재하는 것을 알 수 있었다. 응고가 점차 진행됨에 따라서 응고 속도의 감소와 응고잠열의 방출로 인하여 공기와 접하고 있는 리본의 상부에서는 편석이 수반되는 cellular 혹은 수지상 조직이 잘 발달되어 있었으며 Al 수지상이 발달한 중에 Al₂Cu상이 정출하여 길게 늘어난 봉상으로 일부는 구상 입자상으로 존재하였다.

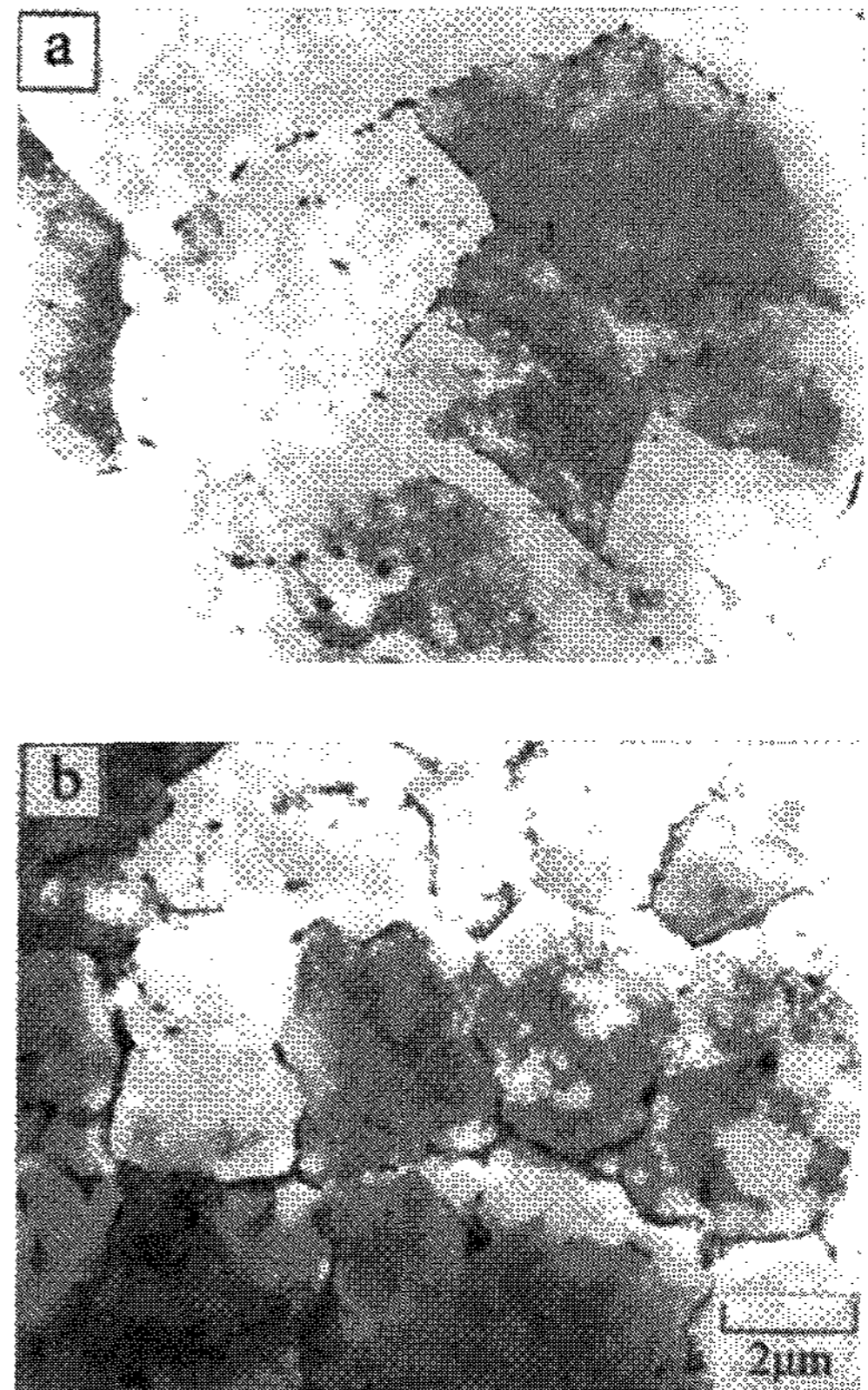


Fig. 5. Transmission electron micrographs of Al-4.5wt%Cu ribbon solidified with a wheel velocity of 23.6m/s : (a) wheel side and (b) free side.

Al-4.5wt%Cu 리본에 대하여 휠의 회전속도에 따른 주상정의 결정립 크기와 부피분율의 변화 및 휠의 표면에 대하여 기울어진 경사각을 표 2에 나타내었다. 주상정의 평균 결정립크기는 휠의 회전속도가 15.7m/s에서 47.1m/s으로 증가할 수록 17.5µm에서 5.3µm으로 감소하였고, 따

Table 2. Average columnar grain size, volume fraction of quenched columnar layer and average deflection angle of columnar grain as a function of wheel surface velocity measured in Al-4.5wt%Cu ribbon

wheel velocity(m/s)	1.57 (1000rpm)	23.6 (1500rpm)	39.3 (2500rpm)	47.1 (3000rpm)
average columnar grain size(μm)	17.5	15	6.5	5.3
volume fraction of quenched columnar layer(%)	6	22	38	50
average deflection angle ($^{\circ}$)	0	9	12	15

라서 하나의 결정립이 하나의 핵에서 성장하였다고 한다면 휠의 회전속도가 증가할 수록 핵생성 밀도가 커지는 것을 알 수 있었다. 급냉된 주상정이 차지하는 부피 분율은 47.1m/s에서 1/2정도를 차지하므로써 회전속도가 증가할수록 휠과의 접촉이 양호하며 높은 냉각 속도와 응고 속도가 얻어짐으로 인해 주상정 구역의 부피분율이 증가하는 것으로 생각된다. melt의 흐름에 기인하여 주상정들이 휠의 회전 방향으로 최대 약 15° 정도까지 경사를 가지며 성장하는 것을 관찰할 수 있었으며, 이는 휠회전의 반대 방향으로 용탕의 흐름이 존재하는 것을 의미하는 것으로서 고속에서 제조된 리본의 경우 유동 방향의 반대 방향으로 결정립이 국부적으로 경사지는 현상 [13]과 국부적인 열적기울기나 유동의 경사에 대해 유리하게 배열된 결정립이 선택적으로 성장하는 것을 알 수 있었다.

Al-Cu 공정조성에서의 리본의 두께 방향에 따른 조직 천이를 그림 6에 나타내었으며, 리본의 저부에서 평활응고계면, 주상정, 자유 표면쪽으로 갈수록 더욱 조대해지는 등축정의 세부분으로 된 층구조를 보여주고 있다. 이러한 미세조직을 투과전자현미경을 이용하여 분석한 결과를 그림 7에 나타내었다. 리본의 밑면에서는 degenerate eutectic structure가 관찰되고 있으며 [112] beam방향을 가진 SAD패턴에서 θ 상을 암시야상으로 관찰한 결과 입자 모양으로 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 응고가 점차 진행됨에 따라 규칙적인 lamellar eutectic structure로 천이하는 것을 알 수 있었으며, 리본의 윗부분은 규칙적인 lamellar eutectic structure가 잘 발달된 것을 확인하였다. 자유 표면쪽에서의 평균 lamellar 간격은 95~110nm정도였으며, 급냉응고

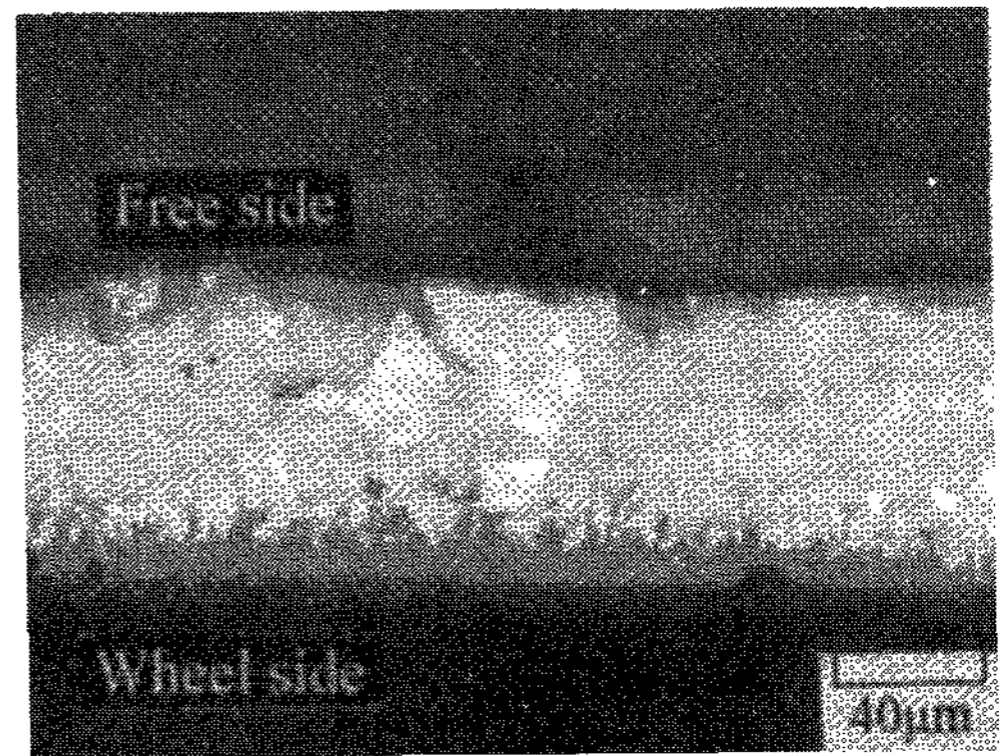


Fig. 6. Optical micrograph of longitudinal cross section through the thickness of Al-33.2wt%Cu ribbon.

된 Al-Cu 공정 조성에서 응고 속도 R과 lamellar 간격 S와의 관계식, $RS^2=58\mu\text{m}^3/\text{s}$ [14]에 의한 자유 표면쪽의 평균 응고속도는 약 5.6mm/s인 것을 알 수 있었다.

그림 8 [15]는 그림 7에서 관찰한 공정 응고 조직의 변화를 설명하는 개략도로서, Al-Cu 공정 합금에서 α 상과 θ 상은 공정 온도 근처에서 각각 12 J/molK와 20 J/molK의 용융엔트로피 값을 가진다 [16]. 더 큰 용융엔트로피 값을 가지는 상은 응고속도와 과냉과의 관계에서 더 작은 kinetic coefficient를 가지며 응고 과정 동안에 원자들의 재배열이 어렵게 되므로, α 상이 θ 상과 비교하여 같은 과냉에서 더 큰 성장 속도를 가지게 된다. 리본 제조시 휠과 접촉하고 있는 리본 밑면에서의 액상은 높은 과냉값을 가지므로, α 상의 성장 속도 V_α 가 θ 상의 성장 속도 V_θ 보다 매우 커서 θ 상이 입자 모양을 하는 조직을 나타내는 것으로 생각된다. 고-액 계면이 휠 접촉면에

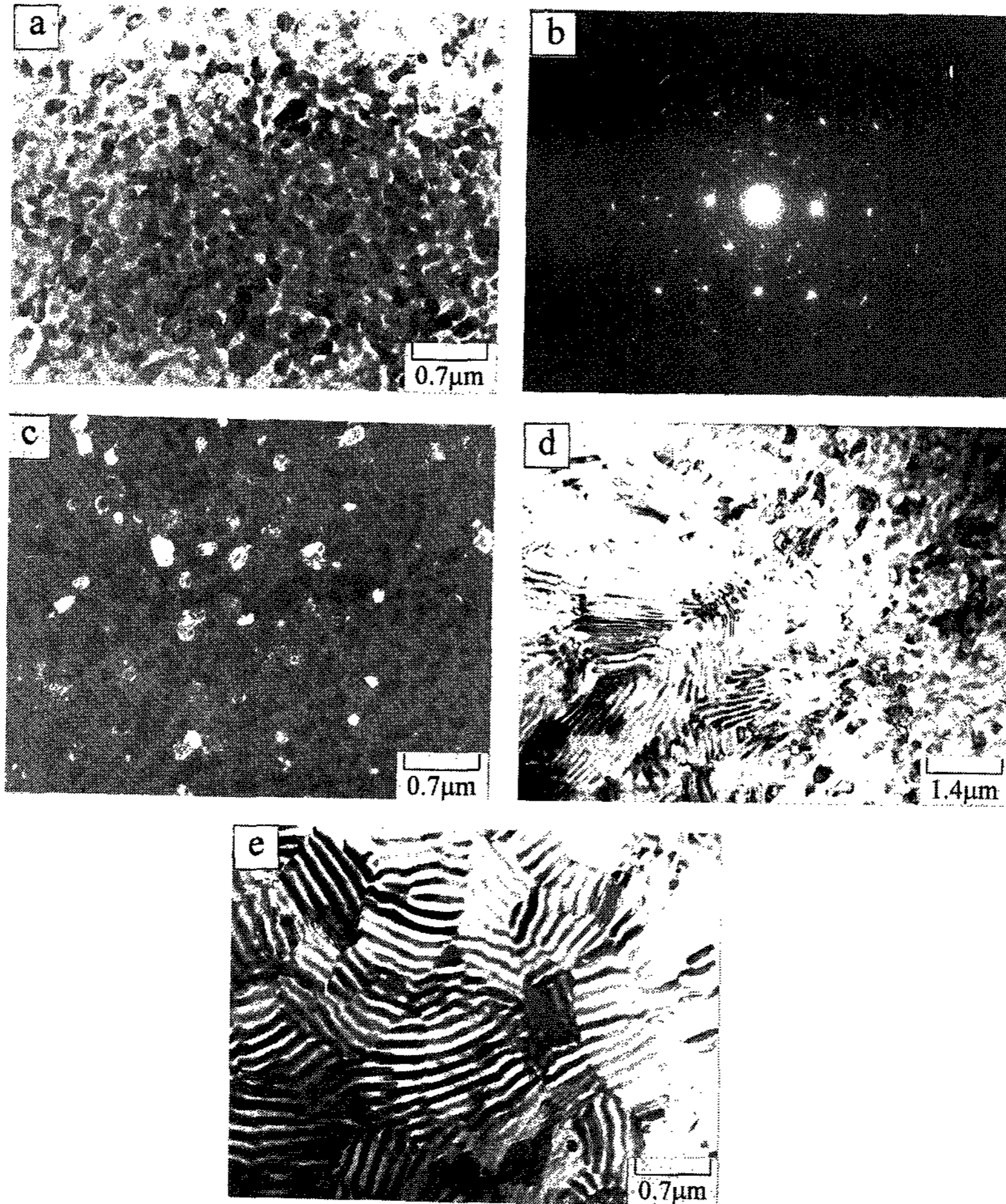


Fig. 7. Transmission electron micrographs of Al-33.2wt%Cu ribbon : (a) BF image of wheel side, (b) SADP of (a), (c) DF image of θ , (d) transition zone, and (e) BF image of free side.

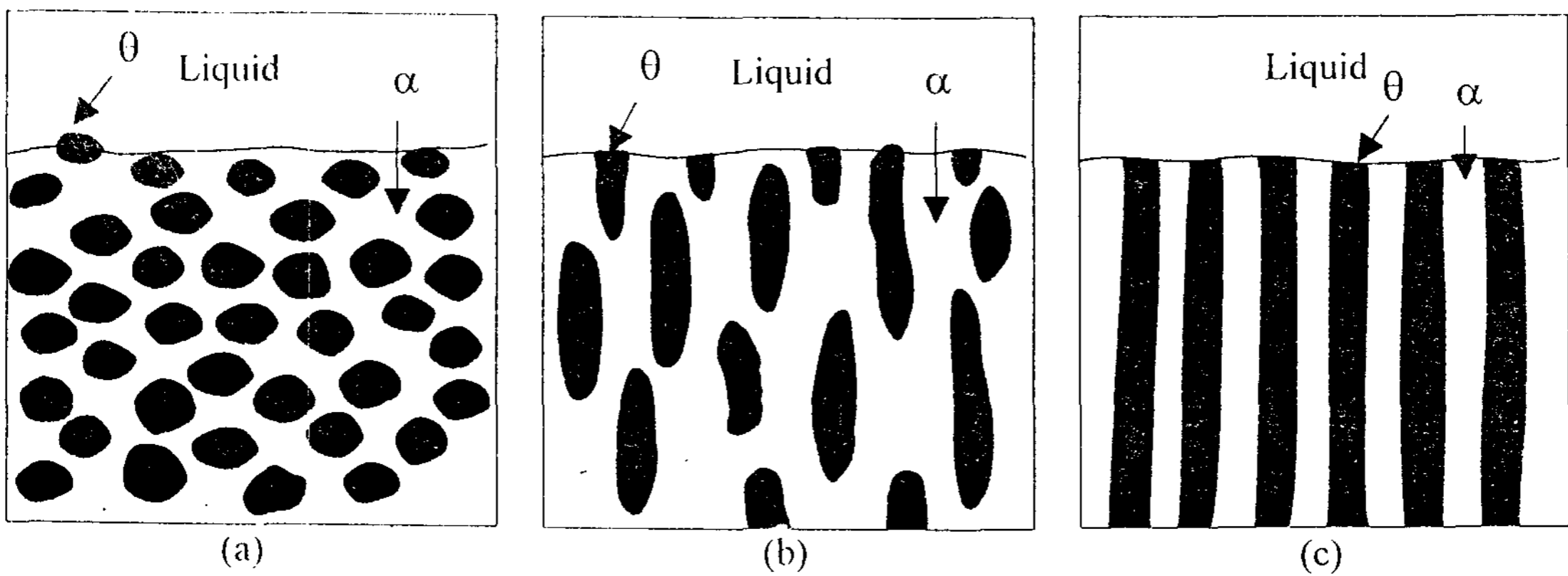


Fig. 8. Schematic diagram of Al-Cu eutectic microstructure as a function of the relative growth velocities[15] : (a) $V_\alpha \gg V_\theta$, (b) $V_\alpha > V_\theta$, and (c) $V_\alpha = V_\theta$.

서 전진함에 따라 잠열의 방출로 계면의 온도가 증가하게 되고 과냉과 응고속도가 점차적으로 감소하여 자유 표면 가까이에서는 V_α 와 V_β 의 성장 속도의 차이가 적어져 α 상과 β 상이 층상으로 존재하는 규칙적인 lamellar eutectic structure를 형성하게 된다.

4. 결 론

PFC법으로 Al-Cu다결정 리본을 연속적으로 제조한 후 응고 거동 및 미세 조직 특성을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 휠 회전속도, 가압압력 등의 주조 변수들이 안정화 범위에 있을 때 폭 10mm, 두께 수십~수백 μm 의 리본을 연속적으로 제조할 수 있었다.

2) 리본 형성기구가 열전달 방식이 지배적이라는 가정하에서 두께 방향에 따른 응고 속도 $V=17.6\text{S}^{-1}$, 국부적 냉각 속도 $T=460.3\text{S}^{-2}$ 의 관계를 보였으며 자유표면쪽의 평균 냉각 속도는 대략 10^4K/s 값을 가진다.

3) Al-4.5wt%Cu 합금에서 두께 방향에 따른 국부 응고 속도의 변화로 인하여 리본의 밑면에서 평활응고계면을 가지는 급냉된 주상정구역이 세포상, 수지상조직으로 천이하였으며, 휠의 회전속도가 15.7m/s에서 47.1m/s로 증가함에 따라 주상정의 평균 결정립 크기는 17.5 μm 에서 5.3 μm 로 감소하였고, 주상정이 전체 리본에서 차지하는 부피분율은 점차 증가하였다. 용융금속의 흐름에 기인한 주상정의 기울어짐이 최대 15° 정도 관찰되었다.

4) 공정 조성에서 α 상과 β 상의 성장 속도의 차이에 의해 입자 모양의 θ 상을 가지는 조직으로부터 규칙적인 층상 공정 조직으로 천이하였으며, 자유표면쪽에서 층상간격은 95~110nm이고 응고 속도는 5.6mm/s정도인 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] R. T. Southin and G. A. Chadwick : Acta Met., 26 (1978) 223
- [2] H. Jones : J. of Mat. Sci., 19 (1984) 1043
- [3] H. Fiedler, H. Muhlbach and G. Stephani : J. of Mat. Sci., 19 (1984) 115
- [4] P. D. Wilde and E. F. Matthys : Mat. Sci. & Eng., A151 (1992) 237
- [5] 이상목, 명노훈, 홍준표 : 대한금속학회지, 32 (1994) 1180
- [6] H. H. Liebermann : J. of Crystal Growth, 70 (1984) 497
- [7] G. Stephan, H. Muhlbach, H. Fiedler and G. Richter : Mater. Sci. Eng., 98 (1988) 29
- [8] L. A. Anestiev : J. of Mat. Sci., 25 (1990) 233
- [9] S. C. Huang, R. P. Laforce and R. P. Goehner : Metall. Trans., 16A (1985) 1773
- [10] R. D. Pehlke, A. Jeyarajan and H. Wade : Summary of Thermal Properties for Casting Alloys and Mold Materials, U.S. Dept. of Commerce, 1982
- [11] D. Ma and P. R. Sahm : Acta metall mater., 40 (1992) 251
- [12] B. Cantor, W. T. Kim, B. P. Bewlay and A. G. Gillen : J. of Mat. Sci., 26 (1991) 1266
- [13] K. Murakami, T. Fujiyama, A. Koike and T. Okamoto : Acta Met., 31 (1983) 1425
- [14] M. Zimmermann, M. Carrard and W. Kurz : Acta Met., 37 (1989) 3305
- [15] W. T. Kim, B. Cantor and T. H. Kim : Int. J. Rapid Solidification, 5 (1990) 251
- [16] J. L. Murray : Internat. Met. Riviews, 30 (1985) 211