

Strip Tail부 재질 편차 감소를 위한 권취 온도 미단 제어 정도 향상

안 종 준, 성 영 훈, 백 계 주
박판품질기술팀, (광)미니밀부
포항제철주식회사

Coiling Temperature Control of Strip Tail for Minimizing the Deviation of Mechanical Properties in Mini-Mill Process

J. J. Ahn and Y. H. Seong and G. J. Baek
Thin Slab Quality & Technology Team, Mini-Mill Dept,
Pohang Iron & Steel Co., Ltd.

Abstract

This document illustrates the way to control of coiling temperature(CTC) of strip tail part in minimill process. The coiling temperature(CT) is very important fact in hot rolling process because the mechanical properties of strip depend on it. In mini-mill process, the speed pattern of rolling is different from that of conventional hot rolling.

We have a lot of difficulties in controlling the coiling temperature at strip tail part, because after the strip tail is passed out the final stand, it's impossible to control the coiling temperature by using coiling speed. So we have CT deviation in thin gauge, about 160℃ below in comparison with target CT. It's clear that deviation of mechanical properties(tensile strength, yield ratio etc) of strip to direction of length is so large, so we could not produce middle carbon steel, like this temperature condition.

New coiling temperature control of strip especially in strip tail was developed. An innovative method for calculate the deceleration speed of strip tail has been implemented in CTC program, so called "Coiling Temperature Control for Strip Tail". By using this, we can control the coiling temperature of strip tail within $\pm 20^{\circ}\text{C}$ in comparison with target CT. Also we could produce middle carbon steel by improvement of coiling temperature control.

Key words : Strip Tail Control, Coiling Temperature Control, Mechanical Properties

1. 서론

최근 판재 생산 공정에 도입된 미니밀 Process는 전기로-연속주조 공정을 이용하여 100mm 이하의 박슬라브를 생산하여 가열로를 거치지 않고 직접 열간 압연하여 열연 코일을 생산하는 공정이다. 기존 고로밀의 판재 생산공정과와의 차이를 Table 1에 나타내었다. 미니밀 Process의 장점은 철광석을 원료로 하는 고로 대신에 고철을 원료로 하는 전기로를 택하고 있으므로 설비가동 측면에서 유연성을 갖는다는 점과 박슬라브 주조법 및 연주-열연 직결공정을 채택하여 공정을 획기적으로 단축시켜 건설비가 저렴하고 제품생산에 필요한 에너지의 절감효과를 얻을 수 있는 선제철 공정이라는 점이다.

Table1: Comparison Minimill & Conventional mill

구분	고로밀	미니밀
처리 공정	<p style="text-align: center;"> </p> <p style="text-align: center;">*설비길이: 3,000m</p>	<p style="text-align: center;"> </p> <p style="text-align: center;">*설비길이: 185m</p>
장점	<ul style="list-style-type: none"> · 원료비 저렴 · 고급강 생산가능 	<ul style="list-style-type: none"> · 건설비 底 · 환경 친화적 · 박물생산 유리 · 탄력적 시장대응
단점	<ul style="list-style-type: none"> · 건설비 高 · 제조비 高 · 환경오염원 多 	<ul style="list-style-type: none"> · 원료비 高 · 저급강 위주 생산

미니밀 Process의 종류는 크게 ISP(In-line Strip Production), CSP(Compact Strip Production) 및 CONROLL(CONTinuous cast & ROLLing) 등으로 대별된다. 이중 당사의 No.1 미니밀 ISP 설비와 미국 Nucor사의 CSP 설비의 비교를 Fig.1과 Table 2에 나타내었다. ISP는 CSP의 설비와는 달리 연주 몰드 직하에서 미용고 압하 공정(Liquid Core Reduction)의 채택에 의해 압연 부하 감소 및 내부 품질의 개선을 얻을수 있다는 점과 연주 공정에 직결로 조압연 공정을 연결하여 마무리 압연 부하를 줄일수 있는 잇점이 있다. 또한 Coiling Station의 채용에 의해 설비 길이를 대폭 단축시킬수 있었으며, 마무리 압연 공정은 Coil Box에 의한 보열 기능으로 길이 방향 온도 편차를 줄일수 있기 때문에 고로밀과는 다른 압연 Speed 패턴을 가진다. 본 논문에서는 ISP 공정을 채용하고 있는 POSCO 미니밀에서의 Strip 후단부 감속 구간에서의 기존 권취 온도 제어의 문제점 및 이를 해결하기 위한 대책에 대해 언급한다.

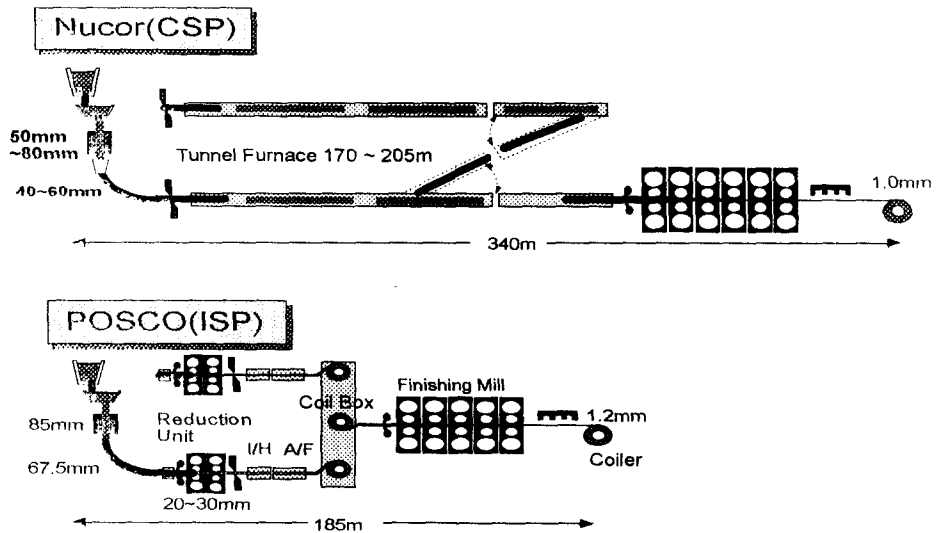


Fig. 1 Comparison between ISP and CSP

Table 2. Comparison of Equipment btw CSP and ISP

항 목		Nucor(CSP)	POSCO(ISP)
Steel Making	EAF	Twinshell 1기(DC)	Twinshell 2기(DC)
	Volume of EAF 2nd Refining	150 Ton/Heat 2 LF + 2 B/B Stand	130 Ton/Heat 2 LF + 2 VTD
Casting	No. of Caster	1M/C - 1Strand	2M/C - 2Strand
	Type of Mold	Funnel	Parallel/Crown
	Mold THK (Funnel Part)	50~60mm (170~180mm)	85mm (125mm)
	Slab THK	35~50mm	67.5mm
	Width	1220~1676mm	900~1350mm
	Casting Speed (Spec.)	8.1m/min	4.5m/min *5.0m/min (60mmt)
Intermediate Rolling	Tunnel F'ce	Edge Heater Descaler(RSB) RU (2 stands) I/H + Acce. F'ce Coil Handling System	
Finishing Rolling		Descaler(FSB) FM (4 Hi - 6 Stands) ROT(Cooling) Down Coiler	Descaler(FSB) FM (4 Hi - 5 Stands) ROT(Cooling) Down Coiler

2. 미니밀 ROT 냉각 개요

2.1. 냉각 설비 개요

미니밀 Run Out Table(이하 ROT)에 설치된 냉각 설비를 Fig. 2와 Table 3에 나타내었다. 미니밀 ROT 냉각 설비는 고로밀 대비 짧은 설비 길이와 등속 압연의 실시로 인해 제어 단위가 세분화되어 있지 않은 특징이 있다.

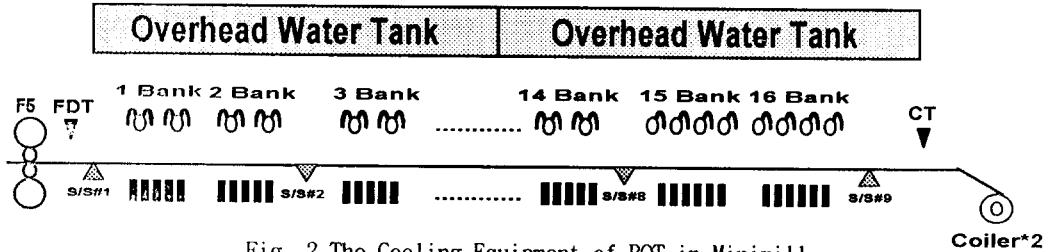


Fig. 2 The Cooling Equipment of ROT in Minimill

Table 3. The Specifications of Cooling Equipment

Length(FDT ~ CT)		61.91 m
Cooling Zone		40 m
Volume of Overhead Tank (m ³)		94
Flow Rate (m ³ /hr)		5,500
Header Type	Top	Hair-Pin Laminar
	Bottom	Pipe Laminar
Headers/ Bank	Top	1~14 Bank: 2, 15 ~ 16 Bank: 4
	Bottom	1~14 Bank: 5, 15 ~ 16 Bank: 6
Control Unit	Top	22
	Bottom	20

2.2 미니밀 냉각 제어(Coiling Temperature Control) 개요

미니밀 CTC 제어 모델은 초기 압연 명령 Data를 수집하는 계산 준비 처리, 계산된 압연 속도 및 FDT를 바탕으로 초기 Valve Pattern를 출력하는 초기 설정 계산, 실적 FDT와 최종 Stand 속도로 일정 제어 주기마다 Valve Pattern을 계산 출력하는 수정 설정 계산, 마지막으로 권취 온도 편차를 미세 조정 Bank(16 Bank)를 이용하여 보정하는 Feed-Back 제어로 구성되어 있다.

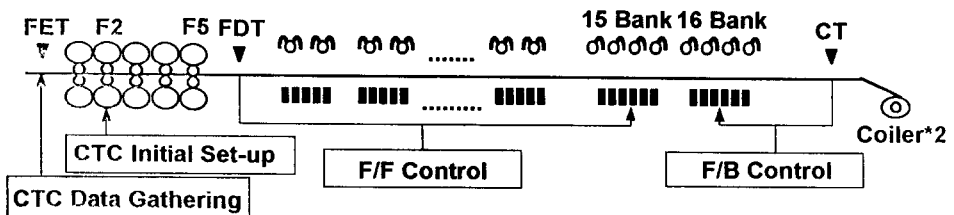


Fig. 3 The Method of Cooling Control

3. CTC 미단(尾端) 제어

3.1 문제점 고찰

미니멀 열연 공정은 등속 압연을 실시하므로 길이 방향 균일한 권취 온도의 확보가 가능하지만, 특정 두께구간에서 Strip Tail부 권취 온도 Profile이 Fig. 4와 같이 되어 다음과 같은 문제점이 발생하였다.

- 길이 방향의 제철 편차
- Sensor 오동작에 의한 Tracking 이상
- Strip Tail부 권취 형상 불량

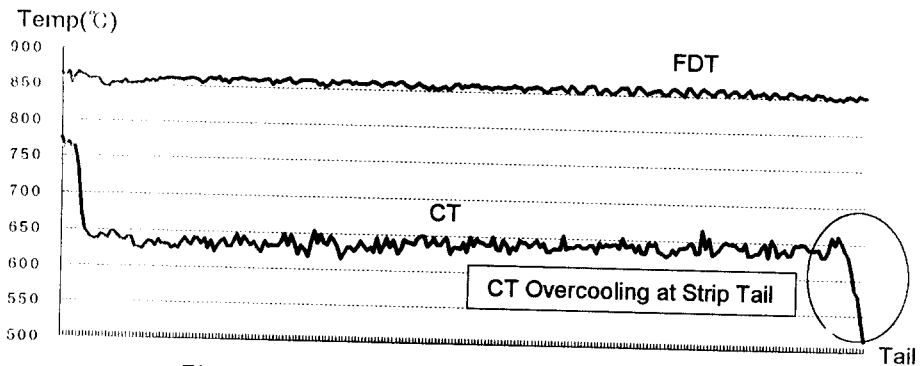


Fig. 4 Temp Profile of [C] 0.15wt%, 1.5mm Strip

Strip Tail부의 과냉각 현상은 박물, 저온 권취제일수록 심하게 발생하였으며, 작업성 악화 및 길이 방향 제철 편차를 유발하였고, 특히 중탄강 이상의 강종은 권취 온도 과냉각 발생시 제철 불량을 초래하여 제품 생산이 불가능하였다. 과냉각이 발생하였던 중탄강의 제철 실적을 Fig. 5에 표시하였다.

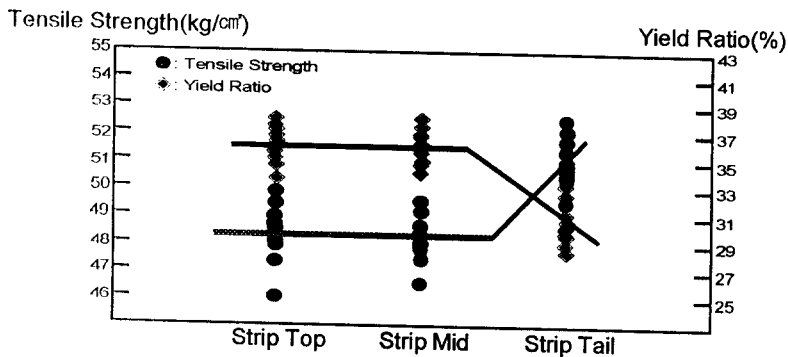


Fig. 5 The Deviation of Mechanical Properties due to CT Overcooling at Strip Tail ([C] 0.15 wt%)

3.2 권취 온도 과냉각 발생 원인

권취 온도의 과냉각 원인이 Strip Tail부 감속과 감속 구간에서의 권취 온도 제어 불량에 있음을 확인하였다. 미니멀 열연 공정의 압연 속도 패턴은 고로밀과 달리 등속 압연을 실시하는데

Strip Tail부는 권취기에서는 권취성 확보를 위한 일정 Creep 속도까지 감속하게 된다. 또한 Strip Tail부의 감속은 통관중에는 일어나지 않으며 판이 최종 Stand를 빠진다음 일어나게 된다. 감속 길이는 Creep 속도와 감속율, 최종 압연 Stand 속도로부터 자동 연산되며 압연 속도가 빠를수록 길어지게 된다. 미니밀 압연 속도 패턴을 Fig. 6에 표시하였다.

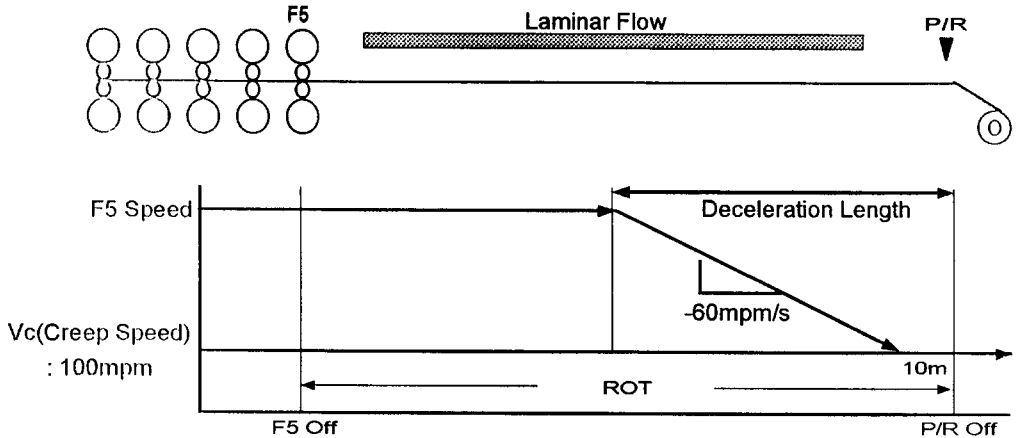


Fig. 6 The Speed Pattern of Hot Rolling in Minimill

마무리 압연 최종 Stand를 Strip이 빠진 다음의 권취 온도 제어는 Down Coiler Mandrel 속도를 이용하는 것이 일반적이다. 그러나 미니밀 공정에서 Down Coiler Mandrel 속도를 권취 온도 제어에 이용하는 것은 다음과 같은 이유로 불가능하다.

첫째, 미니밀 공정에서 Strip Tail부의 감속은 기존 열연 공정과는 달리 마무리 압연 스펀드를 빠진 다음 ROT상에서 일어난다. 권취 온도 제어에서 냉각량 계산을 위한 정보 수집 위치는 FDT 온도계이며, 실제 냉각이 이루어지는 위치는 ROT상에 존재하는 냉각 설비이다. FDT 온도계가 강판의 일정 제이 주기마다 온도를 측정하고, 계산기에서는 속도등 여러가지 압연 정보를 수집하여 제이점의 냉각량을 계산하여 주수량을 결정하는데, 실제 Strip Tail부는 주수 구간에서 감속으로 인한 속도 변화가 생기지만 제어정보가 설정되는 온도계 통과중에는 Strip의 속도 변화가 없으므로 설정 속도 값이 변화가 없게 된다.

둘째, 미니밀 공정에서 일반적인 3mm 미만두께제의 권취 온도의 범위는 550 ~ 650℃ 범위이며, 냉각대에서 주수가 이루어지는 길이는 대략 25 ~ 30m 정도이기때문에 600mpm으로 압연시 강판이 냉각구간을 통과하는 시간은 약 2.5초 내외이다. 일반적으로 권취기의 감속 속도를 계산기에서 받아 냉각량을 계산하고, 밸브를 기계적으로 개폐시키는 데에는 약 2.5초 이상이 소요된다. 그러므로 계산기에서 권취기 감속 속도를 받을수 있다고 하더라도 강판이 냉각 구간을 완전히 빠져나간 다음에 제이가 행하여지므로 감속 구간에서의 온도 제어는 불가능하다.

이를 개선하기 위해 종래에는 Strip Tail부의 권취 온도 제어는 최종 Stand 속도를 Hold하여 적용하고, Tail부의 하습에의해 열유속치를 보정하는 방법을 사용하였으나, 강판의 입연된 길이의 계산 및 실적치가 크게 발생하여 효과를 거두지 못했다. 따라서 강판 후단부의 감속 길이만큼의 권취 온도 제어 불량이 발생하였으며 특히 미니밀 공정에서 압연 속도가 500mpm 이상이고, 8뱅크 이후로 주수를 하는 후단 냉각 패턴 적용제는 감속 구간이 냉각 구간에 포함되게 되어 권취 온도 편차가 160℃ 까지 발생하여 길이방향 재질편차를 유발하는 문제점이 발생되었다.

3.3 CTC 미단(尾端) 제어

3.3.1 Simulation 결과

Strip Tail부의 권취 온도 과냉각 현상을 방지하기 위하여 통판중 감속 속도를 인식할수 있는 방법을 강구하게 되었는데, Strip Tail부 각 제어점의 감속 속도(1)를 16 제어점의 평균 속도를 계산하여 감속 속도를 예측(2)하였다. Simulation을 실시한 결과를 Fig. 7에 표시하였으며, 실제 감속 속도와 평균 속도에 의해 예측된 속도의 비를 Plot하면 그림과 같이 감속 속도를 하나의 2차 방정식으로 표현하는 것이 가능하다. 이러한 방법에 의해 압연 속도별 감속 속도를 예측할 수 있는 방법을 고안하였다.

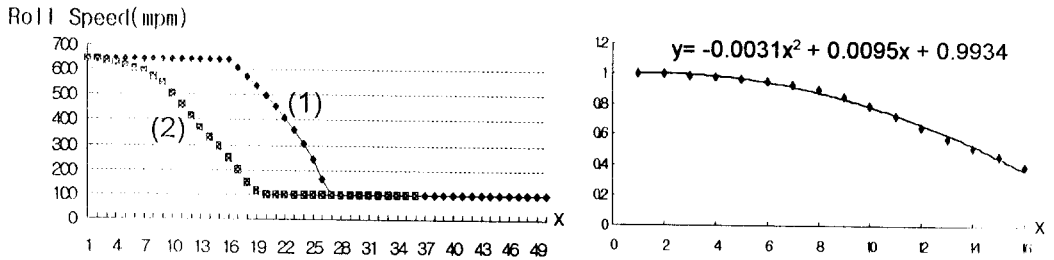


Fig. 7 Simulation Result of Deceleration Speed and it's Equation

3.3.2 미단제어 방법

다음은 미단 제어 방법에 관하여 설명한다. 우선 미단 제어를 행하는 최대의 Strip 길이를 F1 Stand에서 FDT 온도계 구간의 Strip 길이로 설정하였다. 압연 속도별 감속 길이는 다음의 식에 의해 쉽게 구할수 있다.

$$L - l_s \leq (V_s^2 - V_c^2) / (2 \times 60 \times \alpha) + l_m$$

L : 마무리 압연 최종 스탠드 ~ 권취기 입측 핀치롤 거리(m)

l_s : 마무리 압연 최종 스탠드 ~ 열연 강판 후단부 거리(m)

V_s : 마무리 압연 최종 스탠드 속도(mpm)

V_c : 크리프 속도(mpm), α : 감속율(mpm/s), l_m : 여유대(m)

또한, F1 Stand에서 FDT 온도계 구간의 Strip 길이는 실제로 감속이 행하여지는 길이보다는 긴기 때문에 미단 제어 시작 시점을 Strip이 F1 Stand Off후 TD(Time Delay)초후로 설정하였으며, 이후에는 Roll Speed에 3.3.1에서 구한 압연 속도별로 구하여지는 2차 방정식에 의해 속도 보상을 실시하였다. 그리고 권취기별로 냉각 구간에 영향을 주는 감속 길이가 달라지게 되므로 권취기별로 다른 TD를 적용하였다. 미단제어 적용시의 냉각량 계산식은 다음과 같으며, 미단 제어의 방법과 정립된 속도 보상 Parameter를 Fig. 8과 Table 4에 표시하였다.

$$\Delta T = (1000 \times L_{bnk}) / (3600 \times F(V) \times C_p \times \gamma \times THK) \times Q$$

ΔT : 맨크빌 냉각량(℃), F(V) = Roll Speed × (ax² + bx + c) (mpm)

THK : 열연강판 두께(mm)
 Q : 강판의 열량(kcal/m'hr) , Lbnk : बैं크사이의 거리(m)
 Cp : 강판의 비열(kcal/kg°C), γ : 철의 비중(kg/m')

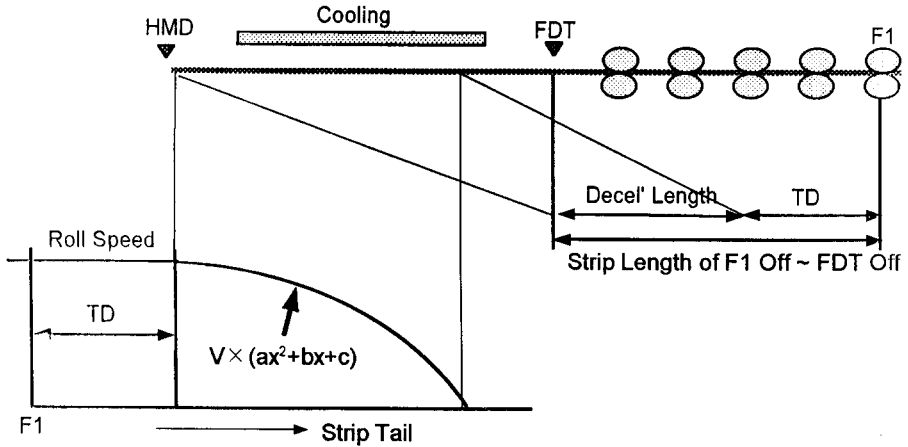


Fig. 8 The Concept of CTC Tail Control

Table 4. The Parameter of CTC Tail Control

Thickness	Roll Speed (mpm)	Parameter			Remarks
		a	b	c	
$1.2 \leq t < 1.6$	590 ~ 610	-0.0036	0.0287	0.9704	TD is automatically calculated by CTC
$1.6 \leq t < 1.8$	560 ~ 600	-0.0029	0.0272	0.9763	
$1.8 \leq t < 2.0$	540 ~ 590	-0.0024	0.0267	0.9786	
$2.0 \leq t < 2.3$	520 ~ 580	-0.0021	0.0167	0.9786	
$2.3 \leq t < 2.7$	490 ~ 560	-0.0025	0.0226	0.9623	
$2.7 \leq t < 3.0$	440 ~ 470	-0.0026	0.0195	0.9718	

3.3.3 적용 결과

CTC 미반 제어를 '98.8월 이후 적용하여 Strip Tail부의 권취 온도 과냉각 예방이 가능하였다. Strip Tail부 권취 온도를 $\pm 20^\circ\text{C}$ 이내로 제어가 가능하게 되어 중탄강의 안정적 제철 확보가 가능하였으며, 박물제의 권취 온도 적중율이 0.3% 이상 상승하였다. 적용 후의 권취 온도 Profile 실적을 Fig. 9에 표시하였다.

Table 5. Target Ratio of CTC after Adopting Tail Control

구분	$t < 1.6$		$1.6 \leq t < 2.3$	
	Before('98.6)	After('98.12)	Before('98.6)	After('98.12)
Target Ratio(%) ($\pm 20^\circ\text{C}$)	96.7	97.2	97.7	97.8

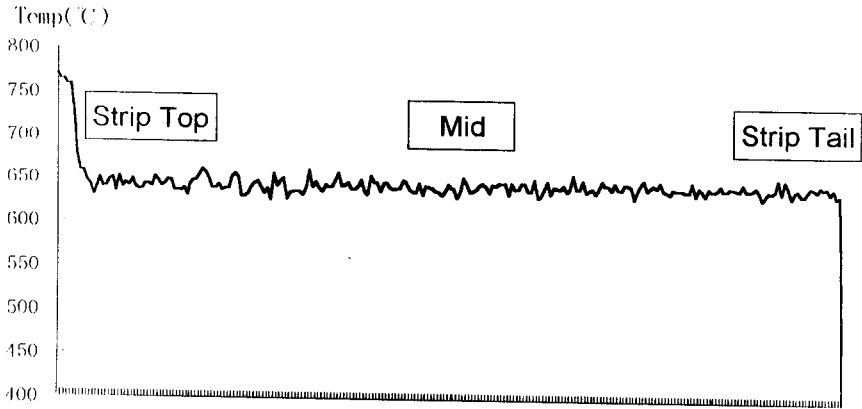


Fig. 9 The Coiling Temp' after Adopting CTC Tail Control
 (Target CT: 640°C, [C] 0.15, [Mn] 0.30, Thickness: 1.5mm)

4. 결론

미니밀 일인 공정에서 권취 온도의 과냉각에 의해 발생하였던 길이 방향 재질 편차 및 직위 불안정을 해소하기 위해 Strip Tail부의 권취 온도 제어 기술을 개발하였다. 그 결과 및 결론은 다음과 같다.

1) Down Coiler 속도를 모델에서 이용할수 없는 미니밀 냉각 제어 조건에서 Strip 후단부 감속 속도를 예측하여 통관중 속도 보상을 실시하는 방법을 개발하였다. 감속 속도는 통관 속도별로 Grouping하여 간단한 2차 방정식화에 의해 예측 가능하였다. 기존 박물재의 권취 온도가 목표 대비 160°C까지 과냉되었으나, 미단 제어 적용이후 $\pm 20^{\circ}\text{C}$ 이내로 제어가 가능하였다.

2) 재질에의 권취 온도 영향이 큰 중탄 이상의 강종에서 Strip Tail부 과냉각으로 인해 재질 불량량을 조려하였으나 CTC 미단 제어 적용으로 길이 방향 재질 편차를 저감하여 안정정 재질 확보가 가능하였다.

참고문헌

1. 이준정, 이필중 외 : 열연 Laminar Flow 냉각 패턴 설정에 의한 권취 온도 편차 개선, 산업과학기술연구소 연구보고서, 1989
2. 강제의 냉각 기술, 일본 철강 협회, 1978
3. 강기봉 외: 고장력강의 재질 편차 감소 및 가공성 개선, 산업과학기술연구소 연구보고서, 1994
4. 이필중 외: 박스라브 냉각 설비 및 제어 기술 개발, 포항산업과학연구원 연구보고서, 1997
5. 강기봉 외: 후단 냉각재의 폭 방향 재질 편차 저감, 포항산업과학연구원 연구보고서, 1997