

# ROT 냉각과정의 Strip 두께방향의 열전달 해석

안주용\* · 황상무\*\* · 손성강\*\*

## A Integral Model for the Analysis of Strip Temperatures During ROT Cooling in Hot Strip Rolling

J. Y. An and S. M. Hwang and S. G. Sun

### Abstract

A finite element-based, integrated process model is presented for coupled analysis of the thermal and metallurgical behavior of the strip occurring on the run-out-table in hot strip rolling. The validity of the proposed model is examined through comparison with measurements. The models capability of revealing the effect of cooling pattern on strip temperatures and the optimal cooling pattern are demonstrated through a series of process simulation. In order to improve strip shape and control temperature history of thickness direction for strip during ROT cooling.

**Key Words** : Finite Element, Integrated Process Model, Thermal and Metallurgical Behavior, Run-Out-Table, Hot Strip Rolling

### 1. 서 론

열간압연 공정에서 최종 stand 압연이 마무리 된 열연 strip은 목표로 하는 재질을 얻기 위해 ROT (Run Out Table) 상에서 FDT(다듬질후면온도), Strip 주행속도 그리고 목표 권취온도(CT)를 기초로 공냉과 수냉과정을 통해 일정한 재질을 확보하게 된다. 기존의 제어방식은 Strip 두께방향의 열전달을 고려하지 않고 상부표면에 대한 냉각만을 제어대상으로 함으로써 상하부 Laminar의 냉각능력차이에 기인한 Strip 두께방향의 냉각편차와 상변태 불균일로 인한 조직 불균일등에 의해서 증후물 고탄소강등 일부 강종에서 만곡 및 형상불량의 원인이

된다.

본 논문에서는 유한요소법과 상변태 모델을 이용하여 냉각과정에서의 판 두께방향 열전달 과정을 해석하여 강 종 및 두께에 따른 적정 냉각 Pattern을 기존의 CTC(Coiling Temperature Control)모델에 적용함으로써 Strip의 균일냉각 및 판형상 개선을 하고자 한다.

### 2. ROT냉각과정의 온도계산 모델

#### 2.1 해석방법

ROT 냉각과정에서의 판형상 불량을 유발하는 원인에

\* 포항공과대학교 철강대학원  
\*\* 포항공과대학교 기계공학과

대해 Table 1에 정리하였다. 두께방향 온도편차를 해석하기 위해 중탄소강, 중후물체를 위주로 #6~7 Bank간, #11~12 Bank간 및 Down Coiler 전면에서 Strip의 상하부 온도를 측정하여 Strip 내부로의 전열현상을 상변태 모델과 FEM을 통해 해석하고 다양한 Size, 강종, 주행 속도 및 온도등에 대해서 상하부 열전달계수를 다중회귀 분석을 통해서 도출하였다. Fig.2 는 광양제철소 열간압연공정의 CTC제어 개략도이다.

## 2.2 상변태 예측 모델

일정한 온도하에서 고체상의 시간에 따른 항온변태는 다음과 같이 표현되는 Avrami식[1]으로 잘 표현된다고 알려져 있다.

$$X = 1 - \exp(-kt^n) \quad (1)$$

여기서 X는 항온 유지시간 t에서의 상변태 분율을 나타내며 속도상수 k와 시간지수 n은 상변태속도를 결정짓는 재료상수이다. 일반적으로 철강의 경우 열역학적으로 Ae3이하 온도에서 2상이 안정한 영역이 존재하므로 식 (1)는 다음과 같이 표현된다.

$$X = X_e[1 - \exp(-kt^n)] \quad (2)$$

여기서 X<sub>e</sub>는 주어진 온도에서 열역학적으로 안정한 변태상의 분율을 의미하며 열역학 해석에 의한 평형상태도로부터 결정되는 값이다.

## 2.3 온도해석 모델

오스테나이트로부터 페라이트, 펄라이트 및 베이나이트로의 변태시 발생하는 열량 및 각 상의 비열은 강의 냉각시 온도변화 계산시 매우 중요한 인자가 된다. 각 조성에 대한 상평형을 계산하는 프로그램을 개발하여 평형상태도와 온도에 따른 변태 발열량과 변태상의 비열을 구하였다.[2]

## 2.4 온도 해석 모델

### 2.4.1 지배방정식

열연강판이 최종 Stand를 빠져나와 ROT상에서 수냉

각될 때의 냉각거동을 해석하기 위해 본 연구에서는 다음과 같은 가정을 하였다.

- 판은 완벽한 평면 형상이다.
- 판 폭방향 및 길이의 열전달은 무시

상변태를 고려한 1차원 비정상 열전달방정식은 다음과 같다.

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \Delta H_\alpha \frac{dX_\alpha}{dt} + \Delta H_P \frac{dX_P}{dt} + \Delta H_B \frac{dX_B}{dt} \quad (3)$$

여기서  $\rho, C_p, k_x, x$ 는 밀도, 비열, 열전도도 및 강판의 두께방향 길이를 의미한다.  $\Delta H$ 는 초기 오스테나이트가 각 상으로 변태할 때의 잠열이며, 하첨자  $\alpha, P, B$ 는 각 가 페라이트, 펄라이트, 베이나이트를 의미한다.  $X_i$ 는 i 상의 분율이다. 위의 수식에서  $C_p$ 는 특정온도 및 시간에서 존재하는 상의 종류와 분율에 대해 열역학 계산을 통해 얻어진 값을 각 상의 분율을 고려하여 평균하여 사용하였으며  $\Delta H$ 도 물론 열역학 계산을 통해 얻어진 값을 사용하였다. 밀도와 열전도도는 변태상과 온도와 조성의 함수로서 J.Mietinen[3]의 수식을 사용하였다. 상하부 주수에 관한 열전달계수는 다음과 같이 강판의 온도와 통판속도의 함수로 표시하였다.[2]

$$h_U = k_U \left( \frac{T_S}{T_0} \right)^a \left( \frac{V_P}{V_0} \right)^b \quad (4)$$

$$h_D = k_D \left( \frac{T_S}{T_0} \right)^c \left( \frac{V_P}{V_0} \right)^d \quad (5)$$

여기서  $k_U, k_D, a, b, c, d$ 는 설비나 외부환경에만 관계하는 상수이며 실측온도 data를 사용하여 비선형 회귀 분석을 통해 그 값을 결정하였다. 실측온도는 사상압연 후면온도, ROT중간의 2곳과 권취기 전면에서의 상하부 온도이다.  $T_0, V_0$ 는 정규화를 위해 사용된 기준 강판온도 및 기준 통판속도로서 각각 1000°C, 1200m/min을 사용하였다.

Table.1 Defects by thermal gradient

Thermal Gradient	Defects	원인 분석
Across the width		온도구배 ↓ 내부응력 발생 ↓ 항복응력 초과 ↓ 소성변형 발생 ↓ 표면 wave 발생
Through the thickness		
Through the thickness on head and tail end		
Along the length		

2.4.2 경계조건

ROT상에서 열연 판이 진행 할 때 발생하는 다양한 경계조건은 Fig. 1에서 보는 바와 같다. 온도계산을 위한 초기조건은 사상압연 출측온도(FDT)를 사용하였다. 열전달해석에 필요한 복사열전달, 공기와의 접촉에 의한 강제대류, 하부 물러와의 접촉에 의한 열전달 및 주수에 의한 수냉열전달이 고려되었다.[4] Fig.3는 상변태를 고려한 강판 두께방향 열전달 해석 Simulator의 Flow Chart이다.

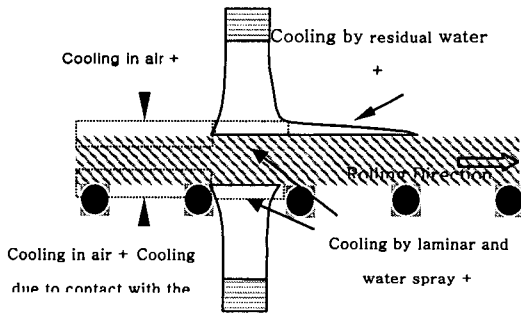


Fig. 1 Heat transfer regimes adjacent to coolant impinging on the ROT of hot strip mill

3. 결과 및 고찰

DC전면에서의 Strip 상하부 온도측정 결과, 상부 대비 하부가 증박물 일반강(두께6mm미만, 0.1 %C미만)에서

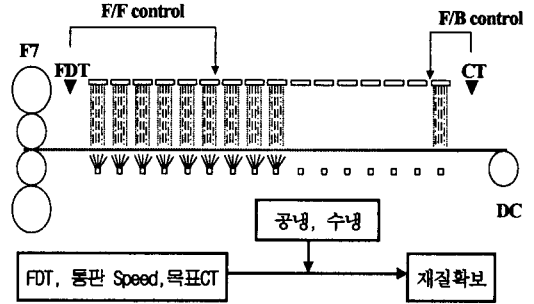


Fig. 2 Coiling Temperature Control in hot strip mill

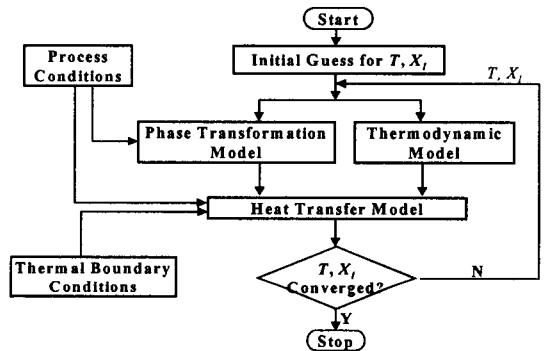


Fig. 3 Flow Chart of Simulator

는5~15℃, 증후물 증탄소강(두께6 mm이상, 0.1%C이상)은 20~35℃ 높게 측정되었다. Fig. 2은 Coiling Temperature 상하부 온도측정 결과이다. ROT 각 지점에서 측정된 Strip 상하부 온도(6개소)와 Strip 내부로의 열전달 현상을 FEM을 통해 해석하고 다양한 강종, Size, 주행속도, 온도등에 대해서 상하부 열전달 계수를 다중회귀분석을 통해 도출하였다. 식(4),(5)에서 각 상수들의 값은 다음과 같다.

후물재(두께:7mm~10mm)  
 $k_0 = 2300, a = 1.8, b = -0.45$   
 $k_1 = 1100, c = 2.5, d = -0.4$

중물재(두께:7mm미만)  
 $k_0 = 2650, a = 1.8, b = -0.45$   
 $k_1 = 1200, c = 1.7, d = -0.45$

이 값들을 사용하였을 때 측정된 온도Data와 Simulator 상의 값이 잘 일치함을 Fig. 4 에서 알 수 있다. 또한, 중후물재 강판 상하부 균일냉각 Pattern을 다양한 강종 및 Size에 대해 도출하고 이를 현장 On-Line CTC모델에 적용 가능하다.

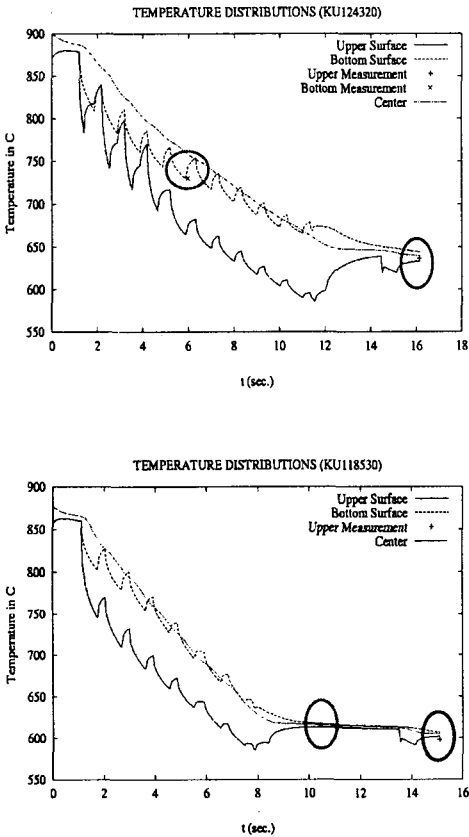


Fig. 4 Temperature Distributions and Measured Temperature of Strip during ROT cooling

#### 4. 결론

본 논문을 통해 Strip 상하부간 온도편차를 측정을 통해 확인할 수 있었으며 기존의 상부 표면온도만을 제어 대상으로 하던 제어에서 상변태 및 열전달을 고려한 1차원 비정상상태 모델을 개발하여 두께방향 열전달을 해석하여 적정 열전달계수를 도출하고 강종, Size에 적합한 상하부 균일 냉각 Pattern을 제시함으로써 제어모델의 고정도화를 이루었다. 또한, 신강종 개발시 simulator를 통해 적정 냉각 Pattern을 제시할 수 있으며 또한, 향후에 본 연구에 이어 강판의 냉각과정의 열용력을 해석하는데 기초자료로써 활용할 수 있을 것이다.

#### 참고 문헌

- [1] M. Avrami : J. Chem. Phys., vol.8, pp.212 (1940)
- [2] H.N.Han, J.K.Lee : Metals and Materials., vol.6, pp.401 (2000)
- [3] J. Miettinen : "Solidification-Related Thermophysical Data for Low-Alloyed and Stainless Steels", Helsinki University of Technology, Report RKK-V-B1 13 (1995)
- [4] H.J.Kim, H.N.Han and J.K.Lee : The 4th Rolling Symposium, vol.4, pp.555(2001)