

초기 소성변형이 초미세 결정립 페라이트-마르텐사이트 이상조직 탄소강의 건식 미끄럼마열 특성에 미치는 영향

박준기¹ · 이슬기¹ · 신동혁² · 김용석^{1,*}

Effect of Prior Deformation on the Sliding Wear of Ultra-Fine Grained Ferrite-Martensite Dual Phase Steel

J. K. Park, S. K. Yi, D. H. Shin, and Y.-S. Kim

Abstract

Effect of prior deformation on the sliding wear of the ultra-fine grained (UFG) ferrite-martensite dual phase (DP) steel was investigated. The UFG DP steel was fabricated by the ECAP and subsequent intercritical annealing. The steel was cold rolled before the wear test, and the effect of the prior deformation on the wear was examined. The wear tests were carried out at various loads against a bearing steel ball. The wear rate of the UFG DP steel that did not experience the prior deformation was higher than that of the coarse-grained (CG) DP steel, because of more severe surface shear deformation. The wear rate of the specimens with prior deformation was much higher than that of the specimen without prior deformation. The deformed CG DP specimen showed higher rate than the deformed UFG DP specimen, and the rate-variation of the CG DP steel was much bigger under the same test condition.

Key Words: Ultra-fine Grained Dual Phase Steel, Sliding Wear, Dual Phase Steel, Prior Deformation

1. 서 론

산업 구조의 고도화에 따라 고강도 고인성 강의 필요성이 증대되었고, 이에 따라 여러 신 강종들이 개발되면서 초미세 결정립강(ultrafine grained steel, UFG steel)이 등장하였다[1]. 초미세 결정립강에 관하여는 이미 많은 연구가 진행되었는데, 최근 초미세 결정립강의 문제점인, 높은 인장강도에 비해 낮은 연신율을 보완하기 위하여 개발된, 미세한 마르텐사이트(martensite) 기지 내에 2 차상인 페라이트(ferrite)를 형성시킨 초미세립 이상조직 탄소강(ultrafine grained dual phase steel, UFG-DP steel)이 주목 받고 있다. 이상조직 탄소강(dual phase steel)은 우수한 연성과 높은 강도뿐만 아니라 낮은 항복비에 기인한 우수한 성형성, 뛰어난 피로 충격저항성 등 매우 우수한 기계적 성질을 지닌 것으로 보고 되고 있다.

내마멸성이 있어서는 결정립이 큰 이상조직 탄소강(coarse grained dual phase steel, CG-DP steel) 보다 UFG-DP 강의 내마멸성이 더 취약한 것으로 일부 연구자들이 보고하고 있다[2, 3]. 이들 연구에서는 UFG-DP 강의 낮은 내마멸성을 미세 마르텐사이트와 페라이트 상 경계에 의한 것으로 해석하고 있는데, 초미세 결정립 이상조직 탄소강(UFG-DP 강)에는 미세한 마르텐사이트 상이 조대한 결정립을 갖는 이상조직 탄소강에 비해 더 많이 분포하며, 이들 미세한 마르텐사이트 입자와 페라이트 상 사이의 경계가 미세 균열의 시발점으로 작용하여 마멸속도를 높이는 것으로 설명하였다. 또한 고하중 하에서는 단단한 마르滕사이트 상에

1. 국민대학교 신소재공학부

2. 한양대학교

교신저자: 국민대학교 신소재공학부, ykim@kookmin.ac.kr

의한 변형억제가 효과적으로 작용하지 못하여 내마멸 특성이 우수하지 않다는 연구 결과도 발표되었다[2, 3].

본 연구에서는 열처리를 통하여 마르텐사이트 조직을 갖게 한 0.15 wt.% C 탄소강을 ECAP(equal channel angular pressing) 가공하여, 그 결정립 크기를 1 μm 이하로 한 후, intercritical 열처리를 통하여 마르텐사이트 상 기자 내에 2 차상인 페라이트 상이 분포하는 초미세립 이상 조직강 (UFG-DP steel)을 제조하고 그 상온 미끄럼 마멸 양상을 분석하였다. 미세 마르텐사이트 상경계에서의 미세크랙 발생이 마멸 속도에 영향을 미치는 점을 고려하여, 초미세립 이상 조직 강(UFG-DP 강)을 마멸 시험 전에 압하량을 변화시켜 압연하여, 시험 전 초기 소성변형이 UFG-DP 강의 마멸에 끼치는 영향을 연구하였다. 마멸 속도의 비교를 위하여 조대한 결정립을 갖는 동일한 조성의 이상조직 탄소강(CG-DP 강)을 ECAP 가공을 제외한 동일한 열처리를 통하여 제조하고 그 마멸 특성을 시험하였다.

2. 실험 방법

2.1 시험소재

본 연구에 사용된 소재는 열적 안정성 향상을 위해 vanadium이 0.06 wt. % 첨가된 탄소함량 0.15 wt. %의 일반 저탄소강으로, 그 화학 조성을 표 1에 나타내었다. 탄소강을 1200°C에서 1시간 열처리 후, 급냉시켜 마르텐사이트 조직을 갖게 한 후, 그 결정립을 ECAP 가공을 실시하여 미세화 시켰다. ECAP 가공은 시편을 500°C의 ECAP die로 각 pressing마다 180° 회전시키는 route C를 사용하여 총 4 회 실시하였다. ECAP 가공을 거친 초미세립 탄소강을 730°C에서 10분간 intercritical annealing 열처리한 후 수냉을 통해 초미세 결정립을 갖는 이상조직 탄소강(UFG-DP 강)을 얻었다. 또한, 조대 결정립을 갖는 이상조직 탄소강(CG-DP 강)은 ECAP 가공을 실시하지 않고, 균질화 열처리 후 위의 열처리와 동일한 조건하에서 intercritical annealing 하여 구하였다. 이렇게 제조된 시편을 마멸 시험 전에 각각 10%, 30%, 50%의 서로 다른 압하량으로 압연하여 각 시편에 초기 소성변형량을 가하였다.

Table 1. Chemical composition of the low carbon steel used in the present study (wt. %)

C	Si	Mn	V	N	P	S
0.15	0.25	1.06	0.06	0.003	<0.01	<0.008

2.2 미끄럼 마멸 시험

미끄럼 마멸시험은 pin-on-disk 방식으로 실시되었다. 시험 중, 하중은 100N, 마멸거리는 100m, 트랙 반경은 2mm, 미끄럼 마멸 속도는 2.5m/s로 고정되었다. 마멸시험 상대재로는 AISI 52100 베어링 강(Hv: 845kg/mm²) 볼을 사용하였고, 상온, 항습 조건 하에서 마멸 시험을 실시하였다. 시험은 최소 3번 이상의 반복시험을 실시하여 그 평균값을 결과 데이터로 취하였다. 실험 전과 후의 시편 무게를 전자저울로 측정하여 마멸 속도를 산출하였으며, SEM, FESEM을 사용하여 마멸트랙, 마멸 단면, 마멸입자를 관찰하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 미세조직과 기계적 특성

그림 1에 시험에 사용된 시편(UFG-DP, CG-DP 강의 압연 전 및 50% 압연 후)의 조직사진을 나타내었다. CG-DP 강의 조직에서는 크기는 50 μm 이상의 크기를 지닌 aspect ratio가 큰 길쭉한 결정립이 다수 발견되었다. 이를 결정립들은 특정한 방향성이 없이 혼재하는 것으로 관찰 되었다. 이에 반하여 UFG-DP 강의 조직에서는 1 μm 이하의 크기를 지닌 구상화된 미세한 마르텐사이트 상이 관찰되었다. 2 차상인 페라이트상은

마르텐사이트 상보다 큰 $10 \mu\text{m}$ 이하의 크기로 관찰되었다. CG-DP 강을 압연한 조직에서 UFG-DP 강을 압연한 경우에 비하여 압연의 방향성이 더욱 잘 관찰 되었다.

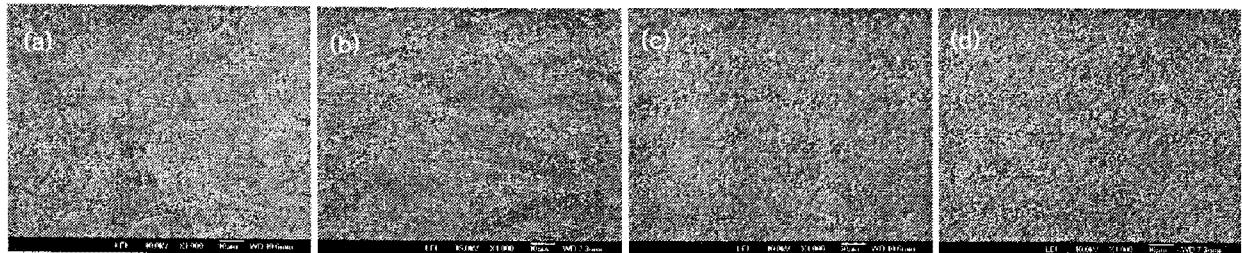


Fig. 1 FESEM micrographs of the CG-DP (a), rolled CG-DP (50%) (b), UFG-DP (c), and rolled UFG-DP (50%) (d)

압하량에 따른 각 시편의 경도값의 변화를 표 2에 나타내었다.

Table 2. Hardness of the UFG-DP and CG-DP specimens (HRB)

Specimen (reduction ratio)	Hardness (HRB)	Specimen (reduction ratio)	Hardness (HRB)
UFG-DP	96.9	CG-DP	95.4
UFG-DP (10%)	105.4	CG-DP (10%)	97.3
UFG-DP (30%)	107.2	CG-DP (30%)	105.0
UFG-DP (50%)	109.1	CG-DP (50%)	106.0

3.2. 미끄럼마멸 시험

그림 2에 압하량을 변수로 시행된 DP 강의 마멸시험 결과를 나타내었다.

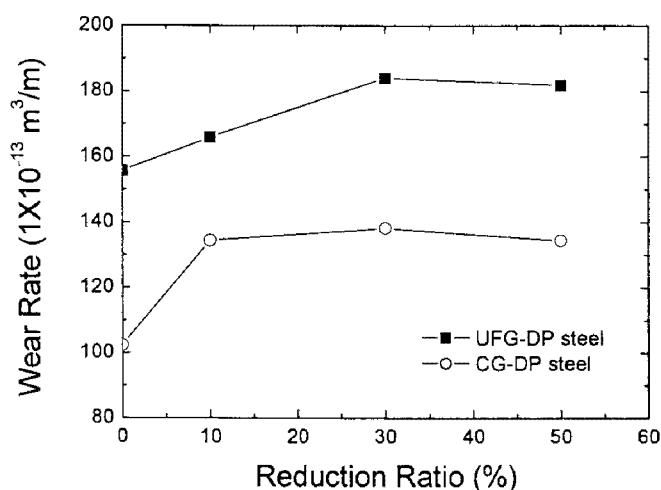


Fig. 2 Wear rate of the UFG-DP and CG-DP steel specimens as a function of the amount of prior deformation (reduction ratio of the rolling)

UFG-DP강의 마멸속도가 CG-DP강보다 높은 것을 그림 2는 보인다. 이 같은 결과는 경도가 올라가면 마멸속도가 낮아진다는 일반적인 경향과는 다르며, ECAP과 같은 강소성 가공에 의해 결정립계가 취약해진 때

문으로 설명되었다. UFG-DP 시편의 취약한 결정립계는 마멸트랙의 단면에서 확인되었다. UFG-DP 와 CG-DP 시편 모두에서 압연 후 마멸속도가 증가되는 양상이 관찰되었다. 30% 이상의 압하율에서는 경도가 일정하였는데 마멸속도 역시 크게 변화하지 않았다. 초기 소성가공된 시편의 마멸속도 변화를 설명하기 위하여 TEM으로 마멸트랙 직하 부분을 관찰하였고 그 결과를 그림 3에 나타내었다. 마멸 전 시편에서는 1 μm 이하의 결정립과 V 탄화물이 관찰되었다. 미끄럼 마멸시험 후 시편에서는 전위의 증가가 관찰되었는데, 결정립계 주위의 전위 밀도가 특히 높았다. 또한 압연된 UFG-DP 시편에서는 마멸 시험 후, 초기 UFG-DP 시편보다 더 미세한 결정립이 관찰되었다. 이 같은 결과는 더욱 미세화된 결정립이 미세 균열의 시발점으로 작용하여 UFG-DP 시편의 마멸속도가 증가하였음을 뒷받침 한다.

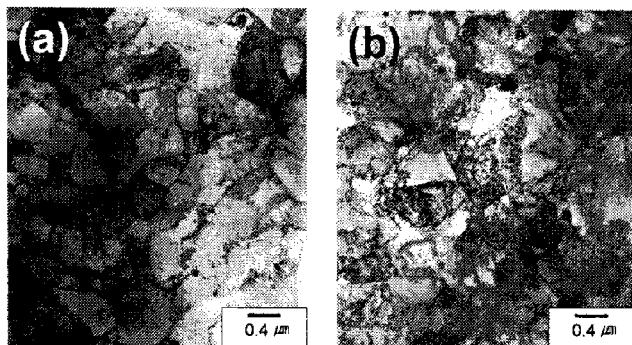


Fig. 3 TEM micrographs of the wear tested UFG-DP (a), and the rolled (50%) UFG-DP specimen (b)

압연되지 않은 UFG-DP 시편의 마멸면에서는 매끄럽게 잘 형성된 마멸트랙이 관찰된 반면, 압연된 UFG-DP 시편의 마멸면은 거친 마멸트랙과 함께 마멸입자가 0.5 μm 이하의 작은 알갱이 형태로 떨어져 나가는 양상을 보였다.

4. 결 론

초기 변형된 UFG-DP 강의 마멸시험을 실시하고 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 초미세 결정립 이상조직 강을 초기 압연한 결과 그 경도가 증가하였다.
- (2) 초미세 결정립 이상조직 강은 조대 결정립 이상조직 강보다 경도가 높음에도 그 마멸속도가 높게 측정 되었고, 초기 압하율이 증가할수록 그 마멸속도는 증가하였다. 초미세 결정립 이상조직 강의 높은 마멸속도는 불안정하고 취약한 결정립계의 영향으로 해석 되었다.

참 고 문 헌

- [1] S. Lee, P. B. Berbon, M. Furukawa, Z. Horita, M. Nemoto, N. K. Tsenev, R. Z. Valiev, T.G. Langdon, 1999, Developing superplastic properties in an aluminum alloy through severe plastic deformation, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 272, Iss. 1, pp. 63 ~72.
- [2] 유현석, 김용석, 2006, 가공경화와 산화층 형성에 의한 이상조직 저탄소강의 건식 미끄럼 마멸 거동, 한국소성가공학회 2006 춘계학술대회 논문집, pp. 149 ~ 152.
- [3] 유현석, 이슬기, 신동혁, 김용석, 2007, ECAP를 이용한 초미세립 이상조직 탄소강의 하중에 따른 마멸기구, 한국소성가공학회 2007 춘계학술대회논문집, pp. 299~303.