

〈論 文〉

분할법을 이용한 슬래브 가열로의 전열 해석

박홍수* · 이용국* · 김기홍* · 조길원* · 민병현** · 김무환***

(1990년 11월 23일 접수)

Numerical Simulation of Slab Reheating Furnace by the Zone Method

H.S.Park, Y.K.Lee, K.H.Kim, K.W.Cho, B.H.Min and M.H.Kim

Key Words : Zone Method(분할법), Reheating Furnace(가열로), Slab(슬래브), Performance(성능), Combustion Gas(연소가스)

Abstract

A computer program was developed to analyze the performance of slab reheating furnaces by applying the zone method which was used to predict the temperature distribution of walls and combustion gas in a furnace. Experiments were also conducted to validate the numerical analysis for the slab reheating furnace of plate mill in iron and steel works. The performance of the reheating furnace was calculated with the variation of fuel flow rate, residence time and charging temperature of slab. The simulation results were in good agreement with the experiment.

기 호 설 명

$a_{gr}(T)$: 가중계수
 A : 면적, m^2
 E : 흑체 방사도, $kcal/(m^2 hr)$
 h : 대류 열전달 계수, $kcal/(m^2 hr ^\circ C)$
 H : 입사에너지 밀도, $kcal/(m^2 hr)$
 K_i : 흡수계수, $1/(m atm)$
 L : 통과거리, m
 M_g : 가스 유량, Nm^3/hr
 r : 반경, m
 ΔT : 균열도, $^\circ C$
 V : 체적, m^3
 W : 방사에너지 밀도, $kcal/(m^2 hr)$
 ϵ : 방사율
 ρ : 반사율, 밀도(kg/m^3)
 σ : Stefan-Boltzmann 상수
 θ : 방위각, rad

ϕ_{CG} : 총괄 열 흡수율

첨 자

i, j, k : 구분번호, 성분가스
 g : 가스
 s : 표면, 슬래브

1. 서 론

철강공정에서 사용되고 있는 슬래브 가열로는 에너지 다소비 설비로서 노내 전열현상의 엄밀한 해석을 통한 가열에너지의 절감이 요구되고 있다. 더우기 최종제품의 품질 고급화를 위해 피가열물을 가장 이상적으로 가열할 수 있도록 노내 분위기 및 피가열물의 온도를 보다 정확하게 해석하여야 할 필요성이 증대되고 있다.

가열로내의 전열현상은 노체, 연소가스 및 피가열물간의 열교환이 주체가 되지만, 노의 구조와 형태가 복잡하고 화염으로부터의 복사, 연소가스 유동등과 같은 노내 현상에 대한 정량적인 해석이 어

* 정희원, 산업과학기술연구소 에너지연구실

** Nor thwestern 대학 기계공학과

*** 정희원, 포항공과대학 기계공학과

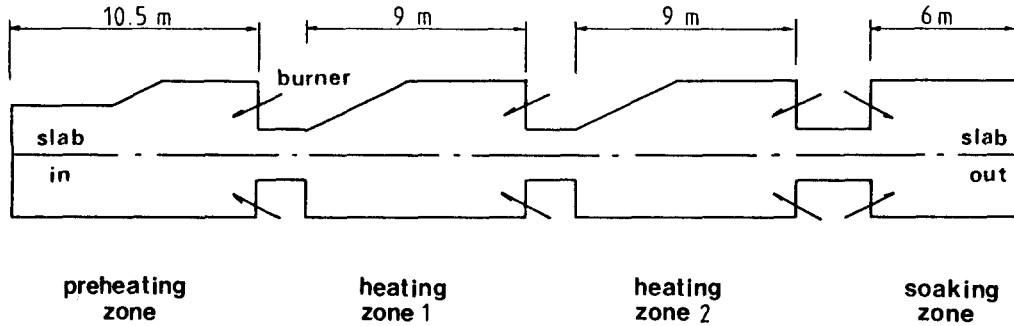


Fig. 1 Schematic diagram of reheating furnace

렵기 때문에 피가열물에 대한 전열 과정을 정확하게 예측하는 것은 대단히 곤란한 실정이다. 지금까지 보편적으로 사용되고 있는 슬래브 가열로의 전열해석 방법으로는, 실험에 의하여 피가열물에 대한 노의 고유한 전열 특성치를 구하여 노내 전열과정을 판단하는 총괄 열 흡수율법(ϕ_{CG} 법)을 들 수 있다⁽¹⁾. 총괄 열 흡수율법에 의한 전열 해석은 주어진 노내 분위기 온도로 부터 슬래브의 노내 온도 이력을 예측하는데 한정된다. 즉 노체와 버너의 배치관계, 조업조건 또는 연소조건 변화에 따른 노 자체의 전열특성 변화가 고려되지 않으며, 이로 인하여 측정시와 다른 조업 조건에 대하여 전열해석을 행 할 경우에는 계산결과와 정확도가 저하된다.

공업로에 대한 보다 엄밀한 전열 해석법으로는 Hottel과 Cohen의 분할법(Zone법)을 들 수 있다⁽²⁾. 이 방법에서는 온도가 불균일한 노내의 가스체와 벽면을 수개의 등온 가스체 및 등온면으로 분할하여 이들에 대한 에너지 보존식으로부터 가스체와 노벽면의 온도분포를 구한다. 분할법으로 슬래브 가열로의 전열해석을 행 할 경우에는 노 형태나 연소가스의 복사특성을 고려할 수 있는 반면, 슬래브에 대해서는 구간별 평균온도의 계산만이 가능하다.

본 연구에서는, 총괄 열 흡수율법과 분할법이 지니고 있는 전열 해석상의 한계를 보완하고 슬래브 가열로의 전열해석에 실질적으로 적용하기 위하여, 분할법으로 노내 분위기 온도를 계산하고 이로부터 슬래브의 노내 온도이력을 예측하는 계산모델을 제시하였다. 계산모델의 유용성 확인을 위하여는, Fig. 1에 보인 바와 같은 최대 슬래브 처리량이 235ton/hr인 후판 가열로를 대상으로 하여, 노내 분위기 가스 온도 및 슬래브의 온도이력을 측정하

고 이를 계산 결과와 비교하였다. 이와 아울러 연료유량, 슬래브 재로시간(residence time) 및 장입 온도등의 조업조건 변화가 분위기 가스온도와 슬래브의 온도이력에 미치는 영향을 검토하여 가열로의 효율적 조업을 위한 자료를 제시하였다.

2. 수치계산

2.1 교환면적의 정의⁽³⁾

가스는 특정 파장영역에서 복사에너지를 흡수·방출하는 선택복사 특성을 지닌다. 각 파장영역에서 흡수계수가 서로 다른 실제가스의 복사율은, 모든 파장에서 흡수계수가 일정한 회색가스의 개념을 도입하여 Beer의 근사식으로 나타낼 수 있다. 수치계산시에는 실제가스를 m 개의 회색가스의 집합체로 보고 각각의 성분가스에 가중치를 주어 다음의 식으로 부터 복사율을 구하였다⁽⁴⁾.

$$\epsilon_g(T) = \sum_{i=0}^m a_{g,i}(T) (1 - e^{-K_i L}) \quad (1)$$

연소가스에 있어서 복사에 관여하는 것은 CO, CO₂, H₂O, SO_x, NO_x 등을 들 수 있으나, SO_x와 NO_x는 그 농도가 타 분자에 비해서 낮고, CO는 복사밴드가 장파장에 집중되어 있기 때문에 이들의 영향을 무시하고 CO₂와 H₂O에 의한 복사만을 고려하였다.

가스체에서의 복사는 Beer의 법칙을 따르며, 면에서의 복사는 Lambert의 법칙을 따르는 것으로 하여 면구분 i 와 j 간의 순수 복사 전열량 $Q_{i,j}$ 를 다음과 같이 나타내었다.

$$Q_{i,j} = (E_{s,i} - E_{s,j}) \int_{A_i} \int_{A_j}$$

$$\frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi r^2} e^{-kr} dA_j dA_i \quad (2)$$

식 (2)로 부터 면-면 간의 직접 교환면적(direct radiative interchange area) $\overline{s_i s_j}$ 를 다음과 같이 정의하였다.

$$\overline{s_i s_j} = \frac{Q_{ij}}{E_{s,i} - E_{s,j}} = \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi r^2} e^{-kr} dA_j dA_i \quad (3)$$

같은 방법으로 하여 가스-면, 가스-가스간의 직접 교환 면적 $\overline{g_i s_j}$ 및 $\overline{g_i g_j}$ 를 다음과 같이 정의하였다.

$$\overline{g_i s_j} = \int_{V_i} \int_{A_j} \frac{K \cos \theta_j}{\pi r^2} e^{-kr} dA_j dV_i \quad (4)$$

$$\overline{g_i g_j} = \int_{V_i} \int_{V_j} \frac{K^2}{\pi r^2} e^{-kr} dV_j dV_i \quad (5)$$

비 흡체간의 다중반사에 의한 복사전열은, 각각의 면이 일정한 온도와 복사 에너지의 방사특성을 유지하며 가스체가 회색가스인 것으로 보았을 때, 전열체 간의 복사에너지의 열 평형을 고려하여 나타낼 수 있다. 이러한 다중반사 특성을 나타내기 위하여 면-면, 가스-면, 가스-가스간의 전 교환면적(total radiative interchange area)을 다음과 같이 정의 하였다.

$$\overline{s_i s_j} = \frac{A_j \epsilon_j}{\rho_j} (\delta_{i,j} W_j - \delta_{i,j} \epsilon_i) \quad (6)$$

$$\overline{g_i s_j} = \frac{A_j \epsilon_j}{\rho_j} g_{i,j} W_j \quad (7)$$

$$\overline{g_i g_j} = g_{i,j} + \sum_k \overline{s_k g_i} g_{i,k} W_k \quad (8)$$

여기서, $s_{,i} W_j$, $g_{,i} W_j$, $g_{,i} W_k$ 는 가스체 (또는 면) i 의 방사도 $E_{g,i}$ (또는 $E_{s,i}$)가 1이고 타 가스체 및 면으로 부터의 복사에너지 방출이 없는 경우 ($T =$ 의 복사 에너지 밀도 $W_j (= \epsilon_j E_{s,j} + \rho_j H_j)$)를 뜻한다.

면-면 간의 다중 반사를 고려한 순수 열 교환량 Q_{ij} 는 식 (6)으로 부터 $Q_{ij} = \overline{s_i s_j} (E_{s,i} - E_{s,j})$ 로 나타내어 지며 가스-면, 가스-가스간에 대해서도 같은 형태가 된다. 위의 식(6), (7) 및 (8)은 회색가스에 대한 것으로, 실제가스에 대하여 계산할 경우에는 식(1)에서 나타낸 바와 같이 방사원의 온도에 따른 가중치를 적용하여 보정한 방향성 전교환 면적(directed total radiative interchange area)으로 가스체의 복사 특성을 나타낸다. 방향성 전교환 면적은 다음과 같이 정의 하였다.

$$\overline{s_i s_j} = \sum_{n=0}^n \{a_{s,n}(T_{s,i})\} (\overline{s_i s_j})_n \quad (9)$$

$$\overline{g_i s_j} = \sum_{n=0}^n \{a_{g,n}(T_{g,i})\} (\overline{g_i s_j})_n \quad (10)$$

$$\overline{G_i G_j} = \sum_{n=0}^n \{a_{g,n}(T_{g,i})\} (\overline{G_i G_j})_n \quad (11)$$

2.2 열평형 방정식 및 계산방법

가스체와 면구분에서의 복사전열을 포함하여 대류, 연료의 발열, 가스 유동등에 의한 열량의 이동을 고려하였을 때, n 개의 면과 m 개의 가스체로 이루어진 전열계에 대한 열 평형 방정식은 다음과 같이 된다.

가스체 i 의 경우 :

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^n \overline{s_j G_i} \cdot \sigma \cdot T_{s,j}^4 + \sum_{j=n+1}^{n+m} \overline{G_j G_i} \cdot \sigma \cdot T_{g,j}^4 \\ & - h \cdot A_k \cdot (T_{g,i} - T_{s,k}) \\ & - 4K_i \cdot V_i \cdot \sigma \cdot T_{g,i}^4 + \dot{Q}_{r,i} \\ & - M_g \cdot C_{pg} \cdot (T_{g,i+1} - T_{g,i}) = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

면 i 의 경우 :

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^n \overline{s_j S_i} \cdot \sigma \cdot T_{s,j}^4 + \sum_{j=n+1}^{n+m} \overline{G_j G_i} \cdot \sigma \cdot T_{g,j}^4 \\ & + h \cdot A_i (T_{g,i} - T_{s,i}) \\ & - \epsilon_i \cdot A_i \cdot \sigma \cdot T_{s,i}^4 - \dot{q}_w = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

식 (12)의 $\dot{Q}_{r,i}$ 는 연료가스의 방열량을 나타내며, 식 (13)의 \dot{q}_w 는 벽면을 통한 방산열량을 나타낸다. 슬래브 면의 경우에는, \dot{q}_w 는 슬래브의 구간 i 와 $i+1$ 간의 합열량 차이를 나타내는 $HF [= V_{s,i} C_{ps} (T_{s,i+1} - T_{s,i})]$ 로 치환된다. 식 (12)와 식 (13)은 온도에 관한 5차 비선형 연립방정식의 형태를 갖게된다.

수치계산을 위하여, 대상가열로를 Fig. 2에 보인 바와 같이 상자 형태로 단순화하고, 길이 방향으로 1.5m 간격으로 23등분 하였다. 연료의 방열량은 버너가 부착된 가스체의 구간에서 70%, 인접구간에서 30% 분포되는 것으로 하였으며 화염에 의한 복사는 고려하지 않았다.

연소가스는 흡수 · 복사만을 행하며, 슬래브와 벽면에서의 대류 열전달 계수는 10 kcal/m²hr°C)인 것으로 가정하였다. 슬래브 하부표면을 통한 열 이

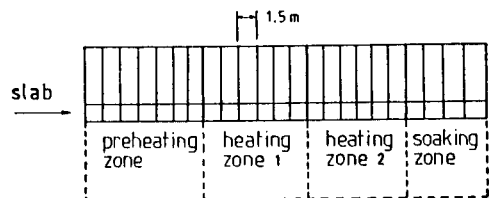


Fig. 2 Simplified zoning of the furnace

동량은 지지대의 영향을 고려하여 상부표면의 80%가 되는 것으로 간주 하였다. 노 벽면을 통한 방사열량과 가스체의 비열은 다음과 같이 온도의 1차 함수로 보았다⁽³⁾.

$$\dot{q}_w = 200 + 0.8 \cdot T_s \text{ (kcal/m}^2 \text{ hr)} \quad (14)$$

$$C_{pg} = 0.321 + 0.00004 \cdot T_g \text{ (kcal/Nm}^3 \cdot \text{K)} \quad (15)$$

노내의 분위기 가스, 벽면 및 슬래브의 평균온도 계산을 위하여 반복계산을 수행하였으며, 열 평형 방정식의 해는 Newton-Raphson법으로 구하였다⁽⁵⁾. 슬래브 내부의 온도 분포는 반복계산에 의해 구해진 평균 표면 열유속을 경계 조건으로 하여 슬래브의 두께방향으로 1차원적으로 해석하였다.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 가열로

대상 가열로의 형태는 Fig. 1에 나타낸 바와 같다. 본 가열로는 지지대 이동방식의 8대식 가열로로서 유효길이는 41.4m, 폭은 9m, 높이는 상하부 각각 2.5m이다. 슬래브는 예열대(preheating zone), 가열대(heating zone) 및 균열대(soaking zone)를 통과하면서 소정의 온도까지 가열되며, 연소가스는 슬래브의 이동방향과 반대방향으로 흐른다. 각 연소대에 부착되어 있는 버너의 수는 56개이며 제철 부생가스인 발열량 2800 kcal/Nm³의 혼합가스(mixed gas)를 연료가스로 사용하고 있다. 혼합가스는 CO, CO₂, N₂, H₂, CH₄, C₂H₄, 및 O₂로 구성되어 있으며 평균 부피비율은 각각 25.2%, 12.3%, 26.4%, 23.5%, 11.1%, 1.3% 및 0.2%이다.

3.2 실험방법

실험은 Table 1에 보인 조업 조건에서 행하였다. 노내 분위기 가스의 온도는, 각 연소대에 설치되어 있는 노온 제어용 열전대로부터 알 수 있다. 이 열전대는 노의 천정과 벽면으로부터 10~20cm 떨어진 지점의 분위기 가스 온도를 검출하도록 되어 있다.

슬래브의 내부온도 측정을 위해서는, 슬래브에 탑재되어 슬래브가 노 내부를 이동하는 동안의 온도이력을 기억소자에 저장할 수 있는 내열형 온도 측정 장치(heat resistive data logger system, KAWASO Co.)를 이용하였다. 본 측정 장치는 물 증발 냉각 방식에 의하여 기억소자 부위의 온도를

Table 1 Experimental conditions

Production rate	178 ton/hr
Fuel temp.	20°C
Fuel flow rate	108 Nm ³ /ton
Air temp.	340°C
Slab size	220×1900×4000mm
Slab density	7849 kg/m ³ (0.23% carbon steel)
Residence time	161 min
Slab charging temp.	20°C
Cooling water temp.	30°C (inlet) 40°C (outlet)

Table 2 Specification of the data logger

Maximum check point	12 points
Sampling time	10 sec ~ 540 sec
Memory capacity	546 data/channel
Thermocouple type	K type
Memory capsule	CMOS RAM
Measuring time	10 hour

105°C 이하로 유지하도록 되어 있다. 온도 측정 장치의 주요제원은 Table 2에 나타나 있다. Fig. 3은 실험에 사용된 온도 측정 장치의 내부구조와 온도 측정 방법을 도식적으로 나타낸 것이다⁽⁶⁾.

Fig. 4에는 슬래브 내부온도에 대한 측정점의 위치를 나타내었다. 슬래브의 폭은 노 길이에 비하여 짧으므로 폭방향 즉 노의 길이 방향으로의 온도구

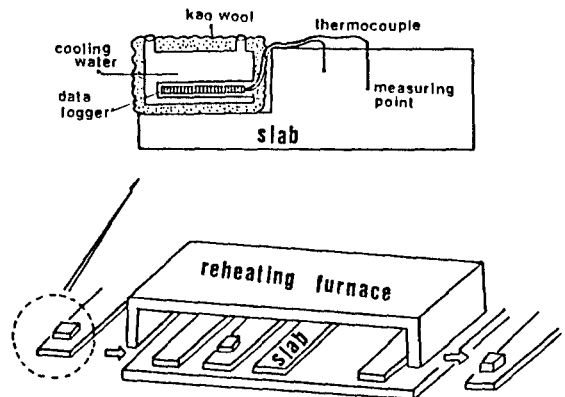


Fig. 3 Layout of slab temperature measuring equipment

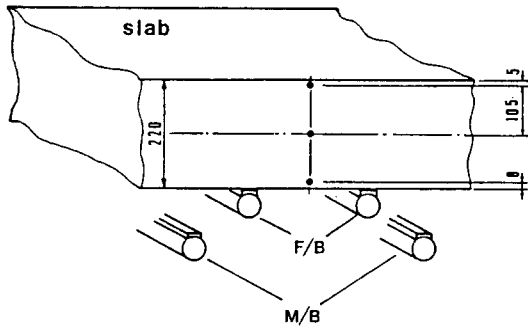


Fig. 4 Measurement of slab temperature

배는 없는 것으로 보고, 고정지지대 (fixed beam, F/B) 와 이동지지대 (moving beam, M/B) 의 영향이 같은 중간 부분에서 슬래브의 두께방향으로 3지점의 온도를 측정하였다. 각 측정점에서의 온도 측정주기는 1분으로 하였다.

실험은 다음과 같은 순서로 진행 하였다.

- (1) 슬래브에 온도측정 장치를 탑재하고 장입직전에 가동시킨다.
- (2) 장입시점을 기점으로 하여 슬래브의 노내 위치와 경과시간의 관계 및 노내 분위기 온도변화를 기록한다.

슬래브의 노내 위치와 경과시간의 관계는 장입주기와 슬래브간의 장입 거리로부터 계산하였다.

- (3) 슬래브가 추출된 후 온도측정 장치를 분리하고 온도이력을 검출한다.

4. 결과 및 고찰

4.1 타당성의 검토

Table 1의 조건에서 이루어진 분위기 가스의 온도 및 슬래브 내부의 온도 분포에 대한 계산결과를 실측치와 비교하였다. Fig. 5는 노내 분위기 가스의 온도분포를 비교한 것이다. 그림에서 실측치는 상하부 연소대에서 측정된 온도를 평균하여 나타낸 것이다. 실험시 상하부 연소대의 분위기 가스 온도 차이는 50°C 이내로 드는 것으로 나타났다. 계산결과는 각 연소대에서 버너측의 분위기 가스 온도가 반대측 보다 400°C 정도 높은 것으로 나타나고 있다.

계산에 의하여 구해진 각 연소대의 평균 온도와 측정치는 예열대에서 50°C, 가열대 1에서 60°C, 가열대 2에서 110°C, 균열대에서 80°C 정도의 편차를

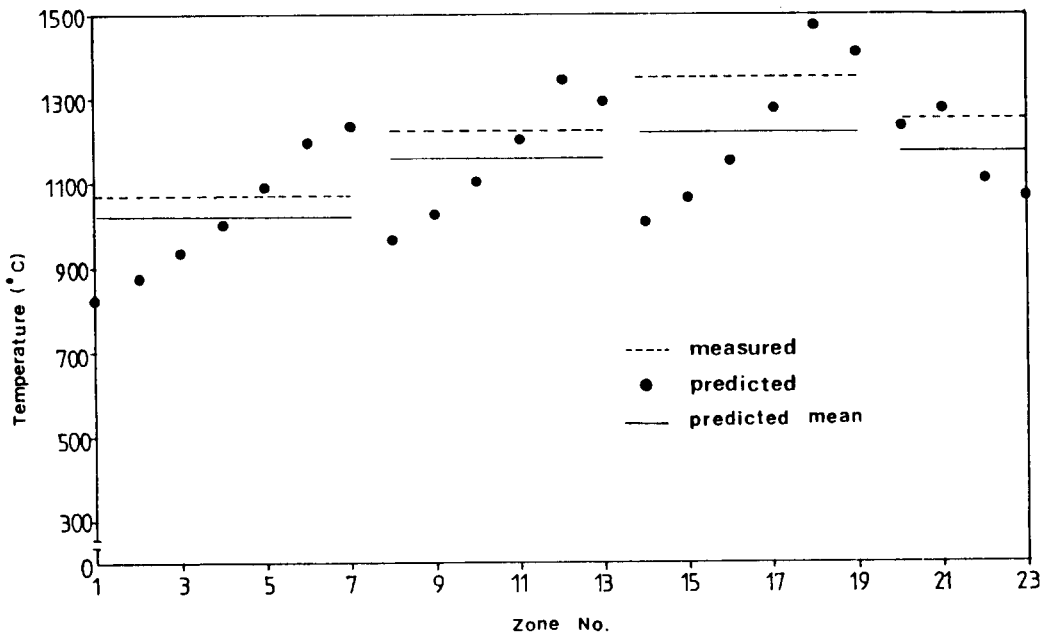


Fig. 5 Distribution of combustion gas temperature

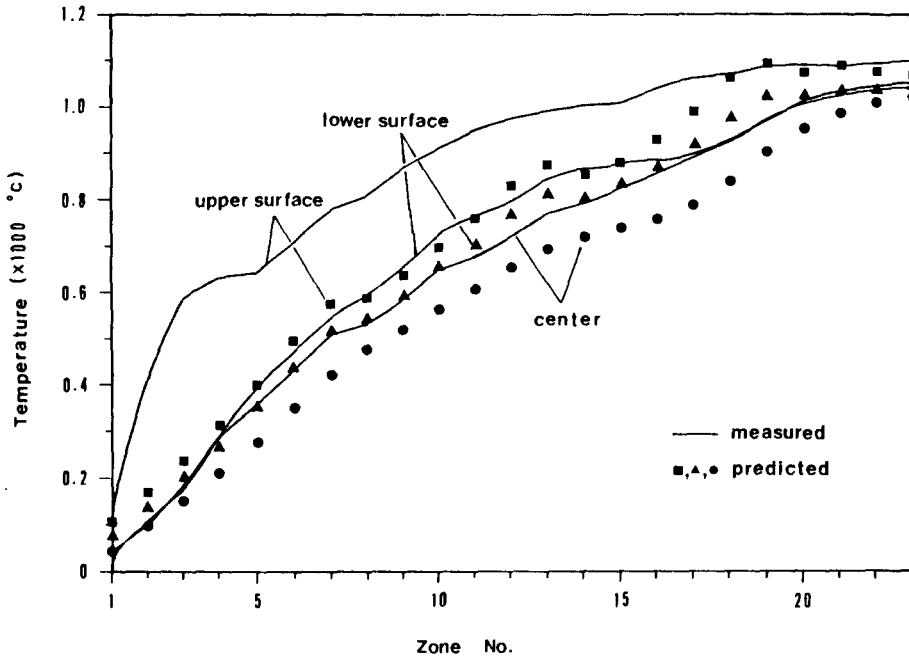


Fig. 6 Comparison of predicted and measured temperature of slab

보이며, 계산치가 측정치에 비해 5% 내지 10% 낮게 나타나고 있다. 이와 같은 실측치와 계산치의 오차는, 각 연소대의 특정지점에서 측정된 온도와 실제 평균온도와와의 차이 및 노 형태의 단순화로 인한 전열해석상의 오차 등에 의한 것으로 생각된다.

Fig. 6은 슬래브 온도분포를 비교한 것이다. 상부표면의 온도가 가장 높고 변동이 심한 반면, 하부표면의 온도는 상부표면과 중심부 온도의 사이에 들고 있음을 볼 수 있다. 중심부의 온도는 노 입구와 출구부근을 제외하고는 실측치와 계산치가 50°C 정도의 비슷한 편차를 보이고 있다. 슬래브 표면의 온도는 출구측으로 갈수록 실측치와 일치되고 있으나, 장입초기에는 200°C 이상의 다소 큰 편차를 보이고 있다. 장입구 부근에서는 장입구의 개폐로 인하여 분위기가스가 외부공기에 의하여 교란되고 슬래브의 온도도 비교적 빠른 속도로 상승된다. 이러한 분위기 조건의 변동이나 슬래브 온도의 급격한 변화는 계산 결과의 정확도를 저하시키며, 계산구간의 보다 세밀한 분할을 요구하게 된다.

본 계산모델의 실로 적용 가능성을 검토하기 위하여, 동일 가열로에 대하여 총괄 열 흡수율법으로 계산한 슬래브 온도분포와 실측치를 비교한 결과를

Fig. 7에 인용하였다⁶⁾. 그림에서 일점 쇄선은 측정된 연소대별 평균 총괄 열 흡수율로 계산한 결과를 나타낸 것이며, 점선은 그 값을 조정하여 대상 가열로의 고유한 총괄 열 흡수율로 선택된 값으로 계산한 결과이다. 그림에서 보듯이 실측된 총괄 열 흡수율로 계산한 슬래브의 온도분포는 노의 전 구간에 걸쳐 실측치와 큰 편차를 보이고 있어, 그 값을 대상 가열로의 특성치로 하기에는 부적합함을 알 수 있다. 조정된 총괄 열 흡수율로 계산한 온도 분포에 있어서도, 슬래브의 중심부에서는 실측치와의 편차가 본 모델에 의한 결과와 비슷한 것으로 나타나는 반면, 표면에서는 장입초기에 최고 400°C 정도의 온도편차를 보이고 있어 본 모델에 의한 결과보다 오차가 큰 것으로 나타나고 있다. 분위기 조건과 슬래브의 온도변화가 심한 장입초기에는 위치에 따른 총괄 열 흡수율의 변화가 커진다. 따라서 Fig. 7에서와 같이 연소대의 평균치를 적용할 경우에는 슬래브로의 전열량 변화를 엄밀하게 반영할 수 없어 실측치와 계산치의 오차가 크게 나타나게 된다. 총괄 열 흡수율법으로 슬래브 온도를 계산할 경우에는 가열로 조업상황의 변화를 고려하여 총괄 열 흡수율을 조정하는 것이 일반적이며, 이

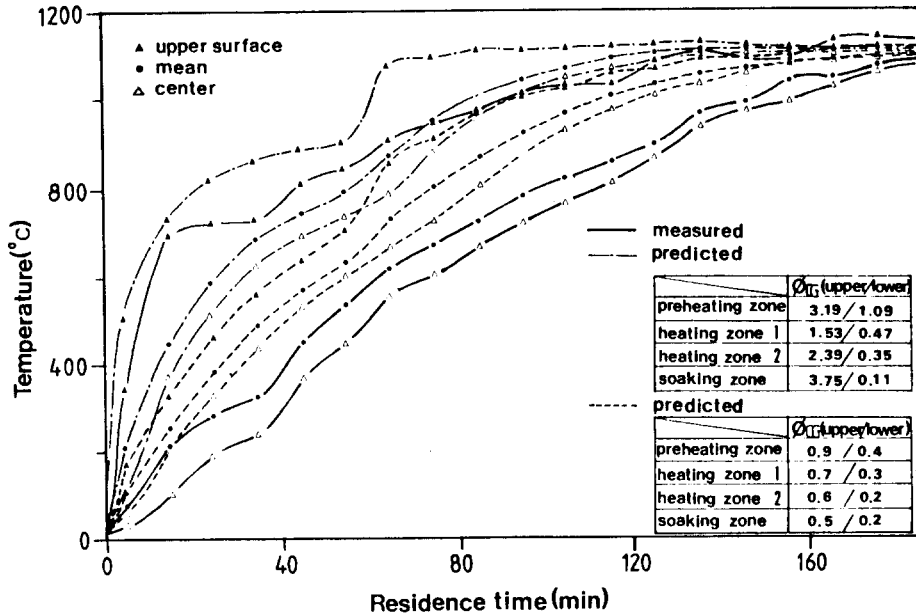


Fig. 7 Temperature distribution of slab by ϕ_{CG} method

경우에는 보다 큰 오차를 내포할 가능성이 많아진다⁽¹⁾.

이상의 고찰을 통하여, 본 계산모델에 의한 슬래브 온도 분포의 계산결과가 실측치와 10% 이내의 편차를 지니며 슬래브의 승온과정은 실측치와 같은 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 총괄 열 흡수율법에 의하여 구해진 슬래브 온도계산결과와 비슷한 편차를 보이고 있어 본 계산모델을 이용한 실로의 전열해석이 유용한 것으로 판단된다.

이하에는 Table 1에 나타낸 조업조건을 기준으로 하여 연료유량, 재로시간 및 슬래브 장입온도 등의 가열로 조업조건이 생산량과 가열품질에 미치는 영향을 검토하였다.

4.2 연료공급량의 영향

연료공급량이 108Nm³/ton, 118Nm³/ton 및 128 Nm³/ton인 3가지 경우에 대하여 분위기 가스온도 및 슬래브의 온도분포를 계산하였다. Fig. 8은 재로시간이 141분인 경우의 분위기 가스온도 변화를 보인 것이다. 분위기 가스의 온도는 연료 공급량이 10% 증가함에 따라 25°C 내지 30°C 정도로 노 전체에 걸쳐 균일하게 상승되는 것으로 나타났다. Fig.

9는 슬래브 온도 분포의 변화를 보인 것으로 이때의 재로시간은 161분으로 하였다. 연료 공급량이 108Nm³/ton에서 128Nm³/ton으로 19% 증가할 경우 슬래브의 평균 온도는 1069°C에서 1161°C로 9% 정도 증가되는 것으로 나타나고 있어 동일한 재로시간에서 연료 공급량을 증가시킬 경우 슬래브 보다는 분위기 가스 온도에 보다 직접적인 영향이 나타남을 알 수 있다.

4.3 재로시간의 영향

Fig. 10은 연료공급량이 108Nm³/ton인 경우에 재로시간에 따른 분위기 가스온도의 변화를 나타낸 것이다. 재로시간이 길어질수록 분위기 온도는 다소 상승되는 경향을 보이나 그 상승폭은 미세한 것으로 나타나고 있다. 이와반면 Fig. 11과 Fig. 12에서 볼 수 있는 바와같이 재로시간이 20분씩 길어질 경우 슬래브의 표면온도는 150°C 정도 상승되며 슬래브 내에서의 최대 온도편차는 25°C 정도 저하되는 것으로 나타나고 있어, 재로시간이 슬래브 추출시의 평균온도와 균일 가열에 미치는 영향이 큰 것을 알 수 있다.

슬래브의 가열상태는 슬래브내의 최대 온도편차

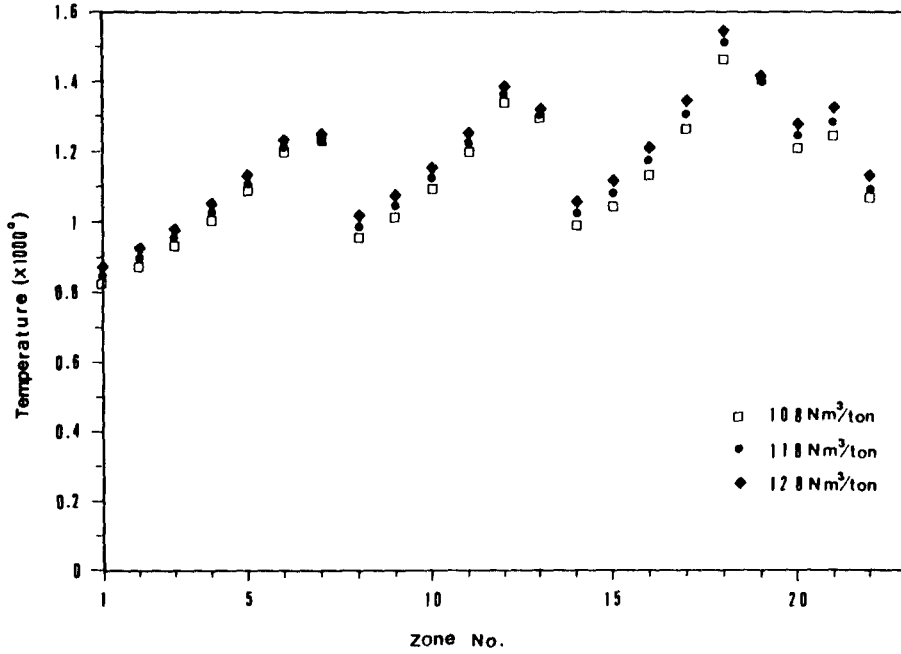


Fig. 8 Effect of fuel flow rate on combustion gas temperature

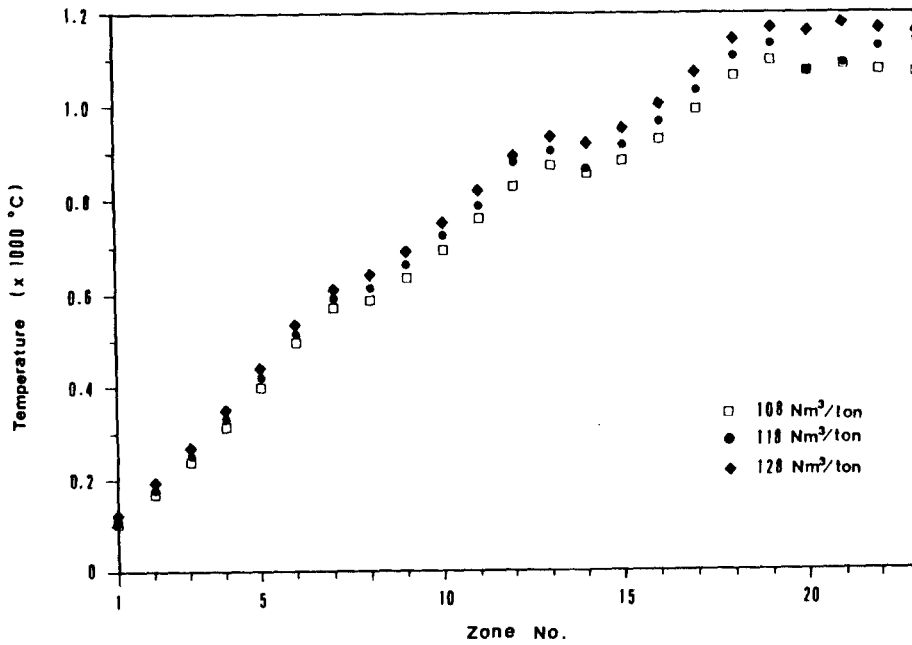


Fig. 9 Effect of fuel flow rate on slab surface temperature

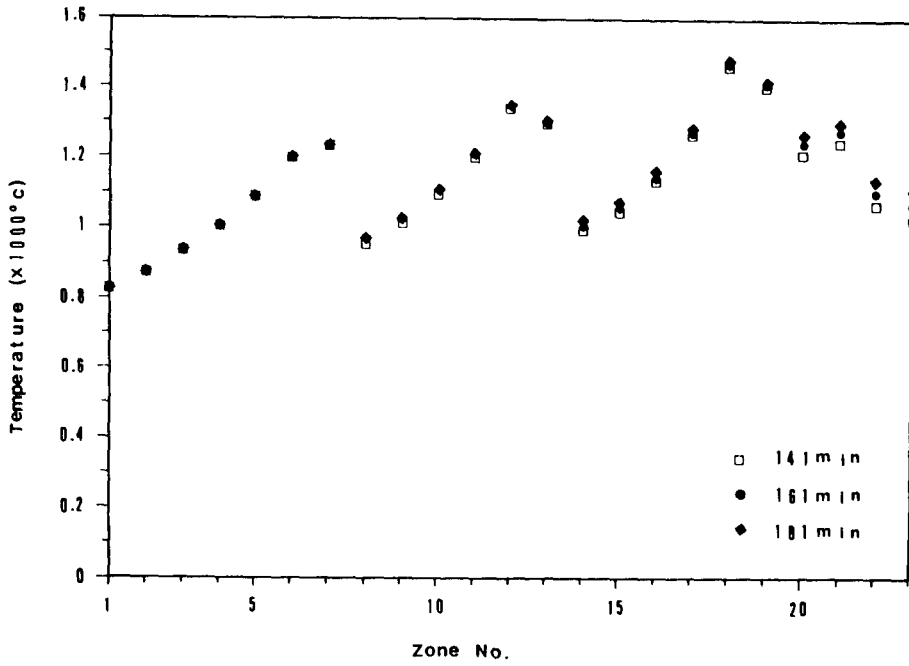


Fig. 10 Effect of residence time on combustion gas temperature

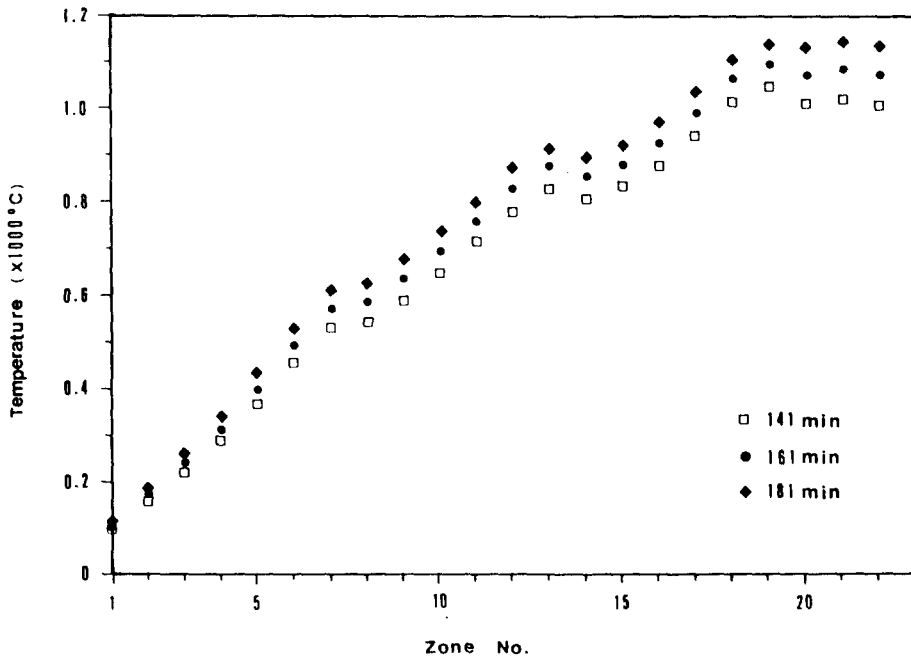


Fig. 11 Effect of residence time on slab surface temperature

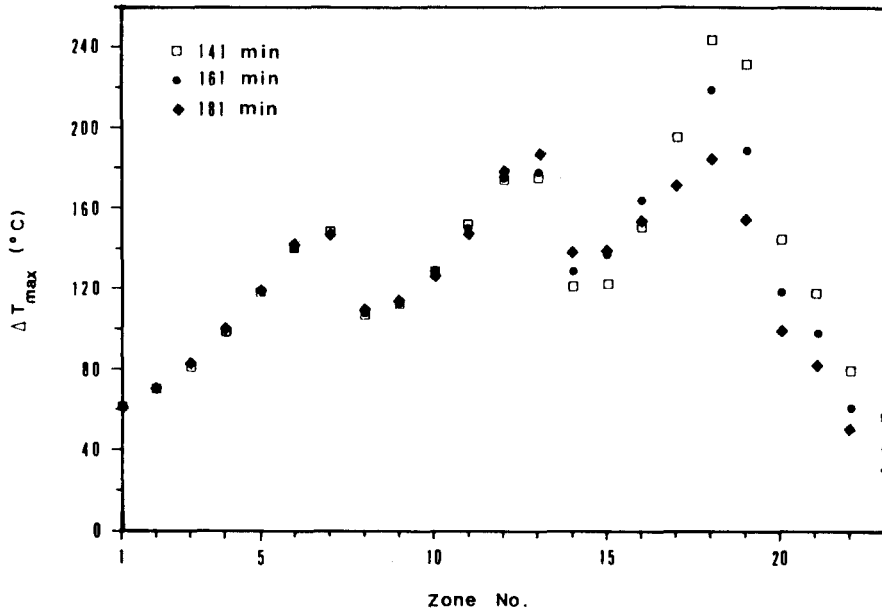


Fig. 12 Effect of residence time on maximum temperature deviation in slab

를 나타내는 균열도로 표시하며, 압연품질에 큰 영향을 미치기 때문에 중요한 관리항목으로 다루어진다. 균열도 향상을 위해서는 재로시간의 증가가 효과적인 것으로 나타나고 있으나 재로시간의 증가

는 생산량을 저하시키므로 생산량을 유지하면서 가열 품질을 만족 시킬수 있는 조업조건에 관한 검토가 필요하다.

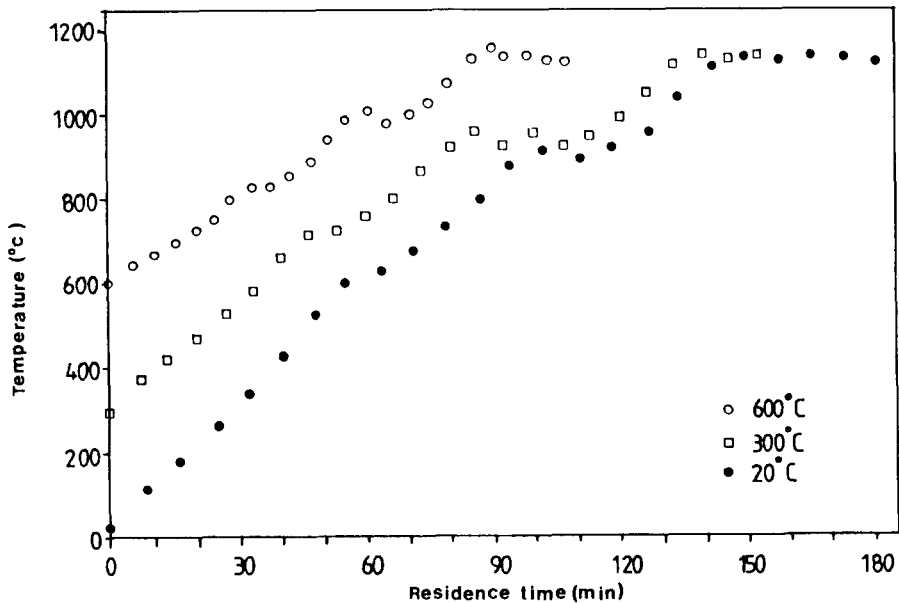


Fig. 13 Effect of charging temperature on residence time

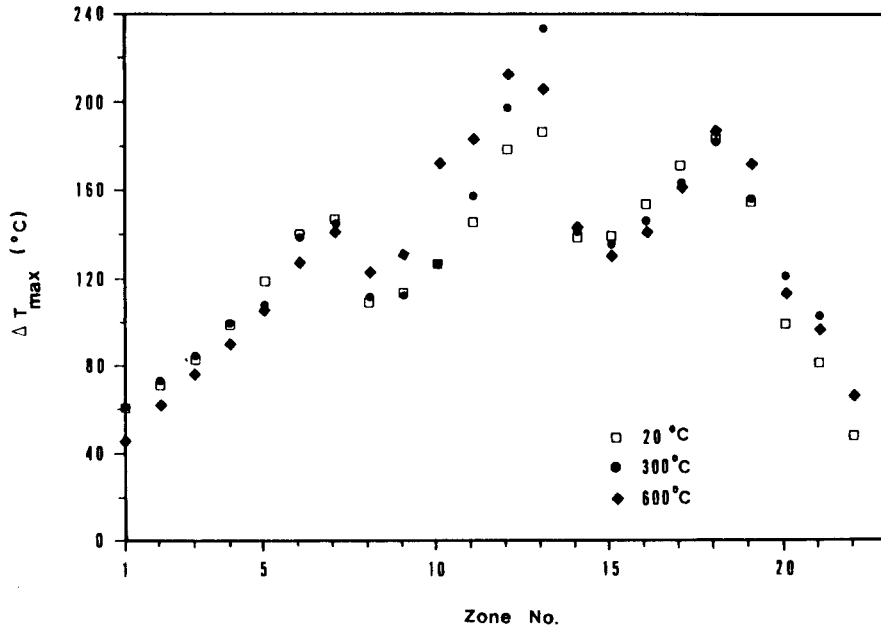


Fig. 14 Effect of charging temperature on maximum temperature deviation in slab

4.4 장입온도의 영향

Fig. 13은 슬래브의 가열목표가 1130°C일 경우에 재로시간에 따른 슬래브내의 온도변화를 장입온도 별로 나타낸 것이다. 슬래브의 장입온도가 상온에서 300°C 및 600°C로 상승되면 재로시간은 181분에서 153분 및 107분으로 큰 폭으로 단축되는 것으로 나타나고 있다. 가열목표 온도가 동일할 경우 재로시간의 단축은 곧 가열로의 생산량 증대를 의미한다. 장입온도가 300°C 및 600°C로 상승될 경우에 생산량은 상온 장입시에 비하여 각각 1.2배 및 1.7배 증대된다. Fig. 14에는 장입온도에 따른 슬래브 내부에서의 최대온도 편차를 나타내었다. 출구에서 슬래브의 균열상태는 장입온도가 높을수록 나빠지는 것으로 나타내는데 이는 가열시간의 단축에 의한 결과이다 그러나 장입온도가 600°C인 경우에도 가열로 조업에서의 일반적인 목표치인 50°C 이내에서 나타내고 있다. 연료공급량의 증대는 추출온도 상승으로 재로시간을 단축시키며, 재로시간의 연장은 균열도 향상에 기여하지만 가열 에너지를 증대되어야 하므로 소정의 균열도를 유지하면서 생산량을 증대하기 위해서는 장입온도의 상승이 가장 효과적임을 알 수 있다.

5. 결 론

철강공정의 슬래브 가열로에 대한 분위기 가스 및 슬래브내의 온도분포를 예측하기 위한 계산모델을 제시하였다. 분위기 가스의 온도와 슬래브 표면의 열유속 분포를 분할법으로 구하고, 이를 경제조건으로 하여 슬래브 내부의 온도분포를 계산하였다.

계산결과, 조업중인 슬래브 가열로에 대하여 행한 실험치와 비교하여 10% 이내의 오차 범위를 가지는 것으로 확인되었다. 동일 가열로에 대하여 행해진 총괄 열 흡수율법에 의한 슬래브 온도 예측 결과와 비교한 결과 실험치와 계산치의 편차는 같은 수준임을 알 수 있었으며, 조업조건 변화시 총괄 열 흡수율법이 지니고 있는 전열해석 결과의 불확실성을 줄일 수 있는 것으로 나타났다.

제시된 계산모델을 이용하여 가열로의 조업조건이 분위기 가스 온도와 슬래브의 노내 온도이력에 미치는 영향을 검토하였다. 연료공급량이 10% 증대될 경우 분위기 가스의 온도는 노 전반에 걸쳐 25°C 내지 30°C로 균일하게 상승되는 반면, 슬래브의 온도는 출구 부근에서 상승되는 것으로 나타났

다. 재로시간의 연장은 슬래브의 추출온도 상승과 함께 균열도 향상에 기여하는 것으로 나타났다. 슬래브의 장입온도를 상온에서 600℃로 할 경우 생산량은 1.7배 증대되고 슬래브내 최대 온도편차는 50℃이내에 드는 것으로 나타나, 장입온도 상승이 가열품질을 만족시키면서 가열로의 생산량을 증대시킬 수 있는 효과적인 방법임을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) 日本鐵鋼協會 熱經濟 記述部會, 1971, “連續鋼片加熱爐における傳熱實驗と計算方法”, 日本鐵鋼協會 熱經濟記述部會 加熱爐 小委員會 報告書, pp.10~66.
- (2) Hottel, H.C. and Sarofim, A.F., 1967, “Radiative transfer”, McGraw-Hill, New York.
- (3) 日本鐵鋼協會 熱經濟 記述部會, 1982, “加熱爐爐內傳熱解析法の基礎と應用”, 日本鐵鋼協會 加熱爐傳熱研究 小委員會 報告書, pp.22~31.
- (4) McAdams, W.H., 1954, “Heat Transmission”, McGraw-Hill, New York.
- (5) Stott, J.B. and Garrod, C. W., 1975, “Calculation of Radiative and Convection Heat Transfer in Combustion Chamber”, J. of Institute of Fuel, September.
- (6) 김기홍, 김경태, 1988, “A Mathematical Model on the Fuel Flow Rate for Optimal Combustion in the Reheating Furnace”, RIST Tech. Research Report, Vol. 2, No. 4, pp.93~103.