

## 고질소 Fe-18Cr-18Mn-2Mo-0.9N 강의 미끄럼 마멸 기구

김승덕<sup>1</sup>, 김성준<sup>2</sup>, 김용석<sup>#</sup>

### Sliding wear mechanism of the high-nitrogen austenitic 18Cr-18Mn02Mo-0.9N steel

S. D. Kim, S.-J. Kim, Y.-S. Kim

#### Abstract

Sliding wear mechanism of a high nitrogen austenitic 18Cr-18Mn-2Mo-0.9N steel has been investigated. Dry sliding wear tests of the steel were carried out at various loads of 1N-10N under a constant sliding speed condition of 0.15m/s against AISI 52100 bearing steel balls. Solution (1050°C) and isothermal aging (900°C) heat treatments were performed on the steel and the effect of the heat treatments on the wear were investigated. Wear rates of the solution-treated steel specimen remained low until 5N, and then increased abruptly at loads above 5N. The rates of isothermally aged specimens were low and increased gradually with the applied load. Worn surfaces, their cross sections, and wear debris of the steel specimens were examined with a scanning electron microscopy. Phases of the heat-treated specimen and the wear debris were identified using XRD. Phases transformed underneath the sliding track during the wear were investigated and analyzed using TEM. Effects of the phase transformation during the wear and Cr<sub>2</sub>N precipitates formed during the isothermal aging on the wear of the austenitic steel were discussed.

**Key Words :** High-Nitrogen Steel, Austenitic Steel, 18Cr-18Mn-2Mo-0.9N steel, Sliding Wear, Wear Mechanism, Cr<sub>2</sub>N

#### 1. 서 론

오스테나이트 스테인리스 강의 기지에 침입형 불순물 원소로 질소를 고용시킨 고질소강(high-nitrogen steel, HNS)이 최근 각광을 받고 있다. HNS는 연성과 인성의 큰 감소 없이 높은 강도를 유지하는 매력적인 장점을 지닌다. FCC 오스테나이트 기지에서 질소는 고용강화를 낳고[1], 적층결함 에너지(SFE)를 낮추어[2], 강의 기계적 특성 및 마멸 저항성을 높이는 것으로 알려져 있다. HNS의 마멸기구에 대한 연구는 아직 널리 진행되어 있지 않으나, 질소에 의한 가공경화, SFE의 변화, 마멸면 직하에서의 상변태 등으로 그 마멸 특성

을 규명하는 시도들이 보고되어 있다[3]. 일반적으로 오스테나이트 스테인리스강의 변형 유기 변태는 소성변형량의 증가와 함께  $\gamma(\text{FCC}) \rightarrow \epsilon(\text{HCP}) \rightarrow \alpha'(\text{BCC})$ 으로 진행된다고 알려져 있다[4].

본 연구는 마멸 시 적용 하중의 증가와 함께 마멸면 직하에서 일어나는 가공경화 및 상변태 특성으로 HNS의 마멸 기구를 분석하고자 하는 목적으로 수행되었다. 1050°C에서 30분간 용체화 처리한 Fe-18Cr-18Mn-2Mo-0.9N 강의 건식 미끄럼 마멸 시험을 AISI 52100 베어링강을 상대재로 pin-on-disk 형태의 마멸 시험기를 사용하여, 상온 대기 중에서 1~10N의 적용 하중, 800m 마멸거리로 실시하였다. 하중에 따른 고질소강의 마멸 특성을 연구하여, 그 마멸기구를 분석하였다.

1. 국민대학교 신소재공학부

2. 한국기계연구원 환경친화형 철강재료 연구실

# 교신저자: 국민대학교 신소재공학부,

E-mail: ykim@kookmin.ac.kr

## 2. 실험방법

본 연구에 사용한 소재는 Fe-18Cr-18Mn-2Mo-0.9N 합금(P900MNo)으로, 그 화학 조성을 표 1에 나타내었다. 초기 두께 5mm의 판재를 2mm까지 냉간 압연 한 후 디스크 형태의 마멸시편을 가공하였다. 용체화 열처리를 1050°C에서 30분간 하고 수냉하였다. Cr<sub>2</sub>N 석출상이 마멸에 미치는 영향을 파악하기 위하여 용체화 처리한 시편을 다시 900°C에서 27.7시간 동안 시효처리 하였다. 열처리된 마멸시편은 2000번 SiC 연마지까지 연마되어 0.3 μm 이내의 일정한 표면조도를 갖도록 하였다.

Table 1. Chemical composition of P900MNo (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	N
0.038	0.77	18.60	0.020	0.001	17.94	2.09	0.89

건설식 미끄럼 마멸시험은 pin-on-disk 형태의 마멸시험기를 사용하여 상온, 대기 중에서 실시되었다. 마멸상대재로 AISI 52100 베어링강을 사용하였다. 마멸시험 시 일정한 마멸조건을 유지하기 위하여 시험온도는 23±2°C, 습도는 40±5%로 고정하였고, 미끄럼 거리는 800m, 디스크 시편 상의 마멸 트랙 반경은 10mm, 미끄럼 속도는 0.15 m/s로 일정하게 유지하였다. 마멸 하중은 1, 5, 10N의 하중을 적용하여, 마멸 하중에 따른 시편의 마멸량 변화를 측정하였다. 시험 중 연속적으로 마찰계수를 측정하였고, 시편의 마멸량은 마멸 시험 전후의 시편의 무게변화를 정밀저울로 측정하여 계산하였다. 마멸기구 분석을 위하여 SEM을 이용하여 마멸면과 마멸단면, 그리고 마멸입자를 분석하였고 변형 전후의 미세조직을 관찰하기 위하여 TEM을 이용하였다. 그리고 상변태의 유무를 확인하기 위하여 XRD를 이용하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

그림 1에 열처리 조건에 따른 시편의 조직 사진을 나타내었다. 용체화 처리 후 시효처리된 시편 조직은 입계를 중심으로 석출된 Cr<sub>2</sub>N 질화물을 보인다.

그림 2는 마멸하중의 증가에 따른 마멸속도의 변화를 보인다. 용체화 처리한 시편의 경우에 초

기 낮은 하중에서는 마멸 속도가 완만한 증가를 보이나, 하중이 5N을 넘어서면 급격히 증가하였다. 마멸속도의 급격한 변화는 적용 하중이 일정값을 넘어서면 시편의 마멸 기구가 변화하는 것을 시사한다. 이에 반하여 시효처리 한 시편의 경우에는, 초기 5N 하중까지는 작은 차이이지만 용체화 처리한 시편 보다 높은 마멸 속도 값이 측정되었다. 그러나 그 이상의 하중에서는 마멸속도는 크게 증가하지 않았고, 하중에 따른 마멸속도 증가의 기울기는 일정하였다. 이 같은 일정한 기울기는 시효처리 한 시편의 마멸 기구가 시험 하중 내에서 일정하였음을 보여준다.

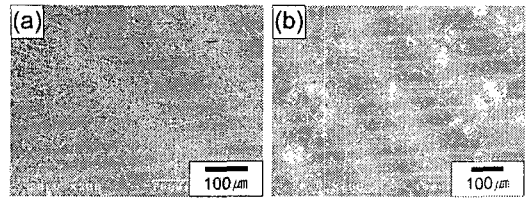


Fig. 1 SEM micrographs of P900MNo specimen: (a) solution treated, (b) isothermally aged.

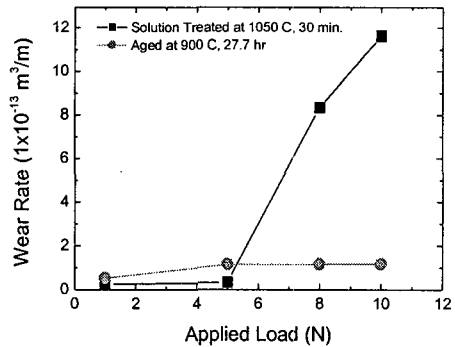


Fig. 2 Wear rate vs. applied load of the high-nitrogen heat treated P900MNo specimens.

그림 3은 마멸시험된 P900MNo 시편의 마멸면을 관찰한 SEM 사진들이다. 1N, 5N, 10N 하중에서 시험된 용체화 처리 시편과 시효처리된 시편 결과가 비교되어 있다. 1N과 5N 하중에서 낮은 마멸 속도를 보인 두 열처리 시편은 유사한, 응착(adhesion)에 의한 마멸 양상을 보인다(그림 3(a)~(d)). 그러나 10N 하중에서의 마멸면은 열처리 조건에 따라 상이하였다. 시효처리 한 시편의 경

우에는 여전히 응착 마멸 양상을 보였으나, 용체화 처리한 시편의 경우에는 연삭(abrasion) 마멸에 의한 깨끗한 면을 보인다. 이와 같은 차이는 마멸면 직하에서 일어나는 미세조직의 변화로 설명될 수 있다.

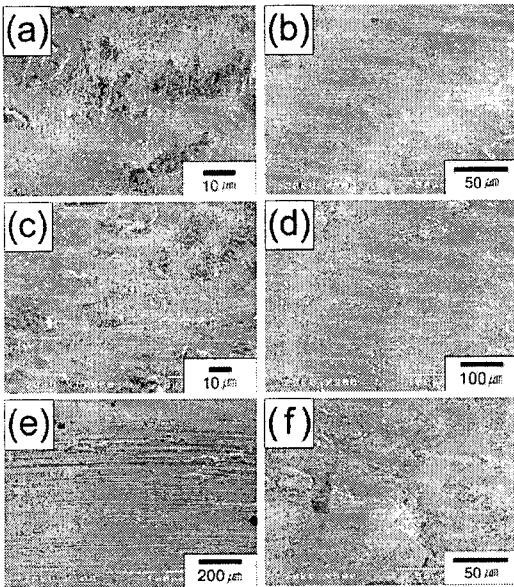


Fig. 3 SEM micrographs of worn surfaces of solution treated (a, c, e) and aged (b, d, f) P900NMo specimens tested at the load of 1N (a, b), 5N (c, d), and 10N (e, f).

침입형 원소로서 질소, 산소, 붕소는 고용강화 효과가 있고, 그 중 질소는 다른 원소보다 그 효과가 훨씬 크다[1]. 질소는 또한 적층결함에너지 (stacking fault energy, SFE)를 낮추는 것으로 알려져 있다. 낮은 SFE는 전위의 교차슬립과 상승(climb)을 억제하고 면슬립(planar slip), 쌍정 변형을 유발한다. 또한 전위 셀 형성을 억제하여, 마멸 변형 동안 마멸면 직하로 가공경화 구간을 국한하는 효과를 지닌다[3]. 가공 경화로 단단해진 하부층은 마멸 시 생성되는 기계적혼합층(mechanically mixed layer, MML)의 생성을 촉진하고, MML 층은 상대재와 시편 간의 직접 접촉을 막고 소성변형량을 낮추어 마멸 속도를 낮추게 된다. 또한 MML 층의 마멸이 고질소강의 마멸을 결정하므로, 마멸입자의 크기는 매우 작게 된다.

적용 하중의 증가에 따라 변형량이 증가하여, 변형유기변태에 의해 자발적으로 마르텐사이트

변태가 일어나기에 충분한 에너지가 축적되면 마멸면 직하에서는 마르텐사이트가 생성되기 시작한다. 그림 4는 용체화 처리한 시편의 마멸 전 표면과 마멸시험 후 채취한 마멸 입자의 XRD 결과를 보인다. 마멸 전 시편에서는 단상 오스테나이트가, 마멸입자에서는 변형유기 변태에 의한  $\alpha'$  마르텐사이트가 생성된 것을 볼 수 있다. 이 같은 결과는 마멸 변형 동안  $\alpha'$  마르텐사이트가 생성되었고, 마멸 입자로 떨어져 나갔음을 보인다. 지속적인 소성변형에 의해 깨져 나간다는 사실을 알 수 있다.

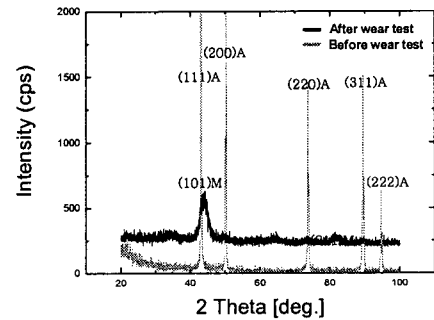
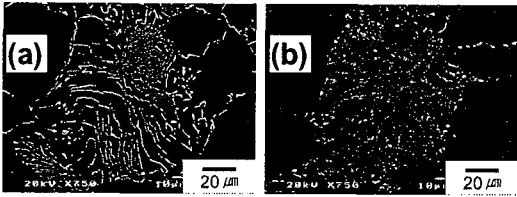


Fig. 4 XRD spectrum of solution treated P900NMo specimen and wear debris of the solution treated specimen tested at the load of 10N.

용체화 처리한 시편과 비교하여, 시효 처리한 시편의 마멸속도는 그림 2에서 낮은 하중에서 용체화 처리한 시편보다 조금 높게 측정되었다. 이 같은 결과는 시효 처리한 시편의 소성 변형에 의한 가공 경화능이 용체화 처리한 시편에 비해 떨어지는 때문으로 설명될 수 있다. 조직 내에 석출한  $\text{Cr}_2\text{N}$  질화물들은 입자강화 복합재료 내의 강화입자와 같이 마멸 변형 동안 마멸 하중을 분담하고, 질소가 고용된 오스테나이트 기지로서의 하중 전달 양을 줄여, 기지의 가공경화 정도를 낮추게 된다. 이에 따라 마멸면 직하에서 가공경화의 정도가 낮아, 마멸면에 MML 층이 좀 더 두껍게 생기게 되고 (그림 3 (b), (d), (f) 참조), 마멸 입자의 크기가 크고 마멸 속도가 용체화 처리 시편에 비하여 높아진 것으로 여겨진다. 그러나, 고하중에서는 용체화 처리한 시편에 비해 훨씬 낮은 마멸 속도를 보이는데 이는 시효처리에 의해 생성된

Cr<sub>2</sub>N 석출물들이 외부 하중을 상당량 흡수하여 기지가 받는 실제 하중의 양을 줄여, 마르텐사이트 변태가 일어날 충분한 양의 에너지가 축적되지 못하고 α' 마르텐사이트로의 변태가 일어나지 못한 때문으로 설명된다.



**Fig. 5 SEM micrographs of aged P900NMo specimen before (a) and after (b) the wear test at 10N.**

그림 5는 시효처리한 시편의 마멸 전과 10N 하중에서 마멸 시험 후의 마멸면에서 Cr<sub>2</sub>N 석출물들의 변화 양상을 보인다. 마멸 시험 후의 Cr<sub>2</sub>N 석출물들은 심하게 변형되고, 파괴되어, 마멸 중 Cr<sub>2</sub>N 석출물들이 외부 하중을 상당량 흡수한 것을 잘 보인다.

#### 4. 결론

용체화 열처리와 시효처리된 고질소 오스테나이트 Fe-18Cr-18Mn-2Mo-0.9N 강의 미끄럼 마멸 시험을 행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 마멸 하중 증가에 따라 용체화 처리한 시편에서 5N 이상의 하중에서 마멸속도의 급격한 증가가 관찰되었다. 시효처리 한 시편은 하중 증가에 따른 마멸 속도 증가의 기울기가 일정하였고, 낮았다.

(2) 낮은 하중에서 관찰된 용체화 처리 시편의 낮은 마멸속도는 질소에 의한 고용강화와 낮은 적층결함에너지에 기인한 활발한 가공 경화로, 높은

하중에서의 높은 마멸속도는 변형유기 변태에 의한 α' 마르텐사이트 생성으로 설명되었다.

(3) 시효 처리한 시편의 낮은 하중에서 관찰된, 용체화 처리 시편에 비해 높은 마멸 속도는 석출물이 마멸 하중을 지탱하여 기지의 가공경화 정도가 낮아 두꺼운 기계적 혼합층(MML)이 생성된 때문으로, 높은 하중에서 보여진 낮은 마멸 속도는 기지 내 석출물인 Cr<sub>2</sub>N 이 기지가 받는 하중을 줄여 상변태를 억제하여 나타난 것으로 해석되었다.

#### 후 기

본 논문은 산업자원부의 연구 사업비 지원을 받아 수행되었습니다. 이에 감사 드립니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] J. W. Simmons, 1966, Overview: high-nitrogen alloying of stainless steels, Mater. Sci. Eng., Vol. A207, pp. 159-169.
- [2] I. A. Yakubtsov, A. Ariapour, D. C. Perovic, 1999, Effect of nitrogen on stacking fault energy of F.C.C iron-based alloys, Acta Materialia, Vol. 47, pp. 1271-1279.
- [3] A. Fischer, 2003, The effects of subsurface deformation on the sliding wear behaviour of a microtextured high nitrogen steel surface, Wear, Vol. 257, pp. 284-291.
- [4] D. Goodchild, W. T. Roberts, D. V. Wilson, 1970, Acta Met., Vol. 18, pp. 107-118.
- [5] T.-H. Lee, 2004, Precipitation of σ-phase in high-nitrogen austenitic 18Cr-18Mn-2Mo-0.9N stainless steel during isothermal aging, Scripta Materialia, Vol. 50, pp. 1325-1328.