

TTT/CCT 데이터를 이용한 저합금강의 죠미니 경화능 곡선 계산

정민수* · 손윤호**†

*한국생산기술연구원 열처리그룹, **(주) 유진에스엠씨

Calculation of Jominy Hardenability Curve of Low Alloy Steels from TTT/CCT data

Minsu Jung*, YoonHo Son**†

*Heat Treatment R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology

**YuJin SMC Co.

Abstract Jominy hardenability curves of low alloy steel containing less than 5 wt.% of alloying elements in total were calculated by applying Scheil's rule of additivity to pre-calculated isothermal transformation curve. Isothermal transformation curve for each phase in steel was approximated as a simple mathematical equation by using Kirkaldy's approach and all coefficients in the equation were estimated from experimental temperature-time-transformation (TTT) and/or continuous cooling transformation (CCT) data in the literature. Then jominy test with simple boundary conditions was performed in computer by applying the finite difference scheme. The resultant cooling curves at each location along a longitudinal direction of Jominy bar were applied to calculate phase fractions as well as mechanical properties such as micro Vickers hardness. The simulated results were compared with experimental CCT data and Jominy curves in the literature.

(Received January 9, 2019; Revised January 17, 2019; Accepted January 24, 2019)

Key words : Jominy hardenability curve, Low alloy steels, Phase transformation, Hardness, Simulation

1. 서 론

주어진 조성을 가진 철강재료를 적절한 가열과 냉각과정을 거치게 하면 내부조직이 온도와 시간에 따라 변화하여 결국 원하는 경도 등 물리적 기계적 특성을 얻을 수 있다. 널리 사용되고 있는 소입소려(Q/T) 처리에서는 먼저 철강재료를 고온으로 가열하여 오스테나이트 조직으로 만들고 일정시간 유지한 후 급냉하여 마르텐사이트 조직을 만든 다음 다시 낮은 온도로 재가열하여 템퍼드 마르텐사이트(tempered martensite)라고 불리는 인성이 큰 미세조직을 얻어낸다. 이처럼 비교적 단순해 보이는 열처리 공정은 실제로는 제품의 형상 및 크기와 냉각제 등 냉각조건에 따라 냉각 경로가 달라지게 되어 철강 내부에서 복잡한 조직변화를 거치게 되기 때문에 열처리 후 특성 예측의 한 방법으로 현장에서는 경화능 시험법인 죠미니 테스트가 널리 이용되어져 왔

다[1, 2]. 이 테스트를 통하여 죠미니 경화능 곡선(일명 죠미니 곡선)이 얻어지는데, 이 곡선은 노말라이징 후 일정 조건으로 가열된 특정 조성의 철강합금에 대해 죠미니 거리, 즉 냉각속도에 따른 체계적인 경도변화를 나타낸다.

ASTM255에서 제시된 표준화된 죠미니 테스트에서는 직경 25 mm, 길이 100 mm의 환봉을 일정 온도에서 일정 시간 유지하여 오스테나이트화한 후 길이방향의 한쪽 끝 표면에 물을 분사시켜 급냉시킨다. 이에 따라 표면으로부터 실린더 축방향으로 거리에 따라 냉각속도의 차이를 발생시키게 되고 길이 방향의 각 위치에서 미세조직과 경도가 변화하게 된다. 결국 죠미니 바 표면으로부터의 거리 혹은 냉각 중 700°C에서의 순간 냉각 속도의 함수로서 미세조직과 경도를 그래프로 나타낼 수 있게 된다. 이에 따라, 실험적이나 수치해석방법을 통해 철강제품 내 특정 위치의 냉각속도가 얻어지면 그 부분의 미세조직과

†Corresponding author. E-mail : yjsmcoo@hanmail.net
Copyright © The Korean Society for Heat Treatment

경도를 예측할 수 있게 되는 것이다. 실제 응용사례로서 침탄 열처리공정 후에 경도분포 곡선은 조미니 곡선을 활용하여 구해질 수 있다고 주장되고 있다[3]. 독일 등 유럽지역에서 시판중인 침탄 열처리 프로그램인 SimCarb 소프트웨어는 Just[4]가 제시한 회귀 방정식을 사용하여 조미니 곡선을 계산하고 이를 침탄 후 경도프로파일 예측에 이용하고 있다. 또한 대형 기어의 경우 모듈 수에 따른 이뿌리원 중심의 심부경도 예측 등에도 조미니 경화능 곡선을 활용할 수 있다[5]. 즉, 어떤 형상의 제품이라도 특정 위치의 냉각속도를 알게 되면 소입 후 경도를 간단하게 예측할 수 있다는 장점이 있다.

따라서 현장에 필요한 합금개발이나 열처리공정 개발 중에 주요 변수 조절에 따른 결과 예측을 위해 조미니 곡선을 구하려는 시도가 많이 행해졌다. 그러나 조미니 곡선을 예측하기 위한 시뮬레이터 제작을 위하여 많은 조성의 철강합금에 대한 데이터 베이스를 실험적으로 구축하는 것은 쉬운 일이 아니다. 많은 데이터가 축적된 경우 신경망 회로 방법을 이용한 최적화 알고리즘을 사용할 수 있고, 국내에서도 최근 이에 대한 연구 결과가 보고되고 있다[6]. 그러나 이러한 방식에서는 동원된 합금 조성범위 내에서만 적용이 가능하다는 약점이 있다. 또한 새로운 분석대상이 될 수 있는 미세조직을 파악하고자 하는 경우 혹은 분석에 동원되지 않은 주요 변수들의 효과 분석을 위해 추가적으로 별도의 데이터 확보가 필요하다. 공정 변수가 많은 경우 대단히 많은 양의 데이터가 필요하거나 제품의 형상 등 수치화하기 어려운 경우에는, 예를 들어 침탄 열처리의 경우, 지금까지 이에 대한 인공지능 해석이 별로 이루어지지 못하고 있다. 반면 과학자들이 이전부터 많이 시도한 방식은 상변태 속도를 대변하는 온도-시간-상변태(temperature-time-transformation, TTT) 다이어그램이나, 연속 냉각 변태(continuous cooling transformation, CCT) 다이어그램을 이용하여 미세조직과 경도를 예측하는 방식들이다[7-9]. 많은 연구자들에 의해 각 철강에 대한 풍부한 TTT/CCT 데이터가 실험적으로 측정되어 축적되어 왔으며, 그 동안 이들 데이터를 수식 화하기 위한 노력들이 많이 행해졌다. 대표적으로 시판되는 영국의 JMatPro 소프트웨어 [10]는 실험적으로 측정된 TTT 데이터를 수식화하

여 상용합금 및 임의 조성의 철강합금들의 TTT/CCT 계산을 수행하고 있다. 그러나 실제로는 이러한 소프트웨어를 이용하여 침탄 열처리 후 경도 예측과 같은 시도는 그리 많지 않은데 이는 계산결과의 정확도와 연관되어 있는 것으로 생각된다.

이처럼 조미니 곡선이 기본적인 데이터베이스인 TTT/CCT 다이어그램과 밀접한 관계가 있고, 냉각 시험 결과를 간명하게 보여주기 때문에 매우 중요한 데이터이다. 결국 열처리분야에서 이에 대한 예측 프로그램을 확보하는 것이 중요하며, 또한 최근 공장 스마트화 추세에 따라 열처리 기술의 전산화에 중요한 밑바탕이 된다고 여겨진다. 본 연구에서는 TTT/CCT 다이어그램을 이용하여 냉각중 출현하는 상들의 정량분석을 구현해 보기 위해 문헌상의 200여개의 TTT/CCT 데이터를 분석하여 Kirkaldy 식의 계수를 구하고[8, 11], 이를 기반으로 모의 상변태 및 조미니 곡선 계산을 시도하였다. 또한, 계산된 결과를 문헌상의 조미니 테스트 및 CCT 다이어그램의 결과와 비교하여 그 정확성을 검토하였다.

2. 조미니 경화능 곡선의 계산

Fig. 1과 같이 특정 조성의 합금에 대한 조미니 곡선을 계산하기 위해서는 먼저 입력변수로서 합금 조성과 오스테나이트화 온도 및 유지시간을 입력한다. 입력된 조성 및 열처리 조건을 바탕으로 최적화된 TTT/CCT 데이터를 계산하여 데이터 베이스에 저장한다. 이후 경계조건과 함께 Fourier 방정식을 유한차분법을 이용하여 풀고, 시험편내 1 mm 간격으로 냉각 시 시간에 따른 온도변화를 계산한다. 또한 데이터 베이스로부터 넘겨받은 TTT 데이터에 가산 법칙을 적용하여 상변태 과정을 계산한 후 계산된 각 상들의 분율에 대응하는 데이터베이스의 열전도도, 열용량 등의 물리적 값들을 가져온다. 이 값들은 다음 계산 스텝에서 Fourier 방정식의 각 상수에 대입된다. 또한 그 순간의 온도와 각 상의 분율을 기계적 모델에 입력하여 그 순간 온도에서의 각 상들의 항복강도 및 경도를 계산한다. 냉각과정이 종료되면 조미니 시험편내 각 지점에서 최종 상들의 종류 및 분율, 그리고 각 상의 평균강도와 평균경도로부터 최종적으로 위치별로 항복강도와 경도를 계산할 수

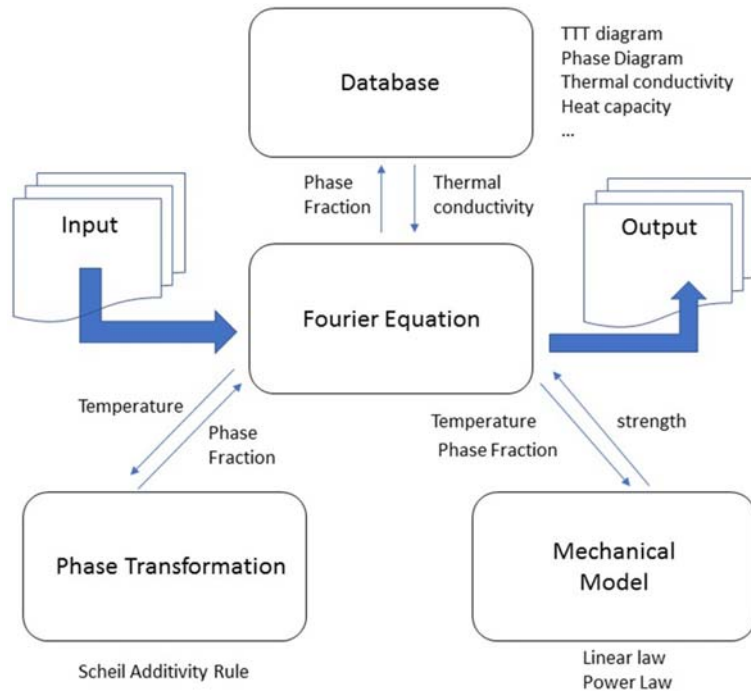


Fig. 1. A block diagram showing a procedure to obtain Jominy hardenability curve corresponding to specific input conditions.

있다. 이하에서는 본 연구의 계산에서 사용된 조미니 냉각과정, 상변태 과정 및 경도 계산에 대해 자세히 기술하였다.

2.1 조미니 테스트 냉각과정 계산

전술한 바와 같이 ASTM A255와 같이 표준화된 조미니 시험법에서는 Fig. 2(b)와 같은 실린더형 샘플을 고온의 정해진 온도로 정해진 시간 동안 가열하여 오스테나이트 조직을 생성시킨 후 가능한 빨리 한쪽 표면에 물을 분사하여 냉각시킨다. 냉각 종료 후 실린더 측면의 표면을 그라인딩한 다음 표면으로부터 일정한 간격으로 경도를 측정한다. 따라서 급냉된 표면으로부터 실린더의 긴 축을 따라 거리가 증가할수록 냉각속도가 감소하게 되어 미세조직이 변화하게 되고 결국 경도가 감소하게 된다.

유사하게 컴퓨터로 모의 조미니 테스트를 하기 위하여 Fig. 2(a)와 같이 길이 150 mm의 환봉에 대하여 분사된 물에 의해 매우 빨리 냉각되는 한쪽 끝 표면을 일정온도(24°C)로 가정하고, 공냉으로 느리게 냉각되는 측면은 단열 조건으로 가정한다. 물이

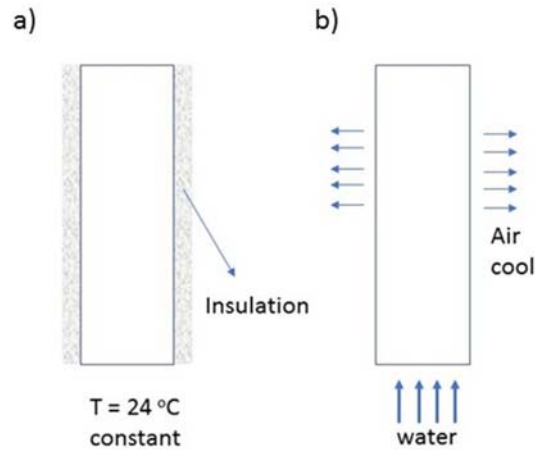


Fig. 2. A schematic diagram of Jominy test: (a) simulation; (b) experiment.

닿는 표면의 초반 냉각과정(수초 이내의 매우 짧은 시간)이 무시되어 냉각속도가 약간 빨라지고, 측면 단열조건으로 인해 냉각속도가 약간 느려질 수 있다. 하지만, Li 등이 실시한 유한요소해석법(FEM)에 의한 조미니 모의 계산에서도 일정한 표면온도를 가정

한 해석적 해와 차이가 거의 없고, 공기를 고려한 경우와 그렇지 않은 경우 차이가 미미하다는 연구결과[9]에서 알 수 있듯이 이러한 가정으로 인한 오차는 미미할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 SCr420 등 여러 가지 강종을 사용하여 직경 25 mm의 실린더의 공기 중 냉각속도를 계산한 결과 탄소 및 합금 원소량에 따라 대략 0.6~0.8°C/s로 나타나고 공기의 열전달계수가 매우 작기 때문에[12] 심부와 표면간의 냉각속도 편차는 거의 무시할 수준임을 확인하였다. 개략적으로 두 가지 다른 냉각요인에 의한 냉각속도는 각각 요인의 냉각속도의 합으로 나타낼 수 있다는 가정 하에 조미니 곡선 계산 결과에서 0.7°C/s를 보정 값으로 사용키로 하였다. 이에 따라 조미니 거리 15 mm 이내에서는 공냉 속도는 수냉 효과에 비해 거의 미미한 수준이고 반면 조미니 거리 50 mm(통상 문헌에서 2°C/s에 해당되는 지점)에서는 합금의 성분 따라 다소 차이를 나타낼 수 있음을 알 수 있다. 참고로 침탄 열처리 등에 응용을 목적으로 한 경우에는 대부분 유냉을 이용하므로 냉각속도가 10~100°C/s의 범위로서 대략 5~15 mm 사이의 데이터가 매우 중요함을 기억할 필요가 있다.

조미니 테스트는 일차원적인 열전달 문제로 간주될 수 있으므로 다음과 같이 쓸 수 있다[2].

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\rho C_p} \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \Delta H_i \frac{\partial c_i}{\partial t} \quad (1)$$

식 (1)에서 T는 각 위치에서의 온도, t는 냉각시간이며, ρ , C_p 및 k는 각각 재료의 밀도, 열용량 및 열전도도를 나타낸다[13]. 각 위치마다 여러 상들이 동시에 나타날 수 있으므로 이들 물리적 상수 값들은 선형 혼합법칙을 사용하여 추정한다. 아울러 오스테나이트로부터 페라이트 등 다른 i 상으로 변태시 유발되는 엔탈피 변화 ΔH_i 와 시간에 따른 i 상의 상변태량의 곱이 포함된다. 식 (1)의 열전달 지배방정식에 대하여 Fig. 3(a)에 나타난 경계조건을 가지고 유한차분법(FDM)에 의한 조미니 테스트 냉각과정 계산을 수행하였다.

2.2 상변태 계산

고온에서 오스테나이트로 유지된 철강조직은 변태

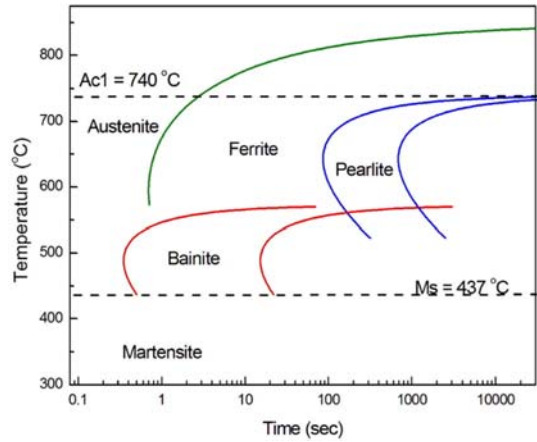


Fig. 3. A calculated TTT diagram denoting the domain of each phase of SCM415 low alloy steel.

점 이하로 급냉후 유지하는 항온변태 혹은 임의의 냉각속도로 냉각시키는 연속냉각 변태에 의해 페라이트, 펄라이트, 베이나이트 및 마르텐사이트 등으로 변화하게 된다. 전자인 항온변태의 경우 시간 및 온도를 변수로 하여 Fig. 3과 같이 각 상의 영역을 나타낸 TTT 다이어그램을 사용하고, 후자의 경우 주어진 냉각경로를 따라 나타나는 상들의 영역을 표현한 CCT 다이어그램을 사용한다. 현장에서는 주로 소입 공정 등 연속냉각을 주로 다루기 때문에 CCT 다이어그램의 파악이 중요하다. TTT 다이어그램으로부터 정확한 CCT 다이어그램의 작성은 Scheil의 가산법칙을 사용하여 시도될 수 있지만, 실제로는 페라이트 생성에 따른 탄소 농축 효과 등으로 인해 정확한 계산이 쉽지 않고 그 역의 경우도 마찬가지이다. 그럼에도 불구하고 TTT 다이어그램의 실험적 구축과 수식화는 그 중요성과 효용성으로 인해 지속적으로 연구되어져 왔다.

일정한 온도에서 확산에 의해 진행되는 철강 내부의 상변태에 대한 표현은 1930년대 유명한 Johnson Mehl Avrami에 의해 수식화되어 활용되어 왔다[1]. 이후 여러 연구자들에 의해 다양한 식들이 제시되었고, 특히 Kirkaldy 등이 제시한 표현이 널리 사용되어져 왔다. 그는 TTT 다이어그램 상에서 페라이트, 펄라이트 및 베이나이트 조직의 변태 곡선들은 C 형태의 곡선으로 볼 수 있고, 변태 개시선과 변태 종료선 등은 모두 함께 다음과 같은 수식으로 나타

Table 1. Values for major parameters in Kirkaldy's formula

	A	ΔT	q	$1/D_{eff}$
페라이트	60Mn + 2Ni + 68Cr + 244Mo	Ac3 - T	3	$\exp\left(\frac{23500}{RT}\right)$
펄라이트	1.8 + 5.4(Cr + Mo + 4MoNi)	Ac1 - T	-	$\frac{1}{\exp\left(-\frac{27500}{RT}\right)} + \frac{0.5Mo}{\exp\left(-\frac{37000}{RT}\right)}$
베이나이트	$(2.3 + 10C + 4Cr + 19Mo)10^{-4}$	Bs - T	2	$\exp\left(\frac{27500}{RT}\right)$

낼 수 있다고 제안하였다[8, 9].

$$\tau = \frac{A}{6 \times 2^{NGS/8} \Delta T^q D_{eff}} I \quad (2)$$

$$I = \int_0^x \frac{dx}{2^{2(1-x)/3} (1-x)^{2x/3}} \quad (3)$$

위 식에서 적분값 I는 온도 T에서 오스테나이트 상변태 분율 x 로 표현되며, 결국 분율 x 만큼 변태 하는데 걸리는 시간 τ 는 식 (3)에서와 같이 오스테나이트 결정입도 NGS, 해당되는 조직의 변태선 아래 과냉도 크기 ΔT , 유효 확산계수 D_{eff} 및 합금조성의 함수 A에 의해 주어진다. 이때 페라이트, 펄라이트 조직에 대한 각 파라미터들은 실험으로 측정된 TTT곡선을 분석함으로써 Kirkaldy에 의해 Table 1과 같이 주어졌다.

Kirkaldy 식에서 유효 확산계수 뿐 만 아니라 q , A 값 등은 여러 연구자들에 의해 수정되어져 왔다 [8, 9]. 특히 주목할 부분은 식 (3)에 의해 주어진 적분 값인데, 변태 분율에 대한 적분 값 I는 전형적인 sigmoidal 형태로서 Johnson-Mehl-Avrami(JMA) 식의 결과와 동일한 형태를 나타낸다. 결국 변태분율 100%에 대한 적분 값 I (1.0)와 변태 분율 1%에 대한 적분 값 I (0.01)의 비는 주어진 상의 변태 종료시간과 변태 개시시간의 비를 나타낸다. 연구자들은 적분 식 (3)에서 계수를 조정하여 이 비율을 달리하였다. 예를 들어 Kirkaldy의 경우 7.2, Li의 경우 19.9 등을 사용하고 있다. 이 값이 작을수록 주어진 상의 확산 변태 속도가 빨라져서 상대적으로 확산 변태량이 많아지고, 마르텐사이트 변태량이 줄

어들어 낮은 경화능을 나타내게 된다. 이처럼 변태 시작과 종료에 대한 적분 값의 I의 비는 변태속도와 그에 따른 경화능에 크게 영향을 미치는데, 모든 종류의 저합금강들의 상변태 곡선들이 이들의 접근법처럼 동일한 비율로 표현될 수 있는가 라는 의문이 든다. 또한 실제로는 문헌상의 TTT 다이어그램 데이터에서 특히, 베이나이트 상의 경우 그 변태특성으로 인하여 그 비율을 합금조성의 함수로 표현하는 것이 쉽지 않음을 알 수 있다. 종합하면 Kirkaldy의 공식이 TTT 다이어그램 변태곡선의 모양은 잘 나타내지만 실제 계산에 있어서는 다음과 같이 몇 가지 어려운 점이 있다.

1) Atlas[11] 등 문헌데이터를 보면 각국의 TTT 데이터가 정확도에서 차이를 보이고 있어 어떤 데이터를 선정할 것인지 어려움이 있다.

2) 식 (2), (3)의 적분 값 I에 포함된 다항식은 변태 분율에 대하여 완전히 대칭적이므로 Fig. 4에 나타냈듯이 특정 변태 분율 값들에 대하여 균등히 분할된다. 즉 다항식으로 표현된 상분율 변화곡선은 Sigmoidal 형태로 변태분율 0.5에 대하여 대칭적이지만 실제로는 실험적 데이터는 비대칭이다.

3) 각 합금에 대하여 각 상마다 정의되어야 하는 변태종료 시간과 변태개시 시간의 비율, 즉 변태율 1% 일때 적분값과 변태율 100% 일때 적분값의 비율이 일정하다고 볼 수 있는가 하는 문제가 있다.

4) 진행되는 상변화에 따른 기지인 오스테나이트의 조성 변화 문제, 즉 주로 저탄소강의 경우 냉각중 페라이트가 발생하면 탄소 고용도가 극히 낮으므로 오스테나이트의 탄소 조성이 증가하고 결국 베이나이트 변태 시에는 변화된 조성에 대응하는 TTT 다이

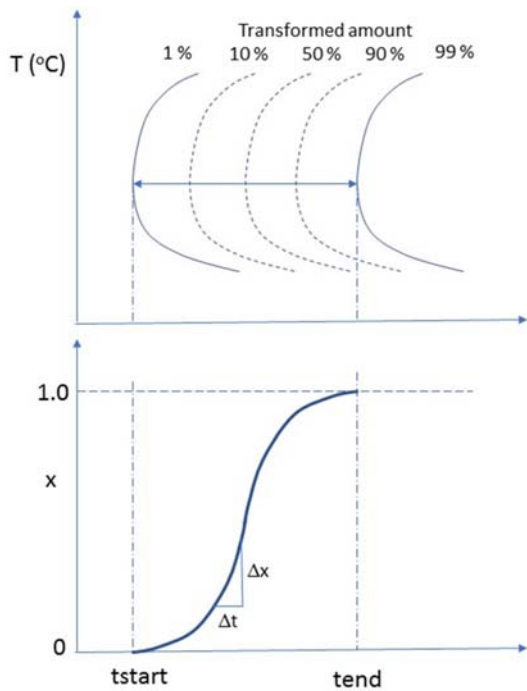


Fig. 4. Transformation lines as a function of transformed amount of a specific phase (upper) and symmetric phase fraction curve for transformed amount as a function of reaction time at a specific temperature.

어그램이 계산에 적용되어야 한다[15]. 실제로 CCT 다이어그램에서 냉각속도에 따라 오스테나이트 기지의 탄소 농도 증가로 인하여 베이나이트 및 마르텐 사이트 개시 온도는 강하한다.

Li 등의 연구에서는 1)번 문제를 개선하기 위하여 CCT 다이어그램을 분석하여 A, q 등 주요 변수를 추출하였으나 2), 3), 4)항을 고려하지 않고 있다. 전술한 변태 종료시간과 변태 개시시간의 비($I(1.0)/I(0.01)$)를 19.9로 고정하여 Kirkaldy의 연구결과보다 경화능 계산에서 향상된 결과를 보여주지만, 여전히 위의 항들을 무시한 결과를 포함하고 있다. 결국 임의의 저합금강의 상변태 정보를 보다 정확하게 수치화하기 위하여 다른 전략이 필요하게 된다.

4)항과 관련해서, 페라이트 변태 량이 증가함에 따라 오스테나이트내 탄소 조성은 증가하게 되고 즉 탄소 농축이 일어나고 베이나이트 개시 온도인 B_s 점 이하로 온도가 더욱 하강할때 베이나이트 변태 계산에 사용되는 변태 곡선 정보는 해당되는 변화된

오스테나이트 탄소 조성에 대응되어야 한다. 이러한 효과가 반영되어 나타나는 데이터는 CCT 다이어그램이며, 결국 임의 조성의 철강합금에 대한 CCT 다이어그램의 계산을 위해서는 탄소 조성을 달리하는 수 많은 철강합금의 TTT 다이어그램들이 필요하게 된다. 역으로 CCT 데이터로부터 TTT 다이어그램을 추출하는 과정은 주어진 냉각경로와 변태량으로부터 JMA 방정식 혹은 Kirkaldy 식과 같은 sigmoidal 형태의 식을 사용하고 그 계수를 최적화시킨다. 이러한 경우에도 결국 원래 탄소조성보다 큰 탄소조성들이 계산 결과에 포함되기 때문에 베이나이트 변태 종료시간과 변태 개시시간의 비는 대단히 큰 값을 나타내게 된다. 베이나이트의 변태곡선은 탄소 함량의 강한 함수임을 유념할 필요가 있다. 예를 들어 팽창계(dilatometer)를 사용하여 S45C 합금의 연속 냉각 시험결과를 JMA 식을 사용하여 정량화 시킬 때 베이나이트에 대한 시간 계수, 즉 $n=1.05$ 가 얻어지는데, 이 값을 이용하여 베이나이트 변태종료(99.9%)와 개시(1%) 시간 비율을 구해보면 662가 얻어진다[14]. 문헌상 TTT 데이터나 Kirkaldy 식을 사용하는 연구 결과들을 보면 통상 8-50 정도에 비해 큰 값이 얻어진다.

실험적 TTT 데이터의 부족과 위에 언급한 각 상에 대응하는 변태곡선의 특징들로 인하여 문헌상 TTT 다이어그램으로부터 주어진 철강합금에서 공식 점까지 포함하는 탄소조성 범위에 대응하는 변태식을 구성하는 것은 쉬운 일이 아니다. 결국 계산의 정확도를 높이기 위해 변태 종료 및 개시시간 비율을 임의의 일정 값으로 초기화 시킨 후 계산을 수행하고 이를 주어진 CCT 데이터와 일치하도록 회귀시키는 방식이 현실적일 수 있다. 이에, 본 연구에서는 상변태 계산을 위하여 기존에 발표된 TTT 및 CCT 데이터들을 모두 함께 수식화하여 최적화 모듈에 대입시킨 뒤, Kirkaldy 식과 같은 TTT 변태식을 사용하여 계산을 진행시켜 최적화 모듈의 CCT 데이터에 근접하도록 변태식내의 계수들을 조정해 나간다. 이렇게 함으로써 2) 3) 4)항과 관련된 문제들을 완화할 수 있다.

2.3 기계적 성질의 계산

상변태 과정을 연동하여 열전달방정식(식 (1))을 적

절한 경계조건과 함께 풀면 전술한 바와 같이 오스테나이트가 냉각 중에 얼마나 페라이트, 펄라이트, 베이나이트, 마르텐사이트로 변태하고, 얼마나 잔류 오스테나이트로 남아 있는지 계산할 수 있게 된다. 최종 미세조직의 경도를 구하는 것이 간단하지는 않은 문제이므로 대부분 많은 연구에서 대부분 소위 Creusot-Loire 시스템 혹은 Maynier-Carsi 시스템을 사용해 왔다. 즉 이러한 시스템은 특정구간 평균 냉각속도 혹은 700°C에서의 순간 냉각속도를 사용하여 다음과 같이 각각 페라이트와 펄라이트의 혼합상의 비커스 경도, HV_{p+f} , 베이나이트의 비커스 경도, HV_b , 및 마르텐사이트의 비커스 경도, HV_m ,를 계산하고, 최종 조직의 비커스 경도, HV,를 선형혼합법칙으로 나타낸다[1].

$$HV_{p+f} = 42 + 223C + 53Si + 30Mn + 12.6Ni + 7Cr + 19Mo + (10 - 19Si + 4Mn + 4Ni + 8Cr + 130V) \text{Log}(T_{700}) \quad (4)$$

$$HV_b = -323 + 185C + 330Si + 153Mn + 65Ni + 144Cr + 191Mo + (89 + 53C - 55Si - 22Mn - 10Ni - 20Cr - 33Mo) \text{Log}(T_{700}) \quad (5)$$

$$HV_m = 127 + 949C + 27Si + 11Mn + 65Ni + 16Cr + 21 \text{Log}(T_{700}) \quad (6)$$

$$HV = (x_f + x_p) HV_{p+f} + x_b HV_b + x_m HV_m \quad (7)$$

식 (4)~(6)을 이용하여 각 상의 평균 비커스 경도를 구하고, 식 (7)에 i 상의 분율 x_i (f =페라이트, p =펄라이트, b =베이나이트, m =마르텐사이트, ra =잔류 오스테나이트)와 함께 700°C에서 순간 냉각속도를 대입하면 최종경도를 구할 수 있다. 이 분석법에서는 페라이트 및 펄라이트의 경도는 분리되지 않고 혼합상의 경도, 즉 HV_{p+f} 를 입력하는 구조이며 잔류 오스테나이트는 고려되지 않는다. 따라서, 위 접근법의 700°C 순간 냉각속도 혹은 800°C~500°C 구간의 평균 냉각속도를 알면 미세조직 계산과 아울러 경도 예측이 매우 손쉽게 가능하다는 장점이 있으나, 정확도가 떨어질 것으로 예상된다.

이에 본 연구에서는 냉각과정 중 실시간 각 상의 경도를 계산하는 것을 시도하였다. 페라이트의 경도

는 결정립의 크기에 의존하고, 펄라이트는 페라이트/씨멘타이트 층상간격(lamellar spacing)에 의존한다는 사실은 문헌에서 잘 알려져 있다. 아울러 페라이트의 결정립의 크기는 기지인 오스테나이트의 결정립크기와 생성온도에 의존하며, 펄라이트의 층상간격은 온도와 조성의 함수로 나타내어진다. 문헌으로부터 이에 대한 정보를 종합하여 약간의 수정을 거쳐 함수화하였다[15-17]. 결국 펄라이트 비커스 경도, HV_p ,와 펄라이트의 로크웰 경도, HRC_p ,는 각각 식 (8) 및 (9)을 사용하여 구하였다.

$$HV_p = 361 - 0.357 T + 50 \text{wt}\%Si \quad (8)$$

$$HRC_p = 0.506\lambda^{-0.5} - 16 \quad (9)$$

위 식에서 T 는 냉각중 페라이트의 생성온도, λ 는 펄라이트의 층상간격(mm)으로 주어진다.

베이나이트의 경우에는 문헌상 나와있는 TTT 다이어그램에 경도 데이터[11]가 나와 있으므로 이를 이용하여 조성의 함수로써 선형회귀분석에 의해 각 온도 구간별로 수식화 하였다. 예를 들어, 371°C에서 생성되는 베이나이트의 로크웰 경도(HRC_b)는 아래 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$HRC_b = 30.2 + 9.79\text{wt}\%C + 1.1\text{wt}\%Mn - 0.16 \text{wt}\%Si + 1.45\text{wt}\%Cr + 1.77\text{wt}\%Mo + 0.69\text{wt}\%V \quad (10)$$

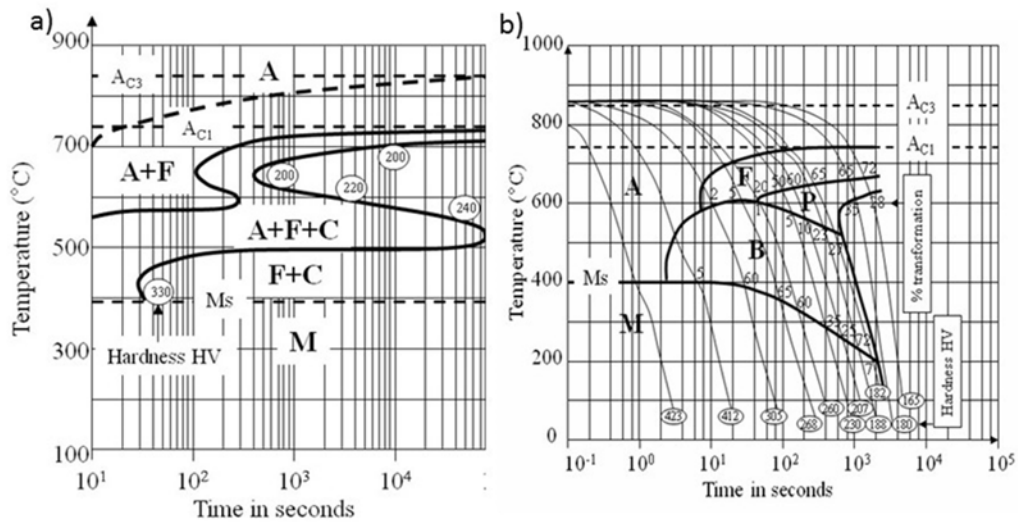
마르텐사이트의 경도는 US steel의 Grange가 제시한 데이터를 활용하여 식 (11)과 같은 회귀식을 구하였다[18]. 그 결과 마르텐사이트의 비커스 경도, HV_m 은 다음과 같이 표현된다.

$$HV_m = 896.6 - \frac{650.2}{1 + \exp\left(\frac{\text{wt}\%C - 0.293}{0.155}\right)} \quad (11)$$

아울러 잔류 오스테나이트의 경우 연질상으로 알려져 있으나 그 경도 값이 잘 알려져 있지 않고 그 크기에 대하여서도 논란이 많다. 본 연구에서는 그 경도를 마르텐사이트 경도의 40%로 가정하였다. 최종 조직의 평균 경도는 각 상의 평균경도를 모두 비커스 경도로 환산한 다음 식 (12)와 같이 선형 혼합법칙을 이용하여 구하였다.

Table 2. Composition of low alloy steel and heat treating conditions used in the calculation

Grade	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	V	T (°C)	t (min)
16MnCr5	0.16	1.12	0.22	0.12	0.99	0.02	0.01	870	15
50CrMo4	0.5	0.8	0.32	0.11	1.04	0.24	-	850	15

**Fig. 5.** (a) TTT diagram and (b) CCT diagram of 16MnCr5 Carburizing low alloy steel.

$$HV = x_f HV_f + x_p HV_p + x_b HV_b + x_m HV_m + x_{ra} HV_{ra} \quad (12)$$

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 제안된 상변태 및 경도 계산 방법을 이용하여 Table 2에 나타난 두 합금의 조성 및 열처리 조건에 대해 가상 조미니 테스트를 실시하였다. 아울러 결과 비교를 위해 문헌상 CCT 데이터 및 조미니 테스트 시험 결과를 사용하였다.

Fig. 5는 침탄용 강으로 널리 사용되고 있는 16MnCr5 강의 TTT 다이어그램과 CCT 다이어그램을 나타내고 있다 [19]. 탄소함량이 비교적 낮으므로 TTT 다이어그램의 각 상들의 변태곡선들이 비교적 짧은 시간에 배치되어 확산 변태 없이 마르텐사이트 변태를 달성하기 위해서는 극히 높은 냉각속도가 요구된다. 오른쪽 CCT 다이어그램으로부터 각 냉각곡선에 대해 800~500°C 온도 구간의 평균 냉각시간 그에 따른 상변태 분율을 구하여 계산결과들과 비교하였다.

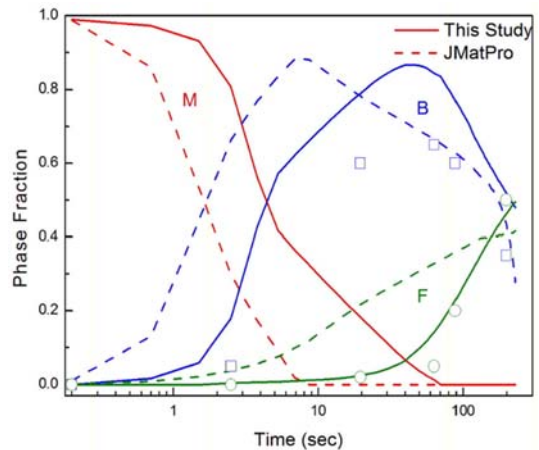
**Fig. 6.** Changes in phase fractions of martensite (red), bainite (blue), and ferrite (olive) as a function of cooling time between 800°C and 500°C in Jominy bar of 16MnCr5 steel (dot for JMatPro, solid for this study, and symbol for experimental CCT data).

Fig. 6은 16MnCr5 강에 대하여 본 연구에서 개발한 프로그램과 상용 프로그램(JMatPro)을 이용하여 계산한 조미니 테스트 시 위치별로 800~500°C 온도 구간의 평균 냉각 시간에 따른 상분율 변화와

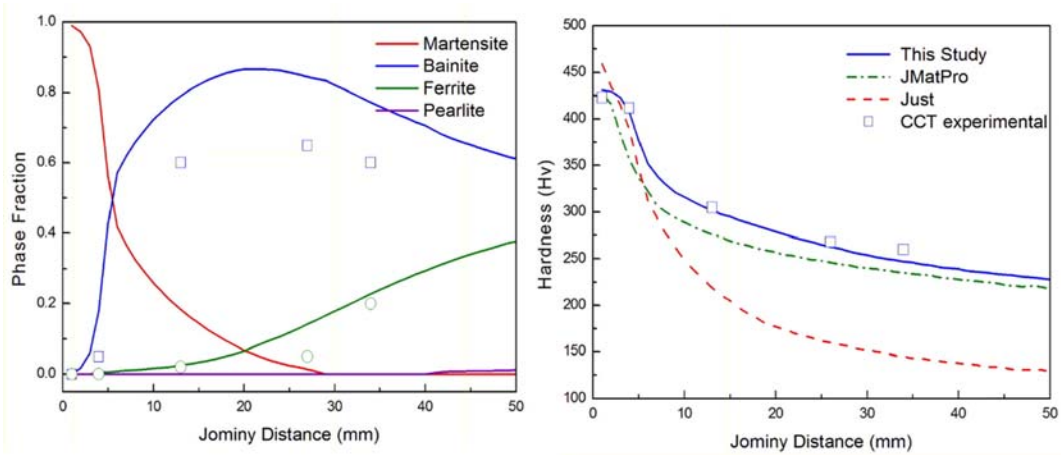


Fig. 7. (Left) Changes in phase fractions of various phases in 16MnCr5 steel. (Right) Hardness changes as a function of distance from the end of Jominy bar. Note that all symbols were referred from Fig. 3 showing CCT diagram of 16MnCr5 steel.

Fig. 5(b)의 CCT 다이어그램을 이용하여 구한 평균 냉각시간에 따른 상분율 변화를 보여주고 있다. 각 상의 변태 분율의 변화형태는 비슷하지만 전체적으로 본 연구에서 개발한 프로그램을 이용하여 계산한 변태 분율 변화 곡선들이 상용프로그램을 이용한 결과에 비해 다소 긴 시간 쪽으로 이동되어 있으며, CCT 다이어그램으로부터 변환된 결과에 더 잘 일치함을 알 수 있다. 이는 본 연구에서 16MnCr5강종의 경우 베이나이트 구역에서 변태종료시간과 변태개시시간의 비율, 즉 전술한 적분 값 I 가 더 크기 때문이다.

추출된 CCT 데이터를 계산된 조미니 상분율 곡선 및 경도곡선과 함께 Fig. 7에 나타내었다. 계산된 상분율 곡선과 실험데이터를 비교해보면 베이나이트의 경우 계산치가 다소 높게 나타나어 발생하는 마르텐사이트 양이 다소 저평가되고 있다. Fig. 8은 Fig. 5의 CCT 다이어그램의 HV305를 나타내는 냉각곡선 데이터와 조미니 거리 13 mm 지점의 계산된 냉각곡선을 비교한 것이다. 초기의 가열조건이 다르지만 냉각속도의 비교를 위하여 CCT 다이어그램의 데이터를 우측으로 약 4초 정도 이동시켰다. 그림에서 보이듯이 베이나이트 생성구간인 베이나이트 개시온도, B_s 와 마르텐사이트 개시온도, M_s 사이에서 CCT 다이어그램의 경우 냉각속도가 다소 크므로 당연히 베이나이트양이 다소 감소할 수 있다. 그럼에

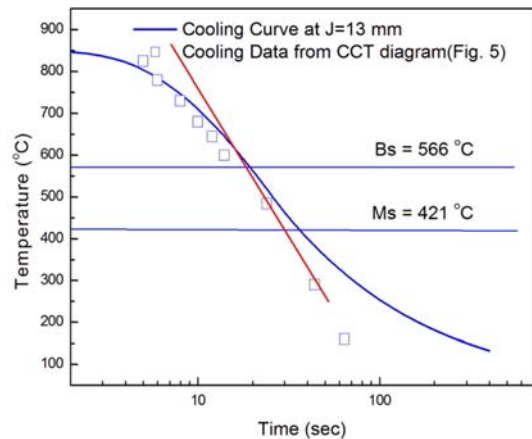


Fig. 8. Comparison of experimental cooling data from CCT diagram shown in Fig. 5 and calculated cooling curve at jominy distance of 13 mm.

도 불구하고 Fig. 8에 나타난 계산된 경도 값들이 실험치에 매우 근접하여 침탄공정 예측 등에 사용되는데 아무런 문제가 없다고 보여진다. 한편 Just가 제시한 방정식이나 상용프로그램의 결과들은 다소 낮은 경도 값을 나타내고 있다.

다음으로 고탄소강인 50CrMo4 합금의 경우에 대하여 계산을 실시하고 그 결과를 Fig. 9와 10에 나타내었다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 상용 프로그램의 결과보다 긴 시간 쪽으로 변태 분율 곡선이 이동하고 있으며, CCT 시험 결과와 매우 잘 일치하고 있다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 조미니 상분

을 곡선은 실험 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있으며, 경도곡선도 그 형태는 매우 유사하지만 약 15 mm 지점까지 다소 높은 경도 값을 나타내고 있다. 따라서 이 경우는 이 강종의 마르텐사이트 경도보다 다소 높은 값이 이용됐거나 잔류 오스테나이트의 영향 때문으로 해석된다. 반면 상용 프로그램의 경우에는 CCT 결과보다 훨씬 낮은 경도 곡선을 나타내는데 이는 베이나이트 변태가 실제보다 조기에 일어나도록 계산되었기 때문으로 판단된다. 이는 적

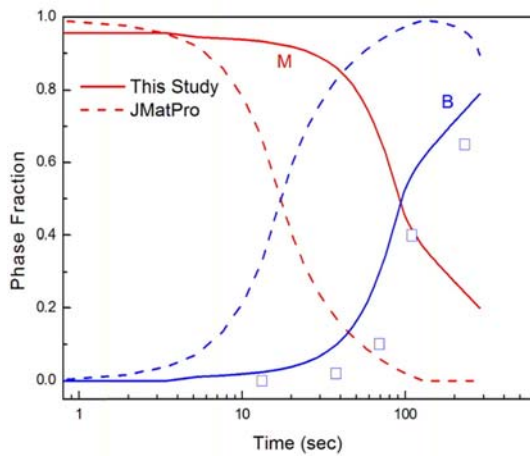


Fig. 9. Changes in phase fractions of martensite (red), bainite (blue) as a function of average cooling time between 800°C and 500°C in Jominy bar of 50CrMo4 steel (dot for JMatPro, solid for this study, and symbol for experimental CCT data).

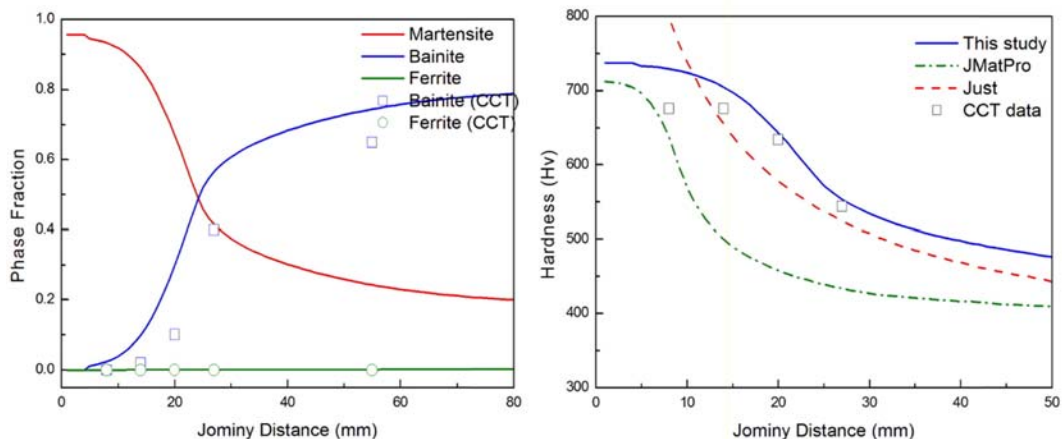


Fig. 10. (Left) Changes in phase fractions of various phases in 50CrMo4 steel. (Right) Hardness changes as a function of distance from the end of Jominy bar. Note that all symbols were referred from Fig. 3 showing CCT diagram of 50CrMo4 steel.

분 값의 비율을 일정하게 고정하는 방식에는 정확도 문제가 있음을 시사해 준다.

또한 실제 조미니테스트 결과(TimkenSteel 사가 제공한 SAE5130, SAE4140 두 강종[20])와 비교하여 본 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 고온 유지시간이 불분명하여 15분간 유지한 것으로 가정하였다. 이 두 강종은 국산 SCr430, SCM440에 상당하는 재질로서 침탄 공정중 유효경화깊이 부근의 조성을 나타내므로 그 정확도가 매우 중요하다. 그림에 보이는 것처럼 두 강종 모두 조미니 곡선의 정확도는 비교적 높은 것으로 평가되며, 대략 15 mm 구간 이후부터 HRC 2 정도 이내의 일정 수준의 편차를 나타내고 있다. 추후 더욱 많은 강종의 조미니 결과를 가지고 본 연구 결과를 비교하는 것이 필요하다고 생각되지만, 본 연구에서 수행된 계산방식을 국내에서 널리 사용되고 있는 침탄 열처리공정 등에 적용하는 데는 정확도 면에서 큰 문제가 없을 것으로 사료된다.

이상에서와 같이 TTT/CCT 데이터를 동시에 사용하여 수식화 시키는 것이 단순히 TTT 데이터만을 사용하는 경우보다 계산의 정확도를 높일 수 있다고 판단된다. 또한 본 연구에서 사용한 가상 계산에 의한 이러한 접근방법이 유용한 것은 특히 열처리 조건과 열처리 결과에 대한 상세한 모든 정보들을 한번에 다 얻을 수 있기 때문이다. 각 상의 분율 뿐만 아니라 각 상에 대한 결정립 크기, 층상간격등

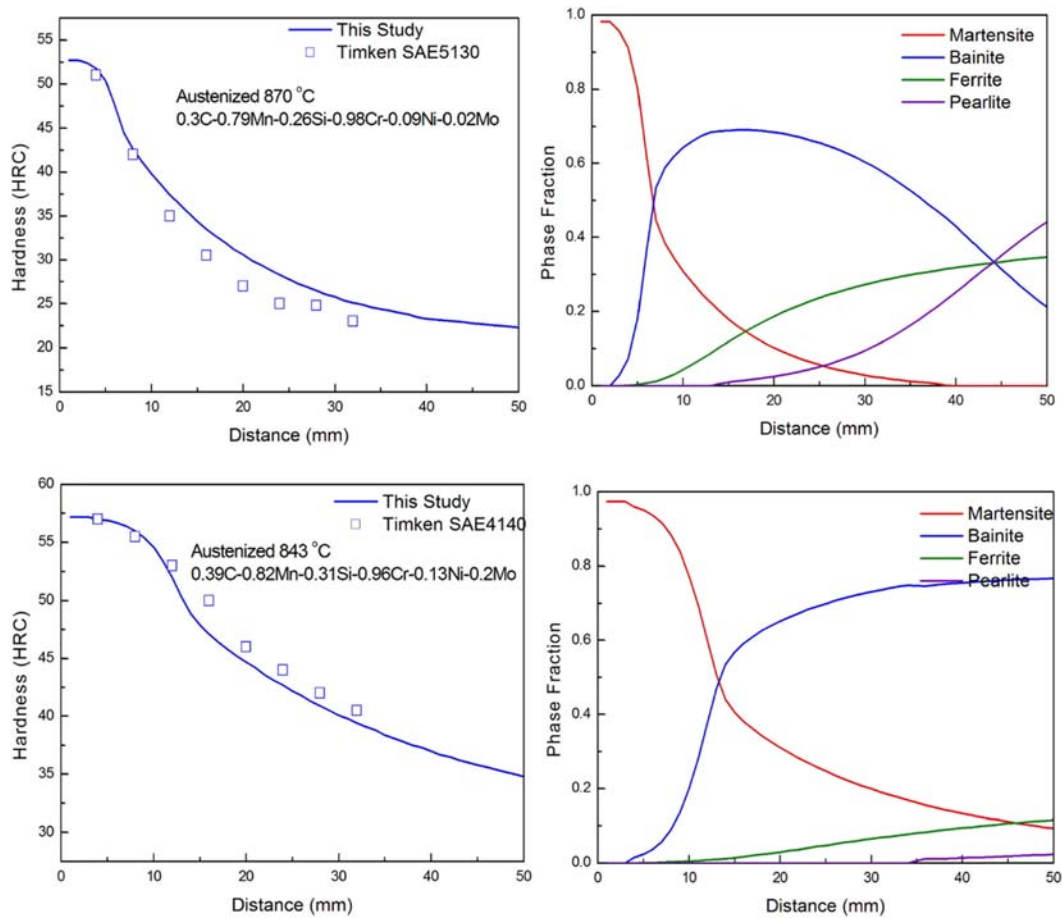


Fig. 11. (Upper) Jominy curve and phase fraction curve of SAE5130 (Below) Jominy curve and phase fraction curve of SAE4140.

각종 미세조직 정보와 아울러 항복강도 및 경도등 열처리 종사자 뿐 만 아니라 부품을 설계하는 구조 해석 전문가들에게도 유용한 정보들을 줄 수 있고 각종 저합금 특수강 제작에도 많은 영감을 줄 수 있다. 특히 칩탄 공정에서 복잡한 형상의 부품의 변형 문제에서도 각 주요 관심 부위별로 시간에 따른 상변화를 추적할 수 있기 때문에 열처리 현장의 냉각공정의 개선에 큰 도움이 되리라고 생각된다.

4. 결 론

1. Kirkaldy 등이 제시한 식을 사용하여 TTT 다이어그램을 나타내고, CCT 데이터를 통해 그 계수를 조정해 나가는 방식으로 상변태 모델이 개선된

조미니 경화능 곡선 계산 프로그램을 개발하였다.

2. 본 연구에서 개발한 프로그램을 이용하여 여러 종류의 저합금강에 대하여 계산한 상변태 결과 및 경도 값은 실측치와 잘 일치하며, 그 오차가 크지 않을 것으로 예상되므로 칩탄 시뮬레이터 등에도 적용 가능할 것으로 판단된다.

References

1. ASM Handbook, vol. 4 Heat Treating, published by ASM International (1991).
2. Quenching Theory and Technology, 2nd Edition, edited by B. Liscic, H. M. Tensi, L.C.F. Canale, and G. E. Totten, published by CRC Press (2009).
3. M. Kaffenberger and J. Gegner : New Case

- Hardening Software SimCarb QuenchTemp for the simulation of Hardness and Microstructure from Carburization Profiles, sourced from www.ariel.ac.il.
4. E. Just, Metal Progress, Nov. (1969) 87-88.
 5. F. J. Otto and D. H. Herring : Gear Heat Treatment Part I, www.vacfurnace.com.
 6. W. Lee and S. -J. Lee : Journal of the Korean Society for Heat Treatment, **31** (2018) 1.
 7. 저합금강의 미세조직 및 열응력 예측을 위한 컴퓨터 프로그램 개발, 최종보고서, 연세대학교, 산업자원부 (2005).
 8. The Calculation of TTT and CCT diagrams for General Steels, N. Saunders et al, sourced from homepage www.sentencesoftware.co.uk.
 9. M. V. Li, D. V. Niebuhr, L. L. Meekisho, and D. G. Atteridge : Metallurgical and Materials Transactions B, **29B** (1998) 661.
 10. Z. Guo et al. : International Journal of Metallurgical Engineering, **12**(2) (2013) 198.
 11. Atlas of Time Temperature Diagrams for Irons and Steels, edited by G.F. Vander Voort, published by ASM International (1991).
 12. L. Guo et al. : Materials Science and Technology, **33** (2017) 1.
 13. J. Mittenen and S. Louhenkilpi : Metallurgical and Materials Transactions B, **25B** (1994) 909.
 14. M. Jung, M. Kang, and Y.-K. Lee : Acta Materialia **60** (2012) 525.
 15. Structure/Property Relationships in Irons and Steels, Metals Handbook Desk Edition, 2nd Edition, edited by J. R. Davis, published by ASM International (1998) 153.
 16. Hyzak and Berstein : Metallurgical Transactions A, **7A** (1976) 1217.
 17. M. Suehiro et al. : Transactions ISIJ, **27** (1987) 437.
 18. R. A. Grange, C. R. Hribal, and L. F. Porter : Metallurgical Transactions A, **8A** (1977) 1775.
 19. Licenced by Total Materia, sourced from www.totalmateria.com (2017).
 20. Practical data for metallurgists, Timken Steel, sourced from www.timkensteel.com.