

# Fe-17Mn 합금의 상에 따른 미끄럼 마멸 거동의 변화

이종은<sup>1</sup> · 김용석<sup>#</sup>

## Sliding Wear Characteristics of the Fe-17Mn Alloy with Various Phases

J. E. Lee<sup>1</sup>, Y. -S. Kim<sup>#</sup>

### Abstract

It is reported that  $\epsilon$  (HCP) and  $\gamma$  (FCC) phases of a Fe-17Mn alloy transform to  $\alpha'$  phase, which has BCC structure, under a deformation condition. In this study, we investigated the effect of strain-induced-transformed  $\alpha'$  phase on sliding wear of the Fe-17Mn alloy that originally had  $\epsilon$  and  $\gamma$  phases. Wear tests of the materials were carried out using a pin-on-disk wear tester at various loads of 0.5N-50N under a constant sliding speed condition of 0.38m/s against glass (83% SiO<sub>2</sub>) beads. The sliding distance and radius were 300m and 9 mm, respectively. Wear rate of the Fe-17Mn alloy was calculated by dividing the weight loss, measured to the accuracy of 10<sup>-5</sup>g by the measured specific gravity and sliding distance. Worn surface and wear debris of the specimens were examined using an SEM and XRD. During the wear,  $\alpha'$  phase of BCC structure was formed by strain-induced transformation when the applied wear load exceeded critical values. The  $\alpha'$  phase formed by the strain induced transformation increased the wear rate of the Fe-17Mn alloy.

**Key Words** : Sliding wear, Fe-17Mn alloy, strain-induced-transformation,  $\alpha'$  phase, phase

### 1. 서 론

Mn 함량이 높은 Fe-Mn 합금은 그 다양한 산업적 응용성으로 인하여 많은 연구자들의 주의를 끌어들였는데, Fe-Mn 합금의 형상기억 효과, 우수한 방진 특성, 높은 가공경화능 등을 응용한 연구가 활발하다 [1-3]. Fe-Mn 합금은 Mn 함량에 따라  $\gamma$  상(FCC)에서  $\epsilon$  상(HCP)으로, 또는  $\gamma$  상(FCC)이  $\epsilon$  상(HCP)을 거쳐  $\alpha'$  상(BCC)으로 변태하며, 이들 상과 혼재된 상의 분율에 따라 합금의 기계적 물리적 성질이 크게 변화하는 것으로 알려져 있다 [4]. Fe-Mn계 합금에서, M<sub>n</sub> 온도 아래에서 존재하는  $\epsilon$  마르텐사이트 상의 부피분율은 비열적탄성 변태의 불완전성 때문에 열처리 및 변형조건과

밀접히 연관된 것으로 알려져 있다 [5]. 상온에서  $\epsilon$  상(HCP)과  $\gamma$  상(FCC)이 동시에 관찰되는 Fe-17Mn 합금 또한 균질화열처리(1000℃, 1h)의 유무에 따라  $\epsilon$  상(HCP)의 부피분율이 변화하는 것이 XRD 분석결과를 통한 연구 결과로 보고되어 있다 [1]. Fe-17Mn 합금의 또 다른 특징은 합금에 변형이 가해지면 혼재하던  $\epsilon$ (HCP)상과  $\gamma$ (FCC)상이  $\alpha'$  (BCC)상으로 변형유기변태를 하는 점이다. Fe-17Mn 합금에서, 변형유기변태 된  $\alpha'$  (BCC) 마르텐사이트 상은  $\epsilon$ (HCP)상 안에서 최초로 형성되기 때문에, 균질화 열처리를 통해 얻어지는  $\epsilon$ (HCP)상의 부피가 변형유기변태에 의해 생성되는  $\alpha'$  (BCC)상의 양을 결정짓는 중요한 요소가 된다. 변형의 초기 단계에서 변형유기변태된  $\alpha'$  (BCC)

1. 국민대학교 신소재공학부

# 교신저자: 국민대학교 신소재공학부,

E-mail: ykim@kookmin.ac.kr

상은 가공경화 속도를 낮춰 소성변형을 돕지만, 계속적인 변형에 의해 유기변태 된  $\alpha'$  (BCC)상이 축적되면 가공경화 속도가 증가되어 연속적인 소성변형에 장애물이 된다고 알려져 있다 [1]. 본 연구는  $\epsilon$  (HCP)상과  $\gamma$  (FCC)상이 혼재된 Fe-17Mn 합금의 마멸 중에 생성되는 변형유기변태  $\alpha'$  상이 Fe-17Mn 합금의 미끄럼 마멸에 미치는 영향을 연구하기 위한 목적으로 행하여졌다.

## 2. 실험방법

### 2.1 시험시편

본 연구에 사용된 소재는 Fe-17Mn 합금으로, 열간압연 후에 공냉된 판재로 공급 받았다. 압연된 판재를 1000°C, 아르곤 개스 분위기 하에서 1시간 동안 균질화 열처리 한 후 수냉하였다. Fe-17Mn 합금을 상온에서 변형 시키면, 변형유기변태에 의해  $\alpha'$  상이 생성되는 것으로 알려져 있으므로 [1], 균질화 열처리된 Fe-17Mn 합금을 상온에서 압하율 30%로 압하하여, 균질화 열처리된 시편과 다른 상을 지닌 시편을 또한 제조하였다. 열처리된 판재와 냉간압연된 판재로부터 직경 25mm, 두께 8mm의 디스크(disk) 시편을 제작하였다. 디스크(disk) 시편을 2000번까지의 SiC 연마지로 연마하여 0.3 $\mu$ m 이내의 일정한 표면조도를 갖도록 하였다.

### 2.2 미끄럼 마멸시험

Fe-17Mn의 마멸특성을 파악하기 위한 미끄럼 마멸시험은 pin-on-disk 형태의 마멸시험기를 사용하여 대기 중에서 실시되었다. 마멸 시험 도중 시편 미끄럼 방향(측방향) 힘을 계속적으로 측정하여 마멸 시험 중에 변화하는 마찰계수를 실시간으로 계산하였다. 마멸시험 시 일정한 마멸조건을 유지하기 위하여 시험온도는 23 $\pm$ 2°C, 습도는 40 $\pm$ 5%로 고정하였고, 미끄럼 거리는 300m, 디스크 시편 상에 형성되는 마멸 트랙의 반경은 9mm, 미끄럼 속도는 0.38m/s로 일정하게 유지하였다. 마멸 (적용) 하중으로는 10, 20, 30 및 50N의 하중을 적용하여, 마멸 하중에 따른 시편의 마멸량 변화를 측정하였다. 마멸시험 결과의 재현성을 확인하고 정확도를 높이기 위하여 동일한 시편을 동일한 마멸 시험조건 하에서 3번 이상 실험하고 그 평균값을 그 시편의 마멸속도로 취하였다. Fe-17Mn 합금의 마멸 상대재로는 SiO<sub>2</sub>가

83% 첨가된 glass bead를 사용하였다. 마멸된 시편의 마멸기구를 연구하기 위하여 SEM과 XRD를 이용하여 마멸된 시편표면과 마멸단면, 그리고 마멸입자를 분석하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 상온 미끄럼 마멸시험

그림 1에 1000°C에서 1시간 동안 균질화 열처리된 Fe-17Mn 합금 시편과 열처리된 시편을 상온에서 30% 압하율로 압연한 시편의 상온 마멸시험 결과를 마멸하중을 변수로 나타내었다. 두 시편 모두 마멸속도는 하중의 증가와 함께 증가하고 있다. 그러나, 하중에 따른 두 시편의 마멸속도 증가의 경향은 차이를 보인다. 균질화 열처리된 시편의 마멸속도 증가의 기울기는 마멸하중이 20N이 될 때까지는 비교적 낮았으나, 하중이 20N 이상이 되면서 크게 증가하였다. 이에 반하여 30% 압하율로 냉간압연된 시편의 마멸속도 증가 기울기는 시험된 하중 전체에서 비교적 균일하였다.

냉간압연된 시편의 마멸속도 증가 기울기는 균질화 열처리된 시편이 높은 하중에서 나타낸 기울기와 유사하였다. 냉간압연된 시편의 상이 변형유기변태에 의한  $\alpha'$  상일 확률이 높으므로, 두 시편 간의 유사한 마멸속도 증가 기울기는 균질

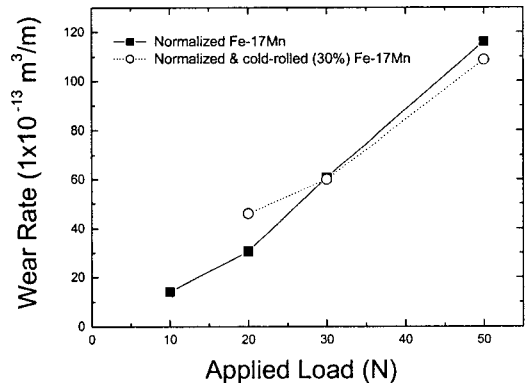


Fig. 1. Wear rate variation of the normalized and cold rolled (after the normalizing heat treatment) Fe-17Mn specimens as a function of applied load.

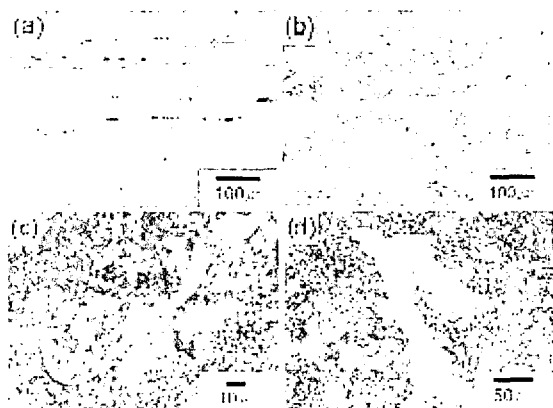
화 열처리된 시편에서도 마멸 시험 도중에 변형유기변태에 의해  $\alpha'$  상이 생성되었음을 시사한다.

표 1은 균질화 열처리된 Fe-17Mn 합금과 균질화 열처리 후 상온에서 30%의 압하율로 냉간압연된 Fe-17Mn 합금 시편의 로크웰 경도값을 보인다.

**Table 1. Hardness of the normalized and cold rolled (after the normalizing heat treatment) Fe-17Mn specimens**

	Normalized	30% Cold rolled
Hardness (HRB)	91	110

그림 1에서, 냉간압연된 시편의 마멸속도는 20N 하중에서 그 정도값이 균질화 열처리된 시편보다 월등히 높음에도 불구하고, 열처리된 시편보다 더 높게 나타났다. 냉간 압연된 시편의 마멸속도는 적용하중이 30N, 50N으로 증가함에 따라 균질화 열처리된 시편의 마멸속도와 유사하거나 더 낮게 나타났다. 압연 변형과 같은 외부응력에 의해  $\alpha'$  상이 생성된 Fe-17Mn 합금은 BCC구조를 지니고, 비교적 낮은 하중인 20N에서도, BCC 금속의 전형적인 마멸 기구인 박리마멸(delamination wear)에 의하여 판상 형태의 마멸입자가 형성되며, 그 마멸속도가 높았다. 변형의 초기단계에 변태된  $\alpha'$  상은 가공경화 속도를 낮추지만, 변형이 진행됨에 따라 변형유기변태된  $\alpha'$  상은 더 많이 축적되고, 이로 인하여 합금의 가공경화속도는 증가한다고 알려져 있다 [1]. 냉간압연된 시편의 마멸속도가, 마멸하중 30N, 50N



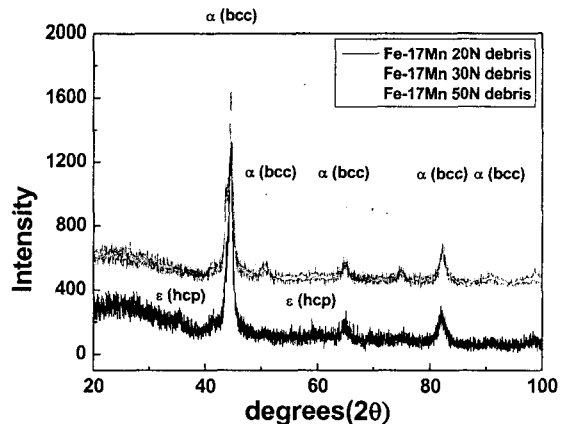
**Fig. 2. SEM micrographs of worn surface and wear debris of normalized Fe-17Mn alloy tested at the load of 10N (a, c) and 50N (b, d).**

에서, 균질화 열처리 시편과 유사하거나 더 낮은 것은 축적된  $\alpha'$  상의 파괴 증가에 의한 가공경화속도의 증가때문으로 추정된다.

그림 2는 균질화 열처리된 Fe-17Mn 합금 시편의 마멸면과 마멸입자의 SEM 사진들이다. 10N 하중에서 시험된 마멸면은 HCP 구조 금속의 마멸면에서 흔히 관찰되는 발을 쟁기질 한 듯한 독특한 마멸면을 보인다. 또한 절삭 칩(cutting chip) 같은 주름진 벨로즈(bellows)형태의 마멸입자가 10N 하중에서 시험된 시편으로부터 관찰되었다.

그러나 50N에서 시험된 시편에서는 이와는 다른 심한 변형을 받은 마멸면과 길쭉한 판상형태의 마멸입자가 관찰되었다. 고하중에서 시험된 시편에서 저하중과는 상이한 마멸면과 마멸입자가 관찰된 결과는, 저하중에서는 낮은 하중에 의해 변형유기 변태가 활발히 일어나지 못해 시험전부터 시편에 존재한  $\epsilon$ (HCP)상이 주로 마멸특성에 영향을 미친 때문으로 사료된다. 고하중에서는  $\epsilon$ 상(HCP)과  $\gamma$ 상(FCC)이  $\alpha'$  상으로 변형유기변태되면서 BCC 구조 금속의 마멸이 일어나며, 저하중과는 다른 마멸 양상이 나타난 것으로 설명된다.

균질화 열처리된 Fe-17Mn 합금의 마멸 시험 후 채취한 마멸입자를 XRD 분석하였고, 그 결과를 그림 3에 나타내었다. 균질화 열처리된 Fe-17Mn 합금에는  $\epsilon$ (HCP)상과  $\gamma$ (FCC)상이 혼재하는 것으로 알려져 있다 [6]. 마멸 시험 후 채취한 마멸 입



**Fig. 3. X-ray diffraction pattern of normalized Fe-17Mn alloy wear debris obtained from specimens tested at various loads.**

자를 XRD한 결과는 초기에 존재하던  $\epsilon$ (HCP)상과  $\gamma$ (FCC)상이  $\alpha'$  (BCC)상으로 변형유기 마르텐사이트 변태 되었음을 잘 확인시켜 준다. 마멸 시험 전에 존재하던  $\epsilon$ (HCP)상과  $\gamma$ (FCC)상은 마멸하중이 20N으로 시험된 마멸 입자에서만  $\epsilon$ (HCP)상 피크 (peak)로 관찰되었다. 30N과 50N 하중으로 시험된 시편의 마멸입자에서는 모두  $\alpha'$  (BCC)상 피크가 검출되었다. 적용하중이 증가함에 따라  $\alpha'$  마르텐사이트로 변형유기 변태가 활발히 진행되었음을 마멸입자 XRD 분석 결과는 잘 확인시켜준다.

#### 4. 결론

$\epsilon$ (HCP)상과  $\gamma$ (FCC)상이 혼재된 Fe-17Mn 합금의 마멸 시험을 하중을 변수로 행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 1000°C에서 1 시간 동안 균질화 열처리한 Fe-17Mn 합금의 마멸속도는 하중의 증가에 따라 증가하였고, 적용하중 30N 부터는 변형유기변태에 의해 생성된  $\alpha'$  상의 영향으로 마멸속도 증가가 가속되었다.

(2) 마멸시험 전에 미리 생성된  $\alpha'$  상이 마멸 속도에 미치는 영향을 조사하기 위해, 균질화 열처리한 Fe-17Mn 합금을 30% 압하율로 냉간압연하고 마멸 시험을 한 결과, 균질화 열처리한 시편과 같이 압연된 시편의 마멸속도는 적용하중에

따라 증가하였지만 마멸속도 증가의 기울기는 균질화 열처리한 경우에 비하여 낮게 나타났다.

(3) 균질화 열처리한 Fe-17Mn 합금의 마멸입자를 XRD 분석하여, 마멸 시험 중에 변형유기 변태가 일어났음을 확인하였다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Y. Tomota, 1986, Microstructural Dependence of Fe-High Mn Tensile Behavior, Metallurgical Transactions A, Vol. 17A, pp. 537-547.
- [2] A. Sato, 1982, Shape memory effect in  $\gamma \leftrightarrow \epsilon$  transformation in Fe-30Mn-1Si alloy single crystals, Acta Metall., Vol. 30, pp. 1177-1183.
- [3] S.W. Jun, 1999, The Effects of Deformation on Damping Capacity and Transformation Behavior in Fe-Mn Alloys, J. Kor. Inst. Met. & Mater, Vol. 37, No. 7, pp. 749-753.
- [4] Y. K. Lee, 1996, Effect of martensite content on the damping capacity of Fe-17%Mn alloy, Scripta Mater., Vol. 35, No7, pp. 825-830.
- [5] K. K. Jee, 2004, Measurement of volume fraction of  $\epsilon$  martensite in Fe-Mn based alloys, Materials Science and Engineering A, Vol. A378, pp. 319-322.
- [6] A. Holden, 1971, Structure and properties of Iron-Manganese Alloys, Journal of The Iron and Steel Institute, September, pp 721-728.