

가공경화와 산화층 형성에 의한 이상조직 저탄소강의 건식 미끄럼 마멸 거동

유현석¹ · 김용석[#]

Dry sliding wear behavior of plain low carbon dual phase steel by strain hardening and oxidation

H. S. Yu¹, Y.-S. KIM[#]

Abstract

Dry sliding wear behavior of low carbon dual phase steel, of which microstructure consists of hard martensite in a ductile ferrite matrix, has been investigated. The wear characteristics of the dual phase steel was compared with that of a plain carbon steel which was normalized at 950 °C for 30min and then air-cooled. Dry sliding wear tests were carried out using a pin-on-disk type tester at various loads of 1N to 10N under a constant sliding speed condition of 0.2m/sec against an AISI 52100 bearing steel ball at room temperature. The sliding distance was fixed as 1000m for all wear tests. The wear rate was calculated by dividing the weight loss measured to the accuracy of 10⁻⁵g by the specific gravity and sliding distance. The worn surfaces and wear debris were analyzed by SEM, EDS and a profilometer. Micro vickers hardness values of the cross section of worn surface were measured to analyze strain hardening behavior underneath the wearing surfaces. The wear rate of the dual phase steel was lower than the plain carbon steel. Oxidation on the sliding surface and strain hardening were attributed for the higher wear resistance of the dual phase steel.

Key Words: dual phase steel, sliding wear, strain hardening, oxidation, microstructure

1. 서론

이상조직 탄소강(dual-phase steel)은 연질의 페라이트(ferrite) 기지 내에 제 2 상인 강한 마르텐사이트(martensite)가 분산되어 페라이트의 우수한 연성과 마르텐사이트의 우수한 강도를 동시에 갖고 있는 철강재료이다. 또한, 이상조직 탄소강은 낮은 항복비(yield ratio)를 지니어 우수한 성형성을 보이며, 뛰어난 피로, 충격저항성 및 내마멸성(wear resistance)등의 우수한 기계적 성질을 갖고 있는 것으로 보고되고 있다 [1-2]. 이러한 이상조직 탄소강의 기계적 특성은 페라이트 기지 내 마르텐사이트의 분율, 형태, 크기 및 분포에 의해 그 특징이 결정되는 것으로 알려져 있다 [3].

이상조직 탄소강의 기계적 특성에 관한 많은 연구가 보고되고 있음에도 불구하고, 이상조직 탄소강의 마멸거동에 관한 연구보고는 현재까지 매우 드물다.

본 연구는 이상조직 탄소강의 마멸거동을 분석하기 위한 목적으로 수행되었다. 일반적으로 내마멸 특성은 경도가 높은 소재일수록 우수하나, 그 경향이 늘 일정한 것은 아니고, 연성 기지에 경한 입자가 존재하는 복합조직의 마멸 특성이 오히려 더 우수한 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 이상조직 탄소강의 미세조직이 마멸 특성에 미치는 영향의 분석에 연구의 중점이 두어졌다. 동일 조성의 일반 탄소강의 건식 미끄럼 마멸시험을 또한 함께 실시하여, 이상조직 탄소강의 건식 미끄럼 마멸거동과 비교 분석하였다.

1. 국민대학교 신소재공학부

교신저자: 국민대학교 신소재공학부,

E-mail: ykim@kookmin.ac.kr

2. 실험 방법

2.1 시험 시편

본 연구에 사용된 소재는 0.08 wt.% C 조성의 일반 저탄소강이었고, 그 화학적 조성을 표 1에 나타내었다. 시험 소재는 초기에 이상조직을 지닌 상태이었고, 불림 열처리를 통해 조직을 변화시켰다. 본 논문에서는 이하 초기 이상조직 저탄소강은 DP-steel로, 불림처리 한 시편은 Nor-steel로 표기하였다. 초기 이상조직 저탄소강은 판상이었는데, 판재로부터 30 x 30 x 2.5mm 크기의 마멸시험을 위한 시편을 채취하였다. 이상조직 저탄소강의 불림 열처리는 950°C에서 30분간 실시하였고, 이후 공냉하였다. 모든 시편은 마멸시험 전 #100 ~ #2000까지 SiC 연마지를 사용하여 grinding된 후 Al₂O₃ 1µm의 단계까지 미세 연마(polishing)되었다.

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

Fe	C	Mn	Si	P	Cr	Ni
98.24	0.08	0.45	1.10	0.02	0.01	0.03

2.2 미끄럼 마멸 시험

미끄럼 마멸시험은 Pin-on-Disk 마멸시험기로 상온·대기 중에서 실시되었다. 마멸시험 중 미끄럼 방향의 힘을 측정하여 마찰계수를 연속적으로 산출하였으며, 일정한 마멸조건을 유지하기 위해 시험온도는 23±2°C, 습도는 35±5%로 일정하게 유지하였다. 마멸거리는 1000m, 미끄럼 속도는 0.2m/s, 미끄럼 마멸트랙의 반경은 9mm로 일정하게 유지하였으며, 상대재로는 AISI 52100 베어링강(Hv: 845kg/mm²)을 사용하였다. 적용하중을 1, 5, 10N으로 변화시켰으며, 마멸시험 전 후 시편의 무게변화를 정밀도 10⁻⁵g의 전자저울로 측정하고, 측정된 시편의 무게 변화량을 시편의 밀도로 나누어 부피 변화량(마멸량)을 산출하였다. 이와 같이 산출한 마멸량을 마멸거리로 나누어 마멸속도를 계산하였다. 마멸시험 결과는 재현성과 정확도를 위하여, 동일한 마멸시험 조건 하에서 3번 이상 행하고, 시험 결과의 평균값을 그 시편의 마멸속도로 취하였다.

마멸시험 후 마멸면과 마멸단면, 그리고 마멸

입자를 SEM, EDS, profilometer를 이용하여 관찰하였다. 또한, 마멸단면의 미세경도를 측정하여 마멸시험 후의 가공경화 효과를 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 미세조직 및 기계적 성질

그림 1에 DP-steel과 Nor-steel의 미세조직을 나타내었다. DP-steel의 경우 페라이트 기지 내에 마르텐사이트가 균일하게 분포한 미세조직을 보인다. 반면에 950°C에서 30분간 불림처리 한 Nor-steel의 경우 페라이트 기지 내에 펄라이트가 혼재되어 있고, 결정립의 크기가 크게 증가한 미세조직을 보인다.

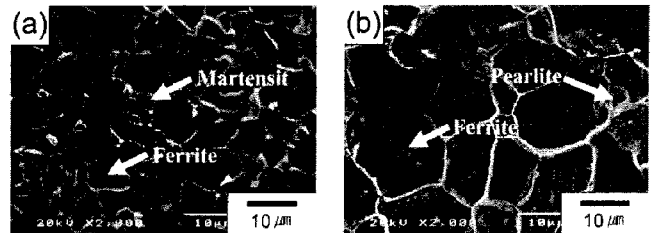


Fig. 1 SEM micrographs of the as-received DP-Steel (a), and the normalized Nor-steel (b).

표 2에 초기 DP-steel과 불림처리한 Nor-steel의 경도, 인장강도, 그리고 파단신율을 나타내었다.

Table 2. Mechanical properties of As-received and Normalized-Steel

Specimen	Hardness(Hv)	UTS(MPa)	Elongation(%)
DP-steel	210.5	586	37.3
Nor-steel	155.8	501	38.1

3.2 건식 미끄럼 마멸거동

그림 2는 AISI 52100 베어링강을 상대재로 하여 DP-steel과 Nor-steel을 건식 미끄럼 마멸시험한 결과를 보인다. 시험된 모든 하중에서 DP-steel은 Nor-steel에 비하여 더 우수한 마멸특성을 나타내었다. DP-steel이 나타내는 우수한 내마멸성을 그림 3에 나타난 마멸입자의 SEM과 EDS 분석 결과를 통해 설명할 수 있었다.

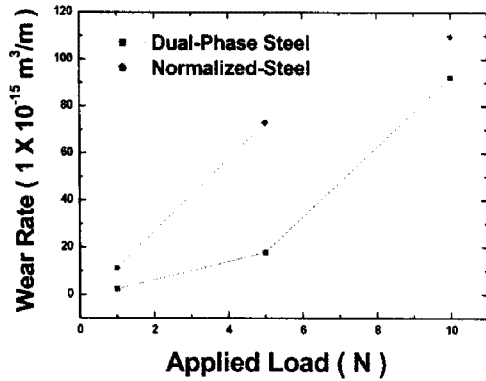


Fig. 2 Variation of wear rates of the DP-steel and the Nor-steel as a function of the applied load.

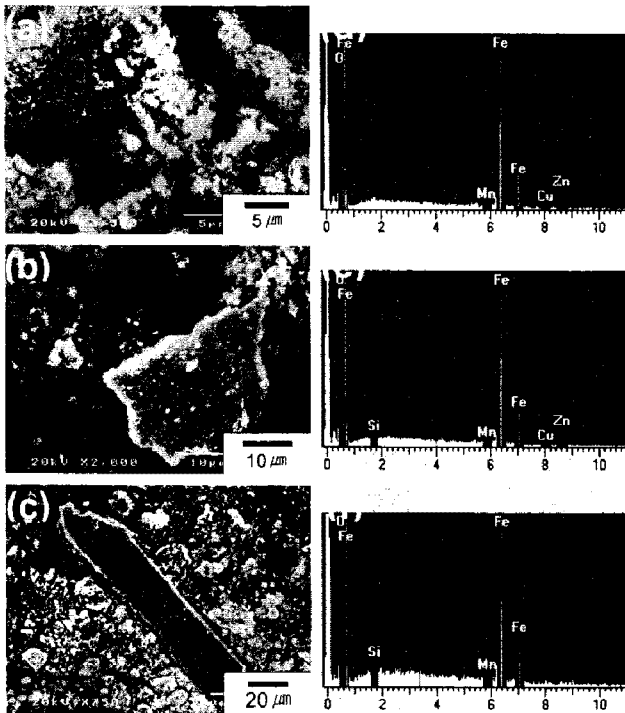


Fig. 3 SEM micrographs of the wear debris of the DP-steel tested at the load of 1N (a), 5N (b), and 10N (c) together with EDS analysis results of the wear debris. Each EDS analysis result is from the wear debris shown left.

그림 3에 보인 마멸입자의 SEM 사진 (a), (b), (c)를 살펴보면, 적용하중이 가장 낮은 1N에서는 마멸입자의 양상이 매우 작은 크기의 분말이 묻쳐 있는 형태이지만, 적용하중이 증가함에 따라 20~100 μm 이상의 얇은 판상형태로 마멸입자의 형

태가 변화하는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 사실은 하중이 증가함에 따라 DP-steel에서 가공경화가 발생하고, 표면이 경화되어 어느 정도 이상의 반복하중을 받기 전까지는 마멸입자가 떨어져 나가지 못하다가 어느 정도 이상의 반복하중을 받게 되면 균열이 전파되어 시편으로부터 얇은 판상형태의 마멸입자가 떨어져 나온다는 것을 시사한다.

DP-Steel의 건식 미끄럼 마멸시험 중 발생하는 가공경화 현상은, 적용하중 10N에서 시험된 시편의 마멸트랙의 깊이 방향으로 단면 경도를 측정 한 그림 4의 결과로도 확인할 수 있었다. 그림 4에 뚜렷이 보여진 것과 같은 가공경화에 의해 소성변형에 충분한 저항력을 갖게 되어 DP-steel의 마멸속도는 낮아진 것으로 생각된다.

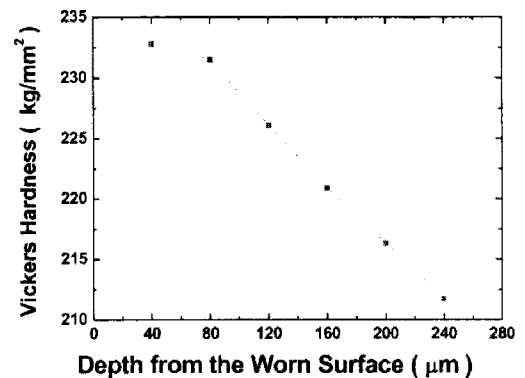


Fig. 4 Micro Vickers hardness measured at the cross section of the DP-steel wear tested at the load of 10N as a function of the depth from the worn surface.

그림 3 (d), (e), (f)에 나타낸 마멸입자의 EDS 분석 결과는, 1N에서 10N까지 모든 하중에서 시험된 시편의 마멸면에서 산소 피크(peak)을 보인다. 이 같은 결과는 DP-steel의 마멸시험 중 마멸트랙의 모든 부분에 걸쳐 산화층이 형성되었음을 나타낸다. 이러한 산화층은 마멸표면에 생성되어 상대재와 마멸시편이 직접적으로 닿지 않게 하는 역할을 하여 마치 코팅층이 생겨나듯한 역할을 하게 된다. 즉, DP-steel의 마멸시험 중에는 변형에 의한 가공경화와 함께 tribochemical 반응이 동시에 일어나 마멸속도를 낮추었음을 알 수 있다. 그림 3과 그림 4의 결과는 DP-steel의 마멸은 시험 전 하중에 걸쳐 생성되는 산화층과 마멸시험 중 발

생하는 마멸면에서의 가공경화 현상에 의하여 영향을 받는다는 것을 보여준다.

DP-steel 의 마멸입자가 적용하중 증가에 따라 미세 분말 상태에서 얇은 판상 형태로 변환한 것을 그림 5 에 나타낸, 마멸 트랙을 profilometer 로 분석한 결과로도 확인 할 수 있었다. 적용하중이 1N 인 경우 매우 좁고 얇은 마멸트랙이 생성된 반면에, 적용하중이 5N, 10N 으로 증가하면서 마멸 트랙의 폭과 깊이가 증가하였고 이와 동시에 트랙 내에서는 마멸입자가 큰 판상형상으로 떨어져 나간듯한 많은 각진 골들이 관찰되고 있다.

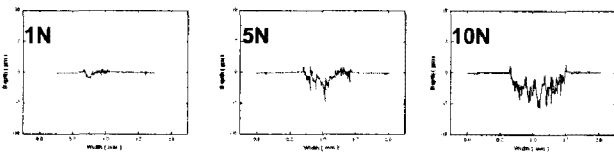


Fig. 5 Profilometer analysis results of the DP-steel tested at the loads of 1N, 5N, and 10N.

DP-steel 마멸시편의 마멸시편 후 마멸트랙 직하 단면을 SEM 으로 관찰한 결과를 그림 6 에 나타내었다. 마멸 시험 중에 페라이트 결정립들이 미끄럼 방향을 따라 심하게 변형되었음을 그림 6 은 잘 보여준다. 이에 반해 페라이트 결정립계에 위치한 마르텐사이트 입자들은 변형되지 않고, 페라이트의 변형을 일정 한도로 막는 역할을 하는 것으로 나타났다.

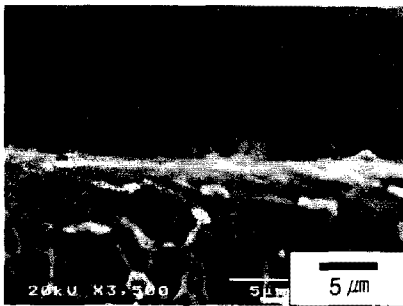


Fig. 6 SEM micrograph of the cross section of the DP-steel tested at 5N.

4. 결론

이상조직 저탄소강의 건식 미끄럼 마멸시험을 행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 페라이트 기지 내 마르텐사이트로 강화된 이상조직 저탄소강의 내마멸특성은 같은 조성의 다른 조직을 갖는 탄소강 보다 우수하였다.

(2) 이상조직강의 마멸은 좁은 마멸트랙, 얇은 마멸입자, 그리고 전 하중에 걸쳐 관찰되는 산화층으로 특징 지어졌다.

(3) 시험된 전 하중에 걸쳐 마멸입자와 마멸트랙에서 많은 산화층이 관찰되어, 이상조직 저탄소강의 마멸거동이 tribochemical 반응과 함께 진행되었음을 알 수 있다.

(4) 마멸 하중이 증가함에 따라 판상형태의 마멸입자의 수가 증가하여 가공경화 효과가 두드러짐을 나타내었다.

후기

본 연구의 소재는 POSCO 로부터 제공받았고, 이에 감사 드립니다.

참고 문헌

- [1] M.A. Maleque, H.H. Masjuki, 2004, The effect of intercritical heat treatment on the mechanical properties of AISI 3115 steel, J. Mater. Pro. Tech., Vol. 153-154, pp.482-487
- [2] R. Tyagi, S.K. Nath, S.Ray, 2001, Dry Sliding friction and wear in plaincarbon dual phase steel, Metall. Mater. Trans. A, Vol. 32A, pp. 360-367
- [3] P.H. Chang, A.G. Preban, 1985, The effect of ferrite grain size and martensite volume fraction on the tensile properties of dual phase steel, Acta Metall., Vol. 33, pp. 897-903