

고Mn강의 저온 인장 변형 거동에 관한 연구

(A Study on the Low Temperature Tensile Deformation
Behavior of High-Mn Steels)한국기계연구원 임 차 용한국과학기술원 김 영 길

극저온에서도 우수한 강도와 연성을 겸비한 고망간계 강이 극저온 구조용 재료로서 주목을 받기 시작한 것은 최근의 일이다^[1]. 기존의 극저온 구조용 재료인 9% 니켈 강은 조직의 대부분이 α' 마르텐사이트 이고 약간의 잔류 오스테나이트를 가지고 있어 항복강도는 높지만 연성-취성 천이 온도가 존재하여 77 K 주위에서는 충격인성이 급격히 저하하는 단점이 있다. 또 하나의 극저온 재료인 304 계통의 스테인레스 강은 fcc 조직이어서 극저온에서도 우수한 인성을 유지하여 4 K 까지 사용가능하나 고가의 니켈과 크롬을 다량 함유하고 있어 경제성에 문제가 있고 항복강도가 낮다. 이러한 배경에서 최근의 저온 구조용 재료의 연구 동향은 오스테나이트계 스테인레스 강에서 니켈과 크롬을 비슷한 성질을 갖는 망간이나 알루미늄으로 대체하려는 연구가 활발하게 진행되고 있다^[2]. 본 연구에서는 기초연구를 통하여 최적의 합금 조성으로 선정된 CAM-1 (Fe-30Mn-5Al-0.3C, wt.%) 과 CAM-2 (Fe-25Mn-5Al-5Ni-0.3C) 합금의 저온 인장 변형 거동에 관하여 조사하였다.

상온 및 저온 인장 실험 온도는 298 K, 233 K, 173 K, 77 K 였으며, 실험후 X-ray와 TEM으로 미세조직을 관찰하였다. 실험전과 상온 및 77 K에서의 실험후 X-ray회절 결과 오스테나이트 단일상을 유지하였으며, CAM-2 합금에 대한 결과를 그림1에 나타내었다. CAM-1 및 CAM-2 합금은 상온에서 부터 77 K로 실험온도가 낮아질수록 강도와 연신율이 증가하였다. 이러한 현상은 미세구조 분석 결과 저온 변형중 미세 쌍정(micro-deformation twinning)의 생성에 의한 광의의 TRIP 현상임이 밝혀졌다(그림2). CAM-1, CAM-2 합금과 같이 오스테나이트의 안정화 정도가 높은 경우 77 K에서의 변형중에도 304스테인레스 강에서 나타나는 마르텐사이트는 생성되지 않고 단지 변형유기 쌍정에 의한 가공경화 효과의 증대로 연신율이 향상된다. 이러한 경우 가공경화지수(n)은 일정한 값이 아니고 true strain에 따라 변하는 값이 된다. 즉,

$$n = \frac{d(\ln \sigma)}{d(\ln \epsilon)} = M\epsilon + N \quad (1)$$

여기서 M, N 은 온도에 의존하는 상수이다. 식(1)을 적분하면 다음과 같은 flow equation을 구할 수 있다^[3].

$$\sigma = Ke^N \exp(M\epsilon) \quad (2)$$

여기서 K 는 재료의 강도 상수이다. 그리고 M 은 오스테나이트의 안정성을 나타내는 온도 상수로 M 값이 클수록 안정성은 떨어진다. CAM-1의 298 K에서와 같이 변형중 가공유기상

이 생성되지 않는 경우 M 값은 0이 되어 식(2)는 잘 알려진 Hollomon's equation과 일치하게 된다.

저온 구조용 재료로서 파괴인성과 좋은 성형성을 갖기 위해서는 necking이 일어나지 전까지의 균일하게 변형된 부위가 크야 한다. necking은 최대 응력에서 일어나므로, 식(2)로부터 다음과 같은 true uniform elongation을 구할 수 있다.

$$\epsilon_u = \frac{N}{1 - M} \quad (3)$$

식(3)을 이용하여 계산한 값과 실제 실험으로 측정된 값을 표1에 나타내었다. 이 표에 의하면 77 K에서 계산된 값이 약간 큰데 이는 변형 쌍정이 생성될 때의 쌍정 자체의 전단 변형과 관련된 인장 변형량($\phi_s = 0.707$)을 고려하지 않았기 때문이다.

변형유기상으로 무확산 변태의 마르텐사이트나 쌍정이 생성되는 경우 다음과 같은 변형된 necking조건이 적용되어야 한다^[4].

$$\frac{d\sigma}{d\epsilon} = \sigma \left\{ 1 + \frac{\phi_s^2 f \frac{df}{d\epsilon}}{1 + \phi_s f} \right\} \quad (4)$$

여기서 f 는 변형된 양의 부피 비율이다. 식(4)로부터 아래의 변형된 true uniform elongation을 구할 수 있다.

$$\epsilon_u = \frac{N}{1 + \frac{\phi_s^2 f \frac{df}{d\epsilon}}{1 + \phi_s f} - M} \quad (5)$$

식(5)는 식(3)에 쌍정의 생성량, 생성속도 및 전단변형을 고려한 경우로서 CAM-1 및 CAM-2 합금에 적용한 결과 실제 측정치와 잘 일치하였으며, 표1에 나타내었다.

결론적으로 고망간계 극저온 합금인 CAM-1 및 CAM-2 합금은 저온으로 갈수록 변형유기 쌍정의 생성에 의해 강도와 연신율이 증가하며, 이러한 무확산 변태에 의하여 변형유기상이 생성되는 합금계에 대하여 실험결과와 잘 일치하는 flow equation과 true uniform elongation 모델을 제시하였다.

[참 고 문 헌]

1. J. Charles, A. Berghezan, and A. Lutts, *Advances in Cryogenic Engineering*, 30, 311(1982)
2. Y. Tomota, J. D. strum, and J. W. Morris, Jr., *Metall. Trans. A*, 18A, 1073(1987)
3. Y. G. Kim and C. Y. Lim, *Metall. Trans. A*, 19A, 1625(1988)
4. M. K. Keshavan, G. Sargent, and H. Conrad, *Metall. Trans. A*, 6, 1291(1975)

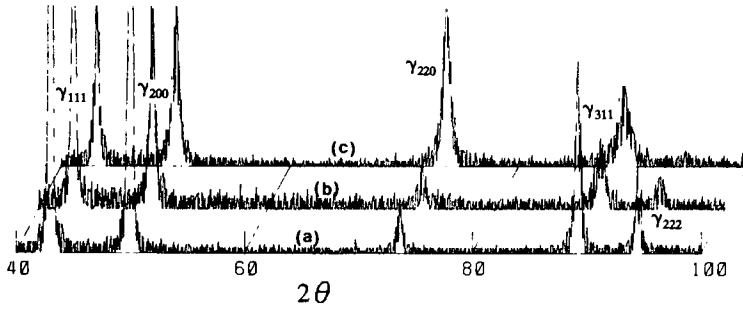


Fig. 1 X-ray diffraction patterns of CAM-2 alloy.
(a) before testing, (b) after testing at RT, (c) 77 K

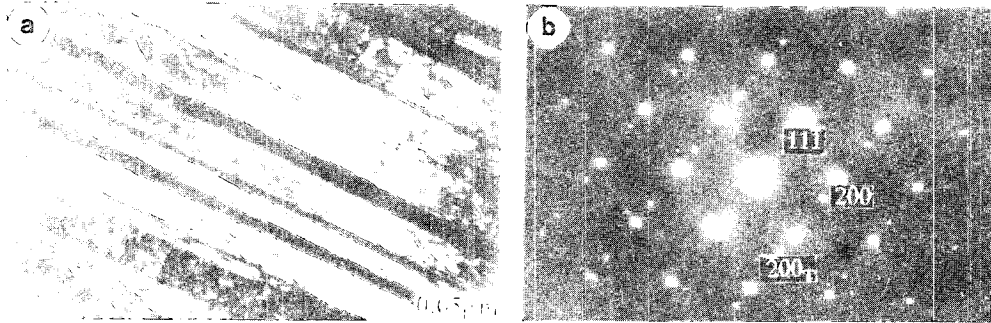


Fig. 2 Transmission electron micrographs of controlled-rolled CAM-2 alloy after testing at 77 K.
(a) Bright-field image(twin), (b) Diffraction pattern with Z=[011]

Table 1. Calculated and measured true uniform elongations of CAM-1 and CAM-2 at 298 K, 233 K, 173 K and 77 K.

Alloys	Temp.(K)	M	N	$\epsilon_{uc}^*(\%)$	$\epsilon_{um}^\#(\%)$	$\left(\frac{df}{d\epsilon}\right)_{\epsilon_u}$	m	f	$\epsilon_{uc}^{**}(\%)$
CAM-1	298	0	0.23	23	19	0.099	0.086	0.037	23
	233	0	0.23	23	19	-	-	-	-
	173	0.14	0.21	24	21	-	-	-	-
	77	0.59	0.19	46	43	0.274	0.359	0.235	43
CAM-2	298	0	0.18	18	19	0.087	0.076	0.033	19
	233	0.18	0.16	20	21	-	-	-	-
	173	0.33	0.17	25	26	-	-	-	-
	77	0.63	0.15	41	39	0.228	0.285	0.178	39

* Calculated true uniform elongation from equation (3)

** Calculated true uniform elongation from equation (5)

Measured true uniform elongation