

〈 論 文 〉

## 단로법으로 제조한 AISI 310 스테인레스강의 급냉 조직에 관한 연구

최재현 · 오명석\* · 조성석\*\* · 이용호

홍익대학교 공과대학 금속·재료공학과

\* 인천 제철기술연구소

\*\* 충남대학교 공과대학 금속공학과

A Study on the Microstructure of Melt-Quenched AISI 310 Stainless Steel.

J. H. Choi, M. S. Oh\*, S. S. J\*\*, Y. H. Lee

Department of Metallurgical · Materials Science Engineering, Hong Ik Univ.

\* Technical Research Center, Incheon Iron & Steel Co., Ltd, Incheon, 401-040

\*\* Department of Metallurgical Engineering, Chung Nam National Univ.

### ABSTRACT

Melt-quenching of steels leads to various metallographic effects such as refinement of grain size, extension of the solid solubility of carbon and alloying elements, and is expected to improve the mechanical properties of conventional steels. Furthermore, this technique is a useful method for producing sheet directly from liquid state. And it will lend itself to development as a continuous cast process which offers significant savings in energy and product costs. The purpose of this study is to present the microstructures of melt-quenched austenitic stainless steels. As the results of this study, the morphology of melt-quenched microstructure show that the roll contact area is columnar structure, and the free surface area is dendrite structure. As the line speed increases, the ratio of  $d_{\text{columnar}}/d_{\text{total}}$  increases from 0.12 to 0.60, but the ribbon thickness decreases from  $150\mu\text{m}$  to  $30\mu\text{m}$ .

### 1. 서 론

높은 강도와 우수한 내식성으로 인하여 오스테나이트 스테인레스 판재는 원자로 냉각용 파이프에서부터 주방용 식기에 이르기까지 용도가 다양하다. 이들 판

재 제조는 용탕을 액상에서 용해한 후 ingot 형태로 응고시킨 뒤 수차례의 고온 압연, 냉연 등의 소성가공을 거쳐 생산하고 있다. 이와 같이 스테인레스 판재를 사용 가능한 두께까지 제조하기 위해서는 여러 단계의 고온 공정을 적용해야 함으로 많은 에너지 사용을

필요로 하고 생산 원가가 상승하는 것을 피할 수가 없다. 따라서 이들 판재 제조시 고온 가공 공정과 소성 가공 공정의 일부 혹은 전부를 생략함으로써 설비투자를 줄이고 생산원가를 절감하려는 연구가 많이 진행되었다. 이러한 연구 방법 중 용융상태에서 냉각매체를 이용하여 직접 최종 제품 두께에 가까운 스테인레스 판재를 제조하려는 급속 응고법이 새로운 주조 기술로 개발 연구되었다<sup>1-3)</sup>. 급속 응고법으로 제조한 재료는 일반적으로 입계가 미세하며, 용질의 고용환을 넓힐 수가 있는 것으로 알려지고 있다. 이때 급냉시 사용하는 냉각 매체로는 물, 가스 등을 사용하는 방법이 있는가 하면 본 연구에서 사용한 것과 같이 냉각매체로 단률을 사용하는 방법이 있다<sup>4-6)</sup>. 이때 회전하는 물재질, 물의 선속도, 분사압력, 분사거리에 따라서 액상에서 고상으로 응고한 조직은 매우 다양하게 나타나며 이들 변수들 중에서도 물 선속도가 미치는 영향은 매우 큰 것으로 알려지고 있다<sup>7-8)</sup>. 따라서 본 연구에서는 냉각 속도가  $10^5\text{K/s}$ 에 이르는 단률 장치를 이용하여 물의 선속도가 AISI 310 스테인레스 스트립 미세 조직에 미치는 영향에 대하여 연구하고 이들 재료를 열처리하여 조직변화를 관찰하였다.

## 2. 실험방법

Fig. 1은 본 실험에서 사용한 급속 응고 장치로서 AISI 310 스테인레스강 10g을  $\phi 10\text{mm}$  석영관에 넣고 Ar 분위기하에 전기로에서 액상선 근처까지 용해한 후 분사 압력  $1.2\text{kg/cm}^2$ , 물의 선속도는  $9.6\text{m/sec}$ 에서  $20.1\text{m/sec}$ 까지 변화시켜 제조하였다. 이렇게 하여 제조한 스테인레스강 스트립은 길이  $300\text{mm}$ , 폭  $5\sim 10\text{mm}$ 이고, 두께는  $30\sim 150\mu\text{m}$ 이었다.

광학 현미경을 이용하여 급속 응고된 스테인레스강 스트립의 조직을 관찰하였으며, 냉각시 물 접촉부와 자유 표면에 생성된 상분석은 X-선 회절 장치를 이용하였다. 제조한 스트립은 매우 빠른 속도로 응고함으로 준안정상이 존재하기 때문에 준안정상과 결정 구조를 분석하기 위하여 투과 전자 현미경을 이용하였

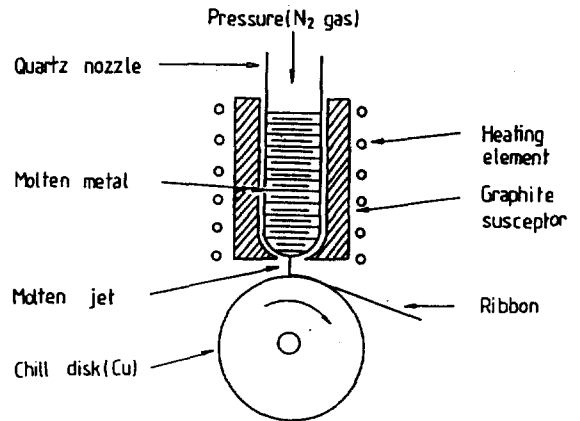


Fig. 1. Schematic diagram of melt-quenched technique.

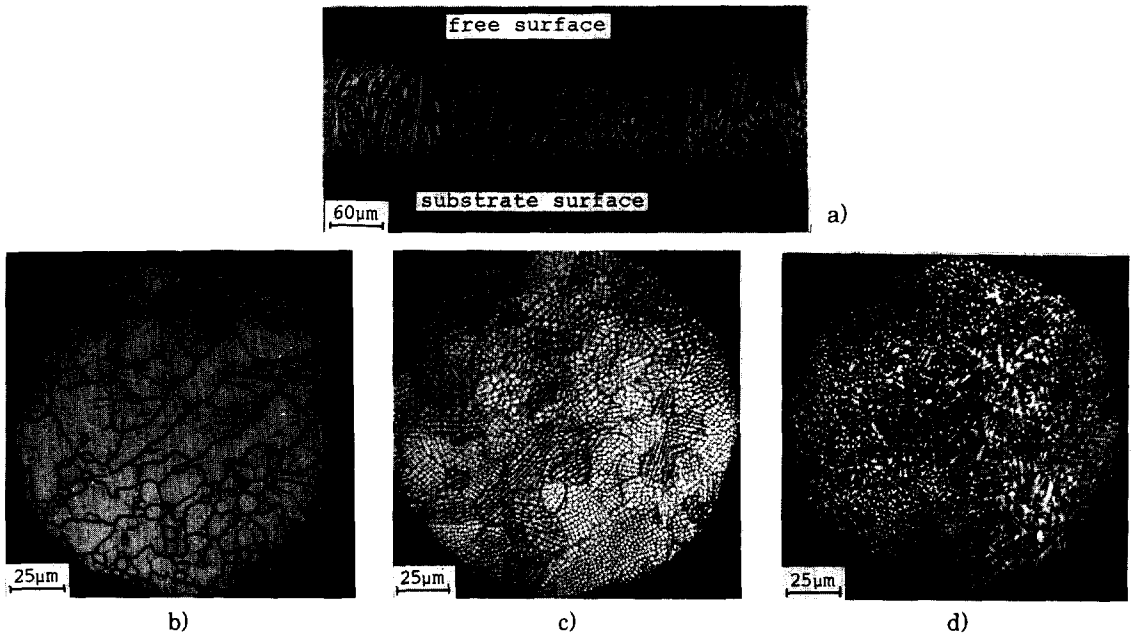
다. 또한 급속응고된 조직은 단상 영역인  $1050^\circ\text{C}$ 에서 5min간 유지한 후 수냉하여 열처리 영향을 살펴 보았다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 물의 선속도에 따른 급속 응고 조직의 변화

Photo 1 a)는 분사 압력, 분사 각도 등을 고정한 후 선속도  $9.6\text{m/sec}$ 에서 제조한 AISI 310 스테인레스강의 응고조직으로 물 접촉부로부터 공기 접촉부를 향하여 planar  $\rightarrow$  columnar  $\rightarrow$  dendrite 순서로 응고 조직이 형성되어 있는 것을 관찰할 수가 있다.

Photo 1 b)는 제조한 스트립 중 물 표면과 직접 접촉한 부분을 관찰한 것으로, 냉각 매체인 copper 휠에 충돌시 물 접촉부위를 통하여 외부로 응고 잠열이 빠르게 소멸됨으로 냉각 속도에 따라 접촉부위에는 약  $600\mu\text{m}$  간격으로 형성된 반동심형의 band structure 구조가 형성되어 있으며 이들 band 구조 중 최대  $10\mu\text{m}$  이하의 두께로 표면 방향으로 성장한 planar 응고 조직을 보여 주고 있다. Photo 1 c)는 스트립의 중간부분으로 약  $30\mu\text{m}$  domine내에 columnar 형태 응고를 보여 주고 있으며, 상대적으로 냉각 속도가 가장 느린



**Photo 1.** Optical micrographs of melt-spun AISI 310 stainless steel at 9.6m/sec.  
 (a)longitudinal section (b)substrate surface (c)center surface (d)free surface.

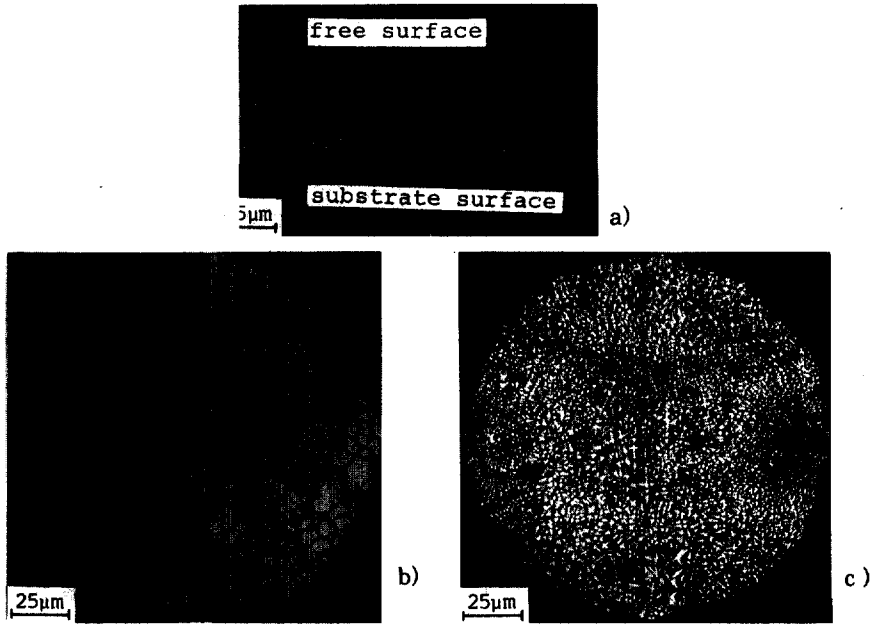
자유 표면부근 Photo 1 d)에서는 dendrite 응고를 볼 수가 있다. 이들 각부위의 조직을 좀 더 자세히 살펴보면 물 표면과 직접 접촉하는 Photo 1 b)의 planar 영역은 약 평균 입계 크기가 약  $18\mu\text{m}$  정도로 미세한 것을 볼 수가 있으며 전체 스트립의 두께  $140\mu\text{m}$  중 최대 약  $20\mu\text{m}$  정도까지 성장한 것을 볼 수가 있다.

이와 같이 동일 시료내에서 냉각 속도에 따라 응고 조직이 다르게 나타나는 것은 온도구배(G)와 응고 속도(R)에 관련된 것으로 생각한다. 즉 물 접촉부는 용융 상태에서 냉각 매체인 wheel에 직접 접촉함으로써 온도구배는 급격하나 반면에 상대적으로 응고 속도가 작음으로 planar 형태의 응고 조직이 형성되었고, 공기 접촉부에서는 응고 속도가 크고 상대적으로 온도 구배가 낮아 dendrite 형태의 응고 조직이 발달되었으며, 중심부는 응고 속도와 온도구배의 크기가 서로 비슷하여 columnar 조직이 형성된 것으로 생각된다. 이것은 급속 응고시 G/R 값이 클 경우에는 계

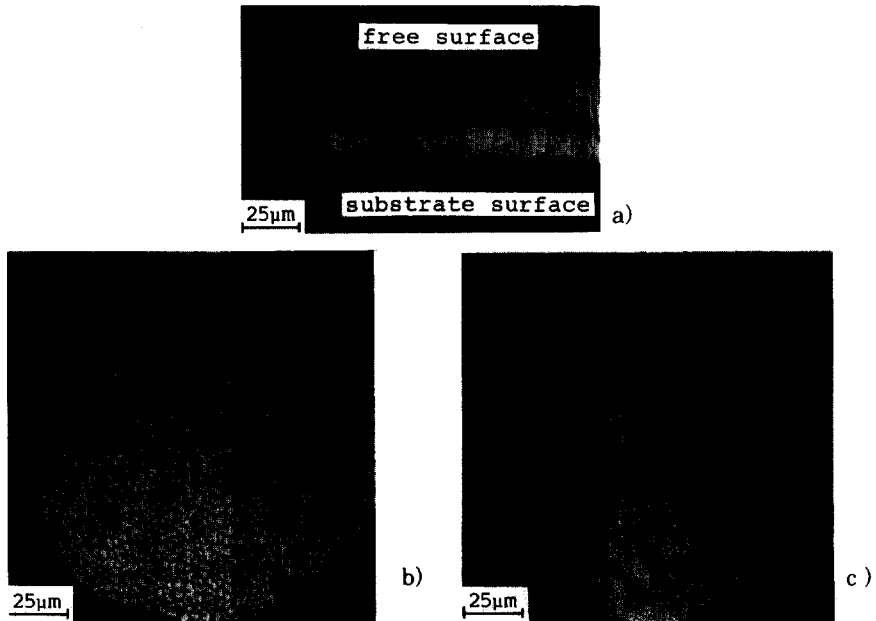
면 안정성이 커져 planar조직이 되며 G/R 값이 작아짐에 따라 계면 안정성이 감소되어 columnar, dendrite의 형태로 응고 조직이 형성된다는 이론과 잘 일치하고 있다<sup>9)</sup>.

Photo 2, 3, 4는 물 선속도를 12.6m/sec, 16.8m/sec, 20.1m/sec로 증가시키면서 제조한 AISI 310 스테인레스 스트립의 응고 조직이다. 역시 응고 양상은 모두 물 접촉부로부터 공기 접촉부를 향해 planar → columnar → dendrite 형태로 발달해 있으나, 물의 선속도가 증가함에 따라 스트립 총두께 중 온도 구배가 급격한 경우에 나타나는 planar 응고 영역의 비가 증가하고 있음을 알 수 있다.

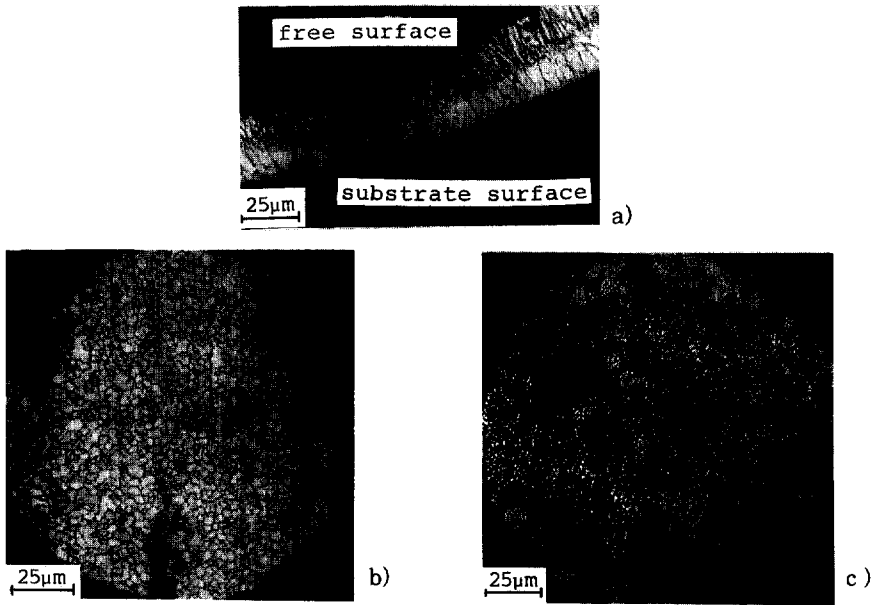
또한 물의 선속도가 증가함에 따라 planar 영역의 결정립과 dendrite의 간격이 작아짐을 알 수 있다. 이는 물의 선속도가 증가함에 따라 열전달 계수(h)가 증가해 열구배에 의해 지배되는 영역이 증가하며 핵 생성 자리가 증가한 것에 기인된다고 생각한다.



**Photo 2.** Optical micrographs of melt-spun AISI 310 stainless steel at 12.6m/sec.  
(a) longitudinal section (b) substrate surface (c) free surface.



**Photo 3.** Optical micrographs of melt-spun AISI 310 stainless steel at 16.8m/sec.  
(a) longitudinal section (b) substrate surface (c) free surface.



**Photo 4.** Optical micrographs of melt-spun AISI 310 stainless steel at 20.1m/sec.  
 (a) longitudinal section (b) substrate surface (c) free surface.

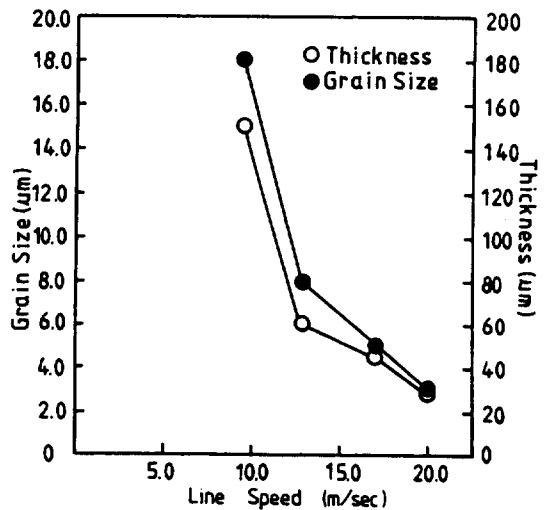
Table 1에 물의 선속도에 따른 시료의 두께변화와 전체 시료두께에 대한 planar영역의 비를 나타내었다.

**Table 1.** Experimental data line speed and thickness resulting in the variation of components of phases between columnar and dendrite in AISI 310 stainless steel.

Line speed (m/sec)	Ribbon thickness ( $\mu m$ )	$D_{columnar}/D_{total}$
9.6	150	0.12
12.6	60	0.27
16.8	45	0.44
20.1	30	0.60

Fig. 2는 선속도에 따라서 급냉 응고된 planar 조직의 결정립도 변화를 나타낸 것이다. 그 결과 물의 선속도가 9.6m/s에서 20.1m/s로 증가함에 따라서 결정립은 18 $\mu m$ 에서 3 $\mu m$  정도로 감소하였고, 두께도 150 $\mu m$ 에서 30 $\mu m$  정도로 감소하였다. 두께와 결정립도가 같은

형태로 감소하고 있다. 이것으로 단물 급속응고법에서 선속도가 증가할수록 스트립의 두께는 감소하고 조직은 매우 미세하게 응고한다는 것을 알 수 있다.



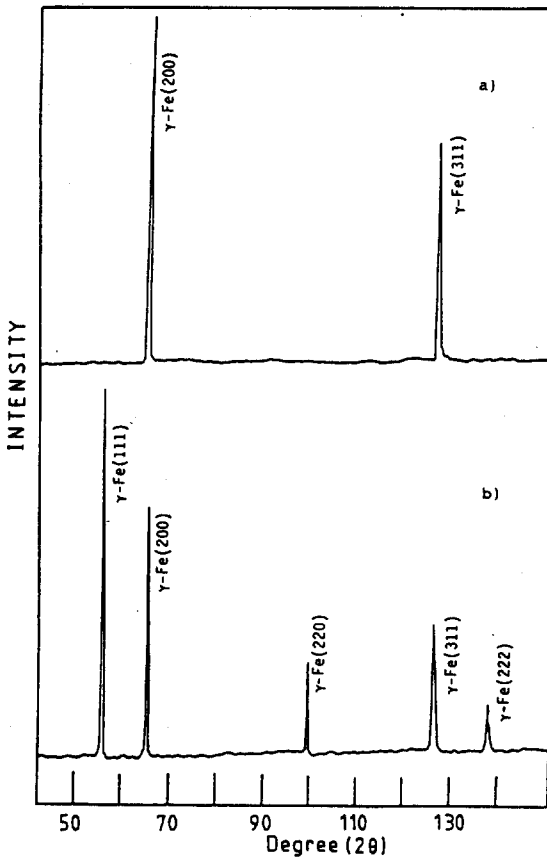
**Fig. 2.** Changes of grain size and thickness with line speed in melt-spun AISI 310 stainless steel

### 3.2 X-ray 회절 분석

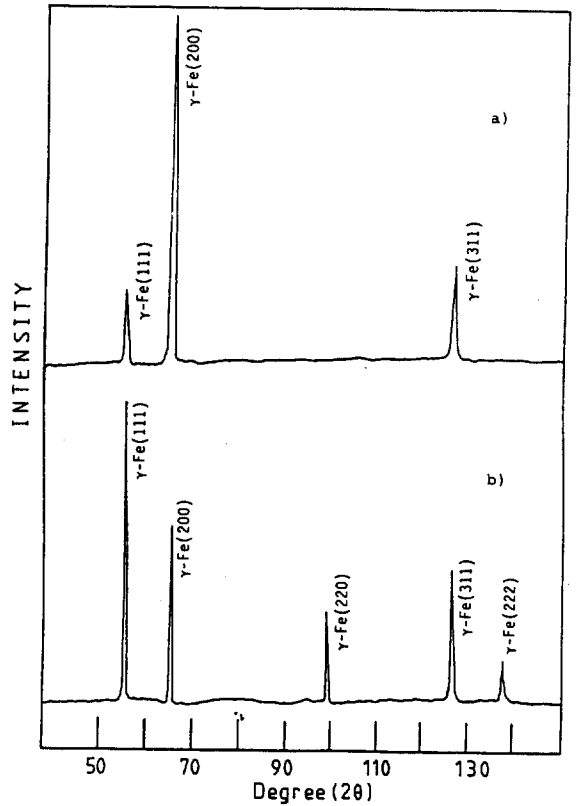
광학 현미경 분석 결과 wheel과 직접 부딪치는 물 접촉부위와 자유 표면의 응고 조직이 다름으로 우선 성장면을 분석하기 위하여 X-ray 회절기를 이용하였다. Fig. 3은 물의 선속도가 9.6m/sec의 경우 물 planar 응고부위는 물 접촉부에서는 5개 면의 오스테나이트 peak가 나타났으나 공기 접촉부에서는 (200), (311) 면만이 나타났음을 알 수 있다. 이는 물의 접촉부에서는 매우 random한 방향 및 면으로 응고가 진행되었으나 공기 접촉부의 dendrite 구조에서는 우선 성장면인 (200)으로의 성장이 발생했기

때문으로 생각한다.

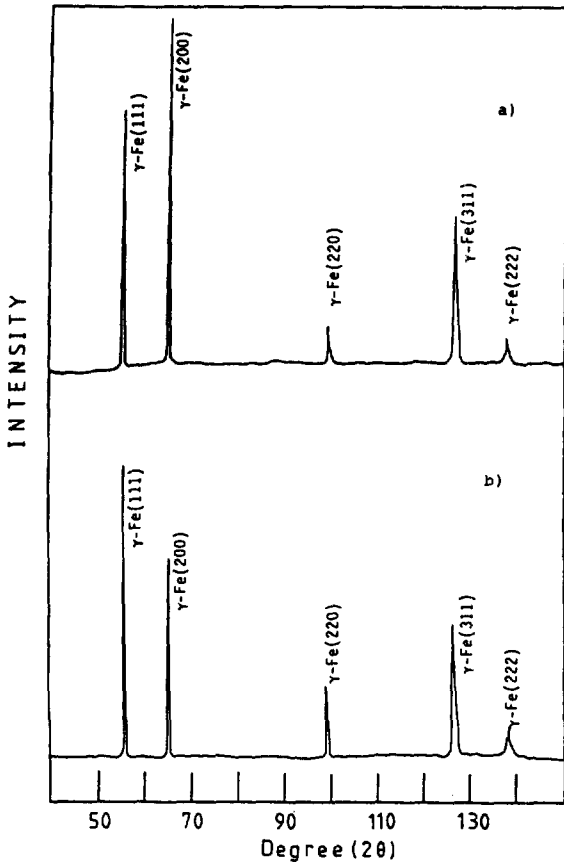
Fig. 4는 선속도가 12.6m/sec의 경우로 자유 표면부와 물 접촉부는 물 선속도가 9.6m/sec와 유사하게 나타났으나 자유표면 부분에서는 오스테나이트(111)면의 peak가 새롭게 나타나기 시작하였으며 이 (111)면 peak는 선속도가 증가함에 따라 크게 성장하는 것을 볼 수가 있다. 선속도가 16.8m/sec 와 20.1m/sec인 Fig. 5, 6에서는 물 접촉부와 자유 표면이 모두 동일한 면이 나타났지만 물 접촉부보다 자유접촉면의 (200)면 peak의 강도가 큰 것을 알 수 있다.



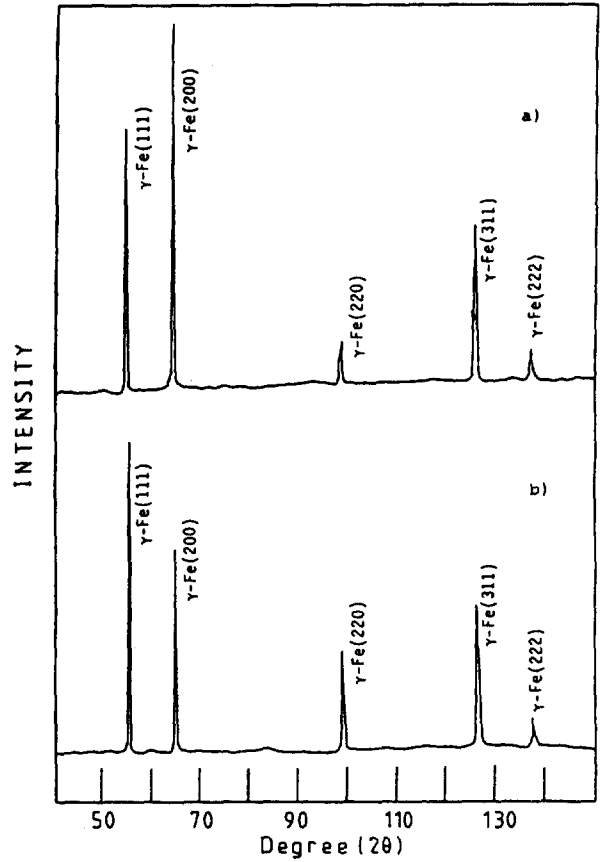
**Fig. 3.** X-ray diffraction patterns of AISI 310 stainless steel melt-spun at 9.6m/sec (a) free surface (b) substrate surface.



**Fig. 4.** X-ray diffraction patterns of AISI 310 stainless steel melt-spun at 12.6m/sec (a) free surface (b) substrate surface.



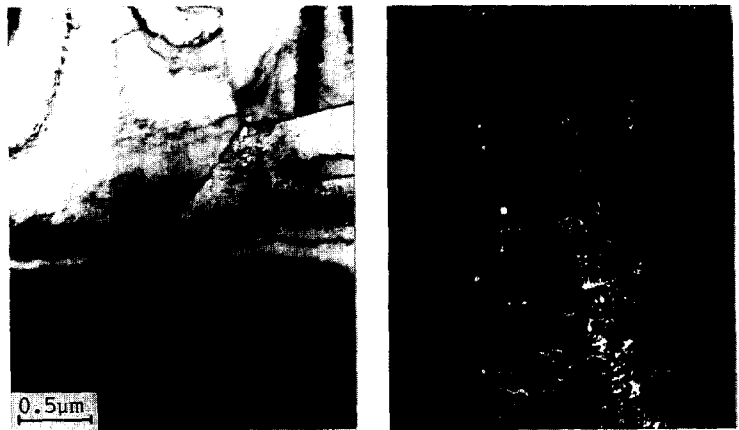
**Fig. 5.** X-ray diffraction patterns of AISI 310 stainless steel melt-spun at 16.8m/sec (a) free surface (b) substrate surface.



**Fig. 6.** X-ray diffraction patterns of AISI 310 stainless steel melt-spun at 20.1m/sec (a) free surface (b) substrate surface.

### 3.3 TEM 관찰

Photo 5는 X-선 회절 시험 결과 급속 응고된 스트립 상은 단상의 오스테나이트로서 나타났고 이들 스트립을 고배율의 투과 전자 현미경을 이용해 상분석한 결과이다. TEM 분석과 패턴 분석 결과 다른 준안정상은 보이지 않고 오스테나이트 단상만이 분석되어 X-선 회절시험의 결과치와 일치함을 밝혔다.



**Photo 5.** Transmission electron micrographs of melt-spinning AISI 310 stainless steel (a) bright field (b) matrix diffraction pattern

### 3.4 열처리에 따른 상변화

Photo 6은 급속응고한 AISI 310 스테인레스강을 1050℃에서 5분간 유지한 후 급냉한 스트립의 조직사진이다. 급속 응고시 냉각 속도에 따라 wheel 접촉부분에서 자유 표면으로 형성된 plannar→columnar→dendrite순으로 존재하던 조직은 열처리시간이 짧음에도 불구하고 25 $\mu\text{m}$  이상의 오스테나이트 입계와 폭 2~10 $\mu\text{m}$  이하, 길이 2~25 $\mu\text{m}$  이하의 쌍정으로 상변태된 것을 관찰할 수가 있다.

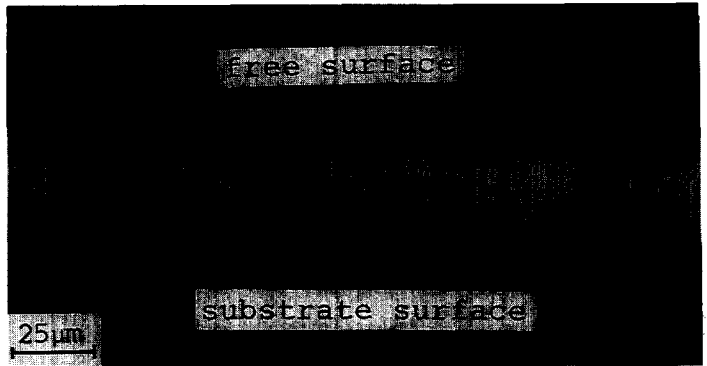


Photo 6. Optical micrograph of heat-treated AISI 310 stainless steel 1050℃×5min → W.Q.

### 4. 결론

1. 선속도가 9.5m/sec에서 20.1m/sec로 증가함에 따라 두께는 150 $\mu\text{m}$ 에서 30 $\mu\text{m}$ 로 감소하였다.
2. 선속도가 9.6m/sec에서 20.1m/sec로 증가함에 따라  $d_{\text{columnar}}/d_{\text{total}}$ 은 0.12에서 0.60으로 증가하였다
3. 선속도가 증가함에 따라 용고양상은 롤 접촉부에서 공기 접촉부를 향해 주상정에서 수지상정으로의 천이가 발생하였다.
4. 롤의 선속도가 증가됨에 따라 롤 접촉부의 주상정 및 공기 접촉부의 수지상정이 미세화되었다.
5. X-ray 분석 결과 롤 및 공기 접촉부 모두 오스테나이트상 만이 분석되었으나 공기 접촉부에서는 (200)면의 우선성장이 확인되었다.

### 참고 문헌

1. T. Kusakawa : Trans. ISIJ, 26 (1986) B 123
2. R. Amehrabian : International Metals Reviews, 27 (1982) 185
3. L.E. Collins : Canadian Metall. Quarterly, 25 (1986) 59
4. P. Duwez : Metallic Glasses, American Society for Metals (1976)는
5. H.S. Chen and E. Coleman : Scripta Met., 9 (1975) 787
6. T.T. Burch and J.I. Budnick : Phys. Rev. Lett., 33 (1974) 421
7. S.J. Savage and F.H. Froes : J. of Metals, (1984) 20
8. S.M. Pimpatkar, R.S. Carbonara and A.H. Clauer : Proc. 5th Int. Conf. on Rapidly Quenched Metals, Wurzburg, (1985) 95
9. J.E. Flinn : Rapid solidification technology for reduced consumption of strategic materials, Noyes Pub., New Jersey, (1985) 45