

탄소강의 펄라이트 분율에 따른 미끄럼 마멸속도 편차 분석

김명곤¹ · 권혁우¹ · 허하리¹ · 김용석[#]

Analysis of Mean Deviation in Sliding-wear-rate of Carbon Steel with Various Pearlite Volume Fractions

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

(Received January 5, 2015 / Revised February 6, 2015 / Accepted February 9, 2015)

Abstract

The current investigation was performed to study sliding-wear-rate deviation (wear-rate data scatter) in carbon steels with various microstructures. Pure iron, 0.2 wt. % C steel, 0.45 wt. % C steel, and bearing steel (AISI52100) were used for the investigation. These steels possess different microstructures. Microstructures of the pure iron, two carbon steel and the bearing steel were full ferrite, ferrite + pearlite and full pearlite, respectively. Depending on the carbon content, the carbon steel had different pearlite-volume fractions. Dry sliding wear tests of the steel were conducted using a ball-on-disk wear tester at a sliding speed of 0.1 m/s using a bearing ball (AISI52100) as a counterpart. Applied load and sliding distance were 100 N and 300 m, respectively. More than three (up to twelve) tests were conducted for each steel under the same conditions, and the mean deviations in the wear rate of the steel (microstructure) were compared. The wear-rate deviation in the steel with ferrite + pearlite microstructure was higher than that with ferrite microstructure, and the deviation decreased with the increase of pearlite volume fraction. The pure iron and the bearing steel specimens showed much less deviation. The high deviation observed from the ferrite + pearlite steel was attributed to irregular subsurface-crack nucleation and growth at the interface between the two micro constituents (ferrite and pearlite) during the wear test.

Key Words: Sliding Wear, Wear-rate, Mean Deviation, Carbon Steel, Pearlite Volume Fraction

1. 서론

미끄럼 마멸(Sliding wear)은 두 물체가 접촉하며 상대적인 미끄럼 운동을 할 때 발생하는 마멸로, 기계부품의 수명과 직접적으로 관련된 소재 손상 형태의 하나이다[1]. 따라서 마멸 저항성은 구조용 재료를 선택할 때 고려해야 할 재료물성 중의 하나이기에 재료의 미끄럼마멸 연구는 매우 중요하다. 마멸속도(Wear rate)는 재료의 마멸저항성 예측과 설계를 위해 사용되는 일반적 지표이다. 그러나 동일한

성분, 미세조직을 지니는 재료 임에도, 동일한 시험 조건 하에서 수백 %의 마멸속도 편차가 나타나는 재료가 있는 반면, 마멸속도 편차가 거의 관찰되지 않는 재료도 존재한다[2~4]. 이 같은 마멸속도 편차는 마멸시험 결과의 신뢰성을 떨어뜨릴 수 있으므로, 재료의 마멸저항성의 정확한 예측을 위해 마멸속도 편차의 분석이 필요하다.

본 연구는 재료에 따른 미끄럼 마멸속도 편차 변화와 그 원인을 규명하기 위한 기초 연구로, 기본 미세조직을 지니는 탄소강을 이용하여 미끄럼 마멸

1. 국민대학교 신소재공학부
Corresponding Author : Kookmin University,
E-mail: ykim@kookmin.ac.kr

Table 1 Chemical composition of the tested steel in the present study (wt. %)

Material	C	Mn	Si	P	S	Etc
Pure Iron	0.005	0.14	0.06	0.004	0.008	
0.2 wt. % C steel	0.19	0.72	0.05	0.01	0.01	
0.45 wt. % C steel	0.44	0.717	0.249	0.014	0.008	
AISI 52100	1.0	0.31	0.26			Cr (2.17)

Table 2 Heat treatment condition and microstructure of the tested specimens

Material	Heat treatment condition	Microstructure	Designation
Pure Iron	As - rolled	100 % Ferrite	100 % Ferrite
0.2 wt. % C steel	1000 °C for 1 hour → Furnace cooled	Ferrite + Pearlite (18 %)	18 % Pearlite
0.45 wt. % C steel	1000 °C for 1 hour → Furnace cooled	Ferrite + Pearlite (54 %)	54 % Pearlite
AISI 52100	1050 °C for 30 min. 650 °C for 30 min → Water Quenched	100 % Pearlite	100 % Pearlite

속도의 편차와 그 생성 원인을 분석하였다. 철강재료는 열처리 조건과 조성에 따라 그 미세조직이 달라지는 데, 각 미세조직에 따라 기계적 특성뿐만 아니라 마멸특성도 달라진다는 것은 많은 문헌들을 통해 보고되어 있다[5~9]. 탄소강의 미끄럼 마멸특성에 대한 연구는 그간 매우 활발히 수행되어 왔으나, 그간의 연구들은 미세조직에 따라 변화하는 마멸속도와 그 원인 규명을 주로 다루었고, 미세조직과 마멸속도 편차 간의 관계에 대한 연구는 보고되어 있지 않다. 본 연구는 탄소강의 미세조직에 따른 마멸속도 편차 변화와 그 원인을 규명하기 위한 목적으로 수행되었는데, 탄소강 미세 조직 가운데에서도 특별히 펄라이트 분율에 따른 마멸속도 편차 변화에 중점을 두어 분석하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 탄소강의 미세조직, 특히 펄라이트(Pearlite) 분율에 따른 마멸속도 편차를 연구하기 위하여, 탄소 함량이 다른 4 종류 강을 사용하여 시험하였다. 표 1에 본 연구에 사용한 철강재의 조성을 나타내었고, 열처리 조건과 그에 따른 미세조직을 표 2에 나타내었다. 각 시편의 미세조직은 시편을 연마, 폴리싱 한 후, 5% Nital 용액으로 부식시켜 관찰하였다. 각 미세조직에서 펄라이트 분율은 이미지분석 프로그램을 이용하여 구하였다. 마멸실험은 Pin-on-disk 마멸시험기를 사용하여, 마멸트랙 반경 9mm, 무윤활 조건으로 상온에서 실시하였다. 전 시

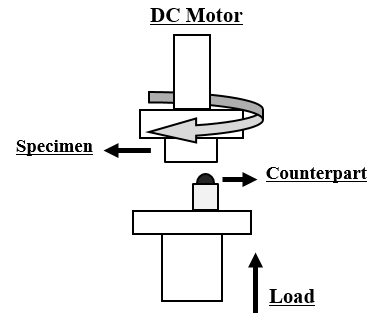


Fig. 1 A schematic diagram of the pin-on-disk sliding wear tester used in the present study

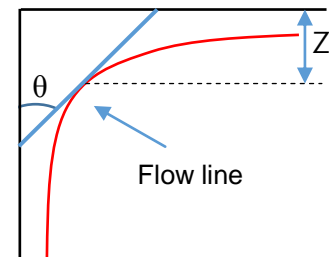


Fig. 2 A schematic diagram illustrating the method for estimating shear strain beneath the worn surface utilizing the flow lines

험에서 시험 습도는 $36 \pm 3\%$ 로 일정하게 유지하여, 마멸시험 조건에 따른 속도 편차 생성을 최소화하였다. 마멸상대재는 베어링강(AISI 52100) 구(Ball)를 사용하였다. 마멸하중과 미끄럼 거리는 100N과 300m로 고정하여 시험하였다. 또한 미끄럼 거리에 따른 마멸속도 편차를 확인하기 위하여, 100m 간격

으로 마멸속도를 측정하는 시험을 각 조직에 대해 700m 미끄럼 거리까지 실시하였다. 미끄럼마멸 속도는 마멸시험 전후 시편의 무게변화를 전자저울을 이용하여 측정하고, 이 값을 시편의 밀도와 미끄럼 거리로 나누어 산출하였다. Fig. 1에 본 연구에 사용된 Pin-on-disk 시험기의 개략도를 나타내었다. 마멸 시험 후, SEM을 이용하여 마멸면과 마멸 단면을 관찰하였다. 문헌[10]을 참조하여, 시험된 시편 마멸면으로부터의 깊이에 따른 변형률을 Fig. 2에 보인 방식으로 측정하였다. 미끄럼마멸 중 전단변형된 마멸면 직하 미세조직의 변형양상을 곡선으로 나타내고, 곡선의 각 점(깊이, Z)에서의 접선의 기울기를 구하고, 식 (1)을 이용하여 깊이에 따른 변형률($\epsilon(Z)$)을 산출하였다.

$$\epsilon(z) = \frac{\sqrt{3}}{3} \tan[\theta(z)] \quad (1)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 미세조직과 경도

Fig. 3은 표2의 조건으로 열처리된 각 시편의 미세조직을 보인다. 순철은 100% 페라이트 조직(100% Ferrite)을 보였고, 0.2% C 와 0.45% C 탄소강은 등축 페라이트와 펄라이트 혼합조직을 지녔는데, 펄라이트 분율은 각각 18%(18% Pearlite)와 54%(54% Pearlite)이었다. 베어링강은 100% 펄라이트(100% Pearlite) 조직을 나타내었다. 각 시편의 경도를 펄라이트 분율에 따라 나타낸 Fig. 4는 펄라이트 분율이 증가함에 따라 경도가 증가하는 것을 보인다. 시험된 조직 모두 경도의 편차는 매우 낮게 측정되어, 각 미세조직 시편에서 기계적 물성의 편차는 거의 없었음을 보인다. 시험된 시편 미세조직 내 각 상의 미소경도를 0.01kg 하중으로 측정하여 표 3에 나타내었다. 시험된 미세조직 모두에서 페라이트와 펄라이트 각 상의 경도가 유사하게 나타나, Fig. 4에 보인 시편 간의 경도 차이는 시편들 간의 펄라이트 분율 차이에 따른 것임을 알 수 있다.

3.2 마멸속도와 속도편차

시험된 시편의 마멸속도와 속도편차를 펄라이트 분율의 함수로 Fig. 5에 나타내었다. 그림에 나타낸 각 시편의 마멸속도와 편차는 각 시편을 3회~12회 시험하여 얻어진 결과들이다. 18% Pearlite 시편의 마

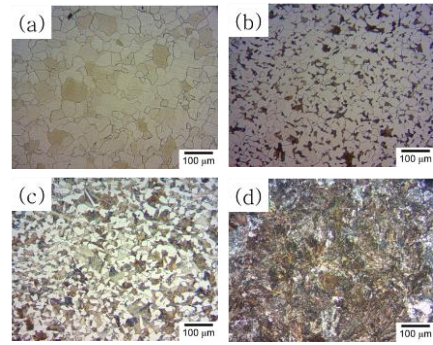


Fig. 3 Optical micrographs of the tested specimens: (a) 100 % Ferrite, (b) 18 % Pearlite (0.2C), (c) 54 % Pearlite (0.45C), and (d) 100 % Pearlite (1.0C)

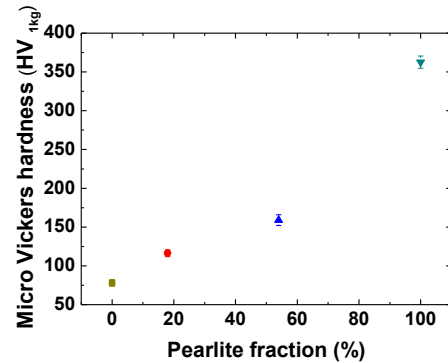


Fig. 4 Variation of micro Vickers hardness of the tested steel specimens as a function of pearlite fraction

Table 3 Micro Vickers hardness of the ferrite and pearlite phase in the tested microstructures

Microstructure	Micro Vickers hardness (HV _{0.01})	
	Ferrite	Pearlite
100 % Ferrite	124.6	-
18 % Pearlite	144.22	325.92
54 % Pearlite	144.83	329.82
100% Pearlite	-	334.1

멸속도가 가장 높고 속도편차가 가장 큰 것을 볼 수 있고, 이후 펄라이트 분율이 증가하면서 마멸속도와 그 편차가 감소하였다. Fig. 3의 결과와 비교하면, 시편의 경도가 증가할수록 마멸속도 편차가 대체적으로 감소했다. 100% 페라이트 조직 시편은 경도가 가장 낮았음에도 마멸속도가 낮았고, 속도 편차가 100% 펄라이트 조직과 유사하게 거의 없었다. 시험된 조직 시편 모두의 경도 편차가 4.3~7.8 HV 범위로

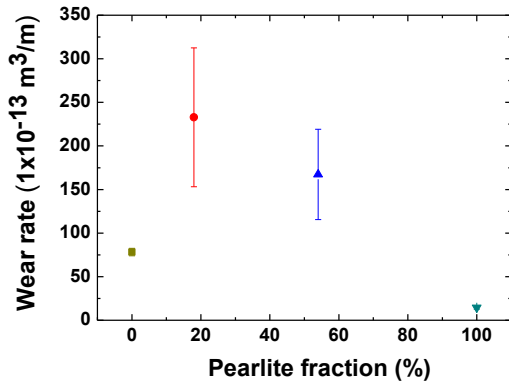


Fig. 5 Wear-rate variation of the tested steel specimens as a function of pearlite volume fraction. Mean deviation in the wear rate of each specimen is compared

매우 작았으나(Fig. 4), 마멸속도 편차는 경도 편차보다 높게 나타났고 미세조직에 따라 편차의 차이가 컸다. Fig. 4와 Fig. 5의 결과는 시험된 시편의 마멸속도 편차는 그 기계적 특성보다는 미세조직의 영향에 의해 나타났음을 시사한다.

Fig. 5는 단일조직과 복합조직에 따라 시편의 마멸속도 편차가 다른 것을 또한 보인다. 100% 페라이트와 펄라이트로 구성된 단일조직 시편에서는 마멸속도 편차가 각각 ± 4.3 과 $\pm 1.8 \times 10^{-13} \text{m}^3/\text{m}$ 로 매우 낮았으나, 18%와 54% 펄라이트 조직 시편에서는 편차가 각각 ± 79.7 과 $\pm 51.8 \times 10^{-13} \text{m}^3/\text{m}$ 로 단일 조직보다 매우 크게 나타났다. 마멸속도 편차가 단일조직과 복합조직(Ferrite+Pearlite) 시편에서 서로 크게 달랐다.

3.3 마멸면 관찰

마멸시험된 각 시편의 마멸면을 SEM으로 관찰한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 시험된 조직 시편의 마멸면 모두, 마멸면에 표면 변형층이 형성되고, 그 변형층으로부터 마멸 입자가 박리되며 마멸이 진행된 마멸기구를 잘 보여준다. 18%와 54% 펄라이트 조직 시편 마멸면(Fig. 6 (b), (c))에서 그 흔적들(마멸 입자가 변형층에서 떨어져 나간 흔적)이 더 두드러지고, 이는 펄라이트 분율에 따라 미끄럼 마멸속도의 편차가 발생하는 것이 마멸면 직하 변형층 내에서 마멸입자를 생성시키는 (마멸)균열의 생성, 성장과 관련이 있음을 시사한다. 또한 각 시편 마멸면의 평탄도를 비교하면, 100% 페라이트와 100% 펄라이트 시편의 마멸면(Fig. 6 (a), (d))이 18%와 54% 펄라

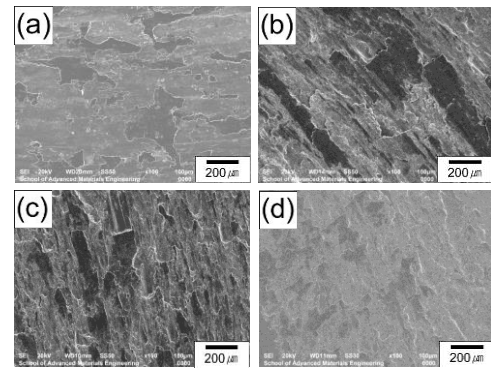


Fig. 6 SEM micrographs of worn surfaces of the tested steel specimens: (a) 100% Ferrite, (b) 18% Pearlite, (c) 54% Pearlite and (d) 100% Pearlite

이트 조직 시편의 마멸면에 비해 좀 더 평탄한 것을 볼 수 있다. 이 결과는 100% 페라이트와 100% 펄라이트 시편에서 마멸균열이 좀 더 일정하게 생성, 성장하였음을 보이고, 이들 시편에서 관찰된 낮은 마멸속도 편차가 일정하게 생성 성장한 마멸균열과 연관됨을 뒷받침한다.

경도가 가장 낮은 100% 페라이트 조직 시편의 마멸속도는 더 높은 경도를 갖는 18%, 54% 펄라이트 조직 시편보다 더 낮았다. Fig. 6 (a)에 나타낸 100% 페라이트 조직 시편 마멸면은 변형층 박리와 함께 응착마멸 양상을 함께 보이고, 이 시편에서는 생성된 마멸입자가 마멸면에 재응착되는 현상이 함께 발생하였음을 나타낸다. 100% 페라이트 조직 시편이 보인 낮은 마멸속도는 마멸입자의 재응착에 기인한 것으로 추정된다.

3.4 마멸단면 변형층 관찰

Fig. 7은 미끄럼 마멸 시험 후, 마멸면 직하에 생성된 마멸단면 변형층을 SEM으로 관찰한 결과이다. 시험된 전체 조직에서 변형층 내 균열이 관찰되어, Fig. 6에서 설명한 변형층 내에서의 마멸균열 생성과 성장에 의해 마멸입자가 발생하며 마멸이 진행된 결과를 확인시켜 준다. Fig. 7 (b), (c), (d)는 미세조직 내 펄라이트 분율이 증가함에 따라 변형층 내 마멸균열의 길이가 감소하는 것을 보인다.

100% 페라이트 조직과 100% 펄라이트 조직은 마멸면으로부터 10 μm 와 20 μm 깊이에서 주 균열이 생성 성장하고 있으나, 페라이트와 펄라이트가 혼재되어 있는 18%와 54% 펄라이트 조직은 변형층 내

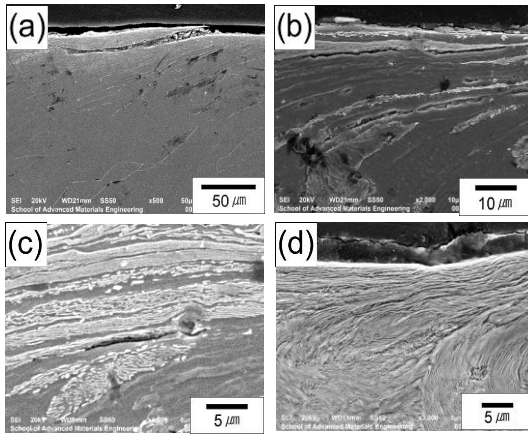


Fig. 7 SEM micrographs of cross section of the tested steel with different microstructure: (a) 100% Ferrite, (b) 18% Pearlite, (c) 54% Pearlite, and (d) 100 % Pearlite

펄라이트/페라이트 계면 여러 부위에서 균열이 생성되었다. 단일 조직 시편에서는 미끄럼마멸 중 마멸면 근처의 비교적 일정한 깊이에서 주 균열이 생성 성장한 반면, 페라이트와 펄라이트 두 조직이 혼재되어 있는 복합조직 시편에서는 두 조직의 계면에서 균열이 불균일하게 생성되었고, 균열 생성 깊이도 일정하지 않았다.

3.5 깊이에 따른 변형률 분포

미끄럼마멸 시험 후 형성된 마멸면 직하 변형층의 깊이에 따른 변형률을 계산한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 8 (b), (c), (d)는 조직 내 펄라이트 분율이 증가할 수록 변형층의 두께가 감소하고, 마멸면 전단변형률의 최대값 또한 감소하는 것을 보인다. 이 결과는 펄라이트 분율 증가에 따라 마멸속도 편차가 감소하는 것이 균열 생성 구역인 변형층의 두께 감소에 따라 균열 생성이 마멸면 근처로 좀 더 집중된 때문임을 확인시켜 준다.

100% 페라이트 단일 조직 시편에서는 조직 전체가 연성이 우수한 단일 페라이트 조직으로 구성되어 있고 상경계가 존재하지 않음으로 인하여, 변형층 두께가 가장 컸음에도 안정적인 마멸이 진행되며 마멸속도 편차가 작게 나타났다고 판단된다. 18% 펄라이트 복합조직 시편은 동일한 깊이에서 타 시편에 비해 더 높은 전단 변형률을 나타내었다. 마멸 중의 높은 변형률은 경도가 다른 두 조직 간의 변형률 불일치를 야기하고, 변형층 내 불균일한

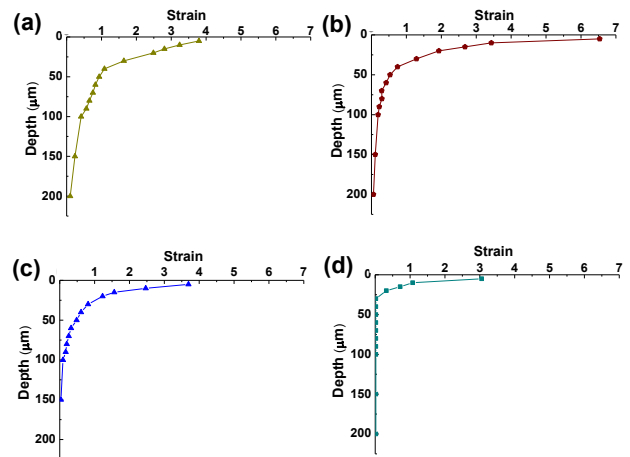


Fig. 8 Variation of the calculated shear strain as a function of the depth beneath the worn surface: (a) 100% Ferrite, (b) 18% Pearlite, (c) 54% Pearlite, and (d) 100 % Pearlite

페라이트/펄라이트 계면 균열 생성을 촉진하여, 높은 마멸속도 편차를 낳은 것으로 판단된다. 54% 펄라이트 복합조직 시편에서는 18% 펄라이트 시편에 비해 변형률이 낮았고 변형층 깊이도 얕아서 마멸 균열이 생성되는 구역이 비교적 균일하여 마멸속도 편차가 더 작아진 것으로 설명된다.

3.6 구간별 마멸실험

마멸속도의 편차 원인이 전체 300m 마멸 거리 중, 초기 마멸 구간에서의 마멸량이 정상 상태에서의 마멸량에 비해 커서 나타난 결과인지의 여부를 판단하기 위해, 마멸속도 편차가 작았던 페라이트 조직 시편과 편차가 가장 컸던 18% 펄라이트 조직 시편의 구간별 마멸시험을 실시하였다. 총 미끄럼거리 700m를 100m 간격으로 마멸시험을 실시하여 각 구간에서의 마멸속도를 측정하였고 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9의 각각의 마멸속도는 해당 구간 100m 거리에 대한 마멸속도를 나타낸다. 변형층 내 균열이 마멸면 근처에 균일하게 생성된 페라이트 조직은 각 100m 구간의 마멸속도가 균일하였고 그에 따라 전 구간 마멸속도 편차가 작았다. 그러나, 18% 펄라이트 혼합조직 시편에서는 각각의 100m 구간에서 마멸속도가 불규칙하게 변하였고, 전체 마멸속도 편차가 크게 나타났다. 이 결과는 페라이트/펄라이트 계면에서 균열이 불균일하게 생성되어 마멸속도가 불규칙해지는 것이 미끄럼마멸 초기의 거

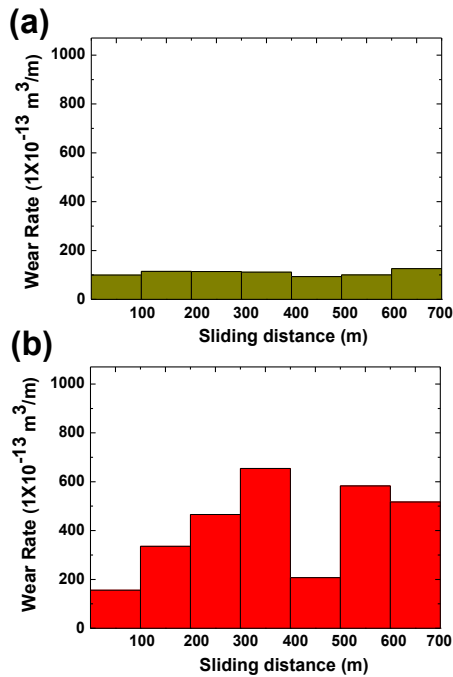


Fig. 9 Variation of the sliding wear rate measured at every 100m during 700m sliding: (a) 100 % Ferrite, (b) 18% Pearlitic

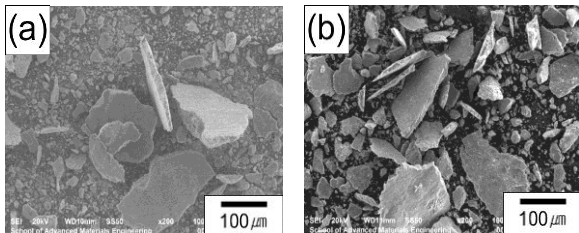


Fig.10 SEM micrographs of the wear particle generated at the specific sliding-distance interval (400 ~ 500 m) during the whole 700m sliding distance: (a) 100% Ferrite, (b) 18 % Pearlitic

동이 아닌 것을 나타낸다.

Fig. 10은 Fig. 8의 400~500m 구간 시험에서 채취한 두 시편의 마멸입자를 SEM으로 비교 관찰한 결과이다. 두 시편 모두 마멸입자는 판상이었으나, 100% 페라이트 조직 시편의 마멸 입자 크기가 좀 더 균일하였고 입자의 두께도 더 얇아, 마멸 중 균열 생성이 마멸면 근처에 집중되었음을 보여준다. 18% 펄라이트 조직 시편의 입자는 크기와 두께가 페라이트 조직 시편에 비해 불균일하였다. 페라이트/펄라이트 계면에서 생성되는 균열 생성 구역이 일정하지 않아, 마멸입자의 크기와 두께가 불균일해진 것으로 설명된다.

4. 결론

(1) 페라이트와 펄라이트가 혼재한 미세조직을 지닌 탄소강의 미끄럼마멸 시험 중 관찰되는 마멸속도의 큰 편차는 변형층 내의 페라이트/펄라이트 계면에서 마멸 균열이 불균일하게 생성되고, 성장한 때문으로 설명되었다.

(2) 페라이트와 펄라이트가 혼재한 미세조직 내의 펄라이트 분율이 증가하면 미끄럼 마멸속도와 마멸속도 편차가 감소하였다. 펄라이트 분율이 증가하면서 변형층의 두께와 마멸면 전단변형율이 감소하면서 균열 생성 구역이 좁아지고 균열 생성이 균일해져, 마멸속도와 속도편차가 감소하였다.

(3) 100% 페라이트와 펄라이트 단일 조직에서는 미끄럼 마멸 시 마멸 균열 생성 구역이 균일하고 균열의 생성과 성장이 비교적 일정하여, 마멸속도 편차가 작게 나타났다.

REFERENCES

- [1] K. H. Zum Gahr, 1987, Microstructure and Wear of Materials, ELSEVIER, Amsterdam, pp. 351~353.
- [2] S. Q. Wang, M. X. Wei, F. Wang, Y. T. Zhao, 2010, Transition of Elevated-temperature Wear Mechanisms and the Oxidative Delamination Wear in Hot-working Die Steels, Tribol. Int., Vol. 43, No. 3, pp. 577~584.
- [3] A. M. Al-Qutub, A. Khalil, N. Saheb, A. S. Hakeem, 2013, Wear and Friction Behavior of Al6061 Alloy Reinforced with Carbon Nanotubes, Wear, Vol. 297, No. 1-2, pp. 752~761.
- [4] Q. Y. Zhang, K. M. Chen, L. Wang, X. H. Cui, 2013, Characteristics of Oxidative Wear and Oxidative Mild Wear, Tribol. Int., Vol. 61, pp. 214~223.
- [5] S. Kumar, A. Bhattacharyya, D. K. Mondal, K. Biswas, J. Maity, 2011, Dry Sliding Wear Behaviour of Medium Carbon Steel Against an Alumina Disk, Wear, Vol. 270, No. 5-6, pp. 413~421.
- [6] 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.
- [7] C. C. Viàfara, M. I. Castro, J. M. Vélez, A. Toro, 2005, Unlubricated Sliding Wear of Pearlitic and Bainitic Steels, Wear, Vol. 259, No. 1-6, pp. 405~411.

- [8] V. Abouei, H. Saghafian, Sh. Kheirandish, Kh. Ranjbar, 2008, An Investigation of the Wear Behaviour of 0.2% C dual Phase Steels, J. Mater. Process. Technol., Vol. 203, No. 1-3 pp. 107~112.
- [9] 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.
- [10] B. Venkataraman, G Sundararajan, 1996, The Sliding Wear Behavior of Al-SiC Particulate Composites- II. The Characterization of Subsurface Deformation and Correlation with Wear Behavior, Acta Mater., Vol. 44, No. 2, pp. 461~473.