

# 저탄소 마르텐사이트 강의 냉간압연과 온간압연을 통한 미세조직 개질

이종철<sup>1</sup>, 강의구<sup>1</sup>, 이종원<sup>1</sup>, 오창석<sup>2</sup>, 김성준<sup>2</sup>, 남원종<sup>1,\*</sup>

## Abstract

There have been a number of works on manufacturing ultrafine grained steels with average ferrite grain sizes of smaller than a few micrometers to develop beneficial high strength steels. Among microstructures in low carbon steels, lath martensite is known to be useful to produce an ultrafine grained ferrite matrix and finely globular cementite particle. Thus, severe plastic deformation and subsequent annealing at lower temperature of lath martensite would become an effective way to produce ultrafine grained steels.

However, most ultrafine grained steels exhibited a total elongation of a few per cent in tensile tests. Such a defect is one of the primary factors restricting the potential applications of ultrafine grained steels. Therefore, the improvement of the strength-elongation balance is required for the application of ultrafine grained structural steels.

In this study, the effect of deformation temperatures on microstructure, such as ferrite grain size and the distribution of cementite particles, and mechanical property of lath martensite steels, was investigated. Specimens were fabricated through cold rolling or warm rolling and subsequent annealing.

**Key Words** : lath martensite, cold rolling, warm rolling, ultrafine grain

## 1. 서론

최근에 많은 연구자들의 연구에 의해서 초 미세 결정립 재료를 제조하는 여러 강가공법들이 개발 중에 있다. 이런 강가공법에 의해 제작된 재료들은 우수한 기계적 성질을 기대 할 수 있으며, 다양한 강가공법들이 제안되고 있다[1-7]. 그 결과, Equal-Channel Angular Pressing(ECAP) [1-3], Accumulative Roll Bonding (ARB)[4-5] 는 부피변화와 잔류 가공 없이 결정립 미세화를 이룰 수 있는 효과적이고 널리 알려진 방법이지만 불연속 공정이며 제품의 형상 및 치수 등에 제한을 받고, 상당한 가공량을 요구하기 때문에 일반적인 산업현장의 적용에 한계가 있다.

또한 극저온 압연은 일반적인 냉간 압연의 같은 압하량에 비해 강도가 높으며, 연속적인 공정이라는 장점을 지니고 있다[6-7].

반면에, 여러 연구에서 저탄소 마르텐사이트강

을 특별한 강가공 없이 냉간및 온간압연만을 통하여 결정립 미세화로 높은 기계적 강도를 이루었으며, 이후 어닐링 열처리를 통하여 적절한 인성을 얻을 수 있었다. 하지만 이들은 많은 가공을 통하여 높은 강도를 얻었지만 오히려 인성의 감소에 대해서는 설명하지 못하였다[10]. 따라서 본 연구의 목적은 미세한 페라이트 결정립과 균일한 탄화 석출물을 얻음으로써 높은 기계적 성질을 얻고, 적절한 가공량과 이후 어닐링 열처리 조건을 최적화 하는 것이 목적이 되겠다.

## 2. 실험 방법

본 연구에서는 일반적으로 열간 압연 된 초기 두께 5mm의 저탄소 판재강을 사용하였으며 합금 성분은 Table. 1 과 같다. 가공하기 이전에 1273K 온도에서 30분간 오스테나이트화 후 상온의 물에서 퀘칭하여 마르텐사이트를 만들었다. 냉간압연은

1. 국민대학교

2. 기계

# 교신저자: 남원종, wjn@kookmin.ac.kr

상온에서 30%, 50%, 60%씩 각각 7, 14, 18pass 를 실시하였고, 온간 압연은 473K와 523K의 온도에서 Sn bath에 3분간 침적한 뒤, 30% 압연을 실시하였다. 이후 어닐링 열처리는 각각 723K에서 873K까지 5분동안 실시하였다.

기계적 성질은 인장시험을 통하여 상온에서 압연방향으로 변형속도는  $1.5 \times 10^{-3}/s$  였으며, 인장시험편은 ASTM 규격의 subsize로 실험하였다. 초기 미세조직은 3%나이탈 용액으로 애칭하여 광학현미경으로 관찰하였으며, 이후 가공과 어닐링 열처리한 미세조직은 압연방향으로 기계적 연마 후 8% percloric acid + 15% methanol + 77% acetic acid 용액으로 11V와 -253K 온도에서 twin jet polishing 하여 TEM으로 관찰하였다.

Table. 1 Chemical composition

C	Mn	Si	P	S	Fe
0.25	0.4	0.3	0.05	0.002	-

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 미세조직

초기조직의 미세조직을 관찰하기 위해 광학현미경으로 관찰한 결과 Fig. 1 과 같이 마르텐사이트로 구성됨을 알 수 있었다.

Fig. 2(a) 는 30% 냉간압연과 Fig. 2(b)~(d) 는 이후 어닐링 한시험편의 TEM 미세조직 사진이다. Fig. 2(a) 의 사진에서는 일반적으로 강가공된 재료에서 나타나는 lamellar dislocation cell과 shear band가 관찰되었다. Lamellar dislocation cell의 간격은 대략 50~60nm 이며, 내부에는 높은 전위밀도를 보였다[9]. 이후 773K에서 5분동안 어닐링한 시험편에서는 재결정온도인 823K에 도달하지 않았기 때문에 재결정된 결정립은 보이지 않았지만 탄화물들이 lamellar dislocation boundary를 따라 rod 형태로 균일하게 관찰 되었다(Fig. 2(b)). 823K에서 어닐링한 시험편에서는 재결정온도인 결정립들이 관찰 되었으며 탄화물도 구형의 형태를 나타내었다. 그리고 결정립 내부에 전위들이 많이 감소한 것을 알수 있었다(Fig. 2(c)).

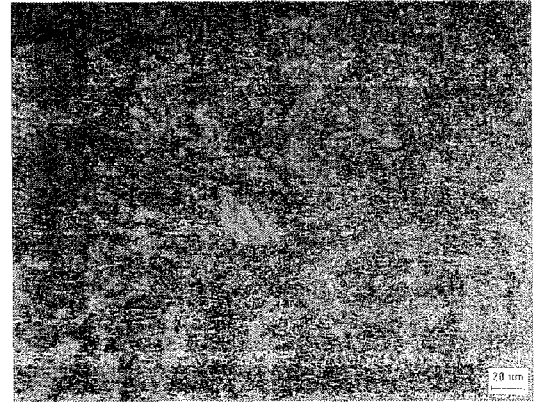


Fig. 1 OM microstructure of the as-quenched martensite in the 0.25 wt% C steel before rolling

더 높은 온도인 873K에서 어닐링한 시험편은 탄화물 성장한 모습이 관찰되었다.

Fig. 3(a-b)는 각각 50%, 60% 가공하여 773K에서 5분동안 어닐링한 시험편이다. 이 사진에서는 가공을 많이 하면 할수록 계면에서 lamellar dislocation boundary 흔적을 따라 탄화물이 석출됨이 관찰 되어졌다. 이는 가공이 더해짐에 따라 cell 내부에 전위의 양이 증가하여 탄소확산의 통로역할을 하게 되어 계면에 존재하는 잔류오스테나이트에서 생성된 cementite의 성장을 촉진시키는 것으로 판단되어진다. 따라서, 계면에 생성된 cementite는 pinning 효과로 인해 결정립의 성장을 억제하여 “extended recovery” 가 발생하였다[11].

#### 3.2 기계적 성질

Table. 2 는 각 시험편의 인장시험의 데이터이다. 냉간압연 30%~60% 실시한 시험편은 2GPa에 근접 하였으며 온간압연 실시한 시험편은 2GPa보다 더 높은 기계적 강도를 보였다. 이는 잔류오스테나이트의 분해로 인한 약간의 강도증가로 판단된다. 그리고 가공으로 인한 취성의 성질은 어닐링을 실시하여 충분한 연성을 확보하였다. 그러나 냉간가공을 50%~60% 실시한 경우 가공량이 많기 때문에 1GPa 이상의 강도를 보이지만 계면에서 발생된 cementite에 의해서 결정립 성장을 억제하여 연성의 증가는 이루어지지 않았다.

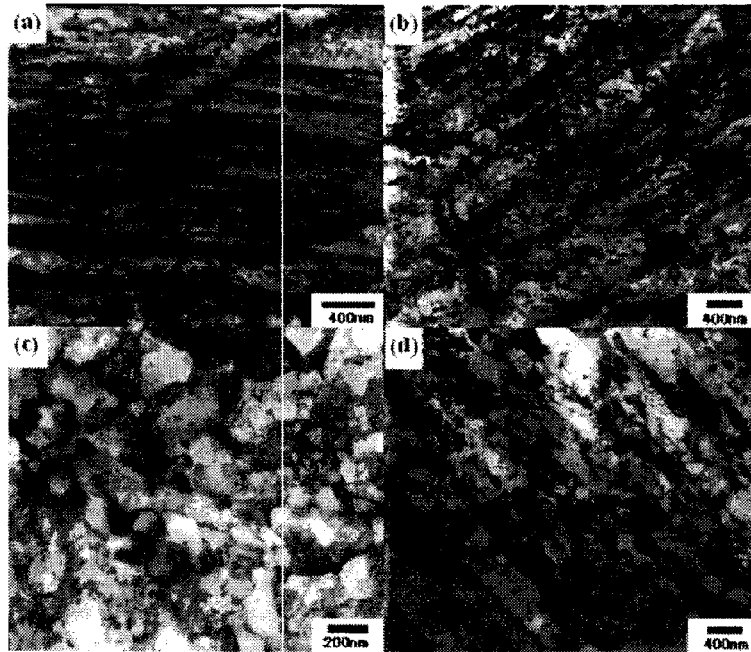


Fig. 2 TEM microstructure of the 0.25 wt% C steel (a) cold-rolling to reduction 30%, and subsequent annealing at various temperature (b) 773K, (c) 823K, (d) 873K for 5min, respectively

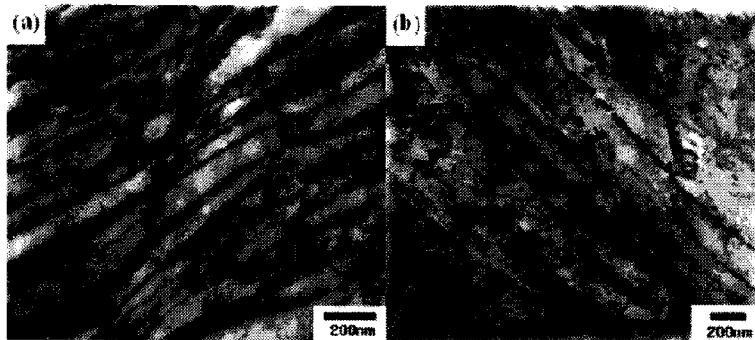


Fig. 3 TEM microstructure of the 0.25 wt% C steel subsequent annealing at 773K for 5min at various cold-rolling reduction (a) 50%, (b) 60%, respectively

processing	annealing	Tensile strength	Total elongation	processing	annealing	Tensile strength	Total elongation
Tempering	-	1491MPa	5.4%	Cold30%	-	1741MPa	3.2%
	773K	949MPa	17.6%		773K	1230MPa	19.1%
	823K	748MPa	16.1%		823K	1071MPa	14.5%
	873K	754MPa	19.7%		873K	1042MPa	16.2%
Cold50%	-	1954MPa	5.2%	Cold60%	-	1980MPa	4.7%
	773K	1376MPa	8.7%		773K	1449MPa	7.8%
	823K	1204MPa	10.6%		823K	1239MPa	8.6%
	873K	1122MPa	11.7%		873K	1174MPa	6.2%
Warm473K 30%	-	2033MPa	4.5%	Warm523K 30%	-	1949MPa	4.1%
	723K	1074MPa	17.3%		723K	1159MPa	16.45%
	773K	1010MPa	16.5%		773K	1095MPa	17.47%

	823K	930MPa	17.3%		823K	992MPa	16.87%
--	------	--------	-------	--	------	--------	--------

**Table. 2 Mechanical properties of lath martensite cold-rolled and warm-rolledannealedat various temperatures for 5 min**

#### 4. 결 론

- (1) 저탄소 마르텐사이트강을 냉간압연과 온간압연을 실시하여 결정립 미세화를 이루었으며 이후 어닐링 열처리를 통하여 우수한 기계적 성질을 얻었다.
- (2) 잔류오스테나이트 분해온도인 523k에서 온간압연 함으로써 냉간압연한 시편에 비해 약간의 우수한 기계적 성질을 기대할 수 있었다.
- (3) 재결정 온도이상인 873K에서 어닐링 실시하였음에도 불구하고 결정립은 성장이 발생하지 않은 것은 결정립계면에 있는 탄화물의 pinning 효과에 의해 “extended recovery” 가 일어난 것으로 보인다.
- (4) 마르텐사이트강에 많은 가공을 가한 뒤, 어닐링 열처리를 실시하면 계면을 따라 cementite의 석출이 발생하여 기계적 성질을 저하시킨다.

#### 참 고 문 헌

[1] J. K. Kim, H. K. Kim, J. W. Park, W. J. Kim, 2005, Large enhancement in mechanical properties of the 6061 Al alloys after a single pressing by ECAP, Scripta materialia., vol 53, pp1207~1211

[2] Jing Tao Wang, Cheng Xu, Zhong Ze Du, Guo Zhong Qu, Terence G. Langdon, 2005, Microstructure and properties of a low-carbon steel processed by equal-channel angular pressing, materials science and engineering A., vol 410~411, pp312~315

[3] Si-Young Chang, Byong-Du Ahn, Sung-Kil Hong, Shigeharu Kamado, Yo Kojima, Dong Hyuk Shin, 2005, Tensile deformation characteristics of a nanostructure 5083 Al alloy, Journal of alloys and compounds., vol 386, pp 197~201

[4] Kyung-Tae Park, Hyuk-Joo Kwon, Woo-Jin Kim,

Young-Suk Kim, 2001, Microstructural characteristics and thermal stability of ultrafine grained 6061 Al alloy fabricated by accumulative roll bonding process, Materials science and engineering A., vol 316, pp 145~152

[5] N. Tsuji, Y. Ito, Y. Saito, Y. Minamino, 2002, Strength and ductility of ultrafine grained aluminium and iron produced by ARB and annealing, Scripta materialia., vol 47, pp 893~899

[6] T. Shanmugasundaram, B. S. Murty, V. Subramanya Sarma, 2006, Development of ultrafine grained high strength Al-Cu alloy by cryorolling, Scripta materialia., vol 54, pp 2013~2017

[7] Young Bum Lee, Dong Hyuk Shin, Kyung-Tae Park, Won Jong Nam, 2004, Effect of annealing temperature on microstructures and mechanical properties of a 5083Al alloy deformed at cryogenic temperature, Scripta materialia., vol 51, pp 355~359

[8] Jing Tianfu, Gao Yuwei, Qiao Guiying, Li Qun, Wang Tiansheng, Wang Wei, Xiao Furen, Cai Dayoung, Song Xinyu, Zhao Xin, 2006, Nanocrystalline steel processed by severe rolling of lath martensite, Materials science and engineering A., vol 432, pp 216~220

[9] R. Ueji, N. Tsuji, Y. Minamino, Y. Koizumi, 2002, Ultrafine refinement of plain low carbon steel by cold-rolling and annealing of martensite, Acta materialia., vol 50, pp 4177~4189

[10] Rintaro Ueji, Nobuhiro Tsuji, Yoritoshi Minamino, Yuichiro Koizumi, 2004, Effect of rolling reduction on ultrafine grained structure and mechanical properties of low-carbon steel thermomechanically processed from martensite starting structure, Science and technology of advanced materials., vol 5, pp 153~162

[11] S. Hossein Nedjad, M. Nili Ahmadabadi, T. Furuhashi, 2008, The extent and mechanism of nanostructure formation during cold rolling and aging of lath martensite in alloy steel, Materials science and engineering A., vol 485, pp 544~549