

가열로내에서 Slab 온도예측 수식모델

이근성 · 유은재 · 송동익*

(주) 포항종합제철 기술연구소 에너지연구실

*경북대학교 화학공학과

(1984년 9월 4일 접수, 1985년 2월 5일 채택)

A Mathematical Model for Predicting Slab Temperature in Reheating Furnace

Geun Seong Lee, Eun Jae Yoo and *Dong Ik Song

Energy Research Lab., Technical Research Laboratories,

POSCO, Pohang 680, Korea

**Department of Chemical Engineering,*

Kyungpook National Univ., Daegu 635, Korea

(Received 4 September 1984 ; accepted 5 February 1985)

요 약

가열로내에서의 slab 온도를 예측하기 위한 2차원열전달 수식모델을 유도하였다. 이 모델은 가열로내에서 slab, 분위기가스 및 노벽에 의한 복사 열전달과 slab 내부에서 길이와 두께방향의 온도구배에 의한 전도 열전달을 고려하였으며, 유도한 식을 차분법을 이용하여 가열로내의 slab 온도를 계산하였다.

모델의 타당성을 검토하기 위해서 No. 4 조압연기 후단에서 pyrometer에 의한 실적 slab 평균추출온도와 모델에서 계산된 slab 평균추출온도를 비교하였으며 그 결과 본 모델은 slab 온도예측精度를 약 6°C 향상시켰다.

Abstract — A mathematical model based on two-dimensional heat transfer for predicting slab temperature in reheating furnace was derived. This model takes into account the radiation heat transfer between the slab and atmosphere gases and furnace walls, and the conduction heat transfer by temperature gradient in the length and the thickness direction within the slab. The slab temperature was calculated from the derived equation by using the difference method.

To verify this model, actual slab average extraction temperature which could be estimated by the temperature after No.4 roughing mill using a pyrometer was compared with the calculated value. Results from this model showed that the accuracy of predicting slab temperature enhanced about 6°C.

1. 서 론

일반적으로 열연공장의 제조 process는 Fig. 1에

서 보는 것처럼 분괴압연이나 연주에서 만들어진 slab을 상온까지 냉각하여 형상 및 표면품질의 검사를 행한 후 다시 가열로에 장입하여 1100~1250

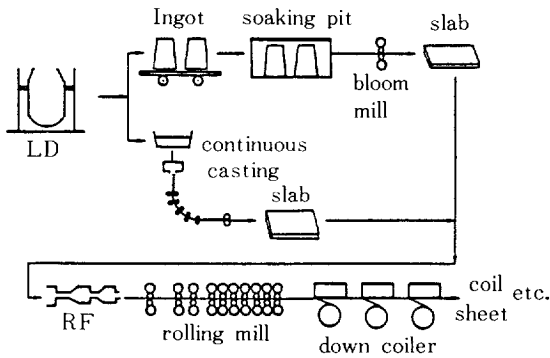


Fig. 1. Basic flow linked with hot strip mill.

℃로 가열하여 압연공정을 거쳐 sheet나 coil 등을 생산한다.

최근 열연공장의 성에너지대책으로서 열연공정의 에너지소비량중 60% 이상을 차지하는 가열로의 열원단위를 감소시키는 방안이 다각적으로 검토되어 실시되고 있다. 가열로의 열원단위감소 방안으로서 가열로의 전산제어화, slab추출온도저하, 연료예열강화, skid pipe의 2중단열 및 연주에서 나온 slab의 현열을 이용하기 위해 slab을 상온까지 냉각하는 것이 아닌 직접 가열로에 장입하는 열편장입(hot charge)등을 들 수 있다. 특히 열편장입은 상온에서 형상 및 표면흠치리 등을 생략한 제품품질상의 문제와 전후의 공정차이에 있어서 공정관리의 어려움이 열편 slab의 탐상기술, 반송방식 및 고온 slab의 현열방지를 위한 heat cover, 또는 냉각되기 쉬운 slab의 선단을 가열하는 edge heater 등의 각종

기술, 설비의 개발에 의해서 본격적인 실시에 도달하게 되었다.

1981년 7월 가동초기부터 조업전산화에 의해 가동되고 있는 당사 제2 열연공장의 가열로 제어 system은 Fig. 2에서 보는 것처럼 수요가가 요구하는 제품의 성질에 따라 결정되는 조압연기(roughing mill)나 사상압연기(finishing mill)의 출구온도에 맞추기 위해 압연 line의 온도강하모델에 의해서 계산되는 목표추출온도까지 가열로내에서 slab을 가열하기 위해서 가열로내의 분위기온도와 노내에서 예측되는 slab의 온도도에 의해 연료유량을 제어하여 2분간격으로 분위기온도를 설정하고 있다. 하지만 on-line으로 사용하고 있는 가열로내의 slab 온도계산식은 신일본제철 大分제철소의 조업실적을 토대로한 off-line 계산결과에서 도출된 단순계산식 이기에 가열로내에서의 전열현상을 정확히 판단하기 힘들다. 따라서 본 연구에서는 당사 가열로실정에 맞게 정확한 이론적 해석에 의해 전열현상을 파악하여 수식모델을 유도함으로써 현 가열로조업시의 slab 온도에측정精度를 개선하여 가열로의 열원단위절감에 기여하며 향후추진계획인 가열로열편장입시의 가열로조업에도 이용할 수 있을 것이다.

2. 가열로의 사양

당사 제2 열연공장 가열로의 제원과 개략적인 모형을 Table 1과 Fig. 3에 나타내었다. 가열능력이 250T/H인 가열로는 slab의 형상 및 노효율을 고려

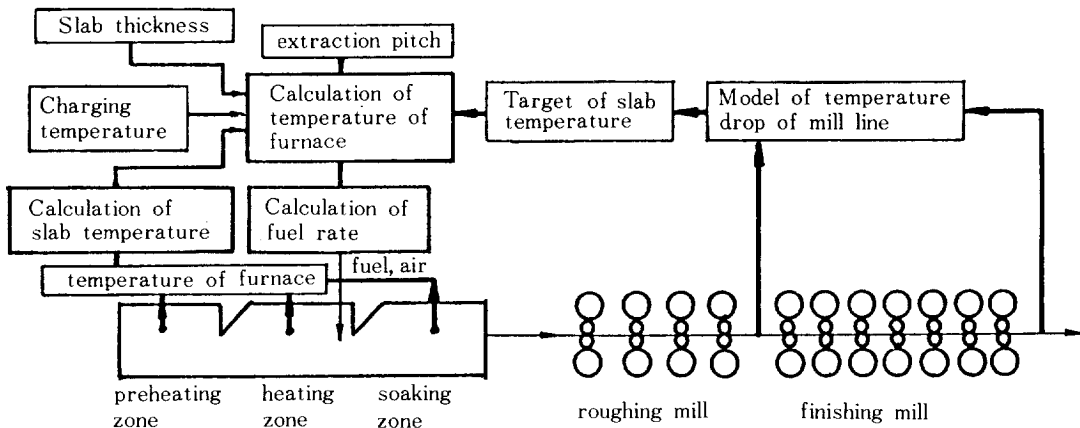


Fig. 2. Control system of reheating furnace.

Table 1. Calculation value.

Charging temperature	30, 650~900℃			
Slab thickness	200~270mm			
Residence time				
cold charge	150~240min			
hot charge	50~130min			
Set temperature (℃)		T_p	T_h	T_s
	1	1050	1250	1300
	2	980	1220	1275
	3	980	1220	1300
	4	980	1250	1325
	5	1015	1220	1275
	6	1015	1220	1325
	7	1015	1250	1350
	8	1050	1220	1275
	9	1050	1280	1275
	10	1050	1280	1325
	11	1050	1310	1350

하여 예열대, 가열대 및 균열대로 나누어 관리하고 있으며 walking beam식으로 slab이 장입되어 추출될 때까지 6개의 고정 beam에 의해 지지되며 4개의 이동 beam에 의해서 운반되고 있다. 가열로내의 열량을 공급하는 burner는 예열대와 균열대에 상하부 각각 8개, 가열대에 상부 8개, 하부 10개가 있으며 사용되는 연료는 중유 또는 혼합가스(COG; coke oven gas와 BFG; blast furnace gas의 1:1 mixture, 발열량 2800kcal/Nm³)를 사용하며 burner에서 연소된 폐가스는 열교환기를 통해 약 420

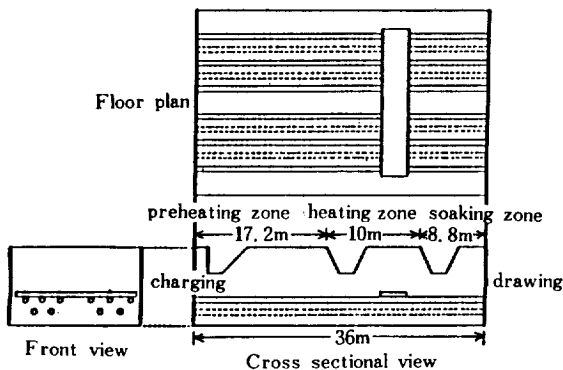


Fig. 3. General view of reheating furnace.

℃까지 공기를 예열시켜 연돌을 통해 방출되며 예열된 공기는 연소용 공기로 burner에서 사용된다.

3. 기본 수식모델

가. 노내의 복사전열

전열은 보통 대류, 전도 및 복사에 의해 일어나며 이 모든 현상이 가열로내에서 존재한다. 본 모델에서는 대류전열에 의한 slab의 가열이 복사전열의 5%도 채 안되기 때문에(1-3) 무시할 만하다고 가정하여 노내에서 slab으로의 전열은 복사전열에 의해서 일어난다고 생각하고 slab 내부에서의 전열은 전도법칙에 따른다고 생각하였다. 또한 가열로의 조업은 고온에서 이루어지고 있기 때문에 분위기가스중 O_2 의 농도에 따라 slab의 표면에서 철의 산화물인 scale이 생성하게 된다. 하지만 scale이 복사 및 slab 표면에서의 전도열전달저항을 어떻게 고려해야 하는 문제는 철저한 연구를 통해 해결해야 할 것이나 본 연구에서는 모델의 단순화를 위해 scale의 생성은 무시하였다. 노내의 상황을 모형화하면 Fig. 4와 같다.

Slab으로부터 노벽, slab에서 노내가스 및 노벽에서 노내가스로의 전열속도식을 유도하여 열의 이동이 전류와 유사한 것을 이용해서 radiation network[4, 5]으로 표시하고 view factor가 거의 1이라 가정하여 Kirchhoff법칙을 이용하면 노내에서 slab으로의 총 전열량은 다음과 같이 표시된다.

$$q_r = \epsilon_1 \sigma \{(T_w + 273)^4 - (T_s + 273)^4\} + \epsilon_2 \sigma \{(T_g + 273)^4 - (T_s + 273)^4\} \quad (1)$$

여기서

$$\epsilon_1 = \frac{\epsilon_w \epsilon_s (1 - \epsilon_g)}{\epsilon_w + (1 - \epsilon_w) \epsilon_g} \quad (2)$$

$$\epsilon_2 = \frac{\epsilon_g \epsilon_w}{\epsilon_w + (1 - \epsilon_w) \epsilon_g} \quad (3)$$

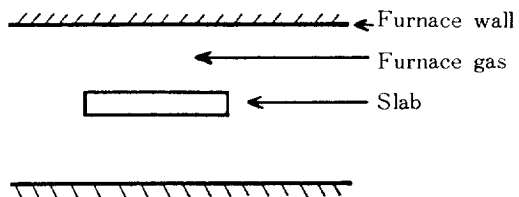


Fig. 4. Radiation system consisting of a transmitting flame gas between furnace wall and slab.

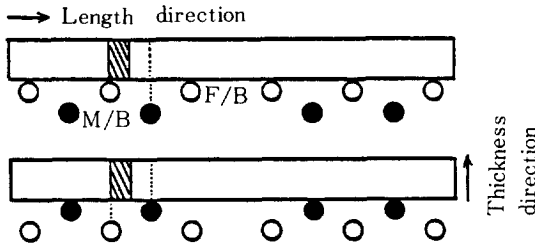


Fig. 5. Selection of control volume.

본 연구에서는 ε_g , ε_w , ε_g 의 값을 각각 0.04, 0.45, 0.75로 사용하였다[6].

나. Slab내부의 전도전열

Slab이 이동 및 고정 beam에 지지되어 있는 경우의 대표부피를 Fig. 5와 같이 나타내었다. 원칙적으로 길이방향을 반으로 나눈 부피를 대표부피로 선정을 해야 완전대칭을 이루나 slab이 고정 및 이동 beam에 교대로 지지되고 slab의 온도는 beam과 접촉하는 부분만 다소 차이가 있기 때문에 수치해석상의 精度를 고려하여 고정 beam과 이동 beam 사이 거리의 반인 빗금친 부분을 대표부피로 선정을 하여 빗금치지 않은 부분과 완전대칭을 이룬다고 가정을 하였다. 각 beam 위에는 slab이 직접 접촉하게 되는 button이 25cm 간격으로 부착되어 있으며 이것들의 모양은 노의 대별로 달라서 원통형 혹은 직사각형을 이루며 배열 또한 일직선 혹은 zig-zag 형으로 되어 있다. 본 모델에서는 Fig. 6에 나타낸 것과 같이 button이 직사각형을 이루며 배열 또한 일직선으로 되어 있다고 가정하였다. 여기서 slab 폭방향의 온도구배는 없는 것으로 생각하여 거리와 두께만을 고려한 2차원해석을 하였으며 Fig. 7과 같이 slab을 모형화하면 내부전열식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (k \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k \frac{\partial T}{\partial y}) \quad (4)$$

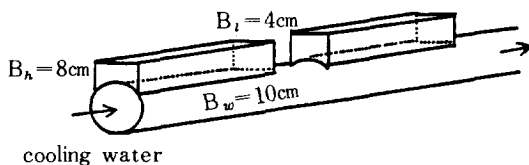


Fig. 6. Modeling of buttons on the beam.

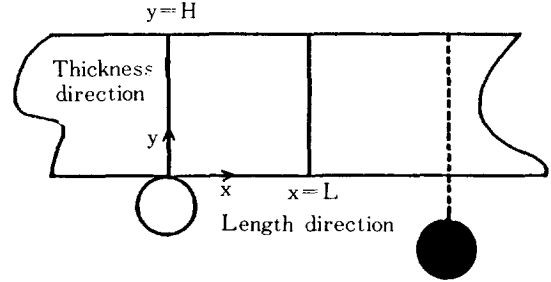


Fig. 7. Mathematical representation of slab.

초기조건은

$$T(x, y, 0) = T_c(\text{slab 장입온도}) \quad (5)$$

이며

경계조건은

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0 \quad (6)$$

과

(1) Slab상부

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=H} = q_r \quad (7)$$

(2) Slab하부

① 고정 beam에 지지되어 있는 경우

i) Beam과 접촉하는 부분

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = h_c (T_{cw} - T \Big|_{y=0}) \quad (8)$$

ii) Beam과 접촉하지 않는 부분

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = q_r \quad (9)$$

② 이동 beam에 지지되어 있는 경우

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = q_r \quad (10)$$

이다.

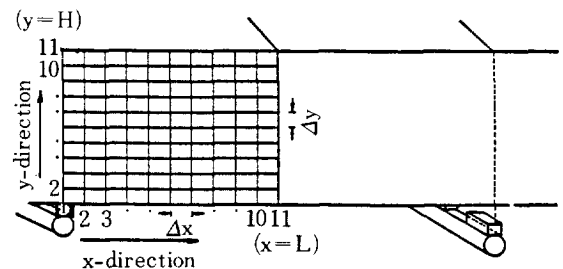


Fig. 8. Finite difference formulation of slab.

지금까지 전개된 기본수식에 다음의 가정을 덧붙여 모델을 완성하였다.

- (1) Slab은 노내에 체류하는 동안 고정 beam과 이동 beam에 같은 시간동안 교대로 지지된다.
- (2) 각대에 설정된 분위기온도는 각대에 걸쳐 균일하다.
- (3) Slab과 skid pipe사이의 빈 공간에 대해서는 외부에서 전달되는 열량은 없다.

4. Slab의 차별화 및 차별식유도

고정 beam에 지지되어 있는 경우의 slab에 대해서 대표부피를 차별화한 것을 Fig. 8에 나타내었다. 대표부피를 x, y 방향으로 각기 10등분하여 121개의 node로서 대표되는 미소부피에 대해 에너지 수지식을 세워 거리에 대한 차별화를 행하고 시간에 대해서는 Euler법을 적용하여 explicit하게 시간차분을 행하였다. 또한 온도에 따른 slab의 열전달계수는 인접하는 node온도의 평균값에 의해 결정된다 고 가정하였다.

Node (1, 1)에 대해서 에너지수지식은

$$\rho c_{p,1} \left(\frac{\Delta x}{2} \cdot \frac{\Delta y}{2} + \frac{B_i}{2} \cdot \frac{B_h}{2} \cdot B_w \cdot N \right) \frac{\partial T_{1,1}}{\partial t} = \frac{\Delta x}{2} \cdot \frac{k_{1,2} + k_{1,1}}{2} \cdot \frac{T_{1,2} - T_{1,1}}{\Delta y} + \frac{B_i}{2} \cdot B_w \cdot N \cdot \frac{k_{cw} + k_{1,1}}{2} \cdot \frac{T_{cw} - T_{1,1}}{B_h} + \left(\frac{\Delta y}{2} + \frac{B_h}{2} \cdot B_w \cdot N \right) \left(\frac{k_{2,1}^* + k_{1,1}}{2} \cdot \frac{T_{2,1}^* - T_{1,1}}{\Delta x} + \frac{k_{2,1} + k_{1,1}}{2} \cdot \frac{T_{2,1} - T_{1,1}}{\Delta x} \right) \quad (11)$$

이며 이것을 정리하면

$$T_{1,1}^{(\nu+1)} = \left[1 - \frac{\alpha_1}{c_{p,1}} \left(\alpha_2 \frac{k_{1,2} + k_{1,1}}{2} + \alpha_3 \frac{k_{cw} + k_{1,1}}{2} + \alpha_4 \frac{k_{2,1} + k_{1,1}}{2} \right) \right] \cdot T_{1,1}^{(\nu)} + \frac{\alpha_1 \alpha_2}{c_{p,1}} \frac{k_{1,2} + k_{1,1}}{2} T_{1,2}^{(\nu)} + \frac{\alpha_1 \alpha_3}{c_{p,1}} \frac{k_{2,1} + k_{1,1}}{2} T_{2,1}^{(\nu)} + \frac{\alpha_1 \alpha_4}{c_{p,1}} \frac{k_{cw} + k_{1,1}}{2} T_{cw} \quad (12)$$

이다.

$$\text{여기서 } \alpha_1 = \frac{\Delta x / \rho}{\left(\frac{\Delta x}{2} \cdot \frac{\Delta y}{2} + \frac{B_i}{2} \cdot \frac{B_h}{2} \cdot B_w \cdot N \right)} \quad (13)$$

$$\alpha_2 = \frac{\Delta x}{2 \Delta y} \quad (14)$$

$$\alpha_3 = \frac{B_i \cdot B_w \cdot N}{2 B_h} \quad (15)$$

$$\alpha_4 = \frac{\Delta y + B_h \cdot B_w \cdot N}{\Delta x} \quad (16)$$

Node (i, 1), i=2, 3, ..., 10에 대해서도 에너지 수지식을 세워 정리하면

$$T_{i,1}^{(\nu+1)} = \frac{p}{c_{p,i,1}} \cdot \frac{k_{i-1,1} + k_{i,1}}{2} T_{i-1,1}^{(\nu)} + \left[1 - \frac{1}{c_{p,i,1}} \left(p \cdot \frac{k_{i-1,1} + 2k_{i,1} + k_{i+1,1}}{2} + 2q \frac{k_{i,2} + k_{i,1}}{2} \right) \right] T_{i,1}^{(\nu)} + \frac{2q}{c_{h,1}} \frac{k_{i,2} + k_{i,1}}{2} T_{i,2}^{(\nu)} + \frac{p}{c_{p,i,1}} \frac{k_{i-1,1} + k_{i,1}}{2} T_{i+1,1}^{(\nu)} + \frac{2q}{\rho \Delta t c_{p,i,1}} \cdot q_{r,i,1} \quad (17)$$

이다.

$$\text{여기서 } p = \Delta t / \rho (\Delta x)^2 \quad (18)$$

$$q = \Delta t / \rho (\Delta y)^2 \quad (19)$$

나머지 node에 대해서도 마찬가지로 방법으로 유도할 수 있으며 이러한 방법으로 구한 총 121개의 연립대수방정식을 식(20)과 같은 행렬로 표시하여 시간증분에 따른 slab의 온도분포 및 평균온도를 계산하였다.

$$\begin{bmatrix} T_{1,1} \\ T_{1,2} \\ \vdots \\ T_{1,11} \\ \vdots \\ T_{11,11} \end{bmatrix}^{(\nu+1)} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} & \cdots & a_{1,121} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & & & a_{2,121} \\ \vdots & \vdots & & & \vdots \\ a_{11,1} & a_{11,2} & & & a_{11,121} \\ \vdots & \vdots & & & \vdots \\ a_{121,1} & a_{121,2} & & & a_{121,121} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{1,1} \\ T_{1,2} \\ \vdots \\ T_{1,11} \\ \vdots \\ T_{11,11} \end{bmatrix}^{(\nu)} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_{11} \\ \vdots \\ b_{121} \end{bmatrix} \quad (20)$$

Explicit하게 시간차분을 행하였기 때문에 해의 안정성을 유지하기 위해서는 시간증분치의 선택에 제한이 가해지며 그 관계는 다음식으로 주어진다.

$$\Delta t \leq \frac{\rho c_p (\Delta x \cdot \frac{\Delta y}{2})}{k \left(\frac{\Delta y}{\Delta x} + \frac{\Delta x}{\Delta y} \right) + \Delta x \frac{q_r}{T_w - T_s}} \quad (21)$$

허용되는 시간증분치는 slab 두께, 노벽온도 및 slab 온도에 따라 변하나 약 15초 정도가 되며 본 연구에서는 5 초로 해서 사용하였다.

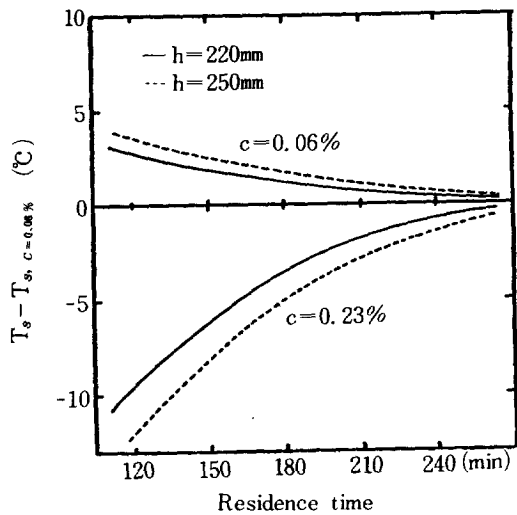


Fig. 9. Extraction temperature difference with carbon content.

5. 계산방법

Slab이 노내에 장입하여 체류하고 있는 동안 sl-

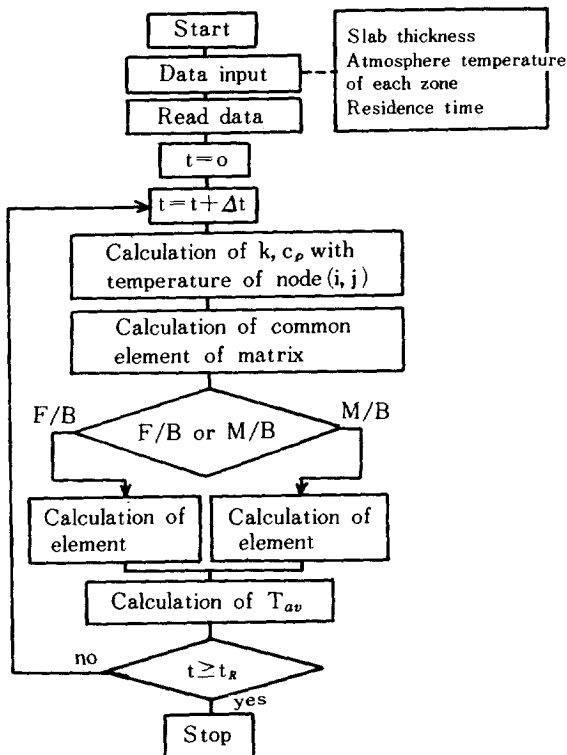


Fig. 10. Flow chart for the calculation of slab temperature.

ab의 온도에 영향을 주는 인자로는 각대의 분위기 온도, 재로시간, slab두께, slab 장입온도, 강의 탄소함량등을 들 수 있다.

Fig. 9는 탄소함량변화에 따른 slab의 평균추출 온도변화를 나타내었다. 탄소함량이 높을수록 열전도도가 낮아 추출온도가 낮은 것으로 나타났으나 전체적으로 볼 때 $\pm 10^\circ\text{C}$ 이내로서 다른 인자에 비해 추출온도에 커다란 영향을 미치지 않는다. 따라서 강종에 대해서는 0.08%의 기본탄소함량에 대해서만 계산을 행한다. 기본수식모델을 이용한 slab의 온도계산흐름을 Fig. 10에 나타냈으며 off-line 계산은 당연연구소 Prime 750 computer를 이용하였다.

6. 현장적용

당사 제2 열연공장 가열로설비의 여건상 가열로 내의 slab온도를 측정할 수 없기 때문에 slab이 가열로에서 추출될 때의 온도로서 모델의 타당성을 검토하였다. 현 조업에서 실적 slab 평균추출온도는 추출된 slab의 표면에 생성된 scale을 제거하는 scale breaker와 조압연기를 거쳐 No. 4 조압연기의 후단에서 pyrometer를 이용하여 측정한 값을 제어 프로그램의 온도강하모델식에 의해 역으로 계산하여 예측하고 있다.

먼저 현장의 SCC (Supervisory Computer Con -

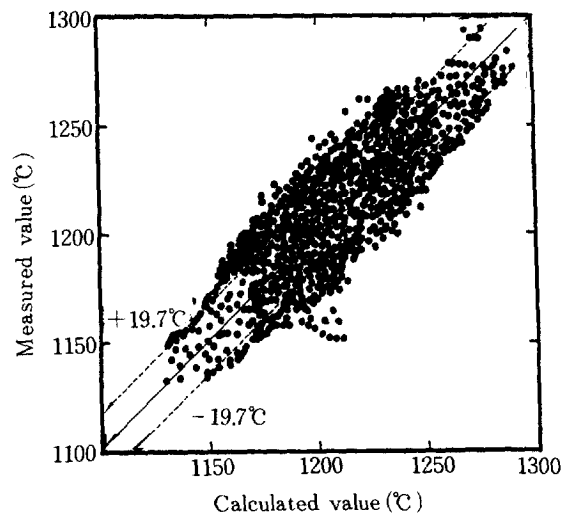


Fig. 11. Comparison of slab average extraction temperature between measured value and calculated value.

trol) data 중에서 연소제어목표 slab에 가까운 neck slab의 data만을 선별하기 위해서 No. 4 조압연기 후단에서 목표온도와 실적온도의 차가 20°C 이하인 logged data를 택하여 모델의 타당성을 검토하였다. Fig. 11은 측정온도에 의한 실적 slab 평균 추출온도와 본 모델에서 계산된 slab 평균추출온도와의 비교를 나타내고 있다. 기존의 가열로 제어프로그램의 예측 slab 평균온도와 실적온도와의 평균오차는 25.6°C였으며 상관계수는 0.700으로 주어져 slab온도에 측 精度와 각 변수와의 상관성이 그다지 크지 않았다. 하지만 본 연구의 수식모델계산에서는 실적온도와의 평균오차는 19.7°C로서 기존의 가열로 제어프로그램보다 약 6°C의 온도예측精度의 향상을 보였으며 상관계수도 0.8665로서 각 변수와의 상관성도 증가하였다.

7. 결 론

당사 제2 열공장의 가열로내에서 slab온도를 예측하기 위한 2 차원 열전달 수식모델을 유도하여 현장적용결과 slab온도예측精度를 약 6°C 향상시켰다.

NOMENCLATURE

- a : constant element of array
- A : area [cm²]
- b : constant element of array
- B_h : button height [cm]
- B_l : button length [cm]
- B_w : button width [cm]
- c : carbon content [%]
- c_p : specific heat [cal/g °C]
- h : slab thickness [mm]
- h_c : heat transfer coefficient [cal/cm² sec °C]
- k : thermal conductivity [cal/cm sec °C]
- k_{cw} : thermal conductivity of cooling water [cal/cm sec °C]
- N : number of buttons per skid pipe length [No./cm]
- q_r : total radiation heat transfer rate [cal/cm² sec]

- T : temperature [°C]
- T_c : charging temperature of slab [°C]
- T_{cw} : average temperature of cooling water [°C]
- T_s : slab temperature [°C]
- Δx : unit length of slab length direction [cm]
- Δy : unit length of slab thickness direction [cm]
- W : slab width [cm]

Subscript

- g : gas
- i : node of slab length direction
- j : node of slab thickness direction
- s : slab
- w : wall

Greek letters

- ρ : density [g/cm³]
- ε : emissivity
- σ : Stefan-Boltzmann constant (=1.355 × 10⁻⁸ cal/cm²·sec·K⁴)
- ν : dimensionless time step

REFERENCES

1. Hollander, F. and Huisman, R.L.: The Iron and Steel Institute, London, 46 (1973).
2. Ford, R., Suryanarayana, N.V. and Johnson, J.H.: Ironmaking and Steelmaking, **11**, 140 (1980).
3. Hollander, R. and Zuurbier, S.P.A.: Iron and Steel Engr., **59**(1), 44 (1982).
4. Holman, J.P.: Heat Transfer, McGraw-Hill, 3rd ed., Tokyo (1972).
5. Geiger, G.H. and Poirier, D.R.: Transport Phenomena in Metallurgy, Addison-Wesley (1973).
6. Hottel, H.C.: Heat Transmission (ed. McAdams, W.H.), 3rd. ed., McGraw-Hill, New York, (1954).