

< 논문 >

가열로 내 소재의 2차원 총괄열흡수율 추정에 관한 역해석

강덕홍[†] · 광동성* · 김우승*

(2005년 7월 25일 접수, 2005년 10월 12일 심사완료)

An Inverse Analysis on the Estimation of Two-dimensional Overall Heat Absorptance on the Slab in the Reheating Furnace

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

Key Words : Slab(소재), Overall Heat Absorptance(총괄열흡수율), Conjugate Gradient Method(공액구배법), Reheating Furnace(가열로)

Abstract

An inverse problem to determine two-dimensional total heat exchange factor is studied for the prediction of the slab 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 overall heat absorptances for 12-zones of the cross-section of the slab are estimated. The estimated temperatures at measurement locations are in good agreements with the measured temperatures.

기호설명			
C_p	: 비열 (J/kgK)	β	: 단계크기
d	: 감소방향	ε	: 수렴조건
H	: 소재 두께 (mm)	γ	: 공액계수
k	: 열전도도 (W/mK)	ρ	: 밀도 (kg/m ³)
L	: 소재 폭 (m)	σ	: 스테판-볼츠만 상수
M	: 측정점의 수	μ_m	: 측정온도 (°C)
P_N	: 총괄열흡수율계수 행렬	Φ_{CG}	: 총괄열흡수율
T	: 소재온도 (°C)	첨자	
T_F	: 로온 (°C)	b	: 소재하부면
T_o	: 초기 소재온도 (°C)	c	: 소재폭방향 중앙부
T_S	: 소재표면온도 (°C)	f	: 소재 선단부
t	: 시간 (s)	m	: 소재 폭방향 중간부
t_f	: 최종시간 (s)	N	: 소재의 총괄열흡수율 구분 단면수
x, y	: 직교좌표계	r	: 소재 미단부
x_m, y_m	: 측정점의 위치	t	: 소재상면

그리스문자

1. 서론

가열로(reheating furnace)는 연주공정에서 나온 소재(slab)를 압연하기에 적합한 목표온도로 재가열해주는 열설비로, 소재를 고온으로 가열하는데 많은 에너지를 사용하기 때문에 적절한 제어를

[†] 책임저자, 회원, RIST 에너지연구소

E-mail : kangdh@rist.re.kr

TEL : (054)279-6548 FAX : (054)279-6688

* 회원, 한양대학교 기계공학과

통한 사용 에너지 절감이 매우 중요하다. 반면, 가열공정에서 소재에 대한 적절한 가열은 압연공정을 통한 최종 제품의 품질을 결정하게 되며, 특히 최근의 다품종 소량 생산 및 품질의 고급화 추세에 따라 추출시 소재의 목표 가열온도 및 균열도의 허용 관리범위가 점점 엄격해지고 있는 실정이다. 이 같은 상황에 비추어 볼 때 효율적이고 정확한 가열로의 연소제어 기술의 확보가 시급한 실정이다.

가열로의 연소제어는 소재의 추출 목표온도와 균열도를 확보하기 위하여 실시간 가열로내 소재온도를 계산하고, 각 제어대별 적절한 분위기 온도 설정을 통한 연소기의 연소용량을 제어하는 것이다. 이러한 연소제어의 기본은 가열로의 조업조건에 따른 소재의 온도분포를 실시간으로 정확히 예측하는 것이다. 하지만 가열로내에서 소재의 가열이력을 제대로 파악하는 것은 매우 어렵다. 그 이유는 가열로 내부의 삼차원의 복잡한 형상, 화염 및 고온의 연소 배가스 유동에 의해 매우 복잡한 열전달 현상을 보이기 때문에 소재 온도에 대한 수치적인 계산이 어렵고, 가열과정 중에 소재 표면에 생성된 산화 스케일층의 영향을 고려해야 하기 때문이다. 이 때문에, 연소제어용 소재온도 예측에 대한 수치적 전열모델링을 실시하여 적용하여 오고 있다.

그 중 일반적으로 가장 많이 사용되고 있는 온라인(on-line) 수치적 모델링 기법은 실제 가열로내 소재 상하면으로 유입되는 복잡한 전열현상을 간략화한 총괄열흡수율(overall heat absorptance)의 계수를 이용하여 표현하는 총괄열흡수율법이다.⁽¹⁻⁶⁾ 이 모델링 기법은 소재의 상부 및 하부면으로의 열유속을 고려한 두께방향의 온도분포를 예측하는 일차원 모델이다. 최근 계산기의 용량증대와 더불어 후공정인 폭방향 압연제어를 위하여 소재 두께 방향만이 아니라 폭방향의 균열도 정보가 요구되고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 소재 두께 및 폭방향의 이차원 총괄열흡수율 계수를 역해석(inverse analysis)을 이용하여 추정하고, 총괄열흡수율법을 이용한 두께 및 폭방향의 이차원 소재온도 예측모델이 실제 가열로의 연소제어용 온-라인모델로 사용할 수 있는지에 대한 타당성을 파악하고자 한다.

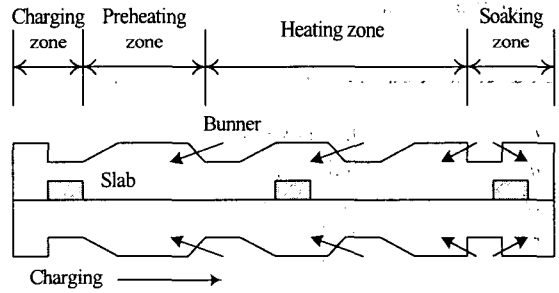
2. 직접문제

2.1 가열로

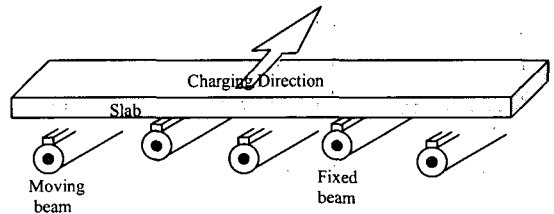
가열로는 제철소 내 연주공정에 의해 만들어진

소재를 적절히 가열하고 연성을 부여하여 후속 공정인 압연공정의 압연기에 대한 부하의 변동폭을 줄여 조업의 안정화를 이루는데 그 목적이 있다. 가열로는 장입측으로부터 네 개의 제어대로 구성 되어 있다. 즉, 예열대(preheating zone), 제 1가열대(1st heating zone), 제 2가열대(2nd heating zone), 그리고 균열대(soaking zone)로 구성된다.

Fig. 1에 전체 가열 구간의 길이가 41m 인 가열로의 개략적인 구조를 나타내었다. Fig. 1의 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 이동 지지대(moving beam)에 의해 전진하게 되며 일정 시간동안 고정지지대(fixed beam)에 의해 정지해 있다가 다시 이동지지대에 의해 전진하는 과정을 반복하게 된다.⁽⁷⁾ 각 빔의 내부에는 스킨드 파이프(skid pipe)가 있고 냉각수가 흐르게 되어 있어 빔에 접하는 부분(skid 부)의 소재 온도는 소재 내의 빔과 빔사이의 부분(non-skid 부)에 비해 상대적으로 온도가 낮다.



(a) Schematic diagram for the reheating furnace



(b) Cross-sectional view of a slab and support beams

Fig. 1 Schematic diagram for the reheating furnace and the configurations of a slab and support beams

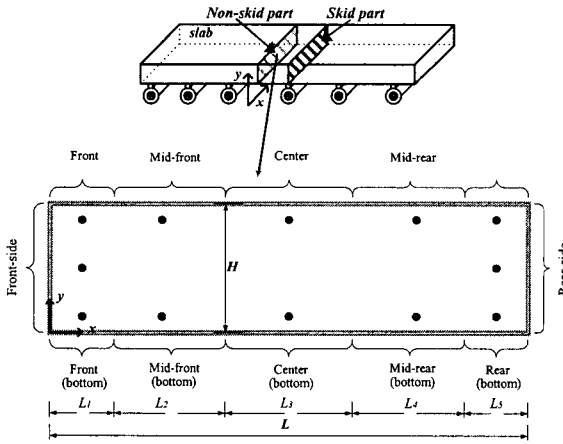


Fig. 2 The cross-section of a slab and the overall heat absorptance sections (* : thermocouple)

2.2 2차원 비정상 열전도 문제

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

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

in $t > 0, 0 < x < L, 0 < y < H$ (1)

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

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = \Phi_{CG,fs} \sigma (T_{F,f}^4 - T_{S,fs}^4) \text{ at } x = 0 \quad (2a)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial x} = \Phi_{CG,rs} \sigma (T_{F,r}^4 - T_{S,rs}^4) \text{ at } x = L \quad (2b)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} = \Phi_{CG,fb} \sigma (T_{F,b}^4 - T_{S,fb}^4) \text{ at } y = 0, 0 < x < L_1 \quad (2c)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} = \Phi_{CG,mfb} \sigma (T_{F,b}^4 - T_{S,mfb}^4) \text{ at } y = 0, L_1 < x < L_1 + L_2 \quad (2d)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} = \Phi_{CG,cb} \sigma (T_{F,b}^4 - T_{S,cb}^4)$$

at $y = 0, L_1 + L_2 < x < L_1 + L_2 + L_3$ (2e)

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} = \Phi_{CG,mrb} \sigma (T_{F,b}^4 - T_{S,mrb}^4)$$

at $y = 0, L_1 + L_2 + L_3 < x < L_1 + 2L_2 + L_3$ (2f)

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} = \Phi_{CG,rb} \sigma (T_{F,b}^4 - T_{S,rb}^4)$$

at $y = 0, L_1 + 2L_2 + L_3 < x < L$ (2g)

$$k \frac{\partial T}{\partial y} = \Phi_{CG,ft} \sigma (T_{F,t}^4 - T_{S,ft}^4) \text{ at } y = H, 0 < x < L_1 \quad (2h)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial y} = \Phi_{CG,mft} \sigma (T_{F,t}^4 - T_{S,mft}^4)$$

at $y = H, L_1 < x < L_1 + L_2$ (2i)

$$k \frac{\partial T}{\partial y} = \Phi_{CG,ct} \sigma (T_{F,t}^4 - T_{S,ct}^4)$$

at $y = H, L_1 + L_2 < x < L_1 + L_2 + L_3$ (2j)

$$k \frac{\partial T}{\partial y} = \Phi_{CG,mrt} \sigma (T_{F,t}^4 - T_{S,mrt}^4)$$

at $y = H, L_1 + L_2 + L_3 < x < L_1 + 2L_2 + L_3$ (2k)

$$k \frac{\partial T}{\partial y} = \Phi_{CG,rt} \sigma (T_{F,t}^4 - T_{S,rt}^4)$$

at $y = H, L_1 + 2L_2 + L_3 < x < L$ (2l)

그리고 초기조건은 다음과 같다.

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

식 (2)의 우변 항은 가열로내의 로체, 연소배가스 등으로부터 소재로의 열전달율을 나타낸다. 따라서 식 (2)에 나타난 총괄열흡수율 Φ_{CG} 는 순수한 복사전열량에 대한 실제 전열량사이의 차이를 조절하는 모델 조정계수를 의미한다. 이와 같이 총괄열흡수율을 사용하는 이유는 가열로내 전열현상을 수치적으로 해석하는 것은 매우 복잡하고 어렵기 때문이다. 본 연구에서는 이러한 총괄열흡수율을 추정하는 것이 목적이다. 식 (1)은 유한체적법(Finite Volume Method)을 이용하여 차분화를 실시하였다.

3. 역해석 문제

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

$$S[\mathbf{P}_N] = \int_{t=0}^{t_f} \sum_{m=1}^M [T(x_m, y_m, t; \mathbf{P}_N) - \mu_m(t)]^2 dt \quad N = 1, \dots, 12 \quad (4)$$

식 (4)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 12개 총괄열흡수계수 행

렬, 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 (4)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.

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

여기서 \mathbf{T} 는 측정점에서의 온도행렬이다.

식 (5)를 각 성분에 따라 표현하면 다음과 같다.

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

$N = 1, \dots, 12, \quad j = 1, \dots, K$

여기서 K 는 가열로의 열유속 구분구간의 개수이다.

식 (6)에서 $\partial \mathbf{T} / \partial \mathbf{P}_N$ 은 민감도계수 행렬(sensitivity coefficient matrix)이며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \mathbf{P}_1} = \begin{bmatrix} \frac{\partial T_1}{\partial P_{1,1}} & \frac{\partial T_1}{\partial P_{1,2}} & \dots & \frac{\partial T_1}{\partial P_{1,K}} \\ \frac{\partial T_2}{\partial P_{1,1}} & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial T_M}{\partial P_{1,1}} & \dots & \dots & \frac{\partial T_M}{\partial P_{1,K}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

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

$$\frac{\partial T_i}{\partial P_{1,j}} \cong \{T_i(P_{1,1}, P_{1,2}, \dots, P_{1,j} + \varepsilon P_{1,j}, \dots, P_{1,K}) - T_i(P_{1,1}, P_{1,2}, \dots, P_{1,K})\} / 2\varepsilon P_{1,j} \quad (8)$$

식 (8)에서 ε 은 0.001 로 설정하였다. 즉 식 (8)이

의미하는 것은 총괄열흡수계수 $P_{1,j}$ 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.

$$\mathbf{P}_N^{k+1} = \mathbf{P}_N^k - \beta_N^k \mathbf{d}_N^k, \quad N = 1, \dots, 12 \quad (9)$$

식 (9)에서 β^k 는 단계크기(step size)이고, \mathbf{d}^k 는 감소방향(direction of descent)으로 다음과 같이 계산되어진다.

$$\mathbf{d}_N^k = \nabla S_N(\mathbf{P}_N^k) + \gamma_N^k \mathbf{d}_N^{k-1} \quad N = 1, \dots, 12 \quad (10)$$

식 (10)에서 γ^k 는 공액계수(conjugate coefficient)로 다음과 같다.

$$\gamma_N^k = \frac{\sum_{j=1}^N [\nabla S_N(\mathbf{P}_N^k)]_j^2}{\sum_{j=1}^N [\nabla S_N(\mathbf{P}_N^{k-1})]_j^2} \quad (11)$$

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

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

식 (12)를 Taylor 급수 전개하여 정리하면 다음과 같다.

$$S[\mathbf{P}_N^{k+1}] = \int_{t=0}^{t_f} \sum_{m=1}^M [T(x_m, y_m, t; \mathbf{P}_N^k) - \beta_1^k \mathbf{C}_1^k - \beta_2^k \mathbf{C}_2^k - \dots - \beta_{11}^k \mathbf{C}_{11}^k - \beta_{12}^k \mathbf{C}_{12}^k - \mu_m(t)]^2 dt \quad (13)$$

여기서,

$$\mathbf{C}_N^k = \mathbf{d}_N^k \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \mathbf{P}_N^k} \quad (14)$$

식 (13)을 최소화하기 위하여 $\beta_N^k (N = 1, \dots, 12)$ 에 대하여 각각 미분한다. 먼저 β_1^k 에 대해 미분해 보면 다음과 같다.

$$\min_{\beta_i^k} S[\mathbf{P}_N^{k+1}] = \int_{t=0}^{t_f} \sum_{m=1}^M -2\mathbf{C}_1^k [T(x_m, y_m, t; \mathbf{P}_N^k) - \beta_1^k \mathbf{C}_1^k - \beta_2^k \mathbf{C}_2^k - \dots - \beta_{11}^k \mathbf{C}_{11}^k - \beta_{12}^k \mathbf{C}_{12}^k - \mu_m(t)] dt = 0 \quad (15)$$

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

$$\begin{bmatrix} A_{1,1} & \dots & A_{1,12} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{2,1} & \dots & A_{2,12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_1^k \\ \vdots \\ \beta_{12}^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ \vdots \\ B_{12} \end{bmatrix} \quad (16)$$

여기서,

$$A_{i,j} = \sum_{m=1}^M \int_{t=0}^{t_f} \left[\mathbf{d}_i^k \frac{\partial T}{\partial \mathbf{P}_i^k} \mathbf{d}_j^k \frac{\partial T}{\partial \mathbf{P}_j^k} \right] dt \quad (17a)$$

$$B_i = \sum_{m=1}^M \int_{t=0}^{t_f} [T(x_m, y_m, t; \mathbf{P}_N^k) - \mu_m(t)] \mathbf{d}_i^k \frac{\partial T}{\partial \mathbf{P}_i^k} dt \quad (17b)$$

그러므로 식 (16)의 연립방정식을 풀면 단계계기 β_N^k 에 대한 값을 얻을 수 있다. 연립방정식은 LU 분해법을 이용하여 해를 구할 수 있다.

4. 측온실험

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, Datapaq 11)을 사용하여 소재 내부온도를 측정하였다. 내열 계측시스템의 설치 개략도 및 측정위치는 Fig. 3에 나타나 있다. 본 장치는 온도기억 기관의 온도가 105 °C 이상을 초과하지 않아야 하기 때문에 수증기 배출구가 있는 냉각수 통을 단열재로 싸 다음 냉각수 통에 물을 25L 정도 채워 넣는다. 다음에 통 내부에 열전대(Mineral insulated, Type K, 3.0mm diameter)와 연결된 온도 기억판을 삽입시킨 후 소재위에 얹어서 가열로내에 장입시키는 물증발 냉각방식의

온도 측정장치이다. 소재(인장강도 40 kg/mm²급 일반강, 230 mm × 1270 mm × 8540 mm, 19,510Kg)를 가열로에 장입하기 전에 계측시스템을 작동시키고 소재가 추출되면 온도이력을 갖고 있는 기억기판을 분리시킨 후 독출장치에 걸어 소재의 온도이력을 얻었다. 이때 계측기의 오차는 ±3°C 이내이며, 측정주기는 30 초이다.

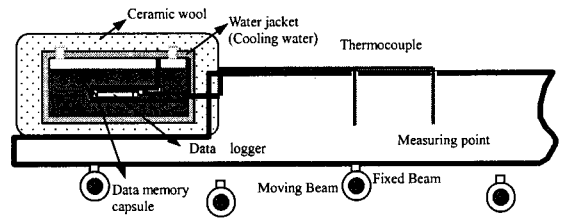


Fig. 3 Schematic diagram of the heat resistive data logger system

Table 1 Estimated total heat exchange factors at skid part

구역	중앙부		측면	
	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 non-skid part

구역	중앙부		측면	
	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

5. 결과 및 고찰

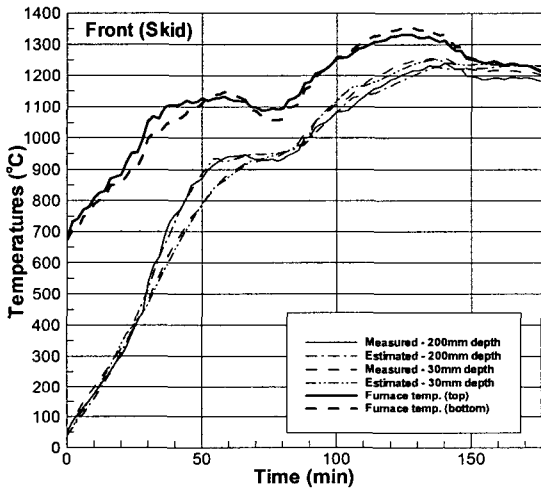
본 연구에서는 가열로의 총괄열흡수율 구간을 11 개로 나누어서 각 구간마다 12 개의 총괄열 흡수율을 추정하였다. 11 개의 구간은 장입부로부터의 거리(mm)로 표현하면 다음과 같이 구분 되었다.

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

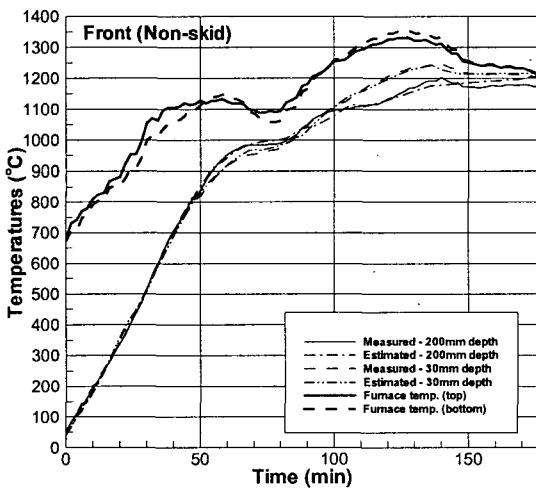
총괄열흡수율의 추정을 위한 역해석에는 Fig. 2 와 같이 총괄열흡수율 구분 구간을 따라 모두 12 개의 측온점이 사용되었으며 옆면의 총괄열흡수율

추정을 위해 선단부와 미단부에서는 3 개의 측온온도가 사용되었다. 그 외의 부위에서는 2 개의 측온온도가 사용되었다. Fig. 2 에서 볼 때 선단부는 좌측부에 해당되고, 미단부는 우측부에 해당된다. 역해석은 스킨부(skid 부)와 비스킨부(non-skid 부)에 대하여 수행하였으며, 각각에 대해 추정된 총괄열흡수계수는 Table 1, 2 와 같다. 편의상 중앙부와 측면부의 총괄열흡수율만을 나타내었다.

Fig. 4(a) ~ (b)는 소재 선단부의 스킨과 비스킨부에서의 온도결과를 나타낸 것이다. 각 그래프는

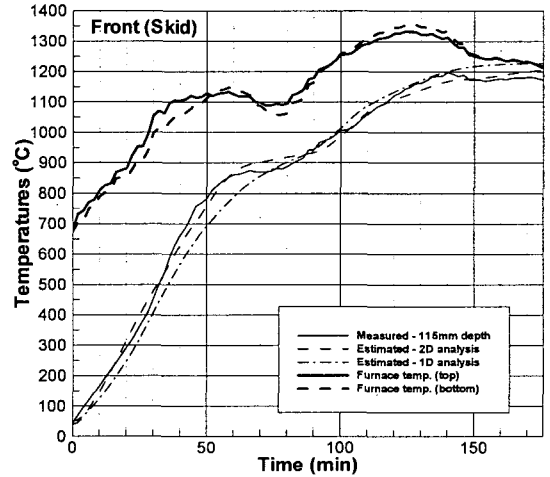


(a) Front skid part

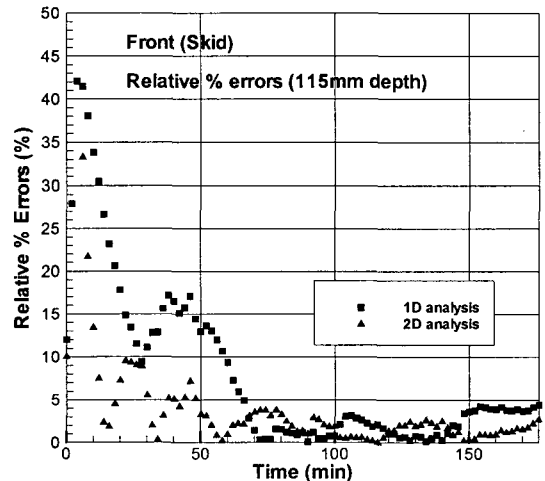


(b) Front non-skid part

Fig. 4 Measured and estimated temperatures of the front part of a slab at the positions of 30mm and 200mm below the slab surface



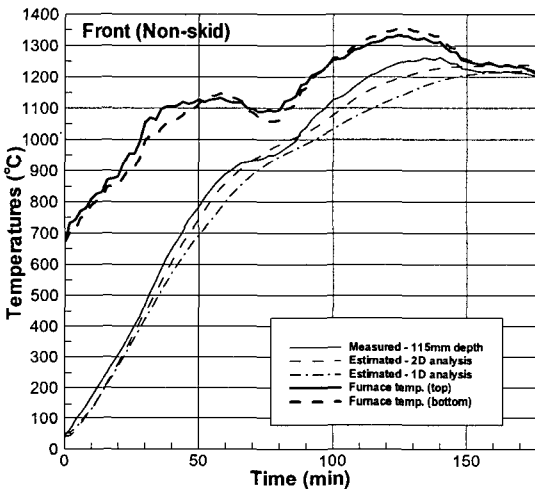
(a) Comparison of the estimated temperatures in 1-D and 2-D analyses at the position of 115mm below the slab surface



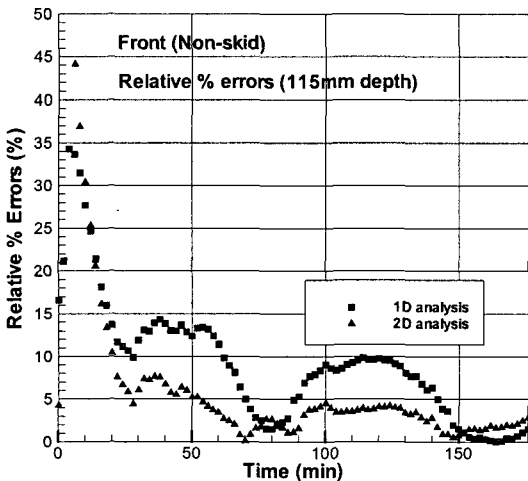
(b) Comparison of the relative percentage errors of 1-D and 2-D analyses

Fig. 5 Comparison of the results from 1-D and 2-D overall heat absorptance estimations of the front skid part at the position of 115mm below the slab surface

소재 상부면으로부터 30mm 와 200mm 지점의 측정된 온도 및 역해석을 통해 추정된 온도를 나타낸 것이다. 추정된 총괄열흡수율을 적용하여 계산된 온도와 측정된 온도가 잘 일치하는 것을 그림에서 볼 수 있다. 이때 가열로 내부의 온도는 측온소재의 선단부 상·하부면으로부터 50cm 떨어진 부위에서 측정된 분위기 온도를 적용하였다.



(a) Comparison of the estimated temperatures in 1-D and 2-D analyses at the position of 115mm below the slab surface



(b) Comparison of the relative percentage errors of 1-D and 2-D analyses

Fig. 6 Comparison of the results from 1-D and 2-D overall heat absorptance estimations of the front non-skid part at the position of 115mm below the slab surface

Fig. 5 는 1 차원 총괄열흡수율과 2 차원 총괄열 흡수율 적용시 소재 두께방향 중심 면인 115mm 지점의 선단 스키드부에 대한 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 1 차원 총괄열흡수율은 Nelder 와 Mead 의 SIMPLEX 방법을 사용하였다⁽⁸⁾. Fig. 5(a)는 1, 2 차원 총괄열흡수율 적용시 추정된 소재온도를 나타낸 것이다. 소재 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. 이에 대한 예측정도를 살펴보기 위하여 % 상대오차를 식 (18)로 정의하여 그 계산 결과를 Fig. 5(b)에 나타내었다.

$$Relative\ \% \ error = \frac{|Estimated\ temp. - Measured\ temp. |}{Estimated\ temp.} \times 100 \quad (18)$$

Fig. 6 은 1 차원 총괄열흡수율과 2 차원 총괄열 흡수율 적용시 소재 두께방향 중심 면인 115mm 지점의 선단 비스키드부에 대한 결과를 비교하여 나타낸 것이다.

선단부 비스키드부에 대한 결과 역시 선단부 스키드부의 결과와 유사하였다. Fig. 6(a)에서 볼 수 있듯이 소재가 장입후 약 50 분과 120 분 경에 추정된 온도와 측정된 온도사이 편차가 제일 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 해당 시간 영역대서 로온의 급격한 상승에 비해 소재 내부는 이러한 급격한 변화에 대응이 불가능 하기 때문이다. Fig. 6(b)에 나타난 것처럼 2 차원 해석에 대한 % 상대 오차는 1 차원 해석에 비해 작음을 알 수 있다.

그리고 소재의 다른 부위에 대한 추정에 대하여도 전술한 방법과 유사한 방법으로 계산하였으나 본 논문에서는 생략하기로 한다.

6. 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 이력 이력을 예측해 본 결과 실험에 의한 온도 이력과 잘 일치하는 것을 볼 수 있었다. 또한 1 차원 해석에 비해 2 차원해석의 경우 측정치에 대한 추정치의 % 상대오차가 약 50%이상 감소함을 보였다. 따라서 본 연구의 결과로부터 총괄열흡수율법을 이용한 두께 및 폭방향의 이차원 소재온도 예측모델이 실제 가열로의 연소재어용 온-라인모델로 적절히 사용 되어질 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.

후 기

본 연구는 POSCO 의 연구비 지원에 의하여 이루어진 것으로 이에 감사합니다.

참고문헌

- (1) Hisashi, E., Yoshiro, S., Naoki, Y. and Hiroyuki, S., 1997, "Development of a Simulator to Calculate an Optimal Slab Heating Pattern for Reheat Furnaces," *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 120, No. 3, pp. 42~53.
- (2) Masahiro, K., Yoichi, S., Yasuo, M. and Yutaka, S., 1995, "Adjusting Neural Networks for Accurate Control Model Tuning," *International Conference on Fuzzy Systems*, Vol. 4, *International Joint Conference of the 4th IEEE International Conference on Fuzzy Systems and the 2nd International Fuzzy Engineering Symposium*, pp. 1995~2000.
- (3) "Experiments and Calculations Related to Heat Transfer in Continuous Bloom Processing," The Iron and Steel Institute of Japan, Subcommittee for Reheat Furnaces, 1971.
- (4) "The Fundamentals and Applications of Heat Transfer Analysis in a Continuous Reheating Furnace," The Iron and Steel Institute of Japan, Subcommittee for Reheat Furnaces, 1982.
- (5) Lee, Y.K., Kim, K. H., Kang, D.H. and Chang, R.W., 2002, "Prediction of Billet Temperature by the Total Heat Exchange Factor in Reheating Furnace," *6th European Conference: Industrial Furnaces and Boilers*, Rio Tinto, Portugal, Apr. 2~5.
- (6) Deok-Hong Kang, Dong-Seong Kwag, Woo-Seung Kim and Yong-Kuk Lee, 2003, "A Study on the Estimation of One-dimensional Heat Fluxes on the Slab in Reheating Furnace by Using Inverse Analysis," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 27, No. 1, pp. 61~68.
- (7) 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.
- (8) Deok-Hong Kang, Ki-Hong Kim and Young-Kuk Lee, 2000, "Prediction of Billet Temperature by the Total Heat Exchange Factor in the Reheating Furnace," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 24, No. 11, pp. 1549~1554.