

압출된 OFHC Cu 봉재의 집합조직과 마멸거동

이슬기¹, 김용석^{1#}, 조재형²

The effect of texture of an extruded OFHC Cu rod on its sliding wear characteristics

S. K. Yi, Y.-S. Kim[#], J. H. Cho

Abstract

The effect of texture of an extruded OFHC Cu rod on its sliding wear has been explored. Disk specimens with three different orientations were machined from the Cu rod for the wear test; surfaces of the disk were perpendicular (0°), inclined with a specific angle (45°), and parallel (90°) to the extrusion axis of the rod. The texture was analyzed using an X-ray goniometer by measuring {111}, {200}, and {220} pole figures of each specimen. The analyzed texture was correlated with wear-test results of the Cu specimen. Dry sliding wear tests were performed at room temperature using a pin-on-disk wear tester against an Al₂O₃ ball. Applied load, sliding distance, sliding speed were fixed as 20 N, 200 m, and 0.5 m/sec, respectively. The 45°-inclined (to the extrusion axis) disk specimen showed the lowest wear resistance with the least data scatters. It has been found that distribution of cube texture strongly influences wear rate of the extruded Cu rod.

Key Words : OFHC Cu rod, Dry sliding wear, Texture, Extrusion, Slip system

1. 서론

연성 재료의 미끄럼 마멸 시험은 국부적으로 극심한 소성 변형을 야기하며 [1], 이와 같은 소성 변형은 일반적으로 결정학적 집합조직에 변화를 준다고 알려져 있다 [2, 3]. 무산소동(Oxygen-free high conductivity copper)은 전성과 연성이 우수한 재료로 미끄럼 마멸 시 마멸면 직하에서 소성변형에 의해 연신된 전위 셀들이 많이 형성된다고 보고되어 있다 [4]. 그러나 현재까지의 연구는 주로 미끄럼 마멸 시험 도중 소성 변형에 의해 초기의 결정학적 집합 조직이 변화하는 양상을 연구하는데 초점이 맞추어져 왔고, 소재의 초기 우선방위가 소재의 미끄럼 마멸 특성에 미치는 영향에 관하여는 연구 보고된 결과가 거의 없는 실

정이다. 초기 집합조직과 미끄럼 마멸 특성과의 연관성, 특히 초기 시편에 어떤 집합조직이 발달하였을 때 내마모성이 증가한다는 등의 연구 결과는 그 실용성에도 불구하고 찾아보기 어렵다.

본 연구에서는 초기 우선조직이 미끄럼 마멸 특성에 미치는 영향을 규명하기 위하여, fcc 구조를 지닌 무산소동(OFHC Cu) 봉재의 상은 미끄럼 마멸 시험을 행하고 그 결과를 Cu 봉재의 초기 집합조직과 연계하여 분석하였다.

2. 실험방법

2.1 시험소재와 시편

본 연구에 사용한 소재는 상업용 OFHC Cu 봉재이다. 시편의 우선방위의 차이와 미끄럼 마멸

1. 국민대학교 신소재공학부

2. 한국기계연구원 부설 재료연구소

교신저자: 국민대학교 신소재공학부,

E-mail: ykim@kookmin.ac.kr

거동 간의 상관관계를 규명하기 위하여 봉재의 압출방향에 대해 수직인 방향(0° 시편), 평행한 방향(90° 시편), 그리고 45° 각도의 방향(45° 시편)으로, 직경 25 mm, 두께 8 mm의 디스크(disk) 마멸 시편을 제작하였다. 세 마멸시편은 모두 103±2 HV의 경도값을 나타내었다.

2.2 미끄럼 마멸 시험

미끄럼 마멸 시험은 pin-on-disk 마멸시험기를 사용하여 상온, 대기 중에서 실시 되었다. 일정한 마멸조건을 유지하기 위하여 시험온도는 23±2°C, 습도는 40±5%로 고정하고, 미끄럼 거리는 200 m, 마멸 트랙의 반경은 9 mm, 미끄럼 속도는 0.15 m/sec 로 일정하게 유지하였다. 마멸시험 하중은 20 N 이었고, 마멸 상대재로는 Al₂O₃ 구를 사용하였다. 시험 전 후 시편의 무게 변화를 측정하여 마멸 속도를 산출하였으며, 시험된 시편의 마멸면과 마멸 단면을 SEM 으로 관찰하여 마멸 기구를 분석하였다. 또한 각 시편의 우선방위를 X-선 고니오메타를 이용하여 {111}, {200}, {220} 극점도를 측정하여 분석하였고, 이를 마멸 시험 결과 해석에 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 미끄럼 마멸시험과 마멸면, 단면 관찰

시험된 OFHC Cu 시편은 등방성 조직을 지니었고 평균 결정립 크기는 250 μm 이었다. 그림 1 에 세 방위 시편의 미끄럼 마멸 시험 결과를 나타내었다.

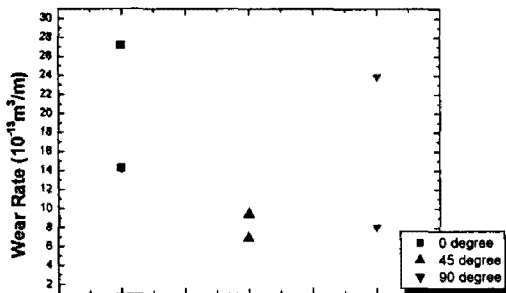


Fig. 1 Wear rate of the three-different-orientation OFHC Cu specimens.

0° 와 90° 시편의 마멸 속도가 45° 시편보다 높고, 45° 시편에 비해 동일 조건 하에서의 마멸

시험 시 마멸속도의 편차가 더 컸다.

마멸 시험 후 SEM 으로 관찰한 0° 시편과 45° 시편의 마멸면을 그림 2 에 나타내었다. 일반적인 금속재료 미끄럼 마멸면의 경우 마멸트랙은 동심원의 굽힘 흔적을 나타내는데, 그림 2 의 마멸면은 여러 층이 겹친 듯한 양상을 보인다. 이 같은 마멸면은 시편을 채취한 방위와 무관하게 세 방위 시편 모두에서 관찰되어, 시험된 OFHC Cu 시편의 특성으로 여겨진다.

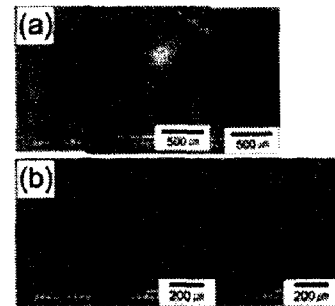


Fig. 2 SEM micrographs of worn surface of the wear tested OFHC Cu specimens: (a) 0° orientation, (b) 45° orientation to the extrusion direction.

확대 관찰한 마멸면(Fig. 3)에서는 수 μm 간격으로 미세하게 굽힌 흔적이 확인되었는데, 0° 와 90° 시편에서는 그 양상과 흔적 간 간격이 유사하였으나 45° 시편에서 관찰되는 굽힘 흔적은 비교적 불규칙하였고 곡률을 지니었다.

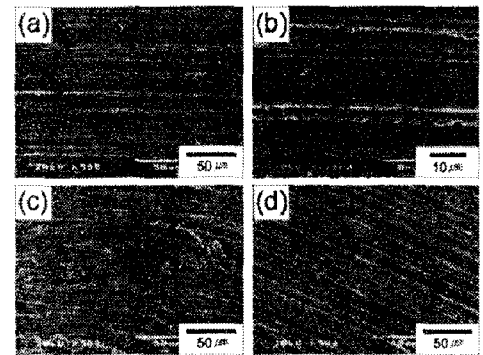


Fig. 3 SEM micrographs of worn surface of the wear tested OFHC Cu specimens: (a), (b) 0° (perpendicular), (c) 45°, and (d) 90° orientation (parallel) to the extrusion direction.

이 같은 마멸면의 차이는 45° 시편의 마멸 거동(속도)이 다른 두 시편과 다른 것을 설명해 준다. 마멸 시험 후 마멸면 직하의 경도를 측정한다.

결과를 그림 4에 나타내었다.

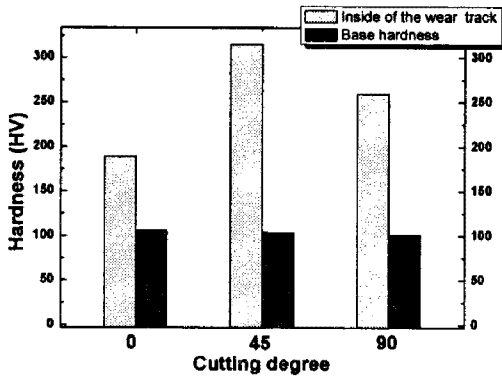


Fig. 4 Change of worn-track hardness after the wear test

마멸 시험 전 세 방위 시편의 경도는 유사하였으나 마멸 시험 후에 측정된 마멸면 직하의 경도 값은 매우 다른 것을 볼 수 있다. 마멸 속도가 가장 낮았던 45° 시편의 경도가 마멸 시험 후 가장 큰 폭으로 상승하였는데 그 증가량은 초기 경도의 약 3배 이상에 달하였다. 미끄럼 마멸 중 마멸면에서는 극심한 변형이 발생하고 시편의 가공경화가 우수할수록 마멸면과 마멸면 직하의 경화가 현저하게 된다. 그림 4의 결과는 45° 시편에서 가장 큰 가공경화가 발생한 것을 보인다.

그림 5에 마멸 시험 후 관찰한 마멸 단면을 나타내었다. 0° 시편의 마멸단면은 마멸 중에 결정립 간의 경계가 유지되고, 결정립이 마멸면에 가까워 질수록 미끄럼 방향과 평행하게 늘는 것을 보여준다 (그림 5 (b)). 90° 시편의 마멸단면 역시 극심한 소성 변형에도 불구하고 초기 결정립의 형태와 결정립계가 유지됨을 보인다 (그림 5 (f)). 이에 반하여 45° 시편의 단면(그림 5 (d))은 단순히 늘린 결정립 외에 초기 결정립 크기 (250 μm)에 비해 30% 정도 크기가 감소한 초기 결정립과는 다른 형태의 결정립들을 마멸면 직하 500 μm 깊이 영역에서 보인다. 이 같은 결정립들의 크기는 마멸면으로 다가갈수록 더욱 미세해졌고, 이들 결정립들이 극심한 변형에 의한 동적재결정의 결과임을 시사한다. 단면에서 관찰되는 다른 흥미로운 현상은 균열의 전파 유형이다. 0° 시편과 90° 시편은 마멸면 직하 50 μm 깊이에 미세한 공공들을 보이고(그림 5 (c)), 45° 시편은 깊이 10 μm 미만의 영역에서 100 μm 이상의 길이로 전파하는 균열을 보인다(그림 5 (e)). 그림 5 (c)는 공공이 생성된 지점과 마멸면 사이의

영역에서 소용돌이 형태의 변형이 발생한 것을 보이고, 45° 시편의 단면인 그림 5 (e)는 균열 발생 지점과 마멸 면 사이의 영역이 단단하게 경화되어 있음을 보인다.

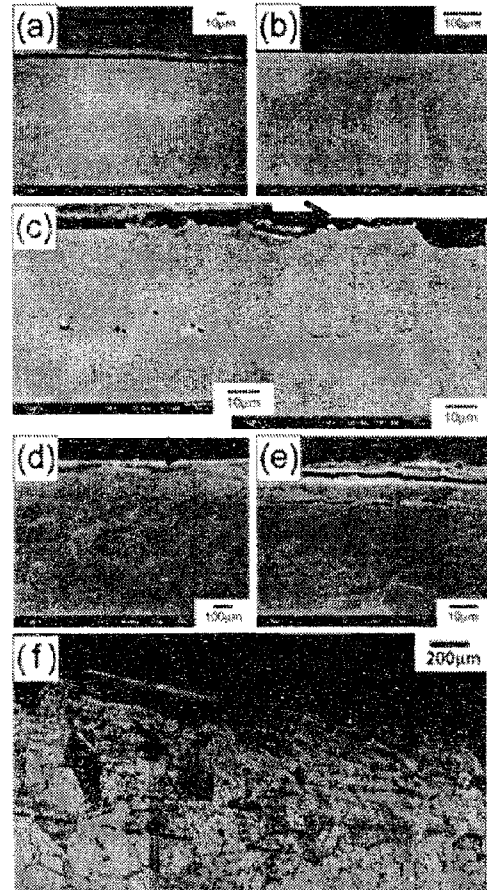


Fig. 5 Cross-section micrographs of wear tested OFHC Cu specimens: (a), (b), (c) 0° (perpendicular); (d), (e) 45° orientation; (f) 90° (parallel) to the extruded direction. The red arrow indicates the sliding direction.

3.2 극점도 분석

본 연구에 사용된 시편은 압출 방향에 대한 방위가 서로 다른 점 외에는 모두 동일한 과정을 거쳐 준비되었다. 그럼에도 불구하고 각 시편이 마멸면과 마멸단면 그리고 마멸 속도에서 큰 차이를 보인 것으로 미루어, 각 시편에 존재하는 서로 다른 우선방위가 마멸 시험 결과에 영향을 미친 것으로 생각된다. 우선방위에 대한 정보는 시편의 결정학적 집합조직을 분석함으로써 알 수 있었다. 그림 6에 각 시편의 미끄럼 마멸 시험이 행해진 면의 방위(면에 수직인 방향)를 ND로 하여 {111}, {200}, {220} 극점도 분석을 행한 결과를

나타내었다.

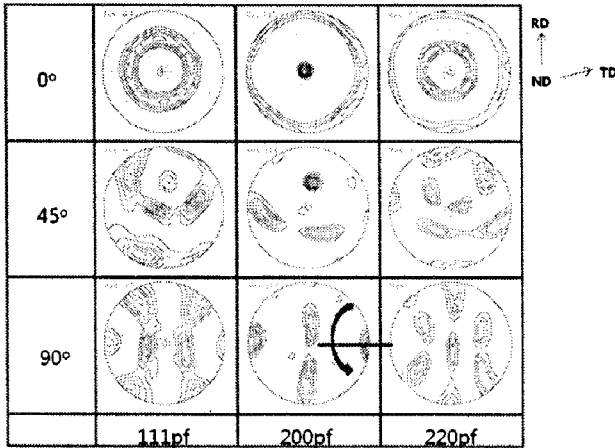


Fig. 6 {111}, {200}, {220} pole figures of the 0°, 45°, and 90° orientation OFHC Cu specimens.

각 시편의 극점도 분석 결과를 보면 0° 시편의 경우 <100>//ND fiber 가 많이 분포하고 있는 형태이며 cube texture 가 상당히 잘 발달 되어 있음을 알 수 있다. 90° 시편은 {200} 극점도 분석 결과를 화살표 방향으로 35 도 정도 회전 시키면 0° 시편과 같은 cube texture 를 갖게 됨을 알 수 있다. 반면에 45° 시편의 극점도는 마멸면에는 cube texture 가 거의 형성 되어 있지 않고 {111}면이 많이 분포함을 보여준다. Cu 의 결정구조는 면심입방구조 (FCC)이며 이 경우 {111}면이 주 슬립면이므로 45° 시편은 다른 두 시편에 비해 마멸면 자체에 슬립면이 많이 분포되어 있음을 극점도 분석을 통해 확인 할 수 있었고, 이 결과는 앞 절에서 보인 마멸면과 마멸단면의 결과를 잘 설명해 준다.

4. 결론

면심입방격자(FCC) 구조를 지닌 무산소동 (OFHC Cu) 압출재로부터 0° (마멸면이 압출방향

에 수직인 방위), 45° (마멸면이 압출방향에 45° 기울어진 방위), 90° (마멸면이 압출방향과 평행한 방위) 방위의 시편을 취하고, 상온 미끄럼 마멸 시험을 행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 압출 방향과 수직하거나 평행한 마멸면을 갖는 0° 시편과 90° 시편의 마멸속도는 높았고 결과의 편차도 심하였다.

(2) 45° 방위 시편의 마멸 속도는 낮았고, 결과의 편차도 적었다.

(3) 0° 시편과 90° 시편의 시험 전 마멸면에는 cube texture가 잘 발달되어 있었고, 45° 시편의 시험 전 마멸면에는 슬립면이 많이 분포하였다.

(4) 마멸면에 슬립면이 많이 분포한 경우 마멸면 직하의 가공경화가 더 활발하여 내마멸 특성이 더 우수한 것으로 확인되었다. 마멸면에 cube texture가 형성된 경우에는 불균일한 변형으로 인하여 마멸 속도 값의 편차가 매우 컸다.

참고 문헌

- [1] L. M. Pradeep, Kishore, and S. V. Kailas, 2008, Subsurface deformation and the role of surface texture – A study with Cu pins and steel plates, Sadhana, Vol. 33, Part 3, pp. 191~201.
- [2] W. Cai, J. Mabon, P. Bellon, 2009, Crystallographic textures and texture transitions induced by sliding wear in bronze and nickel, Wear, 267, pp. 485~494.
- [3] D.R. Wheeler, 1975, Texturing in metals as a result of sliding, Wear, 33, pp. 65~74.
- [4] P. Heilmann, W. A. T. Clark, D. A. Rigney, 1983, Orientation determination of subsurface cells generated by sliding, Acta metall., Vol. 31, No. 8, pp. 1293~1305