

## 고탄소 나노 베이나이트강의 미세조직과 기계적 특성에 미치는 오스템퍼링의 영향

이지민<sup>1</sup> · 고석우<sup>1</sup> · 함진희<sup>2</sup> · 송영범<sup>2</sup> · 김홍규<sup>2</sup> · 황병철<sup>1, #</sup>

### Effect of Austempering on Microstructure and Mechanical Properties of High-Carbon Nano-Bainite Steels

J. M. Lee, S. W. Ko, J. H. Ham, Y. B. Song, H. K. Kim, B. Hwang

(Received April 30, 2019 / Revised June 27, 2019 / Accepted July 3, 2019)

#### Abstract

This study deals with the effect of austempering temperature and time on the microstructures and mechanical properties of high-carbon nano-bainite steels. Although all the austempered specimens are mainly composed of bainite, martensite, and retained austenite, the specimens which are austempered at lower temperatures contain finer packets of bainite. As the duration for austempering increases, bainite packets are clearly seen due to larger amount of carbon atoms being redistributes into bainite and retained austenite during bainite transformation. As the austempering time increases, the hardness of the specimens gradually decreases as a result of lower martensite volume fraction, and later increases again due to the formation of nano-bainite structure. The Charpy impact test results indicate that the impact toughness of the austempered specimens can be improved if the formation of nano-bainite structure and the transformation induced plasticity effect of retained austenite are optimized at higher austempering temperature.

**Key Words** : Nano-Bainite, Austempering, Retained Austenite, TRIP Effect, Impact Toughness

#### 1. 서 론

나노 베이나이트강(nano-bainite steel)은 마르텐사이트 변태 시작 온도 직상의 저온에서 오스템퍼링(austempering)을 실시하여 미세한 베이나이트 페라이트(bainitic ferrite)와 잔류 오스테나이트의 층상 구조를 통해 기존 베이나이트강 대비 강도 및 경도를 향상시킨 소재이다[1]. 최근 높은 강도와 내충격성을 요구하는 다양한 분야에 적용하기 위해 나노 베이나이트강에 대한 폭넓은 연구가 진행되고 있다[2,3].

일반적으로 나노 베이나이트강은 베이나이트 페라이트 판(plate)과 필름(film) 형태의 잔류 오스테나이트가 미세해질수록 수많은 계면에 의한 전위 이동의 방해로 인해 강도가 증가된다[4]. 이로 인해 특정한 소재에서 요구되는 강도 개선을 위해 탄소 함량을 높여 베이나이트 변태 온도를 낮추려는 연구가 꾸준히 진행되어 왔다[5,6]. 그러나 탄소 함량이 높아질수록 베이나이트 변태 완료 시간이 증가하고, 충격 인성이 감소하는 단점이 있다. 또한 베이나이트 변태를 가속화하기 위한 Al 과 Co 의 첨가는 생산 비용을 크게 증가시킨다[7~9].

최근 Zhang 등은 외부 응력에 의해 잔류 오스테나이트가 마르텐사이트로 변태하는 변태유기소성(TRIP, transformation induced plasticity) 효과에 의해 나

1. 서울과학기술대학교 신소재공학과

2. 국방과학연구소 제4기술연구본부

# Corresponding Author, Seoul National University of Science and Technology, E-mail: bhwang@seoultech.ac.kr, ORCID ID: 0000-0001-6330-4747

노 베이나이트강의 충격 인성이 향상된다고 보고하였다[10]. 일반적으로 잔류 오스테나이트의 기계적 안정성은 결정립 크기, 형태, 탄소 함량 및 결정 방위 등에 영향을 받는다고 알려져 있다[11,12]. 따라서 nano 베이나이트강에서는 잔류 오스테나이트와 기계적 특성의 상관관계에 대한 이해가 매우 중요하다.

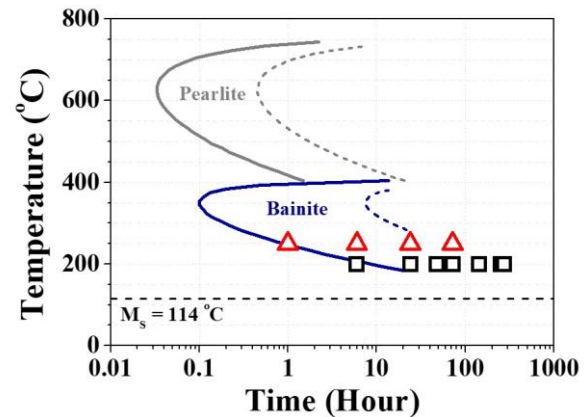
본 연구에서는 고탄소 nano 베이나이트강의 물성을 향상시키기 위해 베이나이트 변태를 모두 완료시키지 않고 급랭 처리를 통한 마르텐사이트 형성과 잔류 오스테나이트의 변태유기소성 효과를 통해 우수한 강도와 인성의 조합을 얻고자 하였다. 이를 위해 오스템퍼링 온도와 시간을 조절하여 다양한 미세조직을 갖는 시편을 제조한 후 미세조직의 특징과 변화를 관찰하고, 경도 및 충격 시험을 실시하여 미세조직과 기계적 특성의 상관관계를 고찰하였다.

## 2. 실험 방법

본 연구에서 사용된 강재의 화학조성은 Fe-0.81C-1.45Si-1.98Mn-1.5(Cr+Mo)(wt.%)이며, 오스템퍼링 온도와 시간에 따라 다양한 미세조직을 갖는 시편들이 제조되었다. 이들은 900 °C 의 온도에서 15 분간 오스테나이트화 처리 후 200 °C 및 250 °C 에서 각각 1, 6, 24, 48, 72, 144, 250 및 275 시간 동안 오스템퍼링을 실시하고 급랭 처리되었다. Fig. 1 에 베이나이트 변태 온도 범위내에서 진행된 오스템퍼링 조건과 함께 JMatPro 소프트웨어(Version 7.0, Sente Software Ltd., UK)로 계산된 TTT(time-temperature-transformation) 곡선을 나타내고, 마르텐사이트 변태 시작 온도( $M_s$ )를 표시하였다. 모든 시편들은 베이나이트 영역에서 급랭되기 때문에 베이나이트, 마르텐사이트 및 잔류 오스테나이트 혼합 조직이 형성될 것으로 예상되었다.

오스템퍼링 후 각 시편들의 미세조직은 판재의 옆면(longitudinal-short transverse plane)을 기계적으로 연마하고, 3% 나이탈 용액으로 에칭한 후 광학현미경 및 전계 방출 주사전자현미경(FE-SEM, field-emission scanning electron microscopy, SU8010, Hitachi, Japan)으로 관찰하였다.

경도는 마이크로 비커스 경도계(FM-800, Future-tech, Japan)를 이용하여 500 gf 의 하중 하에서 측정



**Fig.1 Time-temperature-transformation(TTT) curve of an Fe-0.81C-1.45Si-1.98Mn-1.5(Cr+Mo) alloy. Open symbols indicate austempering temperatures and times. Martensite transformation start temperature ( $M_s$ ) was calculated by JMatPro v7.0 software.**

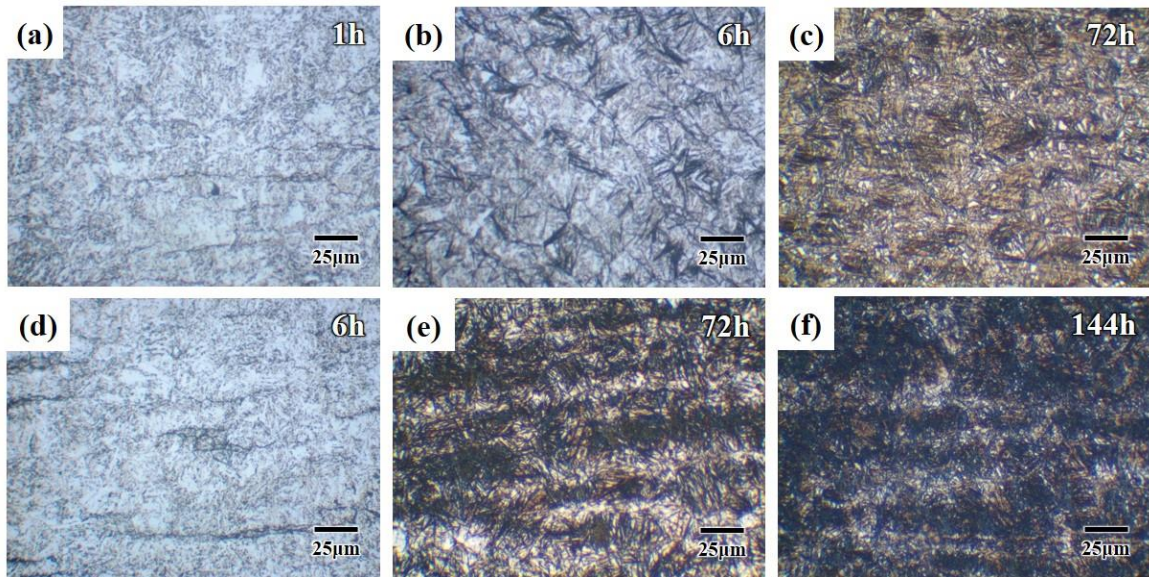
하였다. 충격 시험은 ASTM E23 의 표준 시험법에 따라 L-T(longitudinal-transverse) 방향으로 10 x 10 x 55 mm 크기의 표준 샤르피 충격 시편을 가공한 후 750 J 용량의 충격 시험기(PSW 750, ZwickRoell, Germany)를 사용하여 상온(25 °C)에서 실시하였다. 충격 시험 후 시편의 파면은 주사전자현미경을 이용하여 분석하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

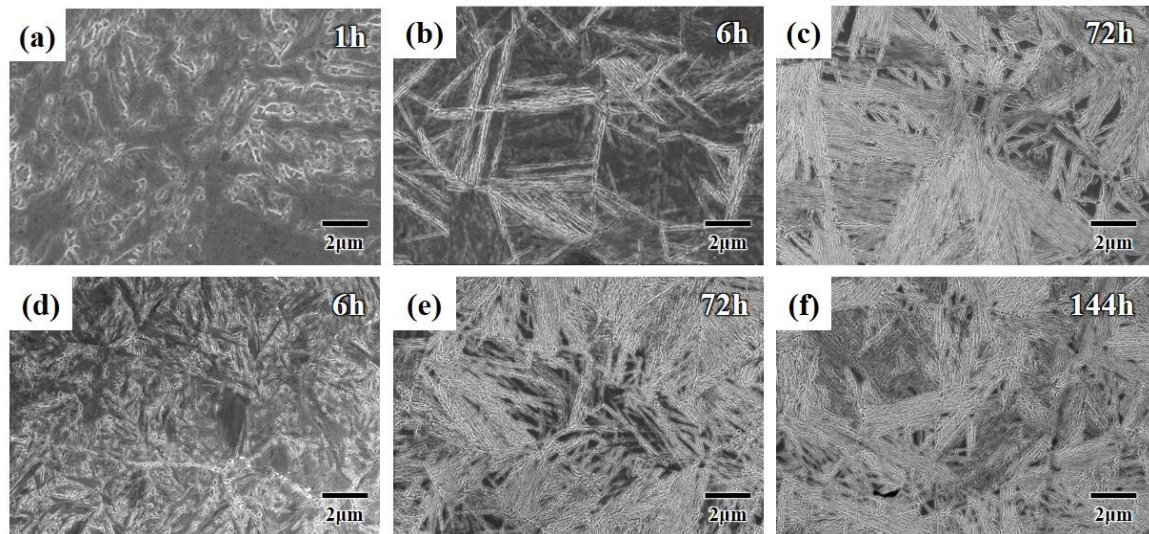
### 3.1 오스템퍼링에 따른 미세조직 변화

오스템퍼링 온도와 시간에 따른 광학현미경 미세조직 사진을 Fig. 2 에 나타내었다. 200 °C 에서 6 시간 및 250 °C 에서 1 시간 오스템퍼링한 시편들의 미세조직은 TTT 곡선의 베이나이트 변태 시작점 근처에서 급랭 처리를 통해 베이나이트가 거의 생성되지 않고, 미세한 마르텐사이트가 주로 형성된 것을 확인할 수 있다. 오스템퍼링 시간이 증가할수록 베이나이트 변태가 진행되어 200 °C 에서 144 시간 및 250 °C 에서 72 시간 오스템퍼링한 시편들은 대부분 베이나이트 조직을 나타내었다.

보다 자세한 미세조직 관찰을 위한 주사전자현미경 사진을 보면(Fig. 3), 오스템퍼링 시간에 따라 형성되는 베이나이트 분율이 크게 달라지는 것을 볼 수 있다. 오스템퍼링 시간이 증가할수록 베이나이트

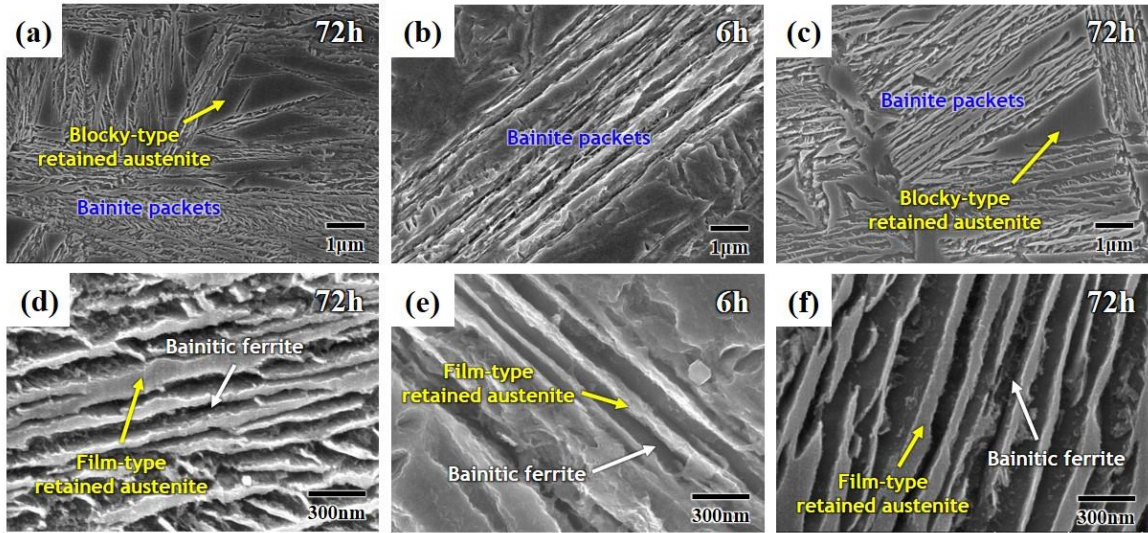


**Fig. 2** Optical micrographs of the high-carbon nano-bainite steel specimens austempered at the (a)-(c) 250 °C and (d)-(f) 200 °C for different hours



**Fig. 3** SEM micrographs of the high-carbon nano-bainite steel specimens austempered at the (a)-(c) 250 °C and (d)-(f) 200 °C for different hours





**Fig. 4** High-magnification SEM micrographs of the high-carbon nano-bainite steel specimens austempered at the (a) and (d) 200 °C, and (b), (c), (e) and (f) 250 °C for different hours

페라이트 판과 필름 형태의 잔류 오스테나이트가 층상 구조로 이루어진 베이나이트 패킷(packet)이 관찰되며, 최종적으로 베이나이트 패킷과 블록(blocky) 형태의 잔류 오스테나이트가 존재하는 것을 확인할 수 있다.

한편 오스테퍼링 조건에 따른 베이나이트 두께 변화를 관찰하기 위해 고배율로 촬영한 주사전자현미경 사진을 Fig. 4에 나타내었다. 또한 이들 결과로부터 베이나이트 페라이트 판과 필름 형태의 잔류 오스테나이트의 두께 변화를 정량적으로 측정하여 Table 1에 나타내었다. 200 °C 및 250 °C에서 72시간 오스테퍼링한 시편들은 베이나이트 변태동안 베이나이트 페라이트에서 잔류 오스테나이트로 충분한 탄소 확산이 일어나 뚜렷한 베이나이트 패킷이 형성된 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 베이나이트 변태가 모두 완료될 경우 오스테퍼링 온도가 낮을수록 베이나이트 핵생성 구동력이 크기 때문에 초기 오스테나이트 결정립계에서 핵생성이 활발히 일어나 변태 분율이 증가하고, 성장하는 동안 서로 간섭하기 때문에 미세해진다고 알려져 있다[13~16]. 따라서 Table 1에서 오스테퍼링 온도가 감소할수록 베이나이트 페라이트 판과 필름 형태의 잔류 오스테나이트의 두께가 감소하는 것은 베이나이트 핵생성 구동력이 증가하기 때문으로 판단된다. 또한 Table 1의 결과를 통해 적절한 오스테퍼링 조건에 따라 100 nm 이하의 미세한 나노 베이나이트가 형성됨을 확인할 수 있었다.

**Table 1** Thickness of bainitic ferrite and retained austenite in the high-carbon nano-bainite steel specimens austempered at different temperatures and times

Austempering condition		Thickness (nm)	
		Bainitic ferrite	Retained austenite
250 °C	72 h	74 ± 40	94 ± 27
	6 h	232 ± 70	116 ± 15
200 °C	144 h	55 ± 33	78 ± 14
	72 h	63 ± 38	66 ± 10

### 3.2 미세조직 변화에 따른 경도 및 충격 특성

오스테퍼링 온도와 시간에 따른 시편의 경도 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 오스테퍼링 온도에 따른 경도 값을 비교해보면, 낮은 온도에서 오스테퍼링된 시편들은 같은 오스테퍼링 시간에서 경도 값이 더 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 오스테퍼링 온도가 낮을수록 더 미세한 베이나이트 패킷이 생성되기 때문이다. 한편 베이나이트 변태가 충분히 완료되기 전 오스테퍼링 시간이 증가할수록 일정 시간 경도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 베이나이트 변태가 증가함에 따라 마르텐사이트 분율이 낮아져서 경도가 감소하는 것으로 판단된다. 200 oC에서는 오스테퍼링 시간이 증가할수록 경도가 감소하다 다시 증가하는 경향을 보였다. Bhadeshia 등은 저온에서

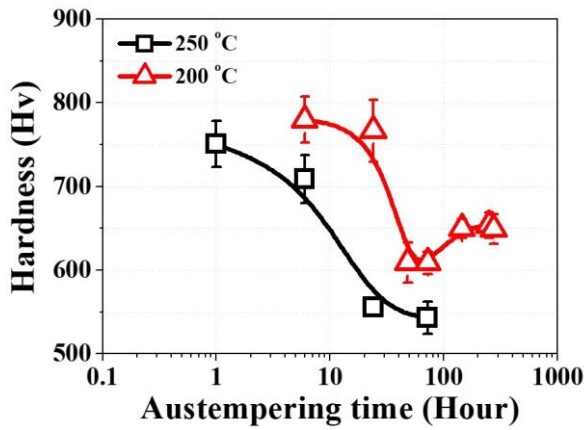


Fig. 5 Vickers hardness of the high-carbon nano-bainite steel specimens plotted as a function of austempering time

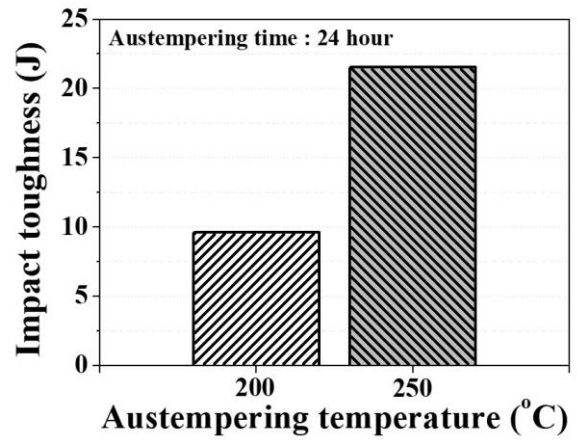


Fig. 6 Charpy impact toughness of the high-carbon nano-bainite steel specimens with different austempering temperatures for 24 hr

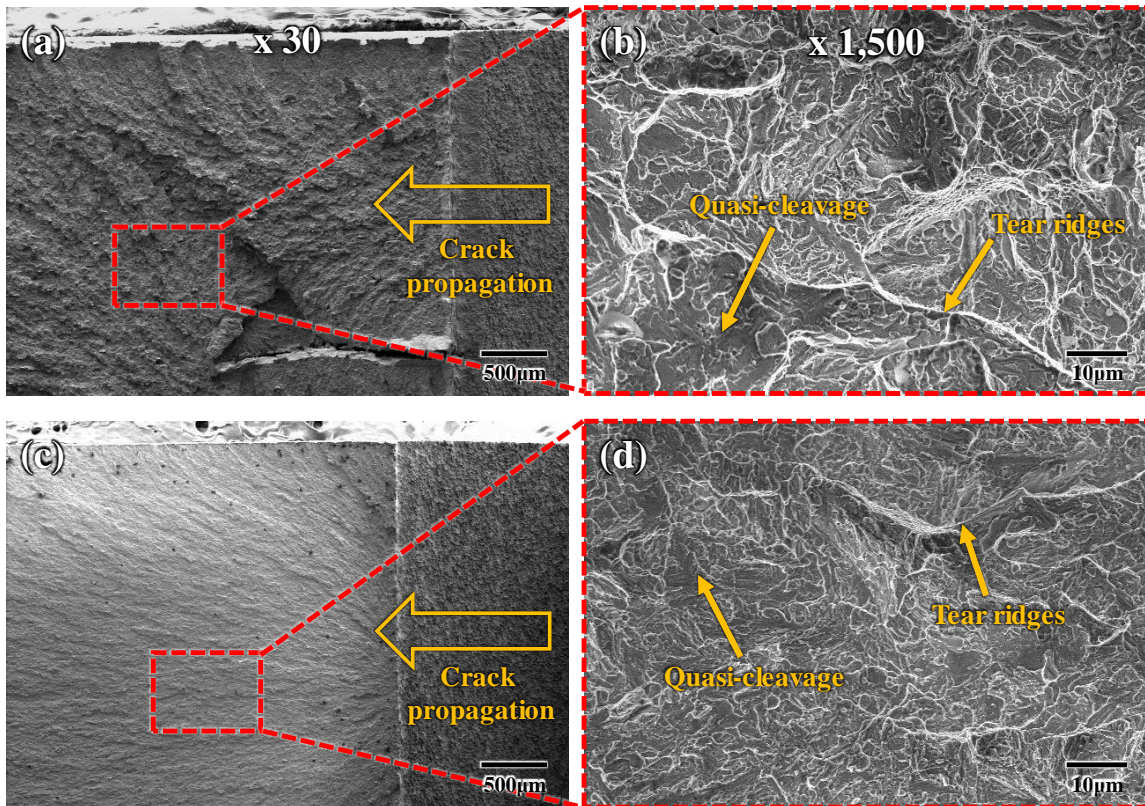


Fig. 7 SEM fractographs of Charpy impact specimens austempered at the (a) and (b) 250 °C, and (c) and (d) 200 °C for 24 hr

오스템퍼링에 의해 형성된 나노 베이나이트가 시편의 경도 향상에 기여한다고 주장하였다[4]. 따라서 200 °C에서 72 시간 이상 오스템퍼링을 진행한 시편의 경우 나노 베이나이트가 대부분 형성되어 마르텐사이트 분율을 감소해 경도가 다시 증가한 것으로 판단된다.

한편 오스템퍼링 온도에 따른 충격 인성 변화를 살펴보면(Fig. 6), 오스템퍼링 온도가 높은 경우 충격 인성 값이 상대적으로 높은 것을 알 수 있다. 이는 베이나이트 변태가 모두 완료되기 전 동일한 시간의 오스템퍼링을 실시할 때, 오스템퍼링 온도가 증가할수록 베이나이트 분율이 증가하고 베이나이트 변태에 의한 탄소 확산이 미변태 오스테나이트의 안정도를 증가시켜 급랭에 의한 마르텐사이트 변태를 억제하기 때문으로 생각할 수 있다. 따라서 250 °C에서 오스템퍼링한 시편의 경우 200 °C 시편보다 경한 마르텐사이트 분율 감소 및 잔류 오스테나이트의 변태유기소성 효과 증가 때문에 충격 인성 값이 더 높은 것으로 판단된다.

또한 오스템퍼링 온도에 따른 충격 시편의 파면 분석 결과를 보면(Fig. 7), 모두 quasi-cleavage facets 및 tear ridges가 형성되는데 250 °C에서 오스템퍼링한 시편의 경우 보다 많은 tear ridges와 소성변형이 관찰되었다. 이는 250 °C에서 24 시간 오스템퍼링한 시편의 경우 상대적으로 안정화된 잔류 오스테나이트가 충격 시험 동안 변태유기소성 효과를 충분히 나타내기 때문이라고 생각된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 오스템퍼링 온도와 시간에 따라 다양한 미세조직을 갖는 고탄소 나노 베이나이트강을 제조하고, 미세조직 분석, 경도 및 충격 시험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 오스템퍼링 온도가 감소할수록 베이나이트 핵 생성 구동력이 커져 보다 미세한 베이나이트가 형성되었다. 또한 오스템퍼링 시간이 증가함에 따라 베이나이트 변태에 의한 탄소 확산에 의해 베이나이트 패킷이 뚜렷하게 형성되었다.

(2) 오스템퍼링 조건에 따른 경도 시험 결과 오스템퍼링 시간이 증가할수록 경도 값이 감소하다 다시 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 베이나이트 변태에 의해 마르텐사이트 분율이 감소함에 따라

경도 값이 감소하고, 이후 미세한 나노 베이나이트의 형성이 경도 향상에 기여하기 때문이다.

(3) 충격 시험 결과 베이나이트 변태가 완료되기 전 동일한 시간의 오스템퍼링을 실시한 경우 오스템퍼링 온도가 높아질수록 베이나이트 분율 및 잔류 오스테나이트의 변태유기소성 효과가 증가하여 상대적으로 높은 충격 인성 값을 나타내었다.

#### 후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

#### REFERENCES

- [1] X. Zhao, F. Zhang, Z. Yang, J. Zhao, 2019, Cyclic Deformation Behavior and Microstructure Evolution of High-Carbon Nano-Bainitic Steel at Different Tempering Temperatures, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 751, pp. 323~331.
- [2] W. Solano-Alvarez, E. J. Pickering, H. K. D. H. Bhadeshia, 2014, Degradation of Nanostructured Bainitic Steel Under Rolling Contact Fatigue, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 617, pp. 156~164.
- [3] W. Solano-Alvarez, E. J. Pickering, M. J. Peet, K. L. Moore, J. Jaiswal, A. Bevan, H. K. D. H. Bhadeshia, 2016, Soft Novel Form of White-Etching Matter and Ductile Failure of Carbide-Free Bainitic Steels Under Rolling Contact Stresses, *Acta Mater.*, Vol. 121, pp. 215~226.
- [4] H. K. D. H. Bhadeshia, Nanostructured Bainite, 2009, *Proc. Math. Phys. Eng. Sci.*, Vol. 466, No. 2113, pp. 3~18.
- [5] J. Tian, G. Xu, Z. Jiang, H. Hu, M. Zhou, 2018, Effect of Ni Addition on Bainite Transformation and Properties in a 2000 MPa Grade Ultrahigh Strength Bainitic Steel, *Met. Mater. Int.*, Vol. 24, No. 6, pp. 1202~1212.
- [6] S. Zhang, P. Wang, D. Li, Y. Li, 2015, Investigation of the Evolution of Retained Austenite in Fe-13%Cr-4%Ni Martensitic Stainless Steel During Intercritical Tempering, *Mater. Des.*, Vol. 84, pp. 385~394.
- [7] J. M. Lee, S. I. Lee, H. S. Lim, B. Hwang, 2018, Effect



- of Isothermal Heat Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of Medium-Carbon Bainitic Steels, *Kor. J. Mater. Res.*, Vol. 28, No. 9, pp. 522~527.
- [8] V. T. T. Miihkinen, D. V. Edmonds, 1987, Microstructural Examination of Two Experimental High-Strength Bainitic Low-Alloy Steels Containing Silicon, *Mater. Sci. Tech.*, Vol. 3, No. 6, pp. 422~431.
- [9] C. Garcia-Mateo, F. G. Caballero, H. K. D. H. Bhadeshia, 2003, Acceleration of Low-Temperature Bainite, *ISIJ Int.*, Vol. 43, No. 11, pp. 1821~1825.
- [10] M. Zhang, T. S. Wang, Y. H. Wang, J. Yang, F. C. Zhang, 2013, Preparation of Nanostructured Bainite in Medium-Carbon Alloy Steel, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 568, pp. 123~126.
- [11] G. K. Tirumalasetty, M. A. van Huis, C. Kwakernaak, J. Sietsma, W. G. Sloof, H. W. Zandbergen, 2012, Deformation-Induced Austenite Grain Rotation and Transformation in TRIP-Assisted Steel, *Acta Mater.*, Vol. 60, No. 3, pp. 1311~1321.
- [12] A. Varshney, S. Sangal, S. Kundu, K. Mondal, 2016, Superior Work Hardening Behavior of Moderately High Carbon Low Alloy Super Strong and Ductile Multiphase Steels with Dispersed Retained Austenite, *Mater. Des.*, Vol. 99, pp. 439~448.
- [13] S. B. Singh, H. K. D. H. Bhadeshia, 1998, Estimation of Bainite Plate-Thickness in Low-Alloy Steels, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 245, No. 1, pp. 72~79.
- [14] C. Garcia-Mateo, F. G. Caballero, T. Sourmail, M. Kuntz, J. Cornide, V. Smanio, R. Elvira, 2012, Tensile Behaviour of a Nanocrystalline Bainitic Steel Containing 3 wt% Silicon, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 549, pp. 185~192.
- [15] H. Beladi, I. B. Timokhina, X. Y. Xiong, P. D. Hodgson, 2013, A Novel Thermomechanical Approach to Produce a Fine Ferrite and Low-Temperature Bainitic Composite Microstructure, *Acta Mater.*, Vol. 61, No. 19, pp. 7240~7250.
- [16] J. Zhao, B. Lv, F. Zhang, Z. Yang, L. Qian, C. Chen, X. Long, 2019, Effects of Austempering Temperature on Bainitic Microstructure and Mechanical Properties of a High-C High-Si Steel, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 742, pp. 179~189.