

탄소강의 초석페라이트와 시멘타이트 구상화가 미끄럼마멸 거동에 미치는 영향 분석

허하리¹ · 권혁우¹ · 김명곤¹ · 김용석[#]

Effect of Pro-eutectoid Ferrite and Cementite-spheroidization on the Sliding Wear Resistance of Carbon Steels

H. L. Hur, H. Gwon, M. G. Kim, Y. -S. Kim

(Received July 9, 2014 / Revised August 18, 2014 / Accepted August 26, 2014)

Abstract

The current study elucidates the effects of cementite spheroidization and pro-eutectoid ferrite on the sliding wear resistance in medium carbon (0.45wt%C) and high carbon (1wt%C) steels. Both steels were initially heat treated to obtain a fully pearlite or ferrite + pearlite microstructure. Spheroidizing heat treatments were performed on both steels to spheroidize the pearlitic cementite. Sliding wear tests were conducted using a pin-on-disk wear tester with the steel specimens as the disk and an alumina (Al_2O_3) ball as the pin. The sliding wear tests were carried out at room temperature in air with humidity of 40 ± 2 %. Adapted sliding distance and applied load was 300m and 100N, respectively. Sliding speed was 0.1m/s and the wear-track radius was 9 mm. Worn surfaces and cross-sections of the wear track were examined using an SEM. Micro Vickers hardness of the wear-track subsurface was measured as a function of depth from the worn surface. Hardness and sliding-wear resistance of both steel decreased with increased spheroidization of the cementite. The decrease was more significant in the fully pearlitic steel (1wt%C steel). The steel with the pro-eutectoid ferrite showed relatively higher wear resistance compared to the spheroidized pearlitic steel.

Key Words : Sliding Wear, High Carbon Steel, S45C, Microstructure, Cementite Spheroidization, Pro-eutectoid Ferrite

1. 서론

채광과 철도산업 등 우수한 마멸저항성을 필요로 하는 산업에 사용되는 탄소강은 그 적합한 응용을 위해 다양한 마찰공정 조건에서의 마멸과 마멸 메커니즘의 연구가 요구된다[1]. 마멸저항성뿐만 아니라 탄소강의 인성과 연성은 용이한 가공을 위한 중요한 물성이고[2], 이러한 인성과 연성은 경도, 피로 특성, 가공경화능 등과 더불어 금속재료의 마멸저항성을 결정하는 주요 인자들을 구성한다[3, 4]. 탄소강

의 인성과 연성은 열처리를 통하여 미세조직 내 시멘타이트를 구상화시켜 증가시킬 수 있다[2]. 그러나 펄라이트 내의 시멘타이트를 구상화시키면 경도가 감소하고[5], 경도와 마멸저항성이 비례함(Archad 식 [6])에 미루어, 시멘타이트를 구상화시키면 인성과 연성은 증가하나 경도 감소로 인한 마멸저항성이 감소하는 문제가 발생한다. 이에 따라 내마멸성이 높은 재료를 개발할 때, 시멘타이트의 구상화와 같은 미세조직의 변화가 마멸저항성에 미치는 영향은 신중히 연구 검토되어야 한다[3].

1. 국민대학교 신소재공학부
Corresponding Author: School of Advanced Materials Engineering,
Kookmin University, E-mail: ykim@kookmin.ac.kr

Table 1 Chemical composition of the tested steel

(wt. %)

Designation	C	Mn	Si	P	S	Cr
1 wt. % C Steel	1.0	0.31	0.26	-	-	2.17
S45C	0.444	0.717	0.249	0.014	0.008	-

Table 2 Heat treatment condition, microstructure, and micro Vickers hardness

Steel Designation	Specimen Symbol	Heat treatment Condition	Microstructure	Hardness (HV ₁)
1 wt. % C Steel	P	1050 °C for 30 min, 650 °C for 30 min, W.Q.	Lamellar Pearlite	362.6
	SP12	After P treatment, holding at 700 °C for 12 h, F.C.	Speroidized Pearlite	264.5
	SP24	After P treatment, holding at 700 °C for 24 h, F.C.	Speroidized Pearlite	255.8
	SP48	After P treatment, holding at 700 °C for 48 h, F.C.	Speroidized Pearlite	234.4
S45C	FP	Holding at 1000 °C for 1 h, F.C.	Ferrite + Pearlite	171.0
	FS6	After FP treatment, holding at 700 °C for 6 h, F.C.	Ferrite + Speroidized Pearlite	147.4
	FS12	After FP treatment, holding at 700 °C for 12 h, F.C.	Ferrite + Speroidized Pearlite	146.1
	FS24	After FP treatment, holding at 700 °C for 24 h, F.C.	Ferrite + Speroidized Pearlite	141.8

본 연구에서는 펄라이트 조직 내의 시멘타이트를 각기 다른 구상화 열처리 시간 조건으로 구상화시켜, 탄소강 내에 존재하는 시멘타이트의 형상이 미끄럼 마멸저항성에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 초석 페라이트의 존재가 미끄럼마멸 거동에 미치는 영향을 알아보기 위해서 페라이트 + 펄라이트 조직을 갖는 S45C 탄소강의 마멸특성과 100% 펄라이트 조직을 갖는 1wt%C 탄소강의 마멸 특성을 함께 비교 연구하였다.

2. 실험 방법

2.1 시편준비

본 연구에 사용된 강의 화학조성을 Table 1에 나타내었고, 열처리조건과 그에 따른 미세조직, 경도를 Table 2에 나타내었다. 초석페라이트 존재의 영향을 알아보기 위하여 S45C 탄소강과 1wt%C 탄소강을 열처리하여 비교 시험하였다. 두 강종 봉(rod)을 구매하여 두께 1cm로 절단하고 Table 2의 조건으로 열처리하였다. 1wt%C 탄소강의 100% 펄라이트 조직(P)을 얻기 위한 열처리 조건은 문헌[4]을 참고하였는데, Hultgren의 외삽법에 의해 100% 펄라이트 조직이 얻어졌다. 미세조직은 5% nital 용액으로 예칭한 후 FE-SEM으로 관찰하였고, 경도는 미소 비커스 경도계를 이용하여 1kg 하중으로 측정하였다.

2.2 미끄럼마멸시험

본 연구에 사용한 미끄럼 마멸시험기의 모식도를 Fig. 1에 나타내었다. 미끄럼마멸 시험은 pin-on-disk 시험기를 이용하여, 1wt%C 탄소강 시편과 S45C 탄소강 시편을 디스크(disk)로, 상대재인 핀(pin)으로는 알루미늄(Al₂O₃) 볼을 사용하였다. 마멸시험은 상온 대기 중에서 습도를 40±2%로 유지하고, 미끄럼 거리 300m, 적용 하중 100N, 미끄럼 속도 0.1m/s, 마멸 트랙 반경 9mm의 조건으로 수행되었다. 마멸시험 전후 시편의 무게변화를 전자저울로 측정하고 측정된 시편의 무게 변화량을 시편의 밀도와 미끄럼 거리로 나누어 마멸속도를 산출하였다.

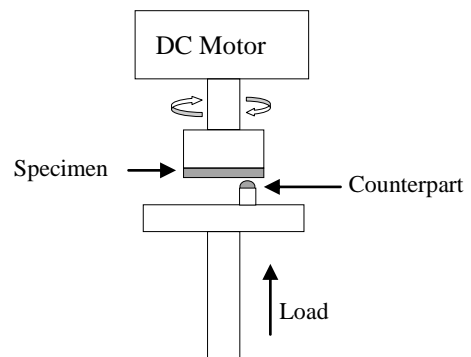


Fig. 1 A schematic diagram of the high-stress dry sliding pin-on-disk wear tester

3. 결과 및 고찰

3.1 구상화시간에 따른 미세조직과 경도

Fig. 2는 각기 다른 조건으로 열처리된 1wt%C 탄소강의 미세조직을 보인다. 1wt%C 탄소강의 P 시편은 100% 펄라이트 조직으로 층상구조를 지닌다. P 시편을 각각 12시간, 24시간, 48시간 동안 구상화 열처리한 SP12, SP24, SP48 시편은 구상화 열처리시간이 길어짐에 따라 펄라이트 조직 내의 시멘타이트 형상이 점차 더 구형이 되어가는 모습을 보인다.

Fig. 3은 다른 조건으로 열처리된 S45C 탄소강의 미세조직을 보인다. 1000°C에서 열처리된 S45C FP 시편은 페라이트와 펄라이트가 혼재된 조직을 보인다. FP 시편을 각각 6시간, 12시간, 24시간 동안 구상화 열처리한 FS6, FS12, FS24 시편에서 구상화 열처리 시간에 따라 펄라이트 내 시멘타이트가 더 구형화 되었으나, 페라이트 조직의 변화는 없었다.

Table 3에 각각 다른 조건으로 열처리된 S45C와 1wt%C 강 시편들의 미소 비커스 경도를 비교하였다. 초기 구상화에 의해 경도가 크게 감소하였으나, 이후 구상화 시간의 증가에 따른 경도 감소는 비교적 작았다. 구상화 시간 증가에 따른 경도 감소는 특히 S45C 시편에서 미약하였다. 이에 비해 1wt%C 강에서는 초기 경도 감소가 컸고(P와 SP12 시편의 경도 변화) 이후 구상화 시간이 증가하면서 직선적으로 경도가 감소하였다.

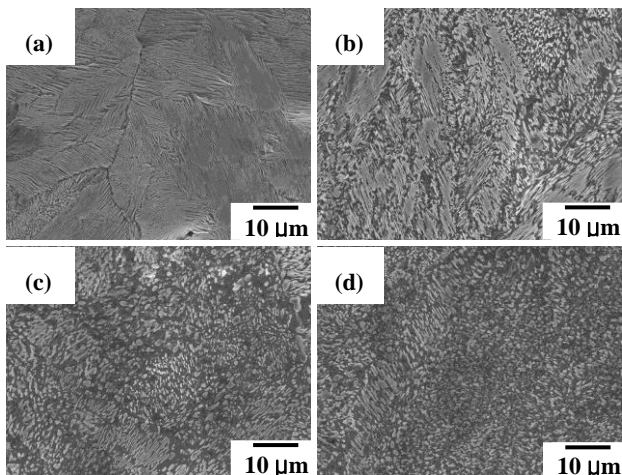


Fig. 2 FE-SEM micrographs of the heat-treated 1wt%C steel specimens: (a) P, (b) SP12, (c) SP24, and (d) SP48

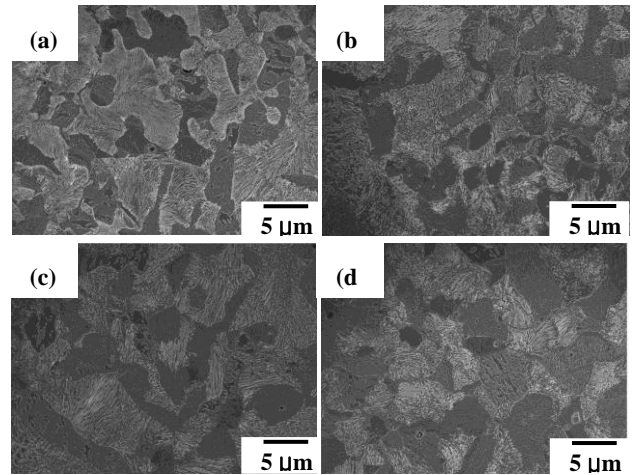


Fig. 3 FE-SEM micrographs of the heat-treated S45C carbon steel specimens: (a) FP, (b) FS6, (c) FS12, and (d) FS24

Table 3 Micro Vickers hardness of the tested treated 1wt%C steel and S45C carbon steel specimens

S45C		1 wt. % C Steel	
Specimen Symbol	Hardness (HV ₁)	Specimen Symbol	Hardness (HV ₁)
FP	171.0	P	362.6
FS6	147.4	SP12	264.5
FS12	146.1	SP24	255.8
FS24	141.8	SP48	234.4

3.2 구상화시간에 따른 미끄럼마멸속도

Fig. 4에 서로 다른 미세조직을 지닌 1wt%C 탄소강 시편들의 미끄럼 마멸속도를 비교하였다. 100% 펄라이트 조직을 갖는 P 시편은 매우 낮은 마멸속도를 보였고, 시멘타이트가 구상화된 SP 시편들은 높은 마멸속도를 나타내었다. 구상화 시간이 길어질수록 SP 시편의 마멸속도가 직선적으로 증가하였다.

Fig. 5는 서로 다른 미세조직을 지닌 S45C 탄소강 시편들의 미끄럼 마멸속도를 보인다. 초석페라이트가 존재하는 S45C 탄소강은 1wt%C 탄소강에 비하여 펄라이트의 시멘타이트가 구형화 하여도 마멸속도의 증가 폭이 크지 않았다. 이는 초석페라이트가 존재할 경우 펄라이트 내의 시멘타이트 형상 변화의 영향이 크지 않은 것을 나타낸다. 또한 초석페라이트가 존재할 때 마멸속도의 편차가 더 크게 나타났다.

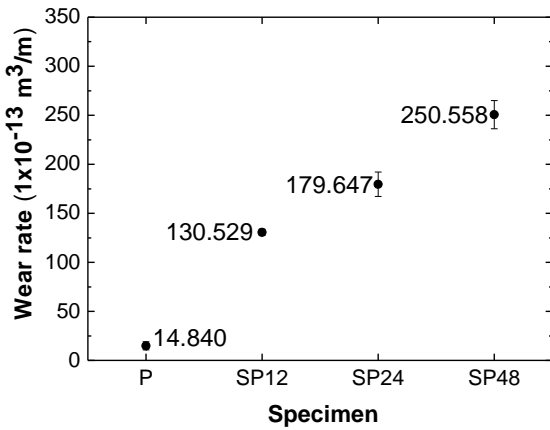


Fig. 4 Dry sliding wear rate of the 1wt%C steel specimens with different microstructure

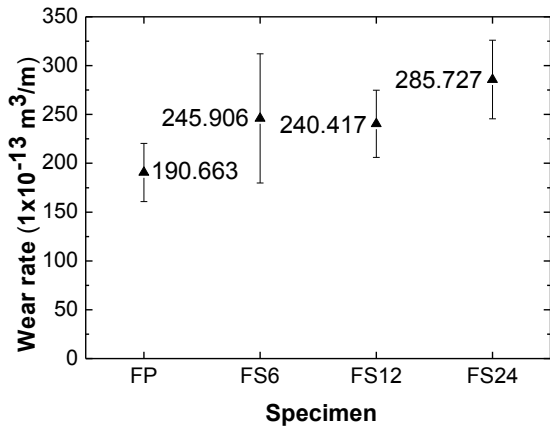


Fig. 5 Dry sliding wear rate of the S45C steel specimens with different microstructure

Fig. 6에 각 시편의 마멸속도를 경도의 함수로 비교하였다. 구상화 펄라이트 조직을 지닌 SP12, SP24, SP48 시편들의 마멸속도가 경도 감소에 대해 일정한 기울기로 증가하는 것과 달리, 초석페라이트를 지닌 S45C 강, 구상화 펄라이트 조직 시편 FS6, FS12, FS24 시편들은 높은 마멸속도 편차와 함께 유사한 마멸속도 값을 보인다. 100% 층상 펄라이트 조직을 지닌 P 시편의 마멸속도는 매우 낮았고, SP 시편들과는 다른 경도 의존성을 보인다. 그러나 초석 페라이트와 층상 펄라이트 조직을 지닌 FP 시편의 마멸속도는 FS 시편들과 비슷하고, 마멸속도의 경도 의존성은 FS 시편들과 유사하다. SP48 시편(1wt%C)과 FS12 시편(S45C)은 HV 100에 가까운 경도 차이를 보임에도 유사한 마멸속도를 보이는데, 이 결과는 초석페라이트가 마멸 저항성 증가에 기여하는 바가 있음을 시사한다.

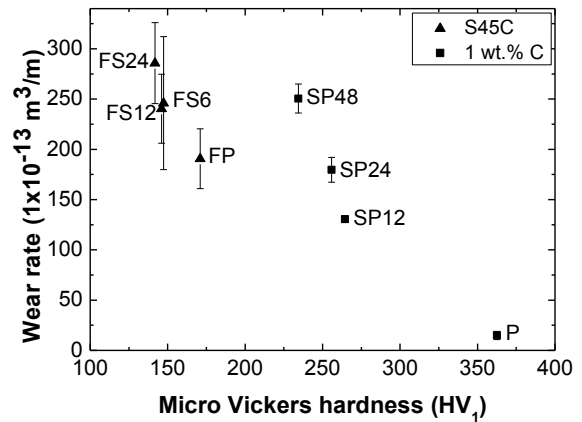


Fig. 6 Dry sliding wear rate vs. micro Vickers hardness of the heat treated 1wt%C and S45C steel specimens

3.3 마멸면과 마멸단면

재료의 내마멸성은 단순히 경도만으로 가늠하는 것이 일반적이나, 재료의 초기 경도 만으로는 마멸 거동을 효과적으로 설명할 수 없다[7, 8]. Fig. 7에 마멸속도가 유사한 SP48 시편과 FS12 시편의 마멸면을 SEM으로 관찰한 결과를 보였다. SP48 시편의 마멸면(Fig. 7 (a))은 균일하나, FS12 시편의 마멸면 (Fig. 7 (b), (c), (d))에서는 마멸입자가 박리된 흔적과 함께 심한 전단 변형층과 이들이 절단된 흔적(Fig. 7 (d))이 함께 관찰된다. Fig. 7은 초석페라이트가 존재하는 FS 시편에서는 마멸 중에 심한 전단변형이 수반되고, 이 같은 마멸 중의 마멸면 변형이 마멸속도에 영향을 주었음을 나타낸다.

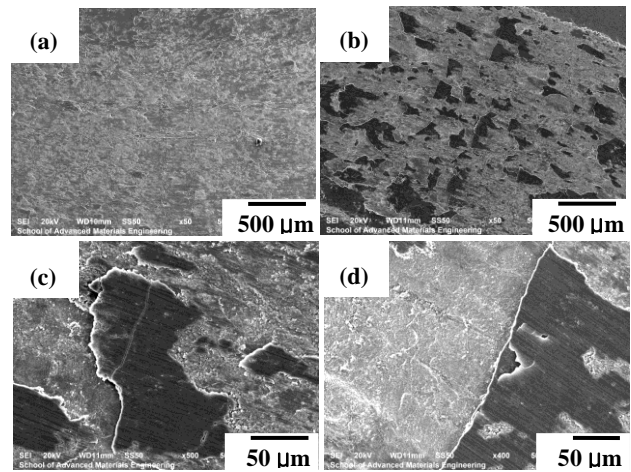


Fig. 7 SEM micrographs of worn surfaces of the SP48 (a) and FS12 (b, c, and d) specimens

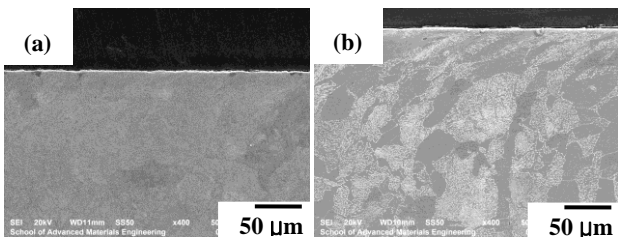


Fig. 8 SEM micrographs of worn-surface cross sections of the tested SP48 (a) and FS12 (b) specimens

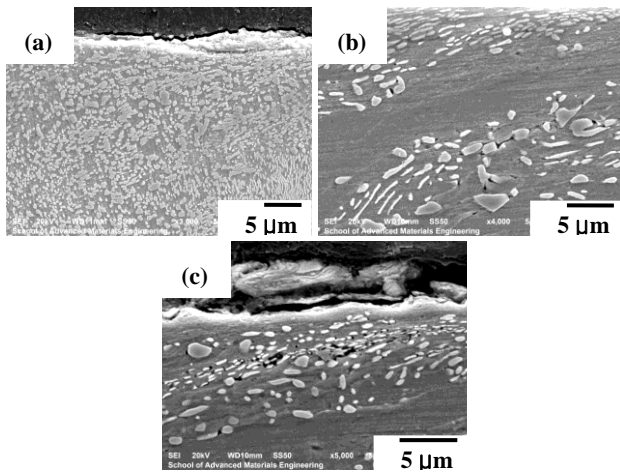


Fig. 9 SEM micrographs of cross sections of the tested SP48 (a) and FS12 (b and c) specimens

Fig. 8과 Fig. 9는 SP48 (1wt% C) 시편과 FS12 (S45C) 시편의 마멸면 직하 단면을 SEM으로 관찰한 결과이다. SP48 시편에서는 변형된 모습이 잘 관찰되지 않는 반면(Fig. 8 (a)), FS12 시편(Fig. 8 (b))에서는 변형층이 명확하게 관찰된다. Fig. 8은 외부에서 가해진 일(에너지)이 FS12 시편의 마멸 중, SP48 시편에 비해, 변형에 좀 더 쓰여지고 이로 인해 마멸 입자 형성에 더 작은 에너지가 사용되어, FS12 시편이 상대적으로 경도가 낮음에도 SP48 시편과 근사한 마멸 저항성을 보인 것을 설명한다.

FS12 시편의 마멸면 단면(Fig. 9 (b), (c))에서는 구상화된 시멘타이트와 페라이트 계면에서 균열이 발생한 양상이 관찰된다. SP48 시편에서는 이 같은 계면균열이 관찰되지 않고, Fig. 9는 FS12 시편에서 페라이트와 구상화된 시멘타이트 간에 변형 불일치가 더 심했음을 보여준다.

3.4 가공경화능

재료의 미끄럼 마멸 거동에는 재료의 초기 경도

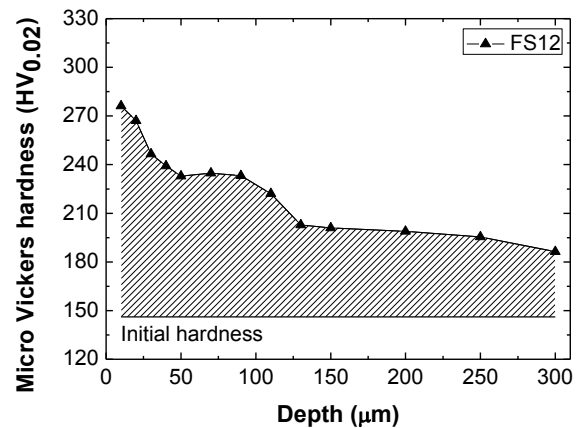
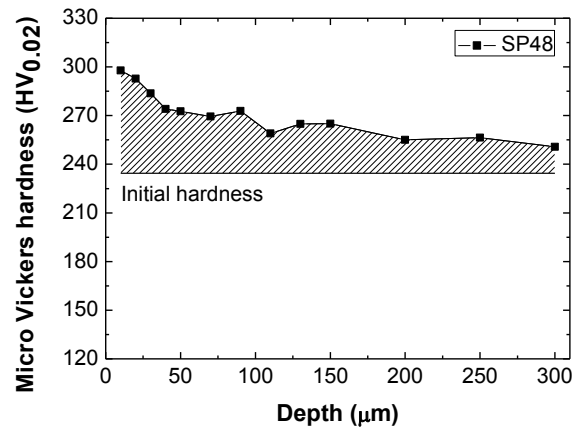


Fig.10 Micro Vickers hardness of the tested SP48 and FS12 specimens as a function of depth from the worn surface

외에도 합금원소, 미세조직, 가공경화 수용력과 같은 여러 인자가 영향을 주는데[9], 이 중 가공경화 수용력은 주로 마멸 트랙 단면의 깊이에 따른 경도를 측정하여 분석한다[10].

큰 정도 차이에도 불구하고 유사한 마멸속도를 나타낸 SP48 시편과 FS12 시편의 마멸면 직하의 경도를 깊이를 변수로 측정한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 마멸시험 전의 시편 초기 경도를 그림에 함께 보였다. Fig. 10의 정도변화에서, 마멸면에 근접한 10 μm 깊이에서의 정도와 시험 전 초기경도의 차이를 가공경화된 정도로, 그리고 측정한 정도 값이 초기 정도와 일치되는 깊이를 가공경화층의 두께라고 볼 수 있다. Fig. 10은 SP48 시편에 비하여 FS12 시편에서 가공경화가 더 많이 진행되었고, 가공경화층의 폭(두께)도 더 큰 것을 보여준다. Fig. 10에서 정도 변화 곡선과 초기경도 직선 사이의 빗금 친 면적은 HV·μm의 단위를 가지나, Vickers 정도의 단위가

N/mm^2 이므로 결국 Fig. 10에 나타난 면적은 J/m^3 의 단위를 갖고, 마멸 중 마멸면 단위부피 당 축적된 에너지를 나타낸다. FS12 시편의 경도 변화 곡선 밑 면적이 SP48 시편의 그것보다 더 넓고, 마멸 중에 FS12 시편에서 SP48 시편에서보다 더 많은 에너지가 마멸면 직하에 축적되었음을 잘 보인다. 이 결과는 마멸면과 마멸단면의 SEM 관찰 결과와 함께, 더 낮은 경도에도 불구하고 FS12 시편이 SP48 시편과 유사한 마멸속도를 나타낸 것을 설명한다.

4. 결론

(1) 1wt%C 탄소강과 S45C 탄소강 모두 구상화 열처리 시간이 길어짐에 따라 경도가 감소하고 마멸속도가 증가하였으나, 경도 감소와 마멸속도 증가의 정도는 1wt%C 탄소강에서 더 두드러졌다.

(2) 초석 페라이트가 존재하는 S45C 탄소강은 1wt%C 탄소강에 비해 경도 대비 마멸저항성이 우수하였다. 또한 초석 페라이트를 지닌 구상화 열처리된 S45C 탄소강의 마멸속도 편차가 매우 크게 나타났다.

(3) 초석 페라이트를 지닌 시편의 상대적으로 우수한 마멸 저항성은 초석 페라이트가 마멸 중에 마멸면에서 더 많은 변형과 가공경화를 유발한 때문으로 설명되고, 이를 마멸면과 마멸면 직하의 단면 관찰, 그리고 마멸 단면의 미소 경도 측정을 통하여 밝혔다.

REFERENCES

- [1] S. kumar, A. Bhattacharyya, D. K. Mondal, K. Biswas, J. Maity, 2011, Dry Sliding Wear Behavior of Medium Carbon Steel Against an Alumina Disk, *Wear*, Vol. 270, No. 5-6, pp. 413~421.
- [2] A. Kamyabi-Gol, M. Sheikh-Amiri, 2010, Spheroidizing Kinetics and Optimization of Heat Treatment Parameters in CK60 Steel Using Taguchi Robust Design, *J. Iron. Steel Res. Int.*, Vol. 17, No. 4, pp. 45~52.
- [3] K.-H. Zum Gahr, 1987, *Microstructure and Wear of Materials*, Elsevier, Amsterdam, pp. 351~353.
- [4] 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.
- [5] A. Saha, D. K. Mondal, J. Maity, 2010, Effect of Cyclic Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of 0.6 wt% Carbon Steel, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 527, No.16-17, pp. 4001~4007.
- [6] I. M. Hutchings, 1992, *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*, Edward Arnold, pp. 133~134.
- [7] K. K. Ray, V. Tppo, S. B. Singh, 2006, Influence of Pre-strain on the Wear Resistance of a Plain Carbon Steel, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 420, No. 1-2, pp. 333~341.
- [8] F. Katsuki, M. Yonemura, 2007, Subsurface Characteristics of an Abraded Fe-0.4 wt% C Pearlitic Steel: A Nanoindentation Study, *Wear*, Vol. 263, No. 7-12, pp. 1575~1578.
- [9] A. Sundström, J. Rendón, M. Olsson, 2001, Wear Behavior of Some Low Alloyed Steels under Combined Impact/abrasion Contact Conditions, *Wear*, Vol. 250, No. 1-12, pp. 744~754.
- [10] J. H. Kim, K. H. Ko, S. D. Noh, G. G. Kim, S. J. Kim, 2009, The Effect of Boron on the Abrasive Wear Behavior of Austenitic Fe-based Hard Facing Alloys, *Wear*, Vol. 267, No. 9-10, pp. 1415~1419.