

|||||  
**論 文**  
 |||||

## 급냉응고법에 의한 금속 섬유제조에 관한 연구

白南益, 許聖康, 羅亨用\*

### A Study on the Fabrication of Metal Fiber by Rapid Solidification Process

Nam-Ik Baik, Sung-Kang Hur, Hyung-Yong Ra\*

#### Abstract

Metal fibers of Al and stainless steel were fabricated by the PDME method and the Taylor process. Tensile strength of metal fiber produced by both the PDME method and the Taylor process was much higher than that of conventionally solidified materials. Utilizing the PDME method, Al fiber with 100  $\mu$ m was fabricated under Ar gas atmosphere, and stainless steel fiber with 50  $\mu$ m was fabricated under 0.06 Torr vacuum. Continuous fiber of stainless steel was made by the Taylor process and the surface of this fiber was smother than that fabricated by the PDME method.

### 1. 서 론

현재 금속섬유는 전자파 차폐용, 정전기 방지용, 콘크리트 강화용<sup>1)</sup> 및 복합재 강화용으로 쓰이며 군사용으로는 레이다 교란용<sup>2)</sup>, 의학 및 음료용으로는 micro filter 등으로 용도가 증가일로에 있다.

이러한 금속섬유를 오늘날 공업적으로 생산할 수 있는 방법에는 기계적 인발에 의한 bundle drawing법<sup>3,4)</sup>과 multipass drawing법 등이 있다. 그러나 최근에 초급냉법에 의한 금속섬유 제조에 관한 연구가 부분적으로 진행되고 있으며, 현재까지 공업적으로 생산할 수 있는 규모는 거의 없고 일부 특수분야와 연구용으로 제조하고 있을 뿐이다.

따라서 본 연구에서는 이와같은 금속섬유의 용도가 다양화 되어가는 추세에 맞추어 금속섬유의 개발에 주안점을 두고 급냉법을 이용하여 극세선 금속섬유의 제조를 시도하였다. 먼저 PDME(pendant drop melt extraction)법 및 Taylor process 장치를 설계 및 제작하였고, 극세선의 제조 조건을 조사 하였으며 이를 토대로 금속섬유 제조를 위한 문제점을 고찰하였다. 그리고 제조된 금속섬유의 기계적 특성을 조사하고 사용가능성을 예측하였다.

한국과학기술연구원(Special alloy lab., KIST)

\*서울대학교 공과대학(Dept. of Metallur. Eng., SNU)

### 2. 실험 방법

본실험에 사용된 Al은 상업용 고순도 Al이었으며, 스텐레스강은 STS 304와 STS 316, 그리고 철은 상업용 연철을 사용하였다. 모든 시료는 지름이 5-10mm, 길이 50cm정도인 rod를 사용하였다.

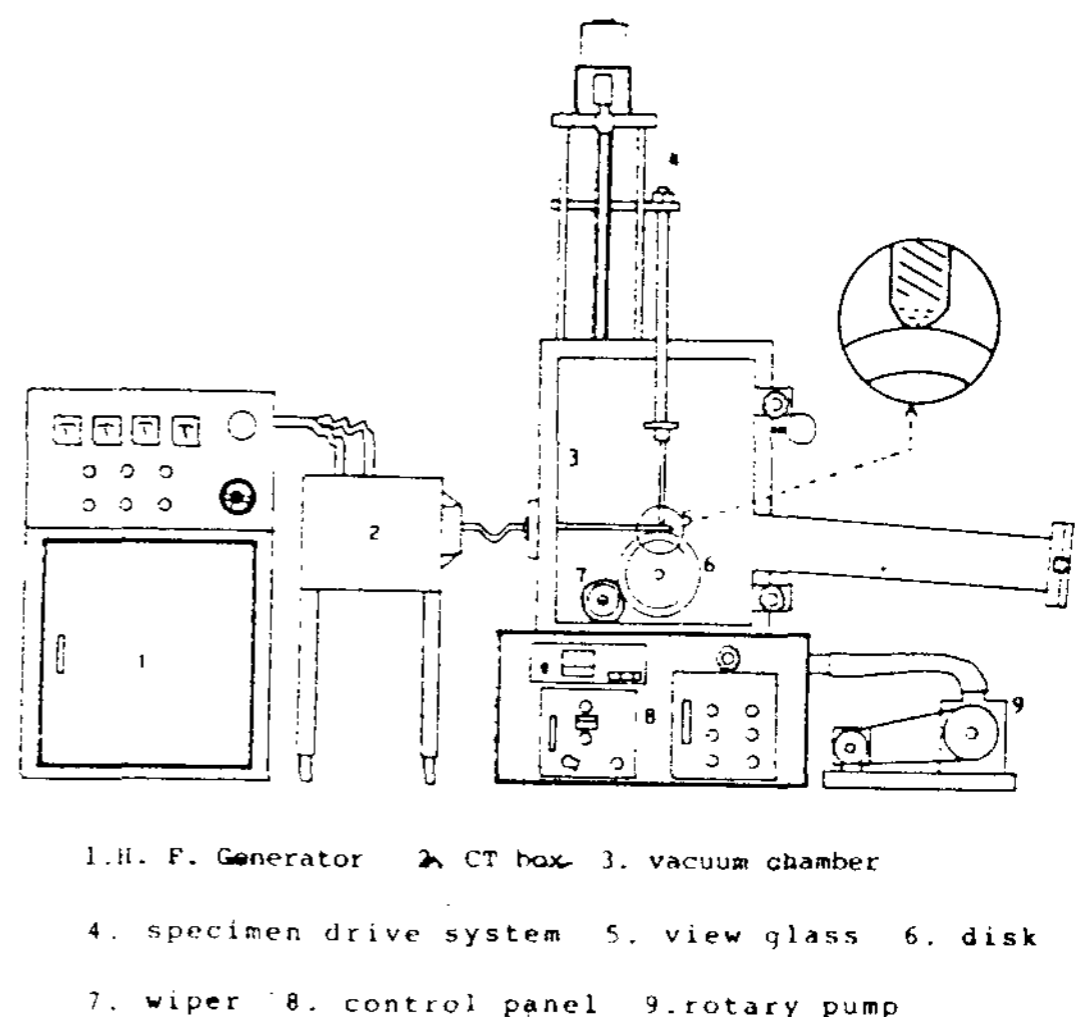
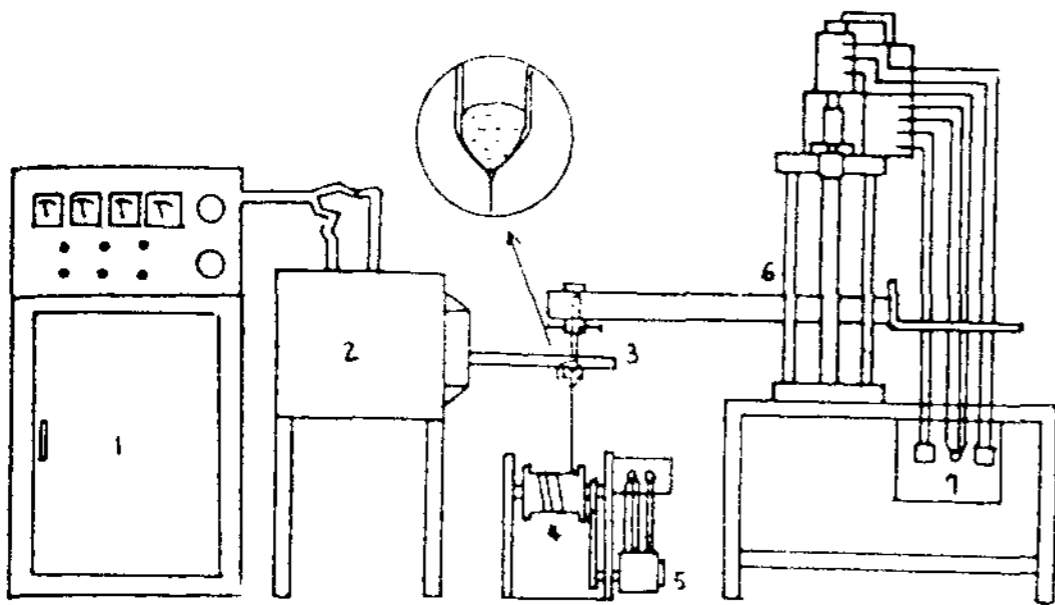


Fig. 1 Schematic diagram of fabricating metal fiber by the PDME method

PDME 실험장치는 Fig. 1과 같이 가열부, 냉각부, disk와 wiper, 시료공급장치 및 진공 chamber로 구성되어 있다. 열원으로는 용량이 10KW이고 400KHz의 고주파 generator를 사용하였으며, 사용상의 안정성과 진공상태에서 방전현상을 방지하기 위하여 CT(current transformer)를 설치하였다. Extraction disk는 열전도성이 좋은 순동을 단조해서 지름이 300mm인 disk를 기계가공 하였으며, disk의 edge각을 90°, 60° 및 45°로 가공하였다. 또 시료공급부는 rod를 상하방향으로 최고 35mm/min의 이동속도로 조정 가능하도록 설치 하였으며 진공 상태는 0.02torr 정도로 조정하였다.

그리고 Taylor process를 이용하여 금속섬유를 제조하는 경우, 열원은 고주파 generator를 그대로 이용하였고 분위기를 조정할 필요가 없었다.



1. H.F. generator 2. C.T. box 3. work coil 4. spindle  
5. torque motor 6. specimen moving device 7. motor control part

Fig. 2 Schematic diagram of fabricating metal fiber by the Talor process

Fig. 2에 이 제조장치를 나타내었다.

이 장치에서 가장 중요한 부분은 work 코일이며 코일디자인은 여러번의 시행착오를 거쳐 제작하였다. 즉 PDME 장치의 특성상 시료의 끝부분만을 짧은 시간내에 용해시켜 연속적으로 용융금속을 공급해 주어야 하기 때문에 이에 따른 최적조건을 실험한 결과 work coil의 경우 3-4turn에서 효율이 우수하였다. 따라서 본 실험에서는 내경이 1/4"인 구리파이프를 3turn하여 사용하였는데, 코일을 감은 상태에서 안쪽 지름이 18mm이었고, 코일의 높이는 16mm이었다. 그리고 극세선의 인장 시험을 하기 위해서는 종이에 시료를 붙여 인장시험기에 장착하고 종이를 오려낸 후 인장시험하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3. 1. PDME법에 의한 금속섬유 제조조건

대기중에서 시료를 용해하면 시료 표면부에 많은 scale이 형성된다. 따라서 이를 방지하기 위하여 Fig. 3과 같이 work코일과 시료 사이에 Ar가스를 통과시키면서 용해하였다. Table 1에 금속섬유 제조조건을 표시하였다.

Table 1의 결과를 보면 스텐레스강과 연철의 경우 지름 40 $\mu$ m의 불연속 섬유 제조가 가능했고, 알루미늄은 지름이 100 $\mu$ m의 연속섬유의 제조가 가능하였다.

연속적인 스텐레스강 섬유를 제조하기 위해서는

Table 1. Results of metal fiber fabricated by the PDME process under air atmosphere

specimen	STS 304( $\phi$ 6)	STS 304( $\phi$ 10)	STS 316( $\phi$ 10)	mild steel( $\phi$ 8.5)	Al( $\phi$ 10)
density	8.0	8.0	8.0	7.86	2.7
melting point	1425°C	1425°C	1370~1400°C	1530°C	660°C
feeding rate (mm/min)	6.0-8.0	6.0-8.0	6.0-8.0	7.0-10.0	14.0-21.0
RPM of disk	400	400	400	450	450-600
morphology of melting part	slag form at the surface	slag form at the surface	slag form at the surface	rounding form at the surface	oxide film form at the surface
shape and size of product	C, D shape dia. 40 $\mu$ m length 10cm	C, D shape dia. 40 $\mu$ m length 10cm	C, D shape dia. 40 $\mu$ m length 10cm	C, D shape dia. 40 $\mu$ m length 10cm	round shpe dia. 100 $\mu$ m continuous
induction heating response	a little short time	a little short time	a little short time	short time	a little long time

\*coil used : 3turn coil, 2turn coil in case of mild steel

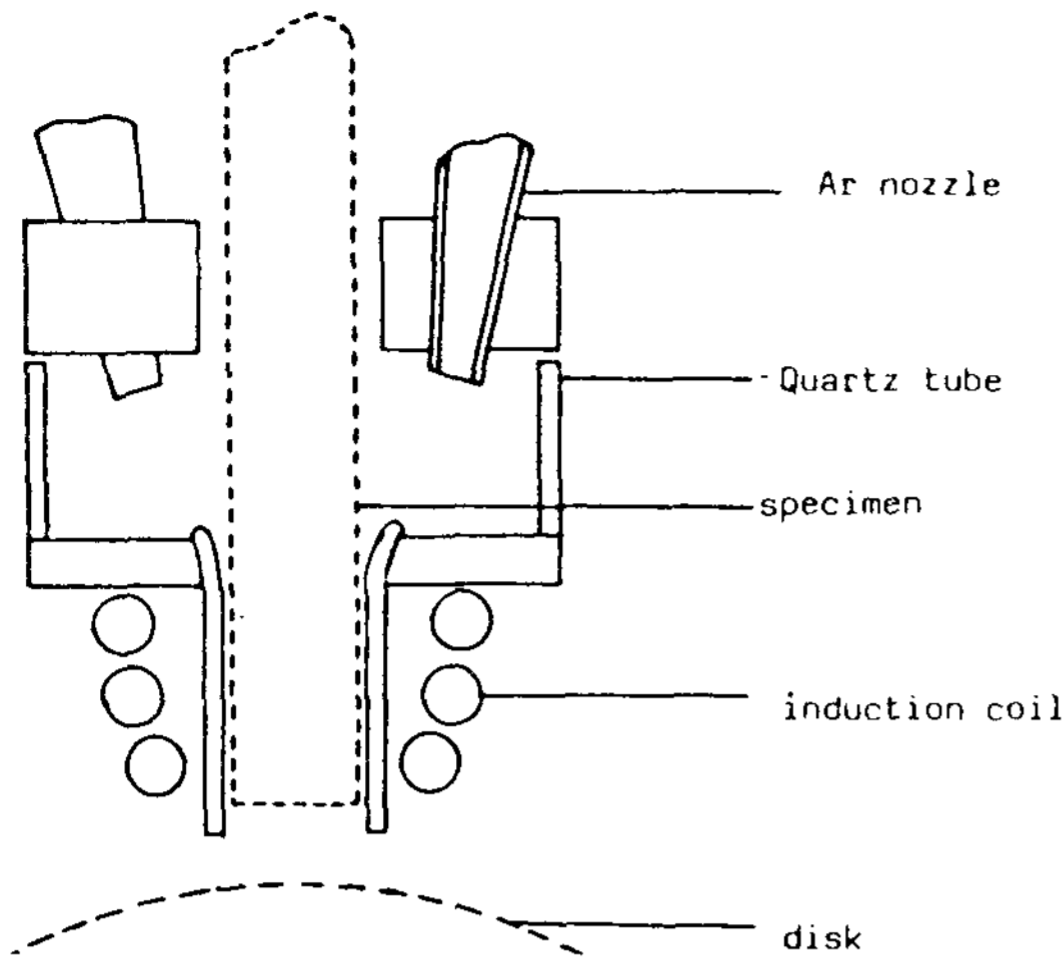


Fig. 3 Apparatus for maintaining Ar atmosphere

진공분위기를 만들어 주는 것이 필요했는데, 제조 조건은 진공도가 0.06Torr 이하이고 disk의 회전수가 450-550rpm이었다.

3. 2. PDME법으로 제조한 금속섬유의 인장강도

대기중에서 제조한 알루미늄 섬유의 인장시험결과를 Table 2에 나타내었다.

Table 2의 인장시험 결과를 살펴보면 Al fiber의 지름이 작아질수록 강도가 증가되는 현상을 보이고 있다. 이것은 지름이 작을수록 금속응고함에 따라 과냉도가 커져서 결정립 미세화가 이루어졌기 때문에 강도 증가를 가져온 것이라고 볼 수 있다.

본 실험에서 얻은 Al fiber는 인장시험시 항복점 이전에서 파단되는 경우도 있었다. 이와같은 현상이 일어나는 원인은 Al fiber가 생성될 때 표면에 생성되었던 산화막이 파괴되어 Al fiber에 혼입되므로 인장 시험할 때 notch effect를 나타낸

Table 2. Strength properties of Al fibers fabricated by PDME process in air.

diameter of Al fiber(μm)	yield st. (kg/mm <sup>2</sup> )	UTS (kg/mm <sup>2</sup> )
55	18.9	24.8
55	17.6	23.9
109		20.8
122		23.3
161		15.6
A	2.0	6.1

\* A : commercial pure aluminum

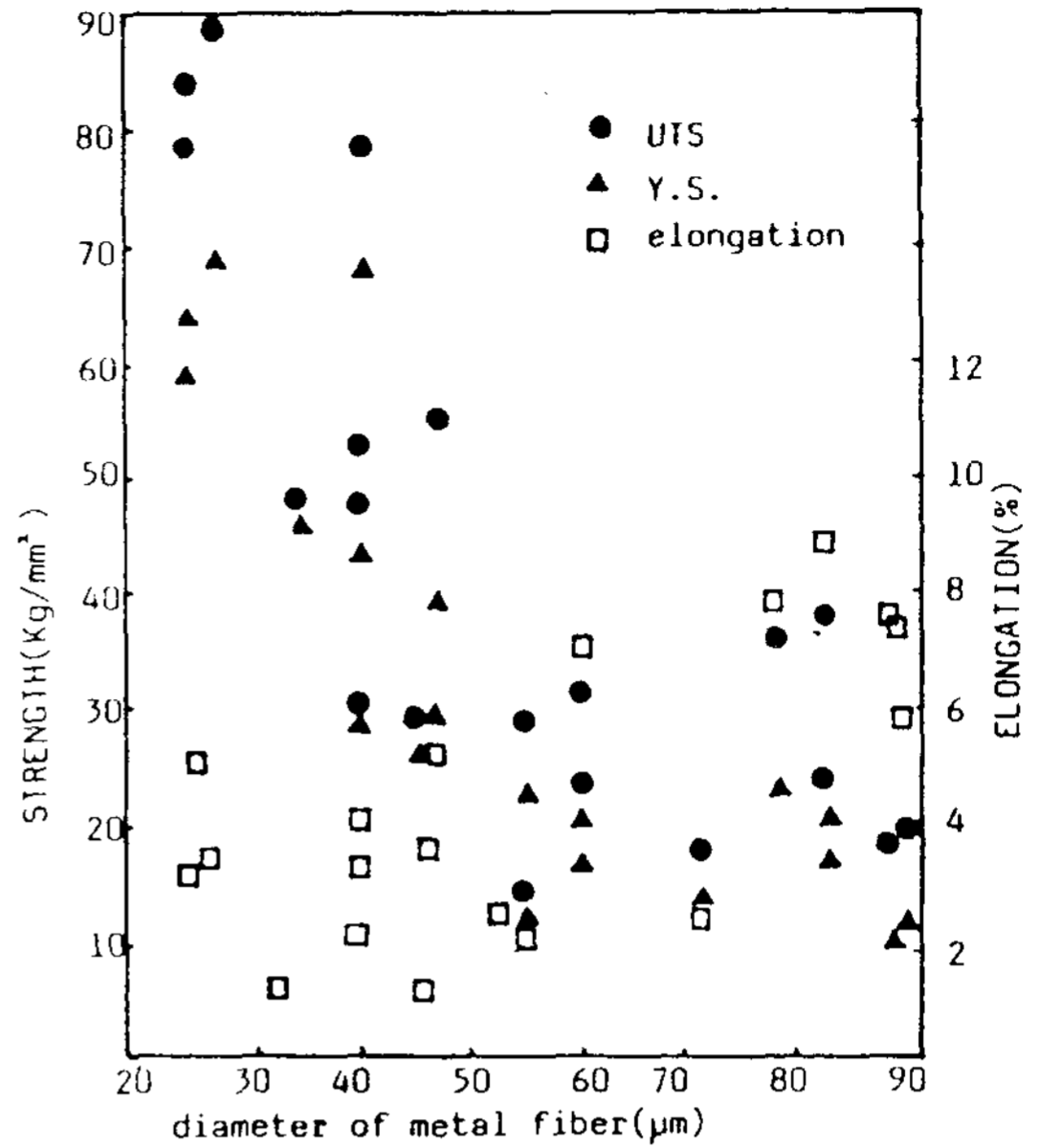


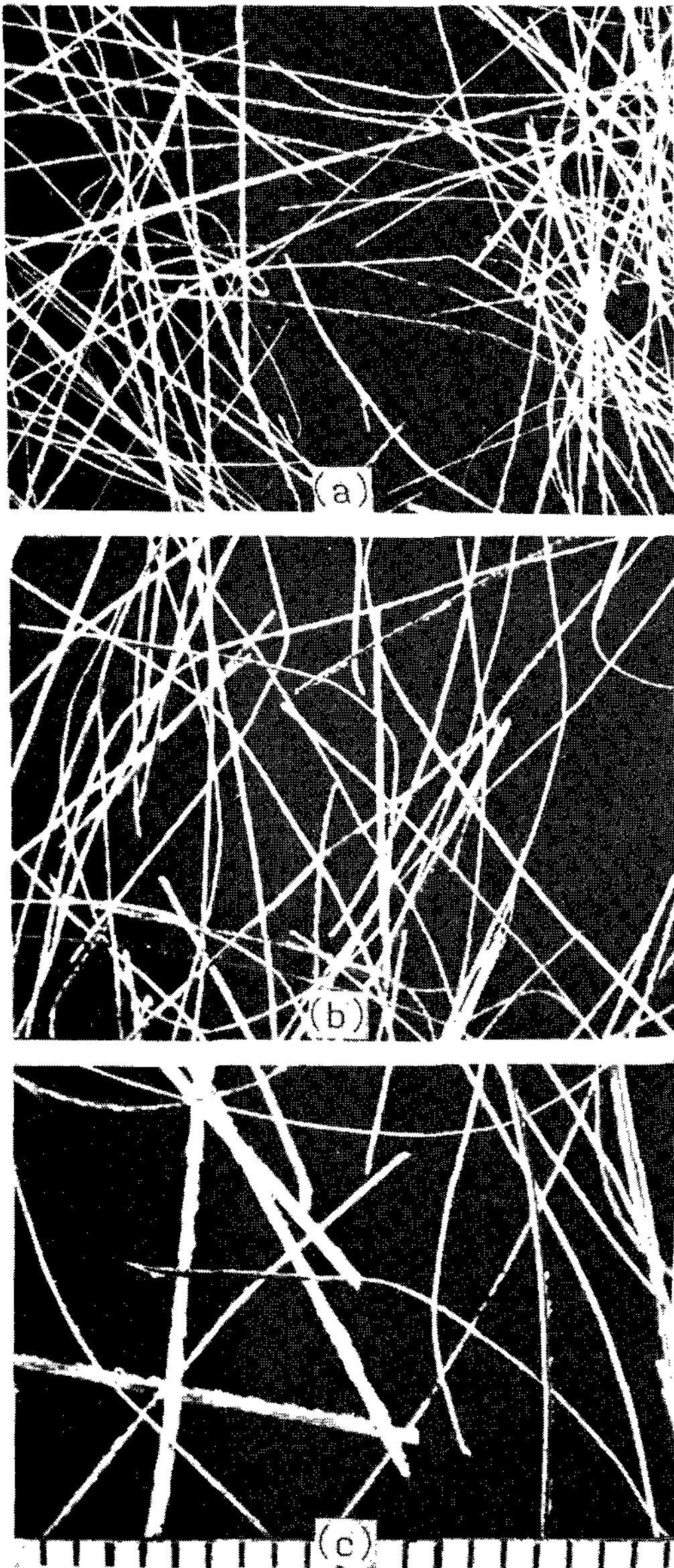
Fig. 4 Tensile test results of stainless steel fiber fabricated by the PDME method under vacuum

것으로 추측된다.

한편 진공 chamber를 부착시킨 PDME 장치를 사용할 경우에는 지름이 25-90μm 정도인 스텐레스강 섬유를 10m이상 연속적으로 제조할 수 있었다. 이 스텐레스강 섬유의 인장시험 결과를 Fig. 4에 나타냈다. 그림에서 보듯이 스텐레스강 섬유의 경우, 지름이 작아질수록 항복강도 및 인장강도는 크게 증가되는 양상을 나타냈다. 특히 스텐레스강 섬유의 지름이 30μm일 경우, 인장강도가 80-90kg/mm<sup>2</sup> 정도로 매우 큰 값을 나타내었다. 그러나 인장강도 값등은 단면적을 정확하게 측정하기 어려운 문제가 있기 때문에 근사값을 취하고 있으나 본 실험에서는 광학현미경과 micrometer를 함께 이용하여 단면적을 구하였다.

3. 3. 금속섬유의 조직관찰

Photo 1은 10mmφ의 Al봉을 사용하여 대기중에서 제조한 Al fiber로서 비교적 연속성을 가지는 장섬유의 외관사진이다. 보통 금속의 경우 대기중에서 용융점까지 온도가 상승하면 급속히 산화되는데 특히 PDME법에서와 같이 rod 형태의 끝부위를 용융시키면 용융금속의 체적당 표면적이 대단히 크기 때문에 용융부위가 거의 sponge 형태로 산화되어 slag 상태로 변하게 된다. 그러나 Al금속의 경우 유도가열이 되어 온도가 상승함에 따라

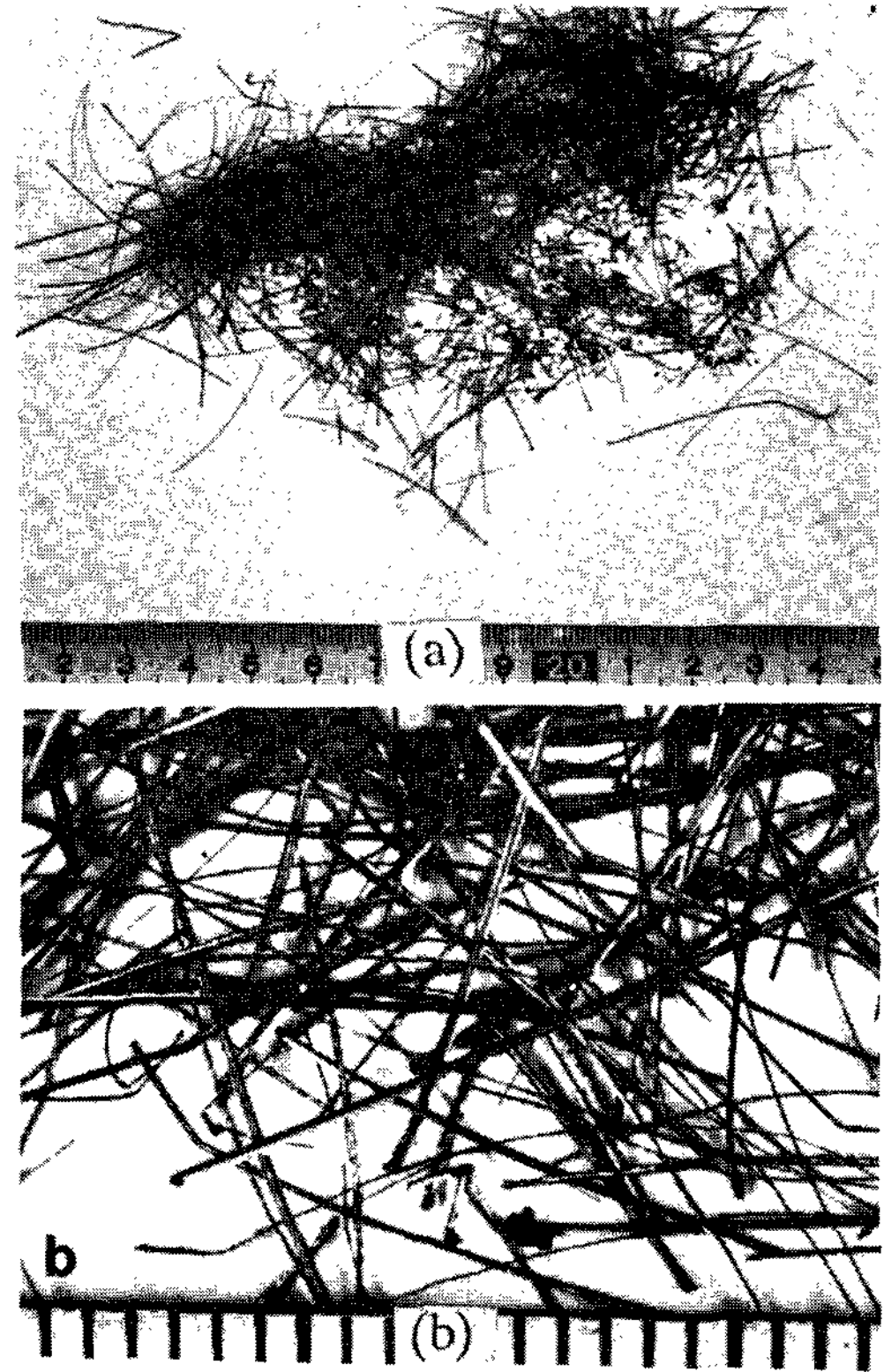


(a) diameter : 100µm  
 (b) diameter : 240µm  
 (c) diameter : 400µm

Photo 1. Optical macrographs of Al fiber

표면층에서 급속히  $Al_2O_3$  산화피막이 형성되어 용융금속의 내부를 보호하고 형성된 산화피막 내부로 용탕공급이 원활하게 되어 연속적인 알루미늄 섬유의 제조가 가능하였다.

Photo 1에서 지름이 100µm에서 400µm인 Al fiber의 표면조도를 살펴본 결과 240µm인 fiber가 가장 표면이 깨끗하였다. 이와같은 현상은 본 실험 조건에서 용융금속을 뽑아내는 선속도가 일정할



(a) diameter : 40~50µm  
 (b) diameter : 100~200µm

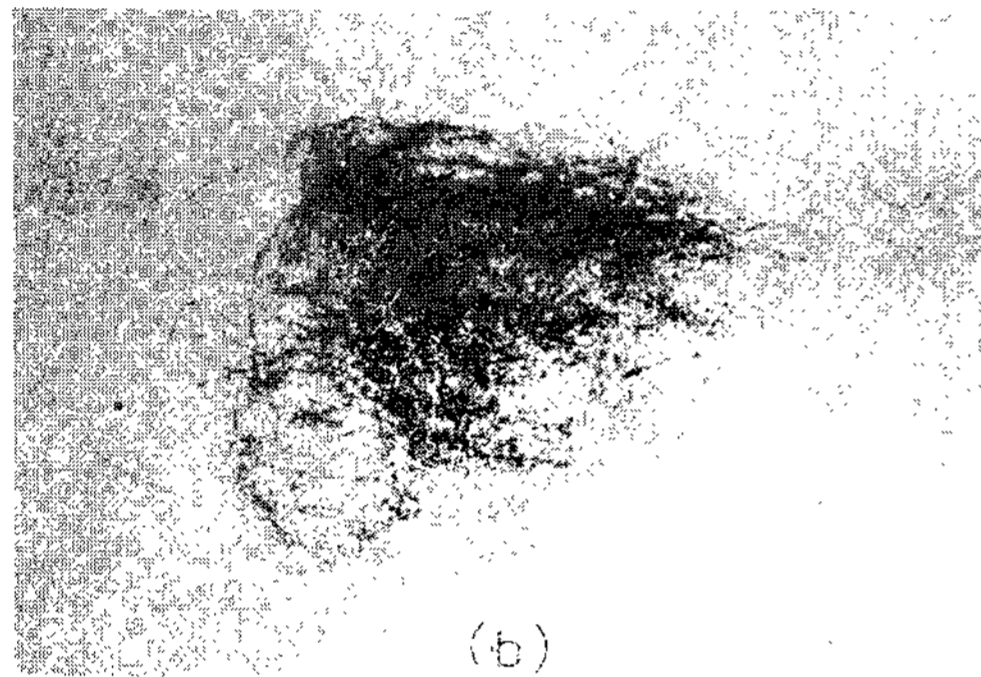
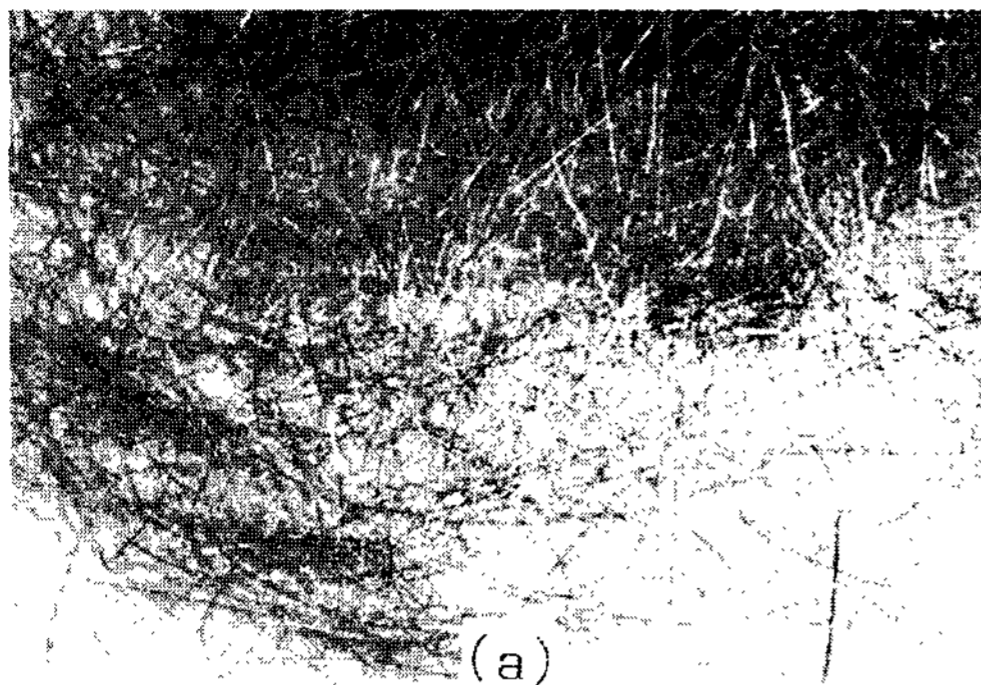
Photo 2. Optical macrographs of stainless steel fiber fabricated under Ar atmosphere

때 제조되는 금속섬유와 형성되는 산화막의 양이 적정 수준이 되는 경우에 용융금속의 표면에 균일한 산화피막을 형성한다는 것을 보여주고 있는 것이다.

Photo 2는 대기중에서 제조한 스테레스강의 표면상태를 나타낸 사진으로, 표면에 산화층이 많이 형성된 것을 볼 수 있다.

이에 반해 Photo 3은 진공상태에서 제조한 스테레스강 섬유의 macro 사진인데, 대기 중에서 제조한 스테레스강 섬유에 비해 표면이 더 깨끗한 것을 알 수 있었다.

Photo 4는 지름이 각각 65, 45 및 15µm 정도 되는 스테레스강 섬유 단면의 광학현미경 사진이다. 반달형태의 단면을 가진 섬유가 대부분이나 Photo 4(c)는 지름이 10µm인 섬유로서 거의 원형에 가깝다. Melt extraction법을 이용하여 제조한 금속 섬유는 보통 단면이 C 혹은 D 형태를 가지며 섬유의 지름이 적어짐에 따라 점점 원형에 가까워진



(a) diameter : 80~90 $\mu\text{m}$   
 (b) diameter : 30~40 $\mu\text{m}$

Photo 3. Macrographs of stainless steel fiber fabricated under vacuum

다고 보고되고 있는데<sup>6)</sup> 본 실험 결과도 이와 유사한 결과를 보여 주고 있다.

반달형을 나타내는 단면에서 flat한 면이 substrate에 접촉한 면인데 핵생성이 가장 먼저 일어나는 쪽이며 이곳에서 그 반대쪽으로 응고가 진행하게 된다. 응고 model을 Fig. 5에 개략적으로 나타냈다.

Fig. 5(a)는 용융금속이 substrate에 접촉되어 응고되는 과정을 나타낸 것이고, Fig. 5(b)는 공급되는 용융금속에 비해 substrate 이동속도가 빠른 경우에는 접촉된 용융액의 양이 작게되어 금냉되어 cell 조직을 형성하며, 그렇지 않을 경우 elongated cell structure가 생성되기 용이하다는 것을 나타내고 있다. Photo 5는 스텐레스강 섬유의 주사현미경 사진으로 elongated cell 구조와 cell 구조의 혼합조직을 나타내고 있다.

### 3. 4. Taylor법에 의한 금속섬유의 제조

금속 섬유를 용융금속으로부터 제조하기 어려운 이유는 용융금속의 점성이 적고 표면 에너지가 크

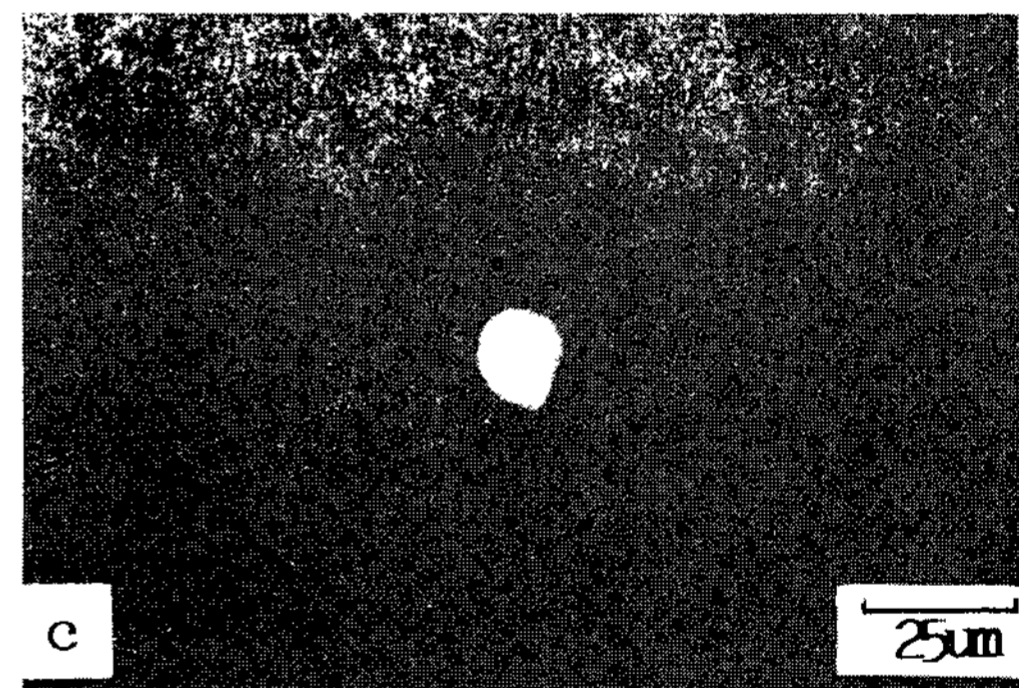
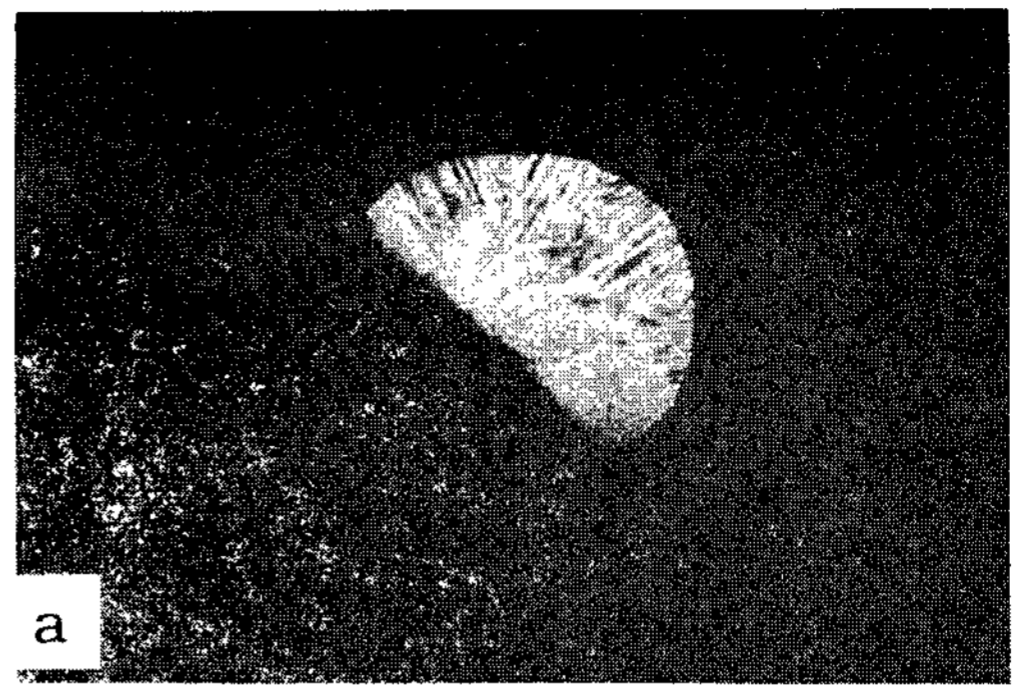


Photo 4. Optical micrographs showing cross section of stainless steel fiber fabricated by the PDME method under vacuum

기 때문에 용융금속이 droplet화 하기 쉽기 때문이다. Taylor process는 이를 보완하기 위하여 석영 tube로 용융금속을 감싸서 용융금속이 drop화 하는 것을 막아주는 동시에 glass의 점성에 의해 용이하게 금속섬유가 제조될 수 있게 만든 것이다. 이렇게 제조된 섬유는 진원을 유지하는 장점도 갖고 있다.

Photo 6(a)는 용융금속이 들어 있는 유리튜브를 금속섬유와 함께 나타낸 것이고, Photo 6(b)는 금속섬유를 뽑는 상태를 나타냈고, Photo 6(c)는 Taylor법에 의해 제조한 스텐레스강 섬유를 보여

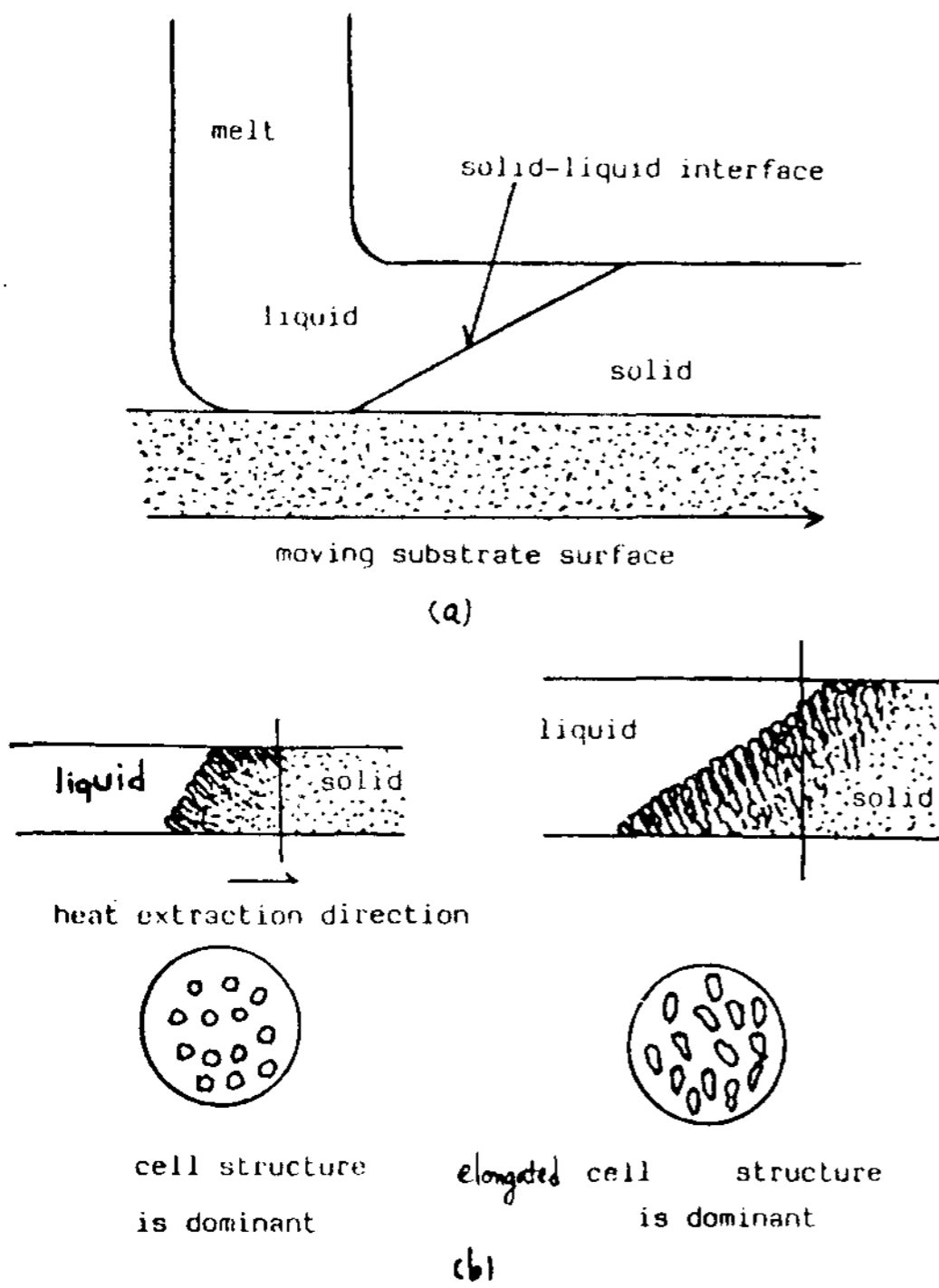


Fig. 5 Schematic assumption of microscopic change according to solidification rate

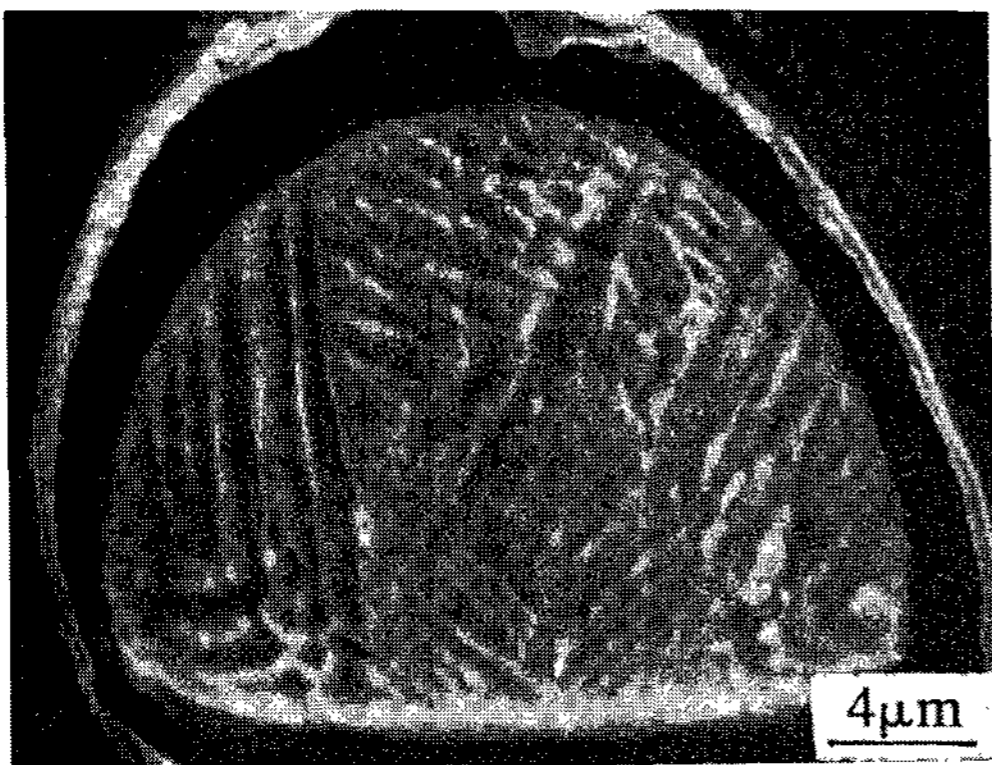
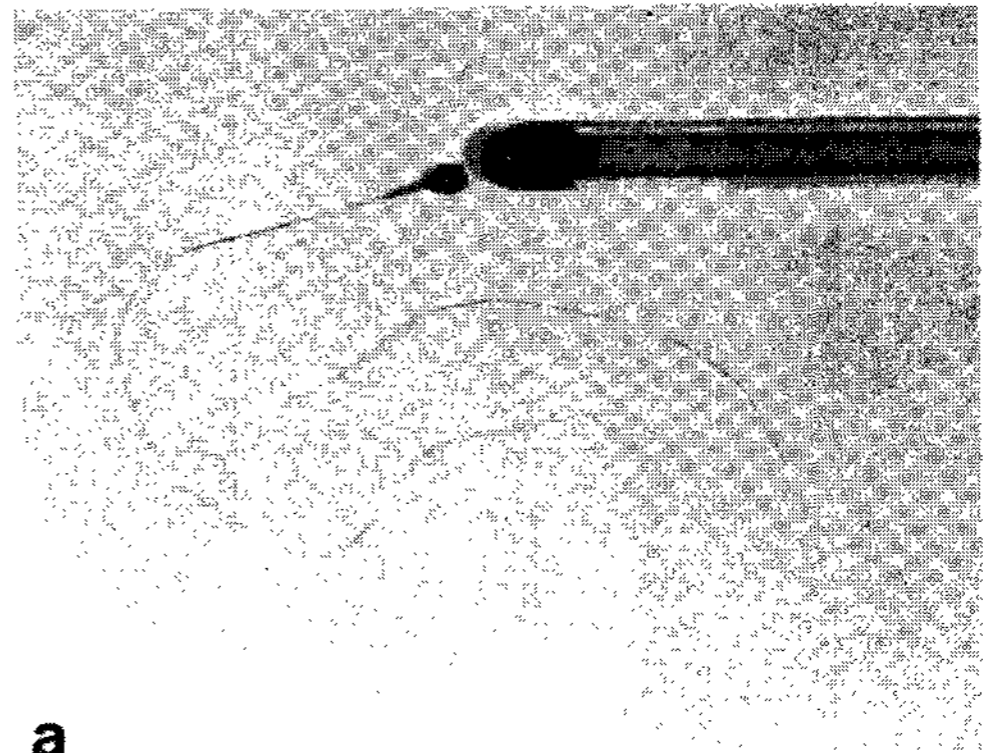


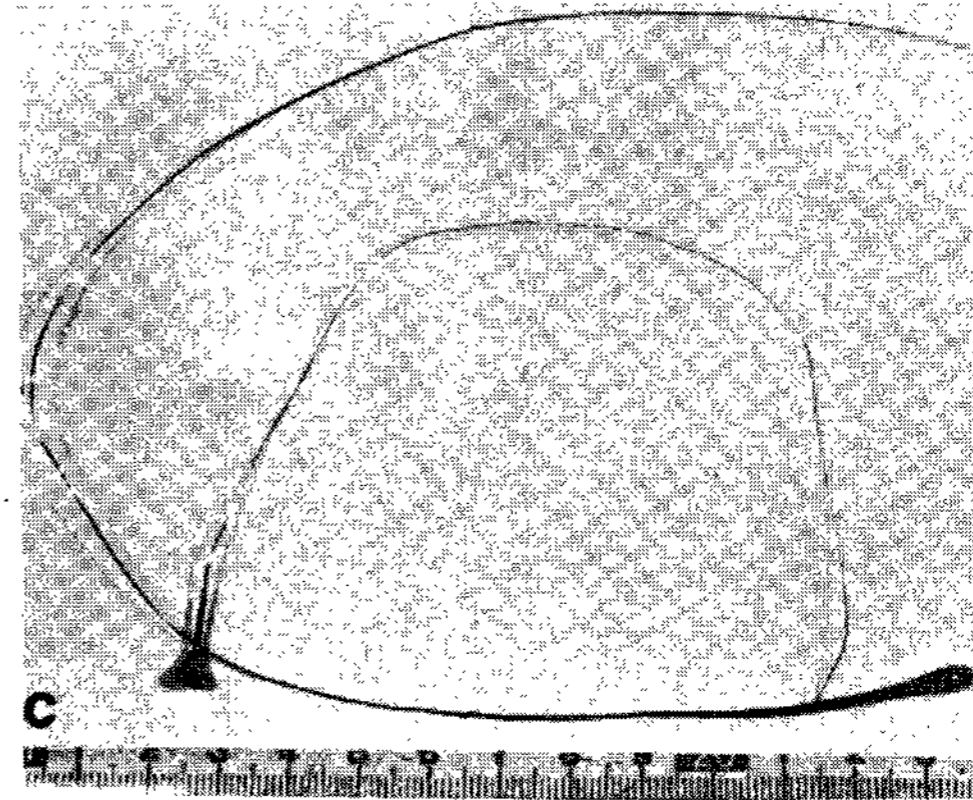
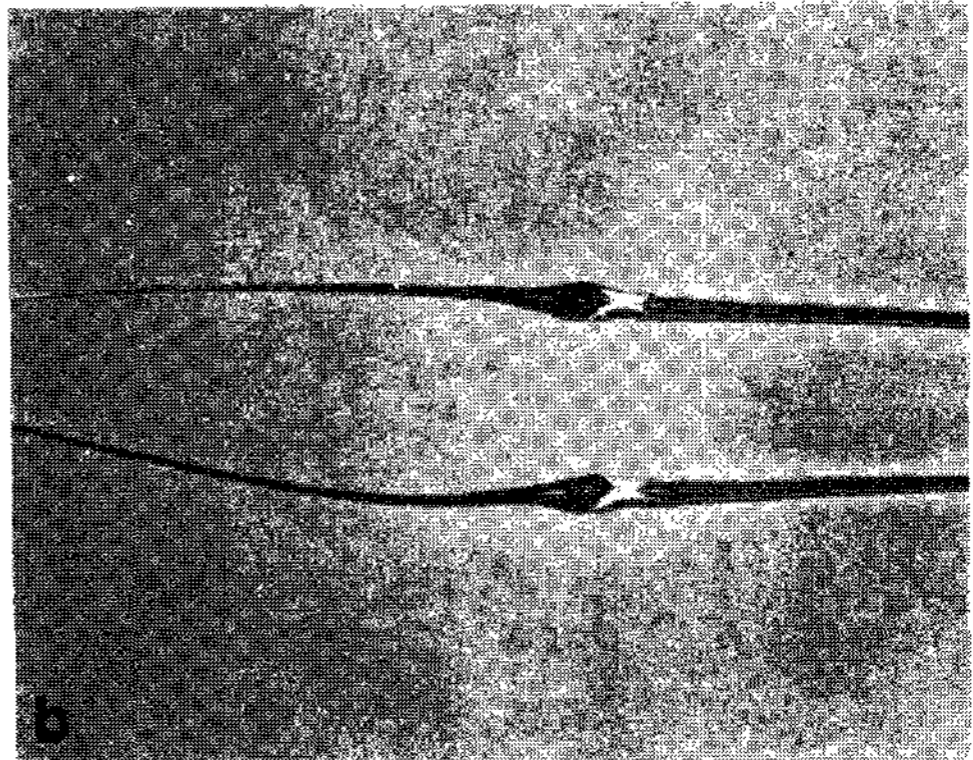
Photo 5. SEM micrographs showing cross section of stainless steel fiber fabricated by the PDME method

주고 있다. Photo 7은 Taylor법을 이용하여 제조한 금속섬유의 표면 사진으로 표면의 조도가 대단히 우수한 것을 볼 수 있었다. 인장시험 결과를 Table 3에 나타냈다.

Table 3에서 보듯이 제조한 금속 섬유는 상업용 STS 316의 기계적 특성과 비교해 보면 강도는 20% 정도 증가되었다.



a



c

Photo 6. Macrograph of stainless steel fiber fabricated by the Taylor process

Table 3. Tensile properties of stainless steel fiber manufactured by Taylor process

dia. (μm)	0.2 offset (kg/mm <sup>2</sup> )	UTS (kg/mm <sup>2</sup> )
105	39.3	68.7
113	38	72.5
134	31.2	47.5
STS 316	23	50

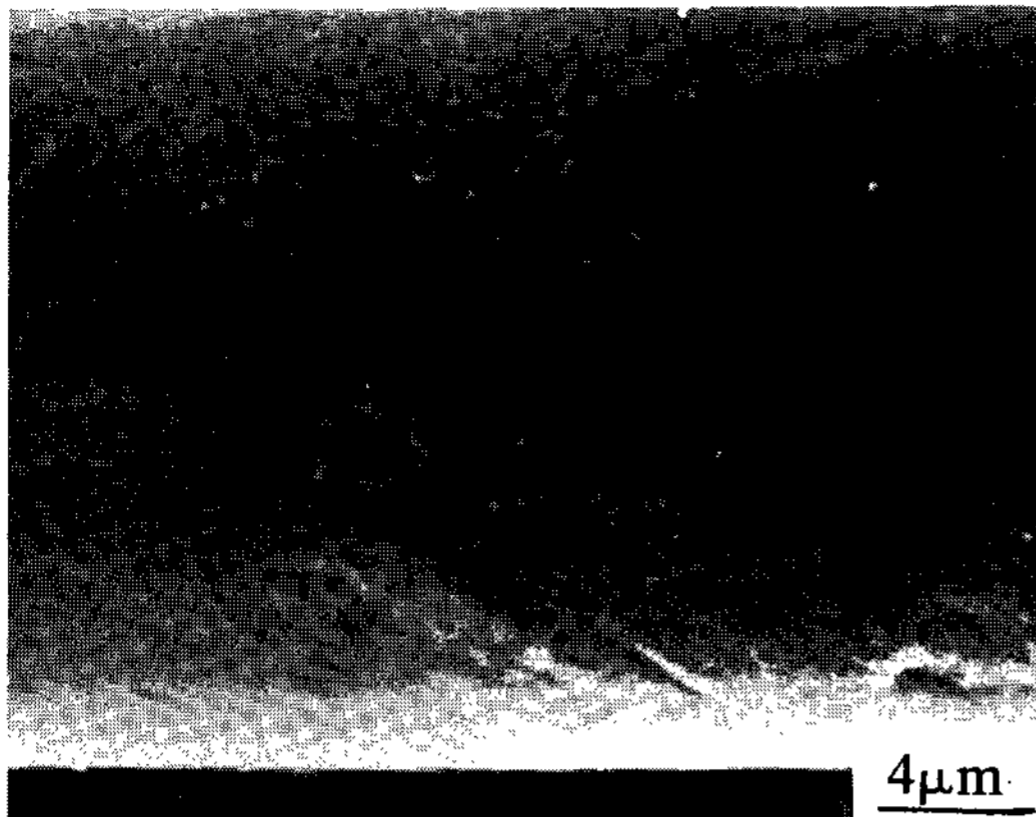


Photo 7. SEM micrograph of stainless steel fiber fabricated by the Taylor process

#### 4. 결 론

Al 섬유 및 스테인레스강 섬유를 제조할 수 있는 PDME 및 Taylor 장치를 제작하여 금속섬유를 제조하기 위한 최적의 제조조건을 구하였고 금속섬유의 외관 및 조직을 검토하였다.

1. Ar 기류 중에서 금속섬유 제조시험을 수행하였을 경우 스테인레스강 섬유 제조는 어려웠고 Al의 경우에는 양호한 금속섬유를 얻을 수 있었다.

2. PDME 법으로 제조한 Al 섬유의 인장시험을 실시한 결과 Ingot로 제조한 Al과 비교하여 항복강도와 인장강도가 현저히 증가하였다.

3. 연속적인 스테인레스강 섬유를 얻기 위한 실험

조건은 진공도가 적어도 0.06 Torr 이하이고 disk edge의 각도는 60°가 가장 양호하며 disk의 회전수는 분당 450-550 회전이었다.

4. 3항과 같은 조건으로 제조된 스테인레스강 섬유의 지름은 평균 50 $\mu$ 정도이었고, 섬유의 지름이 30 $\mu$ m인 경우 인장강도가 90kg/mm<sup>2</sup>까지 얻을 수 있었다.

5. 제조된 스테인레스강 섬유의 단면조직은 columnar cellular 혹은 cell 구조의 혼합된 조직을 보여주고 있었다.

6. Taylor process를 이용하면 100 $\mu$ m 정도의 스테인레스강 섬유를 제조할 수 있었는데, PDME 법으로 제조한 것과 비교할 때 표면조도는 훨씬 우수하였고 기계적 강도는 조금 낮게 나타났다.

#### 참 고 문 헌

1. 中川威雄 小林一輔 : 塑性と加工 19, 213(1978) 842
2. R. B. Pond, R. E. Maringer and C. E. Mobley : New trends in Materials Processing II, American Society, Materials Science Symposium, Detroit(1974) 128
3. 日本特許 昭和 47-13527(1972)
4. U. S. Patents No. 3, 277, 564(1966)
5. D. G. Holloway : The physical properties of glass, London Oxford Univ. Press(1950) 19
6. R. E. Maringer and C. E. Mobley : J. Vac. Sci. Technology, Vol 11, No. 6(1974) 1067