

변형 온도에 따른 탄소강의 미세조직 및 경도 변화

이태경¹, 박성혁¹, 이덕락², 이종수[#]

Effect of Deformation Temperature on Microstructure and Hardness of Plain Carbon Steels

T. Lee, S.H. Park, D.L. Lee, C.S. Lee

Abstract

Microstructural evolution and the mechanical properties of various carbon steels were investigated with the variation deformation temperature to explore the optimum microstructure with excellent combination of strength and ductility. For this purpose, three carbon steels containing different carbon contents were deformed using Gleeble 3500 at temperatures including austenitic, austenitic/ferritic, austenitic/cementitic, ferritic/cementitic regions. The results showed that in the medium and high carbon steels, cementite particles became finer with decreasing deformation temperature resulting higher hardness but lower ductility. Further effort is needed to find out optimum microstructures with enhanced mechanical properties.

Key Words: Carbon Steel, Microstructure, Hardness, Deformation Temperature

1. 서론

철강 분야에서 최근 활발히 연구되고 있는 분야 중 하나로 강소성가공을 통한 결정립의 초미세화(ultrafine grain refinement)가 있다. 많은 연구자들이 결정립 초미세화를 통해 특히 강도 측면에서 상당한 물성의 향상을 보고한 바 있다 [1-2].

최근에는 500~800℃의 온간 영역에서 재료에 변형을 주어 우수한 물성을 가지는 UFG강을 만드는 연구가 활발히 진행되고 있다 [3-5]. 특히 Kimura 등은 0.4%C강을 온간 압연하여 기존에 비해 강도, 경도 및 연성이 크게 우수한 UFG강을 제조한 바 있다 [5].

합금원소 및 열처리 방법에 따라 매우 복잡한 미세조직 양상을 보이는 철강의 특성상, 변형 온도에 따른 미세조직 변화를 선행 연구하는 것은 차후 온간 압연을 통한 UFG 형성 연구에 있어 중요한 자료가 될 것이다. 실제로 강의 초기 미세조직을 변화시킴으로써 UFG 형성에 필요한 변형

량을 크게 감소시킨 결과도 보고되고 있어 [6] 미세조직에 관한 연구의 필요성은 더욱 강조되고 있다.

따라서 본 연구의 목적은 저/중/고탄소강에서 변형 온도가 미세조직 및 물성에 미치는 영향을 살펴보고 이를 기반으로 온간 압연에 대한 가능성을 제시하는 데 있다.

2. 실험방법

탄소 함량의 영향을 조사하기 위하여 저탄소강(0.06%C), 중탄소강(0.50%C), 고탄소강(0.92%C)의 세 가지 탄소강을 사용하였다. 이들 재료의 변태 온도를 측정하기 위해서 dilatometer를 사용하여 1000℃부터 200℃까지 0.1, 0.5, 1, 2, 5, 10, 50℃/s의 다양한 속도로 냉각하였다. 그 중, 실제 압연을 가장 잘 모사할 수 있는 조건인 2℃/s 냉각 결과를 토대로 압축 시험 조건을 설정하였으며 그 값은 표 1과 같다

1. 포항공과대학교 신소재공학과

2. POSCO 선제연구그룹

교신저자: 포항공과대학교 신소재공학과

E-mail: cslee@postech.ac.kr

Table 1 Experimental conditions for compression test
(단위: °C)

		저탄소강	중탄소강	고탄소강
변태전	$Ar_3/Ar_{cm}+40$	878	741	712
	$Ar_3/Ar_{cm}+20$	858	721	692
	Ar_3/Ar_{cm}	838	701	672
변태중	Ar_m	745.5	666	649
변태후	Ar_1-20	633	611	606
	Ar_1-40	613	591	586

압축시험은 Gleeble 3500을 사용하여 실시되었으며, 10x15mm로 가공한 시편에 표 2의 온도 조건 하에서 변형 속도 $10s^{-1}$, 변형량 0.6을 부과하였다. 미세조직은 각 시편의 중심부를 표면광택처리하고 2% nital용액으로 부식 후 광학현미경(OM) 및 고분해능 주사전자현미경(HR-SEM)으로 관찰하였다. 경도는 Vickers hardness tester를 이용하여 측정하였으며, 각 시편 당 10회씩 측정하여 최대값과 최소값을 제외한 나머지의 평균으로 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 미세조직

Fig. 1은 변형 온도에 따른 저탄소강의 미세조직 변화를 나타낸 것이다. 변태전 영역에서 변형을 받은 조직(Fig. 1 (a) ~ (c))과 변태가 시작된 이후 변형을 받은 조직(Fig. 1 (d)~(f))이 크게 다른 양상을 보인다. 전자의 경우는 전반적으로 등축상이 가까운 조직인 반면, 후자의 경우 페라이트 결정립이 연신되어 있으며 절반 이상의 결정립 내부에 아결정립(subgrain)이 형성된 것을 확인할 수 있다. 이는 Ar_3 이상의 온도에서 압축을 가할 경우 변형된 오스테나이트 결정립이 냉각되면서 페라이트와 펄라이트로 변태되나, Ar_1 이하의 온도에서 압축할 때는 변형 후 상변태가 일어나지 않아 변형 이력을 그대로 가지고 있기 때문이다.

또한 변태중 변형을 받은 조직(Fig. 1 (d))에서 결정립계가 톱니모양으로 굴절되는 현상(grain boundary serration)이 관측되었다. 이는 변태 종료 후 변형을 받은 시편(Fig. 1 (e) ~ (f))에서는 관측되지 않았다. 이러한 굴절 결정립계는 변태 시 비교적 높은 온도에서 변형을 받아 동적 회복(dynamic recovery)이 더욱 활성화되고, 이로 인해 전위가 재배열(polygonization)됨으로써 생성되는 것으로

판단된다 [7]. 동시에 오스테나이트가 페라이트로 변태되는 도중에 변형이 가해짐으로써, 성장 중인 결정립계가 불균일한 변형력을 받는 것도 한 원인으로 사료된다.

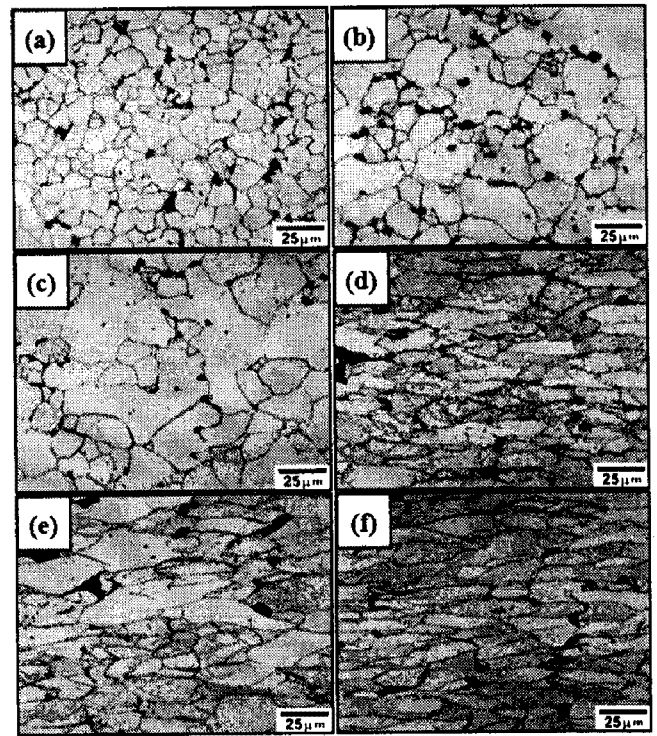


Fig. 1 OM microstructures of the low carbon steel deformed at (a) 878 °C, (b) 858 °C, (c) 838 °C, (d) 745.5 °C, (e) 633 °C and (f) 613 °C

Fig. 2는 변형 온도에 따른 중탄소강의 미세조직 변화를 나타내고 있다. 변태전 영역(Fig. 2 (a) ~ (c))의 경우 미변형 시의 미세조직에 비해 다량의 초석 페라이트가 형성되었다. 이는 오스테나이트 미세결정 영역에서 변형을 가함으로써 초석 페라이트의 생성 구동력(driving force)이 증가했기 때문으로 사료된다. 또한 변형 온도가 내려감에 따라 층상 조직을 이루고 있던 펄라이트가 점차 휘고 분절되어감을 알 수 있다. 변태중/후 영역(Fig. 2 (d) ~ (f))에서는 펄라이트의 시멘타이트 판 대부분이 서브마이크로의 미세한 입자로 분절되어 있다.

Fig. 3는 고탄소강의 미세조직 변화를 나타낸 것이다. 고탄소강 역시 중탄소강의 경우와 마찬가지로 변형 온도가 낮을수록 펄라이트 조직의 분절 정도가 심해지는 경향을 보인다. 고탄소강의 경우 전체가 펄라이트 조직으로 구성되어 있으므로 변형량을 증가시킬 경우 미세한 페라이트 결정립과

시멘타이트 입자를 지닌 UFG 조직을 형성할 것으로 예상된다.

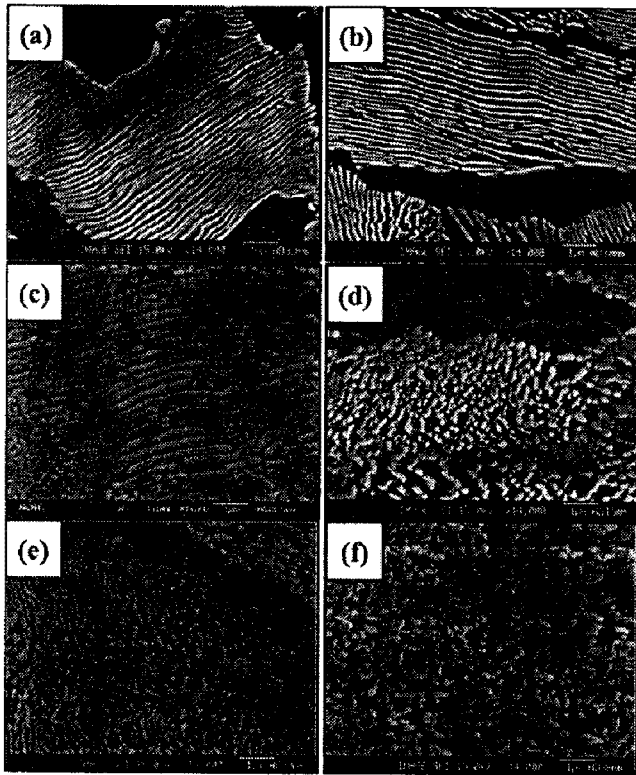


Fig. 2 SEM microstructures of the medium carbon steel deformed at (a) 741°C, (b) 721°C, (c) 701°C, (d) 666°C, (e) 611°C and (f) 591°C

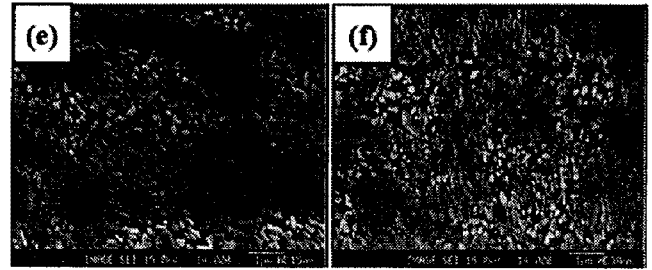


Fig. 3 SEM microstructures of the high carbon steel deformed at (a) 704°C, (b) 684°C, (c) 664°C, (d) 637.5°C, (e) 591°C and (f) 571°C

3.2 경도

Fig. 4에 각 탄소강의 변형 온도에 따른 경도를 나타내었다. 하얀색으로 표시된 점은 어떠한 변형도 가하지 않았을 때의 경도를 의미한다. 전반적으로 탄소 함량이 높을수록, 변형 온도가 낮을수록 경도가 증가함을 알 수 있다.

저탄소강의 변태전 변형(Fig. 1 (a) ~ (c)) 시 미변형 시편에 비해 경도가 소량 감소하는데, 이는 결정립 성장에 의한 것으로 판단된다. 이보다 더 낮은 온도에서는 페라이트 결정립의 연신과 아결정립의 형성으로 인해 일관적인 경도의 증가를 보이고 있다. 중탄소강의 경우 변태 이전의 경도에 비해 변태중 구간 이후에서 경도가 크게 향상되는데, 이는 Fig. 2에서 언급하였듯이 낮은 경도를 지니는 초석 페라이트의 양 차이에 기인한 것이다.

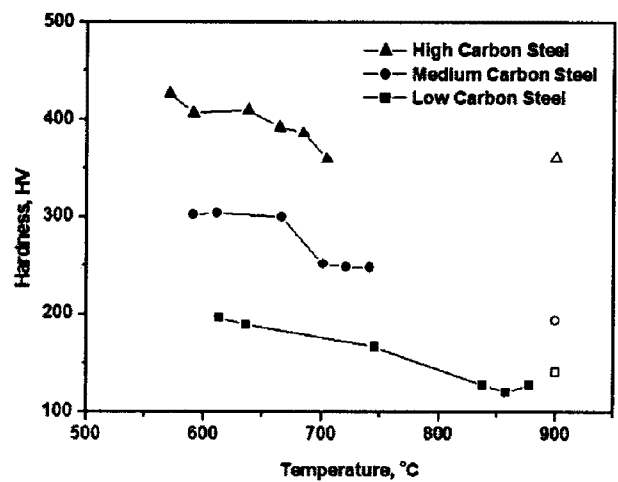


Fig. 4 Hardness variation with deformation temperatures of carbon steels

4. 결 론

본 연구에서는 저/중/고탄소강에서 변형 온도에 따른 미세조직 및 경도 변화를 알아보기 위하여 변태 전/중/후에 압축실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 저탄소강 및 중탄소강의 경우 변태전 변형을 받은 강과 변태중/후 변형을 받은 강의 미세조직이 전혀 다른 양상을 보였다. 후자의 경우 변형 후 상변태가 일어나지 않아 결정립이 연신되었고 일부 결정립 내에서 아결정립이 형성되었다.

(2) 변태 도중 변형을 받은 저탄소강은 동적 회복에 따른 전위 재배치와 변형 중 상변태에 의한 굴절된 결정립계를 형성하였다.

(3) 중탄소강 및 고탄소강의 경우 변형 온도가 낮을수록 펄라이트의 분절 정도가 증가하여 더욱 미세한 시멘타이트 입자를 형성하였다.

(4) 전체적으로 탄소 함량이 높고 변형 온도가 낮을수록 높은 경도를 나타내었다.

후 기

본 연구는 POSCO의 연구비 지원에 의해 이루어진 것으로 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] R. Song, D. Ponge, D. Raabe, 2005, Mechanical properties of an ultrafine grained C-Mn steel processed by warm deformation and annealing, *Acta Mater.*, Vol. 53, pp. 4881 ~ 4892
- [2] N. Tsuji, et al., 2008, Managing Both Strength and Ductility in Ultrafine Grained Steels, *ISIJ Int.* Vol. 48, pp. 1114 ~ 1121
- [3] S. Torizuka, A. Ohmori, S.V.S. Narayana Murty, K. Nagai, 2006, Effect of strain on the microstructure and mechanical properties of multi-pass warm caliber rolled low carbon steel, *Scripta Mater.*, Vol. 54, pp. 563 ~ 568
- [4] T. Inoue, F. Yin, Y. Kimura, 2007, Strain distribution and microstructural evolution in multi-pass warm caliber rolling, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 466, pp. 114 ~ 122
- [5] Y. Kimura, T. Inoue, F. Yin, K. Tsuzaki, 2008, Inverse Temperature Dependence of Toughness in an Ultrafine Grain-Structure Steel, *Science*, Vol. 320, pp. 1057 ~ 1060.
- [6] Y. Okitsu, N. Takata, N. Tsuji, 2009, A new route to fabricate ultrafine-grained structures in carbon steels without severe plastic deformation, *Scripta Mater.*, Vol. 60, pp. 76 ~ 79
- [7] R.D. Doherty, et al., 1997, Current issues in recrystallization: a review, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 238, pp. 219 ~ 274