

TRIP형 복합조직강의 미세조직 및 인장성질에 미치는 화학조성의 영향

이기열* · 장우양 · 강조원

조선대학교 공과대학 신금속소재공학과

*남부대학교 자동차기계공학부

Effect of Chemical Composition on the Microstructure and Tensile Property in TRIP-assisted Multiphase Steels

K. Y. Lee*, W. Y. Jang and J. W. Kang

Dept. of Metallurgical Eng., Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

*Division of Automotive and Mechanical Eng., Nambu University, Gwangju 506-824, Korea

ABSTRACT The effect of chemical composition on the microstructural change and tensile property in TRIP-assisted steels with different chemical composition was investigated by using SEM, TEM, XRD and UTM. As a result of microscopic observation, the morphology of retained austenite could be identified as two types; a granular type in a steel containing higher Si and a film type in a steel having higher C. For the case of higher C-containing steel with a tensile strength of 860 MPa and a total elongation of 38%, film-typed retained austenite could be observed between lath bainitic ferrite. Actually, metastable retained austenite was a requisite for the good formability, which means that chemical composition plays a significant role in the microstructure and tensile property of TRIP-assisted steels. With respect to tensile property, the steels containing suitable Si and Mn, respectively, showed a typical TRIP effect in stress-strain curve, while a steel containing higher Mn content exhibited the similar behavior shown in dual phase steel.

(Received March 12, 2003)

Key words: TRIP-assisted steel, Microstructural change, Tensile property, Chemical composition, Metastable retained austenite

1. 서 론

TRIP형 복합상 강은 Fe-Mn-Si계를 기본성분으로 하여 이상조직강 제조시 이용되는 이상영역열처리(Inter-critical annealing)에 배이나이트변태 온도구간에서의 항온변태처리(Isothermal treatment)를 접목 시킴으로써 얻어진다[1-3]. 항온변태처리 후 공냉시 상온에서 3개의 상($\alpha + B + \gamma_R$)으로 이루어지는 복합조직을 나타내는 TRIP형 복합상 강에서의 강도와 연신율의 조화는 이 복합조직강을 자동차 산업에 적용되는 고장력강의 범주 가운데 높은 반열로 올려다 주고 고인성 충격흡수강재로서의 응용을 가능하게 한다[4,5]. TRIP형 복합상강에서 잔류 오스테나이트는 향후 인장변형시 마르텐사이트로 변태되어 변태유기소성(TRIP)에 크게 기여하기 때문에 적절한 잔류

오스테나이트의 체적분율 및 안정도와 관련하여 많은 연구가 요구되고 있으며 잔류 오스테나이트의 형태(Morphology) 역시 고려의 대상이 된다.

기존의 TRIP형 강에 관한 많은 연구 결과들을 검토해 보면 강재의 상변태 및 기계적 성질에 미치는 열처리 조건 및 잔류 오스테나이트의 특성에 대하여 많이 언급되어 온 것이 사실이다[1-5]. 반면, TRIP 효과를 유발하는데 있어서 합금설계시 강재의 기계적 성질에 영향을 미치는 화학조성에 관해서는 그 수가 많지는 않다. 이에 합금조성이 TRIP 효과를 유발하는데 있어 중요변수로 작용한다는 전제하에 화학조성을 달리하여 열처리함으로써 각 합금원소가 강재의 기계적 성질에 어떠한 영향을 미치는가에 대한 체계적인 연구검토가 필요한 것이 사실이다.

본 연구에서는 화학조성을 달리하는 세 종류의

TRIP형 강에 대해 이상영역 열처리후 항온변태처리를 실시할 때에 C, Si 및 Mn이 강재의 미세조직 및 인장성질에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 특히, 화학조성을 각기 달리하는 세 종류의 강재에 대하여 잔류 오스테나이트가 어떠한 형상을 갖는가를 미세조직 사진을 통해 조사하였으며, 항온변태처리후 잔류 오스테나이트의 체적분율을 비교·분석하였다. 아울러 인장변형후 응력-변형을 곡선상의 변화를 강재의 화학조성(특히 C, Si 및 Mn)과 관련하여 고찰하였다.

2. 실험 방법

Fe-Mn-Si-C계를 기본성분으로 하여 C, Si 및 Mn의 화학조성을 각기 달리한 세 종류의 TRIP형 강재를 설계하여 고주파 진공유도로에서 합금을 용해하였으며 강재의 화학조성은 Table 1과 같다. SS강의 경우 저탄소 TRIP형 강의 전형적인 화학조성의 하나인 Fe-0.12%C-1.37%Si-1.93%Mn조성을 갖도록 설계하였으며 이에 비해 HC강은 C의 함량을 0.27%로 증가시켰으며, LS강은 Si의 함량을 0.86%로 감소시켜 합금을 제조하였다.

합금 잉곳은 1,250°C에서 24시간 유지하여 균질화 처리하였으며 균질화처리후 마무리 온도를 900°C로 유지하면서 열간압연을 실시하여 최종 두께 1.5 mm

Table 1. Chemical composition of steels used in this study (wt.%)

	C	Si	Mn	Fe
SS	0.15	1.37	1.93	bal.
HC	0.27	1.38	1.88	bal.
LS	0.16	0.86	1.82	bal.

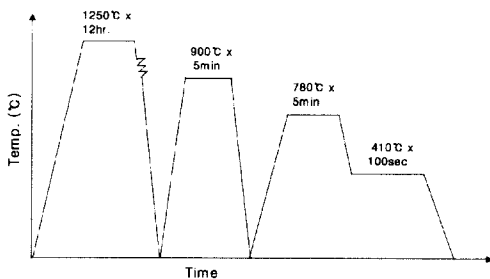


Fig. 1. Schematic diagram showing heat treatment in TRIP-assisted steel.

인 열연판재를 제조하였다. 이단계 열처리공정으로서 780°C에서 5분간 이상영역 열처리를 하였으며 항온 변태처리는 410°C의 염욕(NaCl:KCl=1:1)에서 100초동안 유지한 후 공냉하였다. 이단계 열처리 공정은 Fig. 1과 같다.

항온변태처리후 오스테나이트 형태를 비교하기 위하여 미세조직을 관찰하였으며 투과전자현미경(Jeol; 2000 FX-II) 관찰용 시편은 상온의 CH₃COOH + HClO₄ 혼합용액에서 21 V 및 0.25 mA의 조건으로 젯트 연마하여 천공하였고 주사전자현미경 관찰용 시편은 2% 나이탈(nital)로 에칭하였다.

화학조성에 따른 잔류 오스테나이트의 체적분율을 비교하기 위하여 X선 회절시험을 하였다. X선 회절시험은 CuK_α 특성 X-선을 이용하여 2°/min 주사 속도로 2θ=60°~90°범위에서 실시하였다. 이단계 열처리후 화학조성에 따른 인장특성을 비교하기 위하여 상온에서 1 mm/min.의 변형속도로 인장시험을 실시하였다. 인장시편은 표점거리가 40 mm인 판재 형상으로 제작하였고 이 때 인장축의 방향은 압연방향과 일치하도록 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 잔류 오스테나이트의 체적분율 및 형상

Fig. 2는 이상영역열처리 및 항온변태처리한 SS, HC 및 LS강의 주사전자현미경 사진을 각각 나타낸다. 전체적으로 페라이트 기지에 제 2 상 즉 오스테나이트 및 베이나이트 조직을 갖는 복합조직을 나타내고 있으나 화학조성에 따라 이들의 형태 및 체적분율은 다르게 나타났다. 즉 SS강의 경우 페라이트 입계 삼중점에 주로 입상의 오스테나이트가 관찰되었으나 HC 및 LS강의 경우에는 제 2 상의 체적분율은 증가하였으며 오스테나이트 이외에 항온열처리에 의해 오스테나이트로부터 변태한 베이나이트 역시 관찰되었다.

한편 Fig. 3은 Fig. 2와 같은 미세조직을 갖는 SS, HC 및 LS강의 X선 회절시험결과를 나타낸 것으로서 세 강재에서 모두 페라이트 피크이외에 오스테나이트 피크가 관찰되었다. Fig. 4는 X선 회절 시험 및 화학분석을 통하여 구한 SS, HC 및 LS강에서의 제 2상의 체적분율 즉 베이나이트 및 잔류

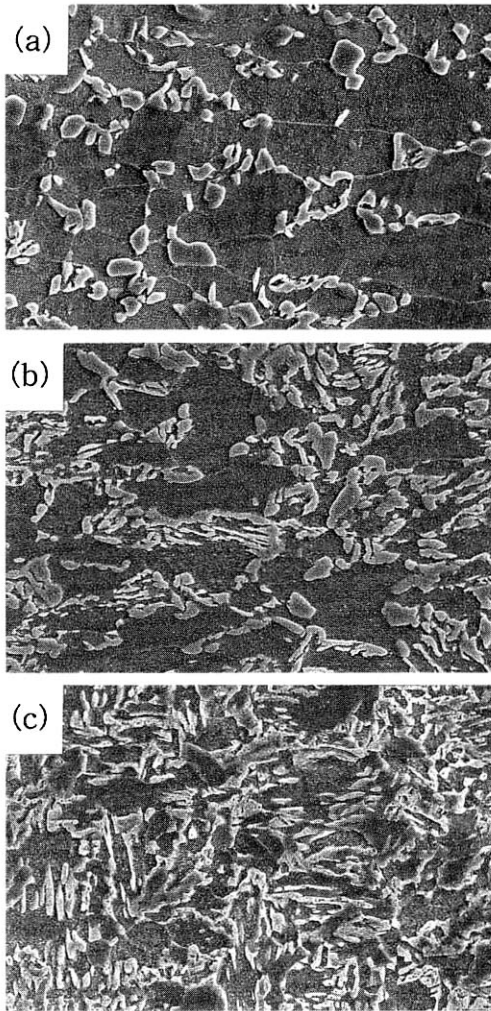


Fig. 2. SEM micrographs showing the microstructure of the secondary phase; (a) SS, (b) HC and (c) LS steels.

오스테나이트의 체적분율을 각각 나타낸다. 전체적으로 SS, HC 및 LS 강에서의 제 2상의 체적분율은 각각 34, 38 및 44%로 측정되었다. 이 중 SS 강의 경우 잔류 오스테나이트의 체적분율은 3.6%이었으나 HC 강의 체적분율은 7.2%로서 SS 강보다 상대적으로 많은 양의 오스테나이트가 잔류하였으며 이는 HC 강의 높은 C 함량에 의해 오스테나이트가 안정화되었기 때문이다.

반면에, Mn에 비해 Si의 함량을 적게 첨가한 LS 강의 경우에는 SS 및 HC와 비교시 잔류 오스테나이트의 체적분율은 보다 높게 나타났다. 이와 같이 LS 강에 있어서 잔류 오스테나이트의 체적분율이 크

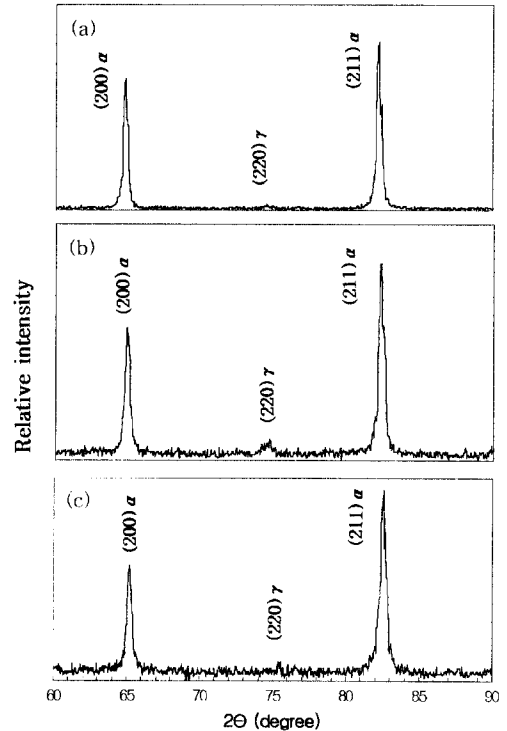


Fig. 3. X-ray diffraction profiles of (a) SS (b) HC and (c) LS steels.

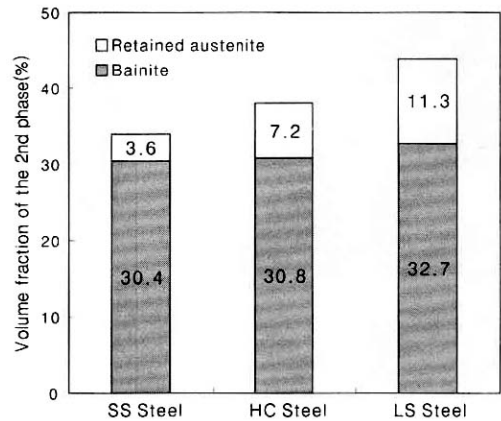


Fig. 4. The change of the volume fraction of the 2nd phase in SS, HC and LS steels.

게 나타난 이유는 이상 영역어닐링시 Mn의 첨가효과에 기인하여 초기 오스테나이트의 체적분율이 증가하였기 때문이다[6]. 즉 Mn은 오스테나이트 확장원소로서 이상 영역열처리시 Mn은 초기 오스테나이트에 주로 고용되기 때문에 상대적으로 Mn함량이 높

은 LS 강이 전반적으로 높은 수준의 잔류 오스테나이트 체적분율을 나타낼 수 있었다.

Fig. 5는 SS, HC 및 LS 강의 항온변태처리후 잔류 오스테나이트의 형상을 관찰한 투과전자현미경 사진을 나타낸다. Fig. 5(a)는 SS 강의 미세조직으로서 기지 페라이트상에서 베이니트와 인접하여 다양하게 존재하는 granular type의 잔류 오스테나이트 형상을 보여준다. 미세조직 관찰상 잔류 오스테나이트

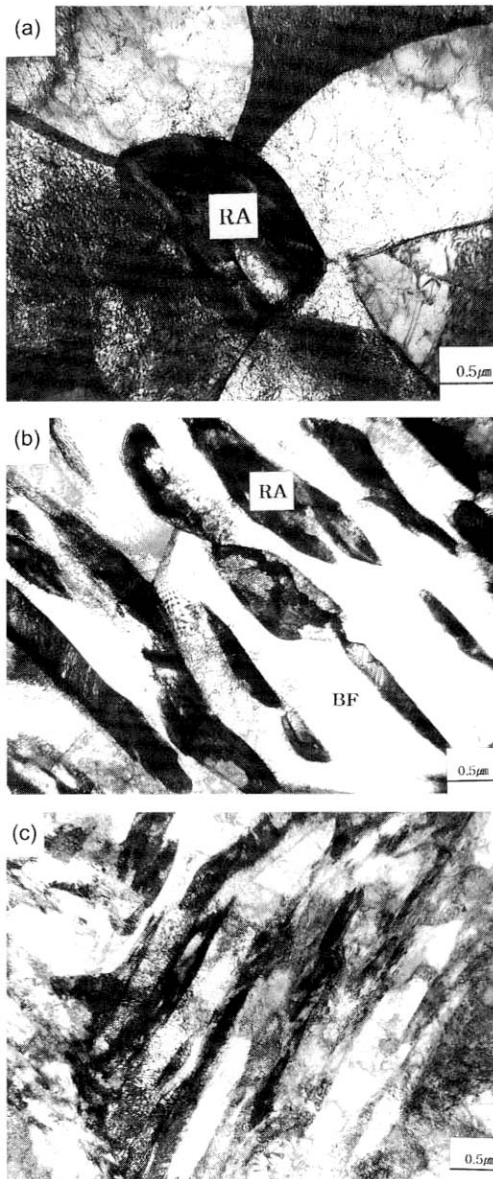


Fig. 5. TEM micrographs showing morphology of retained austenite; (a) SS (b) HC and (c) LS steels.

가 기지 페라이트의 다중점에 주로 위치하면서 베이니트(미세한 실선 모양)와 주로 인접하여 존재하고 있음을 관찰할 수 있다.

Fig. 5(b)는 HC 강에서 다양한 film type의 잔류오스테나이트가 기지 페라이트에서 래스상의 베이니트 페라이트와 인접하여 존재하고 있는 미세조직을 보여 준다. HC 강의 경우 탄화물이 석출되지 않은 베이니트 페라이트가 종종 관측이 되었고 film type의 잔류 오스테나이트가 베이니트 페라이트와 인접하여 존재하고 있음을 알 수가 있었다. 여기서 베이니트 페라이트는 베이니트가 페라이트와 탄화물로 이루어져 있는 혼합물이라고 고려할 때 Si에 의해 탄화물이 석출되지 않은 페라이트상을 의미한다[2,7,8]. Si는 베이니트 변태처리시 초석 페라이트 중의 과포화 탄소를 주변에 있는 잔류 오스테나이트로 확산 이동시키는 역할을 하게 된다[9]. 이 과정에서 Si는 잔류 오스테나이트에서의 탄화물 석출을 억제하며 탄소농도를 증가시켜 잔류 오스테나이트의 안정화에 크게 기여를 한다. 그 결과 적절한 탄소농도를 갖는 잔류 오스테나이트가 상온에서 형성되며 베이니트와 인접하여 존재하는 미세조직을 나타낸다[9]. 한편 Mn과 비교시 Si의 함량을 적게 첨가한 LS 강의 경우에는 Fig. 5(c)에서 보는 바와 같이 잔류 오스테나이트의 형태와 관련하여 독특한 형상을 보여주었으며 SS 및 HC 강과는 다르게 granular type와 film type의 중간 정도의 미세조직을 나타냈다.

3.2. 인장성질의 비교

Fig. 6은 화학조성에 따라 Fig. 5와 같이 상이한

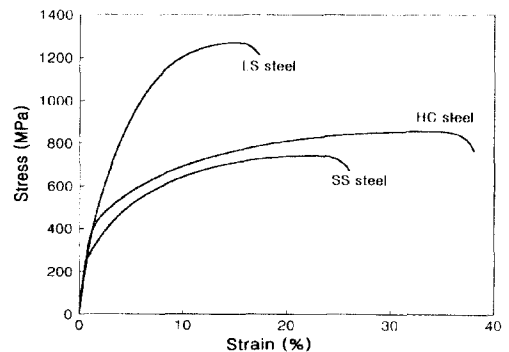


Fig. 6. Stress-strain curves of SS, HC and LS steels.

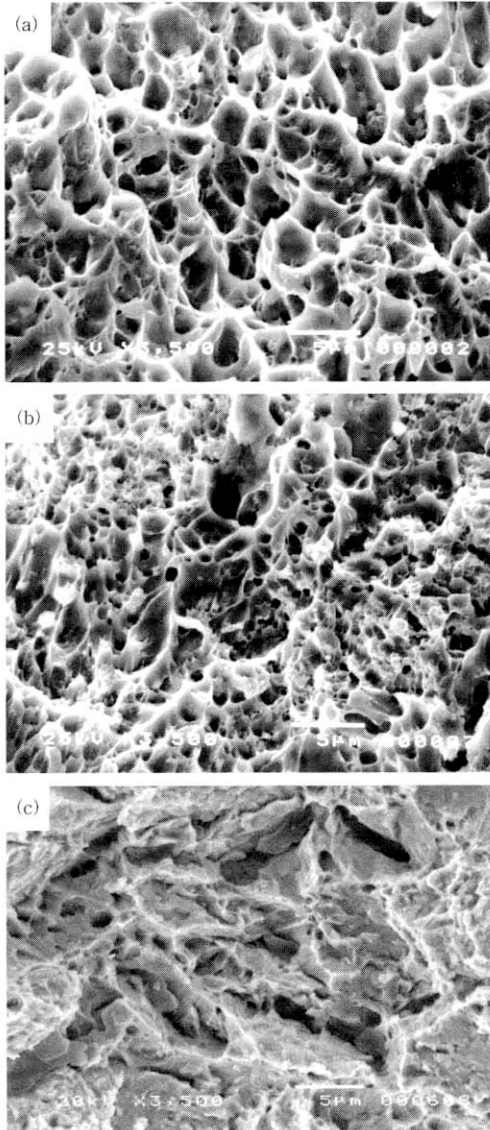


Fig. 7. Fractography showing the fractured surface after tensile testing; (a) SS, (b) HC and (c) LS steels.

미세조직을 갖는 SS, HC 및 LS 강 of 인장변형에 따른 응력-변형률 곡선을 나타낸다. Si와 Mn의 함량을 비슷하게 첨가한 SS 및 HC 강 of 경우 전형적인 TRIP효과를 나타냈으며 특히 C의 함량이 높은 HC 강 of 경우에는 860 MPa의 높은 인장강도와 38%의 우수한 연신율을 보여 주었다.

LS 강 of 경우에는 항복강도가 낮고 인장강도가 높아 낮은 항복비(yield ratio)를 나타내어 (페라이트+마르텐사이트)로 구성된 이상조직강의 전형적인 특

질을 보이고 있다. LS 강 of 경우, 상온에서 안정도가 낮은 잔류 오스테나이트가 생성되어 인장변형시 저조한 TRIP효과를 나타낸 것으로 판단된다. 한편, Si와 Mn의 함량을 비슷하게 하고 적절한 안정도의 잔류 오스테나이트를 함유한 강재(SS 및 HC)는 인장변형 곡선상에서 전반적으로 연신율의 상승효과를 보여 주었다.

여기서 주목할 만한 점은 SS 및 HC 강 공히 인장변형시 전반적인 TRIP효과를 보여주었으며, HC강재의 경우에는 아주 우수한 기계적 성질을 보여 주었다는 점이다. 화학조성과 관련하여 SS 강과 HC 강 of 차이점은 Si와 Mn의 함량을 비슷하게 유지하고 C의 함량만 변화시켰다는 점에서 C가 강재의 인장강도와 연신율의 향상에 우선적으로 기여를 하였다는 것을 알 수가 있다[7,8].

P. Jacques 등[6]에 의하면 TRIP형 복합강의 미세조직 및 인장성질은 잔류 오스테나이트의 양 뿐만 아니라 잔류 오스테나이트 내의 탄소농도, 즉 잔류 오스테나이트의 안정도에 의해서도 강하게 영향을 받고 있는 것으로 알려져 있다. HC 강과 같이 높은 탄소농도를 함유하는 잔류 오스테나이트는 베이나이트 변태처리후 공냉시 마르텐사이트로 변태하지 않고 그대로 준안정상태로 상온에서 존재한다. 이는 잔류 오스테나이트의 마르텐사이트 변태개시온도가 상온보다 낮다는 것을 시사하는바, 잔류 오스테나이트가 베이나이트 변태시 마르텐사이트로 변태하지 않고 준안정(metastable) 상태로 상온에서 존재할 수 있는 배경을 제시해준다.

3.3. 파단 후의 미세조직

SS, HC 및 LS 강 of 파단 후의 판단면을 주사전 자현미경으로 관찰하였으며 그 결과는 Fig. 7과 같다. Fig. 7(a)는 연성과파괴를 보여준 LS 강 of 파단 조직을 나타낸 것으로서 여러 곳에서 dimple이 관찰되며 dimple의 생성과 성장과정을 통해서 파괴가 일어났다고 하는 것을 알 수가 있었다. Fig. 7(b)는 HC 강 of 파단 조직으로서 SS 강에 비해 더욱 미세한 dimple들이 관찰되었으며 이는 HC 강 of 높은 연신율에 기여하는 것으로 판단된다. 한편 Fig 7(c)는 LS 강 of 파단 조직으로서 미세한 dimple이외에 일부 벽개 파단면이 관찰되었다.

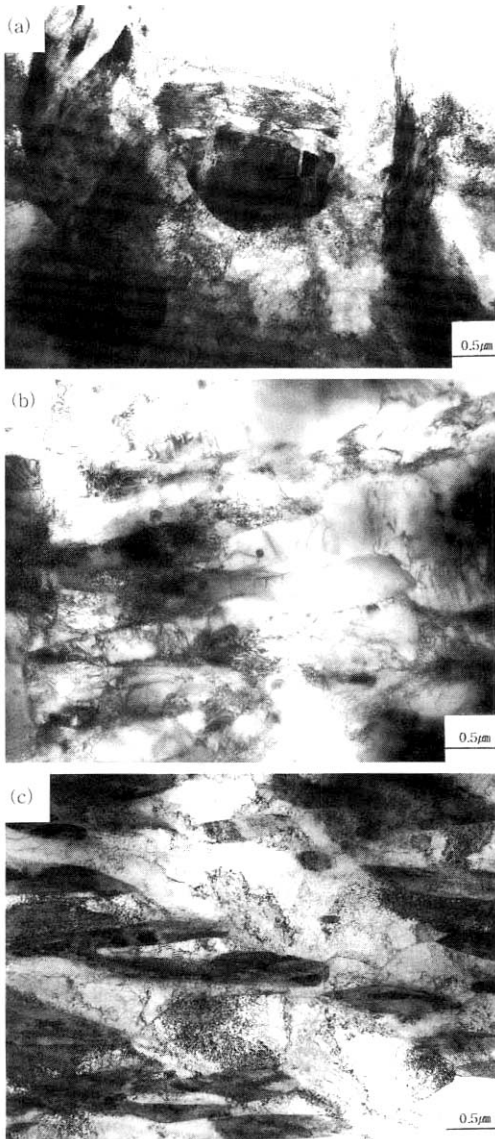


Fig. 8. TEM image showing the microstructural change after tensile testing; (a) SS, (b) HC and (c) LS steels.

Fig. 8은 SS, HC 및 LS 강의 인장변형 후의 미세조직을 보여주는 투과전자현미경사진이다. 인장변형 후의 미세조직은 Fig. 5의 미세조직과는 대조적으로 기지 페라이트가 소성변형을 받아 많은 전위가 축적되어 분포하는 복합조직을 보여준다. Fig. 8(a)는 인장변형전 granular type의 잔류 오스테나이트 형상을 보여준 SS 강에 대해 인장변형 후의 미세조직을 보여준다. 이 조직사진은 소성변형중 전단응력이 가

해질 경우 변형이 개시되어 기지 페라이트상에서 많은 slip trace를 남기며 축적된 전위를 보여주고 있으며 잔류 오스테나이트가 변형을 받아 변형쌍정이 생긴 흔적을 보여주고 있다. Fig. 8(b) 및 (c)는 높은 강도와 우수한 연신율을 보여준 HC 강 및 LS 강의 인장변형 후의 미세조직을 나타낸 것으로서 film type의 잔류 오스테나이트가 소성변형을 받아 변형쌍정이 생긴 흔적을 역시 보여주고 있다. 이 경우 변형쌍정과 더불어 잔류 오스테나이트로부터 변태된 마르텐사이트가 상당량 존재하는 것으로 관찰되었으며, 아울러 매우 높은 안정도를 보이는 잔류 오스테나이트의 경우에는 변태되지 않은 상태로 미세조직상에 존재하는 것으로 판단이 된다. 아울러 film type의 잔류 오스테나이트와 인접하는 베이니틱 페라이트 역시 계속되는 인장변형을 통하여 전위가 축적되어 변형 전과는 매우 상이한 미세조직을 나타냈다.

4. 결 론

화학조성을 달리하는 세 종류의 TRIP형 강의 미세조직 및 인장성질에 미치는 C, Mn 및 Si의 영향에 대하여 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 잔류 오스테나이트 체적분율과 관련, SS 및 HC 강의 경우 900°C에서 어닐링처리 후 이단 열처리를 하였을 때 HC 강의 SS 강보다 높은 수치를 보여 주었다. 반면, LS 강의 경우 잔류 오스테나이트 체적분율은 보다 높게 나타났다.

2) SS 강은 granular type의 잔류오스테나이트 형상을 보여 주었으며, HC 강의 경우 film type의 잔류 오스테나이트가 래스 베이니틱 페라이트와 인접하여 존재하였다.

3) Si와 Mn의 함량을 적절하게 첨가한 HC 강의 경우 860 MPa의 높은 인장강도와 38%의 연신율을 보여 주었고, 상대적으로 Si를 적게 함유한 LS 강의 경우에는 높은 인장강도와 상대적으로 낮은 연신율을 보이며 이상조직강과 비슷한 거동을 보여 주었다.

4) SS, HC 및 LS 강의 파단조직을 관찰시 딤플 조직이 많이 관찰되는 바, 대부분 연성파괴라고 하는 것을 알 수가 있었다. 상기 강재들의 파단조직 관찰시 여러 곳에서 void가 관찰되었고, void의 생성과 성장과정을 통해서 파괴가 일어났다.

후 기

본 연구는 2001학년도 조선대학교 교내연구비에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. V. F. Zackay, E. R. Parker, D. Fahr and R. Busch : Trans. ASM 60 (1967) 252.
2. Y. Sakuma, O. Matsumura and H. Takechi : Met. Trans. 22A (1991) 489.
3. G. Krauss : Steels, ASM International., OH, USA (1989) 78.
4. O. Matsumura , Y. Sakuma and H. Takechi : Trans ISIJ 27 (1987) 570.
5. S. K. Liu and J. Zhang : Met. Trans. 21A (1990) 1517.
6. P. Jacques, E. Girault, J. van Humbeeck, E. Aernoudt and F. Delannay : Journal de Physique IV (1997) 459.
7. H. C. Chen, H. Era and M. Shimizu : Met. Trans. 20A (1989) 437.
8. I. Tsukatani, S. Hashimoto and T. Inoue : ISIJ 31 (1991) 992.
9. H. K. D. H. Bhadeshia and D. V. Edmonds : Acta Metall. 28 (1980) 1265.