

# 변태 유기 소성강(TRIP steel)의 미세구조와 원자 단위 분석

임남석<sup>1</sup>, 강주석<sup>1</sup>, 김성일<sup>2</sup>, 박찬경<sup>#</sup>

## Atomic Scale Investigation of TRIP Steels

N.S. Lim, J. S. Kang, S.I. Kim C. G. Park

### Abstract

In this study, microstructure and distribution of alloy elements were investigated in thermo-mechanically processed C-Mn-Si transformation induced plasticity (TRIP) steels. The microstructures of TRIP steels were investigated by using advanced analysis techniques, such as three dimensional atom probe tomography (3D-APT). At first, the microstructure was observed by using TEM. TEM results revealed that microstructure of C-Mn-Si TRIP steel was composed of ferrite, bainite, and retained austenite. 3D-APT was used to characterize atomic-scale partitioning of added elements at the phase interface. In the retained austenite phase, Ti and B were enriched with C. However, there was no fluctuation of Mn and Si concentration across the interface. Through these analysis techniques, the advanced characteristics of constituent microstructure in C-Mn-Si TRIP steels were identified.

**Key Words:** C-Mn-Si TRIP steel, retained austenite, TEM, 3D-AP

### 1. 서론

자동차용 강재로 사용되고 있는 변태 유기 소성강(Transformation Induced Plasticity steels, TRIP steel)은 우수한 강도와 연성을 동시에 갖는다. TRIP 현상은 1967년 Zackay에 의해 준안정 오스테나이트 스테인리스(metastable austenitic stainless)강에서 처음으로 보고되었다[1]. 이러한 현상은 준안정상인 잔류 오스테나이트가  $M_s$  온도 이상에서 외부 응력을 받아 마르텐사이트로 변하는 것이며, 이로 인해 강재의 연성 및 인성이 향상된다.

TRIP 강은 C, Mn, Si를 기본 성분으로 하여 이상 영역 열처리(Intercritical annealing)에 베이나이트 변태 온도 구간의 항온변태처리(Isothermal treatment)를 접목함으로써 제조된다. TRIP 강의 기계적인 성질은 미세구조와 함께 잔류 오스테나이트의 안정성에 영향을 받는다. 일반적으로 잔류 오

스테나이트에 고용된 탄소의 양은 화학적인 안정성에, 잔류 오스테나이트의 형상 및 크기 등은 기계적인 안정성에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다[2-3].

이처럼 미세 구조 및 잔류 오스테나이트에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으나 원자 단위의 C의 거동이나 각 상 안에서 원소들의 분포에 관한 연구는 미비한 실정이다. C 및 그 밖에 용질 원소들의 분포를 이해하는 것은 상변태를 이해하고, 새로운 합금의 조성과 공정들을 개발하는데 있어서 필수적이므로, 본 연구에서는 TEM 및 EBSD를 이용하여 미세 구조 분석하고 3차원 원자 분석기(3 dimensional atom probe)를 이용하여 원자 단위 수준에서 각 상에서 C의 농도 및 용질 원소의 분포를 연구하였다.

1. 포항 공과대학교

2. 포스코 기술 연구소

# 포항 공과대학교, 포항 나노 기술집적센터, cgpark@postech.ac.kr

## 2. 실험 방법

본 실험에서는 표 1에 보이는 바와 같이 C이 각각 0.08 wt. % 와 0.22 wt. %가 첨가된 두 종류의 TRIP강을 분석 하였다. 전체적인 TRIP강의 미세구조 및 잔류 오스테나이트의 형상을 보기 위해 JEOL-2100 TEM이 사용 되었다. 각 상들의 유효 결정립도와 잔류 오스테나이트의 상분율을 EBSD로 측정 하였으며, 3D-AP 분석은 Cameca사의 LAWATAP이 사용 되었다. 한편 TEM, EBSD, 3D-AP 분석을 위한 모든 시편은 압연 방향과 수직으로 제조 되었다.

TEM과 EBSD 분석을 위한 시편은 기계적인 연마 후에 5% perchloric 용액으로 전해 연마하여 제조 하였다. 3D-AP 시편 분석을 위한 반지름이 약50nm 이하인 침상형 시편 제작에는 perchloric 용액을 분한 원형 고리 안으로 전류를 흘려 전해 연마하는 방법과, FIB(Focused Ion Beam)를 이용한 방법을 함께 사용하였다. Atom probe 분석은 60K의 온도에서 실시하였다.

Table 1 Chemical composition (mass %)

	C	Mn	Si	Al	others
A	0.080	1.660	1.180	0.052	Sb
B	0.220	1.670	1.620	0.459	Ti, B, Sb

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 TRIP강의 미세구조 분석

TEM 분석 결과 그림 1에서 보는 것과 같이 A, B 두 시편 모두에서 TRIP강에서 일반적으로 볼 수 있는 페라이트, 베이나이트 그리고 잔류 오스테나이트의 상을 확인 할 수 있었다. A-TRIP강에 비해 C 함량이 높고 미세 합금 원소(Ti, B)가 첨가된 B-TRIP 강에서는 상의 크기가 더 작았으며 전체적으로도 복잡한 미세구조를 보였다. 한편 TRIP 현상에 직접적으로 관계가 있는 잔류 오스테나이트는 주로 페라이트와 베이나이트의 입계 근처에서 granular 형태로 분포하고 있었으며, 그 밖에 페라이트 입내에 고립되어 있거나 입계 사이에 film type으로 존재하는 등 다양한 형태로 관찰 되었다(그림 2). 유효 결정립의 크기를 정량

적으로 평가한 EBSD 측정 결과 페라이트와 베이나이트 뿐만 아니라 잔류 오스테나이트의 크기도 A-TRIP강이 약 3.6배정도 크게 나타났다. 그러나 잔류 오스테나이트의 상분율에 있어서는 C이 많이 첨가된 B-TRIP이 약 37% 더 많은 것을 확인할 수 있었다. (표 2)

Table 2 Effective grain size and volume fraction of retained austenite by EBDS

	Average grain size( $\mu\text{m}$ )		Volume fraction of $\gamma_R$ (%)
	$\alpha$ and B	$\gamma_R$	
A	9.10	3.05	3.3
B	1.98	0.85	5.2

$\alpha$ : Ferrite, B: bainite,  $\gamma_R$ : retained austenite

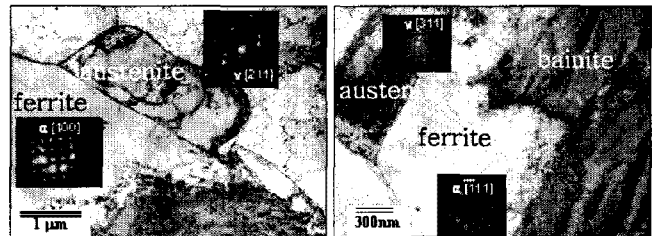


Fig. 1 TEM micrograph of TRIP steels (a) A-TRIP steel (b) B-TRIP steel respectively.

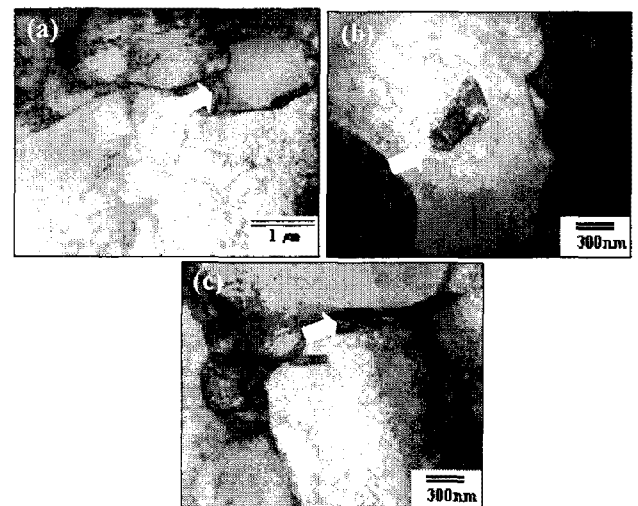


Fig. 2 Various shape of retained austenite (a) granular type, (b) island type, (c) film type respectively.

### 3.2.3 차원 원자 분석기를 이용한 분석

A-TRIP 강의 3D-AP 분석 결과 그림 3과 같은 원자 분포도를 얻을 수 있었다. 분석된 영역에서는 C이 모여있는 영역(Region A)과 그렇지 않은 영역(Region B)으로 C이 분배된 것을 뚜렷하게 확인 할 수 있었다.

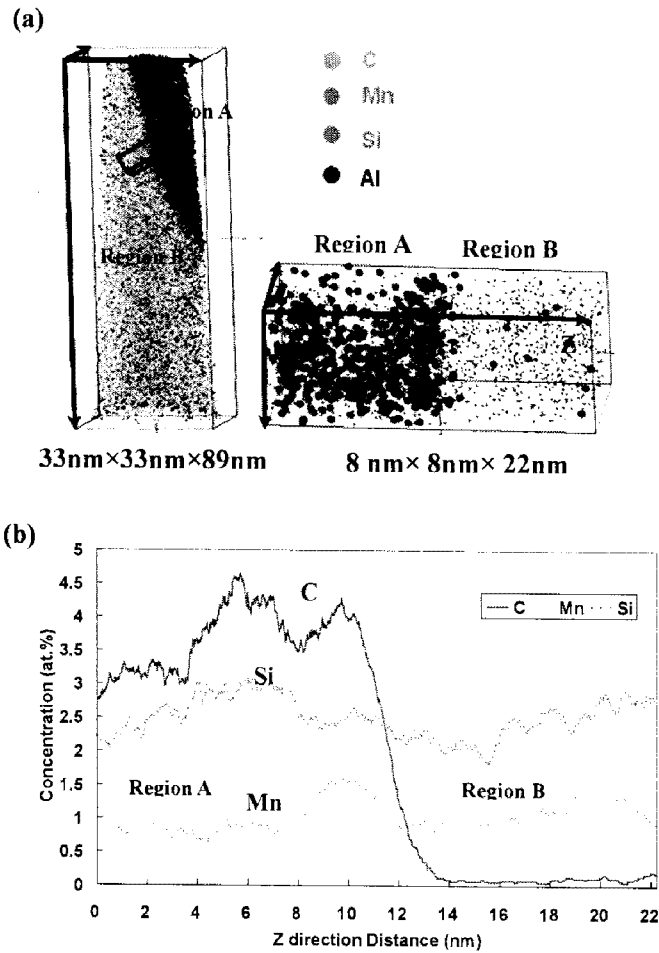


Fig. 3 Atom map of C, Mn and Si in retained austenite and ferrite (or bainite) in the A-TRIP steel (a) and corresponding profile across the interface (b).

위 C 원자 분포로부터 region A 는 C 고용량이 많은 잔류 오스테나이트 영역이며, region B는 페라이트나 베이나이트인 것으로 추정된다. C은 뚜렷하게 상간 계면을 중심으로 분배 거동을 보인 반면, 페라이트 안정화 원소로 알려져 있는 Si과 Al 그리고 오스테나이트 안정화 원소인 Mn의 경우에는 계면을 경계로 하여 농도의 변화가 뚜렷하지 않았다.

B-TRIP강의 경우에도 C의 분배 거동은 A-TRIP과 같이 뚜렷하게 확인을 할 수가 있었다. 그리고 B-TRIP에서는 C 뿐만 아니라 소량 첨가되었던 Ti, B 같은 미세 합금 원소들도 C과 같은 경향을 가지고 분배 거동을 보였다. A-TRIP에서는 상간 거의 변화가 없었던 Si, Mn, Al의 경우 상간 계면을 경계로 하여 페라이트 안정화 원소인 Si, Al의 경우 페라이트 영역에서 약간 증가하는 경향을 보였고 반대로 오스테나이트 안정화 원소로 알려진 Mn의 경우에는 약간의 감소가 있었지만, C과 같은 큰 변화는 없었다

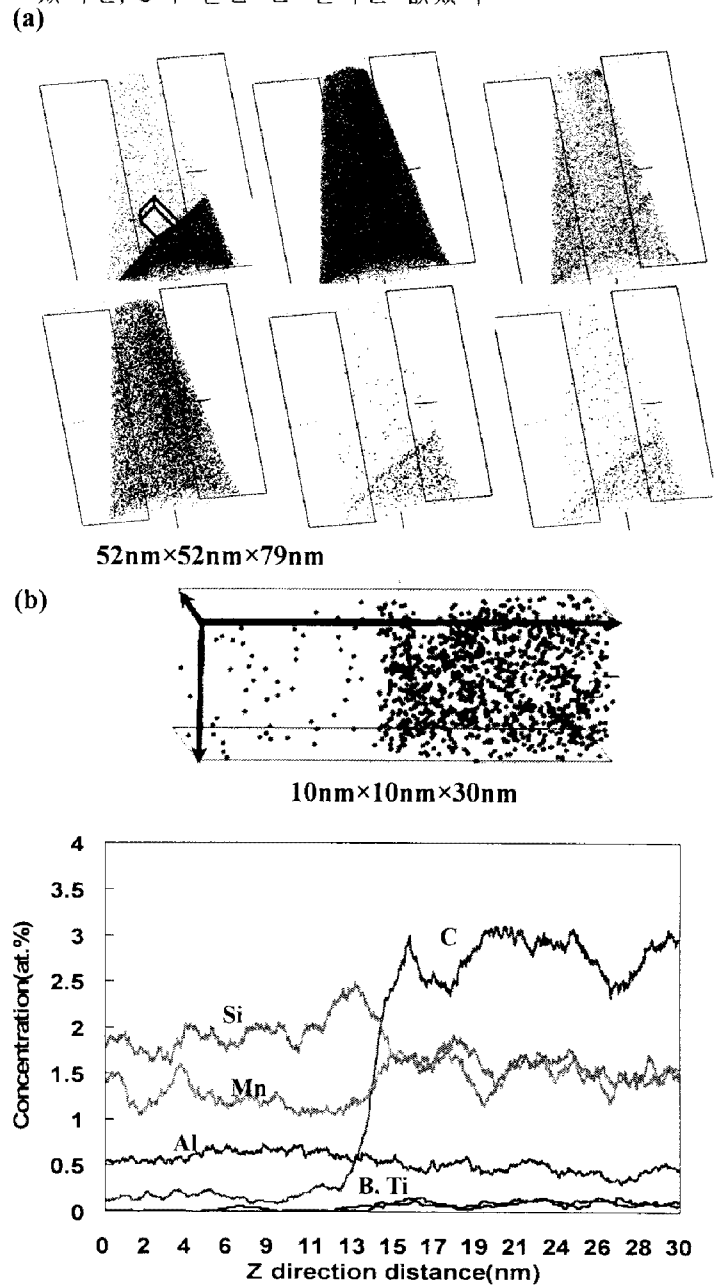


Fig. 4 Atom map C, Mn, Si in in the B-TRIP steel (a) and corresponding profile across the interface (b).

한편 표2 에서 보여지는 것과 같이 A-TRIP강과 B-TRIP강의 잔류 오스테나이트 영역의 C 함량을 비교해보면 약 0.6 wt.% 로 유사 하였다. 이 사실로부터 시편에 첨가된 탄소량이 잔류 오스테나이트의 탄소 함량에 크게 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다. 결국 두 TRIP 강에서 잔류 오스테나이트 내의 탄소함량이 유사하기 때문에 A-TRIP 강에 비해 B-TRIP강 에서 잔류오스테나이트의 분율이 늘어나게 된 것으로 예상할 수 있다.

**Table 2 Concentration of C, Mn, Si and Al in retained austenite measured by APT (mass %)**

	C	Mn	Si	Al
A-TRIP	~0.60	~1.76	~1.02	~0.02
B-TRIP	~0.61	~1.90	~1.06	~0.25

#### 4. 결 론

(1) TEM 을 이용한 미세 구조 분석 결과 A,B 두 시편 모두 TRIP 강에서 일반적으로 볼 수 있는 페라이트, 베이나이트, 잔류 오스테나이트로 구성되어 있었다. 잔류 오스테나이트의 형태는 granular, isolate, film 형태로 존재하였으나 대부분 granular 형태로 기지상의 입계에 위치 하고 있었다. B-TRIP 은 A-TRIP 에 비해 기지 상과 잔류 오스테나이트 모두에서 더 미세한 상의 크기를 보였으며, 더 복잡한 미세구조를 하고 있었다. 이는 B-TRIP 에 첨가된 미세 합금 원소와 함께 더 높은 C 함량에 기인한 것으로 보인다.

(2) Atom probe 를 이용하여 두 시편에서 잔류오스테나이트와 페라이트(또는 베이나이트) 상간 계면을 중심으로 탄소 원자의 분배 현상을 직접 확인 할 수 있었다. 또한 변태 유기 소성 강에서의 주요 원소인 C, Mn, Si, Al 의 양을 정량화 할 수 있었다. 한편 분석된 두 시편의 C 첨가량이 크게 차이가 남에도 불구하고, 잔류 오스테나이트에서의 탄소 고용량은 일정하였다. 이러한 결과는 B-TRIP 강 of 잔류 오스테나이트 분율이 높은 이유를 간접적으로 설명해 준다.

#### 후 기

본 연구가 진행되도록 연구비 지원과 분석을 지원해준 POSCO(주) 기술연구소와, 포항 나노 집적센터(NCNT)에 감사 드립니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] V. F. Zackay, E. R. Parker, D. Fahr, and R. Bush :Trans. ASM, 60 (1967), 252-259
- [2] De Mayer M, Vanderschueren D, De cooman BC. ISIJ Int, 1999;39(8) :813
- [3] Bai DQ, Di Chiro A, Yue S. Mater. Sci. Forum 1998;284-186:253