

미세조직 변화에 따른 AISI 52100 강의 미끄럼마멸 특성

윤나래¹ · 김용석[#]

Sliding Wear Behavior of AISI 52100 Steel with Pearlitic and Bainitic Microstructures

N. Yoon, Y. S. Kim

(Received August 5, 2011 / Revised October 11, 2011/ Accepted October 19, 2011)

Abstract

Dry sliding wear behavior of AISI 52100 steel that has a pearlite or bainite microstructure was characterized to explore the effect of microstructure on the wear of the steel. Isothermal heat treatments were employed to obtain the different microstructures. Pin-on-disk type wear tests of the steel disk were performed at loads of 25~125N in air against an alumina ball. Sliding speed and wear distance used were 0.1m/sec and 300m, respectively. Worn surfaces, wear debris and cross-sections of the worn surfaces were examined with SEM to investigate the wear mechanism of the steel. Hardness of the steel was also evaluated. Wear rate of the steel was correlated with the hardness and the microstructure. On the whole, wear resistance increased with an increase in hardness. However, the pearlite microstructure showed superior wear resistance as compared to the bainite microstructure with a similar hardness. The effect of the microstructure on the wear rate was attributed to the morphological differences of the carbide in the microstructure, which was found to have a significant effect on strain hardening during the wear.

Key Words: Sliding Wear, AISI 52100 Steel, Pearlite, Bainite, Wear Mechanism, Strain Hardening

1. 서 론

재료의 마멸은 재료 물성, 재료에 가해지는 외부 기계적 마멸조건 그리고 환경의 영향을 복합적으로 받으며 발생하는 시스템적 열화 현상이다 [1]. 외부 조건과 환경이 동일한 경우에도 작동하는 마멸 기구에 따라, 마멸 속도를 결정 짓는 재료의 물성은 달라지게 된다. 미끄럼마멸(sliding wear)은 금속재료가 외부 수직하중을 받으며 다른 재료와 접촉한 상태에서 상대적인 이동을 할 때 발생하는 마멸로, 미끄럼마멸 접촉면에서는 응착, 피로, 화학적 반응 등의 현상이 복합적으로 발생한다. 금속재료의 미끄럼마멸 특성에 영향을 미치

는 재질 인자는 재료의 경도, 가공경화능, 피로특성, 물리 화학적 반응성, 접촉면 변형수용도(capacity for deformation) 등을 들 수 있다. 그러나 이들 물성은 서로 연관되어 미끄럼마멸에 영향을 미치므로, 단독 인자로 미끄럼마멸 시험결과를 분석한 연구는 서로 상반되는 결과를 보고하는 경우가 많다[2~6].

위에서 언급된 여러 재질인자의 특성을 포괄적으로 나타낼 수 있는 인자로 재료의 미세조직이 새로이 주목 받고있고, 미세조직과 미끄럼마멸 특성 간의 상관관계 연구가 최근 활발하다. 미세조직의 열적안정성, 가공경화능, 미세조직 구성 상의 형상과 분율 등이 마멸저항성에 미치는 영향

1. 국민대학교 신소재공학부
교신저자: 국민대학교 신소재공학부,
E-mail: ykim@kookmin.ac.kr

이 보고되어 있으나[7~9], 체계적인 추가 연구가 필요하고 특히 고탄소강의 미세조직에 따른 미끄럼마멸 특성 연구는 미흡한 실정이다. 베어링 소재로 사용되는 고탄소 AISI 52100 베어링강은 베어링 부품이 탄성변형 영역에서 사용되므로, 초기 탄화물을 지닌 높은 경도의 마르텐사이트 조직으로 열처리되어 사용된다. 이에 반하여 베이나이트, 펄라이트 조직을 지닌 AISI 52100 강 of 마멸 특성에 관한 연구결과는 거의 보고되어 있지 않다. 펄라이트와 베이나이트 미세조직은 뛰어난 내마멸성이 요구되는 철로(railway)에 사용되고 있고, 그에 대한 연구도 최근까지 꾸준히 이루어지고 있다[10~14].

본 연구에서는 AISI 52100 강을 항온변태열처리하여 펄라이트와 베이나이트 미세조직을 갖게 한 후 상온에서 건식 미끄럼마멸 시험을 실시하고 각 조직의 미끄럼마멸 거동을 관찰하여, 각 조직의 미끄럼마멸 기구를 규명하고 마멸저항성을 결정짓는 재질 인자를 연구하였다.

2. 실험 방법

2.1 시험소재와 마멸시편

본 연구에 사용된 AISI 52100 강(0.99C-1.32Cr-0.36Mn-0.18Si)은 직경 25mm 봉재 형태로 구매되었다. 구입한 봉재로부터 두께 8mm 디스크(disk) 시편을 가공하고, 각각 다른 조건으로 항온변태 열처리하여 미세조직을 변화시켰다. 가공된 디스크 시편을 1050℃에서 30 분간 용체화처리 한 후, 여러 온도에서 항온변태 처리하여, 미세하거나 조대한 베이나이트 또는 펄라이트 조직을 얻었다. 각 항온변태 열처리 조건과 그에 따른 미세조직, 그리고 측정된 미소 비커스 경도를 Table 1 에 나타내었다.

Table 1 Heat treatment conditions, microstructure and hardness of the AISI 52100 steel

Sample No.	Isothermal Heat Treatment Condition*	Hardness (HV)	Microstructure
B1	300 °C, 2hr / WQ	497	Fine bainite
B2	330 °C, 2hr / WQ	350	Coarse bainite
P1	650 °C, 0.5hr / WQ	312	Fine pearlite
P2	700 °C, 0.5hr / WQ	273	Coarse pearlite
P3	700 °C, 1.5hr / WQ	208	Coarser pearlite

* WQ: water quenching

2.2 미끄럼마멸 시험

열처리된 AISI 52100 강 디스크 시편의 건식 미끄럼마멸 실험을 상온 대기 중에서 pin-on-disk 마멸시험기를 사용하여 실시하였다. 미끄럼마멸 시험의 상대재로는 직경 10mm Al₂O₃ 구(ball)를 사용하였다. 마멸하중을 25~125N으로 변화시켰고, 미끄럼거리와 미끄럼속도는 각각 300m, 0.1m/s로 일정하게 하였다. 각 시편 별로 마멸시험을 최소3회 실시하고 그 평균값을 마멸속도 결과로 취하였다. 마멸속도는 마멸시험 전 후의 시편 무게변화를 각 시편의 이론밀도와 마멸거리로 나누어 계산하였다. 마멸 시험 전 후의 디스크 시편의 무게는 정밀도 10⁻⁵g의 저울로 측정하였다. 시험된 시편의 마멸면과 마멸단면을 주사전자현미경(SEM)으로 관찰하여 열처리에 따른 각 시편의 마멸 기구를 연구하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 하중에 따른 마멸거동

각 열처리 조건에 따른 AISI 52100 강 of 미세조직을 Fig. 1 에 나타내었다. 베이나이트 조직 시편은 항온변태온도에 따라 조직의 치밀도와 탄화물 분포의 차이를 보였는데, 변태온도가 낮은 B1 시편이 좀 더 치밀한 탄화물 분포를 보였다. 펄라이트 조직을 갖는 시편 역시 항온변태 온도에 따라 층상조직 간격(lamellar spacing)의 차이를 나타내었고, 변태온도가 높고 유지시간이 가장 긴 P3 시편은 거칠고 분절된 층상조직을 보였다.

마멸 하중에 따른 베이나이트(B1)와 펄라이트(P1) 조직 시편 마멸속도의 변화를 Fig. 2 에 나타내었다. 베이나이트 조직 시편은 100N 하중까지 마멸하중 증가와 함께 마멸속도가 직선적으로 증가하였으나 125N 하중에서 마멸속도가 감소하였다. 펄라이트 조직 시편 역시 75N 하중까지는 하중에 비례하여 마멸속도가 직선적으로 증가하였으나, 이후 감소하였다. 시험된 전체 하중에서 펄라이트 조직 시편은 베이나이트 조직 시편보다 더 높은 마멸속도를 나타내었으나, 두 시편 간의 마멸속도 차이는 최대 13.6x10⁻¹³m³/m, 최소 1.64x10⁻¹³m³/m 로 크지 않았다. 두 시편 모두에서 마멸속도가 감소하기 전 하중에 따라 마멸속도 증가의 기울기가 일정한 것은 시험된 하중 구간에서 각 시편의 마멸이 동일한 마멸기구에 의해 진행되었음을 시사한다.

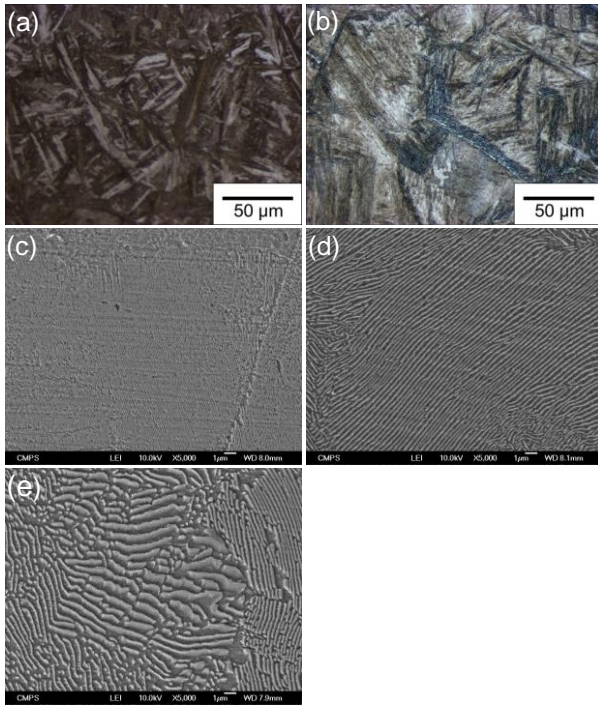


Fig. 1 Optical and SEM micrographs of specimens after isothermal heat treatments: (a) B1, (b) B2, (c) P1, (d) P2 and (e) P3

Fig. 2의 마멸속도 증가 구간과 감소 구간을 대표하여, 75N 하중에서 시험된 펄라이트 조직 시편과 125N 하중에서 시험된 베이나이트 조직 시편의 마멸면을 Fig. 3에 보였다. 펄라이트 조직 시편의 마멸면(Fig. 3 (a))은 심한 변형의 흔적 없이 마멸트랙 안에서 마멸입자가 비교적 일정한 간격으로 떨어져 나간 양상을 보여, 피로기구에 의해 마멸이 진행되었음을 보인다. 동일한 양상의 마멸면이 100N 이하 하중으로 시험된 베이나이트, 펄라이트 시편 마멸면에서 정도를 달리하여 관찰되었다. 125N의 고하중으로 시험된 베이나이트 시편의 마멸면(Fig. 3 (b))은 폭이 좁아진 마멸트랙과 매우 심한 전단변형에 의해 형성된, 표면이 매우 평탄한 균일한 폭의 변형띠를 마멸트랙 중앙에서 보인다. 이 같은 마멸면은 고하중 마멸 중에 마멸면 온도가 급격히 상승하며 마멸면이 연화되어 심한 전단변형이 일어났음을 시사한다. 고하중 125N 마멸 시험 중에는 마찰계수가 타 하중에서 보다 낮게 측정되었고 국부 용융 현상이 관찰되어, 마멸 중의 연화현상을 뒷받침하였다. 두 미세

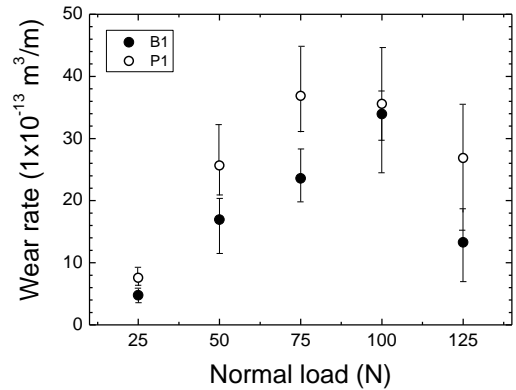


Fig. 2 Variation of sliding wear rates of the bainite (B1) and pearlite (P1) specimens as a function of applied normal load

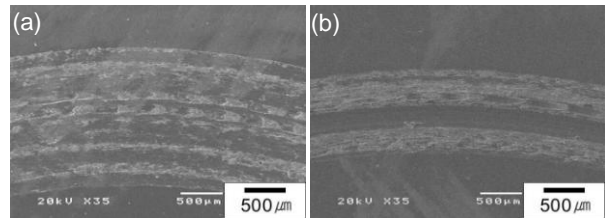


Fig. 3 SEM micrographs of worn surfaces of P1 specimen tested at 75 N (a) and of B1 specimen tested at 125N. The arrow in (b) indicates solidified wear debris after melting during the wear

조직 공히, 하중에 따라 마멸속도가 증가하는 구간에서는 피로기구에 의해 마멸이 진행되었고, 고하중에서는 마멸면에서의 온도 상승에 의한 연화(softening)로 마멸속도가 감소하였다.

재료의 피로 저항성은 경도에 비례한다[15]. 마멸이 피로 기구에 의해 발생한 본 연구의 마멸시험 조건에서, 베이나이트 조직 시편이 펄라이트 조직 시편에 비해 높은 마멸저항성을 보인 것은, 베이나이트 조직 시편의 더 높은 경도로 설명될 수 있다. 그러나, 두 시편 간의 경도 차이가 VHN 185로 매우 크지만, 하중 별 마멸속도 차이의 평균값은 $8.16 \times 10^{-13} \text{ m}^3/\text{m}$ 정도로 매우 작았다. 이는 다른 인자가 마멸에 영향을 끼쳤음을 시사한다

3.2 미세조직에 따른 마멸거동

각기 다른 조건으로 열처리된 AISI 52100 베이나이트와 펄라이트 조직 시편을 100N의 고정 하중으로 300m 거리를 미끄럼마멸 시험하고, 각 시

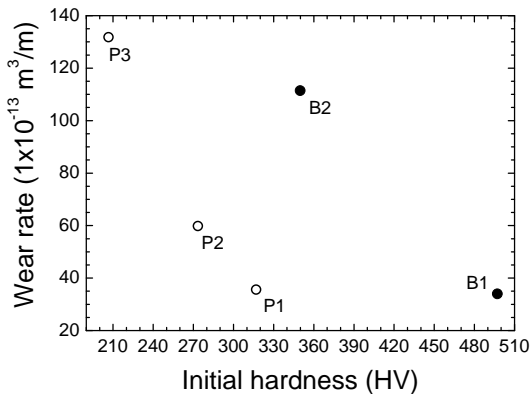


Fig. 4 Sliding wear rates of the bainite(B1, B2) and pearlite(P1, P2, P3) specimens with different initial hardness values.

편의 미끄럼마멸 속도를 시편의 초기경도를 변수로 Fig. 4에 비교하여 나타내었다.

Fig. 4는 베이나이트 조직과 펄라이트 조직에서 공히 시편의 경도가 높을수록 그 마멸속도가 낮아지는 것을 보인다. 이 같은 결과는, 앞 절에서 설명된 바와 같이 피로 기구에 의해 마멸이 진행될 때 마멸저항성이 경도에 비례하여 증가하는 현상과 잘 일치한다. 그러나 유사한 경도를 지닌 P1 시편(HV 312)과 B2 시편(HV 350)의 마멸속도는 3 배 이상 차이가 나고, 경도가 2 배 가까이 차이가 나는 P1 시편과 B1 시편(HV 497)의 마멸속도는 거의 유사하며, 동일한 경향이 P3 시편과 B2 시편 사이에서도 관찰된다. 이들 비교는 모두, 두 조직의 경도가 유사할 때 펄라이트 조직 시편의 마멸저항성이 베이나이트 조직 시편에 비해 우수한 것을 잘 보여주고 있으며, 초기경도 외에 미세조직이 마멸속도를 결정짓는 주요 재질 인자인 것을 나타낸다. 본 연구 결과는 이미 보고된 펄라이트와 베이나이트 조직의 경도 차이가 VHN 100 정도일 경우 펄라이트 조직의 마멸저항성이 더 우수하다는 연구결과와도 일치한다[16].

금속재료가 미끄럼마멸을 하는 동안 그 마멸면에서는 상대재와의 접촉으로 심한 변형이 일어나고, 그에 따라 마멸면 주변 영역은 가공경화 된다. 이에 따라 시험 전의 초기 경도가 아닌 가공경화된 마멸면 경도 또는 가공경화 정도가 실제로 마멸에 영향을 미치는 재질 인자가 될 수 있다. 가공경화 정도가 높을수록 마멸 중 변형에 소모되는 에너지가 증가하여 마멸저항성이 증가할 수

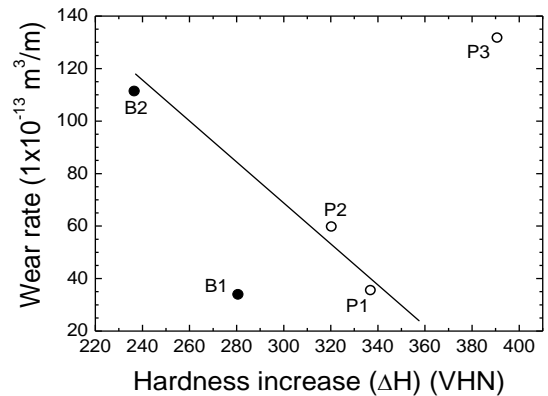


Fig. 5 Variation of sliding wear rates of the bainite (B1, B2) and pearlite(P1, P2, P3) specimens as a function of increase in hardness at the wearing surface

있고, 마멸면의 경도 증가는 피로 기구에 의한 마멸저항성을 또한 증대시키게 된다. 본 연구에서는 마멸면에서의 가공경화 정도를 초기 경도와 마멸 시험 후 마멸면에서 측정된 마멸면 경도와의 차이, ΔH로 정의하였다. Fig. 5에 펄라이트와 베이나이트 조직 시편의 마멸속도를 ΔH(마멸 시험 중 가공경화된 량)의 함수로 나타내었다.

Fig. 5는 Fig. 4에 비하여 두 미세조직의 마멸속도가 한 인자, ΔH에 의해 비교적 잘 관계지워지는 것을 보인다. 펄라이트 조직 P1, P2 시편과 베이나이트 조직 B2 시편은 동일 직선 상에 놓이며, 이들 세 시편의 마멸저항성과 가공경화 간의 상관관계를 잘 나타낸다. 세 시편에서는 ΔH가 커질수록, 즉 마멸 중의 가공경화 정도가 클수록 마멸저항성이 높아졌다. B1 시편과 P3 시편의 마멸속도는 직선에서 벗어나 있는데, 두 시편의 경우 가공경화 외의 다른 인자가 마멸에 영향을 미친 때문으로 설명된다. B1 시편의 초기경도는 다른 시편들에 비해 월등히 높았다. 이 경우 높은 경도로 인해 마멸면에서의 변형량이 매우 작고, 마멸은 미소 파괴의 과정으로 진행된 것으로 설명된다. Fig. 6은 베이나이트 조직 B1 시편의 마멸면 단면의 고배율 사진으로, 변형이 거의 일어나지 않은 마멸면 직하에서 균열이 생성, 전파하는 양상이 관찰된다.

P3 시편은 펄라이트 층상조직이 분절되고 그 크기와 간격이 불균일한 미세조직을 지닌다(Fig. 1(e)). 이에 따라 P3 시편에는 분절된 시멘타이트

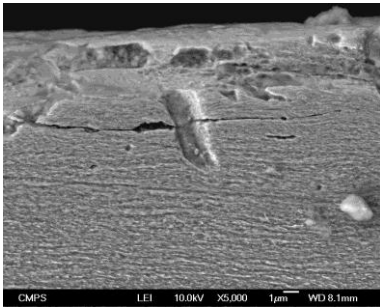


Fig. 6 FESEM micrograph of the cross section of the B1 specimen (bainite) tested at 100 N

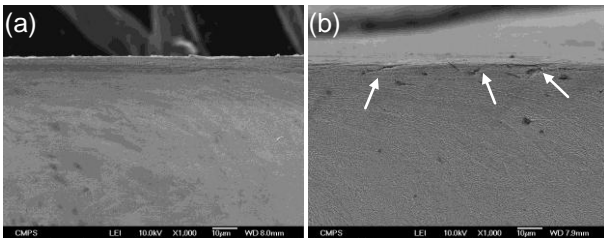


Fig. 7 FESEM micrographs of the cross section of the specimens with pearlite microstructure wear tested at 100N: (a) P1(fine and uniform pearlite) and (b) P3(degenerated pearlite)

끝 부위와 같은 응력집중 부위가 많아, 마멸 중에 균열이 쉽게 생성되고 전파하여, 높은 가공경화 정도에도 불구하고 그 마멸속도가 높게 측정된 것으로 해석된다. Fig. 7 은 치밀한 펄라이트 조직을 지닌 P1 시편과 조대하고 불규칙한 펄라이트 조직을 지닌 P3 시편의 마멸 단면을 비교하여 보여준다.

마멸저항성이 우수한 P1 시편의 단면(Fig. 7 (a))은 매우 치밀하고, 관찰된 배울에서 단면 균열은 관찰되지 않았다. 반면에 가공경화 정도가 매우 높았으나 마멸저항성이 낮은 P3 시편의 단면(Fig. 7 (b))은 많은 균열을 보여준다. 층상조직의 분절 정도와 간격의 균일성이 P1 시편과 P3 시편의 중간 정도인 P2 시편의 단면에서도 균열은 관찰되었으나 그 빈도는 P3 시편에 비해 매우 낮았다. P3 시편의 마멸입자는 그 크기가 P1 시편에 비해 컸고, 단면에서 큰 마멸입자가 떨어져 나간 양상 또한 빈번히 관찰되어 P3 시편에서 균열의 생성과 전파, 그리고 마멸입자 생성이 좀 더 활발하였음이 확인되었다.

마멸시험 된 시편 단면의 미소경도를 마멸면으

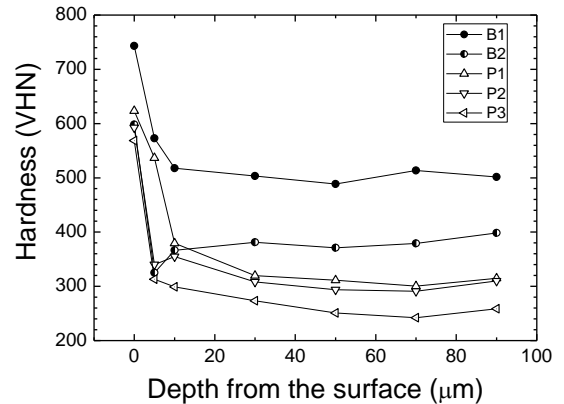


Fig. 8 Variation of micro Vickers hardness as a function of depth from the worn surface of the bainite (B1, B2) and pearlite (P1, P2, P3) specimens

로부터의 깊이를 변수로 측정하였고, 그 결과를 Fig. 8 에 나타내었다.

펄라이트와 베이나이트 조직 시편 모두에서 마멸면 직하에서의 가공경화 거동이 확인되고 있다. 다른 금속재료 마멸면에서와 달리, 마멸면에서의 높은 경도는 깊이가 증가하며 급격히 감소하였다. 이 결과는 열처리된 AISI 52100 강 마멸 중 가공경화 발생 영역(변형층 깊이)이 매우 좁은 것을 보여주고(10µm 이내), 좁은 영역의 가공경화도 마멸 저항성 증가에 큰 영향을 준 것을 확인시켜 준다.

4. 결론

펄라이트 조직과 베이나이트 조직을 지닌 AISI 52100 강 상온 미끄럼마멸 시험을 행하고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 열처리된 AISI 52100 강 마멸속도는 초기 경도가 높을수록 낮았다. 그러나, 초기 경도는 절대적 인자가 아니고, 마멸저항성은 미세조직과 마멸시험 동안의 가공경화 정도에 크게 의존하였다.

(2) 펄라이트 미세조직 시편은 베이나이트 미세조직 시편에 비하여 더 높은 가공경화 수용능력을 보였다. 초기 경도가 유사할 때 펄라이트 미세조직 시편의 마멸저항성은 베이나이트 미세조직 시편에 비해 우수하였다.

(3) 동일한 미세조직에서도, 미세조직 구성 상의 양상과 분포에 따라 마멸 특성이 다르게 관찰되

었다. 펄라이트 조직에서는 페라이트/시멘타이트 층상간격이 조밀할수록, 베이나이트 조직에서는 탄화물이 치밀하고 균일하게 분산될수록 그 마멸 저항성이 증가하였다.

후 기

본 연구는 2010년도 국민대학교 교내연구비를 지원받아 수행된 연구로, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] R. G. Bayer, 1994, Mechanical Wear Prediction and Prevention, Marcel Dekker, Inc., New York, pp. 1~3.
- [2] K. H. Zum Gahr, 1987, Microstructure and Wear of Materials, Elsevier, Amsterdam, pp. 393~397.
- [3] H. S. Yu, S. K. Yi, D. H. Shin, Y. S. Kim, 2007, Sliding Wear Mechanism of Ultra-fine Grained Low Carbon Dual Phase Steel as a Function of Applied Load, Trans. Mater. Process., Vol. 16, No. 4, pp. 299 ~ 303.
- [4] Y. S. Kim, H. S. Yu, D. H. Shin, 2009, Low Sliding-wear Resistance of Ultrafine-grained Al Alloys and Steel undergone Severe Plastic Deformation, Int. J. Mater. Res., Vol. 100, No. 6, pp. 871~874.
- [5] S. Yi, Y. S. Kim, 2010, Sliding Wear Behavior of Pure Metal, Fe and Cu Having a Cubic Crystal System, Trans. Mater. Process., Vol. 19, No. 6, pp. 357~362.
- [6] S. D. Kim, S. J. Kim, Y. S. Kim, 2006, Sliding Wear Mechanism of the High-nitrogen Austenitic 18Cr-18Mn-2Mo-0.9N Steel, Trans. Mater. Process., Vol. 15, No. 2, pp. 112~117.
- [7] Y. Wang, T. Lei, J. Liu, 1999, Tribo-metallographic Behavior of High Carbon Steels in Dry Sliding II. Microstructure and Wear, Wear, Vol. 231, No. 1, pp. 12~19.
- [8] J. Kalousek, K. M. Fegredo, E. E. Lauffr, 1985, The Wear Resistance and Worn Metallography of Pearlite, Bainite, and Tempered Martensite Rail Steel Microstructures of High Hardness, Wear, Vol. 105, No. 3, pp. 199~222.
- [9] R. Tyagi, S. K. Nath, S. Ray, 2001, Dry Sliding Friction and Wear in Plain Carbon Dual Phase Steel, Metall. Mater. Trans. A, Vol. 32, No. 2, pp. 359~367.
- [10] J. E. Garnham, J. H. Beynon, 1992, Dry Rolling-Sliding Wear of Bainitic and Pearlitic Steels, Wear, Vol. 157, No. 1, pp. 81~109.
- [11] P. Clayton, R. Devanathana, 1992, Rolling /Sliding Wear Behavior of a Cr-Mo Rail Steel in Pearlitic and Bainitic Conditions, Wear, Vol. 156, No. 1, pp. 121~131.
- [12] N. Jin, P. Clayton, 1997, Effect of Microstructure on Rolling/Sliding Wear of Low Carbon Bainitic Steels, Wear, Vol. 202, No. 2, pp. 202~207.
- [13] K. M. Lee, A. A. Polycarpou, 2005, Wear of Conventional Pearlitic and Improved Bainitic Rail Steels, Wear, Vol. 259, No. 1~6, pp. 391~399.
- [14] Y. Shiota, Y. Tomota, A. Moriai, T. Kamiyama, 2005, Structure and Mechanical Behavior of Heavily Drawn Pearlite and Martensite in a High Carbon Steel, Met. Mater. Int., Vol. 11, No. 5, pp. 371~376.
- [15] G. E. Dieter, 1986, Mechanical Metallurgy, McGraw-Hill Book Company, New York, pp. 415~419.
- [16] C. C. Viafara, M. I. Castro, J. M. Velez, A. Toro, 2005, Unlubricated Sliding Wear of Pearlitic and Bainitic Steels, Wear, Vol. 259, No. 1~6, pp. 405~411.