가열로 내 소재의 2 차원 총괄열흡수율 추정에 관한 역해석

곽동성* · 강덕홍** · 김기홍** · 김우승†

An Inverse Analysis on the Estimation of Two-dimensional Total Heat Exchange Factor on the Billet in the Reheating Furnace

Dong-Seong Kwag, Deok-Hong Kang, Ki-Hong Kim and Woo-Seung Kim

Key Words : Billet(소재), Total Heat Exchange Factor(총괄열흡수율), Conjugate Gradient Method(공액구배법)

Abstract

An inverse problem to determine two-dimensional total heat exchange factor is studied for the prediction of the billet temperature in the reheating furnace. Temperature measurements by the experiment are used in the inverse analysis. This inverse analysis employs the conjugate gradient method. The total heat exchange factors for 12-zones of the cross-section of the billet are estimated. The estimated temperatures at measurement locations are in good agreements with the measured temperatures.

1. 서 론

가열로(reheating furnace)는 압연공정의 전단계 과정으로서 에너지 소비가 매우 크므로 적절한 제어를 통한 에너지 절약이 매우 중요하다. 그리고 가열공정에서의 적절한 가열이 압연공정을 통한 최종 제품의 품질을 결정하게 되며, 특히 최근의 다품종 소량 생산 및 품질의 고급화 추세에 비추어 볼 때 효율적이고 정확한 가열로의 연소제어 기술의 확보가 시급하다.(1) 가열로의 연소제어에서는 소재의 추출목표 온도와 균열도를 확보하는 것을 그 목적으로 한다. 적절한 연소제어를 위해서는 소재의 온도 이력에 관한 데이터가 필수적인데 일단 소재가 장입되고 나면 소재의 온도 이력을 제대로 파악하는 것은 매우 어렵다. 그 이유는 가열로 내부에 매우 고온의 가스가 흐르고 있어 매우 복잡한 열전달 현상을 보이기 때문에 소재 온도에 대한 수치적인 계산이 어렵고, 소재 외부에 발생하게 되는 스케일층 때문에 직접적인 소재의 온도 측정 또한 거의 불가능하기 때문이다.

가열로의 연소제어에서 가장 근본이 되는 것은 가열로의 조업 조건에 따라 소재의 온도분포를 정확히 예측하는 것인데 이를 위한 총괄열흡수율의 계산방법은 주로 컴퓨터에 의한 시행오차법이 주로 사용되어 왔다. 이러한 방법들은 대부분이 일차원 모델로 소재의 상부 및 하부면으로의 열유속을 고려한 경우에 대한 연구였다. 본 연구에서는 실제 가열로에서 측정한 소재의 온도 이력을 이용하여 소재의 2 차원 총괄열흡수율을 역해석을 이용하여 추정하고자 한다.

* 회원, 한양대학교 대학원 기계공학과
** 회원, 포항산업과학연구원, 에너지 · 화성연구팀
† 회원, 한양대학교 대학원 기계공학과
E-mail : wskim@hanyang.ac.kr
TEL : (031)400-5248 FAX : (031)418-0153

2. 직접문제

2.1 가열로

가열로는 제철소 내 연주공정에 의해 만들어진 소재를 적절히 가열하고 연성을 부여하여 후속 공정인 압연공정의 압연기에 대한 부하의 변동폭을 줄여 조업의 안정화를 이루는데 그 목적이 있다. 가열로는 장입측으로부터 네 개의 제어대로 구성되어 있다. 즉, 예열대(preheating zone), 제 1 가열대 (1^{st} heating zone), 제 2 가열대(2^{nd} heating zone), 그리

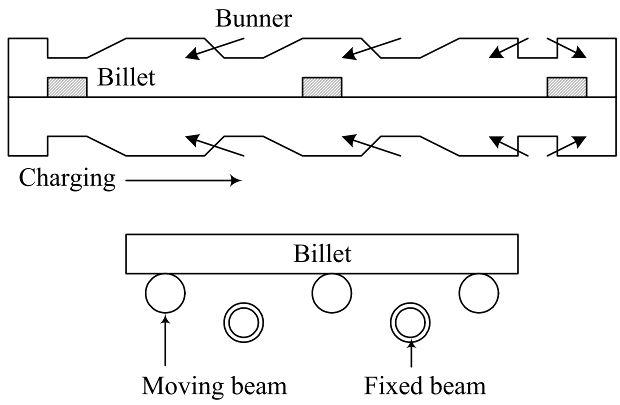

Fig. 1 Schematic diagram of reheating furnace

고 균열대(soaking zone)로 구성된다.

Fig.1 에 전체 가열 구간의 길이가 41m 인 가열로의 개략적인 구조를 나타내었다. Fig.1 의 상부 그림은 실 가열로의 형상을 나타낸 것이며, 하부 그림은 실 가열로에 소재가 장입 되었을 때 소재가 가열로내 이동 및 고정 빔에 얹혀져 있는 형상을 나타낸 그림이다. 가열로 내에서 소재는 이동지지대(moving beam)에 의해 전진하게 되며 일정 시간동안 고정지지대(fixed beam)에 의해 정지해 있다가 다시 이동지지대에 의해 전진하는 과정을 반복하게 된다.[2] 각 빔의 내부에는 스키드 파이프(skid pipe)가 있고 냉각수가 흐르게 되어 있어 빔에 접하는 부분(skid 부)의 소재 온도는 소재 내의 다른 지점에 비해 상대적으로 온도가 낮다.

2.2 2 차원 비정상 열전도 문제

본 연구에서는 2 차원 총괄열흡수율 추정을 위해 소재의 단면에 대한 2 차원 비정상 열전도 해석을 수행하여야 한다. 이를 위한 해석대상을 Fig.2 에 나타내었다. Fig.2 에 나타나 있는 소재의 단면에 대한 2 차원 비정상 열전도 방정식은 다음과 같다.

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

$$\text{in } t>0,\ 0<x<L,\ 0<y<H$$

Fig.2 에서 볼 수 있듯이 소재의 단면에 대하여 12 개의 구역으로 나누어 총 12 개의 총괄열흡수율을 추정하게 된다. 그러므로 각 구역에 대한 경계조건이 달라지게 되며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$-k\frac{\partial T}{\partial x}=q_{ls} \quad \text{at } x=0 \quad (2a)$$

$$k\frac{\partial T}{\partial x}=q_{rs} \quad \text{at } x=L \quad (2b)$$

$$-k\frac{\partial T}{\partial y}=q_{L.ls} \quad \text{at } y=0,\ 0<x<L_1 \quad (2c)$$

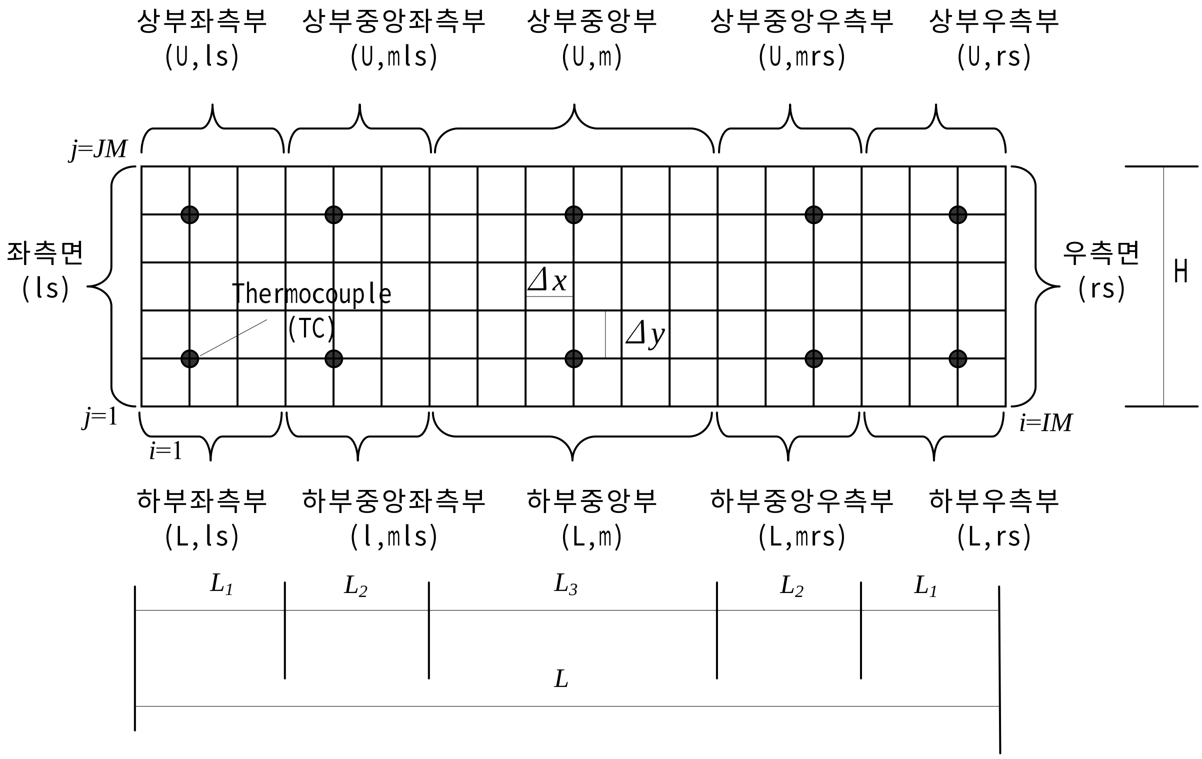

Fig. 2 The cross-section of the billet and the total heat exchange factor zones

$$-k\frac{\partial T}{\partial y}=q_{L.mls} \quad \text{at} \quad y=0,\, L_1<x<L_1+L_2 \tag{2d}$$

$$-k\frac{\partial T}{\partial y}=q_{L.m} \tag{2e}$$

$$\text{at} \quad y=0,\, L_1+L_2<x<L_1+L_2+L_3$$

$$-k\frac{\partial T}{\partial y}=q_{L.mrs} \tag{2f}$$

$$\text{at} \quad y=0,\, L_1+L_2+L_3<x<L_1+2L_2+L_3$$

$$-k\frac{\partial T}{\partial y}=q_{L.rs} \tag{2g}$$

$$\text{at} \quad y=0,\, L_1+2L_2+L_3<x<L$$

$$k\frac{\partial T}{\partial y}=q_{U.ls} \quad \text{at} \quad y=H,\, 0<x<L_1 \tag{2h}$$

$$k\frac{\partial T}{\partial y}=q_{U.mls} \quad \text{at} \quad y=H,\, L_1<x<L_1+L_2 \tag{2i}$$

$$k\frac{\partial T}{\partial y}=q_{U.m} \tag{2j}$$

$$\text{at} \quad y=H,\, L_1+L_2<x<L_1+L_2+L_3$$

$$k\frac{\partial T}{\partial y}=q_{U.mrs} \tag{2k}$$

$$\text{at} \quad y=H,\, L_1+L_2+L_3<x<L_1+2L_2+L_3$$

$$k\frac{\partial T}{\partial y}=q_{U.rs} \tag{2l}$$

$$\text{at} \quad y=H,\, L_1+2L_2+L_3<x<L$$

그리고 초기조건은 다음과 같다.

$$T=T_0 \quad \text{at} \quad t=0 \tag{3}$$

식(2)에서 각 구역에 적용되는 경계조건에 포함되는 열유속은 다음과 같다.

$$q_{ls}=\Phi_{CG,ls}\sigma\left(T_{FU}^4-T_{S,ls}^4\right) \tag{4a}$$

$$q_{rs}=\Phi_{CG,rs}\sigma\left(T_{FU}^4-T_{S,rs}^4\right) \tag{4b}$$

$$q_{L,ls}=\Phi_{CG,L,ls}\sigma\left(T_{FL}^4-T_{S,L,ls}^4\right) \tag{4c}$$

$$q_{L,mls}=\Phi_{CG,L,mls}\sigma\left(T_{FL}^4-T_{S,L,mls}^4\right) \tag{4d}$$

$$q_{L,m}=\Phi_{CG,L,m}\sigma\left(T_{FL}^4-T_{S,L,m}^4\right) \tag{4e}$$

$$q_{L,mrs}=\Phi_{CG,L,mrs}\sigma\left(T_{FL}^4-T_{S,L,mrs}^4\right) \tag{4f}$$

$$q_{L,rs}=\Phi_{CG,L,rs}\sigma\left(T_{FL}^4-T_{S,L,rs}^4\right) \tag{4g}$$

$$q_{U,ls}=\Phi_{CG,U,ls}\sigma\left(T_{FU}^4-T_{S,U,ls}^4\right) \tag{4h}$$

$$q_{U,mls}=\Phi_{CG,U,mls}\sigma\left(T_{FU}^4-T_{S,U,mls}^4\right) \tag{4i}$$

$$q_{U,m}=\Phi_{CG,U,m}\sigma\left(T_{FU}^4-T_{S,U,m}^4\right) \tag{4j}$$

$$q_{U,mrs}=\Phi_{CG,U,mrs}\sigma\left(T_{FU}^4-T_{S,U,mrs}^4\right) \tag{4k}$$

$$q_{U,rs}=\Phi_{CG,U,rs}\sigma\left(T_{FU}^4-T_{S,U,rs}^4\right) \tag{4l}$$

식(4)에서 $\Phi_{CG,U}$, $\Phi_{CG,L}$ 은 각각 소재 상하부의 총괄열흡수율을 나타내고, q_U, q_L 은 각각 소재 상하부에서의 열유속을 나타내고 있다. 그리고 σ 는 Stefan-Boltzmann 상수이고, T_{FU}, T_{FL} 은 각각 소재 상하부의 노온을 나타내며, T_S 는 소재 표면의 온도이다. 하첨자가 나타내는 의미는 다음과 같다.

U : 상부, L : 하부, m : 중앙부, rs : 우측부
ls : 좌측부, mrs : 중앙우측부, mls : 중앙좌측부

그러므로 총괄열흡수율은 가열로 내의 소재에 대해 가해지는 열유속에서 복잡한 열전달 현상을 포함시킨 계수의 의미를 가지게 된다.

3. 역해석 문제

본 연구에서는 2 차원 총괄열흡수율을 구하기 위하여 Fig.2 의 열전대의 위치에서 온도를 측정하였으며, 측정된 온도를 이용하여 역해석을 수행하게 된다. 역해석 문제는 다음의 목적함수(functionnal)를 최소화시키는 과정을 통하여 구현될 수 있다.

$$S[\mathbf{P}_N]=\int_{t=0}^{t_f}\sum_{m=1}^{M}[T(x_m,y_m,t;\mathbf{P}_N)-\mu_m(t)]^2dt \tag{5}$$

$$N=1,\cdots,12$$

식(5)에서 t_f 는 최종시간, M 은 열전대의 개수, $\mu_m(t)$ 는 열전대 위치 x_m, y_m 에서의 측정된 온도, $\mathbf{P}_N$ 은 소재 단면에서의 12 개 총괄열흡수계수 행렬, 그리고 $T(x_m,t;\mathbf{P}_N)$ 은 열전대 위치 x_m, y_m 에서의 $\mathbf{P}_N$ 을 적용하여 계산된 온도를 나타낸다. 계산된 온도 $T(x_m,y_m,t;\mathbf{P}_N)$ 는 추정된 총괄열흡수계수 $\mathbf{P}_N$ 을 이용하여 직접문제를 풀어 얻을 수 있다.

식(5)로 주어지는 목적함수의 구배(gradient)는 총괄열흡수계수 행렬 $\mathbf{P}_N$ 의 각 성분에 대하여 구해지게 되며 본 연구에서는 12 개의 총괄열흡수율을 동시에 추정하고 있다. $\mathbf{P}_N$ 에 대한 목적함수의 구배는 다음과 같다.

$$\nabla S_N[\mathbf{P}_N] = -2\int_{t=0}^{t_f}\sum_{m=1}^{M}[\mu_m(t) - T(x_m, y_m, t; \mathbf{P}_N)]\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \mathbf{P}_N}dt \quad (6)$$

여기서 $\mathbf{T}$ 는 측정점에서의 온도행렬이다. 식(6)을 각 성분에 따라 표현하면 다음과 같다.

$$[\nabla S_N[\mathbf{P}_N]]_j = -2\int_{t=0}^{t_f}\sum_{m=1}^{M}[\mu_m(t) - T(x_m, y_m, t; \mathbf{P}_N)]\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial P_{N,j}}dt \quad (7)$$
$$N = 1,\cdots,12\,,\quad j = 1,\cdots,K$$

여기서 K 는 가열로의 열유속 구분구간의 개수이다.

식(7)에서 $\partial\mathbf{T}/\partial\mathbf{P}_N$ 은 민감도계수 행렬(sensitivity coefficient matrix)이며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \mathbf{P}_l} = \begin{bmatrix} \frac{\partial T_1}{\partial P_{l,1}} & \frac{\partial T_1}{\partial P_{l,2}} & \cdots & \frac{\partial T_1}{\partial P_{l,K}} \\ \frac{\partial T_2}{\partial P_{l,1}} & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial T_M}{\partial P_{l,1}} & \cdots & \cdots & \frac{\partial T_M}{\partial P_{l,K}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

민감도계수 행렬의 각 성분은 다음과 같은 계산을 통하여 얻어질 수 있다.

$$\frac{\partial T_i}{\partial P_{l,j}} \cong \{T_i(P_{l,1}, P_{l,2}, \cdots, P_{l,j} + \varepsilon P_{l,j}, \cdots, P_{l,K}) - T_i(P_{l,1}, P_{l,2}, \cdots, P_{l,K})\}/2\varepsilon P_{l,j} \quad (9)$$

식(9)에서 ε 은 0.001 로 설정하였다. 즉 식(9)가 의미하는 것은 총괄열흡수계수 $P_{l,j}$ 가 변화하였을 때 측정온도에 미치는 변화율을 나타내고 있다.

본 연구에서는 2 차원 총괄열흡수계수 추정을 위한 역해석 방법으로 공액구배법을 사용하였다. 공액구배법을 통한 총괄열흡수계수를 구하는 과정은 다음과 같다.

$$\mathbf{P}_N^{k+1} = \mathbf{P}_N^k - \beta_N^k \mathbf{d}_N^k\,,\quad N = 1,\cdots,12 \quad (10)$$

식(10)에서 β^k 는 단계크기(step size)이고, $\mathbf{d}^k$ 는 감소방향(direction of descent)으로 다음과 같이 계산되어진다.

$$\mathbf{d}_N^k = \nabla S_N(\mathbf{P}_N^k) + \gamma_N^k \mathbf{d}_N^{k-1} \quad N = 1,\cdots,12 \quad (11)$$

식(11)에서 γ^k 는 공액계수(conjugate coefficient)로 다음과 같다.

$$\gamma_N^k = \frac{\sum_{j=1}^{N}\left[\nabla S_N(\mathbf{P}_N^k)\right]_j^2}{\sum_{j=1}^{N}\left[\nabla S_N(\mathbf{P}_N^{k-1})\right]_j^2} \quad (12)$$

그리고 단계크기는 다음의 과정을 통하여 얻을 수 있다. $k+1$ 번째 반복과정에서 목적함수는 다음과 같다.

$$S[\mathbf{P}_N^{k+1}] = \int_{t=0}^{t_f}\sum_{m=1}^{M}[T(x_m, y_m, t; \mathbf{P}_N^{k+1}) - \mu_m(t)]^2 dt$$
$$N = 1,\cdots,12 \quad (13)$$

식(13)을 Taylor 급수 전개하여 정리하면 다음과 같다.

$$S[\mathbf{P}_N^{k+1}] = \int_{t=0}^{t_f}\sum_{m=1}^{M}[T(x_m, y_m, t; \mathbf{P}_N^k) - \beta_1^k \mathbf{C}_1^k - \beta_2^k \mathbf{C}_2^k - \cdots - \beta_{11}^k \mathbf{C}_{11}^k - \beta_{12}^k \mathbf{C}_{12}^k - \mu_m(t)]^2 dt \quad (14)$$

여기서,

$$\mathbf{C}_N^k = \mathbf{d}_N^k \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \mathbf{P}_N^k} \quad (15)$$

식(14)를 최소화하기 위하여 β_N^k ($N = 1,\cdots,12$) 에 대하여 각각 미분한다. 먼저 β_1^k 에 대해 미분해 보면 다음과 같다.

$$\min_{\beta_1^k} S[\mathbf{P}_N^{k+1}] = \int_{t=0}^{t_f}\sum_{m=1}^{M} -2\mathbf{C}_1^k[T(x_m, y_m, t; \mathbf{P}_N^k) - \beta_1^k \mathbf{C}_1^k - \beta_2^k \mathbf{C}_2^k - \cdots - \beta_{11}^k \mathbf{C}_{11}^k - \beta_{12}^k \mathbf{C}_{12}^k - \mu_m(t)]dt = 0 \quad (16)$$

위와 같은 방법으로 β_N^k 에 대한 연립방정식을 얻을 수 있다. 이를 행렬로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} A_{1,1} & \cdots & A_{1,12} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{2,1} & \cdots & A_{12,12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_1^k \\ \vdots \\ \beta_{12}^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ \vdots \\ B_{12} \end{bmatrix} \tag{17}$$

여기서,

$$A_{i,j} = \sum_{m=1}^{M} \int_{t=0}^{t_f} \left[\mathbf{d}_i^k \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \mathbf{P}_i^k} \mathbf{d}_j^k \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \mathbf{P}_j^k} \right] dt \tag{18a}$$

$$B_i = \sum_{m=1}^{M} \int_{t=0}^{t_f} [T(x_m, y_m, t; \mathbf{P}_N^k) - \mu_m(t)] \mathbf{d}_i^k \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \mathbf{P}_i^k} dt \tag{18b}$$

그러므로 식(17)의 연립방정식을 풀면 단계크기 β_N^k 에 대한 값을 얻을 수 있다. 연립방정식은 LU 분해법을 이용하여 해를 구할 수 있다.

4. 결과 및 고찰

4.1 실험온도 데이터

실험에 의한 온도 데이터는 실제 가열로 내에 열전대를 부착한 소재를 장입하여 시간에 따라 온도를 기록하였다. 가열로내 소재의 온도분포 측정은 고온 분위기(1000~1350°C)에서 장시간 소재가 체류하여야 하기 때문에 열전대를 소재내부에 심고 열전대 선을 길게 연결하여 가열로 밖에서 리코터에 의해 온도를 측정하는 방법은 열전대의 단선 등을 초래할 수 있고 실험상 매우 불편하다. 그러므로 본 연구의 실험에서는 열저항 데이터 계측시스템(heat resistive data logger system)을 사용하여 소재 내부온도를 측정하였다. 소재(인장강도 40 kg/㎟급 일반강, 230 ㎜×1270 ㎜×8540 ㎜, 19,510Kg)를 가열로에 장입하기 전에 계측시스템을 작동시키고 소재가 추출되면 온도이력을 갖고 있는 기억기판을 분리시킨 후 독출장치에 걸어 소재의 온도이력을 얻었다.

본 연구에서는 가열로의 총괄열흡수율 구간을 11 개로 나누어서 각 구간마다 12 개의 총괄열흡수을 추정하였다. 11 개의 구간은 장입부로부터의 거리(mm)로 표현하면 다음과 같이 구분되었다.

0 / 7400 / 14000 / 16000 / 21000 / 24000 / 28000 / 30700 / 32000 / 34200 / 36200 / 41000

Table 1 Estimated total heat exchange factors at skid part

구역	중앙부		측면	
존구분	상부	하부	선단	미단
1	0.3279	1.1326	1.8642	1.2778
2	1.3280	1.0313	1.4965	1.0825
3	0.6145	0.4938	0.7126	0.6145
4	0.4634	0.5302	0.4504	0.4059
5	1.0513	1.5562	0.3115	0.5845
6	0.2000	1.9409	0.5467	0.7160
7	0.2000	0.2000	0.6809	0.9796
8	0.2000	0.4801	0.8440	0.0875
9	0.3533	0.5585	0.6502	0.2095
10	0.3121	0.5467	0.6531	0.1791
11	0.4894	0.5205	0.4765	0.5977

Table 2 Estimated total heat exchange factors at skid-gan part

구역	중앙부		측면	
존구분	상부	하부	선단	미단
1	0.5254	1.0594	1.7503	0.9936
2	1.4883	2.0000	0.2986	0.2456
3	0.4787	0.6468	0.7839	0.4379
4	0.4667	0.4568	0.9164	0.1404
5	1.2878	1.8930	1.1247	0.5979
6	0.4158	0.2000	0.4060	1.3876
7	0.2000	0.2000	0.3803	1.8769
8	0.3757	0.2000	0.8168	1.9433
9	0.4618	0.3956	0.0873	1.9140
10	0.4293	0.3424	0.7948	2.0000
11	0.4873	0.4797	0.4323	1.4757

4.2 총괄열흡수율 추정 결과

총괄열흡수율의 추정을 위한 역해석에는 Fig.2 와 같이 총괄열흡수율 구분 구간을 따라 모두 12 개의 측온점이 사용되었으며 옆면의 총괄열흡수율 추정을 위해 선단부와 미단부에서는 3 개의 측정온도가 사용되었다. 그 외의 부위에서는 2 개의 측정온도가 사용되었다. Fig.2 에서 볼 때 선단부는 좌측부에 해당되고, 미단부는 우측부에 해당된다. 역해석은 skid 부와 skid-gan 부에 대해 수행되었으며 각각에 대해 추정된 총괄열흡수계수는 Table 1, 2 와 같다. 편의상 중앙부와 측면부의 총괄열흡수율 만을 나타내었다.

Table 1, 2 에 나타낸 2 차원 총괄열흡수율을 사용하여 얻어진 소재의 온도는 Fig.3, 4, 5 에 나타내었다. Fig.3 에는 skid 부에서 선단부에서의 온도결과

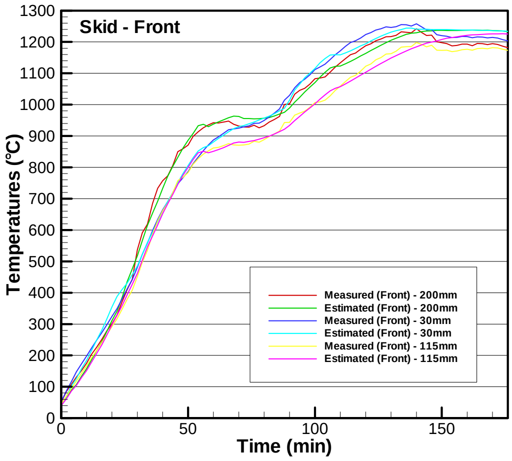

Fig.3 Measured and estimated temperatures at front skid part

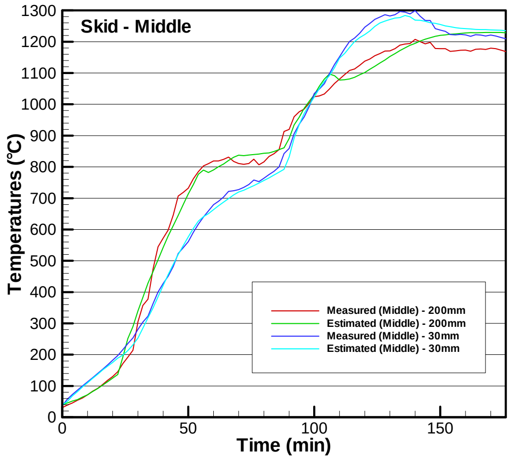

Fig.4 Measured and estimated temperatures at middle skid part

를 나타내었다. 각 그래프는 상부면으로부터의 열전대의 깊이에 따른 측정된 온도 및 추정된 온도를 나타내고 있다. 추정된 총괄열흡수율을 적용하여 계산된 온도와 측정한 온도가 잘 일치하는 것을 그림에서 볼 수 있다. 특히 선단부 및 미단부에서는 측면에서의 전열현상으로 인해 상 · 하부만을 고려하는 1 차원 총괄열흡수율로는 두께방향으로 중심부인 115mm 지점에서의 온도를 잘 예측할 수 없었으나 본 연구의 2 차원 총괄열흡수율을 적용하였을 때에는 잘 예측되는 것을 볼 수 있다. Fig.4 에는 skid 부에서 중앙부에서의 온도 결과를 나타내었다. 대부분의 구간에서 측정된 온도와 추정된 온도가 잘 일치하고 있으나 추출 직전인 150 분 근방에서 200mm 깊이의 열전대 위치에서 오차를 보이고 있다. 본 연구에서는 총괄열흡수율의 하한값을 0.2 로 제한하였고, 총괄열흡수율 추정에 사용된 노온이 측정된 온도보다 높으므로 이론적으로 소재의 온도가 낮아질 수 없기때문이다.

Fig.5 에는 skid-gan 부에서 중앙선단부와 중앙미단부에서의 온도결과를 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 추정된 총괄열흡수율을 사용하였을 때 측정온도와 추정온도가 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 역해석을 이용하여 가열로 내의 소재에 대한 2 차원 총괄열흡수율을 추정할 수 있는 방법을 제시하였다. 본 연구에서 추정된 2 차원 총괄열흡수율의 값을 사용하여 소재의 온도 이력을 예측해 본 결과 실험에 의한 온도 이력과 잘 일치하는 것을 볼 수 있었다. 그러므로 본 연구의

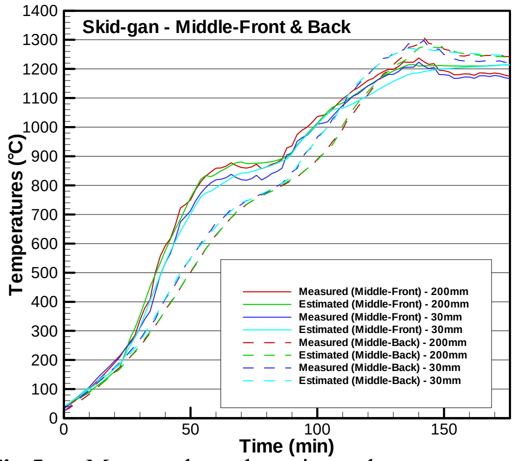

Fig.5 Measured and estimated temperatures at middle-front and middle-back skid-gan part

결과가 가열로의 연소제어에 적절히 사용되어 질 수 있을 것으로 생각된다.

본 연구에서는 12 개의 총괄열흡수율을 추정하여 소재의 온도 예측에 사용하였으나 향후 보다 효율적인 총괄열흡수율의 구분 구간 및 개수에 대한 연구가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

(1) Veslocki, T. A., Smith, C. C. and Kelly, C. D., 1986, "Automatic Slab Heating Control at INLAND' S 80-IN. HOT STRIP MILL," *Iron & Steel Engineer*, Vol. 63, No. 12, pp. 47~54.

(2) Hollander, F. and Zuurbier, S. P. A., 1985, "Accurate Temperature Control of the Reheating Process at Mixed Cold and Hot Charging," *Proceedings of the International Conference on Process Control and Energy Savings in Reheating Furnaces*, Vol. 36, No. 6, pp. 1~6.