

〈논 문〉

열간압연공정에서의 스트립 폭방향 온도제어 시스템 개발

최재찬* · 이성진** · 박봉수***

(1995년 7월 15일 접수)

Development of Control System for Transversal Temperature of Strips in Hot Strip Mills

Jae-Chan Choi, Sung-Jin Lee and Bong-Su Park

Key Words : Thermal Profile(온도분포), Edge Heater(에지히터), Edge Mask(에지메스크), Thermal Profile Control(온도분포제어)

Abstract

In this study, in order to achieve the uniformity of mechanical properties and microstructures of a hot-rolled coil in the transversal direction, the edge mask device is newly developed and installed at the upper laminar-flow cooling head in the run out table, which controls the transversal temperature of strip with enco panel and bar edge heater. The device that is transversally movable prevents the temperature drop of strip edge by blocking the cooling water into the strip edge. So, the pattern of edge mask set-up was determined through the analysis of heat transfer of strip cooling. Finally, the optimal set-up condition of the device was derived by analyzing the characteristics of strip temperature and mechanical properties according to the on-line application of edge mask.

기 호 설 명

T_{25} : 스트립 측면에서 25 mm 지점의 온도(°C)	ΔX : 스트립의 측면부에서 중심부 평균 강도보다 높은 강도를 갖는 지점의 거리(mm)
ΔT_{25} : 스트립 측면에서 25 mm 지점의 온도와 스트립 중심온도의 차(°C)	ΔRB_1 : 스트립의 측면부 경도의 최대와 최소값의 차이(로크웰 B스케일)
T_{max} : 온도분포의 최대온도(°C)	ΔRB_2 : 스트립의 중심부의 온도 평균값과 최소값과의 차이(로크웰 B스케일)
ΔT_{max} : 온도분포의 최대온도와 스트립 중심온도의 차(°C)	ΔY : 스트립의 측면부에서 중심부 평균경도보다 높은 경도를 갖는 지점의 거리(mm)
T_{p0} : 최대온도와 스트립 측면간의 거리(mm)	x : 스트립의 두께방향의 좌표(-)
T_c : 스트립의 폭방향 중심점 온도(°C)	y : 스트립의 폭방향의 좌표 (-)
ΔTS_1 : 스트립의 측면부 강도의 최대와 최소값의 차이(kgf/mm ²)	t : 시간(hr)
ΔTS_2 : 스트립의 중심부의 온도 평균값과 최소값과의 차이(kgf/mm ²)	ρ : 밀도(kgf/mm ³)
	C_p : 비열(kcal/kg°C)
	k : 열전도율(kcal/m hr°C)
	h : 스트립의 두께(mm)
	w : 스트립의 폭(mm)

*회원, 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구센터

**회원, 포항제철(주) 기술연구소

***포항제철(주) 기술연구소

- x_e : 스트립의 측면에서의 편중심으로의 거리(mm)
- $T(x)$: 스트립의 폭방향 온도분포(°C)
- σ : 스테판-볼츠만상수 ($4.88 \times 10^{-8} \text{kcal/m hrK}^4$)
- ϵ : 복사율(런아웃테이블의 경우 0.7~0.8)
- F : 형상인자(-)
- n : 수직방향 단위벡터(-)
- T_a : 대기온도(K)
- T_s : 스트립의 표면온도(K)
- H_w : 라미나 플로우 냉각수에 의한 대류 열전달 계수($\text{kcal/m}^2 \text{ hr}^\circ\text{C}$)
- H_{air} : 공기냉각에 의한 복사열전달계수($\text{kcal/m}^2 \text{ hr}^\circ\text{C}$)

립의 폭방향 온도제어 및 재질 편차 개선을 위한 관심이 고조되고 있다. 이를 위해 열연공정에서는 엔코 판넬(eneco panel), 바 에지 히터(bar edge heater) 및 런아웃테이블(run out table) 공정의 에지매스크(edge mask) 설비 등의 스트립(strip) 측면부의 온도강하를 보상하기 위한 설비를 적용하고, 마무리 입·출측과 권취전의 스트립의 폭방향 온도분포를 측정할 수 있는 폭방향 온도계를 사용하여 폭방향 온도특성을 분석하고 이들 설비를 적정 조건으로 설정해야 한다.

본 연구에서는 열연 스트립의 폭방향 재질 균질화를 추구하기 위해 폭방향 온도제어 설비인 엔코 판넬, 바 에지 히터 외에 열연 런아웃테이블에서의 상부 라미나 플로우(laminar flow) 냉각 헤드에 스트립 측면부의 주수를 차단하기 위한 폭가변식 에지매스크 설비를 개발하고, (3) 런아웃테이블 상의 스트립 냉각의 전열해석을 통해 에지매스크의 설정 패턴을 결정하고 이를 온라인 테스트를 통하여 에지 매스크의 적용에 따른 스트립의 온도와 재질 특성을 분석함으로써 런아웃테이블 상의 에지 매스크의 제어 설비의 최적 설정조건을 도출하였다. 본 논문에서 기존의 엔코판넬, 바 에지 히터에 관한 실험결과는 생략하기로 한다.

1. 서 론

현재 열연강관의 전길이, 전폭에 걸쳐 재질 균일화에 대한 요구는 점점 엄격해지고 있다. 재질의 불균일은 용도에 따라 차이가 있지만 주로 소재의 전절단시의 비틀림, 반곡, 캠버(camber) 등의 판 변형과 굽힘, 심가공, 스트레치 플랭징(stretch flanging) 등의 가공시에 가공 균열을 유발한다. 열간 압연재의 재질 불균일의 인자로는 판 폭방향의 기계적 성질(T, S, Y, S, EI 등)과 미세조직의 불균일, 판두께 및 폭방향의 잔류응력과 웨이브(wave) 등이 있다.

최근까지 열간압연공정에서의 재질제어는 주로 온도제어에 의해 수행되고 있으며 대부분이 스트립의 길이방향에 대한 온도제어에 관한 연구와 설비의 개선이 이루어져 왔다. (1,2) 하지만 이전에는 연속 주조된 스프레를 열간압연공정에서 재가열하여 스트립을 생산한 방법(cold rolling, 이하 CCR)에 비해 최근 연속주조-열연 직결 조업인 HDR(hot direct rolling, 이하 HDR) 공정의 적용으로 스트

2. 이론적 고찰

2.1 열연공정의 스트립의 폭방향 온도 특성

열간압연공정은 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 연속 스프레를 일정 온도까지 재가열로(reheating furnace)에서 가열한 후에 이를 조 압연기(roughing mill)에서 일정한 두께와 폭이 되도록 압연한 후 연속적으로 마무리 압연기(finishing mill)를 통과하여 원하는 두께의 스트립을 만든다.

또한 마무리 압연기에 의해 $A_{\gamma 3}$ 변태점($\gamma \rightarrow \alpha$

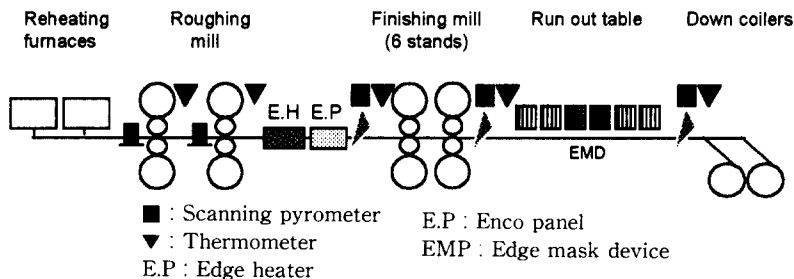


Fig. 1 Layout of POSCO's No. 2 hot strip mill (Kwan gyang)

transformation) 이상의 온도로 압연되고, 후방으로 이동되면서 런아웃테이블 냉각장치에 의해 소정의 권취온도까지 냉각되어 권취기에서 권취된다. 열간압연 라인에는 스트립의 권취전의 권취온도(coiling temperature, 약어 CT)와 마무리 압연출축온도(finishing delivery temperature)를 측정하는 온도계와 피드백제어(feed-back control)에 의한 냉각수 제어장치가 설치되어 있어서 권취온도를 확보하기 위해 냉각장치의 냉각 뱅크(bank)의 온오프(on/off)로서 제어하도록 되어 있다.

열연공정에서 압연재의 온도는 재질을 결정하는 중요한 요인이기 때문에 압연 길이방향 및 폭방향의 온도 관리를 해야 한다. 열연공정에서 폭방향 온도에 미치는 요인은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 열연 소재의 초기 온도분포(profile)
- 가열로 장입조건에 따른 가열로 추출 슬래브(slab)의 폭방향 온도분포
- 디스캐일링(descaling) 및 각종 스프레이(spray)의 폭방향 분사 유량차이
- 압연시의 롤(roll)의 온도분포(thermal profile) 및 폭방향 소성 발달차이
- 런아웃테이블 라미나 플로우(laminar flow)의 스트립 폭방향 냉각 능력차이

스트립 상면의 냉각수의 횡류(lateral flow)에 의한 2차 냉각 효과에 의해 판 폭측면 근방의 열전달 계수는 급격히 크게 변한다.⁽⁴⁾

- 각종 냉각장치의 분사 노즐의 유량 불균일⁽³⁾

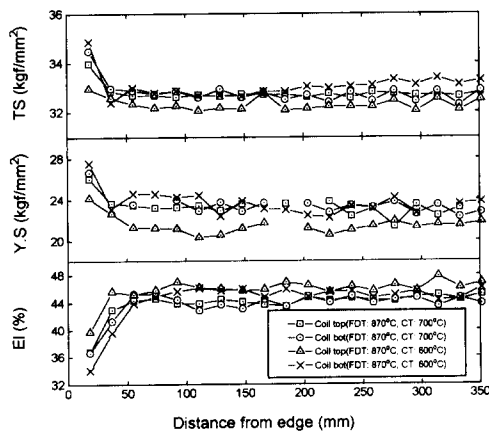


Fig. 2 Mechanical properties of middle carbon steels in width-direction(rolled material : steel grade KS-SGHC, size 1.60 t*1220 w mm)

이러한 온도의 불균일에 의한 재질 불균일은 온도분포에 의한 내부 응력의 폭방향 불균일에 의한 비틀림, 반곡, 캠버 등의 판 변형과 재질 불균일에 의한 2차 가공시의 가공크랙의 발생, 기계적 성질(T. S, Y. S, El. 등)과 미세조직의 불균일 등을 일으킨다. 하지만 스트립 폭방향의 온도 특성을 알기 위해서는 열연 공정간에 폭방향 온도 측정이 가능한 주사형 방사 온도계가 필수적이며 이를 이용하여 다양한 압연조건에 따른 폭방향 온도분포 특성을 조사할 수 있다.

2.2 열연공정의 스트립의 폭방향 재질 특성

열연재의 폭방향 재질 편차를 조사하기 위해 강종별로 여러 압연조건에 따라 압연된 스트립을 폭방향으로 인장, 경도 및 미세조직관찰 시험을 행하였다. Fig. 2는 강종 KS-SGHC의 재질 특성을 한 예로서 나타내고 있다. 폭방향 재질은 선단 및 후단부의 채취 위치의 차이나 마무리 압연출축온도, 권취온도 등의 조업조건에 의해 재질 편차를 보이고 있다. 또한 전체적으로 스트립의 측면 50 mm 지점까지는 강도가 중심부에 비해 높으며 연신율도 이 부분에서 낮음을 알 수 있다. 이러한 재질 특성은 미세조직의 차이에 기인된다.

Fig. 3은 중저탄소 열연강판에 대해서 판의 측면으로부터 W/4(W : 스트립 폭) 위치까지의 폭방향 조직과 시멘타이트(cementite)를 관찰한 것이다. 통상 마무리 압연 후의 폭방향 온도 실적은 측면의 온도가 급격히 저하된다. 이 온도가 오스테나이트(austenite) 온도 영역 이하가 되면 페라이트(ferrite)와 오스테나이트가 공존하는 온도 영역에서 마무리 압연이 완료되기 때문에 최종적으로 나타나는 조직은 변형조직 또는 조대립과 미세립이 혼재된 혼립 조직으로 발전하게 된다.

Fig. 3에서 판의 측면의 8 mm지점에서 관찰된 변형조직은 이상 영역 변형후 변형 페라이트 조직이 잔존된 경우이고 측면에서 멀어진 영역에서는 오스테나이트 역에서 변태가 시작되어 등축의 페라이트가 생성된 조직이다. 그 중간 영역에서는 변형 페라이트의 전위밀도와 변태된 페라이트의 전위밀도 차이가 구동력이 되어 혼립 조직으로 발전된 경우이다.

또한 시멘타이트의 형성도 온도의 영향을 받는데, 낮은 온도일수록 탄소의 확산이 어려워지기 때문에 극 측면에서 생성되는 시멘타이트의 크기가

가장 미세하며, 그 내측으로는 상대적으로 조대한 입계 시멘타이트가 관찰된다. 이상과 같은 측면부 조직의 변화는 압연 온도에 의존하기 때문에 최종 압연온도가 A_{r3} 변태 온도 이상으로 높아질수록 등축 페라이트가 생성되는 영역은 측면쪽으로 이동되는 것이 일반적이다. 따라서 불균일한 조직을 개선하기 위해서는 측면부의 압연 종료 온도가 A_{r3} 변태 온도 이상이 되도록 작업하는 것이 무엇보다도 중요하다.

2.3 폭방향 잔류응력 및 판 변형 발생 메커니즘

마무리 압연 후의 열연 스트립을 냉각하는 런아웃테이블 공정에서는 첫째, 권취온도를 일정하게 유지할 것, 둘째 냉각 중에 열변형이 생기지 않도

록 할 것 등이 고려되어야 한다. 권취온도가 일정하지 않으면, 스트립 재질 균일화 및 안정화를 달성할 수 없다. 예를 들어 권취온도를 일정하게 유지하기 위해서 권취온도 변동요인을 단기적 변동요인과 장기적 변동요인으로 나누고, 단기적 변동요인에 대해서는 마무리 압연기 출측의 스트립 온도의 단기적 성분을 이용하여 특정 수냉장치의 냉각수량을 피드포워드제어하고, 장기적 변동요인에 대해서는 전영역의 냉각제어와 특정 수냉 장치의 피드백제어를 병용하여 권취온도 제어의 정도를 향상시킨다. 또한 냉각 중의 스트립에 열변형이 발생하면 런아웃테이블에 의해 원활한 이송이 곤란할 정도로 스트립의 권취형상이 나쁘게 된다. 열변형이 큰 경우에는 권취가 불가능하다. 열연 스트립의 냉

Microstructure (X 20)				
	8 mm from edge	23 mm from edge	53 mm from edge	quarter of width
Carbide (X 500)				

Fig. 3 Microstructural changes and carbide distribution in transversal direction of a coil (rolled material : steel grade 0.025C-0.14 Mn wt% steel, size 1.60 t*1220 w mm)

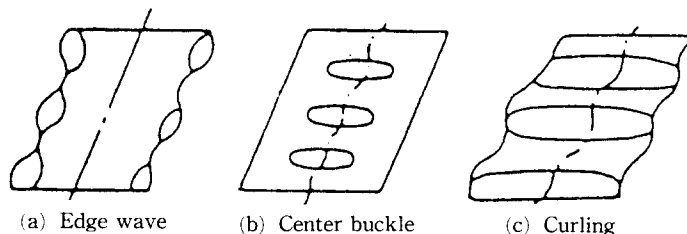


Fig. 4 Deformed forms of strips at the run-out table

각 중에 발생하는 열변형의 방지방법에 대해 검토해 보면 열변형에는 2종류의 형태가 있다. 첫째 Fig. 4(a), (b)에 보인 이파 및 중파이고, 둘째는 Fig. 4(c)에 보인 것으로 반곡(curling) 형태이다.

2.3.1 이파와 중파

편폭방향의 불균일 냉각에 기인하는 것으로, 비교적 간단히 개선할 수 있다. 예를 들면, 슬릿 노즐(slit nozzle)에 의한 냉각을 행하고, 스트립 폭 측면부에 과냉각방지방법을 두어 균일 냉각을 행하는 것이 좋다.^(5,6)

2.3.2 반곡

반곡형태의 변형은 상기한 이파와 중파의 대책으로는 방지할 수 없다. 냉각 중에 발생하는 반곡 변형을 방지하기 위해 다음과 같이 행한다. 첫째, 냉각장치 내에서의 스트립 상하면의 온도차의 절대치가 재료 정수 및 권취 장력에 의해 정한 값 이하가 되도록 한다. 둘째, 상하면의 온도차가 생기고 있는 스트립의 길이가 어느 임계치 이하가 되도록 냉각 수량을 냉각 영역에 분배한다.

한편 냉각에 의한 반곡 변형을 방지하는 관점에서는 스트립 상하면에 소성 연신의 차가 생기지 않도록 하는 것이 중요하다. 그것은 냉각 중의 스트립에 생기는 응력을 탄성 한도내에 두거나 또는 양표면에 발생하는 탄성 연신을 같은 정도로 하는 것이다. 즉, 스트립의 하면에 온도차가 생기지 않도록 한다.

3. 스트립 폭방향 온도 제어 시스템의 개발

3.1 시스템의 구성

열연공정에서 스트립의 폭방향 재질 확보를 위한 폭방향 온도 균질화 설비로서 기존의 엔코판넬, 에지히터장치 등이 있으며 POSCO 광양 열연 공장은 본 프로젝트와 관련하여 열연 런아웃테이블에서의 상부 라미나 플로우 냉각 헤드에 스트립의 폭방향으로 이동이 가능한 가변식 에지매스크장치를 추가로 설치함으로써 열연공정의 폭방향 온도제어를 위한 설비를 갖추게 되었다. 조압연기 출측에 설치되어 있는 엔코판넬은 마무리 압연 입측의 열간압연 소재의 미단부의 온도 보상을 목적으로 8개 구간(총길이 57 m)으로 구분되어 있으며 재질은 멤브

레인(Membrane)으로 압연 소재의 상·하부, 측면에 대한 단열효과를 가진다.^(9,10) 엔코판넬과 마무리 압연기 입측에 설치되어 있는 바 에지 히터는 스트립 측면의 온도 강하에 의한 혼립층 발생을 방지하기 위해 유도 가열장치에 의해 측면의 25 mm 지점까지를 가열해 주는 장치이다.

또한 스트립 폭방향 온도측정장치로서 마무리 압연기의 입·출측 온도분포, 권취온도 분포를 측정할 수 있는 주사형 방사온도계를 설치하였다.

열연공정의 스트립 폭방향 온도제어 시스템의 목적은 다음과 같다.

- 공정별 온도분포의 분석을 통한 열연 스트립의 제품 특성을 규명한다.

- 공정별 온도분포를 비교 분석함으로써 폭방향으로 온도 불균일을 유발하는 공정별 원인을 규명하고 이에 대한 대책을 수립한다.

- 판의 측면의 과냉각에 의한 재질 불량을 방지하기 위해 에지히터와 에지매스크의 설정조건을 정립한다.

기능적으로는 첫째, 공정별 온도분포 데이터를 보관, 분석하는 폭방향 스트립 온도 측정 시스템과 둘째, 온도 실적에 의해 에지히터와 에지매스크의 적용을 피드포워드 및 피드백 제어를 하는 폭방향 온도동적제어(dynamic control) 시스템 등이 있다.

Fig. 5는 열연공정에 설치된 폭방향 온도 제어 시스템의 구성을 나타낸 것으로서 현재 엔코판넬은 전 스트립에 대해 적용하고 있으며 에지히터의 경우는 사용 지정재의 경우 스트립 두께 그룹으로 설정된 설정 전압으로 적용이 된다.

폭방향 스트립 온도 측정 시스템은 마무리 압연 입·출측 및 권취기 입측에서의 스트립의 선단부와 미단부 등의 길이 방향 5지점의 온도 분포의 데이터를 워스테이션(work station)에 전송시켜 공정별 온도분포의 비교 분석을 행하게 된다. 이 온도 분포 데이터는 수개월간(4개월 이상) 저장 보관이 가능하도록 하였다.

스트립내 혹은 스트립 간의 동적 폭방향 온도 제어는 에지히터장치와 에지매스크장치에 대하여 다음과 같이 설계하였다. 동적제어에 사용되는 폭방향 온도는 폭방향 임의 지정점의 스트립 길이방향의 연속적인 데이터로서 마무리 압연기의 입·출측 온도분포의 경우는 폭방향 3점(양쪽 측면 25 mm 지점 온도, 중심부 온도)이며 권취온도분포의 경우

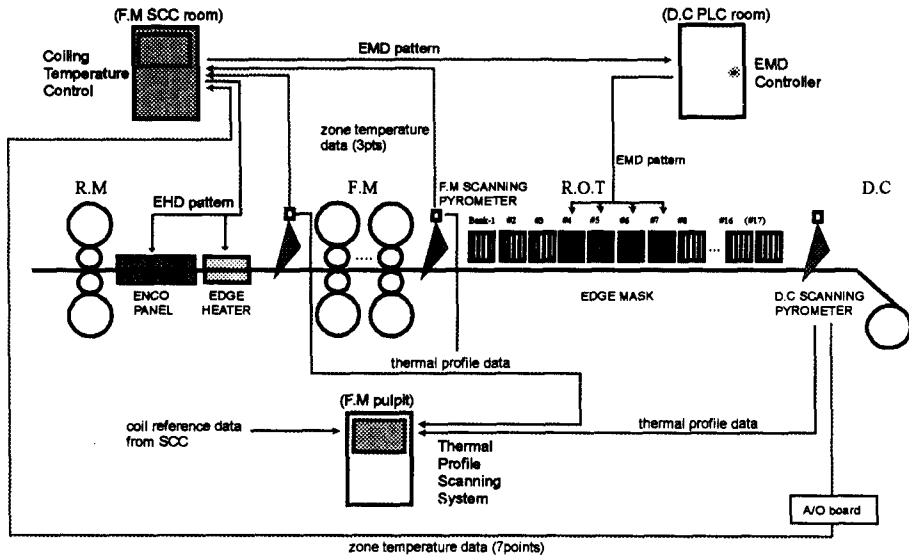


Fig. 5 Schematic of the control system for the transversal temperature of strips at POSCOs No. 2 hot strip mill (Kwangyang)

는 폭방향 7점(위치는 임의 지정 가능)의 데이터를 사용한다. 동적 제어 시스템의 제어방법은 에지 히터의 경우 1차 설정은 조압연 완료 후에 초기 설정 조건에 따라 설정 전압이 결정되며 2차 설정은 마무리 압연 입측 온도분포의 선단부 실적을 수집하여 스트립 내에서 에지히터의 재설정된 전압을 사용하도록 로직(logic)을 개발하였다. 이 때 재설정 가부 판단은 측면의 온도 T_{25} 가 A_{r3} 온도보다 낮은 경우 이를 보상할 수 있도록 설정 전압을 수정한다.

에지매스크의 경우도 1차 설정은 마무리 압연기 제2번 스탠드 치입시 에지매스크 적용량이 결정되어 설정되며 2차 설정은 권취 개시 후 권취온도분포의 선단부 실적을 수집하여 에지매스크 적용량을 수정한다.

3.2 에지 매스크 장치 설계

마무리 압연기 출측에서 판폭방향의 라미나 플로우(laminar flow)를 등수량으로 냉각하면 Fig. 6 (a)에 나타난 것과 같이 스트립 상면의 체류수의 폭방향 흐름으로 측면 부근의 유속이 급속히 증대되어 측면부가 매우 낮은 온도를 나타내게 된다. 이러한 스트립의 측면부의 과냉각은 두가지 관점에서 보아야 한다. 첫째는 마무리 압연기의 출측에서의 평탄도를 제어하여도 런아웃테이블의 냉각 과정

에 있어서 판 폭방향의 온도 불균일에 기인하여 냉각 종료 후의 평탄도가 이파가 되는 경우가 많다. 폭방향 온도 불균일(측면부 온도 강화)에 의한 발생 메커니즘은 냉각과정에 있어서 측면의 과냉각에 발생하는 압축 응력이 임계 좌굴 응력을 넘을 때 판의 측면부가 좌굴한다. 둘째는 스트립의 측면부의 낮은 온도에 의해 최종 압연 제품의 재질(강도, 경도, 조직)의 편차를 감소시키기 위하여 수냉시의 측면 과냉을 보상하여야 한다. 이와 같은 냉각과정에서의 스트립 폭방향 온도를 제어하기 위하여 라미나 플로우 상부 냉각장치에 에지매스크장치를 설치하였다. 에지 매스크에 의해 Fig. 6(b)와 같이 상부 라미나 헤더의 측면부의 주수를 차단시켜 측면부근에서의 급격한 냉각을 완화시킬 수 있다.

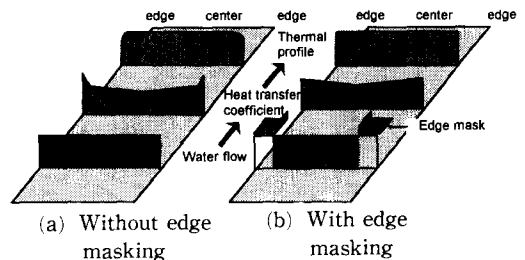


Fig. 6 Control method for the uniform temperature distribution with edge masking at the run out table

폭가변식 에지매스크 장치는 상부 라미나 헤더에 4뱅크(bank)씩 설치하였다. 스트립의 양 측면에서의 매스크량은 최대 250 mm(편측)까지 가능하도록 설계하였으며 Fig. 7은 에지매스크 설비를 제어하는 시스템의 구성을 나타내는 것으로 그림에서 나타낸 것과 같이 에지매스크 설정을 상위 계산기에서 직접 지령하는 방법과 운전자가 수동으로 지령하는 2가지 방법이 있다. 직접 지령하는 방법은 에지 매스크의 강종별, 코일 사이즈, 마무리 압연 출측온도 등의 조업조건에 따라 미리 설정된 에지매스크량과 설정 패턴에 따라 PLC(programmable logic controller)를 통해 에지매스크 구동모터에 전달된다. 또한 에지 매스크 적용시 온도분포 실적에 따라 스트립 내에서 에지매스크의 적용량의 가감이 필요할 때는 운전자가 수동으로 개입하게 된다.

또한 에지매스크의 설정 패턴은 측면부의 온도분포를 완만하게 형성시키기 위해 뱅크별 에지매스크량을 설정할 수 있도록 먼저 Table 1과 같이 총 9가지 패턴으로 정하였다. 에지매스크의 설정값은 통상 50~250 mm 정도이다. 패턴 2의 방식은 뱅크별로 에지매스크량을 일정하게 설정하는 방법이며 패턴 3에서 패턴 5는 단계별로 일정량만큼 에지매스크의 설정량을 감소시키는 방법으로 스트립의 측면부의 온도분포에 대해 과대한 온도보상이 되지 않도록 하였다.

온도분포 데이터는 스트립의 전길이, 전폭에 대해 임의의 기간 동안에 스트립 번호별로 저장, 보관할 수 있도록 하였다. Fig. 8은 상부 라미나 헤더에 설치된 에지매스크용 거터(gutter)를 나타낸 그림이다.

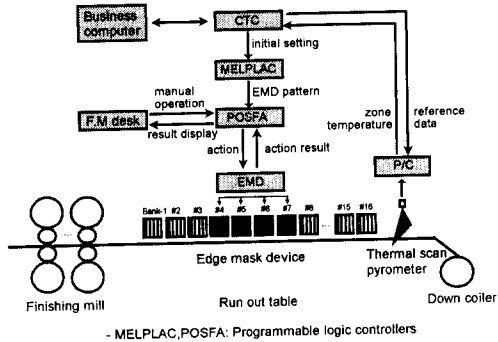


Fig. 7 Edge mask device control system

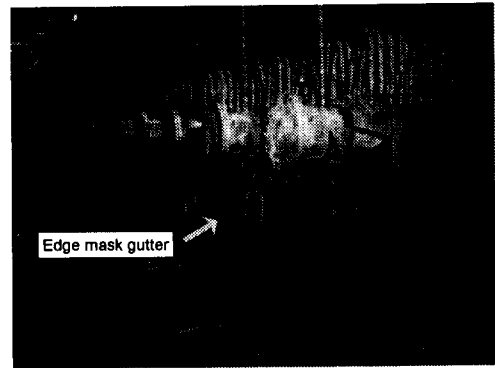


Fig. 8 Edge mask device installed at upper laminar flow headers

Table 1 Edge masking patterns

Pattern No.	1st bank	2nd bank	3rd bank	4th bank
1	0	0	0	0
2	Set value	Set value	Set value	Set value
3	Set value	Set value-10 mm	Set value-20 mm	Set value-30 mm
4	Set value	Set value-15 mm	Set value-30 mm	Set value-45 mm
5	Set value	Set value-20 mm	Set value-40 mm	Set value-60 mm
6				
7	Set value	Set value	0	0
8	Set value	Set value	Set value	0
9	Set value	Set value	A half of Set value	A half of set value

* Set value : the amount of edge masking (range : 0 to 450 mm)

3.3 스트립 폭방향 온도측정 시스템의 구성

각 열간압연공정에서 스트립의 폭 및 길이 방향의 온도분포를 측정할 수 있는 시스템을 개발하였다. CCD silicon linear array 방식의 주사형 방사 온도계(모델명: IR-N50T, 일본 CHINO사)와 변환기(모델명: IR-GNK, 일본 CHINO사)를 이용하여 측정된 온도 패턴 데이터를 고속 A/D 변환기(200 ks/sec)를 내장한 개인용 컴퓨터에서 다음과 같은 기능을 가지도록 운용 프로그램을 개발하였다.

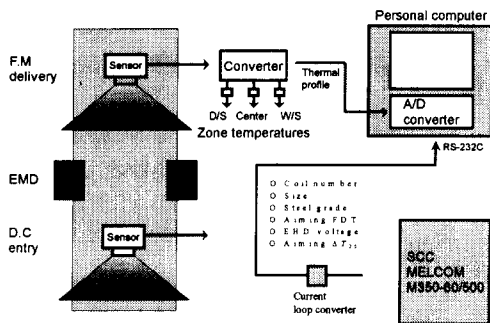
- 온도분포의 화면 출력
- 온도 데이터의 스트리밍별 저장
- T_{25} , T_{max} , T_{po} , ΔT_{25} , ΔT_{max} 의 자동 계산
- 온도 데이터의 상위 컴퓨터 전송

Fig. 9는 폭방향 온도 측정 시스템의 구성을 나타내며 시스템의 운용 소프트웨어는 마이크로소프트 환경하에서 기동되는 미국 National Instruments사의 그래픽기반 언어인 LabVIEW 3.1을 이용하여 개발하였다. 자동적으로 저장되는 데이터 화일은 디스크의 용량을 고려하여 일정 기간의 데이터만 저장할 수 있도록 구성하였다. Fig. 10은 본 시스템의 주화면으로서 폭방향 온도 특성을 나타낼 수 있는 특성치가 자동적으로 계산되어 표시된다.

4. 실험 내용

4.1 에지 마스크 패턴 설정을 위한 컴퓨터 시뮬레이션

Table 1에서 나타낸 바와 같이 런아웃테이블에서의 에지 마스크의 설정 패턴에 따른 스트립의 온



F.M : Finkshing mill
EMD : Edge mask device
D.C : Down coiler

Fig. 9 Thermal profile scanning system

도변화를 알기 위해 먼저 유한차분법에 의한 스트립의 전열해석을 행하였다. 내부 발열을 포함한 스트립 폭, 두께방향의 열전달 방정식은 아래와 같다.

$$\frac{H_i}{\rho C_p} + \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

내부발열 H_i 는 변태 발열에 의해 발생하는 열원이라고 가정한다. 편미분방정식의 수치해를 전진차분법(forward difference method)을 사용하여 x , y 및 t 에 대해 식 (1)을 차분화하고 테일러 급수 전개하여 1차항까지 취합하면 다음과 같은 차분식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{H}{\rho C_p} + \alpha \left[\frac{T(i+1, j) + T(i-1, j) - 2T(i, j)}{\Delta x^2} \right. \\ \left. + \frac{T(i, j+1) + T(i, j-1) - 2T(i, j)}{\Delta y^2} \right] \\ = \frac{T(i, j) - T(i, j)}{\Delta t} \end{aligned} \quad (2)$$

또한, 경계에서의 대류 및 복사에 의한 열전달 경계 차분방정식은 아래와 같다.

대류

$$\frac{\partial T}{\partial n} = -\frac{H}{k}(T - T_a) \quad (3)$$

복사

$$\frac{\partial T}{\partial n} = -\frac{F\varepsilon \cdot \sigma}{k}(T^4 - T_a^4) \quad (4)$$

따라서, 스트립 내부의 차분식 (2) 및 경계에서의 차분식 (3), (4) 을 이용하여 런아웃테이블에서의 스트립의 폭, 두께방향의 온도분포를 계산한다.

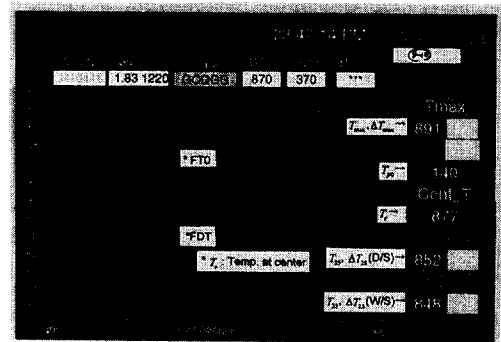


Fig. 10 Front panel of thermal profile scanning system

런아웃테이블에서 라미나 플로우 냉각시의 열전달 계수는 수량밀도 $W_i(\ell/m^2min)$ 에 대한 실험식으로 아래와 같이 표현된다.

$$H_w = 701 + 0.594 W_i \quad (5)$$

또한 공냉시 열전달계수 H_{air} 는 복사열에 의한 열전달계수 H_{rad} 와 공냉시 스트립의 이송에 따른 대류열전달계수 H_{con} 의 합으로 나타낼 수 있다.⁽⁸⁾

$$H_{air} = H_{rad} + H_{con} = \sigma \cdot \epsilon (T_s^2 + T_a^2) (T_s + T_a) + 20 \quad (6)$$

Fig. 11과 같이 온도 해석범위는 런아웃테이블에서 마무리 압연 출측 온도 측정점에서 권취온도 측정점까지로 스트립은 1/4 등분을 모델링하였으며 두께방향으로 10등분, 폭방향으로 100등분하였다.

계산 초기의 스트립의 폭방향 온도는 현장 실험 스트 결과 마무리 압연 출측 온도분포에서 측면부의 온도강하분포를 나타내기 위해 아래와 같은 식으로 표현하여 사용하였다. 스트립의 측면부에서 200 mm 지점까지는 식 (7)에 의해 측면의 온도가 가장 낮은 포물선 형태의 분포를 가지며 200 mm 이내의 스트립의 중심부는 일정한 온도를 가진다.

$$T(x) = T_c - 43 \times h^{0.476} \times \left(\frac{200 - x_e}{200} \right)^{3.37 \times h^{0.155}} \exp(-0.00623 \times h) \text{ for } x_e \leq 200 \text{ mm} \quad (7)$$

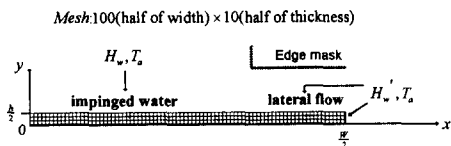
$$T(x) = T_c \text{ for } x_e > 200 \text{ mm} \quad (8)$$

- 계산조건

스트립치수 : 5.0 mm(두께) * 1500 mm(폭)



(a) Run out table layout



(b) Mesh generation

Fig. 11 Mesh generation and run out table layout for edge mask simulation

FDT : 860 °C, CT : 600 °C

이송속도 : 420 m/min

또한 런아웃테이블에서의 온도의 급격한 변화로 열전도율, 비열 등의 열연강재의 물리적 성질은 온도에 따라 급격히 변화하기 때문에 온도의 따른 데이터를 사용하였다.⁽⁹⁾

4.2 스트립 폭방향 온도 측정

먼저 폭방향 온도 특성을 분석하기 전에 온도 분포에 대한 특성을 분석할 수 있도록 Fig. 12에 도시한 것과 같이 새로운 용어를 정의하였다.

온도분포에서 스트립의 측면을 검출하기 위해서 그림과 같이 온도계의 측정범위의 하한값에 대한 온도분포의 최대 온도간의 차를 기준으로 이의 백분율을 정의하여 이 온도의 위치점을 스트립의 측면(edge)로 정의하였다.

스트립의 측면부의 온도 특성을 나타내기 위해 25 mm지점의 온도 T_{25} 와 중심부에 대한 온도 편차 ΔT_{25} 를 정의하였다. 또한 스트립의 온도분포의 최대온도를 T_{max} , 중심부에 대한 온도 편차 ΔT_{max} 를 정의하였다. 최대 온도의 위치는 스트립 측면부터의 거리를 T_{p0} 로 정의하였다.

스트립 폭방향 온도측정 시스템에 의해 마무리 압연 출측온도와 권취온도분포를 측정하여 조업 인자로서 권취온도, 코일두께·폭, HDR/CCR재 등에 따른 온도분포의 변화를 알기 위해 앞에서 정의한 특성값으로 분석하였다.

4.3 스트립 폭방향 재질시험

에지매스크 적용에 따른 열연 스트립의 폭방향 재질 편차의 변화를 조사하기 위하여 Table 2에 나타낸 바와 같이 에지매스크를 미적용한 열간압연

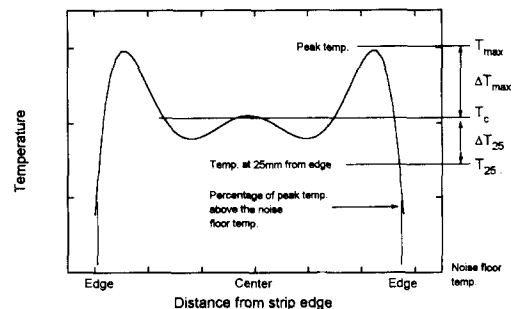


Fig. 12 Nomenclature of characteristics of thermal profile of a hot coil

Table 2 Test conditions for edge mask application

Test No.	Coil size(mm)	Steel grade	Application of edge mask	Amount of edge masking (mm)
1	3.6 t*1517 w	JS-SPHC	Without EMD	
2	5.8 t*1225 w	JS-SS400	Without EMD	
3	4.0 t*1219 w	JS-SPA-H	Without EMD	
4	4.0 t*1350 w	JS-SS400	Without EMD	
5	4.5 t*1530 w	JS-SPA-H	Without EMD	
6	4.4 t*1225 w	JS-SS400	Without EMD	
7	3.6 t*1225 w	JS-SPHC	With EMD	267
8	5.1 t*1204 w	JS-SS400	With EMD	100
9	4.5 t*1530 w	JS-SPA-H	With EMD	230
10	5.6 t*1250 w	JS-SS400	With EMD	75

소재와 에지매스크량을 변화시켜 적용한 열간압연 소재에서 채취한 시험편을 가지고 아래와 같은 시험을 행하였다.

4.3.1. 인장시험

열간압연 소재의 인장시험은 폭방향으로 13부위를 채취하여 ASTM 표준규격에 준하는 인장시험편을 만들어 시험을 행하였다. 인장속도는 2% 스트레인(strain)까지는 2 mm/min, 그 이후는 10 mm/min의 속도로 행한다.

4.3.2. 경도시험

열간압연 소재의 경도시험은 폭방향으로 판의 측면에서 50 mm까지는 5 mm, 50~100 mm까지는 10 mm, 그외는 20 mm간격으로 로크웰(Rockwell) 경도기의 B스케일로 측정한다.

4.3.3. 미세조직 관찰

열간압연 소재의 미세 조직 시험은 폭방향 단면을 20 mm단위로 13 부위를 채취하여 광학현미경으로 200배 배율로 관찰한다. 이 때의 부식액은 2% 나이탈(Nital)을 이용한다.

폭방향 재질 편차를 평가하는 방법으로서 Fig. 13에 나타난 폭방향 강도분포의 모식도에 표시한 바와 같이 ΔTS_1 (측면부 강도의 최대와 최소값의 차이), ΔTS_2 (중심부의 강도 평균값과 최소값과의

차이) 및 ΔX (측면부에서 중심부 평균 강도보다 높은 강도를 갖는 지점의 거리)를 계산하여 비교하였다. 경도의 경우도 강도와 마찬가지로 같은 개념으로서 정의되며 그 값은 ΔRB_1 (측면부 경도의 최대와 최소값의 차이), ΔRB_2 (중심부의 경도 평균값과 최소값과의 차이), ΔY (측면부에서 중심부 평균 경도보다 높은 경도를 갖는 지점의 거리)로 나타내었다.

4. 실험결과

4.1 스트립 폭방향 온도분포 특성

Fig. 14는 냉각 개시점에서 냉각 종료점까지 스트립의 측면부와 중심부의 온도 변화를 나타내고 있다. 그림에서 에지 매스크가 적용되지 않은 경우

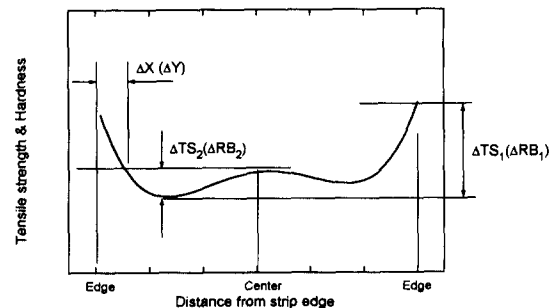


Fig. 13 Nomenclature of characteristics of mechanical properties of a hot coil

는 마무리 압연 출측 온도분포가 공냉 및 수냉구간에서 큰 변화없이 폭방향의 온도차를 그대로 유지함을 알 수 있다. 에지매스크를 설정값 75 mm로 단계별로 75 mm(2뱅크), 60 mm(3뱅크), 45 mm(4뱅크), 30 mm(5뱅크)로 적용시킨 패턴 4의 경우 온도 시뮬레이션 결과, 그림에서 알 수 있듯이 에지매스크가 작용된 30 mm지점의 온도(C)는 수냉구간에서 온도의 강하가 억제되어 오히려 중심부의 온도(A) 보다 높아지는 특징을 보인다.

이는 수냉구간에서 라미나 플로우에 의한 온도 강하는 매우 크기 때문에 에지매스크에 의해 라미나 플로우가 직접 스트립에 충돌되지 않도록 차단하면 측면부의 온도보상을 충분히 얻을 수 있다는 것을 의미한다.

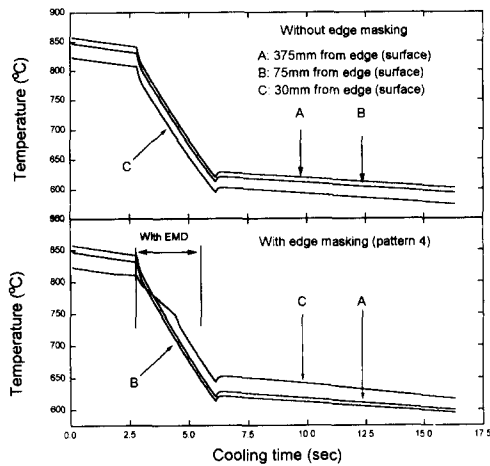


Fig. 14 Trends of width-direction temperature of strip without and with edge masking

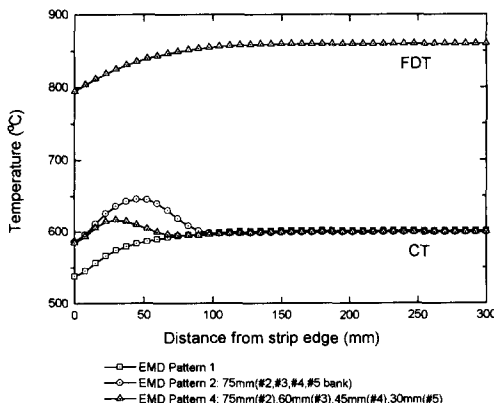


Fig. 15 Changes of thermal profiles of a strip by edge masking patterns

Fig. 15는 에지매스크의 설정 패턴에 따른 권취 온도분포의 변화를 나타낸 것이다. 앞서서도 언급한 바와 같이 마무리 압연 출측 온도분포(Fig. 15에서 FDT)는 그림에서와 같이 스트립의 측면부가 중심부에 대비하여 낮은 포물선 형태를 나타낸다. 에지매스크의 적용으로 권취온도분포는 에지매스크를 적용하지 않는 패턴 1의 경우 마무리 압연 출측 온도분포와 같은 형태의 온도분포를 가지게 된다. 에지매스크를 4뱅크(bank) 75 mm로 일정하게 적용한 패턴 2의 경우 권취온도분포는 측면에서 온도 강하를 보상하여 줄을 알 수 있다. 특히 극측면에서의 온도가 중심부의 온도와 동일함에 따라 기계적 성질 및 미세조직을 균일하게 만들수 있음을 알 수 있다. 하지만 에지 매스크의 적용으로 측면의 온도가 오히려 과대하게 상승하는 경우 이부분의 재질열화가 우려된다. 따라서 에지매스크량을 뱅크별로 단계적으로 설정한 패턴 4의 경우는 그림에서 처럼 스트립 측면의 온도분포가 패턴 2에 비해 균일하게 분포됨을 알 수 있다. 마무리 압연 출측 온도분포가 Fig. 15와 같은 양상을 나타내기 때문에 에지매스크의 적용 패턴은 뱅크별로 단계적으로 적용하여야 한다.

Fig. 16은 스트립치수 2.23t*1203 w mm재를 에지매스크 적용시킨 경우 권취온도분포를 컴퓨터시뮬레이션한 결과와 실기에서 적용하여 얻은 온도분포가 비교적 동일함을 알 수 있다.

4.2 스트립 폭방향 재질편차 특성

4.2.1 인장시험 결과

에지 매스크 적용에 따른 열연 소재의 폭방향 재

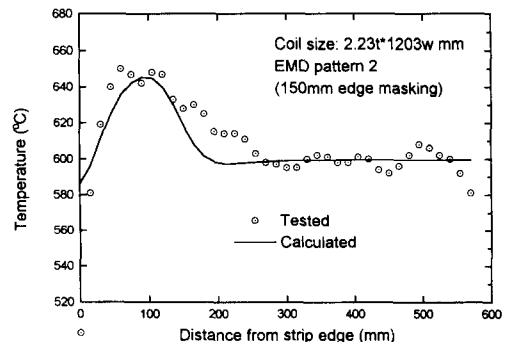


Fig. 16 Comparison between tested and calculated results with edge mask application

질 편차의 변화를 조사하기 위해 인장 시험을 행하였다.

Fig. 12의 강도분포의 모식도에 표시한 바와 같이, ΔTS_1 , ΔTS_2 와 ΔX 를 각각의 시험 결과 얻어진 강도분포에서 구하였다. Fig. 17은 강종 JS-SS400의 경우 에지매스크 적용 전후의 변화를 나타낸 것으로 에지매스크량을 100 mm 적용한 경우에 값이 2 kgf/mm²정도 감소하였다. 또한 ΔTS_2 는 1 kgf/mm²정도 증가하였으며 이는 에지매스크에 의해 150~300 mm 지점의 온도가 스트립의 중심부에 비해 오히려 높아진 것과 일치한다. 에지매스크 적용 전후의 ΔX 의 변화는 에지매스크량이 100 mm인 경우 70 mm 정도 감소하였으며 이는 에지매스크의 적용으로 재질편차 거리가 감소하여 에지

매스크의 효과가 있음을 나타낸다.

Fig. 18은 에지 매스크량의 변화에 따른 ΔTS_1 , ΔTS_2 의 변화를 나타낸 것으로 에지 매스크의 적용으로 ΔTS_1 은 감소하여 전폭의 최대 및 최소 강도 값의 편차가 감소하고 ΔTS_2 는 증가하여 스트립의 중심부에 비해 측면부에서 150~300 mm 부분의 강도가 저하하는 현상이 나타나며 측면부의 재질편차 거리(ΔX)는 감소하는 경향을 보인다.

4.2.2 경도시험 결과

Fig. 19는 강도분포와 마찬가지로 폭방향 경도분포의 모식도에 표시한 바와 같은, ΔRB_1 , ΔRB_2 , ΔY 를 각각의 시험결과 얻어진 경도분포에서 구하였다. 그림에서 알 수 있듯이 에지매스크의 적용으

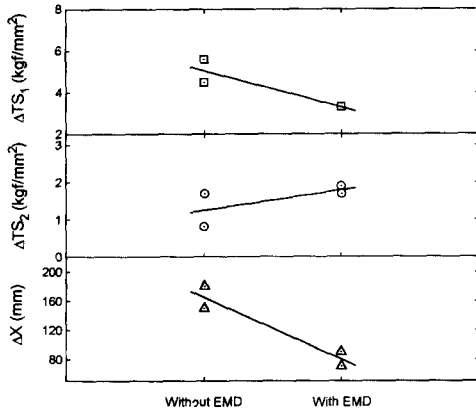


Fig. 17 Changes of tensile strength profile without and with edge mask application (rolled material : steel grade JS-SS400, 100 mm masking)

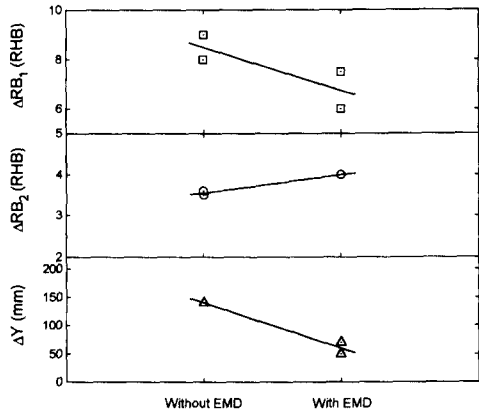


Fig. 19 Changes of hardness profile without and with edge mask application (rolled material : steel grade JS-SS400, 100 mm masking)

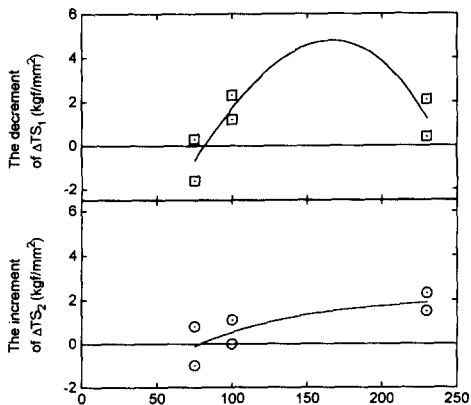


Fig. 18 Effect of the amount of edge masking on ΔTS_1 and ΔTS_2

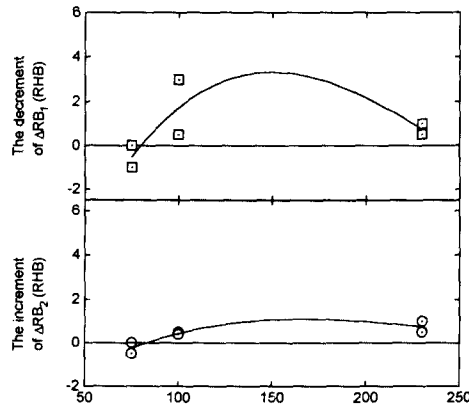


Fig. 20 Effect of the amount of edge masking on ΔRB_1 and ΔRB_2

로 ΔRB_1 , ΔY 는 감소하는 경향을 나타내어 측면부의 재질 편차를 감소하는 효과를 확인할 수 있다.

Fig. 20에 나타낸 바와 같이 에지매스크량에 따른 적용 전후의 ΔRB_1 의 변화에서는 매스크량이 75 mm 이하에서는 적용 효과가 미약하나 100~200 mm 정도의 적용시는 큰 효과를 나타냄을 알 수 있다. 또는 ΔRB_2 의 변화에서는 75 mm 이하에서는 변화량이 없으며 100 mm 부터 증가하는 경향을 나타내어 스트립의 측면부에서 150~300 mm에서는 중심부 대비 경도가 낮아지는 "W"형 분포가 뚜렷해짐을 알 수 있다.

4.2.3 조직시험 결과

Fig. 21은 강종 JS-SS400 (5.1t*1204 w mm, CT : 580 °C)의 에지매스크 적용시의 조직사진으로서 스트립의 측면에서 중심부까지의 조직 변화를 나타내었다.

에지매스크 미적용시에는 대체적으로 조직 분포가 스트립의 극측면을 제외한 전폭에서 저온 변태 조직인 액시큐라 페라이트(acicular ferrite)와 배나이트(bainite)로 이루어져 있으며, 특히 70~200 mm 지점에서는 중심부에 비해 페라이트(ferrite) 분율이 높은 저온 변태조직을 이루고 있으므로 에

지매스크 미적용시의 온도 분포와 일치하는 경향이 있다.

또한 에지매스크 적용시에는 70~200 mm지 점에서는 고온 변태조직인 폴리코날 페라이트(polygonal ferrite)와 피얼라이트(pearlite)로 이루어져 있으며, 200 mm이상 중심부까지는 저온 변태 조직이 존재하며 에지매스크 적용시에는 70~200 mm 지점의 온도가 타지역보다 높았음을 알 수 있다.

이는 앞서 온도분포와 강도분포에서도 알 수 있듯이 에지매스크 적용시 측면부의 100~300 mm 지점의 온도가 상승하며 이부분이 인장강도가 낮아지는 경향과 일치한다.

4.3 에지매스크 설정 패턴 결정

테스트 결과, 에지매스크량이 100 mm 이하의 경우 재질편차 감소효과는 미약하며, 100~200 mm에서 약 2 kgf/mm², 200 mm 이상일 경우 1 kgf/mm² 정도의 재질편차 감소 효과가 있다. 따라서 열연 소재의 재질편차를 감소시키기 위한 적정 에지매스크량은 100~200 mm 범위이다.

또한 마무리 압연 출측 온도분포를 고려할 때 에지매스크는 권취온도분포가 균일하게 되도록 에지매스크를 동일한 량으로 설정하기 보다는 벙크별로

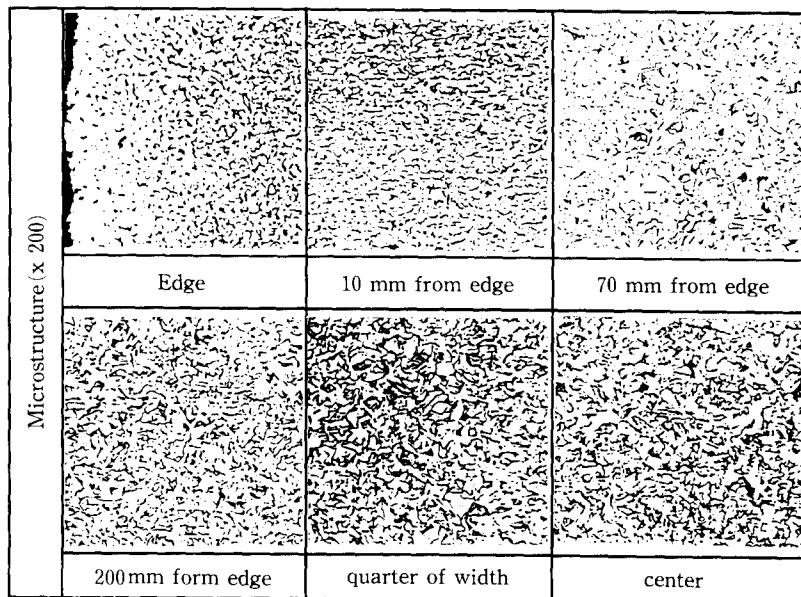


Fig. 21 Microstructural changes of a coil with application of edge mask. (rolled material : steel grade JS-SS400, size 5.1 t*1204 w mm, middle in thickness)

에지매스크량을 단계적으로 적용하는 패턴(예를 들면 Table 1에서 패턴 3, 4, 5)을 사용하여야 한다.

5. 결 론

(1) 본 연구에서 열연 스트립의 폭방향 재질 균질화를 추구하기 위해 폭방향 온도제어 설비인 엔코판넬, 바에지히터 외에 열연 린아웃테이블에서의 상부 라미나 플로우(laminar flow) 냉각 헤드에 스트립 측면부의 주수를 차단하기 위한 폭가변식 에지매스크 설비를 개발하였다.

(2) CCD silicon linear array 방식의 주사형 방사온도계와 변환기를 통해 나온 온도분포 데이터를 고속 A/D 변환기를 내장한 개인용 컴퓨터에서 폭방향 온도분포 데이터와 특성치(ΔT_{25} , ΔT_{max} , T_{p0})를 화면출력 및 보관, 상위 컴퓨터에 전송하는 시스템을 개발하였다.

(3) 열연공정에서 스트립의 폭방향 온도분포를 정의하기 위해 ΔT_{25} , ΔT_{max} , T_{p0} 등의 특성값을 정의하고 또한 에지매스크 적용시의 기계적 성질의 변화를 평가하기 위해 ΔTS_1 , ΔTS_2 , ΔX (강도 특성값) 및 ΔRB_1 , ΔRB_2 , ΔY (경도 특성값)를 정의하였다.

(4) 에지매스크량이 100 mm 이하의 경우 재질편차 감소효과는 미약하며, 100~200 mm에서 약 2 kgf/mm², 200 mm 이상일 경우 1 kgf/mm² 정도의 재질편차 감소효과가 있다. 따라서 열연 소재의 재질편차를 감소시키기 위한 적정 에지 매스크량은 100~200 mm 범위이다.

(5) 마무리 압연 출측 온도분포를 고려할 때 에지매스크는 권취온도분포가 균일하게 되도록 बैं크별로 에지매스크량을 단계적으로 적용하는 패턴을 사용하여야 한다.

(6) 현재 스트립의 폭방향 온도분포의 균일화에 의한 열연 소재의 내부 잔류응력과 관 변형 발생방지를 위하여 린아웃테이블에서의 냉각시의 스트립의 열변형의 해석과 이를 저감하기 위해 에지매스

크의 설정조건에 관한 연구를 진행하고 있다.

참고문헌

- (1) Guo, R. M., 1994, "Heat Transfer of Laminar Flow Cooling During Strip Acceleration on Hot Strip Mill Runout Tables," *ISS Transactions*, Vol. 15, pp. 111~121.
- (2) Yahiro, K., Yamasaki, J., Furukawa, M., Arai, K., Morita, M. and Obashi, M. 1991, "Development of Coiling Temperature Control System of Hot Strip Mill," *Kawasaki Steel Technical Report*, No. 24, pp. 32~40.
- (3) 이성진, 김신일, 1995, "열연 스트립 폭방향 온도제어 시스템 개발," 연구결과보고서(POSCO).
- (4) 神尾寛 等, 1984, "厚板のオンライン制御冷却技術の開発," *鐵と鋼*, 84-A197.
- (5) 吉田博, 佐木徹, 田中智夫, 廣瀬勇次, 1982, "ホットストリップ冷却後の平坦度不良の解析," *鐵と鋼*, 68~8, pp. 965.
- (6) 三宅裕史 等, 1984, "プロフィール・平坦度の優れた熱延鋼板製造技術の確立," *川崎製鐵技報*, Vol. 16, No. 4, pp. 235~246.
- (7) 鋼材強制冷却小委員會, 1977, *鋼材の強制冷却*, 日本鐵鋼協會, pp. 206.
- (8) Yodhida, H., 1984, *Trans. ISIJ*, Vol. 24, pp. 212.
- (9) 壓延理論分科會, 1983, *板壓延の理論と實際*, pp.
- (10) 大友 朗紀 等, 1983, "厚鋼板の溫度および冷却歪制御技發," *鐵と鋼*, '83-S1150.
- (11) 大友 朗紀 等, 1984, "オンライン強制水冷却による新厚板製造法の開發," *鐵と鋼*, '84-A193.
- (12) Hewitt, E. C., Sargeant, G. M., Won Sub Lee and Soo Chul Shin, 1991, "Control of Finishing Temperature at POSCO's No. 2 Hot Strip Mill," *Iron and Steel Engineer*, June, pp. 58~63.