

C-Mn-Si계 변태유기소성강의 성형성에 미치는 베이나이트 변태온도 및 응력상태의 영향

전현조* · 오진후** · 박찬경*

Effects of Bainitic Transformation Temperature and Stress State on the Formability of C-Mn-Si TRIP Steels

H. J. Jun, J. H. Oh, and C. G. Park

Abstract

The effects of Transformation Induced Plasticity(TRIP) phenomena on the plastic deformation of 0.2C-1.5Si-1.5Mn multiphase steels have been investigated at various heat treatment and stress conditions. In order to estimate the formability, the hole expansion(HE) tests and the tensile tests were carried out. The formability evaluated from the uni-axial tensile tests was quite different from the formability measured from multi-axial HE-tests. Consequently, the formability in the multi-axial stress state decreased due to the extinction of the retained austenite relatively at earlier deformation stage and the production of irregular α' martensite. However, the defects of TRIP-steels were initiated exactly at the boundary between transformed martensite and ferrite matrix regardless of stress state. In addition, new experimental formula is proposed in order to predict the multi-axial formability of the TRIP steels from the results of uniaxial tensile test.

Key Words : TRIP Steels, Formability, Stress State, Retained Austenite, Martensite, Hole Expansion Test.

1. 서론

변태유기소성 현상은 복합 조직강 내에 포함된 잔류 오스테나이트가 기지상의 변형에 의해 발생하는 응력집중현상을 변태를 통해 완화시킴으로써 연신율과 강도를 동시에 향상시키는 현상으로, 이를 이용한 변태유기소성강(TRIP강)은 차세대 자동차용 경량 고강도 재료로 주목받고 있다⁽¹⁻³⁾.

TRIP강은 기존의 철강 재료보다 매우 뛰어난 물성과 경제성에도 불구하고 다축 응력 하에서의 소성 변형 특성(성형성)이 떨어져 실용화에 장애가 되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 TRIP현상을 나타내는 복합 조직강에 대한 연구가 진행되고 있으나^(5,8), 다축 응력 하에서의 변형 거동과 미세 조직 사이의 관계에 대한 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 C-Mn-Si계 복합 조직강의 소둔 온도

* 포항공과대학교 재료금속공학과

** LG EDS

및 베이나이트 변태 온도의 변화에 따른 단축, 다축 응력 하에서의 기계적 특성을 평가하고, 이를 미세 조직학적 측면에서 접근하여 응력상태에 따른 기계적 특성을 개선할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

2. 실험방법

본 실험에서는 0.2C-1.5Mn-1.5Si 복합 조직강(Table 1)에 대하여 소둔 온도와 베이나이트 변태 온도를 변화시켜 미세 조직을 변화시킨 후 응력상태에 따른 변형 거동을 관찰하기 위하여 인장시험 및 Hole-expansion 시험(HE-test)을 실시하였다. 열처리 조건은 Table 2에 나타내었다. 인장 시편은 두께 2.5mm의 열연재를 판상 시편으로 가공 후 열처리하였으며, 열처리 과정에서 생성된 산화막을 제거하기 위하여 18Vol % HCl 용액으로 산세 처리하였다. 다축응력 하에서의 변형 정도를 평가하기 위한 HE-test는 두께 2.5mm의 열연재를 120×120mm로 가공 후 연마하여 2mm까지 표e면 처리 후 중앙에 직경 18mm의 구멍을 뚫어 준비하였다. 2차상의 형상 및 분포는 주사전자현미경을 사용하였으며, 투과전자현미경의 명/암시아상 및 회절 도형을 이용하여 잔류 오스테나이트의 형상 및 분포를 확인하였다. 잔류 오스테나이트의 상분율을 정량 분석은 Cu-K_α를 이용하여 실시하였다⁽⁷⁾.

Table 1 Chemical compositions (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Al	Fe
0.2	1.5	1.5	0.015	0.006	0.03	bal.

Table 2 Heat treatment conditions

°C sec.	Annealing Temp.(T1)	Anecaling Time(t1)	Bainitic Trans. Temp.(T2)	Bainitic Trans. Time(t2)
T80-1	800	1200	325	200
T80-2			375	
T80-3			425	
T80-4			475	
T95-1	950	1200	325	200
T95-2			375	
T95-3			425	
T95-4			475	

3. 실험 결과

3.1 미세조직

오스테나이트-페라이트 이상 영역에서 소둔 후 베이

나이트 변태 처리한 T80-강의 경우 페라이트(F), 베이나이트(B), 잔류 오스테나이트(RA) 혼합상으로 이루어진 전형적인 TRIP강의 미세조직을 나타내었다(Fig. 1(a)). 또한 주사전자현미경을 이용한 분석 결과 베이나이트 변태온도의 증가에 따라 400°C를 전후해서 연속상이 베이 나이트와 잔류 오스테나이트로 이루어진 2차상에서 페라이트 기지상으로 변화함을 알 수 있었다. 잔류 오스테나이트의 형상을 확인하기 위하여 투과전자현미경으로 미세조직을 관찰한 결과 베이나이트내의 lath형과 페라이트 기지상 내의 고립형의 잔류 오스테나이트도 소량 존재하고 있었으나, granular형의 잔류 오스테나이트(RA)가 주로 존재함을 확인할 수 있었다(Fig. 2(a)).

한편, 오스테나이트 단상영역에서 소둔 후 베이나이트 변태 처리한 T95-강의 경우 베이나이트 페라이트(BF) 기지상 내에 필름형의 잔류 오스테나이트(RA)가 주로 분포하고 있었다(Fig. 1(b), 2(b)). 또한, 베이나이트 변태 온도가 증가함에 따라 결정립 크기도 증가되었다.

XRD를 통한 잔류 오스테나이트 정량 분석 결과 베이 나이트 변태 온도의 증가에 따라 400°C정도를 중심으로 증가 후 감소하는 것으로 나타났으며(Fig. 3(b)), 소둔 온도의 변화에 따른 영향은 크게 나타나지 않았다.



Fig. 1 SEM micrographs showing the morphology and distribution of secondary phases ; (a) 800/325°C (T80-3) and (b) 950/425°C (T95-3)

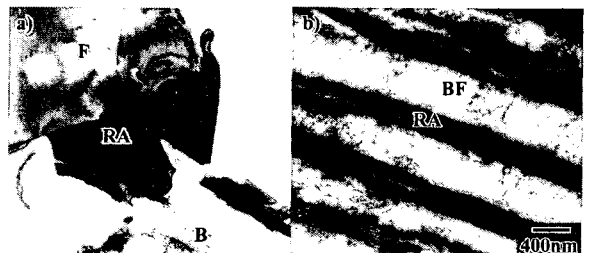


Fig. 2 TEM micrograph showing (a) Granular type retained austenite (T80-3) and (b) Film type retained austenite (T95-3)

3.2 인장특성

Fig. 3에 각 조건에 따른 인장 특성을 나타내었다. Granular형의 잔류 오스테나이트를 주로 포함하고 있는 T80강은 20~36%수준의 비교적 높은 연신율과 800MPa 수준의 우수한 인장 강도를 나타내었다. 베이나이트 변태 온도 400°C 이상에서는 급격한 연신율의 증가와 인장 강도의 감소가 나타나는데, 이는 400°C 이하에서 상대적으로 강한 2차상이 연속상을 이루는 반면, 400°C 이상에서는 페라이트 기지상이 연속상을 이루기 때문으로 판단된다. 항복 강도는 400MPa 이하로 열처리 이전의 650MPa에 비하여 200MPa 이상 감소하였다.

Film형의 오스테나이트가 2차상을 형성하고 있는 T95강은 10~20% 정도의 비교적 낮은 연신율을 나타냈지만 T95-1, 2의 경우 1100MPa 수준의 매우 뛰어난 인장강도를 나타내었다. T95강의 경우 항복강도가 비열처리와 비슷한 수준으로 상당히 높게 나타났으며 이는 베이나이트 페라이트와 잔류 오스테나이트로 구성된 미세한 침상조직에 의한 것으로 판단된다.

강도-연성의 조합으로 표현되는 성형성은 T80강의 경우 비열처리재에 비해 상당히 향상된 반면, T95강의 경우 베이나이트 변태 온도의 증가에 따라 점차 향상되기는 하지만 비열처리재와 비슷한 수준으로 나타났다(Fig. 3 (b)).

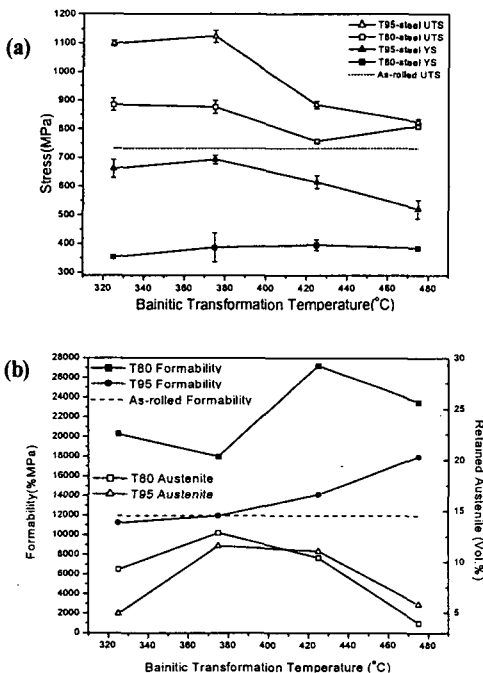


Fig. 3 (a) Tensile properties and (b) formability and volume fraction of retained austenite

3.3 Hole expansion ratio(HE-ratio)

재료의 성형성을 나타내는 다축응력 하에서의 변형 거동을 관찰하기 위해 본 실험에서는 HE-test를 실시하였다. Fig. 4와 같이 전반적으로 T80강이 T95강보다 우수한 성형성을 나타내었으며, 두 시편 모두 425°C에서 베이나이트 변태 처리한 경우 최고의 성형성을 나타내었다. Fig. 3 (b)에 보인 인장 시험 결과를 바탕으로 평가된 성형성과 비교하면, 베이나이트 변태 온도의 변화에 따른 단축응력과 다축응력 사이의 성형성의 변화는 일치하지 않았다. 한편, 비열처리재를 기준으로 보면 다축응력 하에서의 성형성이 상당히 감소함을 알 수 있었다.

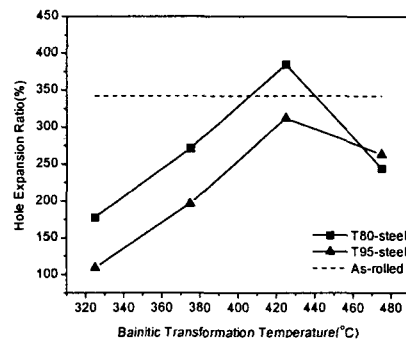


Fig. 4 HE-ratio as a function of bainitic transformation temperature

4. 고찰

4.1 응력상태가 변형에 미치는 영향

단축 인장 시험을 통해 예측된 TRIP강의 성형성은 비열처리재에 비하여 우수할 것으로 예상되었으나 (Fig. 3(b)), 실성형성을 측정하기 위하여 실시한 HE-test결과는 비열처리와 비슷한 수준이거나 오히려 열화 된 것으로 나타났다(Fig. 4). 이와 같이 단축(인장 시험)과 다축 (HE-test) 응력상태에서 나타나는 성형성 차이의 원인을 규명하기 위하여 시험 후 발생한 결함 부위를 주사전자 현미경을 이용하여 관찰하였다. 단축응력 하에서의 결함 조직은 Fig. 5(a), (b)에, 다축응력 하에서의 결함 조직은 Fig. 5(c), (d)에 나타내었다.

각 조직에 나타난 결함은 주로 2차상과 기지상인 페라이트(F) 사이의 계면에 형성되어 있었다. 결함의 원인이 되는 2차상은 투과전자현미경을 통한 분석 결과 잔류 오스테나이트가 변태하여 형성된 마르텐사이트(TM)로 밝혀졌다(Fig. 6). 즉, 잔류 오스테나이트는 TRIP효과를 통하여 기계적 특성 향상에 기여하나, 변태하여 생성된 마르텐사이트는 기지상과의 강도 차이에 의해 결함 생성의 원인이 되는 것이다^(4,5).

단축, 다축에 따른 결합 부위는 큰 차이가 없으며, 이는 응력상태와 파괴 거동에는 직접적인 상관 관계가 없다는 것을 보여준다. 단축과 다축응력 하에서의 복합 조직강의 변태 특성의 차이를 이해하기 위해서는 먼저 복합 조직강 내에서의 잔류오스테나이트의 변태 기구를 이해할 필요가 있다. 복합 조직강의 경우 페라이트 기지상의 변형에 의해 잔류 오스테나이트 주변에 전위가 집적되며, 이에 의해 발생하는 변형 에너지가 잔류 오스테나이트 내부의 결합에 작용하여 마르텐사이트 변태를 유발한다. 내부에 결합이 존재하지 않는 잔류 오스테나이트는 페라이트의 변형에 의해 주위에 집적된 전위에 의해 발생한 오스테나이트 쌍정을 거쳐 마르텐사이트로 변태하게 된다²⁾. 각 조직이 실제로 받는 응력상태는 거시적인 응력상태와는 일치하지 않으나, 각 결정립에 작용하는 응력의 합이 외부 응력과 같으므로 단축응력과 다축응력 조건하에서 미시적으로 작용하는 응력에도 차이가 있다. 따라서, 잔류 오스테나이트가 다축 응력 하에서 받는 응력은 단축 응력 하에서 받는 응력보다 복잡한 상태가 된다. 이처럼 복잡한 응력 상태는 내부 변형에너지를 증가시켜 상대적으로 낮은 변형률에서 변태가 시작되는 것으로 사료된다. 그 결과로 형성된 마르텐사이트는 결합 조직으로 작용하여 파괴를 일으킴으로써 단축응력 하에서 예측된 성형성에 미치지 못하는 낮은 성형성을 나타내는 것으로 판단된다.

또한, Rao 등은 2상 조직강의 잔류 오스테나이트의 결정립 크기에 따른 가공 유기 마르텐사이트 변태 거동에 관한 연구 결과, 잔류 오스테나이트의 결정립 크기가 작을수록 체적대 표면적 비 및 낮은 M_s 온도(마르텐사이트 변태 상한선)에 의해 변태가 지연된다고 보고하였다. 즉, 잔류 오스테나이트의 크기가 작을수록 변태의 핵생성처로 작용할 수 있는 적층 결합 등의 결합을 적게 함유하고 있기 때문에 가공유기 변태가 지연되거나 파괴시까지 변태하지 않고 남아있게 된다⁶⁾. 이러한 변태 거동의 차이는 단축 응력과 다축 응력 하에서 관찰한 회절 도형의 분석을 통해서 설명할 수 있다. 단축 응력 하에서 파괴된 시편의 경우 오스테나이트에 의한 회절점은 나타나지 않고 마르텐사이트에 의한 회절도형만 나타나는 반면(Fig. 6(a)), 다축 응력 하에서 파괴된 시편의 경우 뚜렷한 오스테나이트 회절도형이 마르텐사이트 회절도형과 함께 관찰되었다(Fig. 6(b)). 이렇게 다축응력 하에서 초기에 빨리 생성된 마르텐사이트는 잔류 오스테나이트의 결정립 크기를 감소시켜 변태가 가능한 잔류 오스테나이트를 낮은 변형률 하에서 소멸시켜 TRIP 현상이 조기에 종료되는 것으로 사료된다.

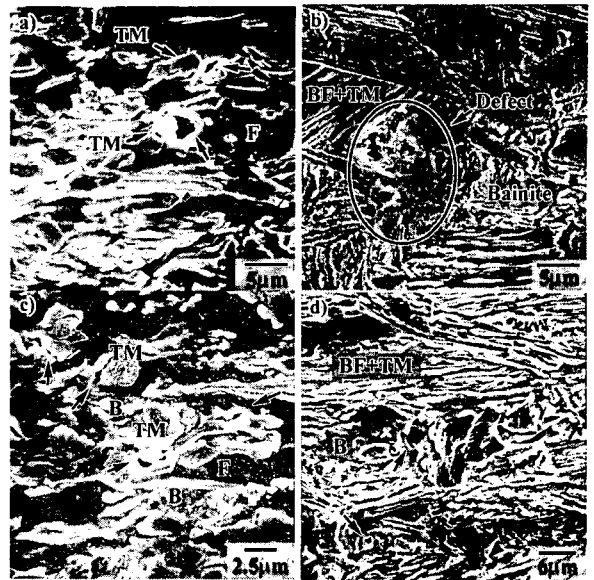


Fig. 5 Deformed microstructure showing the formation of void between transformed martensite and ferrite matrix;(a) T80-3, (b) T95-3(tensile test), (c) T80-3 and (d) T95-3(HE-test)

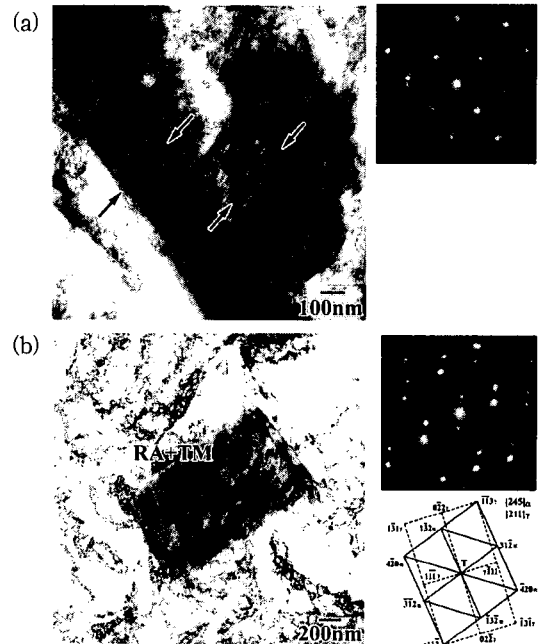


Fig. 6 TEM micrographs showing the formation of transformed martensite after (a) tensile test and (b) HE-test deformation of T80-3

4.2 인장시험 결과를 통한 실성형성의 예측

Fig. 3, 4 에서 알 수 있는 바와 같이 인장 시험을 통해 예측한 성형성과 HE-test를 통해 확인한 성형성은

일치하지 않았다. 따라서, TRIP강의 경우 인장 특성을 통해 실성형성을 예측하기 위해서는 기존의 (연신율)×(인장 강도)로 표현되는 성형성 기준을 직접 적용할 수 없으므로 새로운 함수를 도입할 필요가 있다고 사료된다.

TRIP현상에 영향을 주는 인자로는 잔류 오스테나이트의 부피분율과 안정도가 가장 중요하다고 알려져 있다. 따라서, 먼저 다음과 같은 식을 제안 할 수 있다.

$$Form^{TRIP} = Form_U \times f(Vol. \% RA) \times f(Stability)$$

- $Form^{TRIP}$ = formability of TRIP steel
- $Form_U$ = Uni-axial formability
- $f(Vol. \% RA)$ = Vol. % Retained austenite
- $f(Stability)$ = Term of stability

이 때, 잔류 오스테나이트의 안정도는 탄소고용도와 결정립 크기에 의해 결정된다고 알려져 있으나, 두 가지 모두 다양한 분포를 보이고 있어 일반적으로 실험식을 통해 안정도를 평가하고 있다^(1,2).

본 연구에서는 기존의 성형성을 나타내는 함수에 일차적으로 잔류 오스테나이트의 부피분율만을 도입하여 다음과 같은 실험식을 고려하여 보았다.

$$Form^{TRIP} = C \times Form_U \times f(Vol. \% RA)^n$$

$C = Constant$

위의 식을 0.1~2.0사이의 n값에 대하여 시험하여 본 결과 n=1일 때 실성형성과 가장 유사한 경향성이 나타났다. 잔류 오스테나이트의 안정도 함수는 이번 연구 범위에서 벗어나기 때문에 적용하지 않았다. 위의 실험식에 잔류 오스테나이트의 안정도 함수가 추가되고, 다양한 조건에서의 실험을 통해 C, n에 대한 기준이 확립된다면 인장시험을 통한 TRIP 강도의 실성형성 예측에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결론

TRIP강의 열처리 조건에 따른 인장 특성과 미세 조직의 변화를 관찰하고, HE-test를 통한 성형성 평가를 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) TRIP강의 실성형성 분석을 위한 HE-test결과 80 0℃에서 20분간 소둔한 후 425℃에서 200초간 베이나이트 변태 처리한 T80-3 강에서 가장 좋은 특성이 나타났다.

(2) TRIP강의 변형시 나타나는 결함은 응력 상태와 관계없이 변태 생성 마르텐사이트와 기지상간의 입계로부터 발생했다. 이를 통하여 다축 응력 하에서의 변태가 단축 응력 하에서 보다 조기에 종료됨을 알 수 있었으며, 이는 복잡한 응력 상태에 의한 내부 변형에너지의 증가 및 불규칙한 마르텐사이트 생성에 의한 것으로 사료된다.

(3) 단축 인장 특성을 통해 TRIP강의 실성형성을 예측하기 위하여 다축 응력 하에서의 잔류 오스테나이트의 거동을 고려한 다음과 같은 실험식을 제안한다.

$$Form^{TRIP} = Form_U \times C \times (Vol. \% RA)^n$$

$n = 1$
 $C = constant$

참고 문헌

- (1) H.J.Koh : Ph.D. Thesis, POSTECH (1998).
- (2) J.H.Jung : Ph.D. Thesis, POSTECH (1993).
- (3) V. F. Zackay, E. R. Parker, D. Fahr, and R. Bush: Trans. ASM, 60 (1967) pp. 252~259.
- (4) Kohichi Sugimoto, Mitsuyuki Kobayashi, Akihiko Nagasaka and Shun-ichi Hashimoto: ISIJ Inter, 35 (1995) pp. 1407~1414.
- (5) Kohichi Sugimoto, Mitsuyuki Kobayashi, Kazuya Inoue, Xiaodong Sun and Tetsuya Soshiroda: Testu-to-Hagane, 84 (1998) pp. 559~565.
- (6) B. V. N. Rao and M. S. R. Rashid : Metallography, 16 (1983) pp. 19~37.
- (7) S. K. Kim, H. C. Shin, J. H. Chung and Y. W. Chang : J. Kor, Inst. Met. & Mater., 36 (1998) p. 151
- (8) Chester F. Jatzak, John A. Larson, and Steve W. Shin: Retained Austenite and Its Measurements by X-Ray Diffraction, Society of Automotive Engineers, Inc., New York(1980) p. 45.