금속섬유 제조 기술 개발 현황

박만호^{a,b,*} · 윤종열^c · 한유동^c · 송요승^b

^a(주)알란텀, ^b한국항공대학교 항공재료공학과,

^c한국기계연구원 부설 재료연구소

Trend in Development of Metal Fiber Fabrication Process

Man Ho Park^{a,b,*}, Jung Yeul Yun^c, Yoo Dong Hahn^c and Yo Seung Song^b

^aAlantum Cooperation

^bKorea Aerospace University

^cKorea Institute of Materials Science

1. 서 론

금속섬유(metal fiber)는 일반적으로 머리카락(약 70~100 μm)보다 직경이 작은 50 μm 미만의 미세한 직경을 가지면서 직경 대비 길이가 100배 이상이 되는 섬유 형상의 금속으로, 섬유 형상이 가지는 유연성과 함께 금속 고유의 기계적 특성과 전기 전도도, 내열, 내식성을 보유하고 있어, 고온 소결공정을 통해 기공도 70% 이상의 다공체로 제조하여 고온·고압용 필터, 표면 연소용 다공성 버너 소재, 정전기 방지용 도전성 플라스틱, 고면적 전극 소재 등으로 사용하고 있다[1].

인발(drawing) 공법으로 금속섬유가 개발되어 직경 50 μm 이하의 stainless steel 섬유가 상업적으로 사용되기 시작하면서 직경이 가늘어질수록 공정 비용이 기하급수적으로 상승하는 문제점을 극복하고자 분리재를 코팅한 수백여 가닥의 금속 선을 모아서 원하는 직경까지 연속적으로 인발하는 다발인발법(bundle drawing process)이 1936년에 개발되었으며[2], Bekaert사(벨기에)와 일본정선사(일본) 등이 다발 인발법을 적용한 stainless steel 섬유를 고온/고압 필터에 적용하면서 금속섬유의 활용처에 관한 연구가 활발히 진행되기 시작하였다[1, 3].

활용처에 관한 연구를 바탕으로 1980년대에 들어서면서 금속섬유의 응용 분야가 섬유의 유연성과 넓은 비표면적을 응용하는 전자파 차폐, 표면연소 버너용 다공판[4], 콘크리트 강화재, 자동차 배기가스 촉매지지체[5] 등으로 확대되면서, 보다 경제적인 금속섬유 제조기술에 대한 요구로 인해 절삭 공법[6-9]과 급냉 응고방식을 응용한 melt

spinning 공법[10-14] 등이 개발 되었다.

인발법, 절삭법, 용융추출법 등의 기술은 각각의 특성과 그에 맞는 시장을 확보하면서 서로 경쟁하거나 대체하는 것이 아닌 공존하는 것으로 나타나고 있다. 예를 들면 가격 경쟁력이 요구되는 자동차 브레이크 마찰재용 소재는 진동 절삭 공정으로 제조한 구리(copper) 섬유가 사용되며, 표면 연소기용 소재나 경유차 매연저감장치 필터용 소재는 선반법, PDME 공법과 같은 공정으로 생산된 페크랄로이(fecralloy) 섬유가 응용되고 있다. 고온·고압용 필터와 같이 미세하고 높은 균일도가 필요한 제품의 경우에는 다발 인발법으로 제조한 stainless steel 섬유를 사용한다. 즉 응용하고자 하는 적용처에 가장 적합한 공법을 활용하는 것으로 제조기술과 응용제품의 연관성이 나타나고 있다.

본 고에서는 다발인발법, 절삭법, 급냉응고법 등 대표적인 금속섬유 제조기술 및 응용분야에 대해서 기술하고자 한다.

2. 금속섬유 제조기술

다음 표 1에 대표적인 금속섬유 제조기술에 대해 간략히 설명하였으며, 각각의 기술에 대해 아래에서 상세히 설명한다.

2.1. 다발인발법(bundle drawing process)[1-3]

다발인발법은 금속섬유 제조공법 중 가장 대표적인 방법으로 1940년대에 미국의 Everelt에 의해 알려진 후에 계속적인 연구개발을 거쳐 현재 Bekaert, 일본정선 등이

*Corresponding Author : Man Ho Park, TEL: +82-31-737-0932, FAX: +82-31-737-0930, E-mail: hoya72@gmail.com

Fig. 1. Schematic diagram of bundle drawing technology.

Fig. 2. Cross section view of metal fiber bundle tube.

stainless steel fiber 제조에 활용중인 공법이다. 그림 1에 다발 인발 공정의 개략도를 나타내었다. 그림 2는 다발 인발 후 복합관의 단면 형상을 SEM으로 관찰한 결과를 도시하였다. 다발인발법은 금속 선재를 집속관에 모아 인발

후 재 집속하는 방식으로 연속적인 인발을 거쳐 선경 10 μm 의 금속섬유도 제조할 수 있는 특징을 가진 공정이다. 그림 2에 도시된 복합관의 단면 SEM 관찰 결과에서 직경 0.5 mm의 복합관 내부에 수백가닥의 stainless steel 섬유가 집속되어 있는 것을 볼 수 있다. 집속관을 전기화학 부식으로 분리재를 제거하면 금속섬유를 분리해 낼 수 있다. 다발인발법으로는 일부 순금속의 경우 직경 2 μm 이하까지 섬유화 할 수 있으며, stainless steel, inconel, feralloy, titanium, nickel 등의 일반적인 금속의 경우에는 4, 8, 12, 22 μm 정도의 직경까지 섬유화 할 수 있는 것으로 발표되고 있다. 그림 3에는 다발 인발법으로 제조된 금속섬유의 표면 형상을 SEM으로 관찰한 결과를 도시하였다. 표면에는 인발 시 집속관에 모아진 소재들과의 마찰과 간섭으로 인한 길이 방향의 줄무늬가 형성되어 있는 것을 볼 수 있으며, 단면 관찰 결과에서 보듯이 섬유의 선경은 균일함을 알 수 있다.

2.2. 절삭법(rotary cutting, shaving)[6-9]

절삭법은 일본에서 발달한 금속섬유 제조공법으로, 회전하는 봉 형상(round bar type) 금속 소재의 옆면을 진동하는 바이트로 뜯어내는 진동 절삭공법과 회전하는 coil의 옆면을 선반으로 깎아내는 선반법 등으로 나뉜다. 진동 절삭법은 길이 3 cm 미만의 금속 단섬유를 제조할 수 있는 가장 경제적인 공법으로 알려져 있으며, 선반법은 금속섬유 기계 가공법으로는 가장 최근에 개발된 공법으로 알려져 있다. 그림 4에 진동절삭법(rotary cutting process)의 개략도를 도시하였으며, 그림 5에는 진동절삭법으로 제조된 금속 단섬유의 표면형상의 SEM 관찰 결과를 도시하였다. 일정한 진동으로 절삭했음에도 불구하고 섬유의 표면과 선경이 불규칙함을 알 수 있다.

선반절삭법(shaving process)은 일본 동북대학교에서 개발하고, 이를 Bekinit에서 상업화에 성공한 공법으로 50

(a)

(b)

Fig. 3. (a) Surface and (b) cross section morphology of bundle drawn metal fiber (stainless steel 8 μm).

Fig. 4. Schematic diagram of vibration cutting.

Fig. 5. Surface morphology of vibration cut metal short fiber.

μm 두께의 박판이 감긴 coil의 옆면을 $20\ \mu\text{m}$ 의 폭으로 선삭하는 공법이다. 미세 선삭과정에서 가공성이 불량해지는 단점을 극복하기 위해 경질 소재를 박판에 코팅하여 선삭하는 것으로 알려져 있다[7-9]. 그림 6에 선반절삭법의 개략도를 나타내었다. 그림 7에는 선반절삭법으로 제조된 금속섬유 표면의 SEM 관찰 결과를 도시하였다. 선반절삭법으로 제조된 금속 섬유의 단면 형상은 직사각형이며, 선삭 공구에 의해 잘리는 면(그림 7(a))과 깎이는 면

Fig. 6. Shaving process.

(그림 7(b))의 표면 조직이 다름을 알 수 있다. 직사각형의 면적을 원형으로 가정 시 계산되는 직경을 등가 직경(equivalent diameter)이라고 하는데, 선반절삭법으로 제조되는 $20\sim 50\ \mu\text{m}$ 의 직사각형 단면을 가지는 섬유의 등가 직경은 약 $35\ \mu\text{m}$ 으로 계산된다.

2.3. 급냉응고법[10-19]

급냉 응고 기술은 1967년 Dewez[20]가 실험실 바닥에 떨어진 용융 금속의 응고조직을 검사하면서 우연히 발견된 기술로, 1970년대부터 분말, 박판, 섬유 제조기술 등으로 발전해 왔다. 급냉 응고 기술을 활용하여 금속섬유를 제조하는 기술로는 1974년 R.E. Maringer와 C.E. Mobley 등이 mild steel fiber 제조에 이용한 CME(crucible melt extraction) 공법과 Fe-Ni fiber 제조에 이용한 PDME(pendant drop melt extraction) 공법이 있다. 그림 8과 그림 9는 CME 공법[10-13]과 PDME 공법[13-14]의 개략도이다.

(a)

(b)

Fig. 7. (a) Lathe contact side surface morphology and (b) shaved side surface morphology.

Fig. 8. CME process.

Fig. 9. Schematic diagram of PDME process.

CME 공법은 crucible에 담긴 액상 금속에 회전하는 chilled disc를 접촉시켜 금속섬유를 추출해내는 방법으로, 제조되는 금속섬유의 반경은 다음과 같이 예측할 수 있다. 즉, 급냉 응고 공정에서 충분한 냉각 속도를 유지하고, 일정한 반경을 가지는 반지름 R 인 액상이 V_r 의 공급 속도로 t 시간 동안 공급되면서, 법선속도 V_d 로 회전 중인 wheel에 접촉해서 반지름 r 인 fiber로 추출된다고 가정할 경우 공급되는 원재료의 부피(V_m)는 식 (1)과 같다.

$$V_m = \pi R^2 \times V_r \times t \quad (1)$$

V_m : 공급되는 원재료의 부피

R : 공급되는 액상의 반경

V_r : 소재의 공급속도

이때 식 (1)에서 t 시간 동안 공급되는 액상이 모두 fiber로 제조된다면 제조되는 fiber의 총 부피(V_f)는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_f = \pi r^2 \times l = \pi r^2 \times V_d \times t \quad (2)$$

V_f : 제조된 fiber의 총 부피

r : 제조된 fiber의 반경

l : t 시간동안 제조되는 fiber의 총 길이

V_d : 회전하는 disk의 법선속도

여기서 $V_m = V_f$ 가 되므로 fiber의 반경 r 은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다[18].

$$\text{fiber 반경 } r = \sqrt{\frac{R^2 V_r}{V_d}} \quad (3)$$

따라서 식 (3)에서 fiber의 굵기는 chilled disc의 회전속도와 반비례하고, 액상과 접촉하는 길이에 비례함을 알 수 있다. 이를 바탕으로 CME 공법 보다 액상과 비교적 짧은 접촉 길이를 유지하는 방안으로 PDME 공법이 개발되었다.

PDME 공법은 직경 10 mm 정도를 가지는 환봉(round bar)의 일부분을 용융시킨 후 이를 회전하는 chilled disc에 접촉시켜 금속섬유를 추출하는 방법으로, 용융 → 추출의 1회 공정으로 선경 20~30 μm 수준의 미세 금속섬유를 제조할 수 있으며, $10^4 \sim 10^6$ $^\circ\text{C}/\text{sec}$ 에 달하는 높은 냉각 속도로 인해 수 μm 수준의 미세 결정립, 성분의 균일성, 과포화 고용한도의 증가, 준안정상 및 비정질상 형성 등의 변화가 나타나 비정질 금속섬유를 제조하는 기술로 보고되고 있다[12-17]. 그림 10은 PDME 공법으로 제조한 금속섬유의 단면 형상 및 표면 SEM 관찰 결과이며, 그림 11은 파단면 미세구조를 관찰 결과이다. PDME 공법에 의해

(a)

(b)

Fig. 10. (a) Cross section and (b) chilled disc contact side surface morphology of metal fiber fabricated by PDME process.

Fig. 11. Fractured surface morphology of metal fiber fabricated by PDME process.

Fig. 12. Fiber length distribution by PDME process.

제조된 금속섬유의 단면 미세구조에서는 chilled disc가 접촉한 부분에서 시작하여 free surface 쪽으로 수 μm 폭의 dendrite가 발달해 있는 급냉 응고조직을 확인할 수 있다. 그림 12는 PDME 공법에 의해 제조되는 금속섬유의 길이 분포도를 분석한 결과[18]로 10~70 cm의 범위에서 정규분포에 가까운 분포를 이루고 있는 것을 알 수 있다.

2.4. 분말압출법[21]

그림 13은 분말압출법을 이용한 금속섬유 제조 기술에 관한 개략도로, 분말 압출법은 분리재와 혼합한 금속 분말을 환봉 형태로 만든 후 이를 압출하여 분말이 연신되면서 섬유 형상으로 변형되는 원리를 응용한 공법이다. 분말 압출법에 의해 제조되는 섬유의 직경은 원재료로 사용되는 분말의 직경과 압출 시 압출비율에 의해 결정되는 것으로 알려져 있다. 분말의 직경을 D , 압출비를 ER 로 표현했을 때, 제조되는 섬유의 직경 d 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

Fig. 13. Schematic diagram of powder extrusion technology.

Fig. 14. Schematic diagram of Taylor process.

$$d = 1.15 \frac{R}{\sqrt{ER}} \quad (4)[21]$$

50 μm 지경의 분말을 사용할 경우 식 (4)에 의해 선경 1~10 μm 의 단섬유를 용이하게 제조할 수 있는 공법으로

Fig. 15. Schematic diagram of In-Rotating-Water-Spinning process.

알려져 있다.

2.5. Taylor공법 (Taylor process)[22-23]

테일러법은 용융 금속을 pylex 유리 같은 점도가 높은 보호재로 감싸고, 반 용융 상태에서 보호재와 함께 연신시킨 후 보호재를 화학적으로 제거하여 금속섬유 제조하는 공법이다. Taylor공법은 Taylor에 의해 최초로 개발되어 1957년 Ulitovskiy에 의해 개선되었으며, melt spinning 공정으로는 유일하게 $1\ \mu\text{m}$ 이하의 직경을 가지는 금속섬유까지 제조할 수 있는 공정으로 평가 받고 있다. 그림 14에

Table 1. Metal fiber fabrication process

분류	공법	공정 설명	비고
기계가공법	다발인발법 (Bundle Drawing)	금속 선재의 표면에 이형재를 코팅하여 수백 가닥을 일시에 인발 인발 된 복합관을 전기화학 부식으로 제거하여 금속섬유 분리	
	절삭법 (Shaving)	$20\ \mu\text{m}$ 두께의 sheet를 coil형으로 감은 후 옆면을 선반으로 절삭하여 금속섬유 제조	
	분말압출법 (Powder Extrusion)	직경 $50\ \mu\text{m}$ 분말 표면에 분리재를 코팅한 후 압출, 압출 후 분리재를 녹여서 금속섬유 분리	
급냉응고법	CME공법 (Crucible Melt Extraction)	용융 금속 pool에 고속회전 wheel을 접촉하여 액상 금속에서 미세 직경의 금속섬유 추출	
	PDME공법 (Pendant Drop Melt Extraction)	금속 봉의 일부분을 용융시킨 후 고속 회전 냉각 wheel을 접촉하여 액상에서 고상으로 급냉 응고 된 금속섬유 추출	
	테일러법 (Taylor Method)	유리 등의 보호재로 싸여 있는 용융 금속을 보호재와 함께 인발 후 보호재를 제거하여 금속섬유 제조	
	In-Rotating-Water-Spinning법	용융 금속을 미세한 orifice를 통해 수중으로 방사하여 금속 섬유 제조	

Taylor공법의 개략도를 나타내었다.

Taylor공법은 보호재와 용융금속이 함께 소성변형이 일어나야 하며, 공급되는 보호재의 온도가 T_g 이상으로 유지되어야 점도, 인장력, 표면장력, 반응성 등에 의해 섬유화 가능성이 결정된다. 보호재의 점도가 낮거나, 인장력이 크거나, 표면장력이 작으면 금속을 섬유상으로 만들기 어려운 문제가 있는 것으로 보고되고 있다.

2.6. 회전수중방사법 (In - Rotating - Water - Spinning법)

회전 수중 방사법은 일본 Unitika사에서 개발해 낸 방법으로, 냉각수가 흐르는 회전하는 드럼 속에 용융된 액상 금속을 방사시켜 금속섬유를 얻는 방법이다. 그림 15에 회전수중방사법의 개략도를 도시하였다. 회전수중방사법을 이용하여 100 μm 이하의 균일한 직경의 비정질 fiber를 제조할 수 있다고 발표되었으며, Fe-Nd-B 등의 소재를 바탕으로 비정질 와이어 제조에 활용되고 있다.

3. 응용분야

3.1. 금속섬유 응용분야

금속섬유는 섬유 자체로 산업적으로 활용되기도 하지만 web, yarn, knit, sintered porous plate 등 다양한 형태로 2차 가공 후 활용되고 있다[24-26]. 특히 부직포 형태의 web을 만든 후 이를 진공 소결한 metal fiber sintered porous plate는 금속섬유가 가장 널리 사용되는 형태이다. 금속섬유를 이용하여 진공 소결한 다공체는 미세한 기공에도 불구하고 높은 압력에서 견고하게 형상을 유지한다. 이런 특징으로 인해 액상 나일론이나 폴리에스터 등을 통과시킬 경우 배향성을 우수하게 하므로 화학 섬유 공정용 고압 필터로 주로 사용되고 있다. 또한 섬유간 소결 접합력이 우수하여 필터 여재로 인한 2차 오염 문제가 없어 반도체 공정용 필터로 사용되고 있다.

최근에는 선반법으로 제조된 fecralloy 금속섬유 다발을 knit fabric으로 제조하여, 이 fabric에 공기와 LPG 혼합가스를 통과시켜 표면에서 연소시키는 표면 연소 버너용 소재가 보일러 업계에서 사용이 급속히 증가하는 추세이다. 특히 금속섬유를 이용한 표면 연소 버너는 turn down ratio 10:1의 폭넓은 고부하-저부하 운전이 가능하게 하여 유럽에서는 대부분의 가정용 콘덴싱 보일러에 적용되고 있다.

3.2. 관련기업

금속섬유 기술을 보유한 대표적인 해외기업으로 벨기에의 Bekaert사가 있다. Bekaert사는 다발인발법으로 stainless steel 316L, inconel 601, hastelloy, fecralloy 섬유를 제조하

여 산업용 고온, 고압 필터, 자동차 배기가스 처리용 필터, 표면 연소용 버너 소재 등의 다양한 제품을 개발 및 공급해오고 있다. 일본의 일본정선사도 stainless steel 316L 섬유를 이용하여 고온 고압용 필터용 소재를 공급하고 있으며, 최근에는 반도체 공정용 필터 제품을 출시하고 있다. 금속섬유 해외 공급처로서 최근 중국지역이 급부상 중이며, 대부분 다발인발법을 이용하여 Sunny metal, Swiit metal fiber, 서북유색금속 등의 기업들이 stainless steel 316L, fecralloy 섬유 등을 공급 중이다.

국내에서는 10여년 전부터 melt extraction 공법을 이용하여 화이버텍(주)에서 fecralloy 섬유를 이용한 자동차 배기가스 처리용 필터 및 표면 연소용 버너 소재 등을 공급 중이며, 미래소재에서는 절삭법과 분말압출법을 이용하여 금속 섬유를 제조하고 있으며, 최근 사인에서 금속섬유 제조기술을 확보하여 관련 분야에 제품을 준비 중인 것으로 알려져 있다.

4. 결 론

금속섬유는 금속재료를 머리카락 굵기보다 직경이 작은 섬유 형상으로 제조한 것으로서, 섬유 형상이 가지는 구조적 장점과 금속 고유의 물리적 특성의 결합으로 인해 고온용 필터, 전자차 차단재, 전극소재, 가스버너용 매트, 흡음재 등 다양한 산업에 핵심소재로 사용되고 있다. 본 고에서는 금속섬유의 대표적인 제조 공법의 종류와 특징에 대해 알아보았다. 금속섬유 제조 공법은 크게 기계가공법과 용융추출법으로 분류할 수 있으며 절삭법, 인발법, 압출법 등의 기계가공법과 CME법, PDME법, Taylor법 등의 용융추출법이 있으며 stainless steel, fecralloy, nickel, aluminium, copper, titanium 등 매우 다양한 종류의 금속 섬유가 제조되고 있다. 벨기에의 Bekaert사, 일본의 일본정선사가 대표적인 금속섬유 제조 기업이지만, 최근 중국에서 다양한 기업이 금속섬유를 제조하고 공급하고 있다. 국내의 경우도 10여년 전부터 금속섬유 제조에 관한 연구개발을 시작하여, 최근에는 화이버텍을 비롯한 몇 개의 기업에서 양산을 하고 있는 것으로 알려져 있다. 금속섬유는 섬유자체로 활용되기도 하지만 2차 가공 후에도 다양한 형태로 제조 가능하기 때문에 앞으로도 환경산업, 전자산업, 건축산업, 기계산업 등에서의 주요 핵심소재로 금속섬유의 활용성은 점차적으로 증대할 것으로 예측된다.

참고문헌

- [1] R. D. Bruyne and I. Lefever: Metal Fibers, Ullmann's Ency. of Indust. Chem., **A4-5-4** (1988) 37.

- [2] S. J. Everett: US 2050298 (1936).
- [3] J. A. Roberts: Handbook of Fillers and Reinforcements for Plastics, J. V. Milewski (Ed.), Chapter 31, Van Nostrand Reinhold, New York, (1978) 597.
- [4] A. N. Husain and S. Yagoobi: ASME-IMECE, **364**, Nashville, TN, (1999) 261.
- [5] H. Baur, K. Lempenauer, M. Hartweg and G. Stephani, "Porous Metal Fiber Component - POMFICO" Annual Report (1995).
- [6] P. Chen: The Japan Soc. for Preci. Eng., **61** (1995) 9.
- [7] Z. P. Wan, Y. Tang, Y. J. Liu and W. Y. Liu: J. of Mater. Proc. Tech., **189** (2007) 273.
- [8] M. Kaneko, M. Y. Jun, M. Imamura and A. Yanagisawa: J. Japan Soc. of Powder and Powder Metall., **50** (2003) 253.
- [9] M. Kaneko, J. J. Lee, M. Imamura and A. Yanagisawa: J. Text. Eng., **47** (2001) 23.
- [10] R. E. Maringer and C. E. Mobley: J. Vac. Sci. Technol., **11** (1972) 1097.
- [11] R. E. Maringer, A. Rudnick and C. E. Mobley: US 3,838,185 (1974).
- [12] <http://www.ifam.fraunhofer.de/>
- [13] O. M. Stewart, R. E. Maringer and C. E. Mobley: US 3,812,901 (1974).
- [14] B. S. Mitin and V. A. Vasiliev: Mater. Sci. and Eng., **A133** (1991) 746.
- [15] J. O. Strom-Olsen: Mater. Sci. and Eng., **A178** (1994) 239.
- [16] A. Zaluska, Z. Altounian and J. O. Strom-Olsen: J. Magnetism and Magnetic Mater., **115** (1992) 230.
- [17] G. Stephani, C. Kostmann and P. Neumann: Advances Powder Met. Part I Mater., **5** (1996) 23.
- [18] P. Rudkowsks, J. O. Strom-Olsen, G. Rudkowska, A. Zaluska and P. Ciureanu: IEEE Transaction on Magnetism, **31** (1995) 1224.
- [19] M. H. Park, Y. S. Song and J. H. Won: Adv. Mater. Res., **15~17** (2007) 592.
- [20] C. H. Suk, D. E. Lee and M. H. Park: US 6,604,570 (2003).
- [21] P. Diwez: ASM, Trans Quart, **60** (1967) 605.
- [22] D. I. Kim and T. Y. Park: J. Korean Fiber Society, **40** (2003) 39.
- [23] N. I. Baik, S. K. Hur and H. Y. Ra: J. KFS, **9** (1989) 396.
- [24] N. I. Baik: J. KFS, **18** (1998) 41.
- [25] J. A. Jansen, A. F. von Recum, J. P. C. M. van der Waerden and K. de Groot: Biomaterials, **13** (1992) 959.
- [26] I. Yuranov, L. Kiwi-Minsker and A. Renken: Appl. Cata. B Environ., **43** (2003) 217.
- [27] W. Liu, Z. Zeng and D. Ming: J. of Mater. Proc. Tech., **142** (2003) 562.