

## 결정립 미세화에 따른 이상조직 탄소강의 하중에 따른 마멸기구

유현석<sup>1</sup> · 이슬기<sup>1</sup> · 신동혁<sup>2</sup> · 김용석<sup>#</sup>

### Sliding Wear Mechanism of Ultra-Fine Grained Low Carbon Dual Phase Steel as a Function of Applied Load

H. S. Yu, S. K. Yi, D. H. Shin, Y. S. Kim

(Received May 10, 2007)

#### Abstract

Dry sliding wear behavior of ultra-fine grained(UFG) plain 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 UFG dual phase steel was compared with that of a coarse grained dual phase steel under various applied load conditions. Dry sliding wear test were carried out using a pin-on-disk type tester at various loads of 1N to 100N under a constant sliding speed condition of 0.20m/s 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 profilometer. Micro-vickers hardness of the cross section of worn surfaces were conducted to analyze strain hardening underneath the contact surfaces. The wear mechanism of the UFG dual phase steel was investigated with emphasis on the unstable nature of the grain boundaries of the UFG microstructure.

**Key Words** : UFG Dual Phase Steel, Dry Sliding Wear, ECAP, Wear Mechanism, Martensite

#### 1. 서 론

초미세 결정립(ultrafine grained) 재료는 인성의 큰 감소 없이 우수한 상온 강도뿐만 아니라 우수한 기계적 성질을 나타낸다고 알려져 있다[1]. 또한, 페라이트(ferrite) 기지 내에 강한 마르텐사이트(martensite) 상이 분산되어 있는 이상조직(dual phase) 탄소강은 높은 연성과 강도, 낮은 항복비에 기인한 우수한 성형성, 뛰어난 내피로, 충격저항성 및 내마멸성(wear resistance)등의 우수한 기계적 성질을 갖고 있는 것으로 보고되고 있다[2~3].

본 연구자들은 탄소함량이 0.08wt. %인 저탄소 이상조직 강(plain low carbon dual phase steel) (결정립 크기: 10 $\mu$ m 정도)의 마멸거동을 연구하고, 이상조직 탄소강이 동일 조성의 다른 미세조직을 지니는 탄소강에 비해 우수한 마멸 특성을 보임을 기 보고 하였고, 이상조직 강의 우수한 내마멸 특성을 마멸표면에서 생성되는 산화층과 가공경화에 의한 표면경화 현상, 그리고 페라이트 결정립계에 분포한 강한 마르텐사이트입자가 소재의 변형을 억제한 때문으로 분석하였다[4].

본 연구에서는 탄소함량 0.15wt.%, S15C 이상조

1. 국민대학교 신소재공학부

2. 한양대학교

# 교신저자: 국민대학교 신소재공학부,

E-mail: ykim@kookmin.ac.kr

직 탄소강의 결정립을 ECAP (Equal Channel Angular Pressing) 공정을 통해 미세화시키고, 초미세립 이상조직강의 마멸 특성을 분석하였다. 또한, 동일 조성의 조대한 결정립 이상조직 탄소강의 마멸시험을 함께 실시하여 초미세 결정립을 갖는 이상조직 탄소강의 마멸 특성과 비교 분석하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 시편 제작

본 연구에 사용된 소재는 열적 안정성 향상을 위해 V이 0.06wt. % 첨가된, 탄소함량 0.15wt. %의 일반 저탄소강이다. 시편의 화학 조성을 Table 1에 나타내었다. 결정립 미세화를 위해 ECAP을 실시하였다. 각 pressing 마다 180° 회전시키는 route C를 사용하여, 시편을 500°C의 ECAP die로 통과시키는 ECAP cycle을 총 4회 반복 실시하였다. ECAP을 통해 얻은 초미세립 탄소강을 730°C에서 10분간 열처리(intercritical annealing)하고 수냉시켜 초미세 결정립을 갖는 이상조직 탄소강을 얻었다. 또한, 조대 결정립 이상조직 탄소강 조직은 ECAP 가공을 실시하지 않고, 균질화 열처리 후 위의 열처리와 동일한 조건하에서 intercritical annealing 후 수냉하여 얻었다.

본 논문에서는 이하 초미세 결정립을 갖는 이상조직 탄소강을 UFG-DP 로, 조대 결정립을 갖는 이상조직 탄소강을 CG-DP 로 표기하였다. 모든 시편은 마멸시험 전 SiC 연마지를 사용하여 #100~#2000까지 연마한 후 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1μm의 단계까지 미세 연마하였다.

**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 미끄럼마멸 시험

Pin-on-disk 마멸시험기를 사용하여, AISI 52100 베어링 강(Hv: 845kg/mm<sup>2</sup>)을 상대재로, 이상조직 탄소강의 건식 미끄럼 마멸시험을 상온·대기 중에서 실시하였다. 마멸 하중을 1N에서 150N까지 변화시켰는데, 10N 하중까지는 저하중 마멸시험기를, 그리고 그 이상의 하중에서는 고하중 마멸시험기를 사용하여 시험하였다. 마멸 시험 전 후의

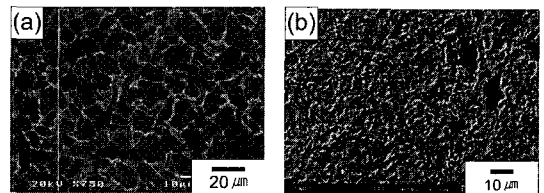
디스크 시편의 무게변화를 정밀도 10<sup>-5</sup>g의 저울로 측정하여 계산하였고, 마멸속도는 마멸시험 전 후의 무게변화를 시편의 이론밀도와 마멸거리로 나누어 계산하였다.

저하중 마멸시험의 실험조건은 미끄럼 거리 1000m, 마멸트랙 반경 3mm, 미끄럼 속도 7cm/s 이었고, 고하중 마멸시험의 실험조건은 미끄럼 거리 100m, 마멸트랙 반경 2mm, 미끄럼 속도 5cm/s 이었다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 미세조직

Fig. 1은 CG-DP와 UFG-DP 시편의 미세조직을 SEM으로 관찰한 결과를 보인다. 두 조직 모두 페라이트 기지 내에 마르텐사이트가 균일하게 분포된 미세조직을 보이고 있다. CG-DP 시편의 경우 10~20μm 정도의 조대한 결정립이 관찰되고 있지만, UFG-DP 시편의 미세조직에서는 1μm 이하의 매우 미세한 결정립이 관찰되고 있다. UFG-DP 시편에서 등축 페라이트와 마르텐사이트가 고르게 분포하는 것은, ECAP 과정 중에 pearlite가 분절되면서 이후의 intercritical annealing 동안에 pearlite 내부의 탄소가 매우 균일하고 빠르게 확산되었기 때문으로 사료된다.



**Fig. 1 SEM micrographs of the CG-DP (a), and UFG-DP (b) specimens.**

### 3.2 저하중 마멸시험

Fig. 2에 5N 이하의 낮은 하중에서 시험된 마멸 시험 결과를 마멸속도 대 마멸하중의 그래프로 나타내었다. 시험된 전 하중에서 페라이트-마르텐사이트의 이상조직 탄소강은 페라이트-페라이트 조직의 균질화된 시편보다 우수한 내마멸 특성을 보이고 있으며, 동일한 이상조직 일지라도 ECAP을 통해 결정립을 미세화 시킨 UFG-DP 시편이 CG-DP 시편보다 더 우수한 내마멸 특성을 보이고 있다. 이상조직강의 우수한 내마멸 특성은 이전

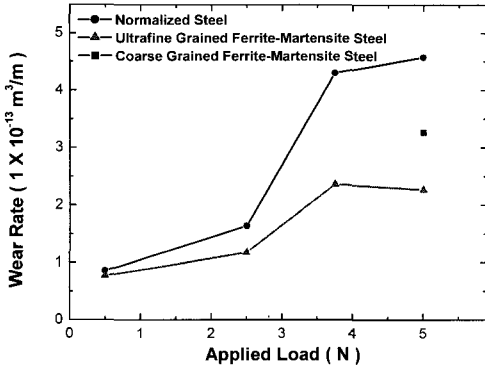


Fig. 2 Variation of wear rates of the UFG-DP, CG-DP and normalized steel specimens as a function of the applied load

연구[4]에서 확인된 바와 같이 마멸시험 중 발생하는 산화층과 가공경화에 의한 표면경화 효과로 설명된다.

UFG-DP의 우수한 내마멸성은 Fig. 3에 보인 마멸단면의 SEM 사진과 마멸기구의 모식도에 의해 설명된다. 시험 전 시편 내부에 CG-DP 시편에는 평형 결정립계가, UFG-DP 시편에는 비평형 결정립계가 존재한다. 반복적인 마멸하중이 가해짐에 따라 CG-DP 시편의 경우 Fig. 3 (a)에서 볼 수 있듯이 미끄럼 방향을 따라 페라이트 상이 변형하기 시작하고, 다수의 shear band가 형성된다. 마멸이 진행되며, 결정립의 변형이 심해지고 변형 불균일 부에서 균열이 발생하게 된다. 생성된 균열은 마멸면 직하에 형성된 shear band를 따라 전파하고 이후 마멸입자가 형성되며 입자는 마멸면으로부터 떨어져 나가게 된다. 반면, UFG-DP 시편의 경우에는 Fig. 3 (b)에서 볼 수 있듯이 미세하고 고르게 분포되어 있는 마르텐사이트 입자들이 페라이트의 변형을 억제하며, 결정립들의 변형이 효과적으로 억제된다.

Fig. 4에 UFG-DP 시편의 마멸시험 후 마멸단면의 깊이를 변수로, 마멸면 직하 여러 부위의 비커스경도를 측정된 결과를, 미소 비커스경도 대 마멸면으로부터의 깊이 그래프로 나타내었다. 그림 4의 결과는 마멸트랙 직하 300 $\mu$ m의 깊이까지 약 300kg/mm<sup>2</sup>의 경도값을 보여주고 있으며, 이 같은 결과는 UFG-DP 시편에서 마멸시험 중 매우 큰 가공경화가 일어났음을 잘 보여준다. 이 결과는 마멸시험 중 UFG-DP 시편의 변형이 억제되었다는 것을 간접적으로 시사한다.

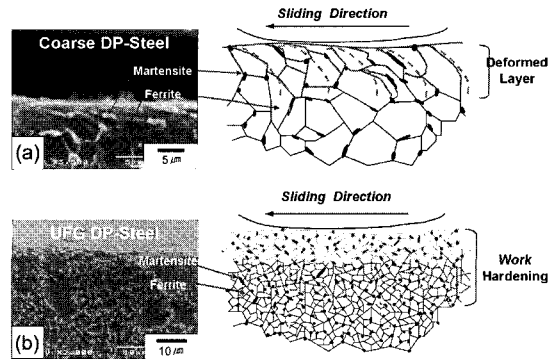


Fig. 3 SEM micrograph and wear mechanism of the cross section of UFG-DP and CG-DP tested at 5N

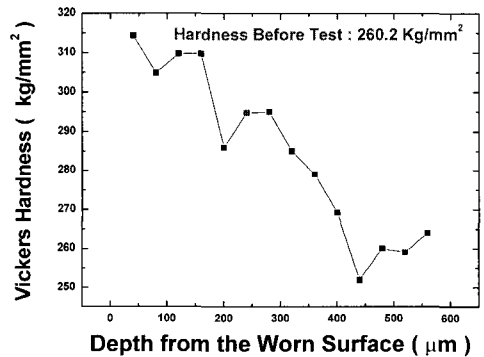


Fig. 4 Micro Vickers hardness measured at the cross section of UFG-DP wear tested at the load of 5N as a function of the depth from the worn surface

Fig. 3과 Fig. 4의 결과를 종합하면, 5 N 이하의 낮은 하중에서 UFG-DP의 우수한 내마멸 특성은 미세하게 분포되어 있는 martensite에 의한 변형억제현상과 시험 중 발생하는 가공경화에 의한 것으로 특징지어진다.

### 3.3 고하중 마멸시험

Fig. 5에 10N 이상의 적용하중으로 시험된 UFG-DP 시편과 CG-DP 시편의 마멸시험 결과를 마멸하중을 변수로 나타내었다. 저하중 마멸시험결과와는 상이하게 CG-DP 시편이 UFG-DP 시편보다 더 우수한 내마멸 특성을 보이고 있다. 그리고 50N 이상의 하중에서는 UFG-DP 시편과 CG-DP 시편의 마멸속도 차이가 그 이하의 하중에서보다 더욱 커지는 양상을 보이고 있다.

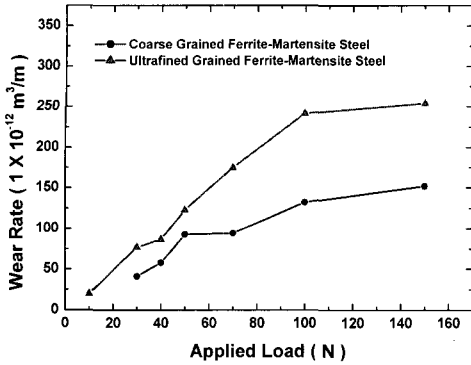


Fig. 5 Variation of wear rates of UFG-DP and CG-DP as a function of the applied load

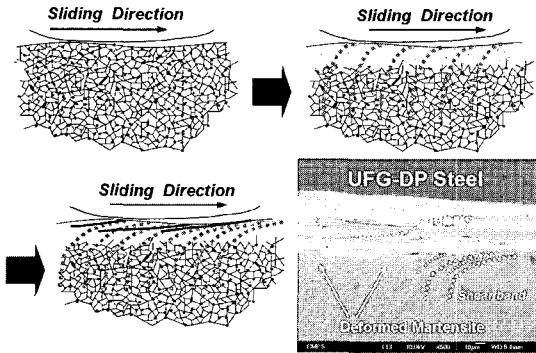


Fig. 6 SEM micrograph and wear mechanism of the cross section of UFG-DP tested at 50N

이러한 결과는 10N 이상의 고하중에서 마르텐사이트 상이 높은 하중에 의해 큰 변형을 받게 되고, 이로 인해 페라이트 상의 변형이 마르텐사이트 상에 의해 억제되지 못한 때문으로 해석된다.

Fig. 6의 마멸단면 SEM 사진과 마멸기구의 모식도는 이와 같은 해석을 확인시켜 준다. 시험 전에 비평형 결정립계를 갖고 있는 UFG-DP 시편에, 강한 마르텐사이트 상을 변형시킬 수 있을 만큼의 큰 하중이 가해지면 마멸시험 중에 미끄럼 방향을 따라 페라이트 상과 마르텐사이트 상은 함께 변형되게 된다. 이 변형에 따라 shear band가 형성되고, 이 shear band는 마멸이 진행됨에 따라 더욱 극심하게 변형되며 더욱 미세해진다. 마르텐사이트 상이 매우 큰 변형을 받게 됨에 따라 페라이트-마르텐사이트 상 경계면에서는 다수의 미세한 균열들이 발생하기 시작하고, 이러한 미세 균열들은 변형에 의해 생성된 shear band를 따라

전달하면서, UFG-DP 시편에서 특징적으로 관찰되는 판상 형태의 마멸입자를 형성하게 된다. UFG-DP 시편에서는 마르텐사이트 상 입자들이 CG-DP 시편에서보다 더욱 미세하고 광범위하게 분포되어 있으므로, CG-DP 시편에서보다 UFG-DP 시편에서 더 많은 미세 균열들이 만들어지고 이로 인해 높은 하중에서는 UFG-DP 시편이 매우 높은 마멸속도를 보인 것으로 여겨진다. Fig. 6의 마멸단면 SEM 사진은 UFG-DP 시편에서 변형된 마르텐사이트 상 입자들과 극심한 변형을 받아 생성된 shear band, 그리고 이들을 따라 전파하는 균열들을 잘 보여준다.

#### 4. 결론

초미세립 이상조직 탄소강을 하중을 변수로 건식 미끄럼 마멸시험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 낮은 하중에서 초미세립 이상조직 강은 우수한 내마멸성 특성을 보였으나, 적용하중이 10N 이상이 되면서 내마멸성 특성이 저하하였다.

(2) 낮은 하중에서 관찰된 초미세립 이상조직 강의 우수한 내마멸성 특성은 조직 내에 분포한 미세한 마르텐사이트 상 입자들의 변형 억제와 마멸면에서의 가공경화로 설명되었고, 높은 하중에서의 증가된 마멸속도는 하중이 증가하면서 마르텐사이트 상 입자들이 변형되었기 때문으로 해석되었다.

#### 후기

본 연구는 과학기술부 21세기 프론티어 연구개발사업인 '나노소재기술개발사업단'의 지원(과제번호: 06K1501-00221)으로 수행되었습니다.

#### 참고 문헌

[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] 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.

- [3] R. Tyagi, S. K. Nath, S. Ray, 2001, Dry sliding friction and wear in plain carbon dual phase steel, Metal. Mater. Trans. A, Vol. 32A, pp. 360~367.
- [4] 유현석, 김용석, 2006, 가공경화와 산화층 형성에 의한 이상조직 저탄소강의 건식 미끄럼 마멸 거동, 한국소성가공학회 2006 춘계학술대회 논문집, pp. 149~152.