

열간압연 고강도강의 온도 및 재질제어

박철재*

(논문접수일 2011. 06. 29, 수정일 2011. 08. 04, 심사완료일 2011. 08. 08)

Temperature and Property Control of High Strength Steel in Hot Strip Mills

Cheol Jae Park

Abstract

This paper proposes a cooling stop temperature control(CST) and a phase transformation control(PTR) which aim at obtaining the uniform temperature and quality along the longitudinal direction of the high strength steel on the run-out table(ROT) process. The problems of the temperature control are analyzed for the conventional steel and the new control concepts are derived from a time-temperature transformation(TTT) diagram. The proposed control technologies are verified from the simulation results under the temperature prediction model by the heat transfer governing equation, and the temperature estimation simulator. It is shown through the field test of the hot strip mills that the phase transformation ratio of the high strength steel is considerably improved by the proposed temperature controls.

Key Words : Hot strip mills(열간압연), Temperature control(온도제어), Phase transformation(상변태), Run-out table(ROT 공정), Cooling stop(냉각정지), High strength steel(고강도강)

1. 서론

열연 공정에서 고강도강은 강도가 크게 요구되는 각종 기계 부품과 자동차용 부품 등에 사용되고 있으며, 높은 수익을 창출할 수 있는 고부가가치강이다. 열연 ROT(run-out table) 공정에서 고강도강의 생산에 있어서 가장 중요한 것은 길이방향의 온도 및 재질을 일정하게 만드는 것이다^(1,2).

일반적으로 고강도강을 생산할 때, 강도가 높아서 마무리 압연에서 압연이 쉽지 않을 뿐 아니라, ROT 공정에서 길이 방향으로 동일한 상(phase)을 갖도록 제어하는 것이 쉽지 않다^(3,4).

ROT 공정에서 고강도강의 온도 및 재질 제어서 문제점을 크게 두 가지로 볼 수 있다. 첫째, 길이방향의 상변태가 ROT 공정에서 종료되지 않는다는 점이다. ROT 공정 이후에 공냉하는

동안 변태발열에 의하여 고강도강에서 원하는 베이나이트(bainite) 조직이 생성되지 않고 폭 방향으로 국부적으로 더 높은 온도에서 생성되는 퍼얼라이트(pearlite) 조직으로 변태된다. 따라서 길이 방향과 폭 방향으로 재질과 조직이 일정하지 않아서 생산성이 크게 떨어진다. 또한 압연 강판의 폭 방향으로 에지(edge)는 중앙부보다 열전달이 활발히 진행되기 때문에 중앙부보다 냉각이 더 빨리 진행되어 길이 방향으로 크랙(crack)이 발생하는 문제가 있다. 둘째, 폭 방향의 냉각편차에 의한 크랙의 문제를 해결하기 위하여 냉각 속도를 작게 하면, 베이나이트로의 변태가 지연되어 ROT 공정 후에 변태발열 때문에 압연 강판이 찌그러지는 타원형 강판이 생성된다. 이러한 타원형 강판은 다운 코일러(down coiler)의 맨드렐(mandrel)에서 압연 강판이 인출되지 않아서 생산 공정 전체가 멈추는 사고의 원인

* 대구대학교 기계자동차공학부 (cjpark@daegu.ac.kr)
주소: 712-714 경북 경산시 진량읍 내리리 15

이 되므로 생산성에 심각한 문제를 일으킬 수 있다. 따라서 ROT 공정에서 상변태를 종료하는 기술의 개발이 필수적이다.

기존에는 위와 같은 문제를 해결하기 위하여 낮은 온도에서 압연하는 저온 압연이 주로 실시되었다. 저온 압연은 보통 조압연(roughing mill) 출측의 온도가 약 950°C, 마무리 압연기 출측의 온도가 약 800°C 정도로 설정하여 강판의 온도를 낮추어서 압연하는 것이다. 저온 압연은 다음과 같은 세 가지 장점이 있다. 첫째, 압연 온도를 하향시킴으로써 스케일이 줄어들고 산세(descaling)를 쉽게 할 수 있다. 또한 조직이 미세화 되어서 소둔성을 개선시키는데 도움이 된다. 둘째, ROT 상에서 상변태를 완료할 수 있다. 이로써 권취온도를 쉽게 제어할 수 있고, ROT 상에서 뿐 아니라 권취할 때 압연 판의 형상이 변하는 것을 방지할 수 있다. 셋째, ROT 상에서 냉각속도를 낮출 수 있다. 냉각속도를 낮추면 냉각수량이 줄어 압연 강판의 재질 편차를 줄일 수 있다. 또한 급냉조직을 억제할 수 있어서 에지 크랙 등을 방지 할 수 있다. 저온 압연으로 인한 위와 같은 장점에도 불구하고, 다음과 같은 세 가지의 단점도 존재한다. 첫째, 압연시 온도가 낮기 때문에 폭 방향의 두께 편차가 증가할 수 있는 가능성이 크다. 둘째, 낮은 온도에서 압연하기 때문에 마무리 압연기에서 압연 판의 진행성이 나빠질 가능성이 크고, 이로 인하여 생산성이 문제가 될 수 있다. 셋째, 고강도강에서 저온 압연하는 경우, 압연 하중(roll force)이 증가하고 압연 강판이 사행이 되어 한쪽 방향으로 쏠리거나 캠버(camber)가 발생할 수 있다.

최근 ROT 공정에서 균일한 온도와 재질을 얻기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 마무리 압연 출측의 온도로부터 냉각속도를 균일하게 제어하기 위하여 ROT 공정을 모델링하고 예측 제어기와 같은 최적 제어를 개발하는 연구가 진행되고 있으며^(5~7), 다변수 제어기법을 이용한 적응제어기의 설계가 연구되고 있다^(8,9). 열역학적 에너지 방정식을 이용한 기존의 온도 제어 방법을 보완하기 위하여 비선형 온도제어 모델을 개발하여 모델의 정도를 높이고 온라인에 적용하여 온도 제어 성능을 향상시켰다^(10,11). 열간 압연 강판의 최종 목표온도와 ROT 공정에서의 유량과의 상관관계를 실험식으로 유도하여 온도제어에 사용하는 연구도 진행되었다⁽¹²⁾.

본 논문에서는 ROT 공정에서 냉각정지 온도제어(CST: cooling stop temperature)와 상변태 기술(PTR: phase transformation in ROT)을 이용하여 신강종으로 개발된 약 1500 MPa의 고강도강에 대한 길이 방향 온도제어 및 재질제어의 문제점들을 체계적으로 해결하는 것을 연구 목표로 한다. CST 제어는 고탄소강과 같은 고강도강에서 상변태를 제어하기 위하여 제안되었다⁽¹³⁾.

이를 위하여 권취온도(CT: coiling temperature) 제어의 문제점을 분석하고 냉각정지 온도제어의 필요성에 대해 TTT (time temperature transformation) 선도로 분석한다. 비선형

온도제어 모델로부터 개발된 온도예측 시뮬레이터를 이용하여 개발된 제어 방법의 타당성을 시뮬레이션하여 ROT 공정에 적용 가능한 냉각 패턴을 도출한다. 시뮬레이션 결과를 바탕으로 현장 온라인 테스트를 열연공장에서 수행한다. 결과적으로 제안된 제어기법을 통하여 고강도강의 생산시 ROT 공정에서 완전히 변태가 종료되어 길이방향의 온도와 재질제어에 효과가 있음을 보인다.

본 논문에서 수행하고자 하는 주요 연구내용 및 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 ROT 공정에서의 온도제어에 대하여 간략히 설명하고 비선형 열전달 방정식을 소개한다. 제 3장에서는 고강도강에서의 냉각정지 온도제어 방법과 상변태 제어 방법을 제안하고, 최적 냉각패턴을 도출할 수 있는 방안을 서술한다. 4장에서는 개발된 제어 방법에 따른 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 분석하고 5장에서 온라인 테스트 결과를 설명한다. 본 논문의 결론은 6장에서 요약한다.

2. ROT 공정에서의 온도제어

열간 압연에서의 ROT 공정은 그림 1과 같이 마무리 압연(finishing mill) 직후의 공정으로써 압연 강판의 재질과 강도를 제어하는 중요한 공정이다. 약 16개 정도의 주수 बैं크(bank)가 상하부에 각각 설치되어 있고 1~14번 बैं크는 피드포워드 बैं크, 15~16번 बैं크는 피드백 बैं크로 주로 사용된다. 각각의 피드포워드 बैं크에는 상하부에 6개의 주수 헤더(header)로 구성되어 있고, 피드백 बैं크는 상하부에 12개의 헤더로 구성되어 있어서 정밀한 온도제어가 가능하게 설치되어 있다.

압연 강판이 마무리 압연기에서 압연되는 동안, ROT 공정을 담당하는 계산기는 마무리 압연 출측 온도(FDT: finishing delivery temperature)의 목표치와 ROT 공정의 출측온도(CT)의 목표치를 이용하여 최대 몇 개의 बैं크와 헤더를 이용하여 주수할 것인지를 결정하는 냉각 패턴을 도출한다. 또한 FDT의 실측치와 압연 강판의 실측 속도에 따라서 냉각 패턴 이내에서 각 बैं크의 헤더수를 조절함으로써 온도를 제어한다. 냉각이 종료된 후에 CT 실측온도와 목표온도와의 편차는 피드백 बैं크에 의하여 정밀 제어하여 압연 강판의 온도 및 재질을 제어할 수

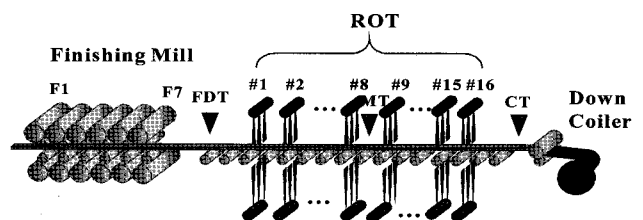


Fig. 1 Configuration of ROT process

있게 된다.

그림 2는 ROT 공정에서의 온도제어 흐름도를 나타낸다. 먼저 ROT 제어 시스템에서는 압연 강판의 강종, FDT 및 CT 온도의 목표치와 학습계수 등의 정보를 수집한다. 그리고 마무리 압연기의 스탠드를 통과하는 시점에 초기 주수를 실시하게 된다. 초기 주수는 온도 목표치들을 이용하여 계산되며, 냉각수에 의한 온도 강하량과 복사에 의한 온도 강하량이 온도 예측 모델로부터 계산된다. 여기서는 모델의 결과만을 나타내고 자세한 수식은 참고문헌 (6)을 참고한다.

먼저 냉각수에 의한 온도 강하량(ΔT_d)는 다음과 같다.

$$\Delta T_d = \frac{2k}{\rho(T)c(T)h} (T - T_w) \left(\frac{\Delta l}{\pi av} \right)^{0.5} t_w \quad (1)$$

여기서 ρ 는 밀도, c 는 비열, h 는 압연 강판의 두께, k 는 열전도도(conductivity), T 는 온도, T_w 는 냉각수 온도, Δl 은 압연 강판의 단위길이, a 는 열확산율(heat diffusivity), v 는 압연 속도, t_w 는 수냉 시간을 각각 나타낸다.

복사에 의한 온도 강하량(ΔT_r)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta T_r = \frac{s\xi A_r}{\rho(T)c(T)V} [(T+460)^4 - (T_a+460)^4] t_r \quad (2)$$

여기서 s 는 스테판 볼츠만 상수, ξ 는 방사율(emisivity), A_r 은 표면적, V 는 압연 강판의 체적, T_a 는 대기 온도, t_r 는 복사 시간을 각각 나타낸다.

초기 주수 후에 압연 강판이 마무리 압연기를 모두 통과하면 FDT 온도가 측정되며 이 때의 압연 속도를 측정하여 피드포워드 बैं크의 주수량을 연산하게 된다. 계산된 주수량을 이용하여 각 बैं크의 주수량과 주수 헤더의 개수를 연산한다. 주수 बैं크와 헤더의 개수에 대한 연산은 일정한 길이마다 실시되며, 주수 결과는 ROT 출측의 온도 실측치인 CT 온도계에서 측정된다. 측정된 온도와 목표 온도와의 오차는 피드백 बैं크에 의하여 제어된다. 온도 제어가 완료되면 당해 압연 강판의 온도 실적은 장단기적으로 학습된다. 따라서 처음 생산되는 신강종의 경우에는 이전에 작업되었던 유사 강종의 온도실적을 참고하여 학습계수 등을 선정하면, 급격한 온도변화를 예방하고 온도 제어의 성능을 높일 수 있다.

3. 고강도강의 상변태 제어

3.1 냉각정지온도를 이용한 상변태 제어

열간 압연에서 생산하는 저탄소강이나 변태 발열이 적은 일반강의 경우에는 ROT 공정에서 상변태 제어보다는 압연 강판의 길이방향과 폭방향의 온도제어 기술이 중요하다. 이 경우의 온도제어는 FDT와 CT 목표 온도를 이용하여 온도예측 모델로부터 각 बैं크의 주수량을 결정하는 두 점 경계문제(two point boundary problem)로 단순화 할 수 있다.

그러나 고강도강에서 FDT와 CT 목표 온도만으로 중간 बैं크에서의 냉각이력에 무관하게 냉각하는 경우, 최종 CT 온도 제어만으로는 강의 재질과 형상, 온도 등을 제어할 수 없다. 이 경우에는 온도제어도 중요하지만, ROT बैं크사이에서의 냉각이력을 맞추는 것이 훨씬 중요하다. 이를 위하여 본 연구에서는 냉각정지 온도(CST)를 설정하고 상변태를 제어함으로써 고강도강의 재질을 일정하게 제어한다.

그림 3은 자동차용 고강도강의 CST 개념도를 TTT로 도시하였다. 탄소함유량이 약 0.2%로 중탄소 정도의 강종이며, 강도가 약 1500MPa 정도이다. 그림에서 점선과 같이 일반적인 두 점 경계 문제를 이용하여 CT 제어하는 경우에는 아주 오랜 시간이 경과한 후(약 8000초) 원하지 않는 재질인 퍼얼라이트 강이 생성되는 것을 볼 수 있다. 그러나 실선과 같이 냉각이 종료되는 시점을 제어하는 CST 제어의 경우에는 전단 बैं크를 이용하여 약 20초 내외에서 냉각을 종료하고 나머지 बैं크에서는 공냉하는 방법으로 온도를 제어한다면, 강도가 높은 베이나이트 재질을 확보할 수 있다. 그림 3의 경우 약 25초에서 CST

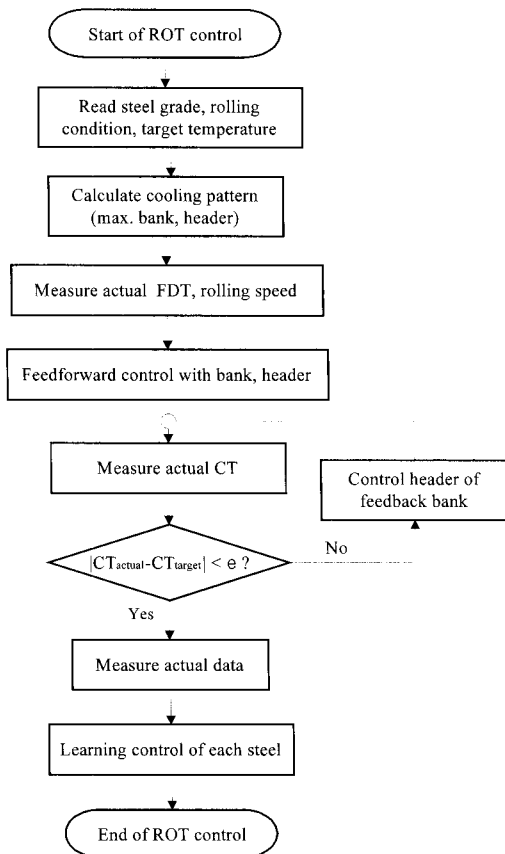


Fig. 2 Flowchart of temperature control in ROT process

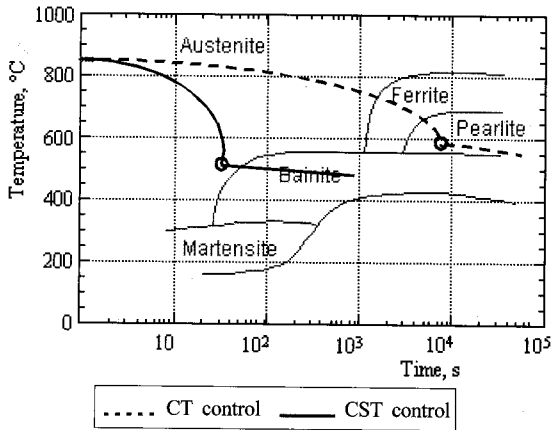


Fig. 3 Concept of CST for high strength steel

는 약 540°C가 된다. 일반적으로 CT 온도제어만으로는 CT 목표 온도 약 600°C를 만족하여 온도제어 목표는 달성하지만, 요구하는 베이나이트 재질을 얻을 수 없으며, 고강도강을 생산할 수 없게 된다.

자동차용으로 사용되는 이와 같은 고강도강을 생산하기 위하여 페라이트와 퍼얼라이트의 불균일한 밴드조직을 방지하고, 미세하고 균일한 베이나이트 조직을 확보하기 위하여 CST 제어를 실시한다. 또한 CST를 확보하여 ROT 구간에서 완전변태를 시킴으로써 변태 분율을 증가시키고 타원형 강판의 발생을 방지할 수 있는 장점이 있다.

따라서 고강도강을 생산하는데 있어서 만족하는 온도와 재질을 얻기 위해서는 그림에서 보는 것과 같이 냉각이 종료되는 온도를 제어하는 것이 가장 필수적이면서 중요한 개념이 된다.

3.2 고강도강의 온도 및 상변태 제어

그림 4는 기존에 생산중인 자동차용 고강도강의 TTT 선도를 나타낸다. 본 절에서는 기존에 생산하지 않은 신강종의 고강도강을 생산하는데 있어서, 일반적인 문제점들을 해결하기 위하여 기존 생산재의 냉각특성을 분석하여 신강종의 냉각조건을 도출한다. 그림의 TTT 선도는 각 온도별로 시간에 따라 변태가 얼마나 진행되었는지를 나타낸다. 예를 들어 600°C의 온도에서는 약 1.2초에서 변태가 5%(○), 약 9.6초에서 50%(●), 약 352.5초에서 변태가 95%(●) 진행되었다는 것을 나타낸다. 그림에서의 점선은 같은 변태 분율을 나타내는 같은 조직의 온도와 시간을 나타낸다. 즉, 위의 점선 3개는 페라이트와 퍼얼라이트 조직(F+P)을, 아래 점선 3개는 베이나이트(B)를 생성하는 조직을 나타낸다.

고강도강의 냉각조건을 결정하기 위하여, 먼저 신강종과 제강 성분(C, Mn, Si 등)이 유사한 기존의 생산재에 대한 변태조건을 분석하였다. 기존 생산재는 실험에 의한 분석결과 목표 CT 온도가 580°C를 나타내었다. 이 강재는 아래 표 1과 같은

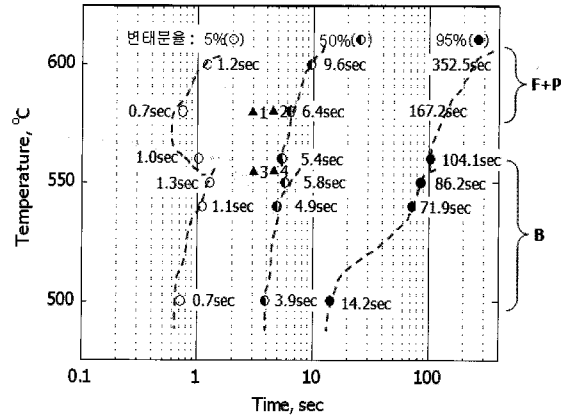


Fig. 4 TTT diagram of high strength steel

2가지 압연 조건으로 생산된 강종을 참고하였다. 즉, 탄소 함유량 0.2%, 압연 두께 2.0mm, 1.6mm에 대하여 압연속도와 CST, FDT는 표와 같다. 그림 4에서 표시 ‘▲1’ 위치는 기존 고강도강에 대하여 2.0mm 두께에서 변태 분율이 34.5%가 발생한 지점이다. CT 온도가 550°C 이상이며, 열연공장의 레이아웃과 기존의 주수 실적으로 판단할 때 수냉후에 공냉이 약 3.6초가 필요했던 것으로 계산된다. 이 때 압연 속도는 870 mpm으로 계산하였다. 또한 표시 ‘▲2’는 기존 강종의 1.6mm 두께에서 변태 분율이 41.2%가 발생한 지점이다. 역시 기존의 주수 실적으로 계산해보면, 공냉이 약 4.6초가 필요하였으며, 이 때 압연 속도는 900mpm으로 계산하였다. 앞의 두 위치(‘▲1’, ‘▲2’)에서는 ROT 공정 이후에 타원형 강판이 발생하지 않았으나, CST가 높았기 때문에 페라이트와 퍼얼라이트의 두 가지 조직이 함께 존재하였다. 이는 본 연구에서 목표로 하는 1500MPa 정도의 강도를 나타내는 조직이 아니므로 새로운 냉각조건을 도출이 필요하다.

신강종을 생산하는데 있어서, CST는 그림 4에서 나타낸 것과 같이 기존 유사 강종의 CST 보다는 낮아야 원하는 조직인 베이나이트 조직이 생성된다. 따라서 신강종의 목표 CT는 베이나이트 조직을 획득할 수 있도록 500~560°C 구간에서 설정되어야 한다. 본 연구에서는 CT 온도 중 베이나이트 조직을 충분히 획득할 수 있고, 타원형 강판을 방지할 수 있으며, 냉각 정지 후에 공냉에 의한 온도 저하(약 7°C/bank)를 감안하면서 충분히 높은 권취 온도(CT)를 확보하기 위하여 CST를 약

Table 1 Rolling condition of conventional high strength steel

	조건 1	조건 2
압연두께[mm]	2.0	1.6
압연속도[mpm]	850이상	870이상
CST[°C]	580이상	580이상
FDT[°C]	870이상	870이상

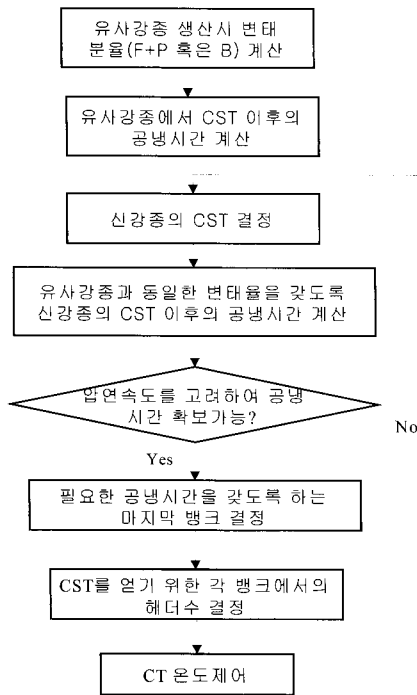


Fig. 5 Flowchart of phase transformation for high strength steel

580°C 이상으로 설정하였다.

또한 타원형 강판이 발생하지 않아야 하므로 앞의 두 위치와 거의 유사한 정도의 변태 분율을 얻어야 한다는 것을 알 수 있다. 표시 ‘▲3’은 앞의 표시 ‘▲1’과 유사하게 압연 두께 2.0mm에서 변태 분율이 34.5%가 되는 지점이며, 압연속도로 볼 때 공냉이 약 3.8초가 필요한 것으로 계산된다. 이는 주수를 약 9~10번 बैं크에서 완료해야 한다는 것을 계산을 통해서 알 수 있다. 또한 표시 ‘▲4’도 표시 ‘▲2’와 유사하며, 압연 두께 1.6mm에서 변태 분율이 41.2%가 되는 지점으로 공냉이 4.5초가 필요하고, 7~8번 बैं크까지 주수하고 공냉을 시켜야 원하는 조직인 베이나이트가 생성된다는 것을 알 수 있다.

그림 5는 신강종인 고강도강을 생산할때 ROT에서 상변태를 종료하고 만족하는 온도와 재질을 얻기 위하여 이상과 같은 알고리즘을 요약한 순서도이다.

4. 시뮬레이션을 통한 알고리즘 검증

본 연구에서 개발한 고강도강의 상변태 제어 알고리즘을 검증하기 위하여 온도제어 모델을 이용하여 시뮬레이터를 개발하였다. 시뮬레이션으로 알고리즘을 검증하기 이전에 시뮬레이터의 정확도를 높이기 위하여 열간 압연 공장의 작업 실적을 이용하여 시뮬레이터를 최적화 하는 것이 필요하다.

시뮬레이터의 최적화는 각 बैं크 출측의 실측 온도와 시뮬레이터에서 계산된 예측 온도와의 오차를 최소화 시키는 작업이며 주로 각 बैं크의 열유속 보정계수를 조정한다.

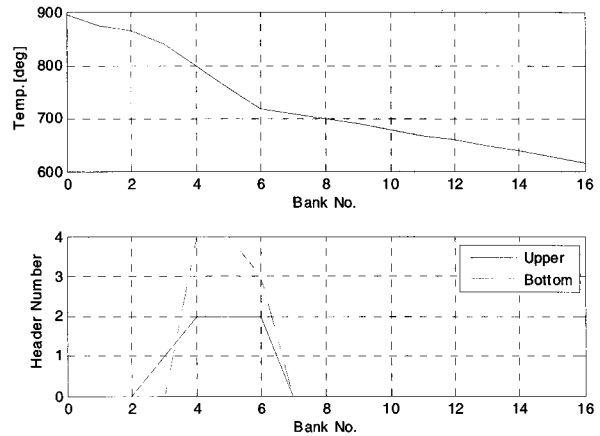


Fig. 6 Optimization of simulator using actual cooling data

먼저, 유사 강종에 대하여 현장의 주수 실적을 바탕으로 시뮬레이션을 수행하였다. 강종은 탄소 함유량이 약 0.2% 이상이고 압연 두께는 1.6mm, 폭 1180mm, FDT 880°C, 속도는 650mpm 이상이다. 그림 6은 시뮬레이션 결과이다. 그림 6의 상부 그림은 각 बैं크 출측의 예측 온도, 하부 그림은 각 बैं크에서 사용된 헤더의 개수이며, 범례의 upper는 상부 헤더의 사용 개수, bottom은 하부 헤더의 사용 개수를 각각 나타낸다.

현장의 온라인에서 수집한 CT는 617°C 이고, 시뮬레이터의 계수들, 특히 열유속 보정계수를 조정하여 시뮬레이터를 최적화한 결과 예측된 CT는 617.5°C 로 온라인의 실측치와 시뮬레이터의 예측치가 거의 유사하므로 시뮬레이터가 현장 조건에 맞게 최적화된 것을 알 수 있다. 또한 수냉구간인 3~6번 बैं크의 냉각속도(cooling rate)는 99.5°C/sec 로써 원하는 냉각속도인 30°C/sec 보다 높았으므로 ROT 구간에서 상변태가 종료될 수 있는 냉각속도를 확보할 수 있다.

최적화된 시뮬레이터를 이용하여 고강도강의 냉각패턴을 시뮬레이션으로 결정할 수 있다. 압연두께 1.6mm, 폭 1180 mm, FDT 850°C 이상, 압연 속도는 870mpm 이상이고 목표 CT는 540°C 이상인 경우에 대한 시뮬레이션 결과는 그림 7에 나타나 있다. 그림에서 냉각패턴은 상부 헤더를 2개, 하부 헤더를 4개 사용하였다. 그리고 상부 헤더는 전체 बैं크에 대해서 9개, 하부 헤더는 16개가 사용되었다. 시뮬레이션 결과 예측 CT는 540°C 이상을 확보할 수 있고 CST도 7번 बैं크에서 약 610°C 정도를 얻을 수 있었다.

5. 온라인 테스트

본 장에서는 시뮬레이션 결과를 바탕으로 열연공장에서 온라인으로 고강도강에 대한 상변태 테스트를 실시한 결과를 기술한다. 대상 강종의 탄소 함유량은 약 0.2% 정도이며, 압연 두께 1.4mm, 폭 1100mm, FDT 870°C 이상, CST는 580°C 이상이

다. 온라인 테스트의 설정 값은 앞 장의 시뮬레이션과 같은 강종, 두께, CT 그룹의 값이므로 냉각패턴 시뮬레이션 결과도 유사하다.

그림 8은 온라인 테스트 결과로서, 가로축은 압연 강판의 길이에 해당하는 펄스 개수, 세로축은 CT 실측 온도와 압연 속도를 각각 나타낸다. ROT 공정에서 헤더는 상부 11개와 하부 20개를 합쳐서 31개가 주수되었다. 또한 피드백 बैं크인 15, 16번 बैं크는 사용되지 않았다. 압연 속도는 최소 700mpm에서 최대 850mpm까지 도달하였다. 그림에서 CT 온도의 평균은 약 495°C 로 양호하였다.

그림 9는 그림 8의 실제 주수 실적을 이용하여 CST를 역으로 계산한 결과이다. CST가 앞 절에서 본 것과 같이 약 580°C 이상이고, 또한 현장에서 타원형 강판이 발생되지 않는다면 ROT에서 변태가 종료되어 완전 변태되었다고 할 수 있다. 그림에서 보는 것과 같이 8번 बैं크까지 주수되었으며, CST는 약 595°C가 되며, 수냉구간인 3~8번 까지의 냉각속도는 약 114.6°C/sec 로 최소 냉각속도인 30°C/sec 보다 훨씬 강하게

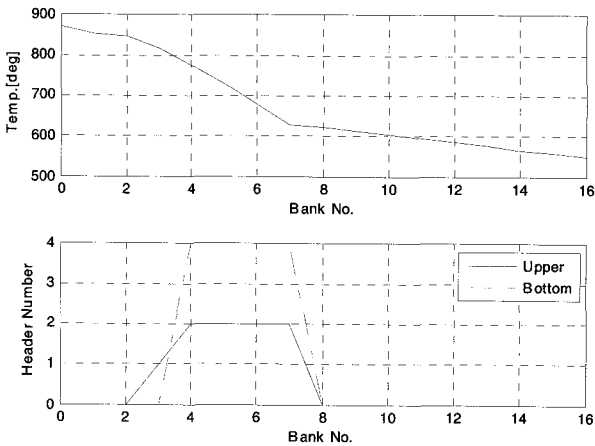


Fig. 7 Simulation of cooling pattern for high strength steel

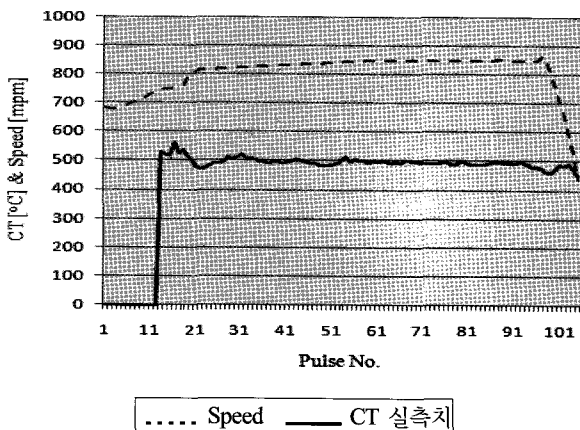


Fig. 8 Test result of phase transformation in on-line

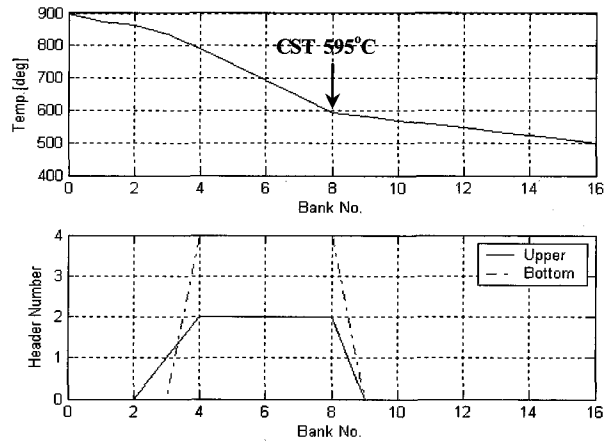


Fig. 9 Analysis result of CST using actual cooling data

냉각된 것으로 판단된다. 또한 그림 4의 TTT 선도에서 확인한 것과 같이 변태에 걸리는 시간인 약 4.2초를 확보할 수 있었고, 권취 후의 형상은 타원형 강판의 형태가 아닌 것으로 나타났다. 공냉시간은 압연속도 850mpm과 주수가 종료된 8번 बैं크에서 다운 코일러까지의 거리를 이용하여 계산한다. 따라서 압연 강판의 형상, CST 확보, CT 균일 및 공냉시간 확보로 ROT 공정에서 변태가 종료된 것으로 판단되며 균일한 온도를 얻을 수 있었다.

신강종인 고강도강에 대하여 약 3개월간 테스트를 실시한 결과 압연 강판의 CST, CT, 최소 냉각속도 및 공냉시간이 만족되었으며, 권취 후의 권취형상이 양호하였으므로 균일한 상변태로 인하여 고강도강의 문제점들을 해결 할 수 있었다.

6. 결론

본 논문에서는 열간 압연의 ROT 공정에서 고강도강의 길이 방향 온도 및 재질을 확보하기 위하여 냉각정지 온도와 상변태 제어 기술을 통하여 신강종의 생산시 발생하는 문제점들을 체계적으로 해결 할 수 있는 제어 기술들을 제안하였고, 온도제어 시뮬레이션 결과를 이용하여 포항 열연공장에 온라인으로 적용하여 알고리즘의 타당성을 입증하였다.

먼저, 기존의 유사 강종에 대한 권취온도 제어의 문제점들을 분석하고, 상변태 선도로부터 신강종의 변태제어 방안을 도출하였다. 유사 강종의 생산시 최적의 변태 분율을 계산하여 이를 신강종 생산에 적용하는 방안을 도출하였다. 기존의 CT 제어에 국한하던 온도제어 기술을 CST 라는 개념으로 확장하여 ROT 구간내에서 변태가 종료될 수 있고, 타원형 강판의 발생과 같은 문제점들을 해결할 수 있었다. 수냉과 공냉시의 열전달 방정식으로부터 온도 예측 시뮬레이터를 개발하여 알고리즘의 타당성을 시뮬레이션 하였다.

포항 열연 공장에서 온라인으로 테스트한 결과 ROT에서 변

태가 종료되어 온도 및 재질제어의 정도가 크게 향상되었음을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2011학년도 대구대학교 학술연구비지원에 의한 논문임.

참 고 문 헌

- (1) Suehiro, M., Oda, T., Senuma, T., and Konishi, S., 1995, "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.
- (2) Oda, T., Kondo, Y., Konishi, S., Murakami, H., Suehiro, M., and Yabuta, T., 1995, "Development of Accurate Control in Hot Strip Mill," *The Iron and Steel Institute of Japan*, Vol. 81, No. 3, pp. 35~40.
- (3) Ditzhuijzen, G. V., 1993, "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.
- (4) Biswas, S. K., Chen, S., and Satyanarayana, A., 1997, "Optimal Temperature Tracking for Accelerated Cooling Processes in Hot Rolling of Steel," *Dynamics and Control*, Vol. 7, No. 4, pp. 327~340.
- (5) Leltholf, M. D., and Dahm, J. R., 1989, "Model Reference Control of Runout Table Cooling at LTV," *Iron and Steel Engineer*, Vol. 66, No. 8, pp. 31~35.
- (6) Samaras, N. S., and Simaan, M. A., 1998, "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.
- (7) Samaras, N. S., and Simaan, M. A., 2001, "Optimized trajectory tracking control of multistage dynamic metal-cooling processes," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 37, No. 3, pp. 920~927.
- (8) Kumar, R. K., Sinha, S. K., and Lahiri, A. K., 2001, "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.
- (9) Guan, S., Li, H. X., and Tso, S. K., 2001, "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.
- (10) Xie, H. B., Jiang, Z. Y., Liu, X. H., Wang, G. D., and Tieu, A. K., 2006, "Prediction of coiling temperature on run-out table of hot strip mill using data mining," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 177, Issues 1-3, pp. 121~125.
- (11) Hatta, N., and Osakabe, H., 1989, "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.
- (12) Groch, A. G., Gubernat, R., and Birstein, E. R., 1990, "Automatic Control of Laminar Flow Cooling in Continuous and Reversing Hot Strip Mills," *Iron and Steel Engineer*, Vol. 67, No. 9, pp. 16~20.
- (13) Park, C. J., 2008, "CSTC of High Strength Steel for ROT Process in Hot Strip Mills," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol. 14, No. 2, pp. 191~196.