

# Fe-18Cr-14Mn-4Ni-0.9N 고질소 내식강의 고온 석출과 변형을 속도에 따른 변형특성 연구

남승만<sup>1</sup>, 김용석<sup>#</sup>

## Deformation behavior of the Fe-18Cr-14Mn-4Ni-0.9N high nitrogen steel under different strain rate conditions

S. M. Nam<sup>1</sup>, Y.-S. Kim<sup>#</sup>

### Abstract

High nitrogen steels (HNS) exhibit both high strength and ductility during tensile deformation. In the present study the Fe-18Cr-14Mn-4Ni-0.9N high nitrogen steel was heat treated at 1000°C and 1100°C to produce Cr<sub>2</sub>N precipitates in austenite matrix and full austenite microstructures, respectively. Tensile tests of the heat treated specimens were performed at two different strain rates of 0.05/sec and 0.00005/sec. Each tensile curve of the specimens could be well characterized by the the modified Ludwik equation. Plastic deformation of the steel was adequately represented by the four parameters of the modified Ludwik equation. At 0.05/s strain rate, the specimen with the Cr<sub>2</sub>N precipitate exhibited higher strength than the full austenite specimen, while the full austenite specimen showed better mechanical properties at 0.00005/s strain rate. It was found that the Cr<sub>2</sub>N precipitates influences deformation behavior of the high nitrogen steel significantly.

**Key Words** : high nitrogen steel, strain rate, Cr<sub>2</sub>N, strain hardening, Nitride, Austenitic stainless steels.

### 1. 서 론

질소는 탄소와 더불어 강의 대표적인 침입형 합금원소로 탄소보다 우수한 고용강화 및 결정립 강화 효과를 야기한다. 질소는 탄소와 달리 결정 내부에서 단범위 규칙도(Short Range Ordering)를 갖는다. 이로 인해 강화효과에 따른 인성의 감소가 적으며, 높은 화학적 안정성으로 내식성을 향상시킨다[1]. 질소는 또한 강력한 오스테나이트 안정화 원소로 오스테나이트 스테인리스강에서 Ni 원소의 양을 효과적으로 줄일 수 있다. 강 내의 질소 농도를 증가시키는 방법으로는 용해된 합금에 질소 분압을 증가시키는 방법과 질소의 고용도를 증대시키는 합금원소를 첨가함으로써 합금

내 질소 고용도를 증가시키는 방법을 들 수 있다. 이 같은 방법에 의해 제조된 높은 질소 고용도를 갖는 오스테나이트 스테인리스 강을 고질소강(high nitrogen steel, HNS)이라 하며, 현재 선진국을 중심으로 질소가 다량 첨가된 새로운 스테인리스강에 대해 연구가 광범위 하게 진행되고 있다. 이러한 HNS 조직 내에는 여러 가지 준 안정상이 존재한다[2]. 질화물은 대부분의 온도 범위에서 존재하며, 이러한 질화물은 재료의 취성을 야기하고, 결합을 유발하여 기계적 특성을 저하 시킨다고 알려져 있다[3]. 본 연구에서는 열처리에 의한 고질소강에서의 질화물 석출 거동을 관찰 하였고, 질화물이 기계적 성질에 미치는 영향을 변형률 속도를 달리하여 실시한 인장 시험을 통해 분석하였다.

1. 국민대학교 신소재공학부

# 교신저자: 국민대학교 신소재공학부

E-mail : ykim@kookmin.ac.kr

## 2. 이론

금속과 합금재료의 균일 소성변형에 의한 인장곡선은 다음과 같은 루드빅 관계식(Ludwig relation)으로 표현할 수 있다.

$$\sigma = K_1 \varepsilon^{n_1} \quad (1)$$

식(1)에서  $\sigma$ 는 진응력(true stress),  $\varepsilon$ 은 진변형율(true strain),  $K_1$ 는 강도계수(strength coefficient),  $n_1$ 은 가공경화지수(strain hardening exponent)이다. HNS의 인장곡선은 그림 1과 같이 낮은 변형율 구간( $0.001 < \varepsilon < 0.15$ )에서 식(1)을 벗어난다. Ludwigson은 식(1)에 새로운 항(?)을 더하여 HNS의 인장곡선을 묘사할 수 있는 수정된 루드빅 관계식(The modified Ludwik equation, 식(2))을 제안하였다.[4]

$$\sigma = K_1 \varepsilon^{n_1} + \Delta \text{ where } \Delta = \exp(K_2 + n_2 \varepsilon) \quad (2)$$

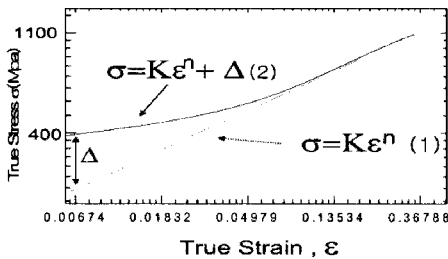


Fig. 1 True stress-strain curve of a high nitrogen austenitic stainless steel (HNS) showing deviation from the Ludwik relation.

## 3. 실험 방법

본 연구에 사용한 소재는 Fe-18Cr-14Mn-4Ni-0.9N 합금으로, 그 화학 조성을 표 1에 나타내었다. 소재는 한국기계연구원에서 제조되었다. 열간 압연된 판재를 900°C, 1000°C, 1100°C 각각의 온도에서 30 분간 열처리하고 수냉하여 열처리 온도에 따른 미세조직의 변화를 SEM으로 관찰하였다.

Table 1 Chemical Composition of the Fe-18Cr-14Mn-4Ni-0.9N alloy (wt.%)

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N
0.02	0.22	13.90	17.40	4.91	3.43	0.88

열처리된 소재로부터 그림 2에 보인 치수로 인장시편을 가공하고, 변형율 속도를 0.05/sec와 0.00005/sec로 달리하여 인장시험 하여 미세조직에 따른 고질소강의 인장 특성을 분석하였다.

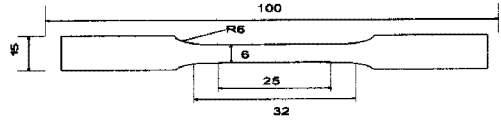


Fig. 2 Tensile test specimen (unit: mm)

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 미세조직

그림 3은 Fe-18Cr-14Mn-4Ni-0.9N 시편의 열처리 온도에 따른 SEM 사진들이다. 열간 압연된 초기 조직(그림 3(a))과 900°C, 1000°C, 1100°C 세 온도에서 30 분간 열처리하고 수냉한 조직을 나타내었다(그림 3(b)~(d)).

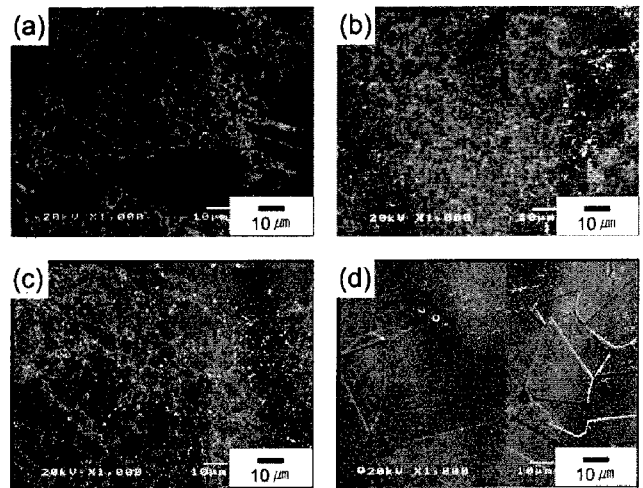


Fig. 3 SEM micrographs of the Fe-18Cr-14Mn-4Ni-0.9N steel, as hot rolled (a), and heat treated for 30 min. at 900°C (b), 1000°C (c), and 1100°C (d).

1100°C에서 열처리된 시편은 XRD 분석결과 오스테나이트 단상(full  $\gamma$  phase)을 지닌 것이 확인되었으나, 다른 시편에서는 모두  $\gamma$  기지 내에서 석출물들이 관찰되었다. 열간 압연된 조직에서는 주로 결정립계에서 탄화물과 질화물로 이뤄진 석출물들이 확인되었다. 그림 4는 900°C와

1000°C에서 열처리된 시편의 고배율 조직사진으로, 결정립계 뿐만 아니라 결정립 내부에서도 석출물이 관찰된다. 이들 석출물은 EDS 분석을 통해 Cr<sub>x</sub>N의 성분으로 확인되었다.

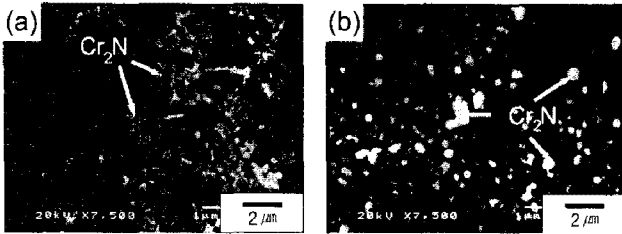


Fig. 4 SEM micrographs of the Fe-18Cr-14Mn-4Ni-0.9N steel heat treated at the temperature of 900°C (a) and 1000°C (b).

이러한 열처리에 따른 상변태 현상 (미세조직의 변화)은 그림 5에 보인 열역학 계산(CALPHAD 법)을 통해 얻어진 상태도[5]에 의한 예측과 명확히 일치하였다.

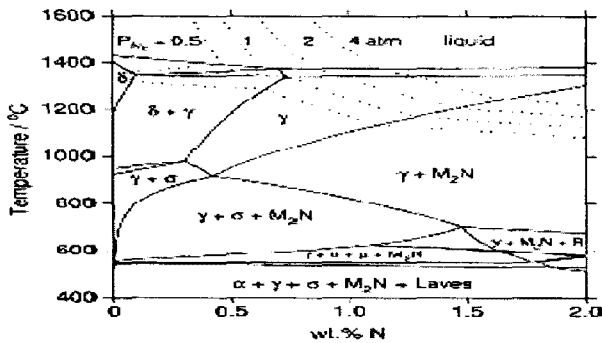


Fig 5. The phase diagram of the Fe-18Cr-14Mn-4Ni-N steel obtained by the CALPAD.

#### 4.2 인장시험

1100°C의 온도에서 열처리되어 full γ 조직을 갖는 Fe-18Cr-14Mn-3Mo-4Ni-0.9N 시편과 1000°C에서 열처리되어 Cr<sub>x</sub>N 석출물이 고르게 석출된 동일 조성 시편을 0.05/s의 변형률 속도로 인장시험한 결과를 그림 6에 나타내었다. 0.05/s의 변형률 속도에서 Cr<sub>x</sub>N 석출상을 지닌 시편은 full γ phase 조직의 시편보다 높은 항복강도와 인장강도를 지니었지만 그 파단신율은 낮았다. 이 같은 결과는 Cr<sub>x</sub>N 석출물이 강화상으로 작용하고, 재료의 취성을 야기한다는 것을 의미한다. 소성변형구간의 응력-변형률 ln-ln 스케일 그림을 통해 식 (2)에

나타낸 가공 경화와  $\sigma$ 값의 크기를 가늠할 수 있었다.

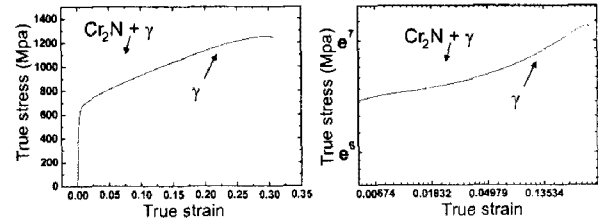


Fig. 6 True stress-strain curve of the Fe-18Cr-14Mn-4Ni-3Mo-0.9N steel heat treated at different temperatures tested at the strain rate of 0.05/s.

그림 7은 변형률 속도를 0.00005/sec로 하여 얻어진 인장곡선을 보인다. Cr<sub>x</sub>N 석출물이 있는 시편의 항복강도와 인장강도가 낮은 변형률 속도 하에서는 오히려 더 낮고, 파단신율은 두 시편이 거의 동일 하였다. 낮은 변형률 속도에서 Cr<sub>x</sub>N 석출물은 강화상의 역할을 하지 못하였으며, 취성을 야기하지도 않았음을 알 수 있다. 소성변형구간을 ln 스케일로 묘사한 그래프를 보면 여전히 Cr<sub>x</sub>N 석출물이 있는 시편보다는 full γ 상으로 이루어진 시편이 더 높은  $\sigma$ 값을 갖는 것을 알 수 있다. 이것은 초기의 적은 변형구간(0.001 < ε < 0.15)에서 나타나는  $\sigma$ 값은 오스테나이트(γ) 상에 따른 결과이며, full γ 상 조직을 갖는 시편은 변형률 속도가 인장 변형에 크게 영향을 미치지 못하지만 Cr<sub>x</sub>N 석출물을 지닌 조직은 그 변형거동이 변형률 속도에 민감하게 반응함을 나타낸다.

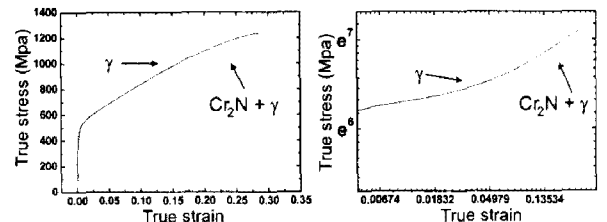


Fig. 7 True stress-strain curve of the Fe-18Cr-14Mn-4Ni-3Mo-0.9N steel heat treated at different temperatures tested at the strain rate of 0.00005/s.

#### 4.3 수정된 루드빅식을 이용한 해석

표 2는 인장시험 데이터를 수정된 루드빅식에

의삽하여 산출한 식 (2)의 강도계수와 가공경화 지수들을 보인다. 모든 시편의 균일 소성변형은 변형된 루드빅 식을 잘 따르고 있음을 표 2 는 보인다. 각각의 강도계수( $K_1$ ,  $K_2$ )와 가공경화지수( $n_1$ ,  $n_2$ )로부터 인장 변형 거동을 해석 할 수 있는데,  $K_2$  와  $n_2$  값이 클수록 ? 값이 커져, 높은 항복강도를 갖고, 낮은 변형구간에서 높은 유동응력을 지니는 우수한 기계적 특성이 나타난다.

**Table 2 The modified Ludwik equation parameters**

phase	$Cr_2N + \gamma$		full $\gamma$	
	$\epsilon$ rate			
$K_{(0.001 < \epsilon < 0.03)}$	1239.35	790.46	1020.49	915.12
$n_{(0.001 < \epsilon < 0.03)}$	0.1057	0.1126	0.0861	0.1131
$K_1$	1918.25	1868.28	1837.15	2038.24
$n_1$	0.2421	0.3968	0.3017	0.3874
$K_2$	5.2453	5.5315	5.7806	5.6668
$n_2$	-46.7527	-37.9245	-33.8347	-36.5959

미세조직 전체가  $\gamma$  상으로 이루어진 시편이  $Cr_2N$  석출물이 있는 시편보다 높은  $K_2$  와  $n_2$  값을 갖으며, 상대적으로 낮은  $n$  값을 갖는다. 이것은 낮은 변형율 구간( $0.001 < \epsilon < 0.15$ )에서 교차슬립보다는 면슬립(planar slip)이 이루어 진다는 것을 의미하며, 교차슬립에 의해 발생하는 전위간의 상호작용이 적기 때문에 가공경화 효과는 적음을 알 수 있다. 즉, full  $\gamma$  상을 지닌 시편이  $Cr_2N$  석출물을 지닌 시편보다 면슬립에 의한 변형을 더 잘 보이고 있다. 높은 변형율 구간 ( $\epsilon > 0.15$ )에서는  $n_1$  의 값이 클수록 우수한 가공경화 효과가 나타났는데, 낮은 변형율 속도에서 인장 시험한 시편이 높은  $n_1$  값을 보이므로, Fe-18Cr-14Mn-3Mo-4Ni-0.9N 재료의 가공경화 효과는 낮은 변형율 속도에서 더 큰 것을 알 수 있다.

## 4. 결론

Fe-18Cr-14Mn-3Mo-4Ni-0.9N 고질소강 시편의 고온 열처리에 따른 미세조직의 변화와 미세조직에 따른 인장변형 거동을 연구하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Fe-18Cr-14Mn-3Mo-4Ni-0.9N 강은 1000°C 와 1100°C 사이에서 2 차상이 석출하였고, 1100°C 이상의 온도에서 열처리해야 전체가 오스테나이트 상으로 구성된 미세조직이 얻어졌다.

(2)  $Cr_2N$  석출물은 재료의 변형 거동에 영향을 주었다. 빠른 변형에서는 석출물이 강화상으로 작용하여 항복강도를 높이고 취성을 야기하였으나, 느린 변형에서는 기계적 특성에 큰 영향을 미치지 않았다.

(3) Fe-18Cr-14Mn-3Mo-4Ni-0.9N 강의 인장변형거동은 수정된 루드빅 관계식으로 잘 묘사되었다.

## 후 기

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

## 참 고 문 헌

- [1] 이태호, 이창길 2000, 고질소 내식강의 특성과 제조기술(1), 기계와 재료, 제 12 권, 4 호, pp. 80~96.
- [2] H. Berns, J.Kleff, 1996, Microstructure and tensile behavior of nitrogen-alloed, dual-phase stainless steels, Metallu.&Mat.Tran., Vol.27A 1845~1859
- [3] Q.X. Dai, Z.Z. Yuan, 2004, Numerial simulation of  $Cr_2N$  age-precipitaion in high nitrogen stainless steels, mater. Scien. Eng. , A, 385(2004), 445~448
- [4] J. W. Simmons, 1996, Strain haredening and flow properties of nitrogen-alloted Fe-17Cr-(8-10)Mn-5Ni austenitic stainless steels, Acta mater., Vol. 45, No. 6 pp. 2467~ 2475.
- [5] 오창석, 이태호, 2002, 고질소 스테인리스강의 열역학계산과 응용, 기계와 재료, 제 14 권, 2 호,