

마이크로 와이어의 크기에 따른 거동 연구 Study on the Size-dependent behavior of the micro-wire

*#고성현¹, 박현철¹, 허용학²

*#S. H. Ko(shko@postech.ac.kr)¹, H. C. Park², Y. H. Huh³

¹ 포항공과대학교 기계공학과, ² 한국과학표준연구원

Key words : platinum micro-wire, tensile test, size dependent behavior

1. 서론

미세선(Micro-wires)은 기계, 전기, 의공학 분야에서 초소형 기전 장치에 많이 쓰이고 있는 재료이다. 이러한 분야에서 쓰이는 미세선에 대한 기계적 거동의 평가는 초소형 기전 장치의 설계 및 성능 유지에 중요한 부분이다. 미세선은 제조 공정 조건 및 그 자체의 크기에 따라 같은 재료의 벌크 물성과는 다른 거동을 나타낸다. 이러한 거동은 미세선의 크기나 내부 구조에 의해 결정되는 경우가 있는데, 이를 기계적 크기 효과(mechanical size effect)라 불린다.

이러한 미세선에 대한 기계적, 열적 물성 평가들이 많이 이루어졌는데, 대부분 구리, 알루미늄, 금의 미세선에 대한 결과들이다. Khatibi [1] 등은 지름이 20, 50 그리고 125 μm 를 가지는 구리 미세선에 대한 인장 실험을 수행하였으며, 내부 구조와 시편 지름에 따라 구리 미세선의 강도가 변함을 알 수 있었다. Fallen [2] 등은 의공학에서 사용되는 MP35N(cobalt-nickel 합금)재료의 여러 크기의 지름을 갖는 미세선에 대한 인장 실험 및 전단 실험을 수행하여 재료의 거동 특성을 살펴 보았다. Kim [3] 등은 지름이 24 μm 인 미세 금 와이어에 대해 열처리에 따른 물성 변화를 실험적으로 연구하였다. 이러한 실험적으로 나타나는 결과들에 대한 분석은 대부분 시편의 내부 구조의 영향과 관련을 짓고 있으며, 특정 이론을 바탕으로 한 분석은 미비한 상태이다.

2. 재료

백금 계열의 금속(ruthenium, rhodium, palladium, osmium, iridium, and platinum)중에서 백금은 가장 많이 사용되는 재료 중에 하나이다. 이는 백금이 가지는 뛰어난 물성 때문인데, 높은 녹는점/취성(ductility)을 가지며 공기 중에서 부식이 잘 되지 않고 산에도 강한 성질을 가지고 있다. 이러한 이유로 많은 분야에 응용되고 있는데 전자 재료에서 귀 금속까지 다양하게 사용되고 있다. Table 1 은 일반적인 백금선에 대한 기계적 물성치를 나타내고 있다.

앞서 말했듯이, 본 연구는 미시 단위(small scale)에서 재료의 크기 의존(size dependent) 거동에 대해 살펴보는 것이 목적이다. 인장 실험을 통한 재료 거동을 보게 되는데, 15, 25, 40, 50, 125, 200, 250 μm 의 지름을 가지는 백금 미세선(platinum micro-wire)에 기계적 물성을 측정하고, 얻은 결과에 대한 크기 의존 거동을 분석하고자 하였다. 백금 미세선은 99.99 %의 순도를 가지며, 잔류 응력을 제거하기 위해서 약 800 $^{\circ}\text{C}$ 에서 풀림 공정(Annealing heat treatment)을 거쳤다. 인장 실험에서는 시편이 외적 지지가 없는(free-standing) 형태로써 미시 단위에서는 시편의 그립(gripping) 및 마운팅(mounting)이 중요한 부분이 된다. 또한 원치 않는 굽힘 모멘트가 발생하지 않기 위해 시편의 중립축과 하중 방향을 일치시켜야 된다.

Table 1 Mechanical properties of Platinum wire[4]

Density, g/cm^3	Tensile strength, MPa		Young's modulus, GPa		Poisson's ratio
	As-worked wire	207-241	Static	171	
21.45	As-worked wire	207-241	Static	171	0.39
	Annealed wire	124-165	Dynamic	169	

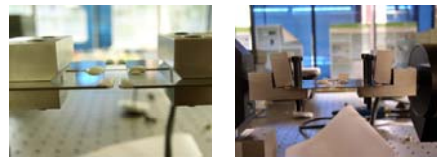
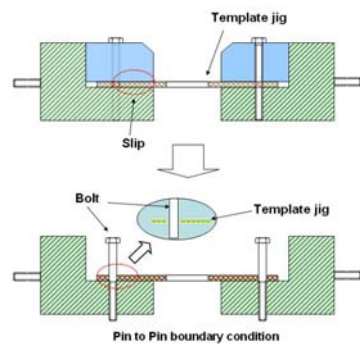
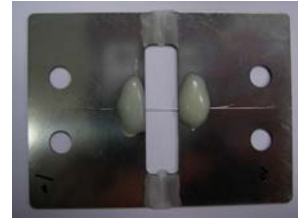


Fig. 1 Jig and mounting shape for micro wire

따라서, 미세 단위에서는 그립 부분에서 시편과 지그 사이 미끄럼(slip)이나 하중 방향과 시편 중립축의 불일치 등이 실험 결과에 큰 영향을 미치게 된다. 이런 실험 오차 발생 원인들을 최소화 하기 위하여 각 시편의 형상이나 재료에 따라 알맞은 지그 및 마운팅(mounting) 방법을 설계해야 된다.

인장 실험을 위한 외적 지지가 없는 형태의 시편은 실험 준비 기간에는 외부 하중을 버틸 지지대(support frame)가 필요하다. 이 지지대는 실험 하기 직전에 절단을 해야 되는데, 이때 시편에 충격 및 전하중(pre-tension)이 가하지 않도록 해야 된다. 본 실험에서는 시편에 가해지는 원치 않는 하중이 발생하지 않도록 새로운 방법을 제시하였으며, Fig. 1 에 지그 형상을 나타내었다. 지그는 템플렛(template) 형상으로 두 개의 조각으로 구성되며, 실험 하기 전에 두 조각을 분리시킨다. 시편을 지그에 마운팅할 때 사용된 접착제는 에폭시(DP-460, 3M)을 사용하였다. 이 에폭시는 강한 전단 강도를 갖고 있으며, 내환경성 특징을 가지고 있어 본 실험에 적합한 접착제이다.

3. 마이크로 인장실험

미세 시편의 크기가 마이크로미터이기 때문에 실험은 매우 높은 해상도의 하중과 변위를 요구한다. 본 실험에서 사용되는 NanoUTM 은 최대 하중이 500 mN 이며 이때 해상도는 50 nN 이다. 그리고 변위 해상도는 약 0.1 nm 이하 수준으로써 매우 정확한 변위를 측정할 수 있다. 따라서 NanoUTM 의 경우 시편의 크기가 15, 25, 40, 50 μm 인 경우에 인장 실험을 수행하기에 매우 적합하다. 그러나, 시편의

크기가 100 ~ 1000 μm 인 경우, NanoUTM 의 최대 하중의 범위를 벗어난 하중이 요구된다. 따라서, 125, 250, 500 μm 범위의 시편에 대하여는 하중 범위가 1 mN ~ 250 N 를 가지는 Tytron 250 장비를 이용하여 실험을 수행하였다. Fig. 2 에 Nano UTM 과 TYTRON 250 의 사진들을 나타내었다.

4. 결과

다양한 지름의 백금 미세선 시편을 이용하여 미시 단위에서 지름의 크기에 따라 어떠한 거동을 보이는지 살펴 보았다. 미세선의 지름이 15, 25, 40, 50 μm 인 경우, 나노 UTM 을 이용하여 인장 실험을 수행하였다. Fig. 3 은 백금 미세선에 대한 전형적인 응력-변형률 선도를 보여주고 있다. Fig. 4 은 백금 미세선의 인장 강도가 시편의 지름에 따라 어떠한 거동을 하고 있는지 보여준다. 시편의 지름이 작아질수록 인장강도가 작아짐을 알 수 있다. 지름인 15, 25, 40, 50 인 경우, 각각 인장강도가 171 ± 8.7, 178 ± 8.0, 196 ± 14.3, 233 ± 14.8 MPa 이다. 또한 TYTRON 250 을 이용하여 측정된 125, 200, 250 μm 인 경우 각각 324 ± 6.4, 188 ± 1.1, 159 ± 8.0 MPa 으로 시편의 지름이 작아질수록 인장 강도가 커지는 것을 알 수 있었다.

탄성 계수의 경우, 두 가지 값을 구하였는데, 하나는 응력-변형률 관계에서 초기 선형 증가 구간에서 기울기를 측정함으로써 그 재료의 탄성계수를 구할 수 있다. 또한, 동적 하중을 시편에 가함으로써 재료의 동적 탄성 계수 (storage modulus)를 구할 수 있다. Fig. 5 에 보여지듯이 동적 탄성 계수의 경우는 그 값이 약 170 GPa 로 문헌에 나온 값과 거의 비슷하게 나옴을 알 수 있다. 마이크로 인장의 경우, 변형률을 정확하게 측정하기가 어렵기 때문에 동적 하중을 이용하여 동적 탄성 계수를 구하여 재료의 물성치로 이용하는 것이 적합하다.



Fig. 2 Nano UTM and TYTRON 250

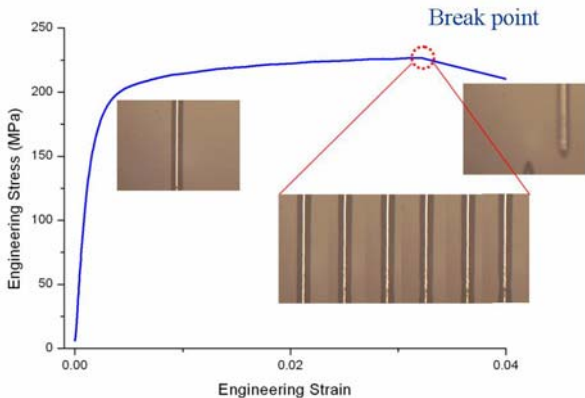


Fig. 3 Stress-Strain curve of platinum microwire

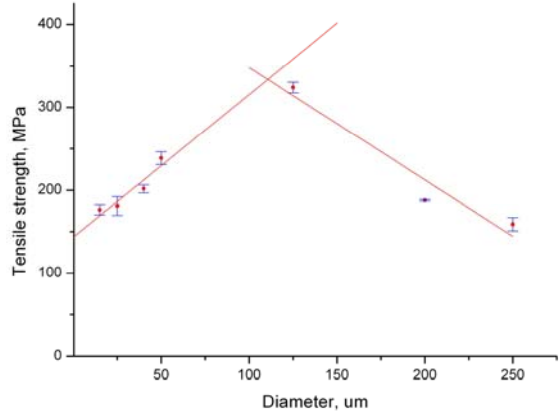


Fig. 4 Tensile strength vs. Diameter

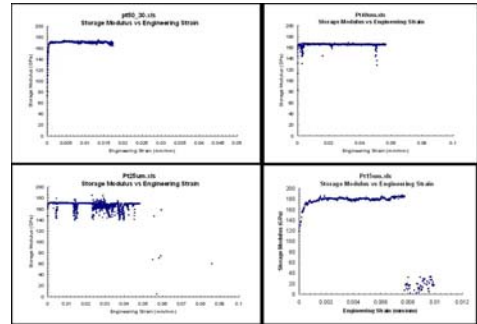


Fig. 5 Storage modulus vs. Diameter

4. 결론

현재까지 나노 UTM 및 TYTRON 250 을 이용하여 지름이 15 ~ 250 μm 인 백금 미세선의 물성에 대한 크기 효과 (size-dependent) 거동에 대해 실험적으로 살펴보았다. 이 범위의 크기에서의 실험 결과는 탄성계수의 경우, 시편의 크기와는 무관하게 일정한 값을 가지고 있으며, 인장 강도의 경우, 약 120 μm 의 크기를 경계로 하여 이보다 작을 경우 시편의 크기가 작을수록 인장강도가 작아지며, 120 μm 보다 클 경우 시편의 크기가 작아질수록 인장 강도는 반대로 커지는 것을 알 수 있었다. 앞으로 이러한 백금의 크기에 따른 강도의 변화를 보이는 실험 결과에 대한 정확한 분석을 필요하다. 이와 관련 시편의 단면 분석을 통하여 재료의 입자 크기 및 입자 경계 크기와 시편의 강도의 관계를 살펴보고자 한다.

참고문헌

1. G. Khatibi, A. Betzwar-kotas, V. Gröger and B. Weiss, "A study of the mechanical and fatigue properties of metallic microwires", *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, **28**, pp. 723 ~ 733, 2005
2. C. T. Fallen, J. Costello, G. Crawford and J. A. Schmidt, "Measuring the elastic properties of fine wire", *Journal of Biomedical Materials Research*, **58**(6), pp. 694-700, 2001
3. K. S. Kim, J. Y. Song, E. K. Chung, J. K. Park and S. H. Hong, "Relationship between mechanical properties and microstructure of ultra-fine gold bonding wires", *Mechanics of Materials*, **38**, pp. 119 ~ 127, 2006
4. ASM Handbook online, ASM International 2003