

|||||||  
**論 文**  
|||||||

### Al-Cu 다결정 리본의 응고거동에 미치는 휠조건의 영향

김주형 · 이상목 · 홍준표

#### Effects of Wheel Condition on Solidification Characteristics of Al-Cu Polycrystalline Ribbon

Ju-Hyung Kim, Sang-Mok Lee and Chun-Pyo Hong

#### Abstract

The effect of wheel surface condition on solidification behavior of Al-Cu ribbon was investigated in order to establish extreme levels of heat extraction. The condition of wheel surface was changed either by heating the wheel surface up to 200°C or by coating boron nitride(BN) onto the the rim of a wheel. Heating the wheel surface up to 200°C improved the wetting behavior between the molten metal and the rotating wheel, leading to an increase in the ratio of columnar structure to the entire thickness of Al-4.3wt%Cu and Al-33.2wt%Cu ribbons. For Al-4.3wt%Cu ribbon, assuming one grain as a single heterogeneous nucleation event at the contact point, the nucleation density with the wheel surface heated to 200°C, was  $4 \times 10^6/\text{mm}^2$ , and in the cases of BN coating with thin and thick layers,  $10^5/\text{mm}^2$  and  $5 \times 10^4/\text{mm}^2$ , respectively. The largest cooling capacity of the wheel corresponded to the heated wheel surface, and as the thickness of BN coating layer increased, the cooling capacity of the wheel gradually decreased. (Received February 15, 1997)

### 1. 서 론

1970년대부터 주목받기 시작한 급속응고 박판제조 기술은 소성가공 공정의 생략에 따른 경제적 이점을 가짐과 동시에, 우수한 기계적, 물리적 소재의 연속제조법으로 평가되어, 이에대한 활발한 연구개발이 계속되고 있는 상황이다[1]. 급냉응고 박판재료의 연속생산법은 용융금속과 냉각휠의 접촉방식에 따라 구분되며, free jet melt spinning(FJMS)[2], planar flow casting(PFC)[3], melt drag(MD) process[4]등이 개발되어왔다. 이중 PFC법은 슬릿과 회전 휠과의 간격을 최소화 함으로써 연속적으로 양질의 리본을 대량생산할 수 있는 제조법으로 주목받아 왔으며[5], PFC법에 대한 공정개발과 제조된 리본의 특성 및 미세조직에 대한 연구가 계속 발표되고 있다[6-10].

PFC법에서 주요제조변수의 변화는 리본 미세구조 및 특성에 커다란 영향을 미치며, 여러 가지 합금들에 대해서 휠회전속도, 용융금속의 과열도, 가압가스의 압력, 슬릿과 휠표면사이의 간격, 가스분위기 등이 리본의 미세조직에 미치는 영향이 연구되었으나[11] 휠

의 표면조건을 변화시킴으로써 미세조직을 제어하려는 연구는 아직 시도되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 2원계 Al-Cu 합금에 대하여 Al-4.3wt%Cu 및 Al-33.2wt%Cu의 두 조성을 선택하고, 회전 휠의 표면조건을 일반휠조건, 가열휠조건, BN 도포조건으로 변화시켜 휠의 냉각능을 제어하여 이에 따른 미세조직 천이를 관찰하였다. Al-4.3wt%Cu 합금에서 관찰되는 등축 수지상정 구조와 Al-33.2wt%Cu 공정합금의 경우에 나타나는 층상구조(lamellar structure) 미세조직의 관찰로부터, 리본내 응고거동을 규명하고자 하였으며, 국부냉각속도, 고액계면 전진속도, 용융금속과 휠간의 열전달계수에 대한 평가가 이루어졌다.

### 2. 실험방법

본 연구에서는 Al(99.99wt%)와 Cu(99.99wt%)를 사용하여, 산세 후 각각 목표조성(Al-4.3wt%Cu, Al-33.2wt%Cu)으로 대기고주파 용해로에서 용해하여, 흑연 주형에 주입, 봉상시편으로 제조하였다. 30 g 정도의

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

봉상시편을 전기로 내에 설치된 석영 노즐에서 재용해, 액상선보다 100 K 과열시킨 상태에서 20 kPa의 압력으로 아르곤 가스를 가압하여, 석영관 하부의 폭 12 mm, 두께 1 mm의 슬릿을 통하여 연속적으로 구리 휠 위에 분사하였다. 이 때 슬릿과 휠표면사이의 간격은 0.75 mm로 고정하였으며, 휠의 회전속도는 1500 rpm으로서 선속도 23.6 m/s로 유지되었다. 이와같이 제조변수를 고정한 상태에서의 휠의 표면조건을 일반 휠조건, 표면온도를 200°C로 유지한 가열휠조건, 휠표면에 BN(boron nitride)도포를 한 상태로 각기 변화시켜, 휠조건의 미세조직 천이에 대한 영향을 조사하였다.

제조된 리본의 종단면 미세조직 관찰을 위해 SiC 연마지로 기계적 연마를 한 후, 0.3 μm의 입경을 갖는 MgO 분말을 에탄올에 분산시켜 buffering 하였다. 부식액으로 Keller시약(증류수 92 ml+HNO<sub>3</sub> 6 ml+HF 2 ml)을 사용하였으며, Nikon EPIPHOT 광학현미경으로

미세조직을 관찰하였다. 자유표면과 휠접촉면의 경우 기계적 연마없이 buffering한 후, 광학현미경과 Hitachi S 2700 Scanning Electron Microscope(SEM)를 사용하여 미세조직을 관찰하였다.

리본내 미세편석분포를 조사하기 위하여 자유표면 및 휠접촉면을 Image Analyser를 이용하여 분석하였으며, 0(BLACK)~255(WHITE)의 등급을 갖는 명암에 대해, 122 이하의 부분을 어두운 지역으로 처리, 면적분율을 산출하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 Al-4.3wt%Cu 다결정 리본의 미세구조

휠조건 변화에 따른 Al-4.3wt%Cu 리본의 종단면 미세조직 변화 양상을 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1의 화살표 방향은 휠의 회전방향이다. PFC법에 의해 제조된 Al-Cu 리본의 종단면에서 일반적으로 나타나는 무

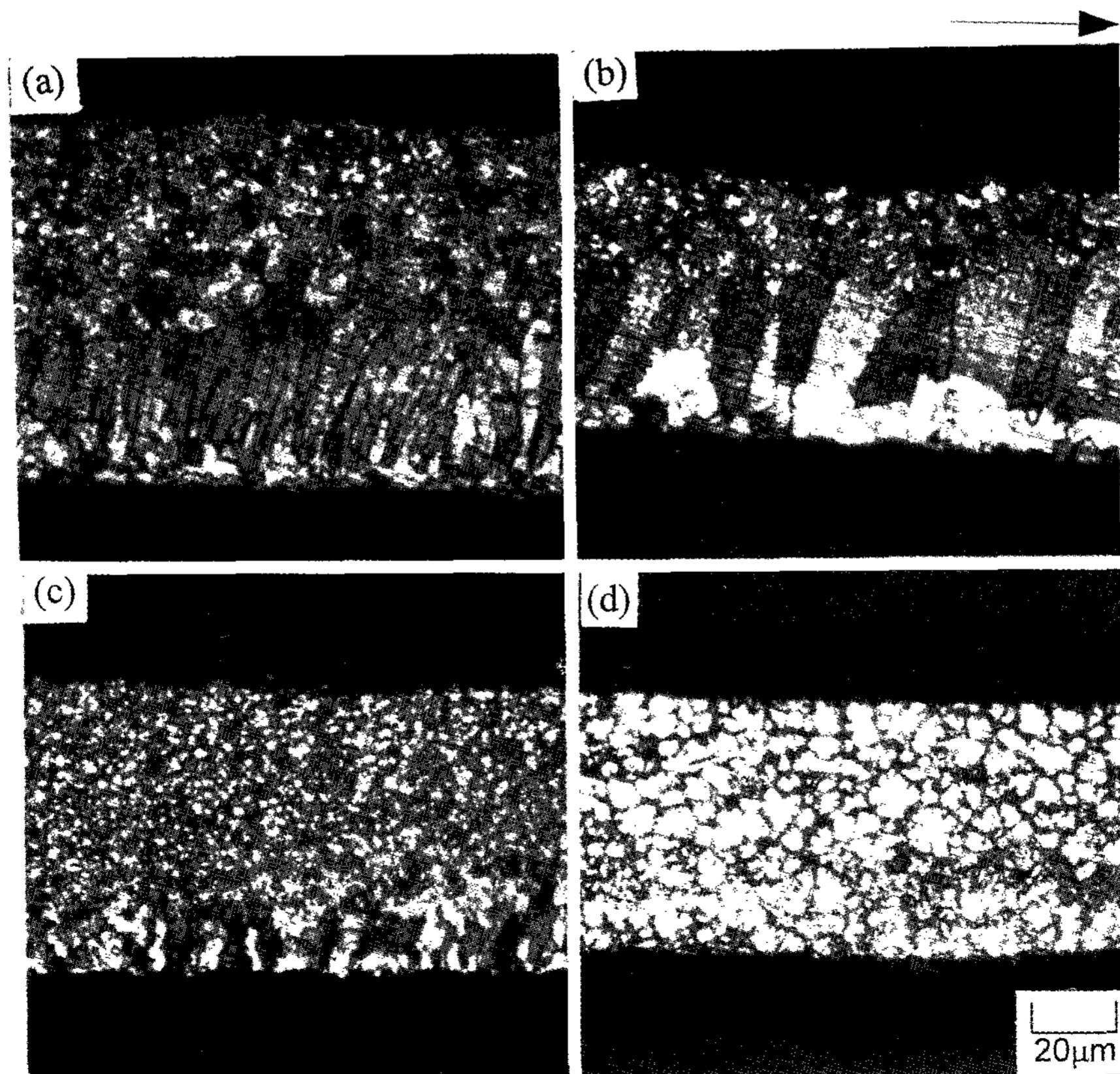


Fig. 1. Microstructures of Al-4.3wt%Cu ribbons produced under various wheel conditions; (a) normal wheel, (b) heated to 200°C, (c) thin layer of BN coating, and (d) thick layer of BN coating.

편석 주상정 응고지역으로부터 세포상/등축수지상으로의 연속적인 천이가 관찰되었다. Al-4.3wt%Cu 리본의 종단면 방향으로 2 또는 3개층의 층상구조가 나타나며 휠조건의 변화에 따라 각 천이대의 비율은 크게 변화하였다. 일반적으로 리본의 휠접촉면 바로 인접한 지역에서는 매우 작은 결정립들이 나타나며, 이곳은 결정성장이 시작되는 지점에서 불균일 핵생성이 일어나 생성된 것으로 생각된다. 몇몇 결정립들은 핵생성시 보다 큰 주상정의 형태로 계속 자라나 휠접촉면 근처에서 구분되는 주상정지역을 형성하였다. 주상정 분율은 일반휠 조건의 경우에 대해 200°C로 가열한 경우 약 50%정도 증가하였으며, BN 도포시 피복 두께의 증가에 따라 주상정 분율이 크게 감소하여 Fig. 1(d)와 같이 두껍게 도포한 경우에는 주상정 지역이 사라지고, 리본의 전 구간에 걸쳐 등축수지상 지역이 형성되었다. 주상정 입자들의 층간격(trunk spacing)의 크기는 일반휠 조건의 경우에 비해 휠 가열 시에는 증가하였고, BN을 얇게 도포하였을 경우에는

매우 작아졌다. 주상정 결정립은 휠접촉면에서 가장 먼 쪽에서 휠면에 수직하는 법선으로부터 10°정도 경사지며 휠의 경사각도는 가열시에 가장 작았으며, 일반조건일 때, BN 도포시로 휠표면조건이 변화함에 따라 약간씩 증가하는 경향을 나타내었다.

Fig. 2는 휠조건 변화에 따른 자유표면쪽의 등축수지상의 변화양상이며, 등축수지상의 크기는 가열조건인 경우 가장 미세하고, 일반조건, BN 도포조건으로 가면서 증가하였다. 등축수지상의 크기를 평가하기 위해서 교선법을 사용하였다. 수지상의 크기를 평가하는 방법으로 교선법과 2차지법[12]이 있는데, Al-Cu 다결정 리본 내에서 발달하는 등축수지상의 경우에는 연속적인 2차가지의 배열이 발생하지 않으므로 2차지법을 사용할 수 없다. 따라서 교선법을 채택하여 등축수지상의 평균크기를 평가하였다. 측정된 자유표면의 등축수지상의 크기로부터 냉각속도를 측정하였으며, 잘알려진 Al-Cu합금에서의 DAS와 냉각속도와 의 관계식[13]

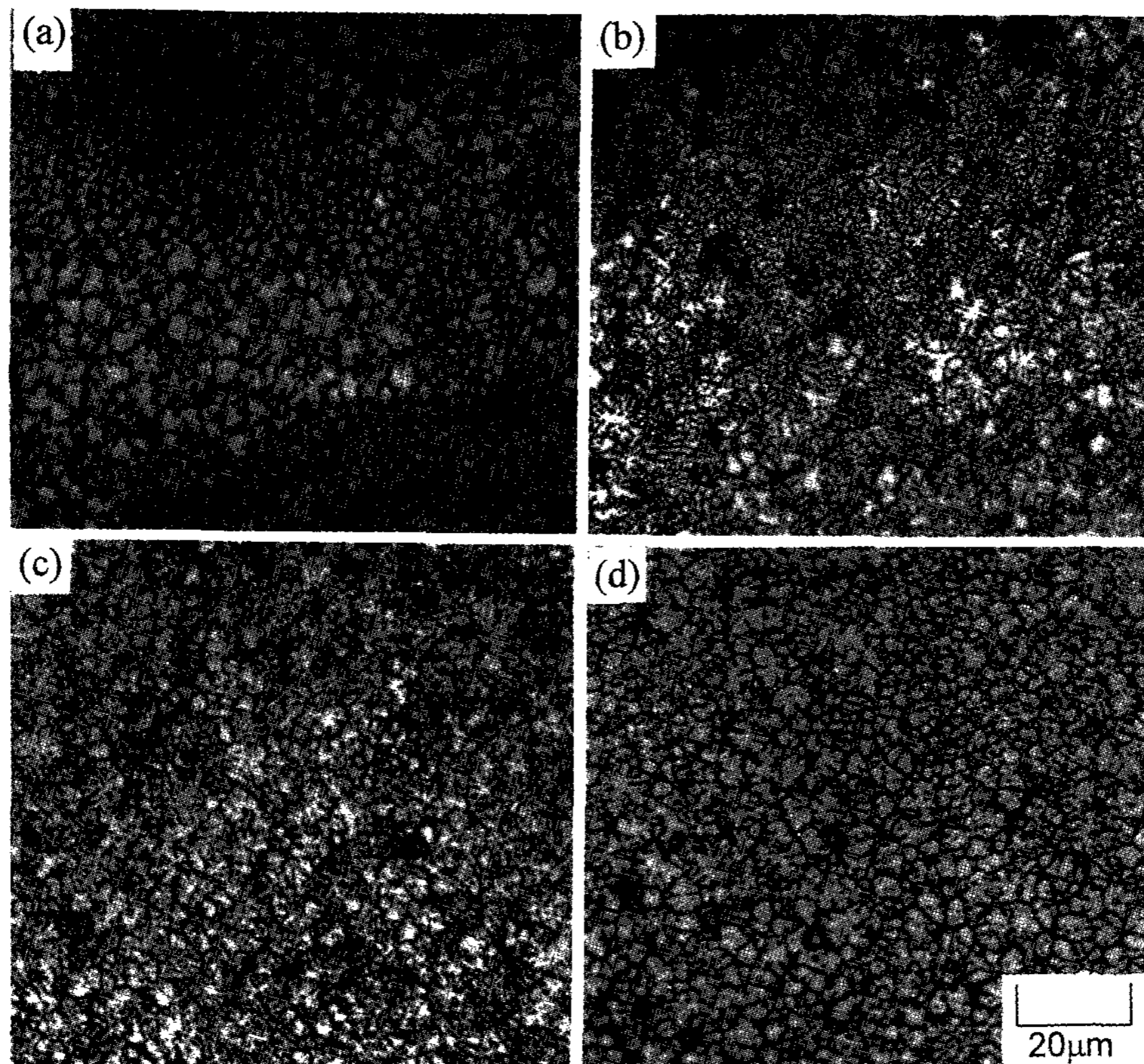


Fig. 2. Microstructures of the air-side Al-4.3wt%Cu ribbons under various wheel conditions; (a) normal wheel, (b) heated to 200°C, (c) thin layer of BN coating, and (d) thick layer of BN coating.

$$d = 50 \dot{T}^{-1/3} \quad (1)$$

을 사용하여 측정된 리본자유표면에서의 냉각속도의 변화를 Fig. 3에 나타내었으며, 냉각속도는 BN을 도포한 경우, 피복 두께가 약 30 μm에서 5 μm로 감소함에 따라 약 10<sup>3</sup> K/s 에서 3.0×10<sup>3</sup> K/s로, 일반응고의 경우 약 1.6×10<sup>4</sup> K/s, 가열한 휠조건의 경우 9.0×10<sup>4</sup> K/s로 변화하였다.

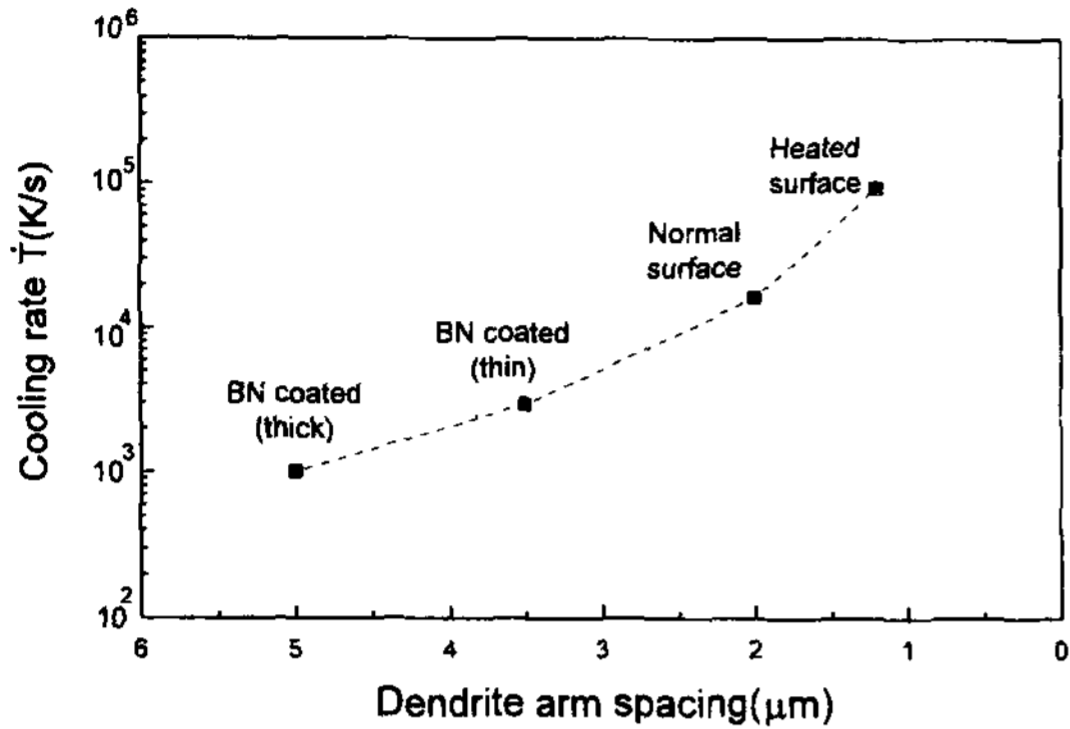


Fig. 3. Cooling rate of the air-side surface of Al-4.3wt%Cu ribbons under various wheel conditions.

에 따라 약 10<sup>3</sup> K/s 에서 3.0×10<sup>3</sup> K/s로, 일반응고의 경우 약 1.6×10<sup>4</sup> K/s, 가열한 휠조건의 경우 9.0×10<sup>4</sup> K/s로 변화하였다.

Fig. 4는 휠조건의 변화에 따른 열접촉면의 미세조직 변화양상이다. 일반응고와 가열조건시에는 열접촉면에 미세한 다각형 형상의 결정립들이 형성되며 결정입계의 형상은 직선형으로 되어있다. 열접촉 상태가 좋은 지역에서는 인근지역보다 훨씬 미세한 결정립들이 형성되며, 열접촉이 불량한 지역에서는 측면으로의 성장이 일어나서 연신된 결정립들이 관찰되고 있다. BN을 얇게 도포한 지역에서는 일반조건시 나타나는 다각형 형태의 결정립들이 나타나는 동시에 인근지역에서 미세한 세포상 조직 또는 등축 수지상들이 관찰되고 있다. BN을 두껍게 도포한 경우 다각형 형태의 결정립들은 나타나지 않으며, 상대적으로 조대한 등축 수지상들이 나타난다. 결정립 및 수지상이 하나의 핵으로부터 자라났다고 가정하였을 때, 휠의 표면을

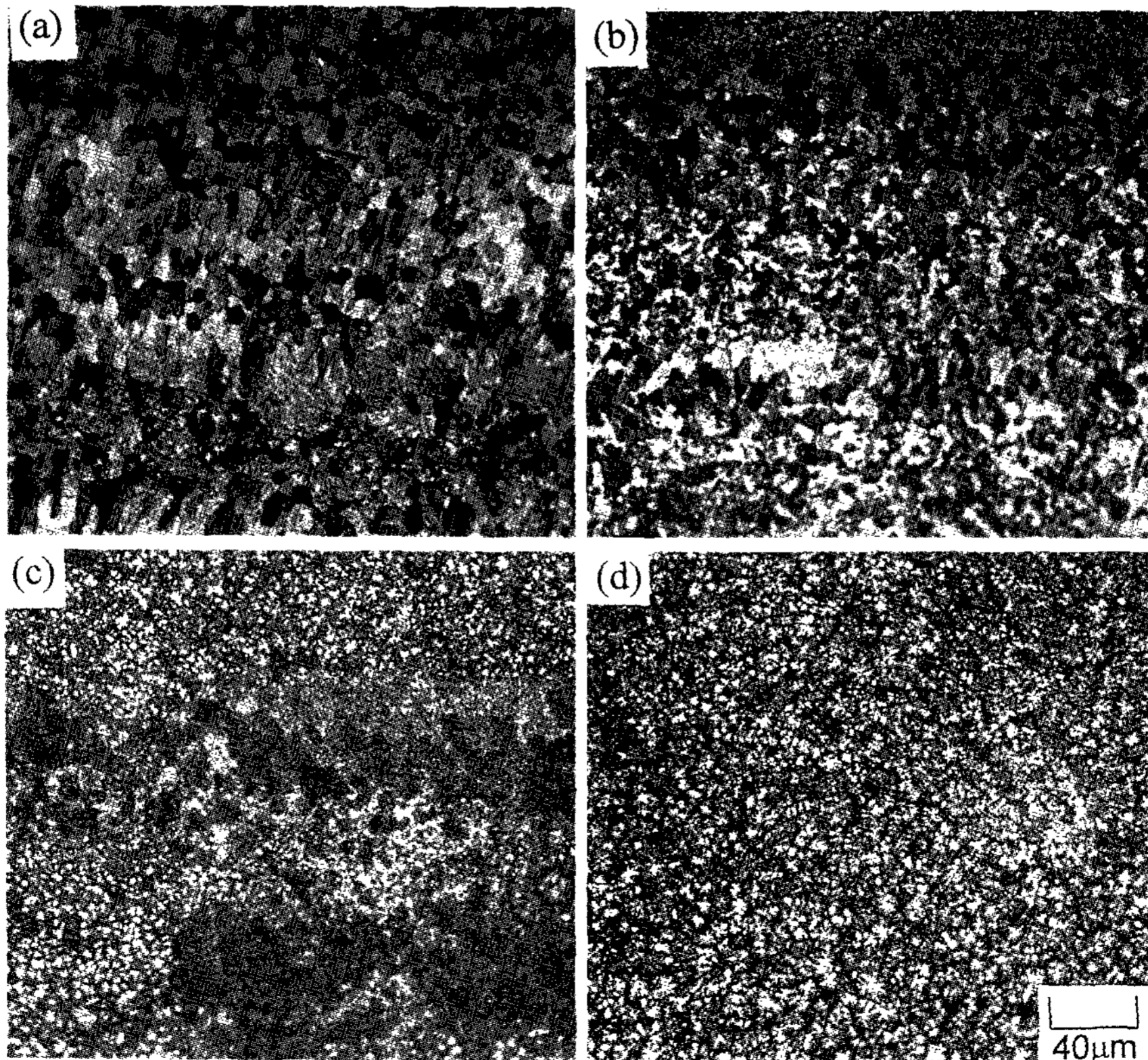


Fig. 4. Microstructures of the wheel-side surface of Al-4.3wt%Cu ribbons under various wheel conditions; (a) normal wheel, (b) heated to 200°C, (c) thin layer of BN coating, and (d) thick layer of BN coating.

200°C로 가열했을 경우 접촉이 좋은 지역에서는 핵생성 밀도는 약  $4 \times 10^6/\text{mm}^2$ 이었고, 일반 휠위에 분사했을 경우에  $10^6/\text{mm}^2$ , BN으로 도포했을 경우에는 얇게 도포했을 경우와 두껍게 도포했을 경우 각각  $10^5/\text{mm}^2$ ,  $5 \times 10^4/\text{mm}^2$ 가 되었다. 불균일 핵생성 밀도는 용융금속으로부터 방출되는 열량 증가에 따라 증가하며, 결정립 크기는 휠근방의 과냉도 증가에 따라 감소한다[14]. 휠접촉면 미세조직 관찰결과를 Table 2에 나타내었다.

3.2 휠의 표면조건 변화에 따른 접촉거동의 변화

Fig. 5에 Al-4.3wt%Cu합금 리본의 휠조건 변화에

Table 1. Correlation between the wheel surface condition and the resultant solidification behavior in Al-4.3wt%Cu alloy

	Normal condition	Heated surface	BN coated (thin)	BN coated (thick)
Ribbon thickness( $\mu\text{m}$ )	80	61	66	58
Ratio of columnar structure(%)	41	68	23	$\approx 0.0$
Columnar grain size( $\mu\text{m}$ )	5.9	10.0	4.6	-

다른 접촉거동의 변화를 나타내고 있다. PFC법으로 제조된 리본의 휠접촉면에서는 용융금속과 휠면과의 접촉정도에 따라서 표면기복현상이 발생한다. 사진에서 높게 나타난 부분은 휠과의 접촉상태가 좋은 부분이고, 낮게 들어간 부분은 휠표면과 접촉이 좋지 않은 지역으로서 air pocket을 형성하게 되며, 휠조건의 변화에 따라 air pocket의 크기 및 분포는 변화하게 된다. Fig. 5(a)에서는 상대적으로 폭이 넓고, 깊이 파인 air pocket이 관찰되고 있다. 휠을 가열한 상황에서는 air pocket의 크기 및 수가 감소하며, 이러한 현상으로 인해 계면열전달 계수가 증가하게 되는 것으로 생각된다. BN 피복시에는 air pocket의 크기와 수가 비교적 감소하며, 휠접촉면 전체에 걸쳐서 균일한 면이 나타났다. 이러한 거동은 용융금속과 휠 간의 젖음성 증가에 의해서 발생하는 것으로 생각되며, 가열조건시 휠과 용융금속의 온도차가 작아짐에도 불구하고 열방출이 증가하는 이유가 된다.

표면의 결함 등에 의해 발생한 접촉 불량 지역에서는 마치 용접시에 발생하는 조직[15]과 유사한 연신된 구조가 나타나곤 한다. 이 지역에서는 상대적으로 낮은 과냉도에서 핵생성이 억제되며 인근의 chill crystal로부터 시작된 성장에 의해서 응고는 진행되게 된다. 한편 이러한 지역에서는 휠 면에 수직인 방향으로

Table 2. Effect of wheel condition on the solidification behavior of the wheel side surface of the Al-4.3wt%Cu ribbon

		Nucleation density at wheel-side surface( $/\text{mm}^2$ )	General features of wheel side surface of the ribbon
Normal wheel condition	High contact region	$10^6$	• fine polygonal grains
	Low contact region	$3 \times 10^5$	• straight-edge
	Non contact region	elongated grains/cellular	• sizes ranging from 0.3~ $\mu\text{m}$ • array of elongated grains
Heated to 200°C	High contact region	$4 \times 10^6$	• uniform distribution of very fine grains
	Low contact region	$10^6$	• polygonal
	Non contact region	elongated grains	• sizes ranging from 0.1~1 $\mu\text{m}$
BN coated (thin)	High contact region	$10^5$	• ambiguous grain boundary
	Low contact region	micro cellular	• mixture of micro cellular and equi-axed dendrites
	Non contact region	equi-axed dendrite	
BN coated (thick)	High contact region	$5 \times 10^4$	
	Low contact region	micro cellular/equi-axed dendrite	• mostly well developed equi-axed dendrites
	Non contact region	fully developed equi-axed dendrite	

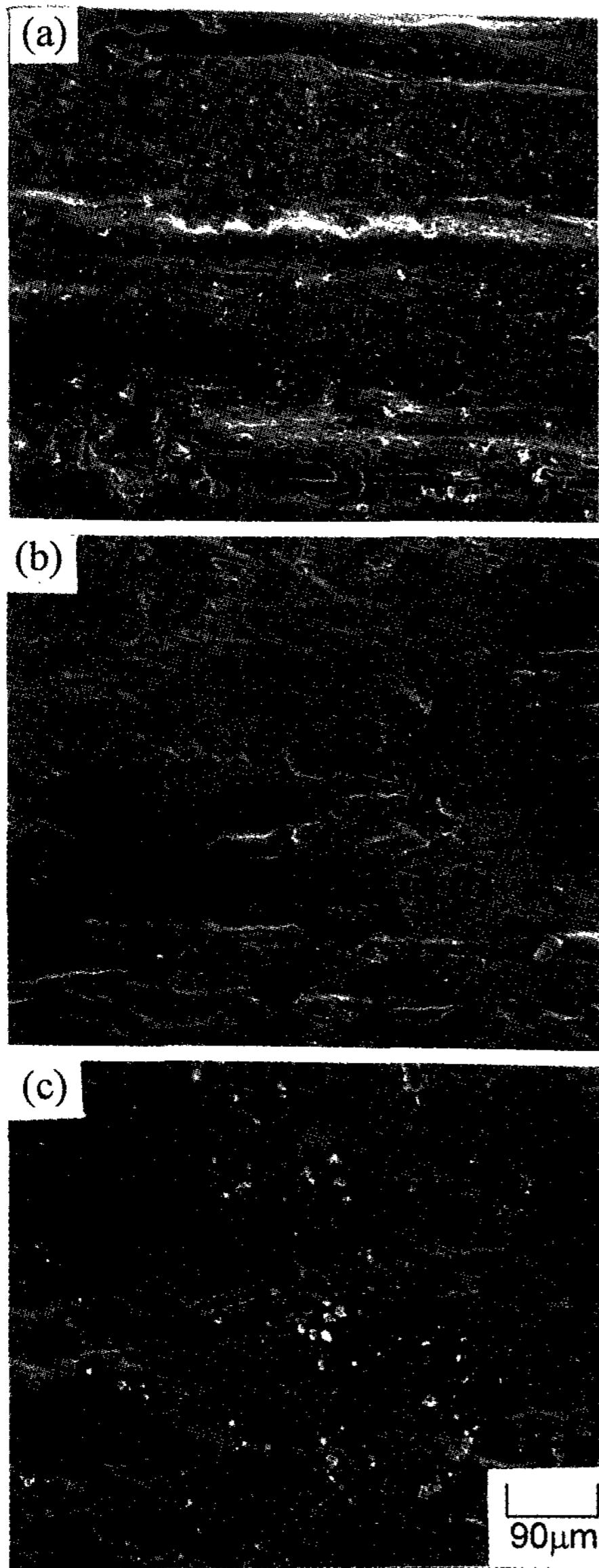


Fig. 5. Variation of the wheel contact behavior with the wheel surface condition.

의 열전달이 크게 감소하며, 응고는 접촉 불량 지역의 중심을 향하여 측면으로 진행되는 경향을 띄게 된다. 접촉 불량 지역의 중심에서는 측면성장한 결정들이 충돌하여 중심선을 이루게 된다.

### 3.3 리본내 미세편석

휠조건을 변화시켜 가며 제조한 Al-4.3wt%Cu 리본의 자유표면 및 휠접촉면에서 검게 나타난 지역의 면

Table 3. Result of image analysis (area ratio of dark field region)

	Normal wheel condition	Heated wheel condition	BN coated condition (thick)
Air side	21.1%	20.0%	31.3%
Wheel side	3.3%	3.4%	7.5%

적분율은 Table 3과 같다. 결과에 의하면 상간석출물의 양과 비례하는 것으로 판단되어지는 검은 지역은 휠표면에서 자유표면쪽으로 갈수록 증가하였고, 일반조건이나 가열조건에 비해서 BN 도포시 휠접촉면에서 검은 지역이 약 3%에서 7%로 4%정도 증가하였으며, 자유표면에서는 30%에서 20%로 10%정도 감소하였다. 휠접촉면에서는 BN 도포시 등축 수지상이 형성되므로, 과포화 고용체를 형성하여 상간석출물의 양이 감소하는 일반조건 및 가열조건에 비해서 검게 나타난 지역의 영역이 증가하게 되며, 자유표면에서는 가열조건과 일반조건의 경우 휠접촉면에서 형성되는 과포화고용체에 용질농축이 진행되어 BN 도포시에 비해 자유표면에서 편석이 감소하는 현상이 발생한 것으로 보인다. 열전달 지배방식에 의해 응고가 진행되었다는 가정하에 계산된 리본내 고액계면 전진속도 식[8]에 의하면 일반조건에서 응고시 리본내 고액계면 전진속도는 수 십cm/s로 평가되며, 계산된 고액계면 전진속도를 Aziz[16] 등이 제안한 고액계면 전진속도와 유효분배계수와와의 관계식

$$K_v = \frac{k_e + \left(\frac{a_0 V}{D}\right)}{1 + \left(\frac{a_0 V}{D}\right)} \quad (2)$$

에 대입함으로써 휠접촉면 근방에서부터 자유표면쪽으로 갈수록 유효 용질분배계수가 현저히 감소되는 것으로 나타났다. 이 때  $k_v$ 는 고액계면 전진속도에 따라 변화하는 유효분배계수이며,  $k_e$ 는 평형분배계수로 Al-Cu합금에 대해 0.15의 값[17]을 가지며,  $a_0$ 는 금속의 경우 0.5~5 nm[18]로 평가되고,  $D$ 는 용질확산계수로서 Al-Cu 합금에 대해  $4.4 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ 의 값[17]을 갖는다. 이는 응고초기에 냉각능이 큰 가열조건 및 일반조건에서 휠접촉면 근방에 형성되는 과포화  $\alpha$ 내에 Cu가 농축되고, 응고말기에 가서 고액계면전진속도가 낮은 상태에서 응고되어, 과포화고용체 생성에 의한

용질농축효과가 없는 BN 피복시보다 용금의 용질량이 감소되어 상간석출물의 양이 줄어들게 되는 것으로 보인다. Bendersky와 Boettinger[19]는 Ag-15wt% Cu 합금의 급냉응고시 세포상간 지역의 면적비가 같은 조성의 일반응고 주조합금에서보다 작음을 보고하였고, 이러한 현상은 cell 내에 농축된 과포화상 때문이라고 결론지었다. 수지상이나 세포상의 성장시 빠

른 성장속도는 수지상 선단의 고상 농도를 평형상태의 값보다 훨씬 크게 만들며, 응고후반부에 변태하는 액상이 농도가 감소하여 질량 보존 조건을 만족시키도록 한다.

3.4 Al-33.2wt%Cu 공정 다결정 리본의 미세구조  
 휠조건에 따른 Al-33.2wt%Cu 다결정리본의 종단면으로의 미세조직 변화의 양상을 Fig. 6에 나타내었다. 일반휠조건에서 제조된 공정리본의 경우, 광학현미경으로 관찰하였을 때, 특별한 조직을 나타내지 않는 지역(featureless zone)이 휠접촉지역에 좁게 나타나며, 리본의 중반부에서는 방향성을 갖는 결정립들이 약간 나타나다가, 자유표면쪽에서는 등축 결정립들이 형성되고 있다. 휠표면을 가열했을 경우, 리본의 전 영역에 걸쳐서 방향성을 가지고 성장하는 미세조직이 나타났으며, 표면에 BN 피복이 된 경우에는 조대한 등축 결정립들이 리본의 전 구간에 걸쳐 나타나며, 결정립의 크기는 휠쪽에서 자유표면쪽으로 갈수록 커지고 있다.

일반적으로 PFC법에 의해 제조된 Al-Cu 다결정 리본 내에서 공정조직은  $\alpha$ 상과  $\theta$ 상의 고액계면 전진속도의 차이에 의해 변화한다. Fig.7에서 작은 용융엔트로피값을 갖는  $\alpha$ 상이 더 큰 kinetic coefficient를 갖고, 높은 과냉도에서  $\theta$ 상에 비해서 더 큰 성장속도로 고액

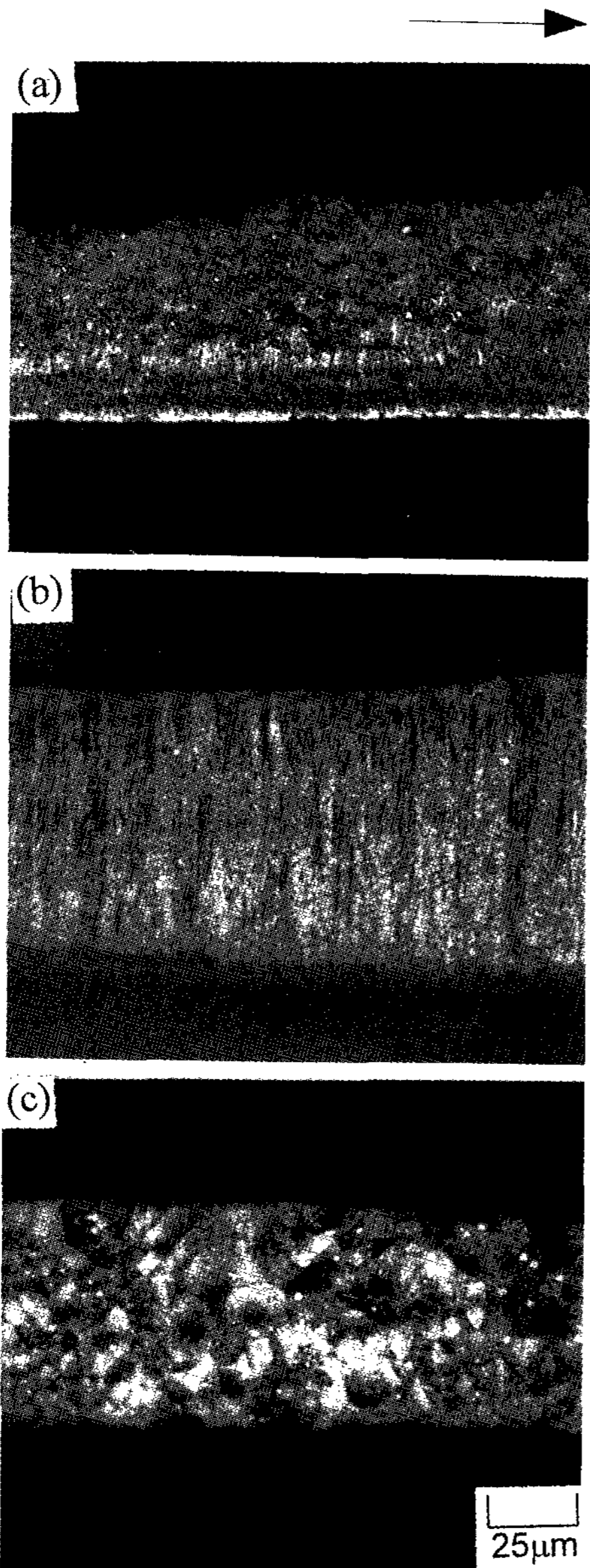


Fig. 6. Variation of the longitudinal morphology of the Al-Cu eutectic ribbon with various wheel conditions; (a) normal wheel, (b) heated wheel, and (c) BN coated wheel.

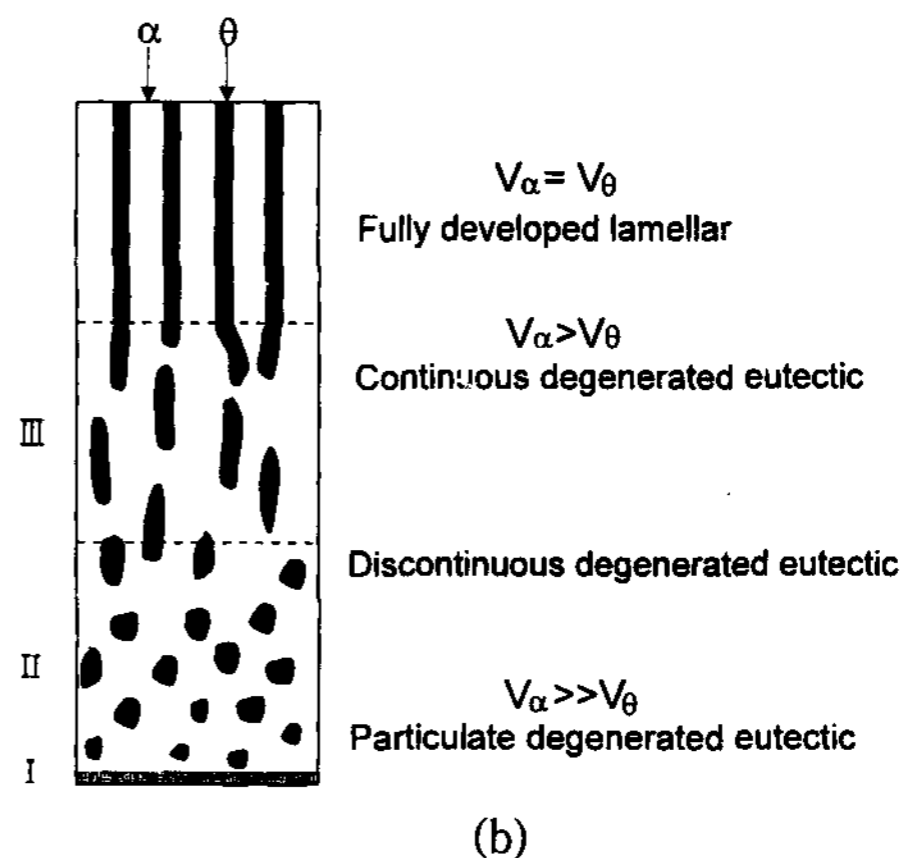
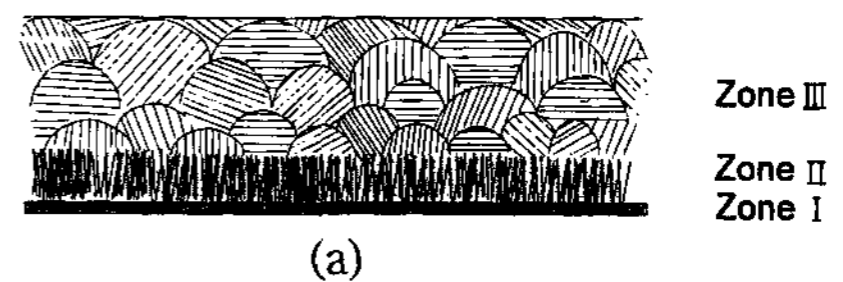


Fig. 7. Schematic illustration of the longitudinal microstructure development of the Al-Cu eutectic; (a) distinguished three zones and (b) transition of eutectic structure.

계면이 전진한다. 휠 근방에서는 큰 과냉도를 갖게 되며, 따라서  $\alpha$ 상과  $\theta$ 상의 성장속도차가 커지게 되어,  $\alpha$ 상이 불연속적으로  $\theta$ 상을 둘러싸는 불연속 degenerated eutectic 조직이 발달하게 된다. 응고가 진행됨에 따라 응고잠열의 방출은 고액계면의 온도를 상승시키며 과냉도가 작아짐에 따라  $\alpha$ 상과  $\theta$ 상의 고액계면 전진속도 차이는 감소하게 되어 연속 degenerated eute-

ctic 조직이 발달하게 되며, 리본의 자유표면에서는 잘 발달된 층상조직(lamellar structure)이 발달하게 된다.

Fig. 8은 SEM으로 관찰한 Al-33.2wt%Cu 공정리본의 자유표면쪽의 미세구조를 나타내고 있다. 일반휠 조건에서는 잘 발달된 층상조직이 나타나고 있으며 국부적으로 표면결함이 나타나고 있다. 휠을 가열한 경우는 잘 발달된 층상조직은 부분적으로 나타나며, degenerated eutectic 조직이 나타나고 있다. 이 때, 일반응고조건에 비해서 표면의 기복이 현저하다. 표면에 BN을 도포하였을 경우에는 일반응고조건에 비해 큰 공정간격을 가지는 층상조직을 갖는 조직이 나타나고 있으며, 일반휠조건이나 가열조건에서 나타나는 표면의 기복현상이 사라지고 자유표면 전체에서 균일한 조직이 나타나고 있다.

Fig. 9에는 Fig. 8의 미세조직에 나타난 공정간격으로부터 평가한 리본 내 고액계면 전진속도와, 리본 내 평균냉각속도를 그래프로 나타내었다. Jones[20]등이 제안한 Al-Cu 공정조성의 공정간격과 고액계면 전진속도에 관한 식

$$\lambda^2 R = 108(\mu\text{m}^3 \text{sec}^{-1}) \quad (3)$$

로부터 고액계면 전진속도를 계산하였으며, 이 때  $\lambda$ 는 공정간격, R은 고액계면 전진속도이다. 로내에서 서냉응고 되었을 때와, 석영관 안에서 응고되었을 때의 속도를 측정하여 고액계면 전진속도와 비교되었다. PFC법에 의해 제조된 리본의 경우 공정간격은 표면의 냉각능이 증가할수록 감소하였으며, BN 피복이 되었을 경우 고액계면 전진속도는 0.8 mm/s 이었으며, 일반계면조건에서는 4.8 mm/s, 가열조건에서는 13 mm/

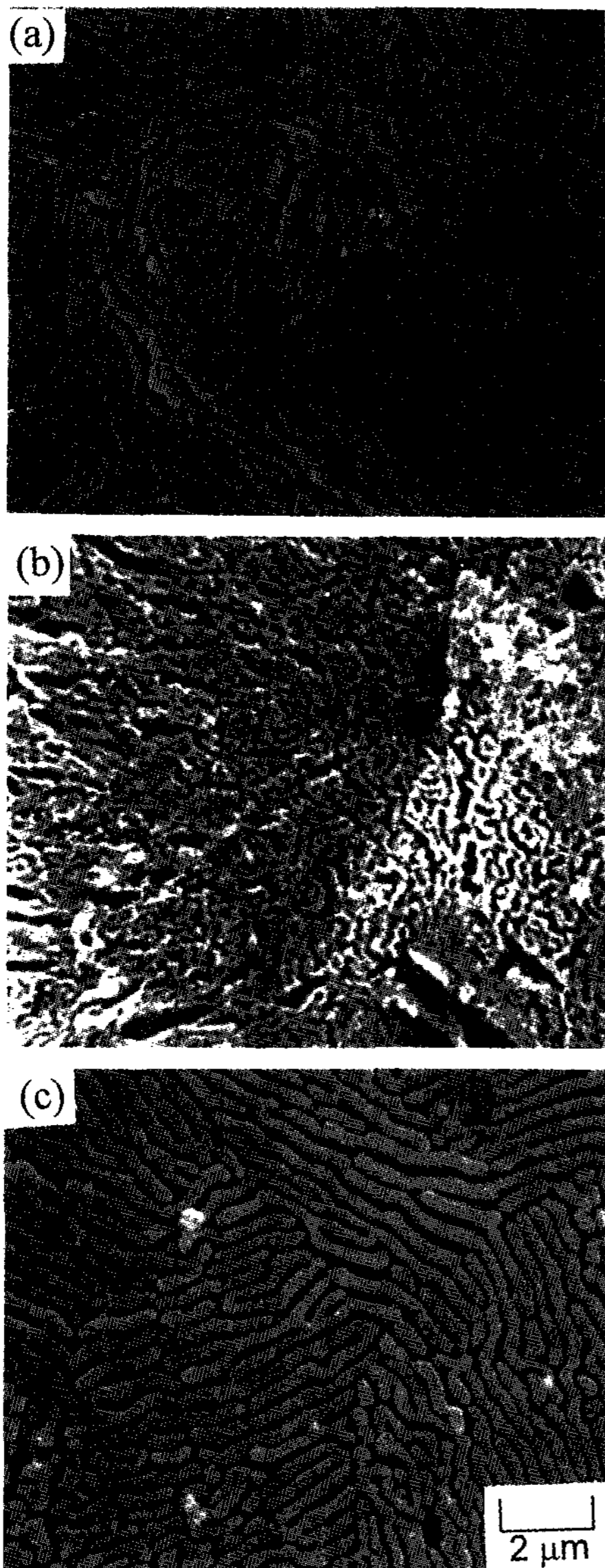


Fig. 8. Microstructures of the air-side surface of the Al-Cu eutectic ribbon under various wheel conditions; (a) normal wheel, (b) heated wheel, and (c) BN coated wheel.

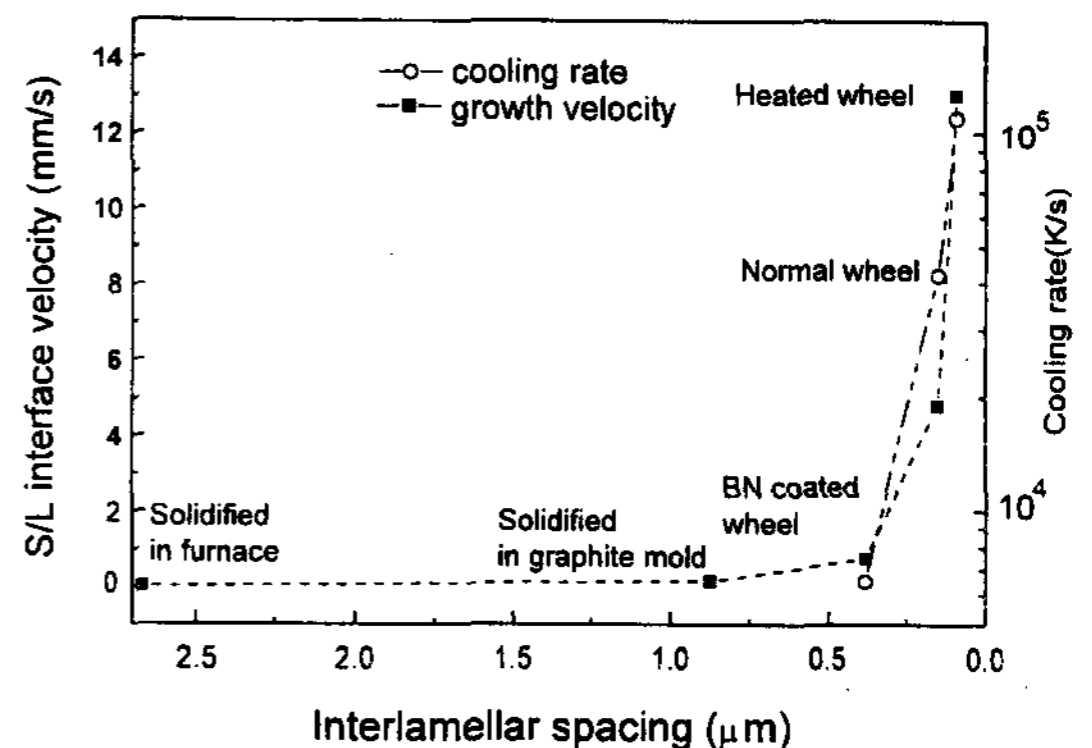


Fig. 9. The effects of wheel surface conditions on growth velocity and cooling rate at the air-side surface of the Al-Cu eutectic ribbon.



s의 고액계면 전진속도가 평가되었다. 박판형태의 리본 내 평균냉각속도는 다음의 식[21]에서 주어진다.

$$\dot{T} = \frac{108L}{cd\lambda^2} \quad (4)$$

이 때, L은 응고잠열(340 kJ/kg)이고, c는 비열(0.71 kJ/kg·K)이며, d는 박판의 두께이다. 이 식은 냉각속

도의 실험적 평가에 대한 측정법으로 많이 사용되며 대략적인 유추값을 얻을 수 있다. 리본내 응고과정이 Newtonian 냉각조건이라는 가정하에서 열전달계수값을 평가하였다. 이 때 사용된 식[22]는

$$h = \frac{\rho LR}{T_F - T_c} \quad (5)$$

이며, 여기서 h는 계면열전달계수, ρ는 밀도( $3.84 \times 10^3 \text{ kgm}^{-3}$ ),  $T_F$ 는 용융금속의 액상선온도,  $T_c$ 는 휠표면의 온도이며, 그 밖의 상수, 변수들은 식(4)와 동일하다. 열전달계수는 BN 도포시  $2.0 \times 10^3 \text{ W/m}^2\text{K}$ , 일반조건의 경우,  $1.2 \times 10^4 \text{ W/m}^2\text{K}$ , 가열조건의 경우  $3.2 \times 10^4 \text{ W/m}^2\text{K}$ 로 증가하였다. Fig. 10에는 Al-33.2wt%Cu 다결정리본의 휠접촉면의 미세조직이 나타나 있다. 일반조건에서 제조된 리본의 휠접촉면에는 공정 cell 구조가 발생하며 cell의 중심부에서 주변부로 갈수록 층상 조직이 불완전해지고 degenerated된 공정조직이 나타나고 있다. 가열하였을 경우 균일한 cell 구조는 사라지며, degenerated된 공정조직들이 리본면 전체에 걸쳐 불규칙하게 분포되어 있다. BN 도포 조건시 리본면에는 거의 완전하게 발달된 유사 층상 조직이 나타났다.

#### 4. 결 론

PFC법으로 Al-4.3wt%Cu 및 공정합금(33.2wt%Cu)의 리본을 가열 휠조건, 일반 휠조건, BN 도포 휠조건에서 제조하였으며 응고거동 및 미세조직 특성에 관한 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 휠표면의 냉각능의 순서는 가열조건, 일반조건, BN 피복 조건으로서 Al-4.3wt%Cu합금의 경우 과포화 주상정에서 세포상/등축수지상으로의 천이가 일어났으며, 주상정분율은 가열조건시 68%, 일반응고시 41%, BN 피복시 피복두께가 얇을 때 23%, 피복두께가 두꺼울 때는 0%로 나타났다.

(2) Al-4.3wt%Cu 리본의 경우 가열조건, 일반조건, BN 피복시 자유표면에서의 냉각속도는 약 105 K/s, 104 K/s, 103 K/s으로 각각 추정되었으며, 휠접촉면에서의 핵생성 밀도는 냉각능 감소에 따라  $10^6/\text{mm}^2$ 에서  $10^4/\text{mm}^2$ 으로 감소하였다.

(3) Al-Cu 공정리본제조시 리본의 미세조직은 휠접촉면으로부터 자유표면방향으로 방향성을 갖는 결정

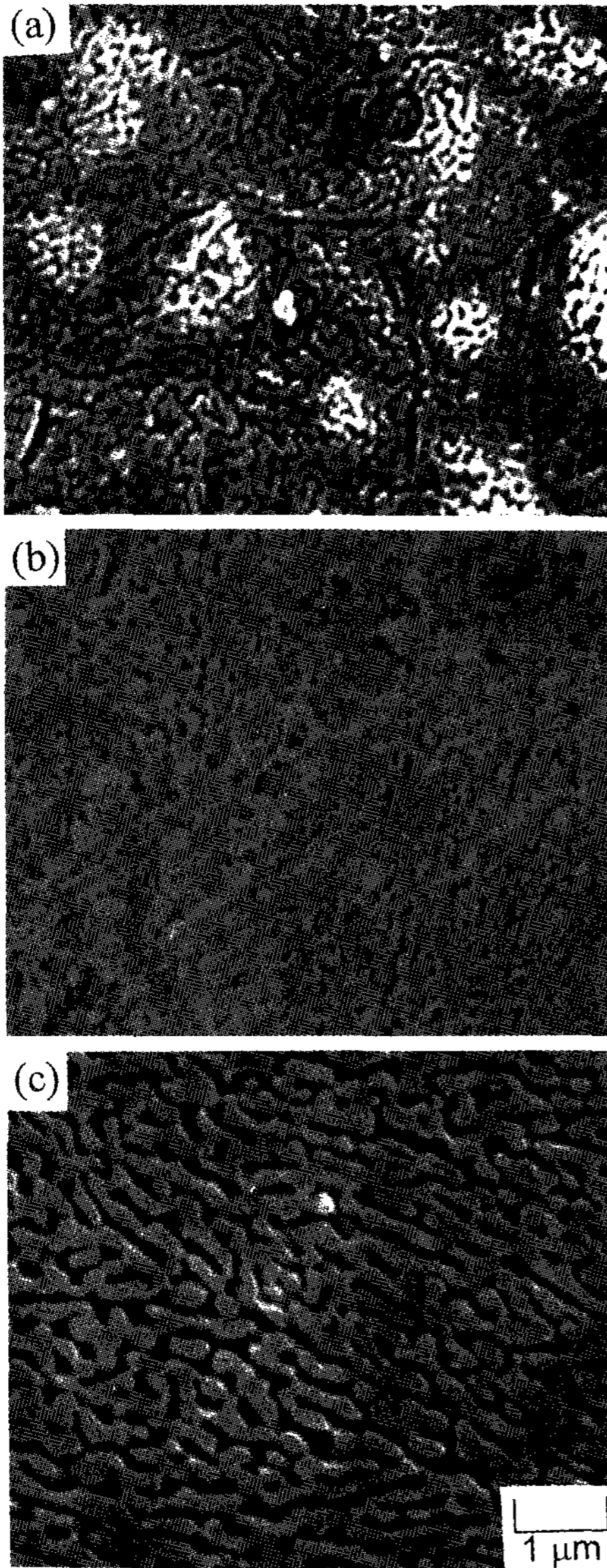


Fig. 10. Microstructures of the wheel-side surface of the Al-Cu eutectic ribbon under various wheel conditions; (a) normal wheel, (b) heated wheel, and (c) BN coated wheel.

립들이 나타나다가, 등축정으로서의 변화가 일어났으며, 고-액계면전진속도 감소에 따라 degenerated eutectic 에서 잘 발달된 층상구조로의 천이가 일어났다. 가열 조건, 일반조건, BN 피복 조건에서 리본의 평균 냉각 속도는 각각  $1.1 \times 10^5$  K/s,  $4.2 \times 10^4$  K/s,  $6.5 \times 10^3$  K/s 정도로 평가되었으며, 용융금속과 휠간의 열전달 계수는 냉각능 감소에 따라 대략  $3.2 \times 10^4$  W/m<sup>2</sup>K에서  $2.0 \times 10^3$  W/m<sup>2</sup>K로 감소하였다.

### 참 고 문 헌

- [1] 한요섭, 이호인: 주조 vol.9, No.1 (1989) 20.
- [2] S. Kavesh: Principles of Fabrication, Metallic Glasses, ASM, Metals Park, Ohio (1978) 36.
- [3] H. Fiedler, H. Muhlbach and G. Stepani: J. of Mat. Sci., 19 (1984) 3229.
- [4] J. Hubert, F. Mollard and B. Lux: Z. Metallk., (1973) 835.
- [5] P. D. Wilde and E. F. Matthys: Mat. Sci. & Eng., 150 (1992) 237.
- [6] 이상목, 명노훈, 홍준표: 대한금속학회지, vol.32 No.10 (1994) 1180.
- [7] 이상목, 홍준표: 주조 vol.15, No.1 (1995) 36.
- [8] 이경구, 이상목, 홍준표: 주조 vol. 15, No. 4 (1995) 112.
- [9] J. Y. Ahn, K. Y. Lee, S. M. Lee and C. P. Hong: Proc. of Conf. on Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes VII, The Minerals, Metals & Materials Society, London (1995) 687.
- [10] 이상목, 홍준표: 대한금속학회지 vol.34, No.11 (1996) 1463.
- [11] 이상목, 홍준표: 대한금속학회지 vol.34, No.8, (1996) 997.
- [12] 日本輕金屬學會, 鑄造凝固部會, vol.38, No.1 (1988) 55.
- [13] H. Matyja, B. C. Giessen and N. J. Grant: J. of Inst. Metals, 96 (1968) 30.
- [14] S. N. Tewari: Metall. Trans.A vol.19, No.7 (1988) 1717.
- [15] D. A. Porter, K. E. Easterling: Phase Transformations in Metals and Alloys, Van Nostrand Reinhold Co. Ltd, UK (1980) 246.
- [16] M. J. Aziz: J. Appl. Phys., vol.53, (1982) 1158.
- [17] P. M. Smith and M. J. Aziz: Acta Metall. Mater., vol.42, No.10 (1994) 3521.
- [18] W. J. Boettinger, S. R. Coriell and R. F. Sekerka: Mater. Sci. Eng., vol.65, (1984) 27.
- [19] L. A. Bendersky and W. J. Boettinger: Int. Conf. on Rapidly Quenched Metals, W rzburg, Federal Republic of Germany, Sept. 3-7, (1984) 217.
- [20] M. J. Burden and H. Jones: J. Inst. Met., 98 (1970) 249.
- [21] M. G. Scott: J. of Mat. Sci., 10 (1975) 270.
- [22] P. Predecki, A. W. Mullendore and N. J. Grant: Trans. Met. Soc. AIME 233 (1965) 1581.