[논문] 열처리공학회지, 제21권 제6호(2008)
J. of the Korean Society for Heat Treatment, *Vol. 21, No. 6, (2008) pp. 281~286*

저탄소 1.1 Mn 강의 인장 및 충격 성질에 미치는 V첨가의 영향

양형렬* · 조기섭 · 최정현 · 심호섭 · 이건배 · 권 훈†**
국민대학교 신소재공학부, *시립인천전문대학 기계공학과, **동국제강 중앙연구소

Effects of V Addition on Tensile and Impact Properties in Low Carbon 1.1Mn Steels

H. R. Yang*, K. S. Cho, J. H. Choi, H. S. Sim, K. B. Lee, H. Kwon†**
School of Advanced Materials Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea
**Department of Mechanical Engineering, Incheon City College, Incheon 402-750, Korea*
***Technical Research Lab., Dongkuk Steel Mill Co., Kyungpook 790-841, Korea*

Abstract In the 1.1 Mn steel containing boron, effects of the 0.1 V addition and processing condition were studied. In the 550°C interrupted cooling where the main structure is (ferrite + pearlite), the impact toughness decreased as the tensile strength increased by the 0.1 V addition. The 800°C rolling including two step rolling of 800-770°C, exhibited better strength-toughness balance, as compared to the 770°C rolling. This seems to be kind of conditioning effect at higher temperature, e.g., more uniform deformation effect. In the accelerated cooling after the 750°C rolling in a dual phase range, the impact toughness was enhanced, despite a large increase in tensile strength. This is believed to be related to the change of main structure from (ferrite + pearlite) to (ferrite + bainite).
(Received September 30, 2008; Revised October 6, 2008; Accepted October 15, 2008)

Key words: *Low carbon steel, V addition, Strength-toughness balance, Rolling and cooling*

1. 서 론

Mn함유 미소합금첨가 400 MPa급(페라이트+펄라이트) 강을 합금조성의 큰 변화 없이 인성을 저해하지 않고 강도를 800 MPa 급으로 두배 증가시키는 방법으로 결정립을 1 μm 대로 초세립화 하기 위한 기술개발이 경쟁적으로 추진되고 있다. 페라이트의 초세립화에 있어서, Ar3 직상의 미재결정역 및 2상역에서의 강가공에 의해 변형유기 동적변태(strain induced dynamic transformation(SIDT))된 초세립의 페라이트를 형성하고, 가속냉각으로 이들의 성장을 억제하는 것이 효과적인 미세화 방법으로 제시되고 있다[1-4]. 그러나 판재가 두꺼워짐에 따라 표면부에 비해 중심부는 가공도 저하[5] 및 냉각속도감소로 상대적으로 조대한(페라이트 + 펄라이트) 미세구조로 되려는 경향이 증대됨에 따라 고강도를 얻는 것이 용이하지 않다.

두꺼운 판재의 경우 내부에서도 고강도를 이루기 위해서는 냉각속도가 늦은 중심부를(페라이트 + 베이나이트)의 기본 미세구조를 갖도록 경화능을 향상시키는 것이 하나의 방법이 될 수 있다.

미소합금강의 화학조성의 별 변화 없이 베이나이트 변태에 대한 경화능을 증가시키기 위해서는 미소량의 B(boron)을 첨가하는 것이 효과적인 것으로 알려져 있다. B의 경화능 효과는 주로 입계편석에 의해 페라이트의 핵생성을 억제하는데 기인한다[6, 7]. 한편, V은 Nb등과 함께 대표적인 미소첨가 합금원소로 500-600°C 구간에서 냉각될 때 미세한 VC의 석출에 의한 강화현상으로 강도를 증가시킬 수 있다. 그러나 이 영역에서 빠르게 냉각되는 경우는 고용된 상태로 경화능을 증가시키는 역할을 하게 된다[7, 8].

본 연구에서는 보론이 첨가된 1.1Mn강에서 미소첨가로 강도증가에 효과적인 V의 첨가 영향을 분석하고, 압연온도, 압하량 등의 압연조건, 냉각속도, 정지온도 등에 냉각조건에 따른 미세조직의 변화와 그에 따른 기계적 특성을 분석하였다.

†E-mail : hkwon@kookmin.ac.kr

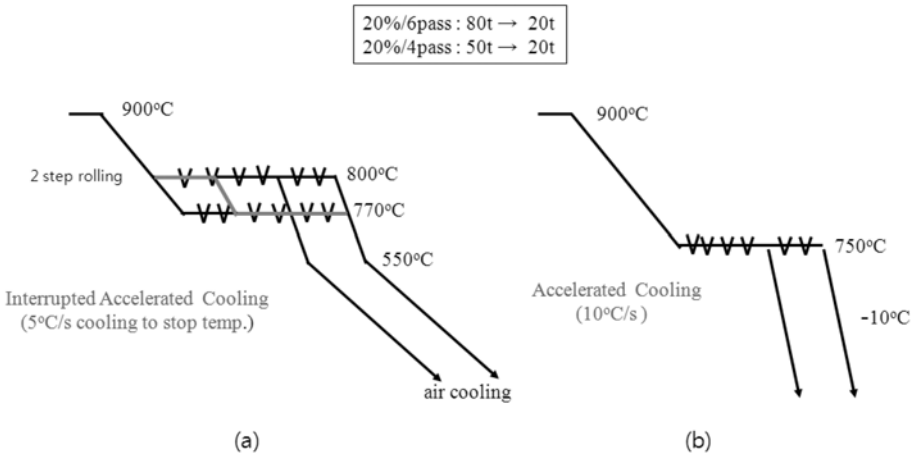

Fig. 1. Schematic diagram of processing condition; (a) IACC and (b) ACC.

2. 실험방법

본 연구에서는 X65강에 비해, 탄소함량이 0.15 wt%로 비교적 높고 Mn 함량이 낮으며 합금첨가가 적은 AH32강에 20 ppm의 B을 첨가한 1.1 Mn강(0.15C-1.1Mn-0.25Si-0.01Ti-0.03Al-0.002N-0.002B)과 기계적성질을 향상시킬 수 있는 가능성을 실험하기 위해 V을 0.1 wt% 첨가한 1.1 Mn-0.1 V강을 합금설계하였다. 진공용해에 의해 50 kg의 잉고트를 제조하고, 1200°C에서 두께 80 및 50 mm의 판재로 조압연하여 다단압연용 시편을 준비하였다.

다단압연을 하기 위해 재가열온도는 900°C로 하였으며, 실제 압연공정에서 적용할 수 있을 정도로 가능한 패스당 압연량을 20%로 하였으며, 최종두께는 20 mm로 하였다. 900°C에서 공냉에 해당되는 2°C/s로 냉각하는 경우, Ar3는 1.1 Mn 및 1.1 Mn-0.1 V강에서 각각 756 및 754°C로 측정되었다.

다단 압연온도는 저온 미재결정역인 770°C, 고온 미재결정역인 800°C를 선택하여, 패스당 20%로 4패스(20%/4 p) 또는 6패스(20%/6 p)하여 각각 총 60%, 75%로 압연한 후 약 5°C/s로 냉각하였으며, 550°C에서 정지하여 공냉하였다.

또한, 강도를 증가시키기 위해, 냉각속도를 10°C/s로 높이고 도중에 냉각정지를 하지 않은 실험을 병행하였다. 이 경우 압연온도도 이상영역으로 낮추어 750°C로 하여 60 또는 75% 압하하였다(그림 1).

다단압연된 판재의 중심부로부터 인장 및 충격시편을 채취하여, 기계적성질을 조사하고, 미세조직을 관찰하였다. 이때 충격시험은 판재의 일반적인 시험 평가온도인 −20°C에서 실시하였다.

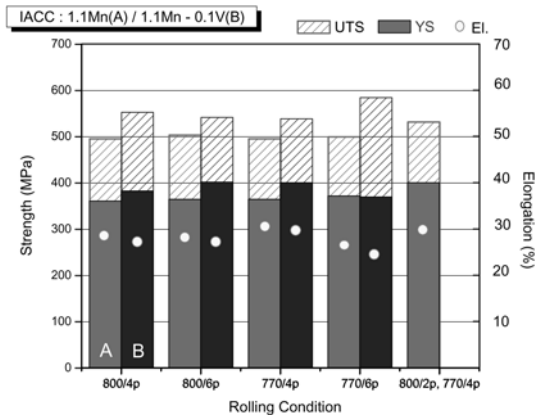

Fig. 2. Tensile properties with rolling condition; accelerated cooled(5°C/s) to 550°C and then interrupted by air cooling(IACC).

3. 결과 및 고찰

3.1 기계적 성질

3.1.1 5°C/s 냉각 - 550°C 공냉

그림 2는 압연조건에 따른 인장성질을 보여주고 있다. 1.1 Mn강은 압연온도 및 압하량에 별 상관없이, 인장강도가 약 500 MPa, 항복비가 0.73-0.75로 전형적인(페라이트 + 펄라이트)의 기본구조를 가지고 있음을 추정할 수 있다. 단지 특기할 만한 사항은 2

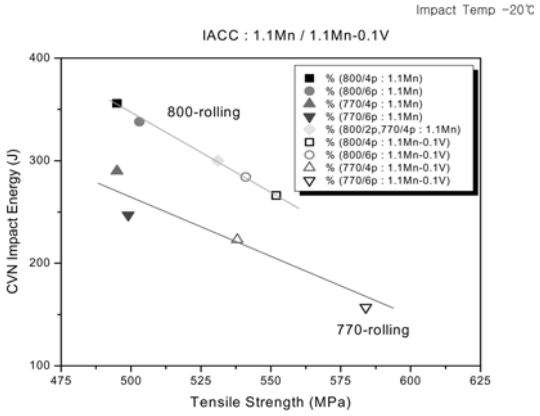

Fig. 3. Variation of impact toughness with tensile strength; accelerated cooled(5^{o}C/s) to 550^{o}C and then interrupted by air cooling (IACC).

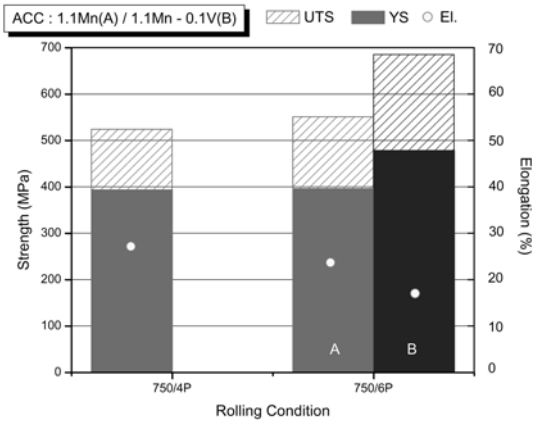

Fig. 4. Tensile properties in the 750^{o}C rolling condition; accelerated cooled at 10^{o}C/s (ACC).

단계 압연(800^{o}C/2 p-770^{o}C/4 p)의 경우, 항복 및 인장강도가 약 30 MPa 정도 증가되는 것으로 나타났다. 현재로서는 이러한 결과가 고온 미재결정역(800^{o}C)에서는 저온 미재결정역(770^{o}C)에 비해 상대적으로 균일변형후 770^{o}C로 냉각되는 동안 생길 수 있는 재료내부에서의 일종의 조절(conditioning) 효과로 저온 미재결정역에서 균일한 동적변태가 가능해지기 때문인 것으로 생각된다.

한편 1.1 Mn-0.1 V강은 인장강도가 540-585 MPa의 범위를 나타내며, V의 첨가로 강도가 증가하는 것으로 나타났으며, 이것은 550^{o}C에서 냉각정지후 공냉함으로써 VC의 석출에 의한 강화현상이 발생되기 때문으로 판단된다[7, 8].

그림 3은 1.1 Mn계의 인장강도와 -20^{o}C 충격인성의 관계를 보여주고 있다. V 첨가에 관계없이 강도의 증가에 따라 인성이 감소하는 강도/인성의 밸런스를 나타내고 있다. 하지만 압연온도에 따른 차이를 뚜렷이 보이고 있다. 압연온도가 800^{o}C인 경우가 770^{o}C에 비해 더 높은 강도/인성 밸런스를 나타낸다. 이것은 고온 미재결정 오스테나이트 영역에서 균일변형과 같은 일종의 조절효과로 변태후 조직의 균일도를 증가시킴으로써 인성를 향상시키는 것으로 판단된다. 800-770^{o}C의 2단계 압연의 경우는 800^{o}C 압연의 강도/인성 밸런스에 속하며, 강도 또한 증가되는 효과를 나타냈다. 따라서 2단계 압연이 강도 및 인성을 동시에 향상시키는 효과적인 방법인 것으로 나타났다.

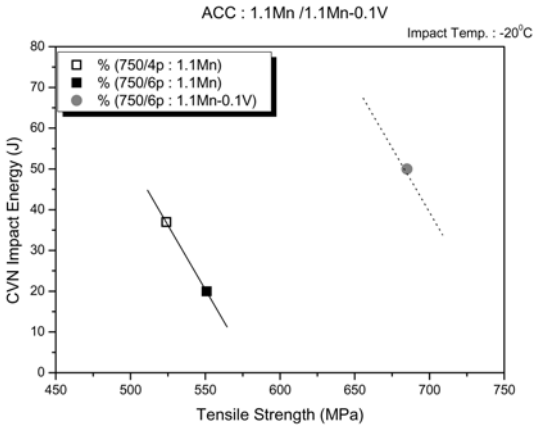

Fig. 5. Variation of impact toughness with tensile strength; accelerated cooled at 10^{o}C/s (ACC).

3.1.2 10^{o}C/s 냉각

그림 4는 압연조건에 따른 인장성질을 보여주고 있다. 2상영역인 750^{o}C에서 압연한 것으로 압하량이 증가하면 인장강도 및 항복비가 증가하는 것으로 나타났으며, 1.1 Mn-0.1 V강의 경우, 인장강도, 항복강도, 항복비가 각각 685 MPa, 479 MPa, 0.70으로 나타났다. 특히 이러한 인장강도의 상당한 증가는 제2상이 베이나이트(마르텐사이트)등으로 변태되었음을 의미하는 것으로 판단된다.

그림 5는 인장강도와 -20^{o}C 충격인성의 관계를 보여주고 있다. 1.1 Mn강의 경우 750/6 p인 경우가 750/4 p에 비해 패스 수 증가로 강도는 5% 정도 약간 증가하였지만(525 → 550 MPa), 인성은 50% 정도 큰 폭으로 감소하였다(38 → 19J). 이것은 2상

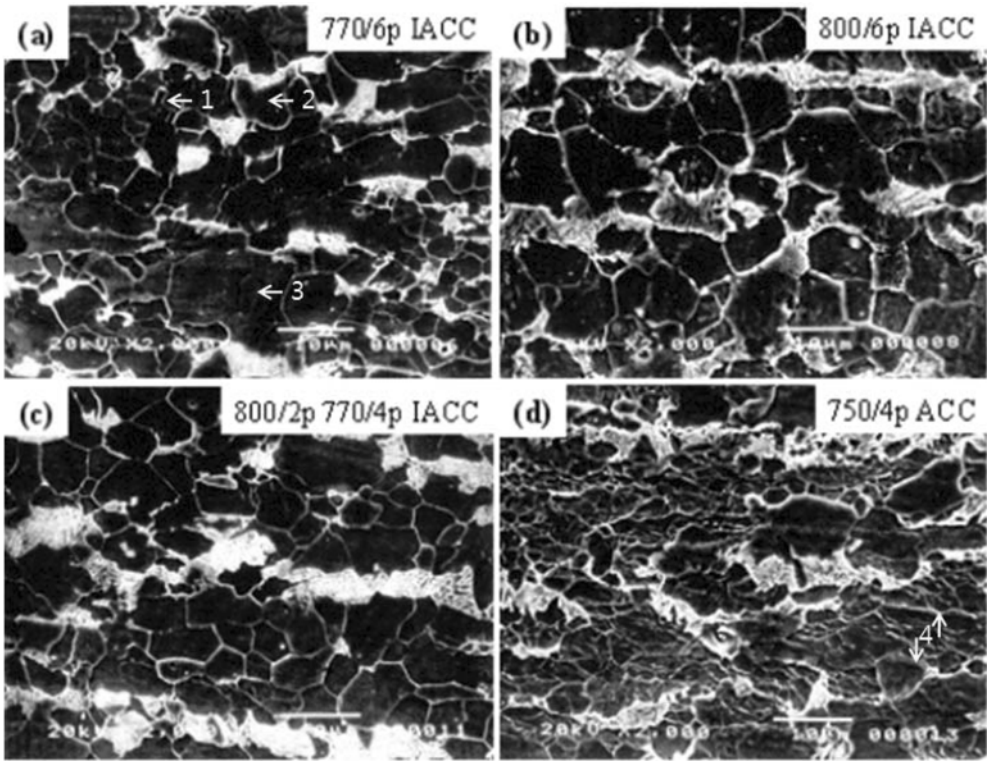

Fig. 6. Scanning electron micrographs of the 1.1 Mn steel : (a) 770/6 p, (b) 800/6 p and (c) 800/2 p-770/4 p rolling and IACC conditions; (d) 750/4 p rolling and ACC condition.

역에서 더 많은 압연으로 페라이트에서의 가공경화가 가중되기 때문으로 생각된다. 한편, V이 첨가된 경우 1.1 Mn강에 비해 강도/인성 밸런스가 상당히 증가하였다(550 MPa/19J → 685 MPa/50J). 따라서 상온까지 가속냉각 하는 경우 V의 첨가는 강도뿐만 아니라 인성의 증가에도 효과적인 것으로 나타났다.

3.2 미세조직

그림 6은 1.1 Mn강의 미세조직을 보여주고 있다.

770 및 800°C에서 압연된 시편의 미세조직은, 압연중 동적변태된 세립 페라이트, 냉각중 변태된 조립 페라이트, 압연방향으로 밴드형태로 배열된 펄라이트로 이루어져 있다. 그림 6(a)의 770/6 p 시편에서는, 2-3 μm 정도의 세립 페라이트(화살표1)와 함께 5-10 μm 이상의 조립 페라이트(화살표2)가 존재하고 있다. 하지만 15 μm 이상인 상당히 조대한 페라이트(화살표3)도 관찰되고 있는데, 이는 동적변태가 생기지 않고 남은 오스테나이트가 냉각중 변태과정에서 과도하게 성장하기 때문일 것이다. 그림 6(b) 800/6 p 시편의 경우, 5 μm 정도의 세립 페라이트와 함께 전체적으로 10 μm 근처의 조립 페라이트가 관찰되고 있다. 전체적으로 페라이트의 성장이 이루어진 상태이지만, 15 μm 이상의 조대한 페라이트는 별로 관찰되지 않는다.

그림 6(c)의 800/2 p-770/4 p 2단계 압연한 시편에서는, 3-4 μm 정도의 세립 페라이트와 함께 5-10 μm 정도의 비교적 미세한 조립 페라이트가 존재하며, 15 μm 이상의 조립 페라이트는 거의 관찰되지 않는다. 즉, 2단계 압연한 경우 동적변태에 의한 세립 페라이트의 형성이 균일하게 이루어짐으로써, 남아 있는 오스테나이트 영역도 조대하지 않고 이로부터 냉각중에 형성되는 페라이트도 비교적 미세하게 되는 것으로 생각된다.

한편, 그림 6(d)의 이상영역인 750/4 p 시편에서는, 1-2 μm 정도의 초세립 페라이트, 10 μm 정도의 조립 페라이트 뿐만 아니라, 조대한 계면탄화물(화살표

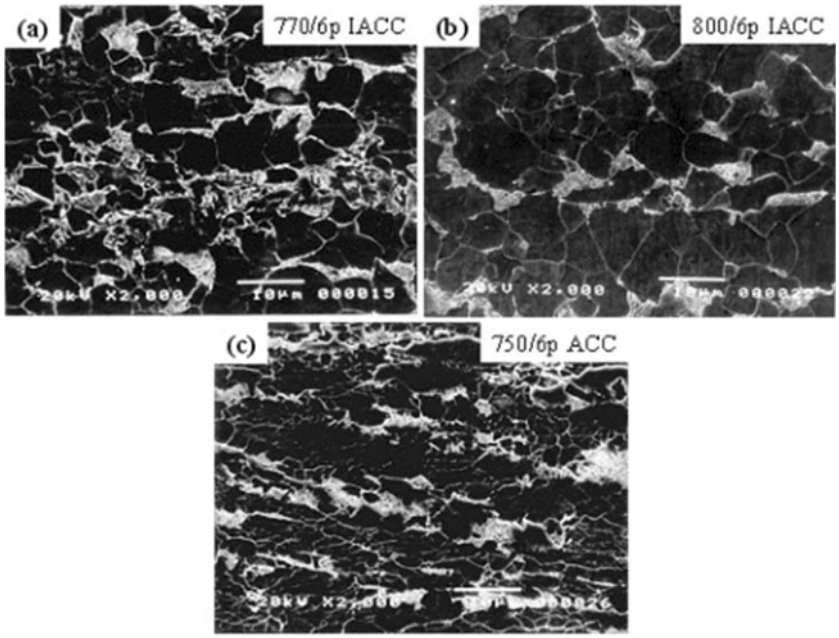

Fig. 7. Scanning electron micrographs of the 1.1 Mn-0.1 V steel : (a) 770/6 p and (b) 800/6 p rolling and IACC conditions; (c) 750/6 p rolling and ACC condition.

4)들이 관찰된다. 이들 탄화물들은 인성을 저하시키는 미세조직적인 주된 원인이 될 것이다.

그림 7은 1.1 Mn-0.1 V강의 미세조직을 보여주고 있다. 전반적으로 1.1 Mn강과 유사한 미세조직적 양상을 나타내고 있다. 단지, 그림 7(c)의 750/6 p 시편에서는, 제 2상의 상당부분이 베이나이트(마르텐사이트)등으로 변태된 것으로 보이며, 이것은 V의 첨가로 동적변태 되지 않고 남아 있던 오스테나이트의 경화능이 증가되었기 때문으로 생각된다.

3.3 파괴양상

그림 8은 1.1 Mn계의 시험온도에 따른 충격시편의 경우는 −60°C까지도 상당한 소성변형이 된 연성파괴의 양상을 보이나, V이 첨가된 경우는 −20°C에서도 소성변형이 별로 수반되지 않는 취성파괴의 양상을 보이고 있다. 그리고 압연면에 평행한 separation 균열이 관찰되고 있다.

그림 9는 separation 균열을 대표적으로 보여주고 있다. 그림 9(a)의 경우, 균열은 주로 페라이트를 관통해서 전파하는 것으로 관찰되며, (b)의 균열면도 벽개형태를 나타내고 있다.

이러한 결과는, 압연면에 평행하게 페라이트의 벽

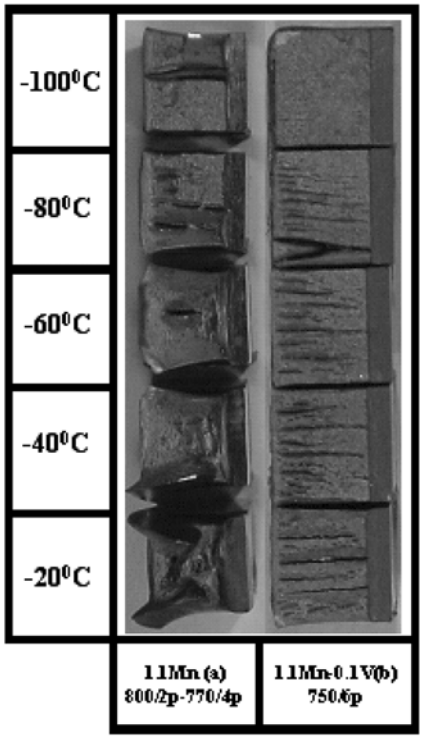

Fig. 8. Macro-view of fracture surfaces : (a) 800/2 p-770/4 p rolling and IACC condition of the 1.1 Mn steel; (b) 750/6 p rolling and ACC condition of the 1.1 Mn-0.1 V steel.

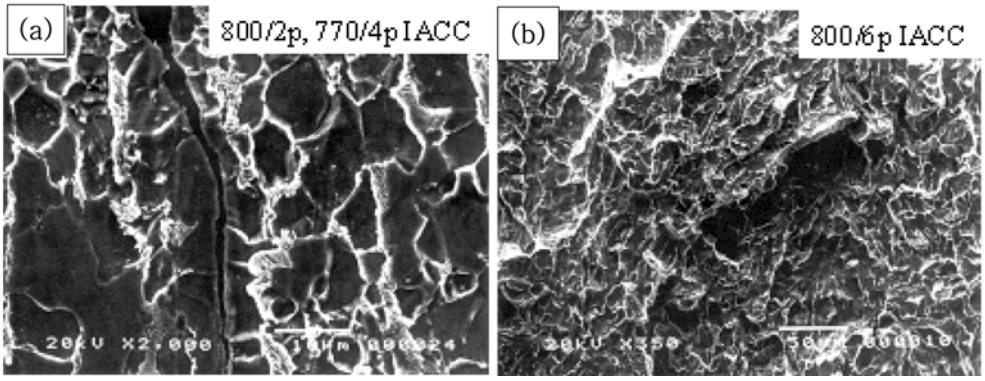

Fig. 9. The separation cracking and the fracture surfaces fractured along the separation cracks in 1.1 Mn steel : (a) 800/2 p-770/4 p rolling and IACC; (b) 800/6 p rolling and IACC.

개면인 {100}면이 우선적으로 배열되는 집합조직이 생성되며, 이로 인해 벽개균열이 생성된다는 보고와 일치하는 결과이다[7]. 그러나 페라이트내를 관통하기 보다는 제 2상과의 계면을 따라 형성된다는 보고도 있으므로[4] 이에 대한 심도있는 연구가 필요하다.

4. 결 론

1. 5°C/s 냉각 도중 550°C에서 정지하여 공냉한 경우, 미세조직은(세립페라이트 + 조립페라이트 + 펄라이트)이고, 인장강도는 0.1 V 첨가로 500 MPa에서 540-585 MPa로 증가되었다. 한편 강도/인성 밸런스는 V의 첨가와는 무관하게, 높은 미재결정역 압연온도인 800°C의 경우 770°C에 비해 향상되었다. 이것은 압연온도의 증가에 의해 오스테나이트 소성변형의 균일성이 증가되는 일종의 조절효과로 변태후 미세조직의 균일성도 향상되기 때문으로 판단된다. 800/2 p-770/4 p의 이단압연을 하는 경우 강도 및 인성이 향상되는 효과를 나타냈다.

2. 750 이상영역 압연후 10°C/s 냉각의 경우, 미세조직은(세립페라이트 + 조립페라이트 + 펄라이트 또는 베이나이트(마르텐사이트))로 인장강도는 V 첨가에 의해 525-550 MPa에서 685 MPa로 상당한 증가를 보였다. 이러한 강도의 증가는 V 첨가에 의한 경화능의 증가로 제 2상의 상당 부분이 베이나이트(마르텐사이트)로 변태되었음을 시사하는 것이며, 이로 인해 인성도 증가된 것으로 믿어진다.

감사의 글

본 연구는 2008년도 교육과학기술부 전문대학 특성화 사업에 의해 지원되었으며, 용해, 압연 등 실험에 도움을 주신 POSCO에 감사드립니다.

참고문헌

1. S. Torizuka, O. Umezawa, K. Tsuzaki and K. Nagai : CAMPS-ISIJ, **10** (1997) 1380
2. S. W. Lee, D. H. Seo and W. Y. Choo : J. Kor. Inst. Met. Mater., **36** (1998) 1966.
3. S. Torizuka, O. Umezawa, K. Tsuzaki, K. Nagai, S. Genda and Y. Kogo : Proc. of Int. Conf. on Solid-Solid Phase Transformations 1999, Kyoto (1999).
4. Development of High Strength Structural Steel with Fine Grain(III), POSCO, 2001.
5. Y. Saito, T. Sakai, F. Maede and K. Kato : Tetsu-to-Hagane, **72** (1986) 799.
6. H. K. D. H. Bhadeshia : Bainite in Steels, Institute of Materials (1992).
7. I. Kozasu : Controlled Rolling and controlled Cooling Chijin Shokan Co., Ltd, (1997).
8. "Physical Metallurgy of Direct-Quenched Steels" ed. by K.A. Tayor et. al., (1993).