

저탄소강에서 템퍼링 온도가 인장변형에 미치는 영향

이영범* · 김대성* · 남원종*
(2003 년 9 월 18 일 접수)

Effect of Tempering Temperatures on Tensile Properties in a Low Carbon Steel

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

Abstract

The effect of tempering temperatures on microstructures and mechanical properties was studied in a low carbon steel. The disappearance of continuous yielding and the formation of an extended region in engineering stress-strain curves at tempering temperatures ranging from 673 to 873K was caused by the reduction of mobile dislocations during tempering and dynamic recovery during tensile deformation. In addition, the occurrence of discontinuous yielding in the sample treated at the tempering temperatures above 923K was attributed to the formation of new strain-free polygonal ferrite grain.

Key Words : Ultrafine Grains, Tempering, Tensile, Recrystallization, Lath Martensite

1. 서 론

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 극심한 강가공에 의한 벌크 재료의 초세립화를 위해서 다양한 가공 방법인, 즉 equal channel angular pressing(ECAP), 다층누적압연법(ARB), severe torsion straining(STS) 등을 알루미늄, 구리, 저탄소강 등의 소재에 적용하여, 비교적 균질한 초미세 결정립 구조를 갖는 재료의 제조 가능성을 보여주었다.⁽¹⁻⁵⁾

일반적으로 사용되는 $10\mu\text{m}$ 정도 크기의 결정립을 갖는 저탄소강의 경우, 초기 낮은 변형량에서 지속적인 가공 경화에 의한 응력의 증가 현상이 관찰된다. 그러나 초미세 결정립을 갖는 저탄소강을 인장 시험하는 경우 관찰되는 변형거동의 특징 중의 하나는, 응력-변형 곡선에 있어서 초기 5% 이하의 변형량 범위에서 가공 경화가 거의 일어나지 않는 영역이 관찰되는 것이다. 이와 같은 특이한 현상은 인장 변형 중에 일어나는 동적 회복에 기인되는 것으로 설명될 수 있다. 박경태 등에⁽⁶⁾ 의하면 소성 가공시 초미세 결정립 강에서는 입자 크기가 너무 작아 냉간 가공 중 입자 내에서 전위 셀의 형성이 곤란하며, 따라서 초세립 강을 인장 변형하는 경우 응력-변형 곡선의 초

* 국민대학교 신소재공학부

기 낮은 변형량에서 동적회복의 발생으로 가공 경화가 거의 일어나지 않는 영역의 발생이 가능하다 하였다.

한편 초세립강의 인장 시험 시 가공 경화가 거의 일어나지 않는 영역의 존재는 마르텐사이트 미세조직을 갖는 저탄소강을 템퍼링한 소재에서도 관찰할 수 있다. 비록 템퍼링한 마르텐사이트의 경우 미세조직에서의 래스(lath) 계면이 저경각 입계로서 일반 결정립계와 그 성질을 달리 하지만, 전위 이동의 장애물, 전위의 sink 등과 같은 역할을 수행할 수 있으므로, 상기의 관점을 근거로 초세립강에서 발생하는 현상을 기대할 수 있다.

Ueji 등의 보고에⁽⁷⁾ 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 템퍼링 시 미세조직 변화에 대해서는 광범위한 연구들이 진행되어 왔으며, 템퍼링 시 탄화물의 석출, 구 오스테나이트 입자경이 인성에 미치는 영향 및 합금원소가 미세조직 및 기계적 성질에 미치는 영향 등에 대해서는 비교적 상세히 연구되어 있다.⁽⁸⁻¹⁰⁾ 그러나 마르텐사이트 미세조직을 갖는 저탄소강의 템퍼링 시 기지조직의 변화에 따른 기계적 성질의 거동에 대한 분석은 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 유도가열을 이용하여 미세한 크기의 오스테나이트 초기 입자를 갖는 마르텐사이트 미세조직을 템퍼링하여 초세립 저탄소 합금강의 제조 가능성을 탐색하기 위한 목적으로, 템퍼링 온도 변화에 따른 인장 거동을 미세조직과 관련하여 분석하고자 한다.

2. 실험 방법

본 연구에서 사용된 저탄소강은 0.21% C, 0.22% Si, 0.73% Mn, 1.08% Cr, 0.19% Mo, 0.014% P, 0.012% S의 화학성분을 갖는 직경 12mm 열간 압연한 봉재로서, 1223K의 온도에서 유도 가열하여 40초 유지한 후 수냉한 소재를 이용하였다. 이때의 초기 오스테나이트 입자의 크기는 ASTM 10.5였다. 시편의 템퍼링 열처리하는 온도를

의 온도 범위에서 변화시켜 염욕에서 30분간 유지하여 수냉하였다.

템퍼링 열처리시 가열조건에 따른 세멘타이트의 분포, 구상화 거동 및 회복 및 재결정과 같은 기지조직의 변화 등 미세조직 변화를 관찰하기 위해서, 각각의 템퍼링 열처리 조건이 완료된 시편은 4% 나이탈 용액에 에칭하여 광학현미경을 이용하여 관찰하였으며, 투과 전자현미경 관찰을 위한 시편은 연마 후 10% perchloric acid와 90% 초산을 용액으로 젓트 연마하여 제조하였다.

템퍼링 열처리시 가열조건에 따른 기계적 성질의 측정을 위해, 열처리가 완료된 시편은 열처리 중 생성된 탈탄층의 영향을 제거하기 위하여 연삭 및 연마를 실시한 후 ASTM 규격의 인장시편으로 가공하였다. 인장시험은 ASTM subsize 규격의 시편을 상온에서 cross-head 속도 1mm/min의 조건에서 실시하였고, 스트레인 게이지를 이용하여 인장거동을 관찰하였으며 총연신율은 시편에 25mm 표점을 표시하여 파단 후 연신된 길이를 측정하여 얻었다.

3. 결과 및 토론

3.1 템퍼링 시 미세조직 변화

일반적으로 템퍼링시 발생하는 미세조직 변화를 분류하면, 탄화물의 석출, 구상화 및 성장 등 탄화물 거동과 관련된 부분과 회복 및 재결정과 같은 기지조직의 변화의 두 가지가 있다. Fig. 1(a)는, 673K에서 템퍼링한 미세조직으로 템퍼링한 경우 전형적으로 탄소강에 존재하는 미세한 래스 마르텐사이트가 관찰되었으며, 래스 내부에는 주로 전위에서 생성한 침상의 세멘타이트 입자가 결정학적 방위에 따라 분포되어 있었다. 템퍼링 온도가 773K로 상승한 Fig. 1(b)에서는, 대부분 세멘타이트 입자가 원래의 형태를 유지하고 있으나 일부 세멘타이트 입자가 탄화물의 표면 에너지를 감소시키기 위한 구상화에 의하여 aspect ratio가 감소하는 경향을 보이는 것이 관찰된다. 템퍼링 온도가 873K에 도달하게 되면(Fig. 1(c)), 래스 내부에 침상 세멘타이트는 거의 존재하지 않고 탄화물의 표면에너지를 낮춘 형태인 구형 세멘타이트의 형성이 관찰된다.

한편, 973K 이상의 높은 온도에서 오랜 시간 유지하면, 미세조직에서 고경각 입계(high angle

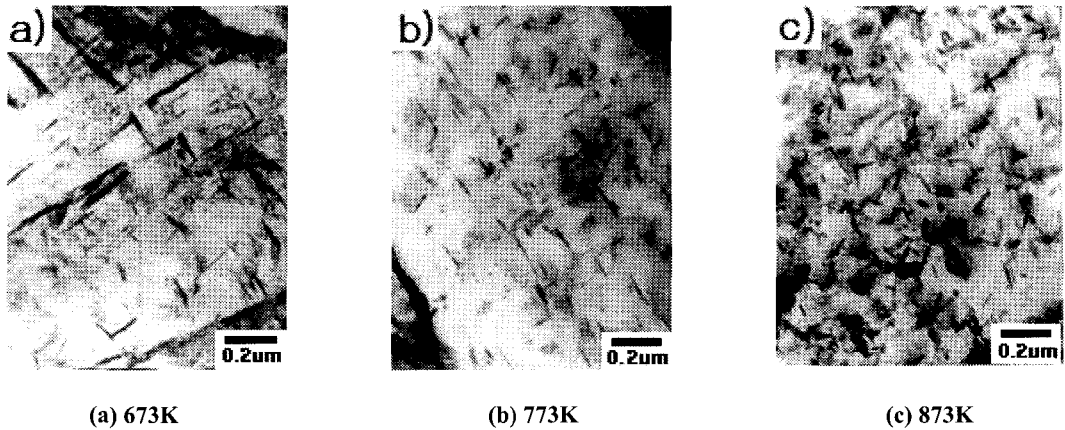


Fig. 1 TEM micrographs showing the morphology of carbide particles at various tempering temperatures

boundary)를 갖는 페라이트의 존재가 관찰된다. Lindsley 등에⁽¹¹⁻¹²⁾ 의하면 탄소량 0.2% 이상의 강을 템퍼링하면 재결정의 발생 없이 페라이트의 회복 및 입자 성장이 일어난다. 이는 일반적으로 결정립계에서의 페라이트 핵생성에 의한 재결정립 생성 또는 아결정립(subgrain)의 합체에 의한 재결정립 형성이 아닌, 회복된 아결정립자의 성장 또는 입계 이동에 의한 고경각 입계를 갖는 페라이트 입자의 형성을 의미한다. 본 연구에 사용된 소재는 탄소 함량이 0.21%인 소재로 Lindney 등에 의한 분류의 경계에 가까우므로, 템퍼링 과정에서 재결정이 발생하는지는 분명치 않다. 다만 Fig. 2에서 관찰할 수 있듯이, 고경각 입계를 갖는 페라이트 결정립이 관찰되어 그 존재를 확인할 수 있다.



Fig. 2 TEM micrographs showing strain-free polygonal ferrite grains in the sample tempered at 973k

또한 973K에서 템퍼링한 소재에서, 계면에 존재하는 조대한 세멘타이트 입자들의 존재는 템퍼링 온도의 상승에 따른 결정립 성장에 의한 페라이트 결정립의 조대화를 억제하는 효과가 있을 것을 보여준다.

3.2 템퍼링 온도에 따른 인장거동 변화

인장시험에서 얻어진 변형-응력 곡선은 소재의 미세조직과 기계적 성질과의 관계에 있어서 많은 정보를 제공한다. 따라서 인장시험 시 얻어진 인장곡선을 분석하여 미세조직의 변화가 인장곡선의 형상에 어떠한 변화를 야기시켰는지 분석해 보았다.

초기 마르텐사이트 미세조직을 템퍼링하는 경우, 템퍼링 온도에 따른 마르텐사이트 저탄소 함금강의 응력-변형 곡선의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서와 같이 인장곡선의 변형 거동은 다음의 3 가지 형태로 분류할 수 있다. 첫 번째로 낮은 템퍼링 온도(523K)에서 템퍼링 한 경우 경우의 인장곡선은 소재의 템퍼링에 따른 연화가 다른 소재보다 작으므로 당연히 다른 템퍼링 온도보다 높은 유동 응력을 보인다. 반면에 인장곡선에서 항복현상이 전혀 관찰되지 않는 연속 항복(continuous yielding)의 특징적인 경향을 보인다.

연속 항복 현상은 이미 잘 알려진 바와 같이, 오스테나이트로부터 마르텐사이트로의 상변태 시 발생하는 잉여 가동전위(excess mobile dislocation)의 존재에 기인한 것으로, 인장 변형 시 가동 전위의 이동이 활발하여 항복현상이 관찰되지

않는 현상으로, 복합 조직강 (dual-phase steel, multi-phase steel 등)의 마르텐사이트 미세조직을 함유한 강에서 주로 관찰된다.

두번째로 관찰되는 인장 변형 곡선의 형태는 그림에서 템퍼링 온도 673K-873K 의 온도 영역에서 관찰되는 형태로, 인장 변형 시 연속항복 현상이나 전형적인 항복 현상도 관찰되지 않으며, 초기의 낮은 변형량 영역에서 가공 경화가 거의 일어나지 않는 영역의 발생이 관찰된다.

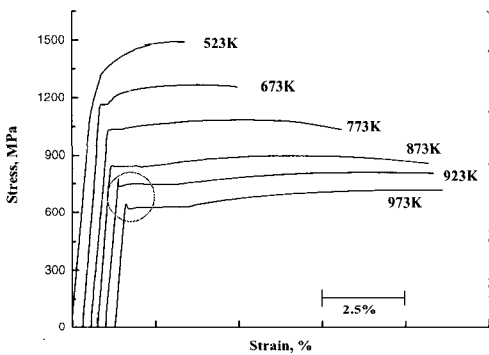


Fig. 3 Engineering stress-strain curves of the present steels with tempering temperatures of 523K ~ 973 K

이와 같은 현상은 냉간 신성한 펄라이트 강을 bluing 처리하는 과정에서도 관찰되는데, 이러한 두 가지 과정의 유사점은 기지조직에 고용된 탄소가 석출되어 형성된 세멘타이트가 구상화되어 가는 과정 및 기지조직의 많은 전위들이 재배열과 관련된 회복현상 등이 활발하게 진행되는 온도 범위이다.

응력-변형 곡선에 있어서 초기 가공 경화가 거의 일어나지 않는 영역의 발생 원인에 대하여 템퍼링 시 발생하는 미세조직 변화와 관련하여 분석하면, 이미 언급한 바와 같이 탄화물의 형상 변화 및 기지조직의 회복과 재결정 등을 들 수 있다.

탄화물의 형상 변화의 관점에서 분석해 보면, 템퍼링 온도의 상승에 따라 탄화물 입자의 형상 변화가 관찰되나 Fig. 3 에서와 같이 인장 곡선에서 큰 변화가 관찰되지 않는 현상으로부터 간접적으로 템퍼링 시 탄화물 형상 변화가 인장 곡선의 형태 변화와는 관련이 미약하다는 결론을 도

출할 수 있다. 특히 인장 변형 시 동적회복 측면에서 탄화물 입자는 단순히 전위 이동의 장애물로만 작용할 뿐 전위의 sink 나 source 로 작용할 가능성이 낮으므로 관련성이 약하다 하겠다. 그러므로 인장곡선에서의 가공 경화가 거의 일어나지 않는 영역의 발생과 관련 짓기는 곤란하다.

따라서 연속 항복의 소멸 및 가공 경화가 거의 일어나지 않는 영역의 발생과 관련 짓기 위해서는 다른 미세조직 변화인 기지 조직의 변화를 고려하여야 한다.

한편 인장곡선에서 연속 항복현상의 소멸을 가능하게 하는 방법으로는 가동 전위가 소멸되거나 또는 코트렐 분위기 형성에 의한 가동 전위의 고착이 이루어져야 한다. 한편 템퍼링 온도의 상승은 마르텐사이트 내에 파괴화 고용되었던 탄소 원자들의 석출을 유도한다. 따라서 템퍼링 온도의 상승은 고용된 탄소원자의 함량을 감소시키는 효과를 가지므로 템퍼링 온도의 상승은 코트렐 분위기 형성에는 전혀 효과적이지 못하다. 더구나 코트렐 분위기 형성을 위해서는 극히 소량의 고용된 탄소원자가 필요할 뿐이다. 따라서 템퍼링 온도 변화에 따른 고용된 탄소함량의 변화는 연속 항복의 소멸 및 가공 경화가 거의 일어나지 않는 영역의 발생과는 연관이 거의 없는 것으로 볼 수 있다.

따라서 연속 항복 현상의 소멸을 위한 다른 가능한 방법으로 초기 마르텐사이트에 존재하는 가동 전위가 템퍼링 온도의 상승에 따라 소멸하는 가능성을 검토할 필요가 있다. 비록 정량적인 전위밀도의 측정은 본 연구에서 실시된 바 없으나, 템퍼링 온도의 상승에 따라 기지조직에 회복 과정으로서 가동 전위의 밀도가 감소함을 예측할 수 있고 이에 따라 연속 항복 현상이 소멸될 가능성이 높다. 더구나 마르텐사이트의 미세조직 단위인 래스의 크기가 일반 초세립 강의 결정립 크기와 유사한 사실로부터, 인장 변형시 래스 내부에 전위 cell 의 형성이 불가능함을 알 수 있다. 따라서 박경태 등이⁽⁶⁾ 보고한 바와 같이, 마르텐사이트 래스 내부에 전위 cell 이 형성되지 못하고, 저경각 입계로 이루어진 래스 계면이 냉간 가공 중 전위의 source 나 sink 의 역할을 수행할 수 있다고 가정하면, 인장시험 시 전위의 생성과 소멸이 평형을 이루어 발생하는 동적회복으로 인

하여 인장 변형 곡선에서 가공 경화가 거의 일어나지 않는 영역의 생성이 이루어질 수 있다.

한편 템퍼링 온도 673K~873K 의 온도 영역에서 템퍼링 온도 상승에 따라 가공 경화가 거의 일어나지 않는 영역이 확장하는 현상은, 템퍼링 온도의 상승에 따른 이동 전위의 소멸 등과 같은 전위의 재배열, 회복 현상, 아결정립계 소실에 의한 아결정립자 성장, 래스 내부 세멘타이트의 구상화 및 조대화에 의한 전위의 이동가능 간격(mean free path)의 증가 등이 가능한 원인으로 고려될 수 있다. 그 중 템퍼링시, 내부에 전위 cell 형성이 이루어지지 않는 범위에서의 아결정립 성장과 침상에서 구형으로의 세멘타이트 형상 변화 및 조대화에 의한 전위의 이동가능 간격(mean free path)의 증가가 동적회복이 발생하는 변형영역의 확대와 관련이 있을 것으로 사료된다.

세 번째 인장 변형 곡선의 형태는 전형적인 항복 현상이 관찰되는 형태로(Fig. 3 의 원으로 표시된 부분), 높은 템퍼링 온도인 923K 이상의 온도에서 템퍼링 열처리한 시편에서 관찰된다. 일반적으로 항복현상은 변형이 없는 등축정의 페라이트 결정립의 존재와 밀접한 관계가 있다고 알려져 있다. 따라서 고온에서 템퍼링하는 경우, 가동 전위의 완전한 소멸 및 초미세 등축정 결정립(Fig. 2, 0.2 μ m) 생성으로 인하여, 내부에 전위 cell 을 형성할 수 있는 페라이트 입자 형성 및 코트렐 분위기 형성으로 항복 현상이 발생하였다.

Fig. 4 에 인장시험에서 얻어진 템퍼링 온도에 따른 기계적 성질 변화를 나타내었다. 그림에서 인장강도 및 항복강도 공히 템퍼링 온도의 상승에 따라 강도가 감소하는 일반적인 경향을 보인다.

인장강도는 주로 소재 내의 전위밀도와 같은 기지조직의 변화에 민감하게 반응하여, 템퍼링 온도의 상승에 따라 직선적으로 감소하는 경향을 보인다. 한편 항복강도는 인장강도의 변화와는 다소 다른 양상을 보이는데, 낮은 템퍼링 온도 범위인 673K 정도까지 다소 완만한 감소 경향을 보이다가 템퍼링 온도의 상승에 따라 인장강도와 유사하게 급격히 감소하는 경향을 보인다. 이는 항복강도는 초기 낮은 템퍼링 온도 범위에서 온도 상승에 따라 기지조직의 전위밀도 감소로 인한 연화 효과에도 불구하고 기지조직 내에 고용

된 탄소원자 들의 탄화물로 석출하여 강도가 상승하는 효과가 크게 작용하기 때문으로 사료된다. 인장강도는 템퍼링시 탄화물의 석출 및 형상 변화에도 영향을 받으나, 온도 증가에 따른 소재 내의 전위밀도의 감소와 같은 기지조직 변화에 민감하게 반응하여 강도가 감소한다. 이후 템퍼링 온도 상승에 따른 인장강도 및 항복강도의 감소는 673K 이상의 온도 영역에서 고용 탄소의 석출현상 없이 세멘타이트의 구상화 및 성장에 따른 탄화물의 간격의 증가와 템퍼링 온도 상승에 의한 기지조직 내에 존재하는 전위들의 소실에 기인된 것으로 사료된다.

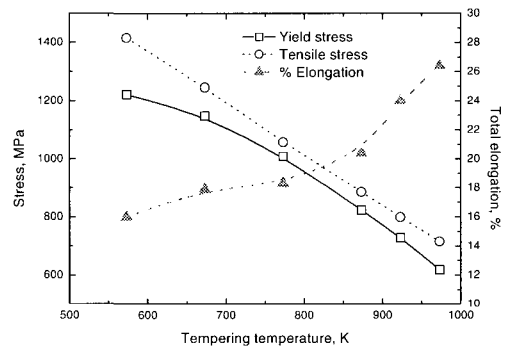


Fig. 4 Mechanical properties of the present steels with tempering temperatures of 523K~973K

총연신율(total elongation)은 템퍼링 온도 상승에 따라 증가하는 일반적인 경향을 나타내며, 전 템퍼링 온도 영역에서 14% 이상을 나타내어 연성이 우수한 소재임을 알 수 있다. Fig. 4 에서 873K 이상의 템퍼링 온도 영역에서 총연신율이 급격히 상승하는 경향을 보이는데, 이 현상을 미세조직 변화와 관련하여 분석하면, 소재의 기지조직에 고정계각 입계를 갖는 페라이트 입자의 존재와 직접적으로 관련된다. 즉 템퍼링 온도의 상승에 따라 등축정 결정립을 갖는 페라이트 입자가 관찰되기 시작하는 영역에서 단면감소율이 급격하게 증가하기 시작한다.

4. 결론

저탄소 합금강에서 미세조직과 기계적 성질에 미치는 템퍼링 온도의 영향을 연구하였다. 인장

변형 곡선에서 템퍼링 온도 영역 673~873K 내에서의 온도 상승에 따른 항복 현상의 소멸과 가공 경화가 거의 일어나지 않는 영역의 발생은 템퍼링 시 가동 전위의 감소와 인장 변형시 동적 회복의 발생과 관계가 있다. 또한 템퍼링 온도 923K 이상에서의 항복 현상의 발생은 템퍼링시 고경각 입계를 갖는 등축정 페라이트 결정립 생성으로 설명할 수 있었다.

후 기

본 연구는 2003년도 국민대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구된 논문임.

참 고 문 헌

- (1) Tsuji, N., Ito, Y., Saito, Y. and Minamoto, Y., 2002, Scripta Mater., Vol. 47, p. 893.
- (2) Saito, Y. Utsunomiya, H. and Sakai, T., 1999, Acta mater., Vol. 47, p. 579.
- (3) Valiev, R. Z., Kislimgaliey, R. and Alexandrov, I. V., 2000, Prog. Mater. Sci., Vol. 45, p. 103.
- (4) Liu, Z. Y., Hu, L. X. and Wang, E. D., 1998, Mater. Sci. Eng., Vol. A255, p. 16.
- (5) Richert, M., Liu, Z. Y. and Hansen, N., 1998, Mater. Sci. Eng., Vol. A260, p. 275.
- (6) Park, K. T. and Shin, D. H., 2002, Matall. and Mater. Trans. A, Vol. 33A, p. 705.
- (7) Ueji, R., Tsuji, N., Minamino, Y. and Koizumi, Y., 2002, Acta Materialia, Vol. 50, p. 4177.
- (8) Altstetter, C. J., Cohen, M. and Averbach, B. L., 1962, Trans ASM, Vol. 55, p. 297.
- (9) Chang, L. and Smith, G. D. W., 1984, J. Phys., Vol. 45, p. 397.
- (10) Babu, S. S., Hono, K. and Sakurai, T., 1994, Met. & Mater. Trans. A, Vol. 25A, p. 499.
- (11) B.A.Lindsley and A.R.Marder, 1998, Acta Mater., Vol. 46, p. 341.
- (12) H.Kreye, 1970, Z. Metallkde, Vol. 61, p. 108.