

총괄 열흡수율을 이용한 가열로내에서의 강재(slab)온도 예측

김기홍 · 김경태 · 이용국 · 최재우

산업과학기술연구소 에너지연구부
(1990년 2월 19일 접수, 1990년 7월 12일 채택)

Prediction of Slab Temperature by the Total Heat Exchange Factor(ϕ_{CG}) in the Reheating Furnace

Ki-Hong Kim, Kyong-Tae Kim, Yong-Kuk Lee and Jae-Ou Choi

Energy Research Dept., Research Institute of Industrial Science & Technology, P.O. Box 135, Pohang 790-330, Korea
(Received 19 February 1990; accepted 12 July 1990)

요 약

가열로내에서 강재(slab)의 온도를 예측하기 위한 새로운 총괄 열흡수율의 결정방법을 제시하였다. 본 방법은 실측온도와 예측온도의 차의 제곱을 목적함수로 정하고 이 목적함수가 최소로 되는 조건에서 강재 내부온도와 표면 열유속을 결정하는 것이다. 이 방법의 타당성을 검토하기 위해 유효 로장 36m의 walking beam type의 가열로에서 강재의 온도를 내열 data logger system을 이용하여 직접측정하였다. 실측치와 예측온도를 비교해 본 결과 이 방법이 가열로내 강재의 온도예측에 잘 적용됨을 보였다.

Abstract—A new method to determine total heat exchange factor was proposed for the prediction of slab temperature in reheating furnace. This method employed the square of the difference between measured and predicted temperature as an objective function. The slab temperature and surface heat flux were calculated under the condition minimizing the objective function.

The real slab temperature in a walking beam type reheating furnace with 36 m of its effective length was directly measured by using a heat resistive data logger system. The present method was validated by showing that the predicted slab temperature was in a good agreement with the measured one.

1. 서 론

철강 공정에서의 압연과정은 에너지 소비가 대단히 큰 공정이며, 그 중에서도 압연소재를 굽는 가열로(reheating furnace)는 압연 공정 소비 에너지의 반 이상을 차지하고 있어 에너지 수급 면에서 매우 중요하다. 또한, 가열공정은 소재의 단순가열 차원을 넘어 제품의 품질을 결정하게 된다. 특히, 최근의 다품종 소량 생산 및 품질의 고급화 추세에 따라 고도의 가열로 조업기술이 요구되고 있다[1-3]. 이러한 경향에 따라 가열로

조업을 효과적으로 하기 위한 일환으로 컴퓨터에 의한 가열로의 연소제어가 행해진다. 가열로의 연소제어에서는 강재의 추출 목표온도와 균열도를 적절하게 맞추는 것을 목표로 한다. 가열로 연소제어모델은 보통 다음과 같이 크게 네부분으로 구성된다[4,5].

- 1) 추출 schedule 계산
- 2) 강재 승온 계산
- 3) 승온 pattern 계산
- 4) 분위기 온도 설정 계산

이 중에서 강재 승온 계산은 가열로 연소제어 모델구

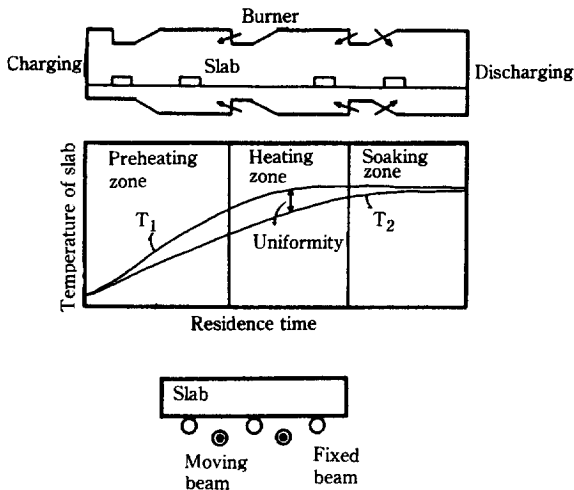


Fig. 1. Schematic diagrams of reheating furnace and heating process of slab.

(T_1 : avg. temp. of the mid position between two neighboring skid pipes, T_2 : avg. temp. of the position on skid pipe)

성시 근본이 되는 것으로 가열로의 조업조건에 따라 강재의 온도분포를 정확히 예측하는 것은 중요하다.

한편, 가열로내 강재의 온도분포를 예측하는데 사용되는 총괄 열흡수율의 계산방법은 표면온도 구배법, 평균합열량법, 컴퓨터에 의한 시행오차법 등이 주로 사용되어 왔다[6].

본 연구에서는 실제 가열로내에서 측정한 강재의 온도분포 이력을 이용하여 강재 표면에서의 열유속(heat flux)을 구하고 총괄 열흡수율을 계산하는 새로운 방법을 제시하였으며, 이에 의해 계산되는 강재의 온도분포와 실측온도를 비교하여 이 방법의 타당성을 검토하였다.

2. 이 론

2-1. 가열로의 개요

가열로는 보통 로의 장입측으로부터 3개의 제어대 즉, 예열대, 가열대, 균열대로 구성된다. 가열로의 개략적인 구성은 Fig. 1과 같은데, walking beam식 가열로의 경우 장입된 강재는 이동지대(moving beam)에 의해 전진하여 일정시간 동안 고정지대(fixed beam)에 있다가 다시 이동지대에 의해 전진하는 것을 반복하면서 가열되어 추출된다[7]. 이 때 각 beam의 skid pipe 내로 냉각수가 흐르기 때문에 이 pipe와 접하는 강재의 부분(skid 부)은 강재내 다른 지점과 비교할

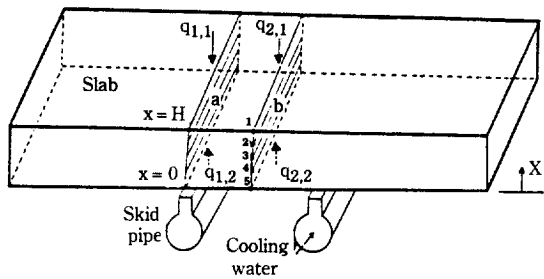


Fig. 2. Schematic representation of slab.

때 온도가 낮다. 한편, 강재의 균열도란 skid부와 skid간 중간부 강재단면의 평균온도차를 뜻하는데, 가열로 조업시에는 강재의 추출목표 온도와 균열도를 맞추기 위해 로내의 분위기 온도를 설정해 주어야 한다.

2-2. 강재의 내부온도 예측

강재의 온도분포 예측에 있어서 3차원 혹은 2차원의 열전도 방정식은 계산시간이 너무 길기 때문에 2분 주기로 행해지는 실제 가열로의 연소제어용 모델로는 사용이 거의 불가능하다. 그러나, 두께방향만을 고려한 1차원 열전도 방정식은 강재의 균열도는 알 수 없지만 계산시간이 빠르다는 장점이 있다.

따라서, 본 연구에서는 강재의 내부균열도도 알 수 있고 계산시간도 단축할 수 있도록 하기 위해 Fig. 2의 skid부(빗금친 단면 a)와 skid간 중간부(빗금친 단면 b)의 두께 방향만을 고려한 모델을 택하였다. 이 때 강재내 열전도 지배방정식과 초기 및 경계조건은 다음과 같다.

(지배 방정식)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\alpha(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] \quad (1)$$

$$\alpha(T) = \frac{\lambda(T)}{\rho C_p(T)} \quad (2)$$

(초기 조건)

$$T(x, 0) = T_0 \quad (3)$$

(경계 조건)

1) skid부 상부

$$\lambda(T) \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=H} = \phi_{CG1,1} \cdot \sigma \left\{ \left(\frac{T_{s,u} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{s,u} + 273}{100} \right)^4 \right\} = q_{1,1} \quad (4)$$

2) skid부 하부

$$\lambda(T) \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} = \phi_{CG1,1} \cdot \sigma \left\{ \left(\frac{T_{s,l}+273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{s,u}+273}{100} \right)^4 \right\} = q_{1,1} \quad (5)$$

3) skid간 중간부의 상부

$$\lambda(T) \frac{dT}{dx} \Big|_{x=n} = \phi_{CG2,1} \cdot \sigma \left\{ \left(\frac{T_{s,u}+273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{s,l}+273}{100} \right)^4 \right\} = q_{2,1} \quad (6)$$

4) skid간 중간부의 하부

$$\lambda(T) \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} = \phi_{CG2,2} \cdot \sigma \left\{ \left(\frac{T_{s,l}+273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{s,u}+273}{100} \right)^4 \right\} = q_{2,2} \quad (7)$$

여기서, 열유속(q)은 보통

$$q = F \cdot \epsilon (\epsilon_g, \epsilon_s, \epsilon_w) \cdot \sigma \left\{ \left(\frac{T_g+273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_s+273}{100} \right)^4 \right\} \quad (8)$$

로 주어지는데 로형상이 복잡하고 로내가스 조성 및 온도가 수시로 변하기 때문에 형상계수(F) 및 열흡수율(ε)을 정확히 안다는 것은 상당히 어려운 일이다.

따라서, 본 연구에서는 가열로내 상황변화 및 로형상에 따라 변하는 열유속을 결정하기 위해 강재가 로에 장입되는 시점에서부터 추출될 때까지의 내부온도를 실측하고, 이 측정된 강재 내부의 온도분포를 만족시키는 표면 열유속을 구하였다. 결정된 표면 열유속에 의하여 $F \cdot \epsilon$ 항으로 표현되는 로의 특성계수인 총괄 열흡수율(the total heat exchange factor, ϕ_{CG})을 결정했다[8-10].

3. 강재(slab)의 내부온도 실측

가열로내 강재의 온도분포 측정은 고온 분위기(1000-1350℃)에서 장시간 소재가 체류하여야 하기 때문에 열전대를 강재내부에 심고 T/C선을 길게 연결하여 가열로 밖에서 recoder에 의해 온도를 측정하는 방법은 T/C의 단선 등을 초래할 수 있고 실험상 매우 불편하다. 따라서 본 연구의 실험에서는 heat resistive data logger system(KAWASO, 일본)을 사용하여 강재 내부온도를 측정하였다. 내열 data logger의 설치개략도

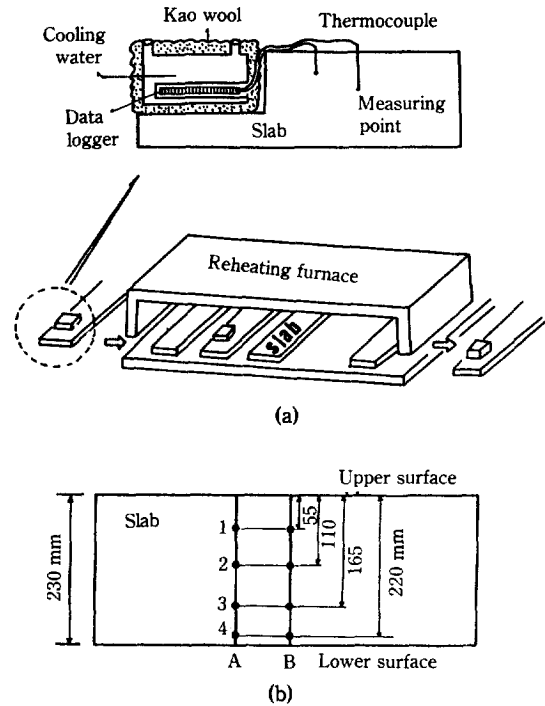


Fig. 3. (a) Installation of heat resistive data logger, (b) Measuring points of slab temperature. (A: a position on skid pipe, B: a mid-position between two neighboring skid pipes)

및 측정위치는 Fig. 3에 나타나 있다. 본 장치는 온도 기억기판의 온도가 105℃ 이상을 초과하지 않아야 하기 때문에 수증기 배출구가 있는 냉각수 통을 단열재로 싸다음 냉각수 통에 물을 25 L정도 채워넣는다. 다음에 통내부에 T/C와 연결된 온도 기억기판을 삽입시킨 후 강재위에 얹어서 가열로내에 장입시키는 물증발냉각방식의 온도 측정장치이다. 강재를 가열로에 장입하기 전에 data logger를 작동시키고 강재가 로를 빠져나오면 온도이력을 갖고 있는 기억기판을 분리시킨 후 독출 장치에 걸어 강재의 온도분포이력을 얻었다.

4. 강재의 표면 열유속 및 총괄 열흡수율 결정

4-1. 차분식 전개

열전도 방정식의 해를 구하기 위해 강재의 두께방향 4구간으로 나누어 절점(node)을 5점으로 하여 Crank-Nicolson법에 의하여 차분화하였다. 차분화된 식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{C_{p1} \cdot \rho \cdot D^2}{\lambda_1 \cdot \Delta t} + 1\right) & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2\left(\frac{C_{p2} \cdot \rho \cdot D^2}{\lambda_2 \cdot \Delta t} + 1\right) & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 2\left(\frac{C_{p3} \cdot \rho \cdot D^2}{\lambda_3 \cdot \Delta t} + 1\right) & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 2\left(\frac{C_{p4} \cdot \rho \cdot D^2}{\lambda_4 \cdot \Delta t} + 1\right) & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & \left(\frac{C_{p5} \cdot \rho \cdot D^2}{\lambda_5 \cdot \Delta t} + 1\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1^{n+1} \\ T_2^{n+1} \\ T_3^{n+1} \\ T_4^{n+1} \\ T_5^{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{C_{p1} \cdot \rho \cdot D^2}{\lambda_1 \cdot \Delta t} - 1\right) \cdot T_1^n + T_1^n + \frac{2 \cdot D \cdot q_u}{\lambda_1} \\ T_1^n + 2\left(\frac{C_{p2} \cdot \rho \cdot D^2}{\lambda_2 \cdot \Delta t} - 1\right) \cdot T_2^n + T_2^n \\ T_2^n + 2\left(\frac{C_{p3} \cdot \rho \cdot D^2}{\lambda_3 \cdot \Delta t} - 1\right) \cdot T_3^n + T_3^n \\ T_3^n + 2\left(\frac{C_{p4} \cdot \rho \cdot D^2}{\lambda_4 \cdot \Delta t} - 1\right) \cdot T_4^n + T_4^n \\ T_4^n + \left(\frac{C_{p5} \cdot \rho \cdot D^2}{\lambda_5 \cdot \Delta t} - 1\right) \cdot T_5^n + \frac{2 \cdot D \cdot q_l}{\lambda_5} \end{bmatrix} \quad (9)$$

4-2. 표면 열유속의 결정

강재온도의 실제 측정점과 차분모델의 계산시 사용 되는 위치가 보통은 일치하지 않기 때문에 모델점의 온도를 이용하여 측온점의 온도를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_n^m = \sum_{i=1}^{m_i} F_{n,i} \cdot T_i \quad (10)$$

이 때 각 시점에서 얻어지는 실제 측정값(T_n^m)과 추정 온도(T_n^m)와의 편차를 최소로 하는 목적함수(objective function)를 다음과 같이 정의하였다.

$$P = \sum_{n=1}^i (T_n^m - \bar{T}_n^m)^2 \quad (11)$$

목적함수 P를 최소로 하는 표면 열유속을 구하는 조

건은

$$\frac{\partial P}{\partial q_{k,j}} = 0 \quad (12)$$

이다.

즉, 조건식 (12)에 식 (9)와 (10)을 대입하여 정리하면,

$$\sum_{n=1}^i \left\{ \left(\sum_{i=1}^{m_i} F_{n,i} \cdot T_i - T_n^m \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^{m_i} F_{n,i} \frac{\partial T_i}{\partial q_{k,j}} \right) \right\} = 0 \quad (13)$$

와 같이 된다.

식 (13)과 식 (9)와를 조합하면 식 (14)와 같이 되며, 이 식을 풀면 강재내 온도분포 $T(i=1, 2, 3, 4, 5)$ 와 $q_{k,j}$ 이 동시에 구해진다. 이 때 $q_{k,j}$ 는 강재내부 온도분포 T_i 를 만족시키는 상하 표면 열유속이다.

$$\begin{bmatrix} \left(\frac{C_{p1} \cdot \rho \cdot D^2}{\lambda_1 \cdot \Delta t} + 1\right) & -1 & 0 & 0 & 0 & -\frac{2 \cdot D}{\lambda_1} & 0 \\ -1 & 2\left(\frac{C_{p2} \cdot \rho \cdot D^2}{\lambda_2 \cdot \Delta t} + 1\right) & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 2\left(\frac{C_{p3} \cdot \rho \cdot D^2}{\lambda_3 \cdot \Delta t} + 1\right) & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 2\left(\frac{C_{p4} \cdot \rho \cdot D^2}{\lambda_4 \cdot \Delta t} + 1\right) & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & \left(\frac{C_{p5} \cdot \rho \cdot D^2}{\lambda_5 \cdot \Delta t} + 1\right) & 0 & -\frac{2 \cdot D}{\lambda_5} \\ \sum_{n=1}^i F_{n,1} \left(\sum_{i=1}^{m_i} F_{n,i} \frac{\partial T_{i-1}}{\partial q_u} \right) & 0 & \sum_{n=1}^i F_{n,2} \left(\sum_{i=1}^{m_i} F_{n,i} \frac{\partial T_{i-1}}{\partial q_u} \right) & 0 & \sum_{n=1}^i F_{n,3} \left(\sum_{i=1}^{m_i} F_{n,i} \frac{\partial T_{i-1}}{\partial q_u} \right) & 0 & 0 \\ \sum_{n=1}^i F_{n,1} \left(\sum_{i=1}^{m_i} F_{n,i} \frac{\partial T_{i-1}}{\partial q_l} \right) & 0 & \sum_{n=1}^i F_{n,2} \left(\sum_{i=1}^{m_i} F_{n,i} \frac{\partial T_{i-1}}{\partial q_l} \right) & 0 & \sum_{n=1}^i F_{n,3} \left(\sum_{i=1}^{m_i} F_{n,i} \frac{\partial T_{i-1}}{\partial q_l} \right) & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1^{n+1} \\ T_2^{n+1} \\ T_3^{n+1} \\ T_4^{n+1} \\ q_{upper} \\ q_{lower} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{C_{p1} \cdot \rho \cdot D^2}{\lambda_1 \cdot \Delta t} - 1\right) \cdot T_1^n + T_1^n \\ T_1^n + 2\left(\frac{C_{p2} \cdot \rho \cdot D^2}{\lambda_2 \cdot \Delta t} - 1\right) \cdot T_2^n + T_2^n \\ T_2^n + 2\left(\frac{C_{p3} \cdot \rho \cdot D^2}{\lambda_3 \cdot \Delta t} - 1\right) \cdot T_3^n + T_3^n \\ T_3^n + 2\left(\frac{C_{p4} \cdot \rho \cdot D^2}{\lambda_4 \cdot \Delta t} - 1\right) \cdot T_4^n + T_4^n \\ T_4^n + \left(\frac{C_{p5} \cdot \rho \cdot D^2}{\lambda_5 \cdot \Delta t} - 1\right) \cdot T_5^n \\ \sum_{n=1}^i \bar{T}_n^m \left(\sum_{i=1}^{m_i} F_{n,i} \frac{\partial T_{i-1}}{\partial q_u} \right) \\ \sum_{n=1}^i \bar{T}_n^m \left(\sum_{i=1}^{m_i} F_{n,i} \frac{\partial T_{i-1}}{\partial q_l} \right) \end{bmatrix} \quad (14)$$

4-3. 보정인자($F_{n,i}$)와 감도($\partial T_i / \partial q_{k,i}$)의 계산

식 (9)의 보정인자($F_{n,i}$)는 다음과 같이 결정된다. 강재내부의 온도분포를 2차함수($y = ax^2 + bx + c$)라 보고 상부표면($x = H/2$), 중심($x = 0$), 하부표면($x = -H/2$)에서의 온도를 T_1 , T_3 , T_5 라 두면 온도분포함수는, 측정점의 위치를 x_1^m , x_2^m , x_3^m , x_4^m 라 할 때,

$$T(x_i^m) = \frac{x_i^m}{H} \left(\frac{2x_i^m}{H} + 1 \right) \cdot T_1 + \left(1 - \frac{4x_i^{m2}}{H^2} \right) \cdot T_3 + \frac{x_i^m}{H} \left(\frac{2x_i^m}{H} - 1 \right) \cdot T_5 = \sum_{k=1}^3 F_{i,2k-1} \cdot T_{2k-1} \quad (15)$$

가 된다. 식 (10)과 (15)를 비교하면 $F_{n,i}$ 는 다음과 같다.

$$(F_{i,1}, F_{i,2}, F_{i,3}, F_{i,4}, F_{i,5}) = \left(\frac{x_i^m}{H} \left(\frac{2x_i^m}{H} + 1 \right), 0, 1 - \frac{4x_i^{m2}}{H^2}, 0, \frac{x_i^m}{H} \left(\frac{2x_i^m}{H} - 1 \right) \right) \quad (16)$$

단 $i=1, 2, 3, 4$

한편, 식 (14)의 해를 구할 때 쓰이는 열유속 변화에 대한 강재내 결점에서의 온도변화인 감도는 식 (9)를 $q_{k,i}$ 으로 편미분하여 얻을 수 있다.

즉,

$$A \cdot \frac{\partial}{\partial q_{k,i}} (T) = D \quad (17)$$

이 되며 A는 식(9)의 좌측항 계수행렬과 동일하며,

$$T = (T_1, T_2, T_3, T_4, T_5)^T \quad (18)$$

$$D_1 = \left(\frac{2D}{\lambda_1}, 0, 0, 0, 0 \right)^T \quad (19)$$

$$D_2 = \left(0, 0, 0, 0, \frac{2D}{\lambda_2} \right)^T \quad (20)$$

가 된다.

위와 같이 구해진 보정인자($F_{n,i}$), 감도($\frac{\partial T_i}{\partial q_{k,i}}$) 및 실측온도(T_n^m)를 알면 식 (14)의 해를 구할 수 있으며 따라서 강재온도 실측 시점에서의 온도분포를 만족시킬 수 있는 열유속($q_{k,i}$)이 구해지는 것이다.

4-4. 총괄 열흡수율의 결정

각 측근 시점에서의 열유속($q_{k,i}$)에 의해 그 때의 총괄 열흡수율이 식 (21)에 의해 구해진다.

$$\phi_{cck,i} = q_{k,i} / \left(\left(\frac{T_{sk,i} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{gk,i} + 273}{100} \right)^4 \right) \quad (21)$$

이렇게 구해진 총괄 열흡수율은 강재 내부온도를 예측하기 위한 열전도 방정식의 해를 구할 때 경계조건에

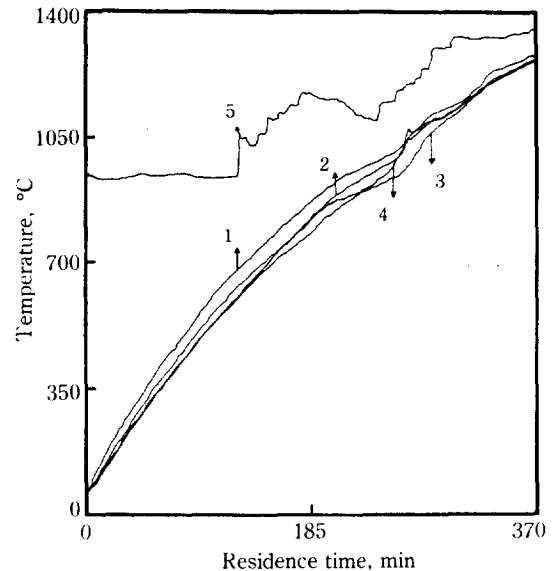


Fig. 4. Variations of measured temperatures with residence time for position A in Fig. 3(b). (5: ambient temp. of reheating furnace)

이용된다.

5. 적용성 검토

열유속 결정에 의한 본 강재온도 예측방법의 유용성을 검토하기 위해, 유효로 길이가 36 m이고 예열대(17.2 m), 가열대(10 m), 균열대(8.8 m)로 이루어진 walking beam식 가열로에서 강재내 온도를 직접 측정하였다.

강재온도의 측정은 Fig. 3에서와 같은 방법으로 실시하였는데, 이 때 측정 강재의 두께는 230 mm이고 측정위치는 Fig. 3의 b)와 같이 skid부분과 skid간 중간부에 두께 방향으로 각각 4점을 택하였다. Fig. 4와 5는 강재내 온도의 측정값을 나타낸 것으로 skid부의 경우 하부온도는 skid pipe에 지지되어 있기 때문에 중심부 온도보다 낮게 나타나며, skid간 중간부의 경우는 중심온도가 상하부 온도보다 낮게 나타난다. 그러나, 로의 약 2/3지점을 강재가 통과할 시점에서는 skid부와 skid간 중간부의 3, 4위치의 온도가 역전되는데, 이는 이 지점부터 강재의 균열도를 고려하여 skid부의 위치가 바뀌기 때문이다. 한편, 분위기 온도는 각 대 상부에 3군데씩 설치된 T/C로 측정된 온도를 이용하여 구한 것이다.

Fig. 6과 7은 skid부와 skid간 중간부에서의 강재의

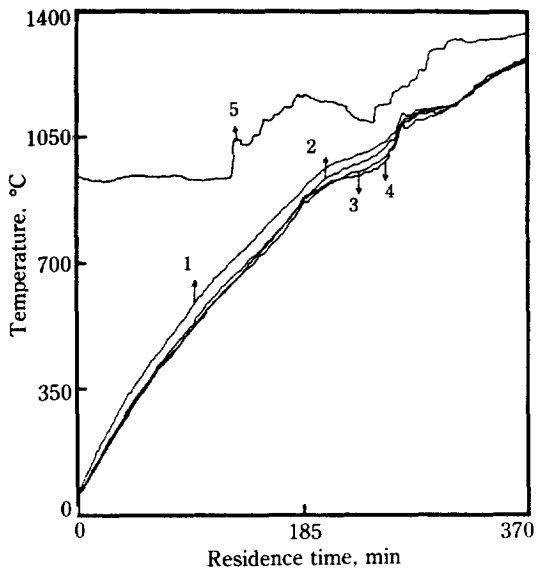


Fig. 5. Variations of measured temperatures with residence time for position B in Fig. 3(b). (5: ambient temp. of reheating furnace)

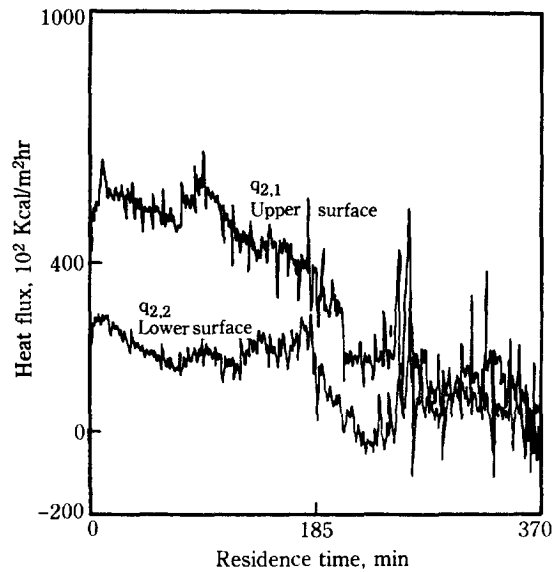


Fig. 7. Variations of heat flux with residence time.

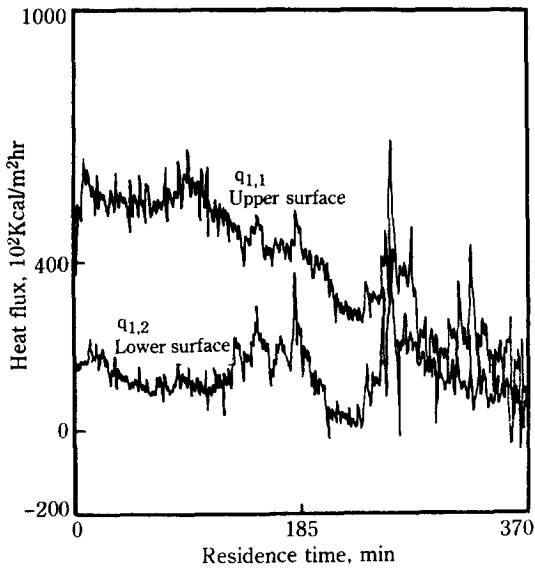


Fig. 6. Variations of heat flux with residence time.

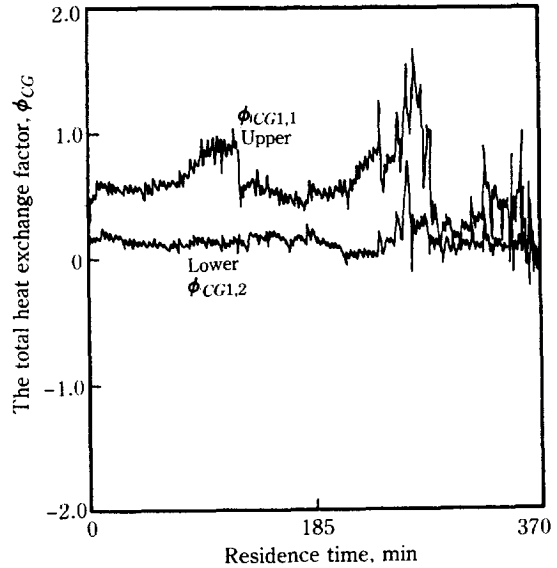


Fig. 8. Changes of ϕ_{CG} with residence time.

상하 표면 열유속을 나타낸 것이다. 강재가 로내에 장입된 후 초기에는 로내 분위기온도와 강재온도차가 크기 때문에 강재표면으로 유입되는 열유속도 큰 값을 보이나 강재가 승온되면서 로분위기와 온도차가 줄어들면서 작아진다.

Fig. 8과 9는 앞에서 구한 표면열유속을 이용하여 식

(21)에 의해 구해진 총괄 열흡수율을 나타낸다. 이 때 ϕ_{CG} 값은 보통 0-1범위에 있지만 표면 열유입이 많은 경우에는 1보다 클 수도 있고, 반대로 강재표면에서 분위기로 열을 빼앗길 경우에는 0이하가 될 수도 있다. ϕ_{CG} 값은 강재의 로내 위치에 따라 변하나 가열로 연소제어시에 사용되는 강재온도예측을 위한 ϕ_{CG} 값은

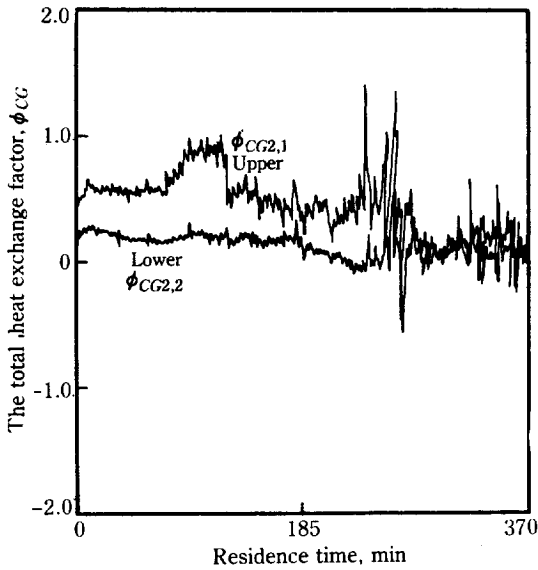


Fig. 9. Changes of ϕ_{CG} with residence time.

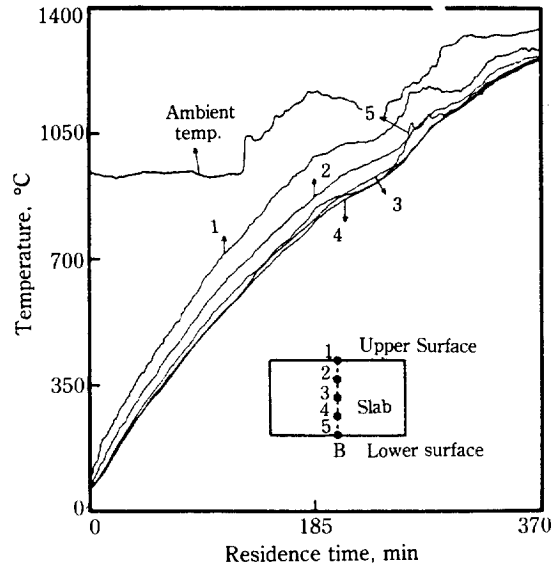


Fig. 11. Calculated slab temperatures of each point at position B in Fig. 3(b) with residence time.

[1: 0 mm (upper), 2: 57.5 mm, 3: 115 mm (center), 4: 172.5 mm, 5: 230 mm (lower)]

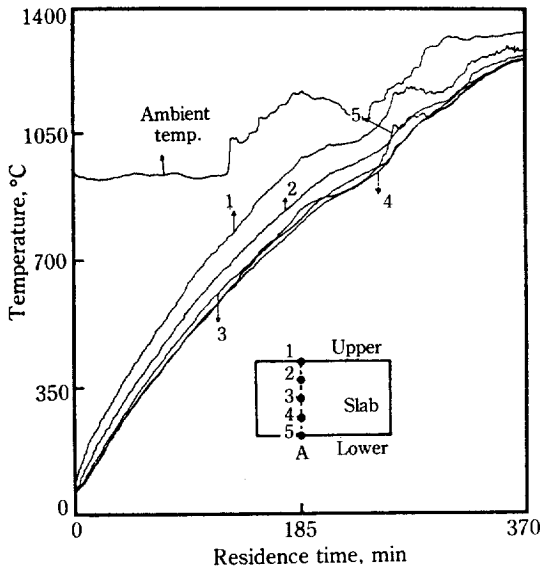


Fig. 10. Calculated slab temperatures of each point at position A in Fig. 3(b) with residence time.

[1: 0 mm (upper), 2: 57.5 mm, 3: 115 mm (center), 4: 172.5 mm, 5: 230 mm (lower)]

일반적으로 대별로 특정값을 주거나 임의의 제어구간을 정하여 특정값을 구하여 사용한다. 보통 중유가열로의 경우에 예열대는 0.6-0.85, 가열대는 0.6-0.8, 균열대는 0.3-0.6과 같이 주어진다[6].

Fig. 10과 11은 앞에서 구한 총괄 열흡수율을 이용

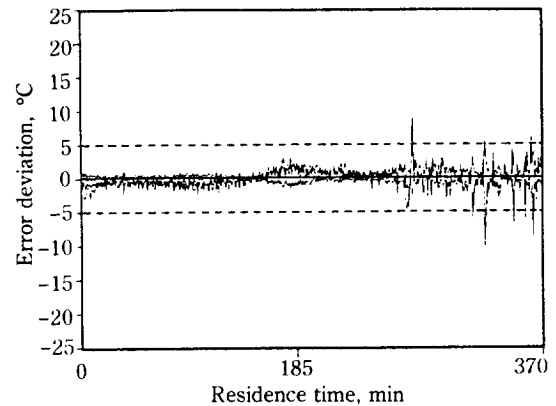


Fig. 12. Temperature deviations between predicted and measured values at position A.

하여 강재 내부의 온도를 예측한 결과이다. Fig. 12와 13은 Fig. 10과 11의 skid부와 skid간 중간부의 강재 온도를 이용하여 실측점의 위치와 같은 지점의 강재 온도를 구한 값과 각 점에서의 실측치와의 편차를 나타낸 것으로 전구간에서 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 정도로 매우 작음을 알 수 있다.

한편, Table 1은 계산시간 증분을 2초, 강재의 로내 체류시간을 370분으로 하여 본 연구의 1-D모델과 2-

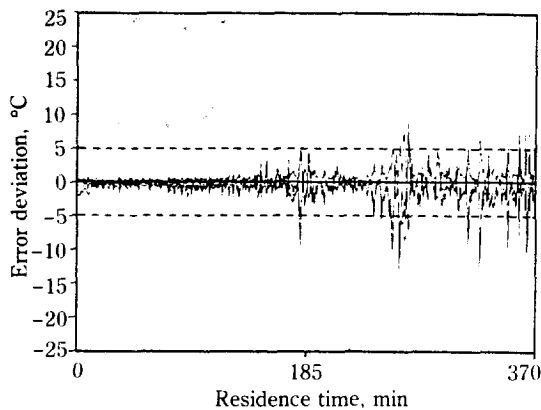


Fig. 13. Temperature deviations between predicted and measured values at position B.

D모델로 강재의 온도를 계산할 경우 계산시간 및 추출온도를 나타낸 것이다.

여기서 알 수 있듯이 계산시간은 1-D모델이 2-D모델보다 상당히 빠른 반면에 추출온도는 별로 차이가 없음을 보여준다. 따라서 본 연구의 강재온도 예측방법은 가열로 연소 제어시 계산시간의 제약 및 정확성을 만족시킬 수 있는 유용한 방법이 될 수 있다.

6. 결 론

가열로내 강재(slab)의 온도를 예측하기 위해서, 실제 강재의 가열로내 온도를 내열 data logger를 사용하여 측정하였으며, 측정된 강재의 온도 분포를 이용하는 새로운 총괄 열흡수를 계산방법을 제시하였다.

한편, 본 연구의 방법에 의해 계산되는 총괄 열흡수율을 이용하여 구한 강재온도와 실제 측정치를 비교해 본 결과 잘 일치하였다. 따라서 본 방법은 가열로 연소제어시 정확한 강재(slab)의 온도분포 예측에 이용될 수 있다.

감 사

본 연구는 POSCO의 연구비 지원에 의하여 이루어진 것으로 이에 감사합니다.

NOMENCLATURE

A : constant element of array
c : specific heat [cal/g°C]
D : constant element of array

Table 1. Comparison of 1-D and 2-D

	Computing time (sec)	Discharging temperature of slab (°C)
2-D (node: 5 × 5)	143	1209.4
1-D (node: 5)	42	1206.6

machine: PRIME 9955II

D : unit length of slab thickness direction [m]
F : view factor [-]
F : correction factor [-]
H : thickness of slab [m]
P : objective function
q : heat flux of slab surface [Kcal/m²·h]
T : temperature [°C]
T_o : charging temperature of slab [°C]
T : measured temperature of slab [°C]

Greek Letters

α : thermal diffusivity [m²/sec]
 ρ : density [kg/m³]
 ϵ : emissivity [-]
 δ : Stefan-Boltzmann constant
 ν : dimensionless time step [-]
 λ : thermal conductivity [cal/m·sec·°C]

Subscripts

g : ambient gas
l : total number of measuring point; lower
m : number of measuring data in residence time
s : slab
u : upper
w : wall

REFERENCES

1. Ishida, R., Matsuura, Y., Sawae, M. and Ohtomo, A.: R&D, 神戸製鋼技報, **33**(4), 81 (1983).
2. Veslocki, T.A., Smith, C.C. and Kelly, C.D.: *Iron & Steel Engineer*, December, 47 (1986).
3. Lee, G.S., Yoo, E.J. and Song, D.I.: *HWAHAK KONGHAK*, **23**, 137 (1985).
4. 若宮宣範, 鶴田 誠, 住野知子: 三菱電機技報, **59**(4), 294(1982).
5. Hollander, F. and Zuurbier, S.P.A.: *Iron & Steel Engineer*, January, 44 (1982).
6. 日本鐵鋼協會 熱經濟技術部會 加熱爐小委員會: 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, 1971.

 8. Watanabe, K.: 鐵と鋼, **10**, 23 (1976).
7. Hollander, F. and Zuurbier, S.P.A.: *Iron & Steel
 Engineer*, May, 60 (1979).

 9. 松永省吾: 燃料協會誌, **52**, (549), 36 (1973).
10. 松永省吾: 鐵と鋼, **59**, 120 (1973).