

고주파 가열에 의한 와이어 인발 공정에서 Hot Zone 의 효과 Effect of Hot Zone in a Microwave-Heated Wire Drawing Process

*하보근¹, #허 유², 백영남²

*Bo K. Ha¹, #Y. Huh(huhyou@khu.ac.kr)², Young N. Paik²

¹경희대학교 대학원 기계공학과, ²경희대학교 기계·산업시스템 공학부

Key words : hot zone, microwave, wire drawing, dieless, susceptor, metal wire.

1. 서론

산업기술이 크게 발달하여, 고성능 첨단소재가 필요함에 따라 고정밀, 고기능성 소재의 수요가 증가하고 있다. 특히, 금속 섬유는 착용형 컴퓨터(wearable computer)와 같은 스마트 섬유를 비롯하여 전자파 차폐재(electromagnetic shielding material), 대전방지재(anti-static material), 발열소재(heatable material), 불연재(non-flammable material), 내열재(heat resistant material), 고온고압 필터재(high temperature and pressure filtration material) 등 제조 산업 또는 환경 산업 분야에서 수요가 지속적으로 증가하는 추세이다. 현재 금속섬유의 생산은 연신구간에 위치한 다이(die)를 이용하는 선법(wire drawing)이 보편적으로 사용되고 있다 [1-2]. 이러한 공정은 메카니즘이 비교적 간단하기 때문에 널리 사용되지만, 공정 중 발생하는 다이의 기계적 마모에 의한 효율 저하, 마찰열과 소음의 발생에 의한 열악한 작업조건 등의 단점이 있기 때문에 새로운 공정의 연구가 요구되고 있다[3]. 본 연구에서는 다이(die)를 이용하지 않고, 강제 네킹(necking)에 의한 와이어 인발법[4]을 이용하고, 가열열원은 고주파(microwave)를 이용하여 연신의 효율화를 도모하고, 유효연신 범위를 실험으로써 확인해보았다.

2. 실험

2.1 실험장치

와이어 인발을 위한 실험장치는 마이크로파를 발생시키기 위한 전원부와 시료를 가열하여 인장시키는 가열부, 그리고 가열된 시료를 연신하는 구동부로 나뉜다. 전원부는 H.V.T.(high voltage transformer), H.V.C.(high voltage capacitor), H.V.D.(high voltage diode)로 구성된다. 가열부는 마이크로파 에너지가 일정 공간에 집적될 수 있도록 폐쇄 공간(chamber)을 형성하고, 마이크로파 발생장치인 마그네트론(magnetron)이 장착되어 있다. 챔버 내부는 고온이 발생되기 때문에 내화물을 이용한 핫존(hot zone)을 별도로 설치하고, 초기 발열체로써 감지재(susceptor)인 SiC를 이용하여, 240℃/min의 승온률로써 공정온도까지 효율적으로 가열하였다. 구동부는 공급/인장 마찰롤러(capstan)로 구성되어 있고, 롤러 표면은 미끄러짐을 방지하기 위해 세라믹(ceramic) 표면처리가 되어있다. 구동은 인발비의 정밀한 제어를 위해 AC servo를 이용하여, 개별구동 하였으며, 컴퓨터를 이용하여 인발비를 제어하였다. Fig. 1 은 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도를 나타낸다.

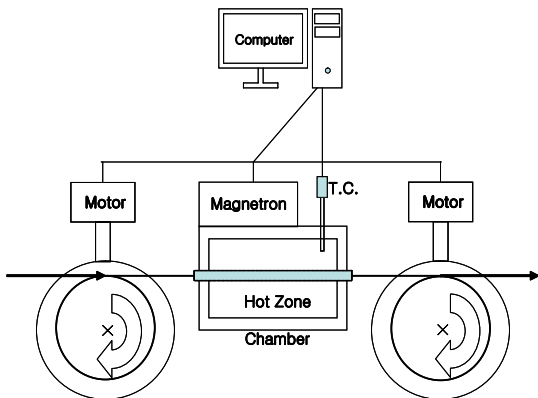


Fig. 1 Schematic description of the experimental system.

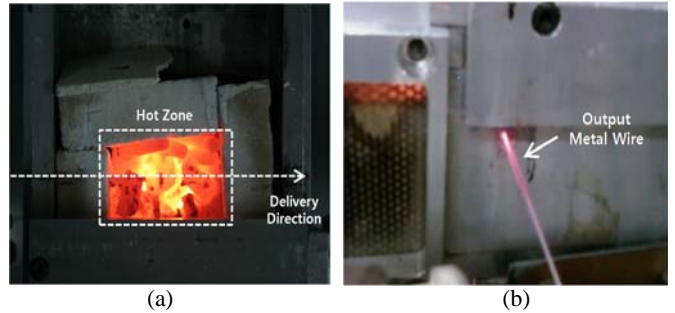


Fig. 2 Photographs of experimental device: (a) hot zone (b) output wire

Fig. 2는 본 실험장치를 이용하여 가열영역 내에서 시료가 마이크로파에 의하여 발열하는 모습 (Fig. 2a)과 가열 인발이 이루어진 시료의 생산모습 (Fig. 2b)을 보여준다.

2.1 실험조건

실험에 사용된 시료는 연성이 적은 직경 0.9745 mm의 스테인레스 와이어(stainless steel wire)이고, 실험 시 챔버 내부의 핫존 온도는 1,250~1,300℃로 유지하였다. 인발비(drawing ratio)는 기계적 적용범위는 다양하게 부여할 수 있으나, 실험이 가능한 1~1.6까지 단계적으로 변화를 줌으로써 인발비에 따른 직경변화를 살펴보았다. Table 1은 실험조건을 보여준다..

Table 1 Experimental conditions

Material	stainless steel wire
	diameter (mm) : 0.9754 C.V.(%) : 0.9412
Feeding velocity	0.3 (m/min)
Drawing ratio	1 ~ 1.6
Hot zone temperature	1,250 ~ 1,300 (℃)
Hot zone length	55 (mm)

3. 결과 및 토의

Table 2는 인발비에 따른 시료의 직경 감소를 측정된 결과를 보여준다. 실험결과에 따르면 연신비가 증가할수록 직경은 감소하는 것을 알 수 있다. 연신비가 1.6 일 때 시료의 직경감소율은 21% 정도가 되며, 연신비가 커질수록 변동계수가 증가함을 알 수가 있다.

Table 2 Wire diameter according to various drawing ratios

D.R.	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
Output wire diameter, mm	0.975	0.928	0.876	0.838	0.814	0.783	0.763
Diameter reduction ratio, %	0	4.782	10.166	14.042	16.527	19.675	21.677
C.V., %	0.941	1.319	1.431	1.817	2.127	2.477	2.856

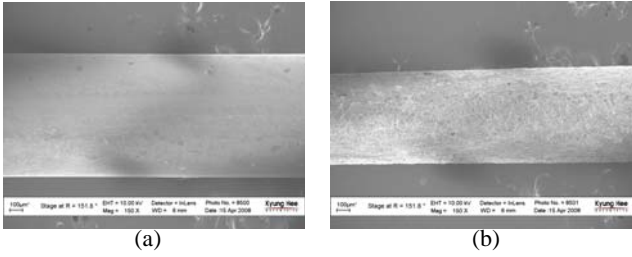


Fig. 3 Photographs of metal wires: (a) normal stainless steel wire (b) drawn stainless steel wire

Fig. 3은 연신비 1.6일 때, 와이어의 직경이 감소된 모습을 보여준다. 원료의 표면은 비교적 매끄럽고, 균일한 모습이지만 (Fig. 3a), 인발된 와이어는 표면이 비교적 거칠고, 불균일하며, 현저히 굵기가 감소된 것을 볼 수 있다.

만일, 와이어의 밀도가 일정하고, 인발 공정이 정상상태인 경우를 가정하면, 출력 와이어의 굵기는 질량보존에 의해 식 (1)과 같이 표현된다.

$$d_2 = \sqrt{\frac{d_1^2}{D.R.}} \quad (1)$$

여기서 d_1 은 입력 와이어의 굵기, d_2 는 인발된 와이어의 굵기, $D.R.$ 은 인발비를 나타낸다.

Fig. 4은 이론적 예측치와 실험값을 비교한 결과를 보여준다. 결과에 따르면, 이론적 추론치와 실험치에 오차가 존재하지만 경향이 일치함을 알 수 있다.

Fig. 5는 인발 전, 후의 시료 표면을 살펴본 SEM 사진이다. 사진 (b)에서 알 수 있듯이 가열 후 시료의 표면이 손상된 것을 관찰할 수 있다. 사진 (b)의 검게 보이는 부분의 성분을 알아보기 위하여 XPS(X-ray Photoelectron Spectroscopy) 분석을 하였다. Fig. 6은 시료의 인발 전, 후의 표면 상태에 대한 XPS의 정성적 분석 결과를 보여준다.

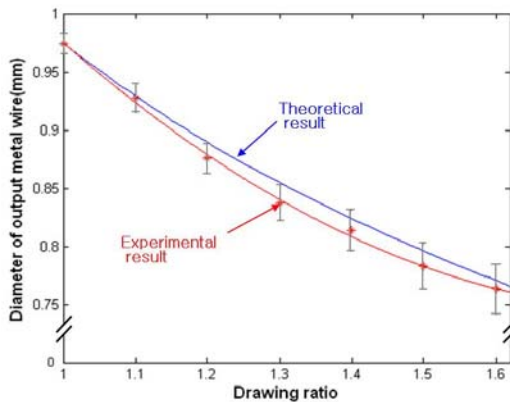


Fig. 4 Comparison of theoretical result with experimental result

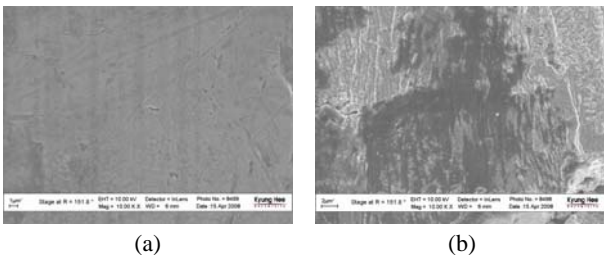


Fig. 5 SEM($\times 10000$) Photographs of metal wires: (a) normal stainless steel wire (b) drawn stainless steel wire

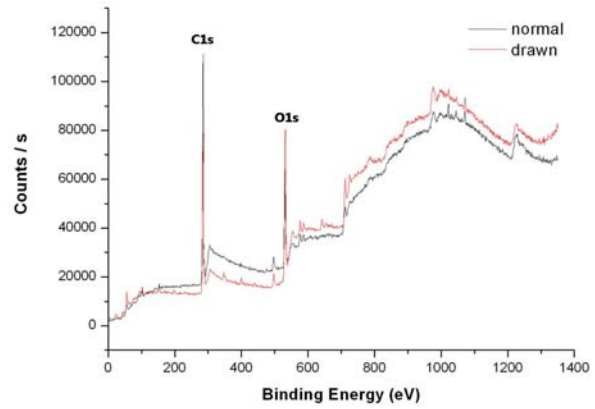


Fig. 6 Qualitative comparison of normal stainless steel wire with drawn stainless steel wire by XPS spectrums

그래프에서 볼 수 있듯이 검출된 탄소와 산소의 양의 변화가 관찰되었으며, 나머지 시료를 구성하는 성분의 변화는 거의 없음을 관찰할 수 있다.

Table 3은 시료의 인발 전, 후의 탄소와 산소의 성분 변화를 정량적으로 보여준다. 가열 인발 후, 산소의 양은 늘어나고 탄소의 양은 줄어들었음을 알 수가 있다.

Table 3 Quantitative component comparison of normal stainless steel wire with drawn stainless steel wire

specimen	element	peak	At., %
Normal stainless steel	C1s	284.96	77.56
	O1s	531.37	16.11
	Fe2p	711.43	2.25
Drawn stainless steel	C1s	285.11	57.52
	O1s	531.26	30.63
	Fe2p	711.39	3.16

따라서 Fig. 4에서 실험을 통해 얻은 결과가 이론값에 비해 작게 나타난 원인은 재료를 가열함으로써 발생하는 산화물에 의한 질량 손실과 기계적 구조에 의한 연신비의 오차가 반영된 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 극세 금속섬유를 생산하기 위하여 고주파를 열원으로 사용하였으며, 효율을 높이기 위해 챔버 내부에 핫존을 설치하였다. 그 내부에 감지제인 SiC를 이용하여 승온 시간을 단축하였고, 실제 공정이 일어나는 온도까지 효율적인 가열하였으며, 와이어를 연신하는 시스템이 유효하게 작동하였음을 확인하였다.

참고문헌

- Persson, L. and Enghag, P., "Basic principles of wire drawing", Wire Ind.(UK), 63(10), 727-733, 1996.
- Hillery, M. T. and McCabe, V. J., "Wire drawing at elevated temperatures using different die materials and lubricants", J. of Materials Processing Technology, 55(2), 197-205, 1995.
- Tiernan, P. and Hillery, M. T., "An investigation of the dieless drawing method for the production of mild steel wire," Wire J. Int., 32(12), 94-100, 1999.
- Kim, S. H., Paik, Y. N., Huh, Y., "Modeling and Characterizing the Steady State Dynamics of Fast Heated Hot Drawing Process Based on Microwave Heating Method", J. Korean Fiber Soc., 43(6), 312-320, 2006.