

## 탄소와 질소 함량에 따른 탄질소 복합첨가강의 내마멸 특성 변화

박준기<sup>1</sup> · 이슬기<sup>1</sup> · 김성준<sup>2</sup> · 김용석<sup>1, #</sup>

### Wear-characteristics variation of Fe-C-N alloy with changing content of carbon and nitrogen

J. K. Park, S. K. Yi, S.-J. Kim, and Y.-S. Kim

#### Abstract

Dry-sliding-wear behavior of Fe-18Cr-10Mn steel with various carbon and nitrogen contents was characterized, and the effect of carbon and nitrogen contents on the wear was investigated. Dry sliding wear tests of the steel were carried out at room temperature against an AISI 52100 bearing steel ball using a pin-on-disk wear tester. Applied wear loads were varied from 10 N to 100 N, and the sliding distance was fixed as 720 m. Worn surfaces and the wear debris of the steel were examined using an SEM to find out the wear mechanism. It was found that the Fe-18Cr-10Mn with both carbon and nitrogen exhibited superior wear resistance to the steel with only nitrogen. The wear resistance of the Fe-18Cr-10Mn-xC-yN alloy increased with the increase of the carbon content. The excellent wear resistance of the Fe-18Cr-10Mn-xC-yN alloy was explained by the increased strain-hardening capability with the interstitial atoms.

**Key Words** : Fe-C-N alloy, sliding wear, strain hardening, twinning, surface deformation

#### 1. 서 론

고질소강은 침입형 원소인 질소를 Fe 기지 내에 고용시켜 인성의 감소를 억제하면서 높은 강도를 지니고 높은 화학적 안정성과 우수한 내식성을 갖는 첨단 강재이다. 고질소강은 또한 스테인리스강의 주요 성분인 인체에 유해한 Ni의 함량을 강력한 오스테나이트 안정화 원소인 질소의 첨가로 줄일 수 있는 이점을 지닌다. 이러한 고질소강의 우수한 물성은 질소의 단범위 규칙도(short range ordering, SRO)에 기인하는 것으로 알려져 있다[1]. 현재 다양한 공정을 통해 0.5 wt.% ~ 1 wt.%의 높은 질소 고용도를 갖는 고질소강이 개발되어 있으나[2, 3], 높은 질소 분압을 요하는 특수한 제조 공정으로 인하여 고질소강은 가격이 비싸고 대량생산이 어려운 단점을 지닌다. 최근 이 같은 단점을 보완하는 연구가 많이 진행되었다. 고질소강에 일정한 함량의 탄소를 첨가하면 질소의 고용도가 증가하면서 인장강도, 연성 및 가공경화능과 같은 기계적 물성 또한 향상된다는 연구결과가 보고되었다. 그러나 현재 이와 같이 제조된 탄질소 복합첨가강에서 탄소와 질소의 함량비에 따른 인장특성 및 마멸특성에 관한 연구는 전무한 실정이다.

본 연구는 탄질소 복합첨가강의 마멸 특성을 탄소와 질소의 함량에 따라 분석하고, 탄소가 탄질소 복합첨가강의 마멸 특성에 미치는 영향을 규명하는 목적으로 수행되었다. Fe-18Cr-10Mn 합금에 질소와 탄소가 각각 0.35 ~ 0.42 wt.%, 0.15 ~ 0.38 wt.% 첨가된 탄질소 복합첨가강을 제조하고, 건식 미끄럼 마멸시험 및

1. 국민대학교 신소재공학부

2. 한국기계연구원 부설 재료연구소

# 교신저자: 국민대학교 신소재공학부, ykim@kookmin.ac.kr

인장시험을 실시하여, 탄소와 질소 함량에 따른 탄질소 복합 첨가강의 마멸 특성의 변화를 연구하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 시험 소재

본 연구에 사용된 탄질소 복합첨가강과 탄소가 첨가되지 않은 고질소강의 조성을 시편 기호와 함께 표 1에 나타내었다. 각 조성별로 탄질소 복합첨가강과 고질소강을 용해 주조한 후, 1200 °C에서 균질화 열처리하고 이후 열간압연 하였다. 열간압연 종료 온도는 900 °C 이었다. 이렇게 준비된 초기시편을 각각의 열처리조건에서 용체화 처리 하였다. 열처리조건은 각 시편의 결정립 평균 크기를 60~70  $\mu\text{m}$ 로 일정하게 하기 위해 설정되었다. 각 시편을 시편의 상태를 기준으로 설정한 오스테나이트 단상 영역 온도에서 Ar 분위기 하에서 열처리 한 후 수냉하였다. 각 시편의 열처리 조건을 표 2에 나타내었다.

Table 1. Chemical composition of the specimens used in the present study (wt. %)

Specimen designation	N	C	Mn	Cr	Mo
HNS2	0.69	0.02	9.58	17.65	0.01
HNS3.15C	0.42	0.15	9.51	18.06	0.005
HNS3.24C	0.35	0.24	10.2	18.02	0.01
HNS3	0.38	0.38	9.66	18.12	0.01

Table 2. Heat treatment conditions of the specimens used in the present study

Specimen	Heat treatment condition
HNS2	1100 °C, 30 min. / water quenching
HNS3.15C	1150 °C, 10 min. / water quenching
HNS3.24C	1150 °C, 10 min. / water quenching
HNS3	1150 °C, 10 min. / water quenching

### 2.2 미끄럼 마멸 시험

미끄럼 마멸시험은 pin-on-disk 방식으로 실시되었다. 미끄럼거리는 720 m, 미끄럼 속도는 0.13 m/s, 미끄럼반경은 9 mm로 고정하였고, 10 N~100 N으로 적용하중을 변화시켜 하중에 따른 마멸특성을 분석하였다. 마멸시험 상대재료는 AISI 52100 베어링 강(HV: 845kg/mm<sup>2</sup>) 볼을 사용하였고, 상온, 항습 조건 하에서 마멸 시험을 실시하였다. 동일 조건에서 마멸시험을 최소 3 회 이상 실시하여 그 평균값을 결과 데이터로 취하였다. 실험 전과 후의 시편 무게를 전자저울로 측정하여 마멸 속도를 산출하였으며, SEM, FESEM, TEM을 사용하여 마멸트랙, 마멸 단면, 마멸입자를 관찰하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 인장물성 평가

고질소강 HNS2 시편과 탄질소 복합첨가강 HNS3 시편의 인장시험을 실시하였고, 그 결과를 공칭응력-공칭변형을 곡선으로 그림 1에 나타내었다. HNS3 시편의 공칭 인장강도는 1300 MPa 정도로 850 MPa의 인장강도를 보인 HNS2 시편보다 높고, 공칭 변형률 역시 HNS3 시편이 48%로 HNS2 시편의 공칭변형률 35%보다 더 높다. 탄질소 복합첨가강 시편이 질소만 첨가된 고질소강 시편에 비해 인장강도, 변형률, 항복강도, 항복비등 거의 모든 기계적 성질에서 더 우수한 기계적 특성을 나타내었다. Modified Ludwik equation을 이용하여 두 시편의 가공경화 거동을 비교 분석한 결과, 탄질소 복합첨가강이 강도와 연성 뿐만 아니

라 가공경화능 역시 우수한 것으로 나타났다. 특히 탄질소 복합첨가강은 인장곡선 후반부에서도 가공경화 정도가 높은 것으로 확인되었는데, 이 결과는 변형 중 쌍정의 형성이 활발하였음을 의미한다.

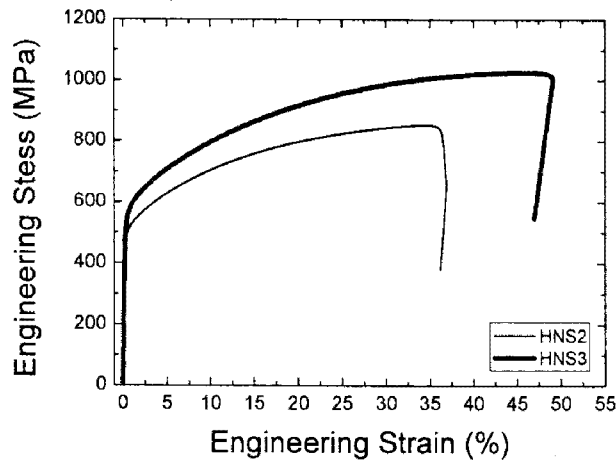


Fig. 1 Engineering stress-strain tensile curve of the HNS2 (N only) and HNS3 (N+C) specimens

### 3.2 마멸시험 결과

그림 2 에 탄질소 복합첨가강과 고질소강의 마멸시험 결과를 하중에 따른 마멸속도의 변화로 나타내었다. 그림 2 는 탄질소 복합첨가강의 내마멸 특성이 고질소강에 비해 시험된 전 하중에서 더 우수한 것을 잘 나타내고 있다. 탄소와 질소의 총 함량이 0.58 wt. % 내외로 일정한 두 시편, HNS3.15C 시편과 HNS3.24C 시편의 마멸 속도는 HNS2 시편과 HNS3 시편의 중간 값을 나타내었고, 시험된 전 하중에서 HNS3.15C 시편과 HNS3.24C 시편의 마멸 속도는 유사하였다. 이 결과는 탄질소 복합첨가강에서 탄질소의 총 함량이 같을 때 두 원소의 함량비의 차이는 그 마멸속도에 큰 영향을 끼치지 않는 것을 시사하고, 결국 탄질소 복합첨가강에서 탄소와 질소는 동일한 침입형 원소로써 HNS 의 마멸 거동에서 동일한 역할을 수행하고 있음을 암시한다. 그러나, HNS3 시편과 질소 함량은 유사하나 탄소 함량이 30% 정도 감소한 HNS3.24C 시편의 마멸속도는 HNS3 시편보다 더 높게 측정 되었다. 이 결과가 탄소와 질소의 총 함량 차이에 의한 것인지, 또는 탄소의 함량이 증가 할수록 내마멸성이 우수해지는 것인지는 현재로서는 불분명하다. 이를 확인하기 위하여는 HNS3 시편과 탄질소의 총 함량은 동일하나 탄소와 질소의 함량 비율이 다른 시편을 제조하여 그 마멸 특성을 평가해야 할 것으로 판단된다.

탄질소 복합첨가강의 우수한 내마멸성을, 마멸면 단면을 관찰하여 확인된 마멸면 직하에서의 기계적 쌍정(mechanical twin)의 형성과 고질소강보다 더 깊게 형성되는 변형층으로 설명하였다. 마멸면 직하의 기계적 쌍정은 TEM 단면 관찰을 통하여, 그리고 고질소강보다 더 깊게 형성되는 변형층은 FESEM 으로 마멸 단면을 비교 관찰하여 확인할 수 있었다. 마멸거동에 영향을 미치는 재료 변수 중 가공경화지수는 중요한 지수로, 가공경화지수가 높을수록 마멸면에서 마멸 변형에 의한 표면경화(변형)층이 더 쉽게 형성되고, 마멸저항성 역시 더 우수해진다. 인장시험 결과에서 나타난 바와 같이 탄질소 복합첨가강의 가공경화지수는 고질소강보다 더 높았는데, 가공경화 정도 차이에 따른 표면변형의 차이는 마멸면 단면에서 관찰되는 쌍정과 변형띠(deformation band)로 확인되었다. 마멸시험 전 TEM 조직에서는 적층결함과 아닐링 쌍정(annealing twin)이 관찰되었으나, 마멸시험 후의 TEM 관찰 조직에서는 전위 밀도가 증가 된 양상과 함께 변형쌍정이 두 시편에서 공히 발견되었다. 특히 탄질소 복합첨가강 조직에서는 기계적 쌍정이 좀더 조밀하게 그리고 서로 교차하는 양상으로 나타났다. TEM 조직 사진 만으로는 쌍정(twin)의 양을 정량적으로 비

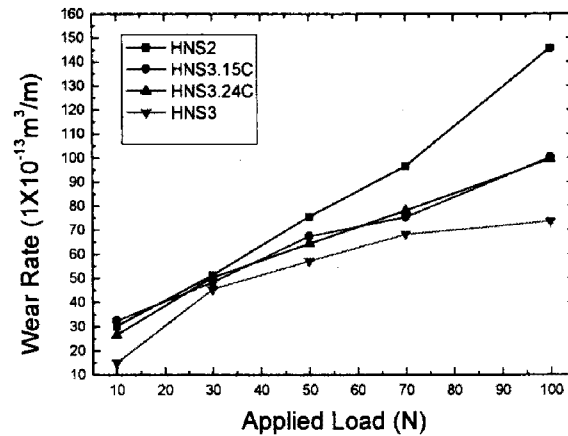


Fig. 2 Variation of wear rates of the high nitrogen (HNS2) and high nitrogen+carbon (HNS3.15C, HNS3.24C and HNS3) specimens as a function of applied load.

교할 수 없으나, 탄질소 복합첨가강 조직에서 관찰된 좀더 조밀하고 확연한 서로 교차하는 쌍정은 탄질소 복합첨가강 시편의 우수한 마멸 저항성 및 가공경화능을 뒷받침해주는 근거로 추정된다.

#### 4. 결론

탄질소 복합첨가강과 고질소강의 마멸 특성을 비교 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 본 연구의 시험 조건 하에서 탄질소 복합첨가강의 인장 및 내마멸 특성은 고질소 강에 그것보다 더 우수하였다.
- (2) 탄질소 복합첨가강의 탄소와 질소 각각의 함량보다 탄질소의 총함량이 내마멸특성에 더 큰 영향을 미치는 것이 확인되었다.
- (3) 탄질소 복합첨가강의 우수한 내마멸 특성은 마멸면에서 생성되는 기계적 쌍정(mechanical twin)으로 설명 되었고, 마멸면 직하의 TEM 조직 관찰사진으로 확인되었다.

#### 참 고 문 헌

- [1] V.G. Gavriljuk, B.D. Shanina, H. Berns, 2008, A physical concept for alloying steels with carbon + nitrogen, Mat. Sic. Eng. A, Vol. 481-482, pp. 707~712.
- [2] U.K. Mudali, B. Raj, 2004, High nitrogen steels and stainless steels manufacturing, properties and applications, Alpha Science.
- [3] H. Berns, 1996, Manufacture and application of high nitrogen steels, ISIJ International, Vol. 36, pp. 909-914.