

초미세 결정립 TRIP 강의 미세조직 변화

이철원¹ · 고영건² · 남궁승¹ · 신동혁^{1*}

Microstructural evolution of ultrafine grained TRIP low-carbon steel

C.W. Lee, Y.G. Ko, S. Namgung, and D.H. Shin

Abstract

Transformation induced plasticity (TRIP) steel consisting of ferrite, austenite, and bainite phases was regarded as an excellent candidate for automotive applications due to the good combination of ductility and strength. The aim of the present study was to understand the microstructural characteristics of ultrafine grained (UFG) TRIP low-carbon steel fabricated *via* equal channel angular pressing accompanied with intercritical- and isothermal-annealing treatments. When compared to coarse grained counterpart, only the volume fraction of austenite phase in UFG TRIP steel remained unchanged, but all other microstructural variables such as size and morphology were different. It was found that UFG TRIP steel showed the homogeneous distribution of each constituent phase, which was discussed in terms of annealing treatments done in this study.

Key Words: low carbon steel, transformation induced plasticity, microstructure; ultrafine grain

1. 서론

최근 자동차 산업에서는 연비효율의 향상과 더불어 이산화탄소 배출량을 줄이기 위해 고강도 철강재를 개발함으로써 소재 경량화를 실현하고자 하는 다양한 접근이 시도되고 있다. 이에, 고강도와 고성형성을 이루기 위해 이상 조직강(dual-phase steel, DP)과 변태유기 소성강(transformation induced plasticity, TRIP)과 같이 2개 이상의 상으로 구성된 복합조직 강에 대한 관심이 증대되고 있다. 이 중에서 소성변형 중 변형유기 변태에 의해 우수한 기계적 물성을 갖는 TRIP 강은 고강도 재료로서 널리 주목 받고 있다. 현재까지 TRIP 강에 대한 주된 연구 결과를 살펴보면, 상온 기계적 물성에 미치는 외부 인자로서 합금 원소 혹은 항온 열처리 조건의 영향에 대해서 논

의된 바 있으며[1,2], 미세조직 인자로서 각 구성상의 크기, 분율, 분포 그리고 형상의 영향에 대해서도 다양한 연구 결과들이 보고되고 있다. 하지만 이들 대부분의 연구들은 결정립 크기가 마이크로 수준일 경우에 해당하는 것으로, 알려진 Hall-Petch 관계를 생각하게 된다면 향후 1 μm 이하의 결정립에 대한 심도 깊은 이해가 필요할 것이다.

일반적으로 벌크 금속 소재에서 초미세 결정립을 도입하기 위해서는 강소성 가공이 가장 효과적이라고 알려져 있다. 이는 주 변형 기구가 전단 변형으로 가공 중 시편 크기의 변화가 없기 때문에 반복 가공을 통하여 높은 변형량을 부여할 수 있기 때문이다. 이처럼 소재에 높은 변형량을 부과할 경우 연속동적 재결정(continuous dynamic recrystallization)이 발생하여 기존의 열가공 처리

1. 한양대학교

2. 영남대학교

한양대학교, E-mail: dhshin@hanyang.ac.kr

Table 1 Chemical composition of the steels (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	Nb
0.16	1.0	1.4	0.014	0.005	0.05	0.012	0.015

(thermo-mechanical processing, TMP)법을 통하여 제조할 수 있는 결정립 크기보다 더 미세한 결정립을 제어 가능하다. 하지만 강소성 가공에 의해 제조된 초미세 결정립 재료는 인장 및 압축 조건에서 높은 강도값을 갖지만 높은 항복비, 즉 가공경화능은 오히려 저하되며 이로써 연신율을 역시 낮아진다고 알려져 있다. 특히 균일 연신율과 관련되어, 알루미늄과 같은 대표적인 가공 경화형 소재의 경우에서도 강소성 가공 후 뚜렷한 균일 연신율을 구간없이 파단이 발생한다고 보고된 바 있어 초미세 결정립 소재는 산업적 적용에 있어서 내재적인 단점을 지니고 있다.

초미세 결정립 소재의 단점을 극복하기 위해, 변형유기 변태에 의해서 우수한 연신율을 수반하는 TRIP 특성을 도입하고자 한다. 우선 ECAP (equal channel angular pressing) 가공법을 사용하여 초미세 결정립 저탄소강을 제조한 후 이상영역 및 항온변태 열처리를 통하여 초미세 결정립 TRIP 강을 제조하고자 한다. 따라서 본 연구에서는, 현재까지 초미세 결정립 TRIP 강의 미세조직 형성에 대해서는 보고된 바가 없기 때문에, 강소성 가공을 포함한 다양한 열처리를 통해 제어된 페라이트, 베이나이트 그리고 오스테나이트 상들의 발달에 대해서 살펴보고자 한다.

2. 실험방법

본 연구에서 사용된 재료는 (주) POSCO에서 제공한 저탄소강을 사용하였으며, 표 1에 화학적 조성을 나타내었다. 이러한 저탄소강을 1473 K에서 매우 중요하다. 따라서 격자 내 탄소를 포함하고 있는 마르텐사이트를 도입함으로써 균일한 TRIP 강을 형성할 수 있다. 둘째, 급냉 후 도입되는 조직은 침상형 마르텐사이트로 높은 강도를 갖지만 연신율은 매우 낮다. 미세조직 형상과 이에 따른 낮은 연신율로 인해 ECAP 가공 시 극심한 변형이 소재에 부과되기 때문에 표면 파단이 발생할 수 있어 상술한 2 단계 열처리를 수행하였다. 이

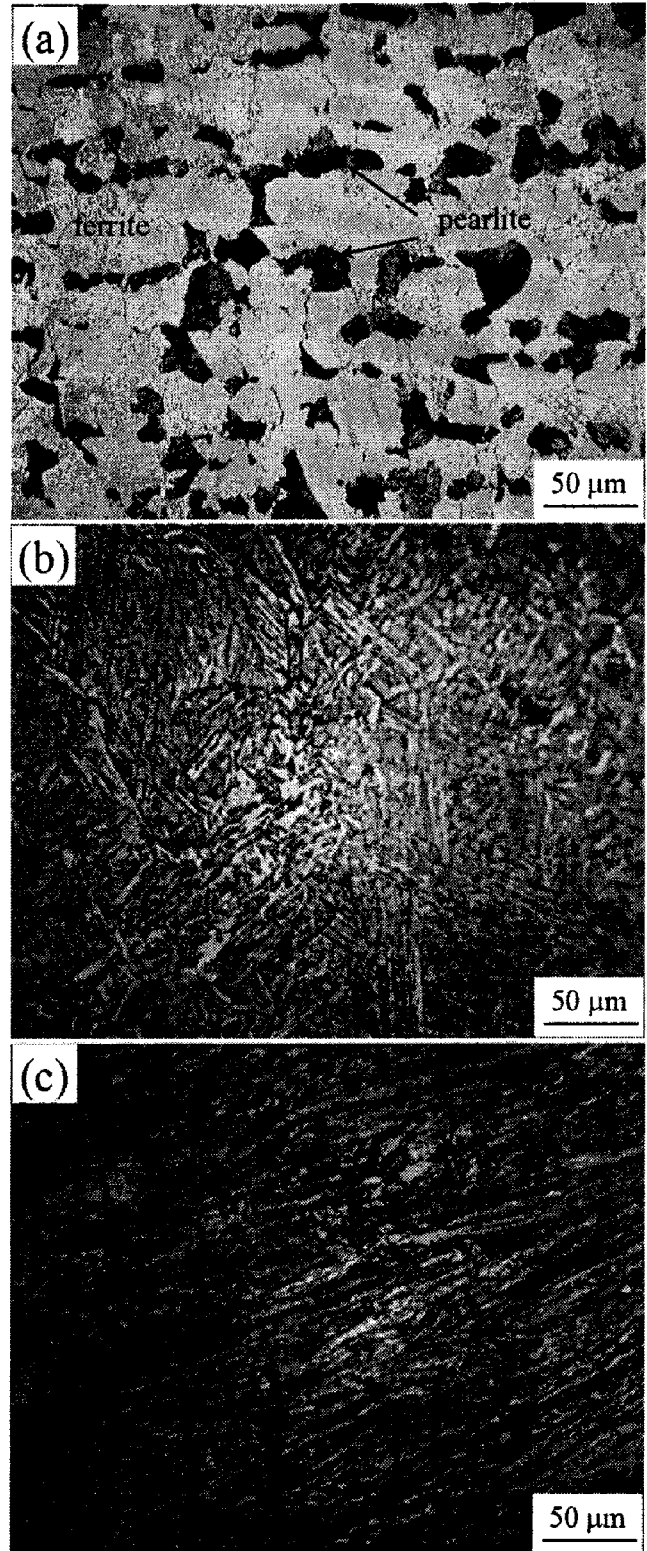


Fig. 1 Optical images of low carbon steel: (a) as-received (ferrite + pearlite), (b) martensite, and (c) deformed martensite microstructures.

를 직경 17.5 mm, 길이 130 mm의 봉상 형태로 가공하여 773 K의 등온조건에서 2 mm/s 의 속도로 ECAP 가공을 4 회 실행하였다. 매회 가공마다 시편을 길이방향으로 180° 회전하였다. 금형의 내각은 90°로 설계되어 1 회 가공을 통해서 ~ 1 정도의 높은 소성변형을 부여할 수 있다. 이후 TRIP 조직을 제어하기 위하여, 1063 K에서 5 분간 이상 영역 열처리를 실시한 후 항온변태 열처리는 673 K에서 5 분간 실행한 후 수냉 처리하였다.

미세조직을 관찰하기 위해 시편을 4 % 나이탈 용액 + 10 % 아황산염 나트륨 용액으로 에칭한 후 광학현미경과 주사전자현미경 (scanning electron microscopy, SEM)을 사용하여 관찰하였다. 잔류 오스테나이트의 분율은 Mo-K α 타겟을 사용하여 X 선 회절 분석기로 측정된 피크의 적분 강도로부터 다음 식 (1)을 이용하여 계산하였다[3]. 여기서 I_a 과 I_γ 는 특정면을 갖는 페라이트와 오스테나이트 상들의 적분 강도값이다.

$$V_\gamma = \frac{1.4I_\gamma}{I_a + 1.4I_\gamma} = \frac{1.4 \left[\frac{I_\gamma^{220} + I_\gamma^{311}}{2} \right]}{I_a^{211} + 1.4 \left[\frac{I_\gamma^{220} + I_\gamma^{311}}{2} \right]} \quad (1)$$

3. 실험결과

3.1 강소성 가공된 미세조직

그림 1(a)는 ECAP 가공 전 시편의 초기 미세조직이다. 평균 결정립 크기가 ~ 40 μm 인 페라이트와 펄라이트 상으로 구성되어 있으며, 이때 펄라이트의 분율은 ~ 15 %이다. 이 조직을 1473 K 에서 1 시간 그리고 1173 K 에서 1 시간 동안 균질화 처리를 실행하여 완전 마르텐사이트 조직을 제조하였다. (그림 1(b)) 한편, 그림 1(c)는 4 회 ECAP 가공 후 조직으로 초기 침상형태의 마르텐사이트 상은 전단변형에 의해 심하게 분절(fragmentation) 되었으며, 대부분의 결정립의 형상을 구별하기 힘들 정도로 결정립이 미세화되었다.

3.2 초미세 결정립 TRIP 강

대개 TRIP 강은 이상영역(페라이트 + 오스테나이트)에서 열처리 후 M_s 온도 이상의 베이나이트 변태온도에서 항온변태처리를 함으로써 제조할 수 있다. 본 연구에서는 미세조직의 변화를 비

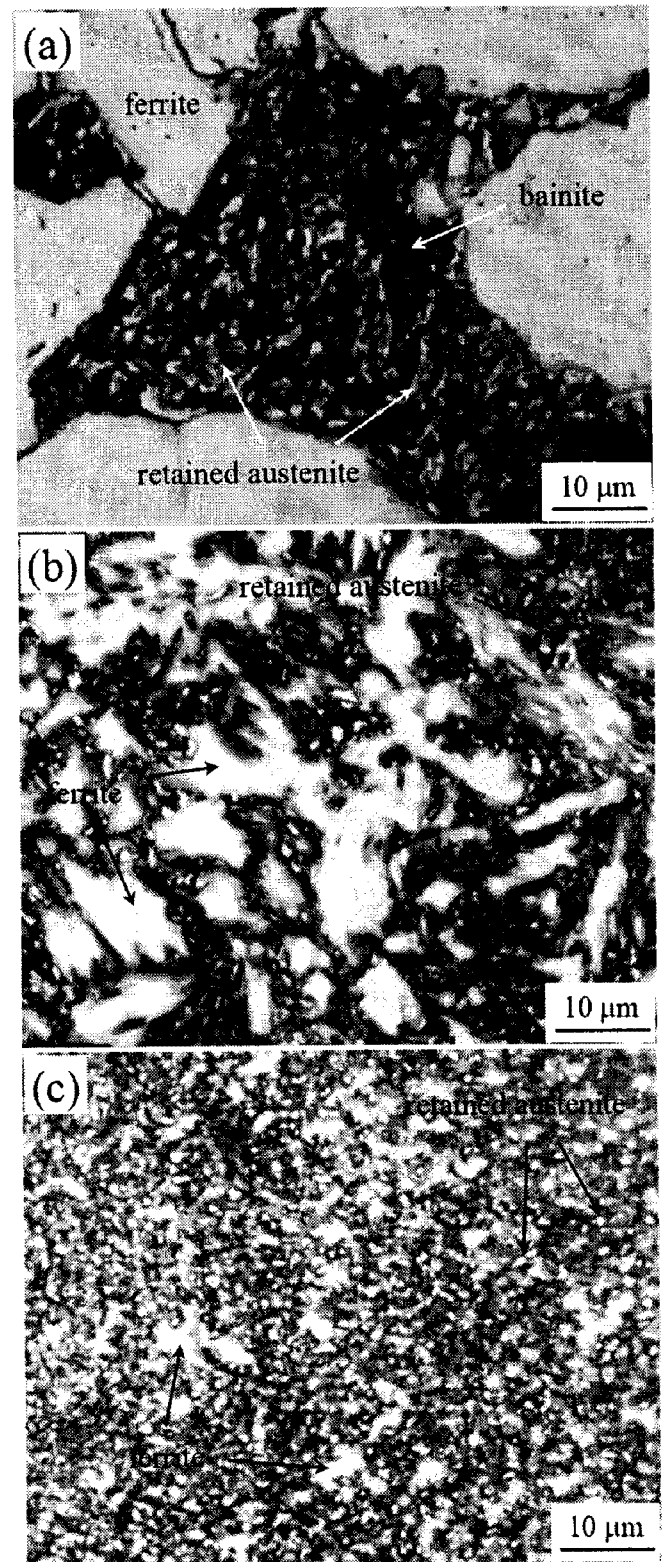


Fig. 2 (a-c) optical and (d-f) SEM images following intercritical- and isothermal-heat treatments: (a),(d): CG TRIP steel, (b),(e): AM TRIP steel, and (c),(f): UFG TRIP steel

교하기 위해서 초미세 결정립 TRIP 강 외에도 초기 저탄소강으로부터 제조한 조대한 결정립 TRIP 강, ECAP 가공 없이 마르텐사이트 조직을 TRIP 처리한 AM TRIP 강 제조하였다. (그림 2) 조대한 TRIP 강에서는 이상영역 열처리 시 탄소를 함유하고 있는 펄라이트 조직의 분해에 의해서 오스테나이트 상을 형성되기 때문에, 항온변태 열처리 시 베이나이트는 형성된 오스테나이트에서 변태되며, 그 일부 조직은 오스테나이트가 잔존하게 되어 TRIP 조직을 형성된다. 하지만 대부분의 구성상인 페라이트 상은 탄소 함유량이 낮기 때문에 최종 구성상의 분포는 균일하지 않다. (그림 2(a)) 고배율 미세조직 관찰 결과, 잔류 오스테나이트는 두 가지 형상을 갖는다고 판단되는 데, 베이나이트와 페라이트 입계의 등축 형과 베이나이트 내의 침상 형으로 존재한다[4]. 오스테나이트의 분율은 ~5% 이다.

Annealed martensitic (AM) TRIP 강 경우 조대한 조직에 비해서 결정립의 크기가 미세하며 그 분포 또한 상대적으로 균일하였다. 이는 초기 마르텐사이트에 의해서 조직 전반에 걸쳐 탄소 원자가 균일하게 분포하여 이상영역 열처리 시 오스테나이트가 균일하게 생성되기 때문으로 생각된다. 하지만 그림 2(b)와 같이, 대부분 결정립의 중형비는 4 이상이며 일부 조직에서는 ~5 μm 정도의 조대한 페라이트 상들이 관찰되었다. 베이나이트 분율은 증가하였으나 오스테나이트 분율은 위와 비슷하였다.

한편, 초미세 결정립 TRIP 강은 모든 복합상들이 매우 미세하며 분포 또한 매우 균일하다. (그림 2(c)) 이는 탄소의 균일한 분포와 매우 밀접한 관계가 있다. 우선 초기 완전 마르텐사이트 조직은 격자 내 탄소 원자를 함유하고 있으며, 게다가 ECAP 가공을 통해 기계적 분절이 발생하는데 이때, 탄소 원자가 균일하게 재 분배되기 때문이다. 이는 이상영역 열처리 시 조직 내 오스테나이트 상을 형성시키는 데 매우 효과적이다. 이때 오스테나이트 분율은 ~10% 정도이며 등축 형태로 존재하고 있다. 초미세 결정립 TRIP 강에서 등축의 오스테나이트 상이 전반적으로 고르게 분포되어 있기 때문에 인장물성 향상에 기여할 것으로 판단된다. 따라서 향후 기계적 물성 평가를 통하여 초미세 결정립 TRIP 강의 잔류 오스테나이트에

의한 변형유기 변태에 대한 연구가 필요하다.

4. 결론

본 연구에서 4 회 강소성 가공과 이상영역 및 항온변태 열처리를 통해 초미세 결정립 TRIP 강을 성공적으로 제조하였다. 본 소재의 미세조직 특성을 조대한 TRIP 강 및 AM TRIP 강과 비교할 때, 우선 구성상들의 결정립의 크기는 1 μm 정도로 매우 미세하였으며 특히 조대한 TRIP 강과 비교할 때 분포는 매우 균일하였다. 또한, TRIP 효과에 있어 핵심 역할을 하는 오스테나이트 상의 형태는 거의 등축의 형태로 인장 물성에 긍정적인 영향을 줄 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 2007년도 한국학술진흥재단의 과제(KRF-2007-357-D00136) 및 2009년도 교육과학기술부 교육역량강화사업(수혜기관: 영남대학교)으로 이루어졌으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] S.J. Kim, C.G. Lee, T.H. Lee, and C.S. Oh, 2003, Effect of Cu, Cr and Ni on mechanical properties of 0.15 wt.% TRIP-aided cold rolled steels, *Scr. Mater.*, Vol. 48, pp. 539~544.
- [2] K. Sugimoto, N. Usui, M. Kobayashi, and S. Hashimoto, 1992, Effects of volume fraction and stability of retained austenite on ductility of TRIP-aided dual-phase steels, *ISIJ Inter.*, Vol. 32, pp. 1311~1318.
- [3] R.L. Miller, 1964, A rapid X-ray method for the determination of retained austenite, *Trans. ASM*, Vol. 57, pp. 892~899.
- [4] J.H. Oh, J.H. Jun, S.G. Hong, and C.G. Park, 2000, Effects of bainitic transformation temperature and stress state on the formability of C-Mn-Si TRIP steel, *J. Kor. Inst. Met. Mater.*, Vol. 38, pp. 1160~1166.