잉곳 슬라이싱용 Saw Wire의 연삭마모에 미치는 인장특성과 미세조직의 영향

황 빈 · 김동용 · 김희봉 · 임승호* · 임재덕* · 조영래†

부산대학교 재료공학부, *고려제강 주식회사

Effects of Tensile Properties and Microstructure on Abrasive Wear for Ingot-Slicing Saw Wire

Bin Hwang, Dong-Yong Kim, Hoi-Bong Kim, Seung Ho Lim*,
Jaeduk Im* and Young-Rae Cho†

Dept. of Materials Science & Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

*Kiswire LTD., Daemyeong-Myeon, Nam-Ku, Pohang City, Gyeongbuk 790-840, Korea

(2011년 4월 7일 접수 : 2011년 5월 20일 최종수정 : 2011년 5월 27일 채택)

Abstract Saw wires have been widely used in industries to slice silicon (Si) ingots into thin wafers for semiconductor fabrication. This study investigated the microstructural and mechanical properties, such as abrasive wear and tensile properties, of a saw wire sample of 0.84 wt.% carbon steel with a 120 μm diameter. The samples were subjected to heat treatment at different linear velocities of the wire during the patenting process and two different wear tests were performed, 2-body abrasive wear (grinding) and 3-body abrasive wear (rolling wear) tests. With an increasing linear velocity of the wire, the tensile strength and microhardness of the samples increased, whereas the interlamellar spacing in a pearlite structure decreased. The wear properties from the grinding and rolling wear tests exhibited an opposite tendency. The weight loss resulting from grinding was mainly affected by the tensile strength and microhardness, while the diameter loss obtained from rolling wear was affected by elongation or ductility of the samples. This result demonstrates that the wear mechanism in the 3-body wear test is much different from that for the 2-body abrasive wear test. The ultra-high tensile strength of the saw wire produced by the drawing process was attributed to the pearlite microstructure with very small interlamellar spacing as well as the high density of dislocation.

Key words saw wire, wear property, drawing, microstructure, ingot slicing.

1. 서 론

태양전지와 반도체 소자용 기관재료로 사용되고 있는 실리콘(Si) 웨이퍼의 급격한 수요 증가와 함께 잉곳(ingot)을 절단(slicing)하는 쏘와이어(saw wire)의 수요도 급격하게 증가하고 있다. 쏘와이어는 잉곳을 웨이퍼 형태로 절단하는데 필수적인 것으로 스테인리스강(stainless steel) 혹은 고탄소강의 소재가 사용되고 있다. 특히, 고탄소강 쏘와이어는 낮은 가격과 높은 인장강도를 갖기 때문에 산업현장에서 선호하고 있으며, 쏘와이어의 최근 개발 추세는 직경이 작은 쏘와이어의 개발을 통하여 톱밥의 형태로 발생하는 잉곳의 소모량(kerf loss)을 줄이는 쪽으로 진행되고 있다.¹⁻³⁾

쏘와이어의 직경이 줄어들면 잉곳의 소모가 줄어들어

결과적으로 웨이퍼(wafer)의 수율이 증가하게 된다. 하지만, 쏘와이어의 직경을 너무 줄이다 보면 절단과정 중 쏘와이어의 단선이 발생하게 되어 오히려 시간적으로 막대한 손실이 발생한다. 산업체의 요구 사항은 잉곳의 절단시 쏘와이어의 단선이 발생하지 않아야 하며, 동시에 내마모(wear resistance) 특성이 우수해 오랫동안 사용할 수 있는 것이다. 이런 이유로, 직경이 작은 쏘와이어의 개발을 위해서는 기계적 특성이 우수한 소재의 안정적인 제조공정 개발과 신뢰성이 높은 특성평가 기술이 필요하다.

내마모 특성을 향상시키기 위해 진행된 현재까지의 연구는 주로 쏘와이어의 인장강도와 표면경도를 높이려는 쪽으로 진행되었다. 그런데, 실제의 산업현장에서 잉곳의 절단시 나타나는 쏘와이어의 마모특성은 인장강도와 표면경도의 연구결과로는 설명하기 어려운 부분이 많았다.⁴⁻⁸⁾ 이유는 쏘와이어를 사용한 잉곳의 절단공정은 종래의 2물체 연삭마모(2-body abrasive wear)와는 달리 3물체 연

†Corresponding author

E-Mail : yescho@pusan.ac.kr (Y. -R. Cho)

삭마모(3-body abrasive wear)의 형태로 발생하기 때문이다. 특히, 마모특성은 인장강도와 표면경도의 영향도 받지만, 파괴인성(fracture toughness)과 연신율에도 영향을 받는다.⁷⁻⁸⁾ 특히, 3물체 연삭마모는 소재의 미세조직에도 크게 영향을 받으며, 현재 사용중인 쏘와이어는 직경이 대략 120 μm 로 매우 작기 때문에 신뢰성이 높은 마모특성을 측정하기가 매우 어려운 실정이다.

본 연구에서는 고탄소강의 패텐팅(patenting) 공정에서 중간선 열처리 공정시 와이어의 선속(linear velocity)을 변수로 해서⁹⁾ 제조한 직경이 120 μm 인 쏘와이어의 기계적 특성과 미세조직과의 관계에 대해 연구하였다. 기계적 특성으로는 마모특성, 인장특성 및 경도를 측정하였으며, 미세조직은 광학현미경과 전자현미경을 사용해서 관찰하였다. 특이한 점은, 동일한 시편에 대해 2물체 연삭마모와 3물체 연삭마모로 측정한 실험결과가 실험변수인 와이어의 선속변화에 대해 서로 반대 경향을 나타냈다. 그래서 인장특성과 마모특성에 미치는 패텐팅 공정변수의 영향을 미세조직과 마모기구 관점에서 연구하여 상관관계를 규명하고자 하였다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 시편의 소재는 탄소함량이 0.84%인 고탄소강 이었다. 직경이 5.5 mm인 와이어 형태의 소재를 2차례의 인발(drawing) 공정으로 직경이 0.86 mm인 와이어를 제조하였다. Fig. 1은 본 연구에서 수행한 실험방법의 개략을 나타낸다. 직경이 0.86 mm인 와이어를 패텐팅(patenting) 공정을 통하여 직경이 0.12 mm(120 μm)인 쏘와이어로 가공하였다. Fig. 1에서 보듯이 패텐팅 공정의 주요 변수(variable)는 인발하기 이전에 910°C 이상의 고온으로 유지된 터널형 로(furnace)와 570°C로 유지된 납조(Pb bath)를 통과시키는 와이어의 선속(linear velocity) 변화였다. 오스테나이트(austenite, γ 상)로 변태한 0.86 mm의 와이어가 납조로 이동시 터널형 로와 납조의 거리는 가능한 짧게 하였다. 중간선 열처리 공정시 와이어의 선속이 변하게 되면 0.86 mm 와이어가 고온의 로와 납조에 머무는 시간이 변해서 미세조직의 변화가 생긴다. 이어서, 전기도금법으로 황동을 2 μm 두께로 코팅한 후, 각도가 11°인 다이슬을 사용해서 직경이 120 μm 인 쏘와이어로 제작하였다. 인발 공정시 발생한 단면 감소율은 대략 98%로 계산되었다.

와이어의 선속을 4가지(40, 50, 60, 70 m/min)로 변화시켜 제조한 지름이 120 μm 인 쏘와이어에 대해 기계적 특성과 미세조직 분석을 하였다. 기계적 특성의 평가에서는 마모시험을 2가지의 서로 다른 방법으로 수행하였다. 2물체 연삭마모(2-body abrasive wear; grinding wear)와

Fig. 1. Schematic flow chart of this study. Major variable in this experiment is linear velocity of wire during patenting process.

3물체 연삭마모(3-body abrasive wear; rolling wear) 방법으로 쏘와이어의 마모특성을 측정하고 비교하였다. 2물체 연삭마모와 3물체 연삭마모는 각각 그라인딩(grinding)과 롤링마모(rolling wear) 원리와 비슷하기 때문에 본 연구에서는 편의상 2물체 연삭마모는 그라인딩으로 3물체 연삭마모는 롤링마모로 표현하기로 한다.

현장에서 사용되는 쏘와이어는 지름이 120 μm 로 매우 가늘기 때문에 마모특성을 평가하기가 쉽지 않다. Fig. 2는 본 연구에서 쏘와이어의 마모특성을 평가하기 위해 제작해서 사용한 장치의 개략도를 보여준다. 장치의 프레임(FE)에는 구동휠(DH)이 있으며, 시편인 쏘와이어(SW)는 직경이 50 mm인 알루미늄 봉의 표면에 부착된 SiC 샌드페이퍼(SP)에 접촉되면서 무게추(MW)와 연결된다. 구동휠이 시계 방향과 반시계 방향으로 왕복 운동을 하면 무게추는 하중과 구동휠의 동작에 의해 상하로 움직이게 된다. 이때, 쏘와이어는 SiC 샌드페이퍼와 2물체 연삭마모 형태로 그라인딩된다. 사용된 SiC 샌드페이퍼는 Grit P220 이었으며, 무게추가 상하로 움직인 거리(WS)는 대략 50 cm로 조절하였다. 마모시험은 15사이클의 주기로 400회 왕복운동 시키는 조건에서 수행하였으며, 마모시험 이전과 이후의 쏘와이어의 시편무게를 전자저울로 측정하여 무게 감소량(weight loss)으로 마모특성을 평가하였다. 각각의 실험조건에 대하여 최소 10개 이상의 시편으

FE: Frame of equipment DH: Driving wheel
SP: SiC Paper on fixed body MW: Moving weight (200 gr)
SW: Sample (Saw wire) WS: Weight stroke

Fig. 2. Schematic description of 2-body abrasive wear (grinding) test.

로 실험을 행한 후 이를 평균하여 실험결과를 얻었다.

Fig. 1의 패턴팅 공정에서 와이어의 선속 변화에 따른 미세조직의 변화를 알아보기 위해 광학현미경(optical microscope, OM)과 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM) 관찰을 하였다. 시편의 미세조직(microstructure)의 관찰을 위해서 지름이 120 μm 인 쏘와이어에 대해서 투과 전자현경(transmission electron microscope, TEM) 관찰을 하였다. TEM용 시편은 FIB(focus ion beam)를 사용해서 120 μm 로 인발한 방향과 나란한 방향으로 μm 범위의 시편을 절단한 후 추가의 이온밀링(ion milling) 법으로 얇게 가공하여 관찰하였다.

3. 실험 결과

본 연구에서는 그라인딩과 롤링마모 방법으로 쏘와이어의 마모특성을 평가하고, 이들 마모특성을 기계적 특성과 미세조직 관찰 결과를 연관시켜 설명한다. Fig. 3은 2가지의 서로 다른 방법으로 측정한 마모특성의 결과를 보여주는데, 패턴팅 공정시 와이어의 선속변화에 따른 무게감소(weight loss)와 직경감소(diameter loss)를 나타낸다. 무게감소는 와이어의 선속이 40 m/min일때 3.94 mg으로 나타나며, 와이어의 선속이 50, 60, 70 m/min로 증가함에 따라 무게감소는 각각 3.64, 3.37, 3.05 mg으로 점점 작아졌다. 즉, 와이어의 선속이 증가할수록 쏘와이어의 무게감소는 29%정도 줄어들어 내마모 특성이 우수하게 나타났다.

반면, Fig. 3에서 롤링마모로 인한 쏘와이어의 직경변화는 그라인딩의 경우와 전혀 다른 경향을 나타낸다. 동일한 조건에서 특정 깊이까지 SiC입자가 포함된 슬러리(slurry)를 뿌리면서 잉곳을 절단하였을 때, 쏘와이어의 직경감소는 와이어의 선속이 증가할수록 점점 증가하였다.

Fig. 3. Change of wear properties for saw wire dependence on linear velocity of wire. Weight loss was measured from grinding and diameter loss was measured from 3-body abrasive wear (rolling wear); (a) weight loss and (b) wear depth.

Fig. 4. Change of tensile properties for saw wire dependence on linear velocity of wire; (a) tensile strength and (b) elongation.

즉, 패턴팅 공정시 와이어의 선속이 40 m/min와 50 m/min 일 경우 와이어의 직경감소는 10 μm 와 11 μm 로 나타났으며, 선속이 60 m/min와 70 m/min로 증가함에 따라 지름감소는 14 μm 와 18 μm 로 더욱 크게 나타나서, 전체적인 지름감소 변화량은 80%로 증가하여 내마모 특성이 나빠졌다.

Fig. 4는 와이어의 선속변화에 따른 쏘와이어의 인장특성을 나타내고 있다. 와이어의 선속이 40 m/min인 경우 인장강도는 3,542 MPa로 매우 높게 나타났다. 와이어 선속이 증가할수록 인장강도는 더욱 증가해서 선속이 60 m/min와 70 m/min인 경우 대략 3,625 MPa로 더욱 높은 인장강도를 나타낸다. 또한, 열처리 선속의 변화에 따른 인장강도의 전체적인 증가량은 대략 2.3%로 크지는 않았다. 반면, 패턴팅 공정시 와이어의 선속 변화에 따른 연신율(elongation)은 선속이 증가할수록 2.68%에서 2.45%로 감소하다가 70 m/min 속도에서 2.64%로 상승하였는

Fig. 5. Change of microhardness for saw wire dependence on linear velocity of wire; (a) Knoop hardness and (b) vickers hardness.

데, 전체적인 변화율은 대략 9%로 나타났다. 쏘와이어가 3,600 MPa 이상의 매우 높은 인장강도와 2.5% 정도의 비교적 우수한 연신율을 나타내는 이유는 고탄소강의 패터닝 처리시 미세한 펄라이트가 형성되고, 후속의 98% 이상의 단면 감소율로 인발되는 과정에서 높은 가공경화 현상이 발생하기 때문이다.¹⁰⁻¹¹⁾

Fig. 5는 패터닝 공정시 와이어의 선속 변화에 따른 쏘와이어의 표면에서 15 μm 부분에서 측정된 경도변화를 나타낸다. 미소경도는 2가지 방법으로 측정하였는데, 누프 경도(HK)와 비커스 경도(HV)로 측정하였다. 미소경도의 측정방법에 무관하게 와이어의 선속이 증가할수록 미소경도는 증가하였다. Fig. 3에서 Fig. 5까지의 실험결과에서 패터닝 공정시 와이어의 중간선 열처리 변수인 와이어의 선속을 4가지로 변화시켰을 때 시편의 마모특성의 변화를 인장특성과 미소경도 특성을 더불어 설명할 필요가 있다. 이를 위해서는 각 시편에 대한 미세구조를 관찰해야 하며, 특히 펄라이트(pearlite)의 미세조직을 면밀하게 관찰해야 된다고 사료된다.

4. 고 찰

4.1 인장특성에 미치는 패터닝 공정 변수의 영향

금속재료의 기계적 특성은 미세조직에 의존한다. 본 연구의 경우, 0.84% 탄소 함유 고탄소강을 Fig. 1과 같이 910°C 이상의 온도에서 유지시켜 오스테나이트로 변태 후 570°C의 냉조에서 등온 변태시키면 탄소의 함량이 높은 세멘타이트(cementite, Fe_3C)와 탄소의 함량이 아주 낮은 페라이트(ferrite, α)로 구성되는 펄라이트가 생성된다. 탄소 함량이 0.80%인 공석강의 경우 등온 변태 커브에서 코(nose)부분의 온도는 550°C 정도이며, 0.84% 탄소 함유 고탄소강의 코 부분의 온도도 대략 570°C로 추정된다.¹²⁾

Fig. 6은 중간선 열처리시 와이어의 선속이 50 m/min

Fig. 6. TEM microstructure images of saw wire: (a) bright field image and (b) carbon mapping.

인 시편에 대한 투과전자현미경(TEM) 이미지를 나타낸다. Fig. 6(a)는 명시야상(bright field image)을 나타내며, Fig. 6(b)는 Fig. 6(a) 부분에 대응하는 탄소맵핑(carbon mapping)을 나타낸다. Fig. 6(a)와 (b)의 비교를 통하여 Fig. 6(a)의 각 부분에 대한 정보를 알 수 있다. 즉, Fig. 6(a)의 TEM 명시야상은 3개의 구역으로 구성되며, 수 nm의 선폭을 갖는 몇 개의 회색선 부분(C), 회색선으로 구역이 구분되는 흰 부분(F), 그리고 회색선으로 구역이 구분되는 검은 얼룩부분(B)으로 나누어 진다. Fig. 6(b)의 탄소맵핑 이미지에서 탄소의 함량이 높게 나타난 밝은 부분은 Fig. 6(a)에서 선폭이 수 nm인 회색선과 일치함을 확인할 수 있다. 따라서, Fig. 6(a)에서 회색선 부분(C)은 세멘타이트상이며, 회색선으로 구획되는 흰 부분은 페라이트상임을 볼 때, Fig. 6(b)는 펄라이트 미세조직이라는 것을 확인할 수 있다. 또한, Fig. 6(b)에서 세멘타이트로 구분된 검은 얼룩부분은 탄소농도가 높지 않았기 때문에 각종 세멘타이트 상을 포함한 탄화물이라고 보기는 힘들며, 오히려 심한 인발가공으로 생성된 전위셀(dislocation cell) 부분으로 판단된다.¹⁰⁾

Fig. 7은 패터닝 공정시 선속을 50 m/min로 중간 열처리한 후 지름이 120 μm 까지 인발한 시편에 대한 TEM 명시야상이다. 쏘와이어의 미세조직은 폭이 좁은 회색선의 세멘타이트와 폭이 넓은 구역으로 나타나는 페라이트가 교대로 이루어진 층상의 미세한 펄라이트임을 확인하였다. 층상의 펄라이트 미세조직은 아주 심하게 인발가공한 시편에서 나타나는 전형적인 현상이며,¹⁰⁾ 세멘타이트와 페라이트가 교대로 형성된 펄라이트 미세조직에서 층상간격(interlamellar spacing: d)의 변화는 시편의 기계적 특성과 밀접한 관계가 있다. Fig. 7의 (a)에서 (d)까지 TEM 이미지는 층상간격을 측정하기 위해 동일한 시편에서 임의의 서로 다른 위치에서 관찰한 명시야상이다. 동일한 시편에서도 펄라이트의 층상간격은 넓은 분포를 나타내는 특징을 나타내지만, 층상간격의 평균 값은 구할 수 있다. 와이어의 선속이 50 m/min 일 경우, 측정된 평균

층상간격은 15.6 nm로 매우 작았으며 최소값과 최대값은 각각 10 nm와 24 nm로 분포하였다.

Fig. 8은 Fig. 7의 방법으로 관찰한 펄라이트의 미세조직에서 와이어의 선속 변화에 따른 층상간격(d)의 변화를 나타낸다. 와이어의 선속이 증가할수록 층상간격의 평균값은 감소하는 경향을 나타낸다. Gomes 등의 연구 결과에 의하면, 펄라이트의 층상간격은 펄라이트로 변태할 때 변태온도가 중요한 인자라고 한다.⁶⁾ 본 연구의 경우, Fig. 1에서 보듯이 910°C 이상의 온도에서 특정시간 유지 후, 570°C의 납조에서 등온변태를 하기 때문에 펄라이트의 층상간격에는 큰 차이가 없을 것으로 예측된다. 본 연구의 경우, Fig. 8에 나타난 바와 같이 펄라이트 층상간격은 와이어의 선속이 증가할수록 약간 감소하였다. 이유는 와이어의 선속이 변화하면 910°C 이상의 오스테나이트화를 위한 터널형 로에 와이어가 머무르는 시간의 차이가 발생하기 때문으로 판단된다.

Fig. 1에서 터널형 로의 길이가 10 m 이상으로 길었기 때문에, 와이어의 선속이 40 m/min인 경우 오스테나이트화 시간은 대략 21초로 계산된다. 와이어의 선속이 증가하면 오스테나이트화 처리시간은 짧아지며, 와이어의 선속이 70 m/min로 증가할 경우 오스테나이트화 시간은 16초로 계산된다. 즉, 오스테나이트화 온도에 유지시키는 시간의 변화는 초기 오스테나이트 입자크기(prior austenite grain size, PAGS)에 영향을 주며,¹³⁾ 와이어의 선속이 증가해서 유지시간이 짧아지게 되면 PAGS는 작아지게 된다. 또한, PAGS가 작아지면 상대적으로 입계(grain boundary)의 넓

Fig. 8. Change of interlamellar spacing(d) for saw wire dependence on linear velocity of wire.

이가 증가하여, 펄라이트의 생성시 펄라이트 블록(block)과 펄라이트 콜로니(colony)의 크기를 작게 만든다. 이 결과를 Fig. 4의 와이어의 선속 증가에 따른 인장강도의 증가현상과 연관시키면 다음과 같이 요약된다. 와이어 선속 증가는 PAGS의 감소를 유발하고, 미세한 PAGS는 Fig. 8에서 보듯이 펄라이트의 층상간격(d)의 감소의 원인으로 작용한다. 결론적으로 Fig. 4에서 와이어의 선속 증가시 인장강도가 증가하는 이유는 미세한 PAGS로 인한 펄라이트의 층상간격의 감소에 기인하는 것으로 해석된다.⁴⁾

4.2 마모특성과 인장특성 및 미세조직의 관계

Fig. 3에서 와이어의 선속변화에 따른 마모특성에서, 그라인딩으로 측정된 무게감소 양과 롤링마모로 측정된 직경감소 양은 서로 반대되는 경향으로 나타난다. 그라인딩으로 측정된 무게감소 양은 와이어의 선속이 증가하면 감소하는데, 이 결과는 Fig. 4의 인장강도와 Fig. 5의 미소경도 변화로 설명이 가능하며 종래의 실험결과와 잘 일치한다.^{4,14)} 그런데, 롤링마모로 측정된 쏘와이어의 지름감소 양은 패터닝 공정중 와이어의 선속 증가시 오히려 증가하는 특이한 현상을 나타낸다. 롤링마모는 쏘와이어로 Si 잉곳의 절단시 현장에서 나타나는 현상으로써 매우 중요하다. 따라서, 쏘와이어의 특성평가에 있어서 롤링마모 특성의 이해는 가장 중요한 인자의 하나이기 때문에 와이어의 선속변화에 따른 쏘와이어의 지름감소가 생기는 이유에 대한 설명은 반드시 있어야 한다.

Fig. 9는 2가지의 서로 다른 방법인 그라인딩과 롤링마모 방법으로 마모시험한 쏘와이어 시편에 대한 표면사진을 나타낸다. Fig. 9(a)는 그라인딩한 시편의 표면에 대한 광학사진이며, Fig. 9(b)는 롤링마모 시험한 시편표면의 SEM사진이다. Fig. 9(a)에서 보듯이, 그라인딩한 시편

Fig. 7. TEM microstructure images of saw wire for sample of 50 m/min linear velocity of wire. From this photos the interlamellar spacing (d) can be calculated. TEM images from (a) to (d) are taken from same sample at different positions.

Fig. 9. Microstructural photos of saw wire after wear test: (a) grinding and (b) rolling wear.

의 경우 쏘와이어의 표면에 직선형의 깊은 홈인 스크래치가 선명하게 나타난다. 와이어의 선속이 증가하면 Fig. 4처럼 표면경도가 높아지고, 높은 표면경도는 스크래치의 깊이를 얇게 하기 때문에 Fig. 3에서와 같이 선속이 증가할수록 무게감소는 줄어들게 된다. 반면, 롤링마모한 시편은 얇은 스크래치(G)가 일부에서 발견되긴 하지만, 대부분의 경우 표면상태가 평활하며 미세한 요철(R)이 나타나는 특징을 갖는다.¹⁵⁾

Fig. 10은 롤링마모 현상을 좀더 자세하게 알아보기 위하여, 쏘와이어를 사용해서 Si 잉곳의 절단공정시 슬러리에 포함된 연마재와 잉곳 및 시편인 쏘와이어(SW)의 위치 관계를 마모 측면에서 도식적으로 나타낸 것이다.¹⁵⁾ Si 잉곳의 절단시 쏘와이어는 대략 20 N의 하중을 가하면서 초속 20 m의 선속으로 Si 잉곳에 대해 상대적인 운동을 하게 된다. 이때, 슬러리에 포함된 강한 연마재는 Si 잉곳 뿐만 아니라 시편인 쏘와이어에 심하게 충돌하면서 침식 혹은 연삭작용을 일으키게 된다. 이때, 연마재는 대부분 자유롭게 롤링(rolling)을 하게 되며, 롤링되는 도중에 계속적으로 잉곳과 시편에 충돌하여 잉곳과 쏘와이어를 침식시킨다.¹⁶⁾

패턴팅 공정시 공정변수가 마모특성에 미치는 영향에

Fig. 10. Schematic representation of 3-body abrasive wear (rolling wear) test that is used in ingot slicing in the industry.

대한 연구는 Fig. 3의 롤링마모시 직경감소 경향과 Fig. 4의 연신율의 변화를 Fig. 10의 롤링마모 특성원리와 관련시키면 설명이 가능하다. Fig. 3에서 롤링마모로 인한 쏘와이어의 직경감소 경향은, 선속이 70 m/min인 경우를 제외하면, Fig. 4에서 연신율의 변화와 반대되는 경향을 나타낸다. 즉, 연신율이 큰 2.5%인 시편의 경우 직경감소는 10 μ m로 적었지만, 연신율이 2.4%로 작았던 시편에서는 직경감소가 13 μ m로 더욱 크게 나타났다. 이상의 결과와 롤링마모의 원리로부터, 롤링마모는 시편의 표면경도 보다는 오히려 시편의 연신율에 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 연신율이 낮고 취성이 높은 시편의 경우, 슬러리 중의 연마재가 시편인 쏘와이어에 강하게 충돌하면 시편은 수많은 부스러기(debris) 형태로 마모가 생길 것이다. 하지만, 연성이 높은 시편이나 탄성이 높은 고무의 경우 연마재가 시편에 충돌하면 충돌에너지가 시편에 흡수되어 마모가 덜 발생한다.⁷⁻⁸⁾ 이렇게 볼 때, 롤링마모를 지배하는 인자는 인장강도와 표면경도 보다는 연신율이 더욱 중요하다고 판단된다.

5. 결 론

탄소함량이 0.84%인 고탄소강의 소재를 사용해서 인발 공정으로 직경이 120 μ m인 쏘와이어를 제조하였다. 패턴팅 공정에서 중간선 열처리시 와이어의 선속을 변수로 해서 제조한 쏘와이어의 기계적 특성과 미세조직과의 관계에 대해 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 와이어의 선속이 증가할수록 쏘와이어의 인장강도와 표면경도는 높게 나타났는데, 이유는 선속이 증가할수록 오스테나이트화 시간이 짧아 최종 시편인 쏘와이어의 미세조직에서 펄라이트의 층상간격이 좁아졌기 때문이다.
- 2) 와이어의 선속변화에 대한 2가지 다른 마모특성 평가방법에서, 그라인딩으로 측정한 무게 감소량은 감소하였지만, 롤링마모로 측정된 쏘와이어의 지름 감소량은 반대로 증가하였다. 이는, 그라인딩 특성은 인장강도와 표

면경도에 주로 지배되고, 롤링마모는 주로 연신율과 연성에 지배됨을 의미한다.

3) 직경이 120 μm 정도인 고탄고강 소와이어의 경우, 인장강도가 3,600 MPa 이상으로 아주 높게 나타났다. 이유는 펄라이트 미세조직에서 15 nm 정도로 좁은 층상간격과 높은 전위 밀도 때문이다.

참 고 문 헌

1. H. J. Moller, Adv. Eng. Mater., **6**, 501 (2004).
2. T. W. Ng and R. Nallathamby, Optic. Laser Tech., **36**, 641 (2004).
3. Z. J. Pei, X. J. Xin and W. Liu, Int. J. Mach. Tool. Manufact., **43**, 7 (2003).
4. C. M. Bae, W. J. Nam and C. S. Lee, Scripta Mater., **41**, 605 (1999).
5. P. H. Shipway, S. J. Wood and A. H. Dent, Wear, **203-204**, 196 (1997).
6. M. G. M. F. Gomes, L. H. Almeida, L. C. F. C. Gomes and I. L. May, Mater. Char., **39**, 1 (1997).
7. G. H. Yang and W. M. Garrison Jr., Wear, **129**, 93 (1989).
8. K. Osara and T. Tiainen, Wear, **250**, 785 (2001).
9. H. Sunada, J. Wadsworth, J. Lin and O. D. Sherby, Mater. Sci. Eng., **38**, 35 (1979).
10. A. H. Nakagawa and G. Thomas, Metall. Mater. Trans. **16**, 831 (1985).
11. M. Zelin, Acta. Mater., **50**, 4431 (2002).
12. M. Murakami, Y. Takanaga, N. Nakada, T. Tsuchiyama and S. Takaki, ISIJ. Int., **48**, 1467 (2008).
13. W. J. Kim, N. Kang, S. J. Kim, H. H. Do, D. Nam and K. M. Cho, Kor. J. Mater. Res. **21**, 187 (2011) (in Korean).
14. E. Rabinowicz, L. A. Dunn and P. G. Russell, Wear, **4**, 345 (1961).
15. R. I. Trezona, D. N. Allsopp and I. M. Hutchings, Wear, **225-229**, 205 (1999).
16. S. Bhagavat and I. Kao, Int. J. Mach. Tool. Manufact., **46**, 531 (2006).