

열간압연 ROT에서 고강도강의 CSTC 개발

CSTC of High Strength Steel for ROT Process in Hot Strip Mills

박 철 재*
(Cheol Jae Park)

Abstract : This paper proposes a cooling stop temperature control(CSTC) concept which aims at obtaining the uniform temperature and quality of the material along the longitudinal and lateral direction of the strip. The CSTC is designed using the experimental CCT(Continuous Cooling Transformation), TTT(Time Temperature Transformation) curves and the temperature control model by the heat transfer governing equation, and the temperature control simulator. The cooling pattern and the rolling speed can be solved by the CSTC. It is shown through the field test of the hot strip mill of POSCO that the phase transformation ratio of the high carbon steel is considerably improved by the proposed temperature control.

Keywords : cooling stop temperature, temperature control, cooling pattern, transformation, carbon steel

I. 서론

최근 열연 강판의 품질에 대한 고객의 요구가 엄격하고 다양해지고 있으며 특히 고강도강(high strength steel)에 대한 요구가 크게 증가하고 있다. 열간압연에서 ROT(Run-Out Table) 공정은 마무리 압연(finishing mill)의 다음 공정으로써 압연 판의 재질 특성과 강도 등을 결정하는 매우 중요한 공정이다. ROT에서의 온도제어는 냉각수에 의한 온도 강하량과 복사(radiation)에 의한 온도 강하량을 제어함으로써 압연 판의 온도뿐 아니라, 상변태(phase transformation)를 제어하는 기술이다. 열간압연 제품의 길이방향과 폭방향의 균일한 형상과 재질은 온도와 상변태 제어 성능과 밀접한 관련이 있으므로, 온도제어 기술은 제품의 품질을 결정하는 핵심 기술이다[1,2].

고강도강 중에서 고탄소강은 탄소가 0.8[%] 이상 함유된 강판으로, 강도가 크게 요구되는 각종 기계부품과 자동차용 부품 등에 사용된다. 열간압연으로 생산시 길이와 폭방향으로 균일 재질특성과 품질특성이 요구되지만 강도가 높아서 압연이 쉽지않다[3]. 특히 고탄소강의 냉각과정에서는 퍼얼라이트(pearlite) 변태에 의한 발열반응으로 인하여 온도제어에 많은 어려움이 있으며, 크게 다음과 같은 세 가지 문제가 있다. 첫째, 마무리 압연 출측에서부터 과다한 냉각에 의하여 원하는 조직인 퍼얼라이트가 생성되지 못하고 압연 판의 폭방향으로 양쪽 엷지부에 퍼얼라이트보다 낮은 온도에서 생성되는 베이나이트(bainite) 조직이 생성되어 엷지 크랙이 발생한다. 폭방향으로 엷지부는 판의 중앙부보다 열전달이 용이하여 폭 방향의 중앙부는 퍼얼라이트 조직이 생성되지만, 엷지부는 온도가 더 떨어지게 되므로 베이나이트 조직이 생성된다. 둘째, 압연 판의 권취 후 코일의 모양이 타원형으로 붕괴되는 쥘구코일의 발생이다. 쥘구코일은 ROT내에서 변태 발열에 의하여 변태소성(transformation plasticity)이 발생하여 자중에 의하여 코일이 붕괴되는 현상이다. 변태소성이란 상변태시에 재료의 항복응력보다 낮은 응력에서 소성변형이 발생하고, 변형은 응력방향으로 발생하는 현상을 말한다. 셋

째, 고탄소강의 온도를 제어하기 위하여 상변태 예측모델을 개발하고 있으나, 상변태 모델의 정도가 크게 떨어진다. 따라서 상변태 예측모델에 의존하여 모든 बैं크에서 온도를 제어하는 것은 쉽지않다.

최근 ROT 공정에서 온도제어 정도를 높이기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다[4-19]. 일본에서는 고탄소강의 온도제어에서 기존의 온도이력(history) 제어가 아니라 열역학적 에너지의 이력을 연산하는 모델이 개발되었고 이를 통하여 운전자의 수동개입 없이 온도제어 정도를 높이는 기술이 제안되었다[4,5]. ROT 출측의 원하는 온도와 유량과의 관계를 실험으로부터 수식 모델을 개발하고 피드포워드(feedforward) 제어를 제안하였고[6,7], 비선형 미분 방정식으로 표현되는 ROT 프로세스를 1차 시간 지연계로 단순히 모델링하여 피드포워드 뿐 아니라 피드백(feedback) 제어를 개발하였다[8]. 특히 최근에는 냉각속도를 제어함으로써 균일한 온도를 얻기 위하여 ROT 공정을 모델링하고 예측제어기(MPC)와 같은 최적제어기와[9-13], 다변수 적응제어기의 설계가 연구되고 있다[14,15]. ROT 구간에서 압연 판의 온도를 예측하기 위한 모델은 두 점 경계문제(two-point boundary problem)로부터 압연 판의 두께와 폭 방향으로 차분방정식을 유도하여 더욱 더 정확한 모델을 개발하고 있다[16,17]. 또한 ROT 공정의 특성상 냉각수에 의한 온도계 이상, 밸브 고장 등의 설비상의 문제가 제어 성능을 떨어뜨리는 요인으로 작용하기 때문에 설비 최적화에도 많은 연구들이 진행되고 있다[18,19].

이 논문에서는 고탄소강의 온도제어 문제점들을 해결하기 위하여 냉각정지 온도제어(CSTC: Cooling Stop Temperature Control) 라는 새로운 개념을 제안한다. 고탄소강의 특성상 변태발열량이 크게 발생하여 상변태를 지연시키는 문제는 냉각정지온도(CST)를 제어함으로써 ROT 공정에서 완전변태시킬 수 있다. 이를 위하여 이 논문에서는 온도제어 모델을 유도하고, 재질 특성 실험치로부터 CST의 개념과 CST를 얻을 수 있는 ROT 냉각패턴을 도출한다. 온도제어 모델로부터 온도예측 시뮬레이터를 개발하고 시뮬레이션 결과를 바탕으로 현장 온라인 테스트를 포함 열연공장에서 수행한다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 ROT 프로세스에 대하여 간략히 설명하고 열전달 방정식으로부터 온도

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2007. 10. 20., 채택확정 : 2007. 12. 13.

박철재 : cjpark@posco.com

제어 모델을 유도한다. 제 3장에서는 CSTC 개념을 도입하고 고탄소강의 냉각패턴을 도출할 수 있는 방안을 서술한다. 4장에서는 CST를 얻기 위한 ROT 공정에서의 냉각패턴을 시뮬레이션하고 그 결과를 바탕으로 실시한 온라인 테스트 결과를 제 5장에서 설명한다. 이 논문의 결론은 제 6장에서 요약된다.

II. ROT 프로세스와 온도제어 모델

1. ROT 프로세스

그림 1은 열간압연의 ROT 공정을 나타낸다. ROT에는 3개의 길이 방향 파이로미터가 설치되어 온도를 계측하고 있으며 마무리 압연 출측의 온도계(FDT)와 8번과 9번 बैं크 사이의 중간온도계(MT), 권취기(down coiler) 입측의 온도계(CT)이다. 피드포워드 주수 बैं크는 모두 14개의 बैं크(#1~#14)가 있고, 각각의 बैं크는 상하부 6개씩의 헤더가 있다. 또한 15번과 16번 बैं크는 피드백 बैं크로써 각각 상하부 12개씩의 헤더로 구성되어 있다.

권취온도(CT) 제어는 다음과 같은 4가지의 제어 모드가 있다. 첫째, 초기설정 모드(preset) 로써, 압연 판이 마무리 압연기 3번 스탠드에 도달할 때, 온도설정 정보와 실적 정보 데이터로부터 각종 제어 정보를 작성하고, 주수 बैं크와 헤더수를 결정한다. 둘째, 피드포워드 제어 모드로써, 압연 판이

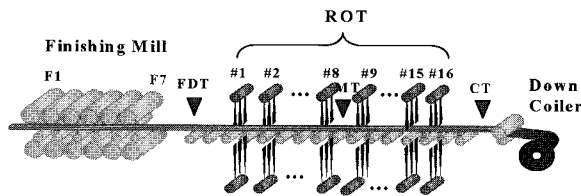


그림 1. 열간압연 ROT 프로세스.
Fig. 1. Configuration of ROT.

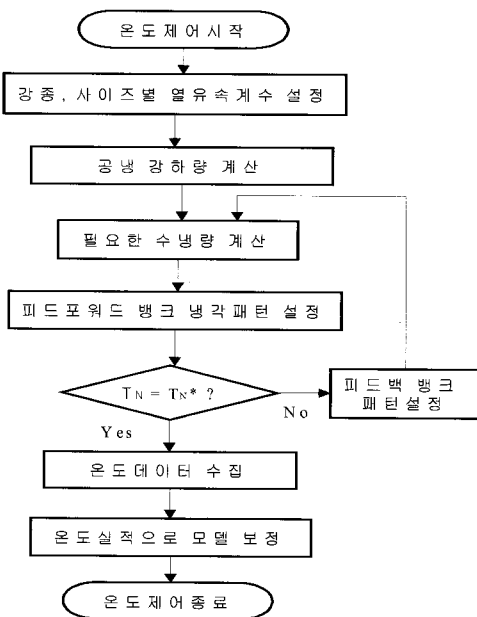


그림 2. 온도제어 흐름도.
Fig. 2. Flowchart of temperature control.

ROT에 도달한 후, 코일 일정 길이마다 제어 시점의 실적 데이터를 수집하여 FDT 실측 온도, 압연 속도, 목표 CT 등으로부터 온도 강하량을 예측하고 목표 온도를 얻기 위한 밸브 패턴을 결정한다. 셋째, 피드백 제어 모드로써, 목표 CT 온도와 실측 CT 온도로부터 편차를 제어하기 위하여 피드백 बैं크를 이용한 제어모드이다. 넷째, 코일의 길이 방향에 대하여 실측 데이터로부터 FDT와 CT간의 온도 변화를 계산하여 모델의 보정량을 계산하는 학습제어 모드가 있다. 그림 2는 상기 제어모드를 이용한 온도제어 흐름도를 나타낸다. 그림에서 T_N 은 CT 실측 온도, T_N^* 는 CT 목표온도를 나타낸다.

2. 온도제어 모델

그림 3은 ROT 공정에서 온도 변화를 나타낸 그림이다. 여기서 T_0 는 FDT 온도, t 는 시간, ΔT_a 는 수냉시 온도 변화량, ΔT_c 는 공냉시 온도 변화량을 각각 나타낸다. 압연 판이 마무리 압연의 출측에서 권취기까지 냉각하는 동안, 압연 판의 온도는 냉각수에 의한 수냉 온도강하와 복사에 의한 공냉 온도강하가 이루어진다[20].

ROT 냉각 프로세스에서 압연 판의 온도 예측에 사용되는 비정상상태 열전달 지배방정식은 다음과 같다[21].

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0 \quad (1)$$

여기서 x 와 y 는 압연 판의 길이 방향과 두께 방향, T 는 온도, ρ 는 밀도, c 는 비열, k 는 열전도도(conductivity)를 각각 나타낸다.

먼저, 수냉에 의한 온도 강하량 모델은 다음과 같다. ROT 구간에서 압연 판 길이 L 에 대한 열 손실율(dq_w/dt)은 다음과 같이 나타낼 수 있다[22].

$$dq_w = 2kw\Delta l(T - T_w) \left(\frac{t_w}{\pi a} \right)^{0.5} dt \quad (2)$$

여기서 w 는 압연 판의 폭, T_w 는 냉각수 온도, a 는 열확산율(heat diffusivity)이다. 압연 판의 열손실은 온도 변화의 함수로써 다음과 같이 나타낼 수 있다[10].

$$dq_m = \rho(T)c(T)VdT \quad (3)$$

여기서 V 는 압연 판의 체적(volume)을 나타내고 $V = w h \Delta l$ 이고, h 는 압연 판의 두께이다. (2)와 (3)을 열 평형조건 $dq_w = dq_m$ 에 대입하고, 시간을 0에서 t_w 까지 적분하면 수냉에 의한 온

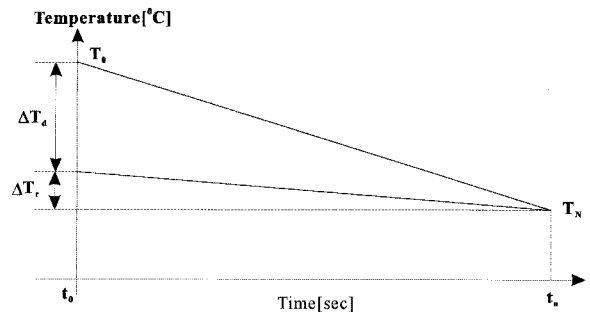


그림 3. ROT 공정에서 온도변화량.
Fig. 3. Temperature deviation in ROT process.

도 손실율(ΔT_d)은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta T_d = \frac{2k}{\rho(T)c(T)h} (T - T_w) \left(\frac{\Delta L}{\pi av} \right)^{0.5} t_w \quad (4)$$

여기서

$$t_w = \frac{\Delta L}{v} \quad (5)$$

다음으로 복사에 의한 열 손실은 다음과 같이 계산된다 [22].

$$dq_r = s\xi A_s [(T + 460)^4 - (T_a + 460)^4] dt \quad (6)$$

여기서 s 는 스테판 볼츠만 상수, ξ 는 방사율(emissivity), A_s 은 표면적, T_a 는 대기 온도이다.

마찬가지로 열 평형조건에 의하여 복사에 의한 온도 강하량(ΔT_r)은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta T_r = \frac{s\xi A_s}{\rho(T)c(T)V} [(T + 460)^4 - (T_a + 460)^4] t_r \quad (7)$$

III. 고탄소강의 CST 제어

1. CST 제어개념 도출

그림 4는 고탄소강의 실험실적 CCT(Continuous Cooling Transformation) 곡선을 나타낸다. 실험은 ROT 구간에서 고탄

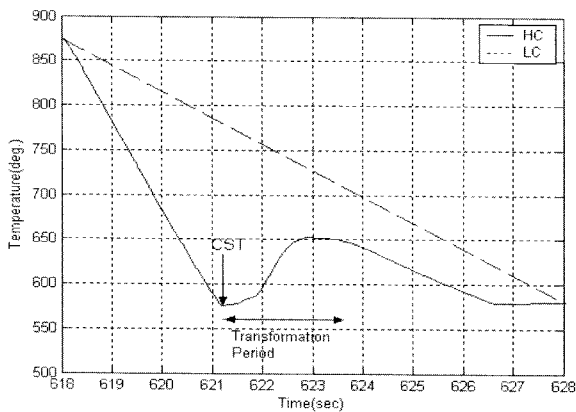


그림 4. 고탄소강의 실험실적 CCT.

Fig. 4. CCT of high carbon steel.

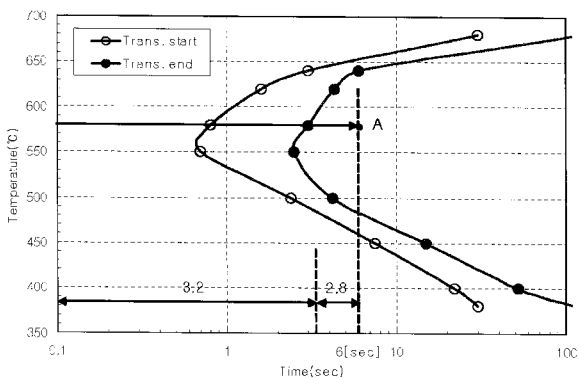


그림 5. 고탄소강의 실험실적 TTT.

Fig. 5. TTT of high carbon steel.

소강의 상변태 거동을 조사하기 위한 목적으로 직경 3[mm]와 높이 6[mm] 시편을 300초간 가열하고 30[°C/s]로 냉각 과정을 거쳐서 40[%]의 변형을 주고, 다시 연속적으로 같은 냉각속도로 냉각했을 때의 시간에 따른 온도변화를 그림에서 보여준다. 고탄소강이 아닌 저탄강의 경우, T_0 (그림에서 약 880도)와 T_N (그림에서 약 580도) 온도를 이용하여 제어하고, 상변태가 거의 없기 때문에 압연 속도에 따라서 밸브의 패턴을 정하면 LC(Low Carbon) 선도를 따라서 온도가 연속적으로 제어된다. 그러나 고탄강의 경우(HC: High Carbon)에는 T_0 에서 CST까지 연속적으로 냉각된 후에 냉각을 정지하더라도 변태 발열량에 의하여 온도가 크게 상승하는 변태구간(transformation period)을 가지게 된다. 실험에 의하면 변태 발열량은 거의 80도 정도가 됨을 알 수 있고, 변태구간이 끝난 후 T_N 온도까지 공냉에 의하여 서서히 온도가 감소하는 경향을 보인다. CST가 580도인 경우에는 냉각정지에서 변태 완료 시간까지 변태구간은 약 2.8초 정도 소요된다.

실험 결과로부터 ROT 구간에서 상변태를 완료시킬 조건은 다음과 같다. 마무리 압연 후에 T_0 온도로부터 약 3.2초까지는 급격하게 온도를 낮추어서 CST를 확보할 수 있도록 압연속도와 냉각패턴을 설계하여야 하며, 약 2.8초 후까지 ROT 구간에서 머무를 수 있도록 압연속도를 설계하여야 한다.

그림 5는 실험으로부터 구한 고탄소강의 TTT(Time Temperature Transformation) 선도를 나타낸다. TTT 선도는 냉각을 정지한 후, 시간에 따른 온도 변화와 변태율을 나타낸 선도이다. 그림에서 변태가 시작하는 곡선("o")과 변태가 완료된 곡선("●")이 도시되어 있다. 만약 냉각을 580도에서 정지하고, 연속 냉각으로 CST까지 3.2초, CST부터 변태완료 시간까지 2.8초를 확보한다면 TTT 선도에서 "A" 위치에 오게 되고, 실험에 의하여 이 위치의 재질은 미세 퍼얼라이트를 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 또한 변태가 종료되었기 때문에 원하는 재질과 감도를 얻을 수 있고, 찡구코일과 옛지 크랙의 문제를 해결할 수 있다.

2. 고탄소강 냉각패턴 도출방안

압연 판의 온도 T_0 와 압연 속도로부터 주수할 최대 बैं크와 최대 헤더수를 미리 설정하는 것을 냉각패턴이라고 하며, 이때 압연 판의 열물성치를 어떤 값으로 설정하느냐에 따라서 온도 예측 모델의 정도가 달라진다.

그림 6은 비열과 같은 열물성치를 이 논문에서 어떤 개념으로 도입하였는지를 간이화된 TTT 곡선으로 설명한다. 그

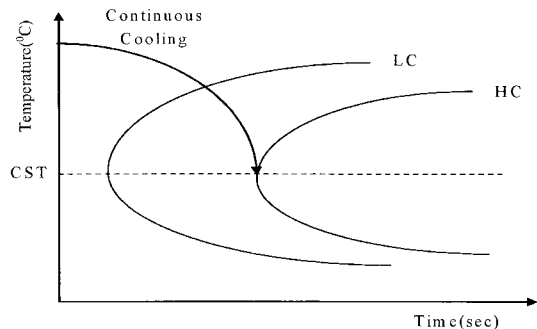


그림 6. 열물성치 도입 개념.

Fig. 6. Import concept of specific heat.

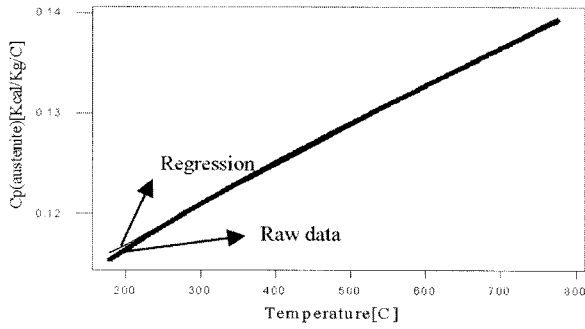


그림 7. 온도에 따른 열물성치 회귀곡선.
Fig. 7. Regression of specific heat.

림에서 고탄소강(HC)은 저탄소강(LC)에 비하여 변태곡선이 뒤로 밀려나 있으며, 연속 냉각중에 HC 곡선을 만나기 전까지는 어떤 변태곡선도 만나지 않기 때문에 오스테나이트 상(phase)을 유지하게 된다. 일반적으로 탄소강은 CST까지는 페라이트 변태를 하게 되고, 열물성치 또한 페라이트 물성치를 이용한다. 그러나, 고탄소강의 제조시에는 그림 5와 같이 실험실적 TTT로부터 CST까지는 아무런 변태곡선을 만나지 않고 냉각됨을 알 수 있었다. 따라서 고탄소강의 냉각패턴을 도출할 때 가장 중요한 열물성치는 오스테나이트 상에서의 열물성치를 사용해야 함을 알 수 있다.

오스테나이트 상에서의 열물성치를 그림 7과 같이 실제의 열물성치로부터 회귀모델을 다음과 같이 구하였다.

$$C_p = 0.109 + 0.0000392 T \quad (8)$$

여기서 C_p 는 비열, T 는 온도를 나타낸다. 오스테나이트 상에서의 열물성치를 회귀식 (8)로 나타낸 결과, 모델의 결정계수 (R^2)가 99.9%로 정확한 회귀식을 얻을 수 있었다.

IV. 냉각패턴 시뮬레이션

CST를 ROT상에서 약 3.2초에 도달할 수 있도록 최대 बैं크와 헤더수를 어떻게 설정할 것인가를 시뮬레이션 하기 위하여 온도제어 모델 (1)-(7)을 이용하여 시뮬레이터를 개발하였다[23]. 시뮬레이션 순서는 그림 8과 같은 흐름도로 나타내었다. 그림에서 열유속 계수($W/m^2 \cdot ^\circ C$)는 단위 시간, 단위 면적, 단위 온도당 냉각된 열량으로 냉각 성능을 결정하는 중요한 변수이다.

냉각패턴의 시뮬레이션 이전에, 개발된 시뮬레이터를 실 조업라인의 냉각성과 유사하게 맞추기 위한 시뮬레이터 최적화 작업이 필요하다. 시뮬레이터 최적화는 온도 모델의 조정계수중 주로 열유속 계수를 조정함으로써 가능하다. 그림 9는 최종 압연판의 두께가 2.0[mm]인 고탄소강의 주수 실험을 이용하여 시뮬레이터를 최적화한 결과를 나타낸다. 그리고 표 1은 시뮬레이터를 최적화하기 위한 냉각 조건들이다. 그림 9와 표 1을 보면, 3.2초만에 CST 580도를 만족하기 위하여 각 बैं크 사이의 거리와 변태 시간으로부터 연산한 결과, 압연속도는 800[mpm]으로 설정하였고, 연속 냉각구간에서 냉각속도를 100.5[$^\circ C/s$]의 높은 냉각속도를 얻을 수 있었다. 그리고 중요한 열유속 계수는 현장 실 조업라인과 유사한 온도 패턴을 얻기 위하여 2.9로 설정하였다.

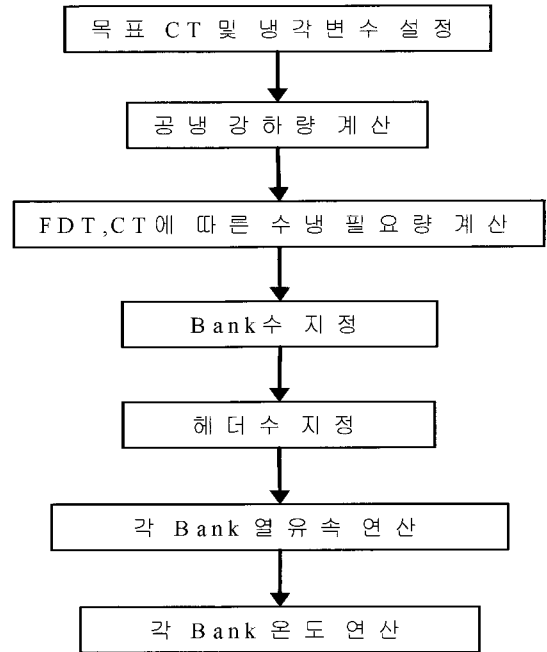


그림 8. 온도 예측 시뮬레이션 흐름도.
Fig. 8. Flowchart for simulation of temperature prediction.

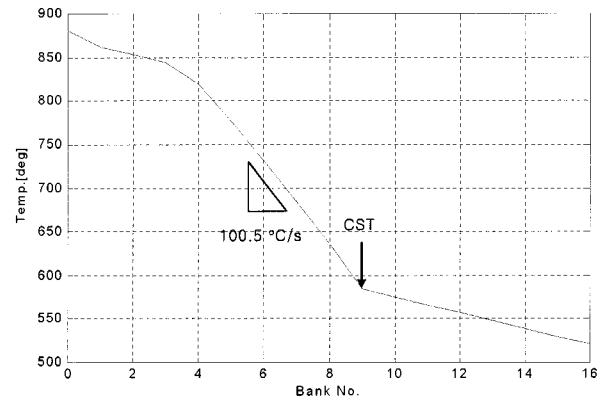


그림 9. 고탄소강의 시뮬레이터 최적화.
Fig. 9. Simulator optimization of high carbon steel.

표 1. 시뮬레이터 최적화 조건.
Table 1. Optimization condition of simulator.

Parameter	Value	Parameter	Value
두께[mm]	2.0	T_N [$^\circ C$]	620
폭[mm]	1,100	압연속도[mpm]	800
T_0 [$^\circ C$]	880	열유속 계수[$W/m^2 \cdot ^\circ C$]	2.9

그림 10은 압연 판의 두께 1.6[mm] 고탄소강을 현장 실 라인에서 생산하기 위한 냉각패턴을 시뮬레이션한 결과이다. 시뮬레이션에 사용된 냉각 조건은 두께를 제외하고는 표 1과 동일하다. 열유속 계수를 표 1과 같이 2.9로 설정한 경우, 총 사용 헤더수를 33개, 30개, 27개로 설정한 경우, CST가 각각 517도, 545도, 582도로 시뮬레이션 되었다. 목표로 하는

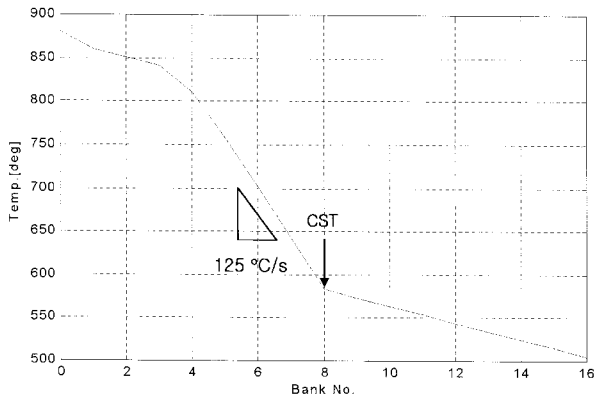


그림 10. 고탄소강의 냉각패턴 시뮬레이션.
Fig. 10. Cooling pattern simulation of high carbon steel.

CST가 580도이므로 최종 냉각 패턴은 27개를 사용하였다.

V. 온라인 테스트

본 장에서는 시뮬레이션 결과를 바탕으로 포항 열연공장에서 온라인으로 온도제어를 실시한 결과를 기술한다. 그림 11은 온라인 온도제어 테스트 결과로써 T_b , T_N 온도의 길이에 따른 온도 제어결과이다. T_b 와 T_N 의 목표치는 각각 880도, 650도이고, 압연속도는 800[mpm]이다. x축은 제어주기를 나타내며, 1개의 제어주기(pulse)는 11.52[m]이고, 각 제어주기마다 제어 입력이 계산된다. 그림 11의 T_b 는 길이방향으로 볼 때 압연 판의 미단부(tail)가 온도가 떨어지는 경향이 있으며, 이는 압연 시간이 길어지면서 공냉 시간이 길어져 압연 판 선단부(head)보다 온도가 많이 떨어져 있는 것을 볼 수 있다. T_N 은 압연 판의 선단부와 미단부에 권취를 용이하게 하기 위하여 온도를 약 20도 올려주는 스텝(step) 제어가 들어가 있는 것을 볼 수 있다. T_N 의 판내 편차는 약 10[°C]로써 매우 양호하였다.

그림 12는 온도 제어에 사용된 상부과 하부 헤더의 개수를 나타낸다. 압연 판의 선단부에서는 압연 속도가 느리기 때문에 사용된 헤더의 개수는 적고, 압연 판의 중앙으로 갈수록 압연 속도가 빨라서 헤더의 개수가 증가하는 것을 볼 수 있다.

그림 13은 온라인 테스트시 8번과 9번 बैं크 사이에 설치되어 있는 중간온도계의 실적치이다. 그림에서 “A” 구간은 그림 11의 T_N 과 마찬가지로 스텝 제어에 의하여 온도가 상승한 부분이고, “C” 구간은 압연 속도가 증가하면서 8번 बैं크까지 주수되고, 압연 판 체류수의 영향으로 온도가 크게 변동하는 구간이다. 따라서, “A”, “C” 구간의 중간 온도 값은 상변태를 판단할 수 있는 온도가 아니다. “B” 구간은 낮은 압연 속도로 냉각한 부분이고 이 구간의 온도가 CST라고 할 수 있다. “B” 구간의 온도 실측치가 약 580도 이므로 온도 예측 모델과 시뮬레이션으로부터 바람직한 온도 제어 실적을 얻을 수 있었다.

약 3개월간의 온라인 온도제어 실적으로부터 ROT 구간에서 퍼얼라이트 변태율은 약 93[%]로 완전 변태되었으며, 균일한 상변태로 인하여 고탄소강의 문제인 찡구 발생이나 엷지부 크랙의 문제를 해결 할 수 있었다.

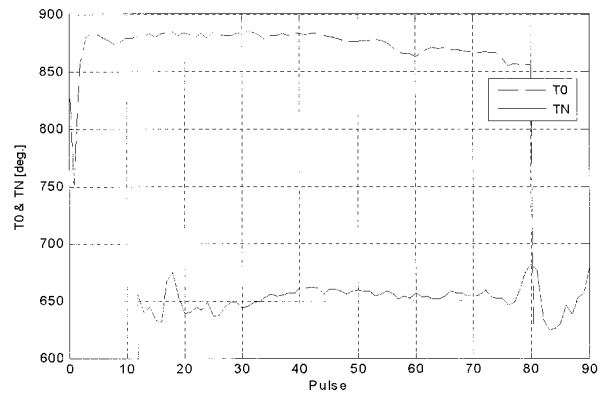


그림 11. 온라인 온도제어 테스트 결과.
Fig. 11. On line temperature control test.

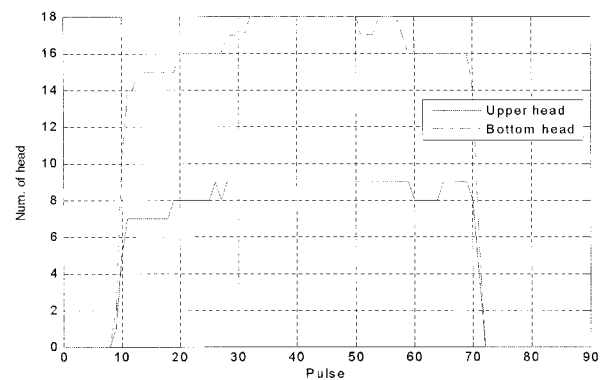


그림 12. 온도제어시 사용 헤더수.
Fig. 12. Head number of temperature control.

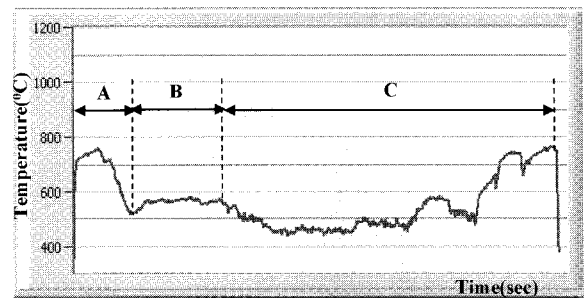


그림 13. 고탄소강의 중간온도 실적.
Fig. 13. Middle temperature of temperature control.

VI. 결론

이 논문에서는 고강도 열연 제품의 상변태를 제어하여 압연 판의 길이, 폭방향의 균일한 온도와 재질특성을 얻기 위하여, ROT 공정에서 최초로 냉각정지 온도제어(CSTC)라는 개념을 제안하였고 냉각패턴 시뮬레이션 결과를 이용하여 포스코 포항 열연공장에 온라인으로 적용하였다.

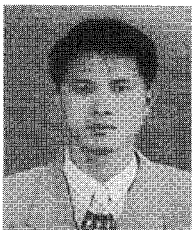
먼저, 실험을 통하여 고탄소강의 상변태 특성을 CCT와 TTT 선도로부터 해석하였고, 이를 통하여 상변태를 지연시키는 문제를 CST 제어로 해결할 수 있었다. 열전달 지배방정식으로부터 수냉과 공냉시의 온도제어 모델을 구축하였으며, 모델을 바탕으로 시뮬레이터를 개발하여 ROT 공정에서

상변태를 종료시키고, CST를 얻을 수 있는 압연 속도와 냉각 패턴을 도출할 수 있었다.

포항 열연공장에 온라인으로 테스트한 결과 ROT 공정에서 퍼얼라이트 변태율은 약 93[%]로 거의 변태가 완료되었으며, 약 43[%] 정도 변태율이 향상되어 찡구코일이나 옛지부 크랙 등의 문제를 해결할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

- [1] M. Phaniraj, S. Shamasundar, and A. K. Lahiri, "Relevance of ROT control for hot rolled low carbon steels," *Steel Res.*, vol. 72, no. 5, pp. 221-224, 2001.
- [2] W. Timm, K. Weinzierl, A. Leipertz, H. Zieger, and G. Zouhar, "Modelling of heat transfer in hot strip mill runout table cooling," *Steel Res.*, vol. 73, no. 3, pp. 97-104, 2002.
- [3] M. Suehiro, T. Oda, T. Senuma, and S. Konishi, "Development of mathematical model for predicting transformation of high-carbon steel during cooling on runout table and its application to on-line temperature control of hot strip mill," *Nippon Steel Technical Report*, no. 67, pp.49-56, 1995.
- [4] T. Oda, Y. Kondo, S. Konishi, H. Murakami, M. Suehiro, and T. Yabuta, "Development of accurate control in hot strip mill," *The Iron and Steel Institute of Japan*, vol. 81, no. 3, pp. 35-40, 1995.
- [5] N. S. Samaras, "Novel control structure for runout table coiling temperature control," *AISE Steel Tech.*, 2001.
- [6] A. G. Groch, R. Gubernat, and E. R. Birstein, "Automatic control of laminar flow cooling in continuous and reversing hot strip mills," *Iron and Steel Engineer*, vol. 67, no. 9, pp. 16-20, 1990.
- [7] R. W. Moffat, M. C. Moore, M. J. Robinson, and J. D. Ashton, "Computer control of hot strip cooling temperature with variable flow laminar sprays," *Iron and Steel Eng.*, vol. 62, no. 11, pp. 21-28, 1985.
- [8] G. V. Ditzhuijzen, "The controlled cooling of hot rolled strip: a combination of physical modeling, control problems and practical adaptation," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 38, no. 7, pp. 1060-1065, 1993.
- [9] M. D. Leltholf and J. R. Dahm, "Model reference control of runout table cooling at LTV," *Iron and Steel Engineer*, vol. 66, no. 8, pp. 31-35, 1989.
- [10] N. S. Samaras and M. A. Simaan, "Water-cooled end-point boundary temperature control of hot strip via dynamic programming," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 34, no. 6, pp. 1335-1341, 1998.
- [11] N. S. Samaras and M. A. Simaan, "Optimized trajectory tracking control of multistage dynamic metal-cooling processes," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 37, no. 3, pp. 920-927, 2001.
- [12] S. K. Biswas, S. Chen, and A. Satyanarayana, "Optimal temperature tracking for accelerated cooling processes in hot rolling of steel," *Dynamics and Control*, vol. 7, pp. 327-340, 1997.
- [13] T. Harakawa and T. Kawaguchi, "Digital control in iron and steel making processes," *Automatica*, vol. 20, no. 5, pp. 1185-1202, 1993.
- [14] R. K. Kumar, S. K. Sinha, and A. K. Lahiri, "An on-line parallel controller for the runout table of hot strip mills," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 9, no. 6, pp. 821-830, 2001.
- [15] S. Guan, H. X. Li, and S. K. Tso, "Multivariable fuzzy supervisory control for the laminar cooling process of hot rolled slab," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 348-356, 2001.
- [16] F. E. James *et al.*, "Numerical modeling of hot strip mill runout table cooling," *Iron Steel Eng.*, pp. 50-55, 1993.
- [17] N. Hatta and H. Osakabe, "Numerical modeling for cooling process of a moving hot plate by a laminar water curtain," *The Iron and Steel Institute of Japan*, vol. 29, no. 11, pp. 919-925, 1989.
- [18] D. Auzinger, F. Parzer, "Process optimization for laminar cooling," *MPT International*, vol. 5, pp. 68-75, 1996.
- [19] E. N. Hinrichsen and G. P. Petrus, "Hot strip mill runout table cooling - a system view of control, operation and equipment," *Iron and Steel Eng.*, vol. 53, no. 10, pp. 29-34, 1976.
- [20] K. Yanagi, "Prediction of strip temperature for hot strip mills," *The Iron and Steel Institute of Japan*, vol. 16, no. 1, pp. 11-19, 1976.
- [21] V. S. Arpaci, *Conduction Heat Transfer*, Lexington, MA, 1991.
- [22] V. Ginzburg, *Steel Rolling Technology*, New York, Marcel Dekker, 1988.
- [23] H. Yoshida, A. Yorifuji, S. Koseki, and M. Saeki, "An integrated mathematical simulation of temperatures, rolling loads and metallurgical properties in hot strip mills," *The Iron and Steel Institute of Japan*, vol. 31, no. 6, pp. 571-576, 1991.



박철재

1992년 부산대학교 정밀기계공학과 졸업(공학사). 1994년 동 대학원 졸업(공학석사). 2007년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 대학원 졸업(공학박사). 1994년~현재 포스코 기술연구소 전문연구원. 관심분야는 모델예측제어, 건설제어, 프로

세스 규명 및 제어.