

C-Mn계 TRIP강의 미세조직 변화와 기계적 성질에 미치는 Mn 첨가의 영향

홍 호 · 이오연 · 송기홍*

전북대학교 신소재개발연구센터, *전주공업대학 컴퓨터응용기계계열

Effect of Mn Addition on the Microstructural Changes and Mechanical Properties of C-Mn TRIP Steels

H. Hong, O. Y. Lee and K. H. Song*

Research Center of Advanced Materials Development, Chonbuk National Univ., Jeonju 561-756, Korea

*School of Computer Basis Applied Mechanics, Jeonju Technical College, Jeonju 560-760, Korea

Abstract Various types of high strength steel sheets were usually used for improving the automobile safety and fuel efficiency by reducing the vehicle weight. The present study aimed to develop the TRIP (transformation induced plasticity) aided high-strength low carbon steel sheets by using a reverse transformation process. The 0.1C-4~8Mn steels were reverse-transformed by slow heating to intercritical temperature region and then furnace cooled to the room temperature. Granular type retained austenite was observed in 4Mn steel and lath type retained austenite was also observed in 6~8Mn steel. The results show that the 6Mn steel under reverse transformed at 625°C for 6 hrs has maximum elongation up to 39%. The optimum strength-elongation combination was 3,888 (kg/mm²×%) when the 8Mn steel was reverse transformed at 625°C for 12 h.

(Received May 13, 2003)

Key words: 0.1C-4~8Mn TRIP steel, Reverse transformation process, Retained austenite, Strength-elongation combination

1. 서 론

자동차의 안정성을 향상시키고 동시에 차체 중량 저감에 의한 연비를 향상시키기 위해 자동차용 고강도 강판의 개발이 꾸준히 진행되고 있다. 지금까지 철강재료의 고강도화를 목적으로 Mn 및 Si에 의한 고용강화[1], 미세하게 분산된 마르텐사이트와 페라이트상으로 이루어진 2상혼합조직강, 그 외 가공경화와 석출강화 등을 조합한 여러 가지 강화기구를 적용하여 왔다[2,3]. 그러나 최근에는 잔류 오스테나이트를 다량 함유한 인장강도와 연신율이 뛰어난 초고강도 강판의 연구·개발이 활발히 진행되고 있다.

일반적으로 강은 강도가 높아지면 연성이 낮아지지만 잔류 오스테나이트의 변태유기소성(TRIP; Transformation Induced Plasticity)[4]을 이용하면 강도와 연성이 우수한 강을 얻을 수 있음이 많이 보고되고 있다[5-10]. 기존 C-Si-Mn계 TRIP강은 베이사이트 변태시 입계탄화물의 석출방지 및 다량의

잔류 오스테나이트를 얻기 위하여 탄화물 형성 억제 원소인 Si 및 Al을 첨가하고 있으며, 높은 C량과 Si량 때문에 용접성 및 생산성이 저하하고 2단 열처리를 행하기 때문에 설비와 생산비 면에서 단점을 가지고 있다.

Furukawa 등[11-13]은 Si를 첨가하지 않은 저C-고Mn강을 열간압연한 후 단순히 2상영역에서 역변태 열처리를 함으로써 다량의 잔류 오스테나이트를 함유한 고연성·고강도의 TRIP강을 얻을 수 있다고 보고하였으나, 생성된 잔류 오스테나이트와 관련하여 C와 Mn의 분배거동, 오스테나이트의 안정화 기구, 기계적 성질에 미치는 합금원소 첨가 효과 등에 관한 연구는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 저탄소강에 Mn을 4~8% 함유한 저C-고Mn계 TRIP강을 역변태 열처리 하였을 때 다량의 잔류 오스테나이트를 생성시키기 위한 합금설계와 열처리 조건을 설정하고 잔류 오스테나이트의 생성과 기계적 성질에 미치는 Mn첨가의 영향을 조사하였다.

2. 실험방법

본 실험에 사용된 시편은 고주파유도로에서 진공용해한 저C-Mn계 Al-killed강으로 화학조성은 Table 1과 같다.

시료는 고주파진공유도로에서 20 kg의 주괴로 용해 주조한 후 강괴 표면의 결함 등을 제거하기 위하여 5 mm 정도 연삭하였다. 열간압연은 1250°C에서 2시간 가열한 다음 5회 압연하여 두께 2.4 mm까지 압연하였다. 압연 종료온도는 900°C가 되도록 하고 압연 후 수분사 방식으로 560°C까지 냉각하여 권취로에 장입하고 1시간 유지 후 노냉하였다.

역변태 열처리 온도는 열팽창시험에 의해 측정된 변태온도를 토대로 하여 ($\alpha+\gamma$) 2상영역 온도인 600°C~675°C에서 25°C간격으로 실시하였다. 이때 가열 속도는 350°C까지는 150 °C/hr으로 가열한 다음 소정의 역변태열처리 온도까지 60 °C/hr으로 가열하여 각각 20분~48시간 유지하였고, 냉각속도는 450°C까지는 100 °C/hr로, 상온까지는 30 °C/hr으로 냉각하였다.

인장시편은 열간압연이 끝난 시료의 표면 산화피막을 제거한 후 ASTM 370 subsize 규격으로 가공하였다. 인장시험은 만능시험기(Instron, model 6027)를 이용하여 상온에서 5 mm/min의 인장속도로 측정하였으며, 항복강도는 항복점이 나타나는 경우는 하부 항복강도, 연속 항복거동을 나타내는 경우는 0.2% offset값으로 하였다.

투과전자현미경 시편은 기계적 연마방법에 의해 50~70 μm 두께의 박편을 만든 후, 5% 과염소산과 95% 초산을 혼합한 전해액에서 전해연마하여 STEM(Philips CM120)으로 관찰하였다.

잔류 오스테나이트량은 인장시편의 그림부분 또는 표점거리부분에서 10×15×3.0 mm 크기로 채취하여 연마한 뒤, X선 회절기(Rigaku D/max-IIIa type)에서 Mo-K α target을 사용하여 X선 회절패턴의

(211) $_{\alpha}$ 와 (220) $_{\gamma}$ 및 (311) $_{\gamma}$ 의 3 peak법을 이용하여 각 회절선의 적분강도를 구한 다음 Miller식[14,15]을 이용하여 계산하였다.

$$VR = 1.4I_{\gamma}/(I_{\alpha} + 1.4I_{\gamma}) \quad (1)$$

여기서 I_{γ} 는 오스테나이트의 (220) $_{\gamma}$ 및 (311) $_{\gamma}$ 면의 적분 강도에 대한 평균치이고, I_{α} 는 페라이트의 (211) $_{\alpha}$ 면의 적분 강도값이다.

잔류 오스테나이트내의 C량을 분석하기 위해 잔류 오스테나이트량 측정 시편과 같은 시편에서 Fe-K α target을 사용하여 (220) $_{\gamma}$ 및 (311) $_{\gamma}$ 에서 피크의 강도로부터 잔류 오스테나이트 내의 C량을 Ruhl과 Cohen식[16]을 이용하여 계산하였다.

$$\alpha = 3.572 + 0.033(\text{wt.}\% \text{ C}) \quad (2)$$

여기서 α 는 오스테나이트의 격자상수, C는 잔류 오스테나이트 내의 탄소량(wt.%) 이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 잔류 오스테나이트 생성에 미치는 Mn의 영향

Fig. 1~Fig. 4는 Mn 첨가량이 서로 다른 열간압연 판재를 역변태처리하여 얻은 잔류 오스테나이트의 형상과 잔류 오스테나이트 내의 Mn 농도를 측정하는 것이다. Fig. 1은 4 Mn 강을 625°C에서 6시간 동안 역변태처리한 시편으로 페라이트 결정입계에서 성장한 잔류 오스테나이트가 과상(granular type)형으로 존재하고 있으며, 페라이트 입계를 따라 성장하고 있다. Fig. 1(a)에서 화살표로 표시한 부분을 STEM/EDS로 분석한 결과 잔류 오스테나이트 내부의 Mn량은 10.8%로서 기지조직의 평균 Mn농도인 4%Mn에 비하여 훨씬 높고, 잔류 오스테나이트의 인접부에 존재하는 페라이트내의 Mn량은 2.98%로서 낮은 값을 나타내었다.

Fig. 2의 6 Mn강에서는 대부분 래스형 잔류 오스테나이트 형태로 존재하며, 래스의 폭은 0.2~0.3 μm 정도이며, 잔류 오스테나이트는 기지조직에서 길이 및 두께방향으로 성장하고 있다. 화살표로 표시한 래스형 잔류 오스테나이트 내부와 기지의 Mn농도를 STEM/EDS로 분석한 결과, Fig. 4와 같이 오스테

Table 1. Chemical composition of C-Mn steels (wt.%)

Alloy	C	Mn	Si	Sol.-Al	N	Fe
A	0.102	4.00	0.51	0.030	0.002~0.003	bal.
B	0.104	6.05	0.49	0.057	0.002~0.003	bal.
C	0.105	8.04	0.50	0.052	0.002~0.003	bal.

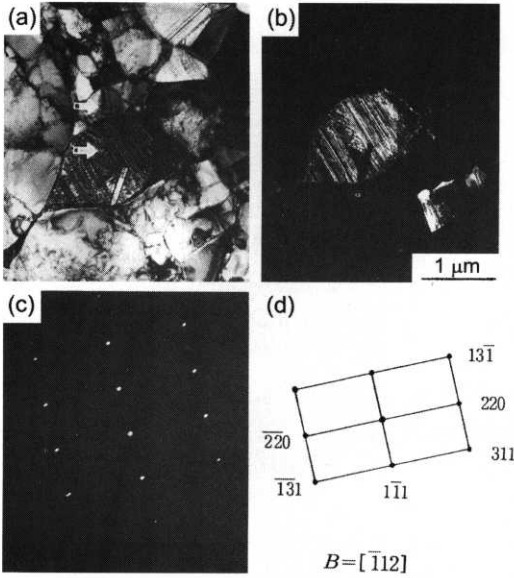


Fig. 1. Transmission electron micrographs of 0.1C-4Mn steel reverse transformed at 625°C for 6 hr; (a) bright field image, (b) dark field image, (c) selected area diffraction pattern, (d) the indexed result.

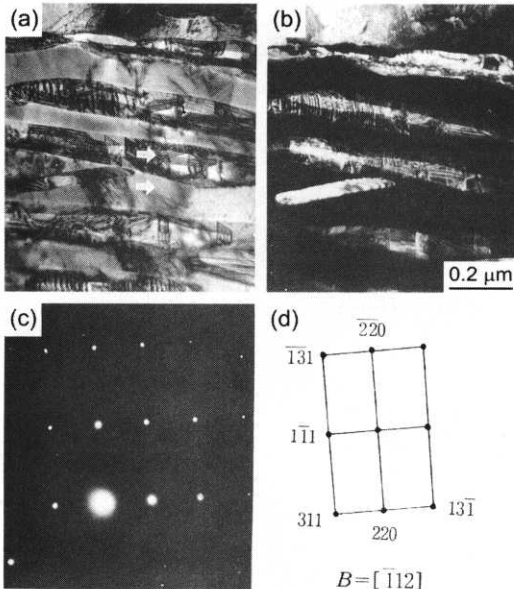


Fig. 2. Transmission electron micrographs of 0.1C-6Mn steel reverse transformed at 625°C for 6 hr; (a) bright field image, (b) dark field image, (c) selected area diffraction pattern, (d) the indexed result.

나이트 내의 Mn량은 10.6%, 잔류 오스테나이트에 인접한 기지는 Mn량이 3.8% 이었다.

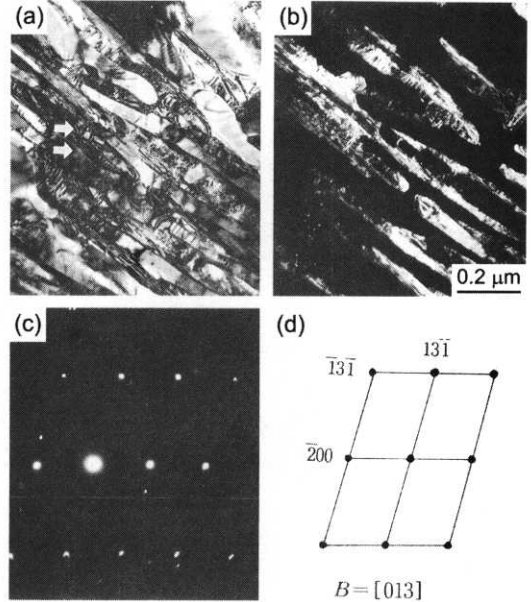


Fig. 3. Transmission electron micrographs of 0.1C-8Mn steel reverse transformed at 625°C for 6 hr; (a) bright field image, (b) dark field image, (c) selected area diffraction pattern, (d) the indexed result.

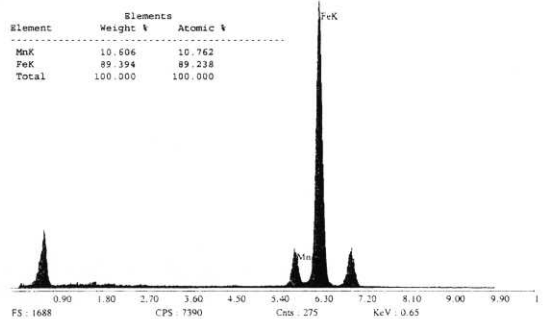


Fig. 4. STEM/EDS analysis of retained austenite [Fig. 3(a)] obtained by reverse transformation at 625°C for 6 hr.

Fig. 3의 8Mn강은 6Mn강과 같이 래스형 잔류 오스테나이트를 나타내며, 래스의 폭은 0.1~0.3 μm 로 약간 미세해지는 경향을 나타내고 있다. 사진에서 화살표로 표시한 잔류 오스테나이트 내의 Mn량은 14.7%, 잔류 오스테나이트 인접부는 3%정도 밖에 되지 않았다.

Fig. 1~Fig. 3에서 볼 수 있는 것처럼 4Mn강에서 잔류 오스테나이트의 형상은 괴상형이며, 그 크기

는 1 μm 정도 이었고, 6~8Mn강에서는 래스형 잔류 오스테나이트로서 폭은 0.1~0.3 μm이었다. 또한 잔류 오스테나이트 내의 Mn량은 기지조직에 비해 2~4배의 Mn을 함유하고 있어, Mn의 확산의 의해 γ/α 계면이나 오스테나이트 내에 국부적으로 축적되어 잔류 오스테나이트 생성과 안정화에 기여하고 있음을 알 수 있다[17]. 따라서 Mn 첨가량이 증가함에 따라 잔류 오스테나이트량도 증가될 것으로 예측할 수 있다.

Fig. 5는 0.1C-4~8Mn강을 각종 온도에서 6시간 동안 역변태처리한 경우 잔류 오스테나이트량의 변화에 미치는 Mn첨가의 영향을 나타낸 것이다. 잔류 오스테나이트량은 Mn 첨가량이 4%에서 8%로 증가함에 따라 그 양도 15~30% 정도 현저하게 증가하였으며, 600°C~650°C 범위에서는 역변태 온도가 상승함에 따라 그 양이 증가하며 그 후에는 감소하였다. 또한 4~6Mn 강은 650°C에서 최대값을 나타내고 이후 약간 감소하는 경향을 보였다. 그러나 8Mn강은 625°C에서 잔류 오스테나이트량이 최대값을 나타내었으며, 675°C에서는 급격히 감소하고 있다. 8Mn강을 625°C에서 6시간동안 역변태 처리하였을 때 잔류 오스테나이트량은 약 48%로 가장 높게 나타났다.

3.2 잔류 오스테나이트내의 탄소분배 거동

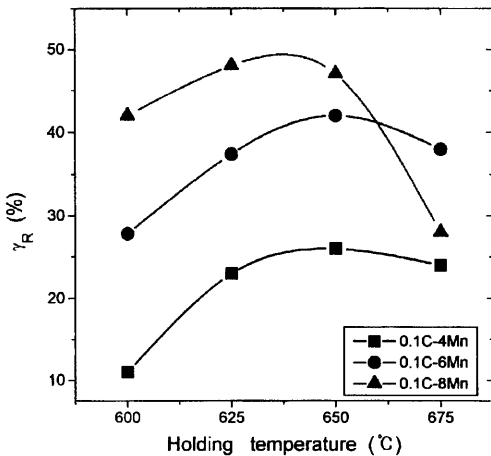


Fig. 5. Effect of holding temperature on the amount of γ_R with various manganese content in steels reverse transformed at various temperatures for 6 hr.

Fig. 6은 0.1C-4~8Mn강을 각종 온도에서 6시간 동안 역변태 열처리했을 때 형성되는 잔류 오스테나이트내의 C량을 측정하여 나타낸 것이다. 4Mn강은 650°C에서 역변태처리 하였을 때 잔류 오스테나이트 내의 C농도가 최대값을 보이는데 반하여 6~8Mn강은 625°C에서 최대농도를 나타내었다. 이것은 Fig. 5의 역변태 온도에 따른 잔류 오스테나이트량의 변화와 비슷한 경향을 나타내었다. 즉 잔류 오스테나이트 내의 C농도는 675°C에서 모두 감소하는 경향을 보여주고 있으며, 특히 8Mn강의 경우 급격히 감소하였다. Fig. 5의 8Mn강이 675°C에서 잔류 오스테나이트량이 급격히 감소하고 있는 것은 이때의 C량이 가장 낮은 값을 보이고 있는 것과 일치하고 있다.

Fig. 5에서 역변태 온도가 650°C를 넘으면 잔류 오스테나이트량이 감소하는 것은 다음과 같이 설명할 수 있다. 역변태처리시 C는 페라이트에서 오스테나이트로 확산하여 잔류 오스테나이트 내에 C농도가 증가하게 되는데, C는 Mn에 비해 확산속도가 빠르기 때문에 오스테나이트 생성 초기 단계에는 지배적인 영향을 줄 것이다. 역변태 온도에서 생성되는 총 오스테나이트량은 열처리 온도가 상승함에 따라 증가하지만 650°C 이상이 되면 오스테나이트의 화학적 안정성이 감소하기 때문에 역변태처리 후 상온에 잔류하는 오스테나이트량은 오히려 감소하게 된다. 즉 역변태 온도가 상승함에 따라 생성되는 오스테나이트량

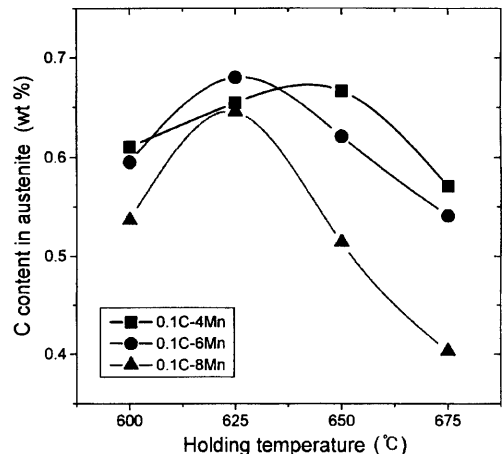


Fig. 6. Effect of holding temperature on carbon content in retained austenite with holding time for 6 hr.

은 증가되지만 γ 가 성장함에 따라 오스테나이트내의 C농도가 감소되므로 냉각시 γ 가 상온에 그대로 잔류하지 못하고 페라이트나 제2상인 마르텐사이트로 변태되기 때문이다. 따라서 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 650°C 이상에서는 잔류 오스테나이트량이 감소하게 된다고 생각된다.

3.3 기계적 성질에 미치는 Mn의 영향

Fig. 7~Fig. 9는 4~8Mn강을 각종 온도에서 유지시간에 따른 기계적 성질의 변화를 나타낸 것이다. 4Mn강을 675°C에서 20분간 열처리 한 경우 인장강도는 약 85 kg/mm², 6Mn강은 102 kg/mm², 같은 열처리 조건의 8Mn강은 약 116 kg/mm²를 나타내어 Mn 첨가량이 4%에서 8%로 증가함에 따라 31 kg/mm² 정도 증가되었다. 연신율은 8Mn 첨가강이 약간 높은 값을 나타내었는데, 그 최대값은 6Mn강을 625°C에서 6시간 역변태처리한 경우에 약 39%를 나타내었다. 625°C가 650°C보다 잔류 오스테나이트량은 적지만 625°C에서 오스테나이트 내의 C량은 최대값을 보이고, Mn량도 γ/α 계면과 오스테

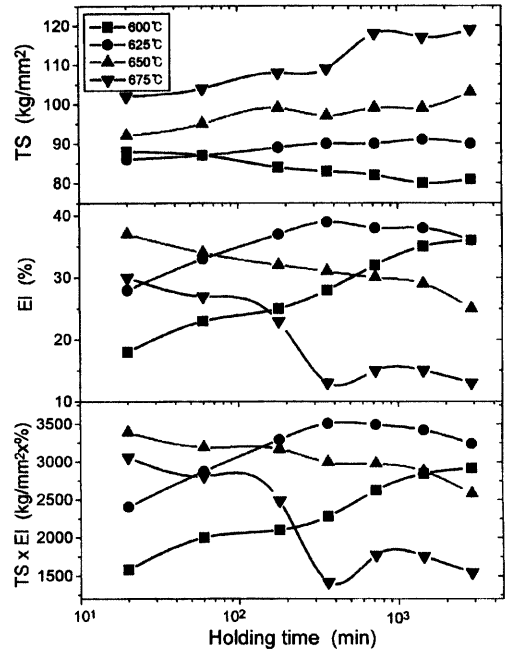


Fig. 8. Changes in mechanical properties with holding time at various reverse transformation temperatures in 0.1C-6Mn steels.

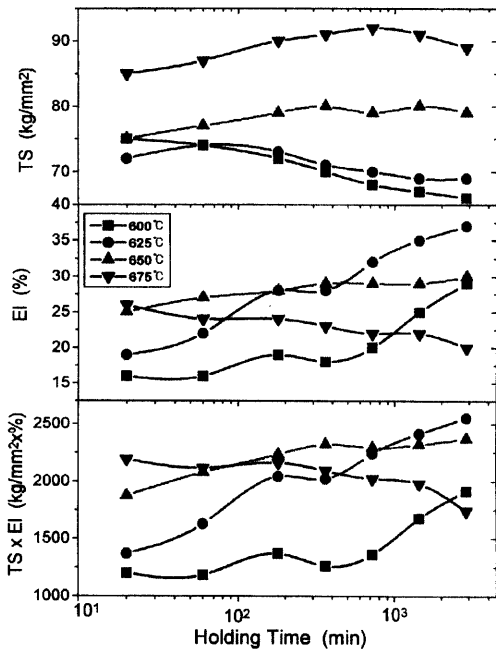


Fig. 7. Changes in mechanical properties with holding time at various reverse transformation temperatures in 0.1C-4Mn steels.

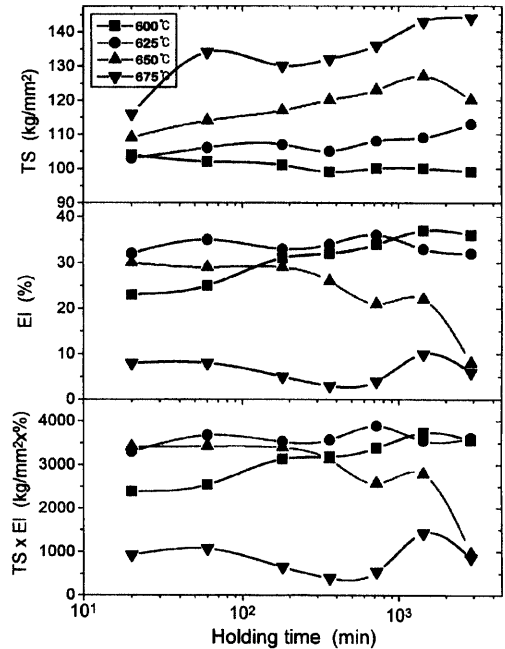


Fig. 9. Changes in mechanical properties with holding time at various reverse transformation temperatures in 0.1C-8Mn steels.

나이트 가장자리부에 빠르게 축적되어 가는 상태, 즉 잔류 오스테나이트의 화학적 안정성이 가장 클 때 연신율은 최대값을 나타내는 것으로 생각된다.

강도·연성 조합(TS×EI)값은 8Mn강을 625°C에서 12시간 동안 역변태처리한 경우에 약 3,888(kg/mm²×%)의 최대값을 나타내었다. 6~8Mn을 함유한 강을 675°C에서 역변태처리 하였을 때 연신율은 유지 시간의 증가에 따라 감소하였다. 이것은 고온의 역변태 처리 온도에서 오스테나이트내의 C와 Mn이 확산에 의해 평형농도로 분배되어 오스테나이트의 화학적 안정성을 감소시킴으로써 냉각시 오스테나이트가 페라이트나 마르텐사이트로 변태하게 될 것이다. 따라서 고온 역변태 처리시 강도는 높고 연성이 저하되는 이유는 불안정한 오스테나이트가 대부분 마르텐사이트로 변태되기 때문이라고 생각된다.

4. 결 론

4~8Mn을 함유한 C-Mn계 TRIP강의 잔류 오스테나이트 생성 및 기계적 성질에 미치는 역변태 열처리 조건과 Mn첨가의 영향을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 4Mn을 첨가강은 역변태 열처리 후 괴상형 잔류 오스테나이트가 형성되었고, 6~8Mn 강에서는 역변태 열처리 후 대부분 래스형 잔류 오스테나이트가 형성되었다.

2) 잔류 오스테나이트량은 Mn함량이 4%에서 8%로 증가함에 따라 그 양도 15~30%정도 증가하였으며, 잔류 오스테나이트의 최대량은 8Mn강을 625°C

에서 6시간 동안 역변태처리하였을 때 약 48%이었다.

3) 최대 연신율은 6Mn강을 625°C에서 6시간 역변태 처리한 경우 약 39%를 나타내었고, 강도·연성 조합의 최대값은 8Mn강을 625°C에서 12시간 역변태처리한 경우 약 3,888(kg/mm²×%)로 나타났다.

참고문헌

1. 荒木 透 : 金屬, 50 (1980) 73.
2. 武智 弘 : 日本金屬學會會報, 23 (1984) 896.
3. 大澤 絃一 : 塑性と加工, 27 (1986-1) 55.
4. V. F. Zackay, E. R. Parker, D. Fahr, and R. Bush : Trans. ASM, 60 (1967) 252.
5. Y. Sakuma, O. Matsumura and H. Takechi : Metall. Trans., 22A (1991) 489.
6. 澤井 巖, 内田 尚志 : 熱處理, 30 (1990) 27.
7. O. Matsumura and Y. Sakuma : Trans. ISIJ, 27 (1987) 570.
8. 澤井 巖, 内田 尚志, 神坂榮治 : 鐵と鋼, 71 (1985) 1292.
9. 佐久間, 松村 武智, 坂東岡本 : ibid, 72 (1986) 1405.
10. 内田 尚志, 澤井 巖, 坂東岡本 : ibid, 72 (1986) 1406.
11. T. Furukawa : Mater. Sci. and Tech., 5 (1989) 465.
12. 古川 敬, 武田 善充 : CAMP-ISIJ, 2 (1989) 744.
13. 古川 敬, 赤澤 高 : CAMP-ISIJ, 3 (1990) 796.
14. R. L. Miller : Trans. ASM, 57 (1964) 892.
15. R. L. Miller : Trans. ASM, 61 (1968) 592.
16. R. C. Ruhl and M. Cohen : Trans. AIME, 245 (1969) 241.
17. G. R. Speich, V. A. Demarest, and R. L. Miller : Metall. Trans. 12A (1981) 1419.