

## 저탄소강의 템퍼링 온도가 인장거동에 미치는 영향

이영범, 김대성, 남원종\*

### Effect of Tempering Temperature on Tensile Behavior of Low Carbon Steel

Y.B. Lee, D.S. Kim and W.J.Nam

#### Abstract

The disappearance of continuous yielding and the formation of an extended region in engineering stress-strain curves at tempering temperatures of 673-873K is closely related to the reduction of mobile dislocations during tempering and dynamic recovery during tensile deformation. In addition, the occurrence of discontinuous yielding at tempering temperature above 923K would be attributed to the formation of new strain-free polygonal ferrite grain

**Key Words** : Ultrafine, Tempering, Tensile, Recrystallization

#### 1. 서론

최근 금속재료의 결정립 크기를 미세화하여 인성이나 연성의 급격한 감소 없이 고강도 재료를 제조할 수 있는 구조재료의 초세립화(결정립 크기 1  $\mu\text{m}$  이하)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 강가공에 의한 벌크 재료의 초세립화를 위해서 다양한 가공 방법, 즉 equal channel angular pressing(ECAP), 다축누적 압연법(ARB), severe torsion straining(STS) 등을 알루미늄, 구리 저탄소강 등의 소재에 적용하여, 비교적 균질한 초미세 결정립 구조재료의 제조 가능성을 보여주었다.<sup>(1-5)</sup>

이러한 초미세 결정립을 갖는 저탄소강을 인장 시험하는 경우 관찰되는 변형거동의 특징 중의 하나는, 일반적으로 사용되는 10  $\mu\text{m}$  정도 크기의 결정립을 갖는 저탄소강에서는 초기 낮은 변형량에서 지속적인 가공 경화가

관찰되는 것에 반하여, 응력-변형 곡선에 있어서 초기 5% 이하의 변형량에서 가공 경화가 거의 일어나지 않는 영역이 관찰되는 것이다. 이와 같은 특이한 현상은 인장 변형 중 발생하는 동적회복에 기인되는 것으로 설명되어질 수 있다. 박경태 등에<sup>(6)</sup> 의하면 소성 가공시 초세립강에서는 입자 크기가 너무 작아 입자 내에서 전위 셀(cell)의 형성이 곤란하다. 따라서 초세립 강에서는 인장 변형시 동적회복의 발생으로 응력-변형 곡선의 초기 낮은 변형량에서 가공 경화가 거의 일어나지 않는 영역의 발생이 가능한 것이다.

한편 초세립강의 인장 시험시 발생하는 가공 경화가 거의 일어나지 않는 영역의 존재는 마르텐사이트 미세조직을 갖는 저탄소강을 템퍼링한 소재에서도 관찰할 수 있다. 비록 템퍼링한 마르텐사이트의 경우 미세조직에서의 래스(lath) 계면이 저각각 입계(low angle boundary)로서 일반 결정립계와 그 성질을 달리 하지만, 전위 이동의

\* 국민대학교 신소재공학부

장애물, 전위의 sink 등과 같은 역할을 수행하므로, 상기의 관점을 근거로 초세립강에서 발생하는 현상을 기대할 수 있다. 더구나 Ueji 등의 보고에<sup>(7)</sup> 의하면 저탄소강 마르텐사이트를 강가공하고 열처리 하면 초세립을 얻을 수 있다. 따라서 마르텐사이트 저탄소강의 경우 템퍼링 열처리에 의하여 회복과 재결정 발생을 제어하면 초세립의 저탄소강을 제조할 수 있는 가능성이 있다.

마르텐사이트 저탄소강의 템퍼링시 미세조직 변화에 대해서는 광범위한 연구들이 진행되어 왔으며, 템퍼링시 탄화물의 석출, 구 오스테나이트 입자경이 인성에 미치는 영향 및 합금원소가 미세조직 및 기계적성질에 미치는 영향 등에 대해서는 비교적 상세히 연구되어 있다.<sup>(8-10)</sup>

본 연구에서는 유도가열을 이용하여 템퍼링하여 초세립 저탄소강을 제조 가능성을 탐색하기 위한 목적으로, 마르텐사이트 조직의 저탄소강의 템퍼링 조건에 따른 인장 거동을 미세조직과 관련하여 분석하고자 한다.

## 2. 실험방법

본 연구에서 사용된 소재는 화학성분 0.21% C, 0.22% Si, 0.73% Mn, 1.08% Cr, 0.19% Mo, 0.014% P, 0.012% S를 갖는 열간압연재로서, 1223K의 온도에서 유도가열한 후 수냉한 소재를 이용하였다. 이 때의 구 오스테나이트 입자의 크기는 ASTM 10.5 이다. 시편의 템퍼링 열처리 온도를 523 - 973K의 온도 범위에서 변화시켜 염욕에서 30분간 가열하여 실시하였다. 열처리가 완료된 시편은 인장시편으로 가공하여 인장시험기에서 1 mm/min의 속도로 실시하였으며, 미세조직은 투과전자현미경(TEM)을 이용하여 관찰하였다.

## 3. 결과 및 토론

템퍼링 온도에 따른 마르텐사이트 저탄소강의 응력-변형 곡선의 변화를 그림 1에 나타내었다. 그림에서와 같이 인장곡선의 변형 거동은 다음의 3가지 형태로 분류할 수 있다. 첫 번째 형태는 낮은 템퍼링 온도인 523K에서 템퍼링 한 경우 관찰되는 것으로 전형적인 연속 항복 현상을 보인다. 이는 이미 잘 알려진 바와 같이 오스테나이트로부터 마르텐사이트로 상변태시 발생하는 잉여가동전위(excess mobile dislocation)의 존재에 기인한 것으로 인장 변형시 가동 전위의 이동이 활발하여 항복현상이 관찰되지 않는다.

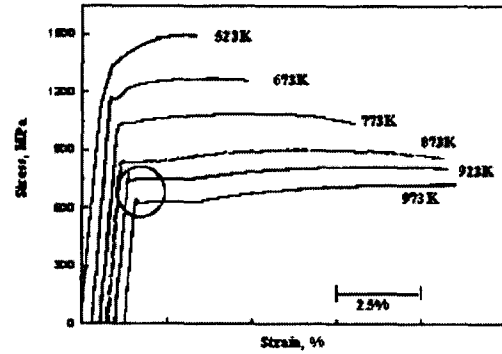


Fig. 1 Engineering stress-strain curves of the present steels with various tempering temperatures of 523K~973

두 번째로 관찰되는 인장 변형 곡선의 형태는 템퍼링 온도 673K 이상의 온도에서 관찰되는 것으로, 인장 변형시 연속항복 현상이나 전형적인 항복현상도 관찰되지 않으며, 초기의 낮은 변형률 영역에서 가공 경화가 거의 일어나지 않는 영역의 발생이 관찰된다. 또한 873K까지 템퍼링 온도의 증가에 따라 가공 경화가 거의 일어나지 않는 영역이 증가하는 경향이 관찰된다. 이러한 현상은 템퍼링 온도의 변화에 따른 미세조직 변화와 긴밀하게 관련되어 있다.

일반적으로 템퍼링시 발생하는 미세조직 변화는 탄화물의 석출, 구상화 및 성장 등 탄화물 거동과 관련된 부분과 회복 및 재결정과 같은 기지조직의 변화의 두가지로 구성된다. 탄화물의 거동을 분석해 보면 그림 2에서와 같이, 673K에서 템퍼링한 경우 래스 내의 침상 탄화물이 주요 미세조직으로 관찰된다. 한편 템퍼링 온도가 773K로 상승한 그림 2-b의 경우 세멘타이트 입자 형상에서 대부분의 입자가 원래의 형태를 유지하나 일부 세멘타이트 입자가 점진적인 구상화에 의하여 aspect ratio가 감소하는 경향을 보이는 것이 관찰된다. 템퍼링 온도가 873K에 도달하게 되면 래스 내부에 분포한 구형의 세멘타이트 입자들을 관찰할 수 있다. 이와 같이 템퍼링 온도의 상승에 따라 탄화물 입자의 형상 변화가 관찰된다. 인장 곡선에서 큰 변화가 관찰되지 않는 것은 간접적으로 템퍼링시 탄화물 형상 변화가 인장 곡선의 형태와는 관련이 미약하다 할 수 있다. 특히 동적 회복과 관련된 측면에서는 탄화물 입자는 단순히 전위 이동의 장애물로만 작용할 뿐 전위의 sink나 source로 작용할 가능성이 낮으므로 관련성이 약하다 하겠다. 특히 인장곡선에서의 가공 경화가 거의 일어나지 않는 영역의 발생과 관련짓기는 곤란하다.



위의 감소와 인장 변형시 동적 회복의 발생과 밀접한 관계가 있다. 또한 템퍼링 온도 923K 이상에서의 항복 현상의 발생은 템퍼링시 재결정에 의한 변형 없는 등축정 페라이트 결정립 생성에 기인한다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Tsuji, N., Ito, Y., Saito, Y. and Minamoto, Y., 2002, *Scripta Mater.*, Vol. 47, p893.
- (2) Saito, Y., Utsunomiya, H. and Sakai, T., 1999, *Acta mater.*, Vol. 47, p579.
- (3) Valiev, R. Z., Kislimgaliey, R. and Alexandrov, I. V., 2000, *Prog. Mater. Sci.*, Vol. 45, p103.
- (4) Liu, Z. Y., Hu, L. X. and Wang, E. D., 1998, *Mater. Sci. Eng.*, Vol. A255, p16.
- (5) Richert, M., Liu, Z. Y. and Hansen, N., 1998, *Mater. Sci. Eng.*, Vol. A260, p275.
- (6) Park, K. T., and Shin, D. H., 2002, *Matall. and Mater. Trans. A*, Vol. 33A, p705.
- (7) Ueji, R., Tsuji, N., Minamino, Y. and Koizumi, Y., 2002, *Acta Materialia*, Vol. 50, p4177.
- (8) Altstetter, C. J., Cohen, M. and Averbach, B. L., 1962, *Trans ASM*, Vol. 55, p297.
- (9) Chang, L. and Smith, G. D. W., 1984, *J. Phys.*, Vol. 45, p397.
- (10) Babu, S. S., Hono, K. and Sakurai, T., 1994, *Met. & Mater. Trans. A*, Vol. 25A, p499.