

## 고합금 공구강의 최적 오스테나이트 처리 온도 결정

박동성\* · 전중환\*\* · 이민하\*\* · 이석재\*<sup>†</sup>

\*전북대학교 신소재공학부, \*\*한국생산기술연구원 융합공정소재그룹

### Determination of Optimal Austenitizing Temperature in High-Alloyed Tool Steels

Dongsung Park\*, Joong-Hwan Jun\*\*, Min-Ha Lee\*\*, Seok-Jae Lee\*<sup>†</sup>

\*Division of Advanced Materials Engineering, Chonbuk National University

\*\*Advanced Process and Material R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology

**Abstract** In the present study, we investigated the optimal austenitizing temperature of high-alloyed tool steels from an industrial point of view. Austenitizing temperatures for manufacturing 25 commercial tool steels were surveyed with their alloy compositions. The relationship between the austenitizing temperatures and the critical equilibrium temperatures by thermodynamic-based calculation was analyzed and a correlation was found. Based on the austenitizing temperatures of 25 commercial tool steels and the thermodynamic calculation results, we proposed a simple equation to predict an optimal austenitizing temperature to achieve superior mechanical properties of high-alloyed tool steels. The applicability of the proposed equation was experimentally validated with a new developed tool steel.

(Received May 12, 2017; Revised May 24, 2017; Accepted May 30, 2017)

**Key words** : austenitizing temperature; carbide precipitation; equilibrium temperature; optimization; high-alloyed tool steels

### 1. 서 론

합금 원소가 많이 첨가되어 우수한 기계적 물성을 보이는 공구강은 단조, 압연, 절삭가공, 프레스 성형 등 소재를 가공하는 거의 모든 제조업 분야에서 기계 장치와 부품으로 널리 사용되고 있다. 새로운 고강도 소재들이 개발되고 사용 환경이 더욱 가혹해짐에 따라 이들 소재를 가공하기 위한 공구강 역시 높은 물성이 요구되고 있다. 예를 들어, 자동차 산업에서는 엄격해지는 환경규제에 대비하여 연비 향상을 위해 차량을 경량화하고 있다. 차량 경량화는 기존 소재보다 우수한 강도를 가진 소재를 사용해야 하며 이에 따라 초고장력강의 사용이 증가하고 있다[1]. 결국 초고장력강과 같이 더욱 높아진 강도를 가진 금속 소재를 가공하기 위해서는 이에 맞는 향상된 기계적 특성을 가지는 공구강이 사용되어야 한다.

공구강이 높은 경도와 강도 및 우수한 내마모성의

특성을 가지기 위해서는 C, Cr, Mo, V, W 등 과 같은 합금 원소들이 다량 첨가되어야 하고 각 단계의 열처리 공정을 통해 MC, M<sub>2</sub>C, M<sub>3</sub>C, M<sub>6</sub>C, M<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 등의 다양한 탄화물들이 석출되어 고강도와 고내마모성의 기계적 특성을 가지는 공구강을 얻을 수 있다[2]. 지금까지 여러 연구자들이 공구강의 물성 개선과 관련된 다양한 연구들을 보고하고 있다. 공구강은 높은 C 함량과 함께 강력한 탄화물 형성 원소들이 많이 포함되어 있어 열처리 중 조대한 탄화물이 형성될 수 있다. 조대한 탄화물들에서 응력 집중이 일어나 균열이 생기게 되어 파괴가 일어나는 것으로 알려져 있다[3, 4]. 이는 인성과 강도가 저하되는 원인으로 작용한다. 따라서 공구강의 새로운 합금 성분 설계와 관련된 연구는 지속적으로 보고되고 있다[5-7]. 응고 중 발생하는 정출 탄화물을 최대한 억제하고 동시에 템퍼링 처리 동안 미세 탄화물의 생성을 통해 물성을 향상시키고자 하는 연

<sup>†</sup>Corresponding author. E-mail : seokjaelee @jbnu.ac.kr  
Copyright © The Korean Society for Heat Treatment

구들이 많이 보고되고 있다. 소재 개발과 함께 공정 변화를 통한 물성 개선에 관한 연구도 많이 진행되고 있다. 고온의 오스테나이트 영역에서 침탄, 봉화 처리, 질화처리 등을 통해 표면층을 경화시켜 경도와 내마모성을 향상시켜 공구강의 수명을 늘리는 여러 연구가 보고되고 있다[8, 9]. 이는 공구강 부품의 교체 주기를 늘리고 교체에 따른 비용과 시간을 절약하여 제품의 생산성과 경쟁력을 높이는데 중요한 기여를 할 수 있다. Kong 등은 냉간 공구강의 고온 가스질화 처리 효과에 대해 연구했다[10]. 다양한 가스 질화처리 온도와 템퍼링 후 서브제로 처리 효과로 인한 경도의 증가를 미세조직 분석과 연계하여 보고했다. Aghajani 등은 열간 공구강에서 질화처리 온도와 시간에 따른 질화층 두께를 예측하고자 했다[11]. 다양한 질화처리 온도와 시간에 따른 질화층 두께를 측정하고, Arrhenius식을 이용하여 질소 확산에 대한 활성화 에너지와 확산계수를 계산했다.

지금까지 공구강의 물성 개선을 위해 새로운 합금을 설계하고 최신의 장비를 통해 표면처리를 실시하는 등의 많은 연구가 보고되고 있지만, 오스테나이트 처리 온도 자체에 관한 연구는 상대적으로 매우 미비하다. 일반 탄소강이나 저합금강에서는 오스테나이트 처리 동안 결정립의 성장이 주된 관심사였지만 고합금 공구강에서는 오스테나이트 처리 동안 이전 공정에서 존재하던 탄화물들이 모두 용해되지 않을 뿐만 아니라 다양한 탄화물들의 용해와 석출이 동시

에 발생한다. 따라서 오스테나이트 처리 동안 결정립의 성장만이 아닌 탄화물의 종류, 분율, 크기, 개수 등과 같이 최종 물성에 영향을 미칠 수 있는 특성을 모두 고려해야 한다. 본 연구에서는 고합금 공구강의 최종 물성에 영향을 미치는 최적의 오스테나이트 처리 온도에 대해 응용적인 측면에서 접근하고자 상용 공구강 소재들의 실제 오스테나이트 처리 온도를 조사하고 이를 분석해 보았다. 분석에 사용된 상용 공구강들의 주요 상변태 온도들을 열역학 시뮬레이션을 통해 계산하고 실제 사용중인 오스테나이트 처리 온도를 결정함에 있어 계산된 온도와의 관계를 조사해 보았다.

## 2. 상용 공구강의 오스테나이트 처리 온도 분석

현재 판매되고 있는 상용 고합금 공구강들의 화학 조성과 실제 조업에서 사용되는 오스테나이트 처리 온도를 문헌과 제조사 홍보자료 등을 통해 조사하였다[12-21]. Table 1은 조사된 25개 공구강의 합금 원소들과 오스테나이트 처리 온도( $T_{aust}$ )의 범위를 보여주고 있다. 조사된 실제 조업에서 사용되는 오스테나이트 처리 온도는 최소 820°C부터 최대 1230°C까지 합금 성분에 따라 크게 변화함을 알 수 있다. 일부 공구강은 실제 오스테나이트 처리 온도의 범위를 명시했는데 이와 같은 경우에는 중간 값을 사용하

**Table 1.** Range of alloying elements and austenitizing temperature of 25 commercial tool steels [12-21]. Alloying elements are in wt.%.  $T_{aust}$  means the austenitizing temperature in degree Celsius

	Min.	Max.	Avg.
C	0.45	2.23	1.06
Cr	0.4	12.25	6.46
Mn	0.3	2	0.55
Mo	0.2	5.5	2.12
Si	0.2	1.5	0.58
V	0.3	2	0.99
W	0.7	6.5	3.16
Cu	0.25	0.25	0.25
Ni	0.4	4	1.73
Ti	0.04	0.04	0.04
Co	5	5	5
$T_{aust}$	820	1230	1031

였다. 가장 온도 범위가 넓은 경우는 중간 온도를 기준으로 대략  $\pm 20^\circ\text{C}$ 였다. 분석 결과 오스테나이트 처리 온도가 특정 합금 원소에 대해 일정한 경향성을 가지고 변화하는 것은 관찰되지 않았다. 공구강들은 합금 성분의 함량이 일반 저합금강과는 달리 매우 높고 오스테나이트 처리 전 상태에서 이미 많은 석출물들이 존재하며 이 석출물들이  $A_{c3}$  이상의 고온에서도 모두 용해되는 것이 아니라 석출상에 따라 각각 다른 거동을 하기 때문에 오스테나이트 처리 온도가 특정 합금 원소 함량에 따라 일정하게 변화하지 않음을 알 수 있다.

조사된 25개 상용 공구강의 열역학적 평형 온도를 열역학 계산전용 소프트웨어인 MatCalc<sup>TM</sup>를 이용하여 계산해 보았다. 계산된 평형 온도는 응고 중 액상이 모두 사라지는 응고 완료 온도( $T_S$ ), 냉각 중 FCC 오스테나이트 상에서 BCC 페라이트 상의 변태가 개시되는 온도( $A_{c3}$ ), 그리고 고온의 액상 영역

에서부터 고상 영역으로 응고가 일어나고 냉각이 진행되는 과정에서 최초로 생성되는 탄화물의 평형 석출 개시 온도( $T_{PS}$ )이다. 냉각 중 최초로 석출되는 평형 탄화물 종류는 MC, Cementite,  $M_6C$ ,  $M_7C_3$ 이며 강재의 화학 조성에 따라  $T_{PS}$  온도와 함께 탄화물 종류가 결정된다. 계산된 각 평형 온도와 실제 오스테나이트 처리 온도와의 관계를 Fig. 1에 나타내었다. 계산된  $T_S$  온도가 높은 공구강의 경우 오스테나이트 처리 온도는 상대적으로 낮은 값을 보였다. 반면에 공구강의 계산된  $A_{c3}$  온도가 증가할수록 오스테나이트 처리 온도가 일정하게 증가하는 경향이 관찰되었다. 이와 유사하게 계산된  $T_{PS}$  온도와 오스테나이트 처리 온도 사이에는 비례하는 관계가 있음을 확인하였다.  $T_S$  온도와  $A_{c3}$  온도 구간은 기지가 오스테나이트 단상인 영역이다. 각 공구강의  $T_S$  온도와  $A_{c3}$  온도의 평균 온도( $= (T_S + A_{c3})/2$ )를 오스테나이트 처리 온도와 비교해 보았다. 평균 온도가 상

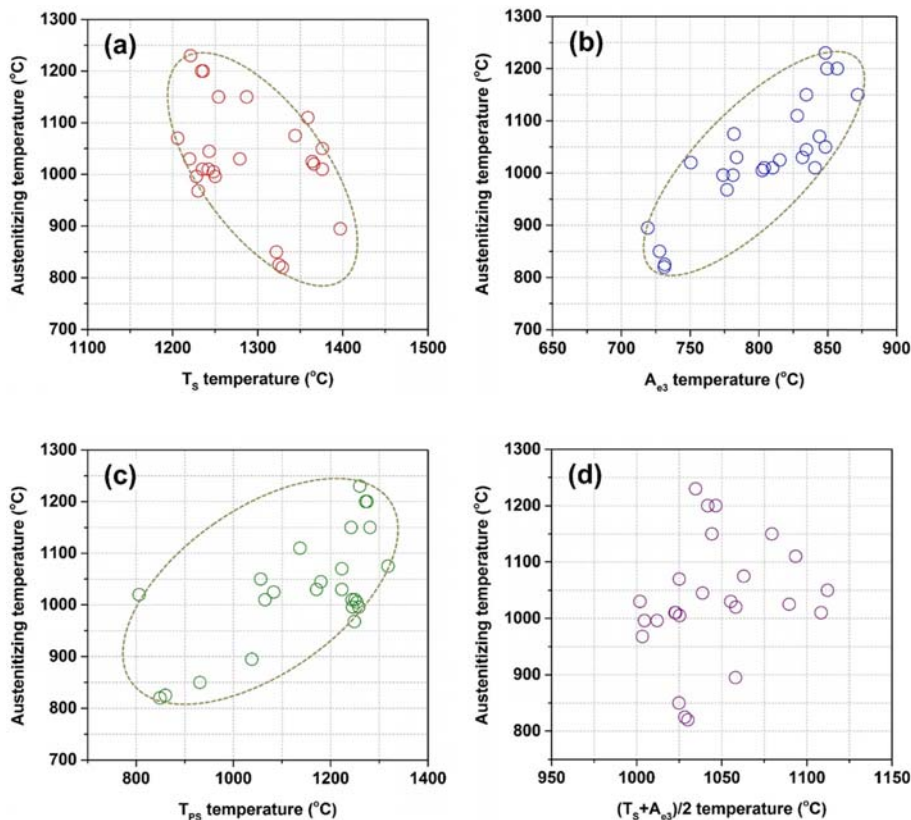


Fig. 1. Relationship between the austenitizing temperature and several equilibrium temperatures: (a)  $T_S$ , (b)  $A_{c3}$ , (c)  $T_{PS}$ , and (d)  $(T_S + A_{c3})/2$ .

승할수록 오스테나이트 처리 온도가 약간 증가하는 것처럼 보였으나 이 두 온도 사이에는 특별한 상관 관계가 없는 것으로 판단된다.

실제 오스테나이트 처리 온도와 열역학적 평형 온도를 분석해 보면 오스테나이트 처리 온도가  $T_S$  온도와  $A_{e3}$  온도 구간을 벗어나지는 않았다.  $(T_S + A_{e3})/2$  온도와  $A_{e3}$  온도의 평균 온도가 1035°C에서 약 110°C 구간 내에서 변화할 때 실제 오스테나이트 처리 온도의 평균 온도는 1029°C로  $(T_S + A_{e3})/2$  온도의 평균 온도와 매우 비슷하지만 변화 폭은 410°C로 매우 넓음을 알 수 있다. 이는 결국 고합금 공구강의 오스테나이트 처리 온도의 결정은 가열 중 기지가 BCC 페라이트 상에서 FCC 오스테나이트 상으로 변태되고 오스테나이트 결정립의 성장을 제어하는 것뿐만 아니라 오스테나이트 기지 내에서 연속적으로 변화하는 다양한 석출상의 제어에 따라 좌우됨을 알 수 있다. 따라서 실제 오스테나이트 처리 온도와  $(T_S + A_{e3})/2$  온도의 차이는 해당 공구강 조성에 따라 생성되는 석출물의 고온 변화를 제어하는 것과 관계가 있을 것으로 생각된다. 이에 다음과 같은 평가 온도( $T_{EV}$ )를 정의해 보았다.

$$T_{EV} = \frac{T_S + A_{e3}}{2} - T_{Aust} \quad (1)$$

최근 공구강의 합금 설계는 냉각 중 고온에서 최초로 생성되는 탄화물의 석출을 최대한 지연시키고 열처리로 인한 탄화물의 성장을 억제시킬 수 있는 방향으로 행해지고 있다. 최종 기계적 성질에 영향을 미치는 주요 인자는 템퍼링 중 생성되는 미세한 2차 탄화물의 제어와 응고 과정 중 생성된 정출 탄화물의 성장 제어이다. 따라서 실제 행해지는 오스테나이트 처리는 상대적으로 고온에서 안정상인 정출 탄화물과 밀접한 관계가 있을 것으로 판단되어 식 (1)의 평가 온도와 열역학 계산으로 구한  $T_{PS}$  온도의 관계를 Fig. 2와 같이 비교해 보았다.  $T_{EV}$  온도와  $T_{PS}$  온도는 아래 식 (2)와 같이 직선적으로 반비례 관계에 있음을 확인하였다.

$$T_{PS} = -1.0201 \times T_{EV} + 1170.7 \quad (2)$$

이에 식 (2)에 식 (1)을 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

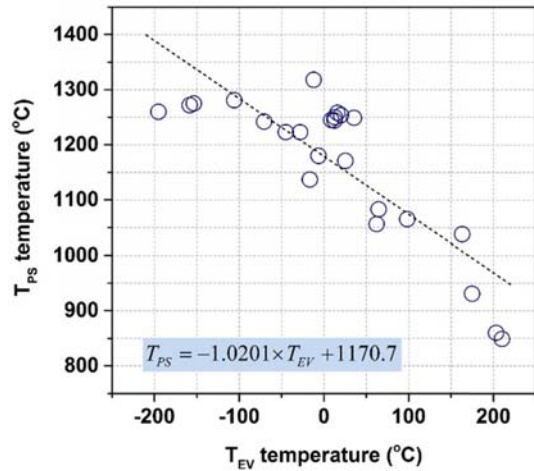


Fig. 2. Linear relationship between the  $T_{EV}$  temperature and the  $T_{PS}$  temperature.

$$T_{Aust}^{OPT} = \frac{T_S + A_{e3}}{2} + \frac{T_{PS} - 1170.7}{1.0201} \quad (3)$$

식 (3)은 25개 상용 공구강의 실제 오스테나이트 처리 온도와 해당 강종의 열역학 평형 온도와의 관계를 나타내고 있다. 여기서  $T_{Aust}^{OPT}$  온도가 현재 생산 중인 상용 공구강의 실제 오스테나이트 처리 온도, 즉 가장 우수한 기계적 성질을 얻기 위한 최적의 오스테나이트 처리 온도를 나타낸다.

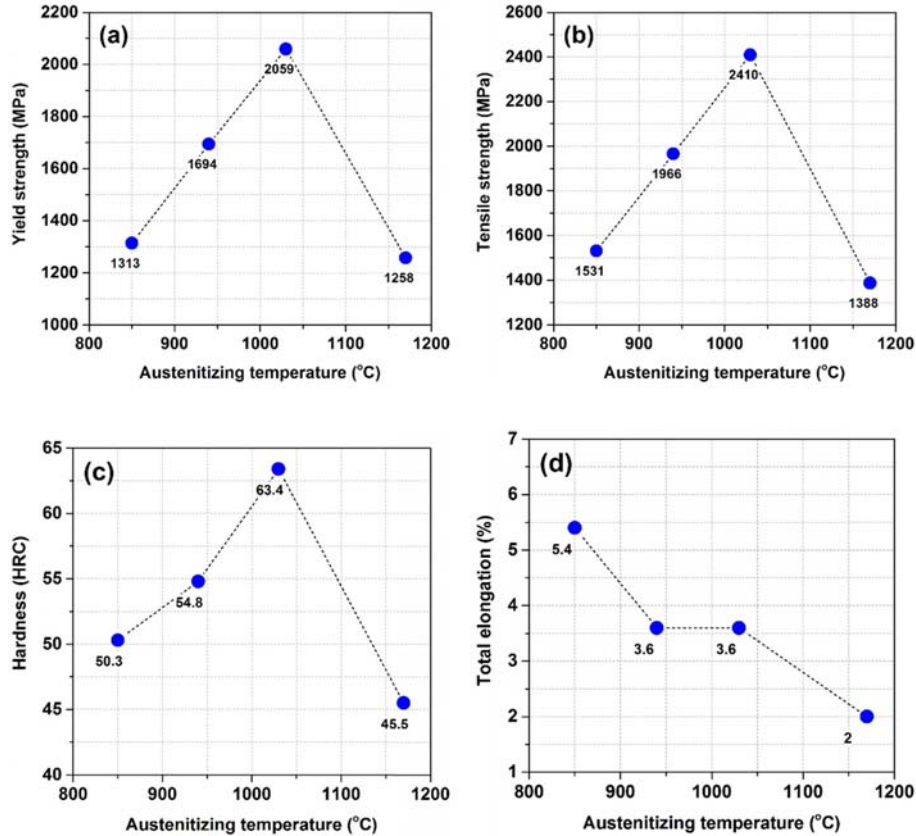
### 3. 최적 오스테나이트 처리 온도 수식 검증

식 (3)에서 제시한 최적의 오스테나이트 처리 온도 예측 수식의 타당성 확인을 위해 수식 유도에 사용하지 않은 개발 공구강[5]을 사용하여 검증 실험을 실시하였다. 실험에 사용된 개발 공구강의 조성은 Table 2와 같다.

개발 공구강을 이용해 ASTM E8 sub-size 인장 시편과 경도 측정과 미세조직 관찰을 위한 coupon 시편을 가공하였다. 시편 제작과 열처리 방법은 이전 연구 논문[5]에 자세히 설명되어 있다. 이번 검증 실험에서는 시편들을 각각 850°C, 940°C, 1030°C, 1170°C에서 30분간 오스테나이트 처리 후 공냉하였다. 냉각된 시편들은 동일하게 520°C에서 2시간씩 2회 템퍼링을 실시하였다. 상온 인장시험은 만능시험기(Instron 5569)를 이용하였고 변형 속도는

**Table 2.** Chemical composition of the sample used for verification (in wt.%) [5]

C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V	Fe
0.88	0.56	0.56	6.08	3.27	0.52	0.99	Bal.

**Fig. 3.** Effect of the austenizing temperature on the mechanical properties: (a) yield strength, (b) tensile strength, (c) hardness, and (d) total elongation.

$1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 이었다. 경도시험은 로크웰 경도기를 이용하여 5회 측정하고 평균값을 구하였다.

Fig. 3은 오스테나이트 처리 온도에 따른 검증 시편의 기계적 성질 변화이다. 1030°C에서 오스테나이트 처리한 시편에서 항복강도, 인장강도, 경도가 모두 높게 측정되었다. Table 2의 화학 조성에 대해 열역학 평형 온도를 계산하여 식 (3)에 대입해보면 계산된  $T_{Aust}^{OPT}$  온도가 1024°C였다. 이는 가장 우수한 기계적 성질을 보인 시편의 오스테나이트 처리 온도인 1030°C에 가장 근접한 온도이다. 이로서 식 (3)과 같이 제시된  $T_{Aust}^{OPT}$  온도가 새로운 공구강의 오스테나이트 처리 온도를 결정하는데 열역학 평형 온도에 기반한 최적의 값을 제시해 준다고 말할 수

있다. 1030°C에서 오스테나이트 처리한 시편에서 강도와 경도가 가장 높은 원인에 대해서는 직접적으로 열처리된 시편을 분석하지 않았으나 오스테나이트 처리 온도에 따른 석출 탄화물의 변화가 최종 기계적 성질에 직접적으로 영향을 미쳤기 때문으로 생각된다[22].

한편 1170°C에서 오스테나이트 처리를 실시한 시편에서 강도와 경도가 급격하게 저하되었다. 이와 유사한 결과들이 기존 연구에서 보고된 바가 있다. Yaso 등은 0.96%C-7.23%Cr 광과 1.40%C-11.59%Cr광에서 오스테나이트 처리 온도가 950°C에서 1200°C까지 상승할수록 급냉시 잔류 오스테나이트 분율이 급격하게 증가함을 관찰하였다[23]. 이는 고

온에서 탄화물 용해로 인해 기지 내에 C와 다른 합금 원소의 농도 증가가 마르텐사이트 개시( $M_s$ ) 온도를 낮추었기 때문이다. 동시에 오스테나이트 처리 온도가 1000~1050°C인 경우에 가장 높은 경도 값을 보였으며 1100°C 이상의 오스테나이트 처리 온도에서는 경도 값이 급감함을 보였다. 이는 높은 오스테나이트 처리 온도로 인한 오스테나이트 결정립 성장이 원인이라고 설명하고 있다. Kahrobaee와 Kashefi의 연구에서도 AISI D2 강외 오스테나이트 처리 온도가 1000°C에서 1130°C까지 상승함에 따라 냉각 후 잔류 오스테나이트 분율은 급격하게 증가하고 경도는 1025°C에서 가장 높은 값을 보였으나 오스테나이트 처리 온도가 올라감에 따라 급격하게 낮아짐을 확인하였다[24]. 이는 역시 오스테나이트 처리 온도가 높아질수록 잔류 오스테나이트 분율이 급격하게 증가하고 평균 오스테나이트 결정립의 크기도 증가했기 때문으로 보고하고 있다. Rehan 등은 5%Cr이 함유된 냉각 공구강에서 오스테나이트 처리 온도와 템퍼링 온도의 변화가 기계적 물성에 미치는 영향에 관해서 보고하고 있다[25]. 급냉 후 200°C의 낮은 온도에서 템퍼링을 실시한 경우 오스테나이트 처리 온도가 높을수록 항복 강도가 감소함을 관찰하였다. 이는 낮은 템퍼링 온도로 인해서 잔류 오스테나이트의 용해가 일어나지 않고 오스테나이트 처리 온도가 높을수록 많은 잔류 오스테나이트 분율이 관찰되기 때문이다. 하지만 525°C에서 템퍼링을 실시한 경우 대부분의 잔류 오스테나이트가 분해되어 오스테나이트 처리 온도에 무관하게 유사한 항복 강도를 보였다.

본 연구에서 사용한 검증 시편의 오스테나이트 처리 온도에 따른 잔류 오스테나이트 분율을 관찰하기 위해 X선 회절분석을 실시하였다. 잔류 오스테나이트 분율은 각 상의 회절강도를 이용한 식을 통해 계산한 기존 문헌들을 참고하여 구하였다[5, 6]. 계산된 잔류 오스테나이트 분율은 오스테나이트 처리 온도에 상관없이 모두 5% 미만이었다(850°C: 3.4%, 940°C: 4.0%, 1030°C: 4.6%, 1170°C: 4.7%). 이는 520°C의 비교적 높은 온도에서 템퍼링을 실시하여 대부분의 잔류 오스테나이트가 분해된 것으로 판단되며, 이전 연구 결과들과 일치한 결과를 보여준다[5, 6, 25]. 오스테나이트 결정립의 크기는 850°C와 940°C에서 오스테나이트 처리를 한 경우 10 μm 미만, 1030°C와 1170°C에서 오스테나이트 처리한 경우 각각 약 12 μm와 49 μm였다. 오스테나이트 결정립 크기가 줄어들수록 Hall-Petch 효과에 의해 항복강도와 경도는 증가하는 것으로 잘 알려져 있다. 하지만 본 검증 실험에서는 오스테나이트 결정립 미세화에 따른 기계적 물성 변화의 효과는 크게 작용하지 않은 것으로 생각된다. Hall-Petch 효과에 의한 결정립 미세화가 전체 강도 변화에 지배적이었다면 오스테나이트 처리 온도가 증가할수록 강도나 경도는 연속적으로 감소하는 결과를 보여야 한다. 따라서 Fig. 3과 같이 1170°C에서 오스테나이트 처리를 실시한 시편에서 강도와 경도가 급격하게 저하된 이유는 과열(over heating 또는 burning)에 의한 국부적인 용융이 발생하였기 때문으로 판단된다. 높은 용체화 처리 온도에 의한 과열로 국부적인 용융이 발생하면 액상에서 고상으로 응고가 일어나면서 공공

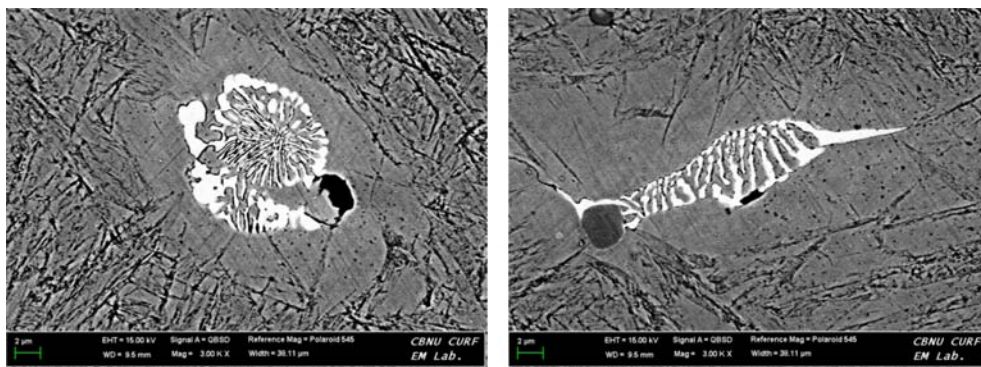


Fig. 4. Microstructural evolution due to partially melting at 1170°C.

형성과 수축이 발생하며 공석 탄화물이 생성된다. 공공과 수축 현상의 발생, 그리고 탄화물의 형태에 의해 국부적으로 소재가 약해지게 된다. 또한 과열로 인한 국부적 용융이 발생할 경우 낮은 응력에서도 쉽게 파괴가 일어난다고 알려져 있다[26, 27]. 실제 1170°C에서 오스테나이트 처리한 시편에서 Fig. 4와 같이 국부적으로 용융된 조직들이 관찰되었다. 1%C-4.2%Cr 고속도강을 레이저 용융을 시킨 경우에도 Fig. 4와 같은 수지상 미세조직(dendritic microstructure)이 관찰된다[28]. 검증 시편의 계산된  $T_s$  온도 1244°C였으나, 실제 평형 용융 온도보다 낮은 온도에서 편석등의 이유로 국부적 과열이 발생함이 보고되고 있다[29-31].

#### 4. 결 론

고합금 공구강의 오스테나이트 처리 온도는 결정립 성장뿐만 아니라 석출 탄화물의 변화와 그로 인한 기지내 조성의 변화에도 영향을 미치고 결국 최종 강도나 경도 등에 직접적으로 영향을 준다. 따라서 우수한 기계적 성질의 공구강을 개발하기 위해서는 최적의 오스테나이트 처리 온도를 결정하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 현재 생산중인 상용 공구강 25종의 오스테나이트 처리 온도를 조사하여 제품에 최적화된 오스테나이트 처리 온도와 열역학적 평형 온도와의 관계를 조사하였고 최적의 오스테나이트 처리 온도( $T_{Aust}^{OPT}$ )를 예측할 수 있는 식을 제시하였다. 새로 개발된 공구강의 실험 데이터를 이용해 제안된 식의 활용도를 성공적으로 검증하였다.  $T_{Aust}^{OPT}$  온도 예측식을 이용하면 앞으로 새롭게 개발되는 고합금 공구강의 최적의 오스테나이트 온도를 결정하는데 시간적, 비용적 측면에서 매우 유용하게 활용될 것으로 생각된다.

#### 후 기

본 연구는 한국(N0001713) 및 한국 산업 기술 평가관리원(KEIT)을 통한 통상 자원부(MOTIE)의 산업 기술 혁신 프로그램에 의해 지원받았으며, 이에 감사드립니다.

#### References

1. J. S. Choi, J. W. Lee, J. -H. Kim, F. Barlat, M. G. Lee and D. Kim : International Journal of Mechanical Sciences, **98** (2015) 144.
2. G. J. Park, M. W. Kang, J. G. Jung, Y. K. Lee and B. H. Kim : Journal of the Korean Society for Heat Treatment, **26** (2013) 72.
3. C. J. McMahon and M. Cohen : Acta Metallurgica, **13** (1965) 591.
4. J. Gurland : Acta Metallurgica, **20** (1972) 735.
5. S. Kang, M. W. Kim and S. J. Lee : Metals, **7** (2017) 12.
6. H. Y. Kim, J. Y. Kang, D. M. Son, D. S. Lee, T. H. Lee, W. C. Jeong and K. M. Cho : Journal of the Korean Society for Heat Treatment, **27** (2014) 242.
7. K. Fukaura, Y. Yokoyama, D. Yokoi, N. Tsujii and K. Ono : Metallurgical and Materials Transactions A, **35** (2004) 1289.
8. D. Panfil, M. Kulka, P. Wach, J. Michalski and D. Przystacki : Journal of Alloys and Compounds, **706** (2017) 63.
9. J. S. Lee, H. G. Kim and Y. Z. You : Journal of the Korean Society for Heat Treatment, **14** (2001) 27.
10. J. H. Kong, C. Y. Kang and J. H. Sung : Journal of the Korean Society for Heat Treatment, **22** (2009) 282.
11. H. Aghajani, M. Torshizi, and M. Soltanieh : Vacuum, **141** (2017) 97.
12. 금형 · 공구강 : <http://www.seahss.co.kr>
13. US 2000 : <http://www.varioedelstahl.ch>
14. SKH51 : <http://www.hojinsteel.com>
15. Premium 1.2360 : <http://www.premium-stahl.de>
16. Cryour 2746 : <http://www.schmolz-bickenbach.cz>
17. PSD1 : <http://daewonknife.co.kr>
18. Tool Steel Catalogue : <http://www.sanyo-steel.co.jp>
19. DC53 : <http://www.daido.co.jp>
20. Uddeholm Viking : <http://www.uddeholm.com>
21. General Catalog of YSS Tool Steels : <http://www.hitachi.co.jp>
22. G. Krauss : Steels - Processing, Structure, and Performance, ASM International, Materials Park, OH (2005) 535-559.
23. M. Yaso, S. Morito, T. Ohba, K. Kubota : Materials Science and Engineering A, **481** (2008) 770.
24. S. Kahrobaee and M. Kashefi : IEEE Transactions on Magnetics, **51** (2015) 6201707.
25. M. A. Rehan, A. Medvedeva, B. Hogman, L. E. Svensson and L. Karlsson : Steel Research International, **87** (2016) 1609.
26. G. Roberts, G. Krauss and R. Kennedy : Tool Steels, 5<sup>th</sup> ed, ASM International, Materials Park,

- OH (1998) 325-343.
27. G. E. Totten, M. Narazaki, R. R. Blackwood and L. M. Jarvis : ASM International, Failure Analysis and Prevention, ASM Handbook, **11** (2002) 192-223.
28. M. R. Ripoll, N. Ojala, C. Katsich, V. Totolin, C. Tomastik and K. Hradil : Materials and Design, **99** (2016) 509.
29. R. O. Ritchie and J. F. Knott : Metallurgical Transactions, **5** (1974) 782.
30. G. E. Hale and J. Nutting : International Metals Reviews, **29** (1984) 273.
31. I. A. Borisov : Metal Science and Heat Treatment, **43** (2001) 305.