

총괄열흡수율을 이용한 가열로내 소재(Billet)온도예측

강덕홍* · 김기홍** · 이용국**

(2000년 6월 14일 접수)

Prediction of Billet Temperature by the Total Heat Exchange Factor in the Reheating Furnace

Deok-Hong Kang, Ki-Hong Kim and Yong-Kuk Lee

Key Words : Billet(소재), Reheating Furnace(가열로), Total Heat Exchange Factor(총괄열흡수율), Residence Time(재로시간)

Abstract

A new method to determine the total heat exchange factor was proposed for the prediction of billet temperature in a reheating furnace. This method employed the square of the difference between measured and predicted temperatures as an objective function. The real billet temperature in a walking beam type reheating furnace with 19.75m of its effective length was directly measured by thermocouples. The present method was validated by showing that the predicted billet temperature was in a good agreement with the measured one.

기호설명

- C : 장입간격 [m]
- c : 비열 [kcal/kg°C]
- F : 형상계수
- H : 소재두께 [m]
- k : 열전도계수 [kcal/mhr°C]
- M : 실측점 개수
- N : 실측 데이터 개수
- P : 목적함수
- q : 열유속 [kcal/m²hr]
- t : 시간 [hr]

그리스문자

- ρ : 밀도 [kg/m³]
- ϵ : 방사계수
- σ : Stefan-Boltzmann 상수
- θ : 온도 [°C]
- θ_0 : 장입온도 [°C]

첨자

- b : 소재(billet)
- g : 로내분위기 [°C]

- l : 하면
- u : 상면
- s : 측면

1. 서론

철강공정에서의 압연과정은 에너지 소비가 대단히 큰 공정이며, 그 중에서도 압연소재를 굽는 가열로(reheating furnace)는 압연공정 소비에너지의 반 이상을 차지하고 있어 에너지 수급면에서 매우 중요하다. 또한, 가열공정은 소재의 단순가열 차원을 넘어 제품의 품질을 결정하게 된다. 특히, 최근의 다품종 소량생산 및 품질의 고도화 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 소재의 추출목표온도와 균열도를 적절하게 맞추는 것을 목표로 한다. 가열로 연소제어 모델은 보통 다음과 같이 크게 네 부분으로 구성된다.^(4,5)

- 1) 추출 스케줄 계산
- 2) 소재 승온계산
- 3) 승온패턴 계산
- 4) 분위기 온도설정 계산

* 회원 포항산업과학연구원 에너지·화성연구팀
E-mail : kangdh@rist.re.kr
TEL. : (054)279-6548 FAX. : (054)279-6688

**비회원 포항산업과학연구원 에너지·화성연구팀

이 중에서도 소재 승온계산은 가열로 연소제어 모델 구성시 근본이 되는 것으로 가열로의 조업 조건에 따라 소재의 온도분포를 정확히 예측하는 것은 매우 중요하다. 한편, 가열로내 소재의 온도분포를 예측하는데 사용되는 총괄열흡수율의 계산방법은 표면온도 구배법, 평균합열량법, 컴퓨터에 의한 시행 오차법이 주로 사용되어 왔다.⁽⁶⁾ 이는 대부분이 일차원 모델로 소재의 상·하면으로의 열유속을 고려한 경우에 대한 연구였다. 본 연구에서는 실제 가열로에서 측정된 소재의 온도분포 이력을 이용하여 소재의 이차원 모델의 총괄열흡수율을 계산하는 새로운 방법을 제시하였으며, 이에 의해 계산되는 소재의 온도분포와 실측온도를 비교하여 이 방법의 타당성을 검토하였다.

2. 이론

2.1 가열로의 개요

가열로는 보통 로의 장입측에서 부터 3 개의 제어대, 즉, 예열대, 가열대, 균열대로 구성된다. 본 연구에서는 가열대와 균열대로 구성된 선재(Billet)가열로를 대상으로 하였으며 그 대략적인 구성은 Fig. 1 과 같은데, 워킹빔(walking beam)식 가열로의 경우 장입된 소재는 이동지지대(moving beam)에 의해 전진하여 일정시간 동안 고정지지대(fixed beam)에 있다가 다시 이동지지대에 의해 전진하는 것을 반복하면서 가열되어 추출된다.⁽⁷⁾ 이때 각 빔(beam)의 스킨드 파이프(skid pipe)내로 냉각수가 흐르기 때문에 이 파이프와 접하는 소재의 부분(skid 부)은 소재내 다른 지점과 비교할 때 온도가 낮다.

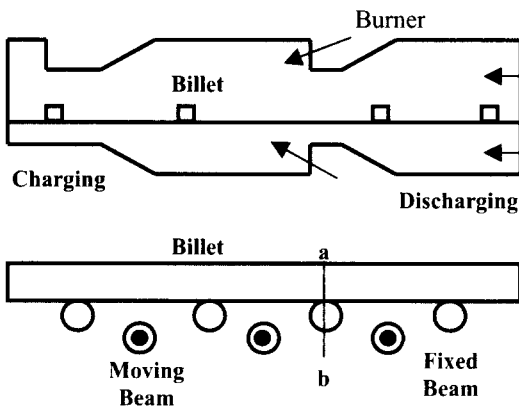


Fig. 1 Schematic diagram of reheating furnace

한편, 본 연구에서의 균열도는 측온실험결과 스킨드(skid) 부의 평균온도와 스킨드(skid) 간 중간부의 평균온도차가 각 부의 상부면과 중심부의 온도편차가 크기 때문에 균열도를 스킨드(skid)간 중간부의 상부면의 평균온도와 중심부의 평균온도차로 정의하였다. 가열로의 조업시에는 소재의 추출목표온도와 균열도를 맞추기 위해 로내의 분위기온도를 설정해 주어야 한다.

2.2 소재의 내부온도 예측

소재의 온도분포 예측에 있어서 3 차원의 열전도 방정식은 계산시간이 너무 길기 때문에 2 분 주기로 행해지는 실제 가열로의 연소제어용 모델로는 사용이 거의 불가능하다. 그러나 두께방향만을 고려한 1 차원 모델 또는 두께와 폭방향을 고려한 2 차원모델의 열전도방정식은 소재 전체의 온도분포를 알 수 없지만 계산시간이 빠르다는 장점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 Fig. 1 에 나타낸 단면 a-b(Fig. 2 의 빗금친 부분, 스킨드 부)에 대한 2 차원모델, 즉, 두께방향과 폭방향의 온도계산이 가능한 모델을 택하였다. 이때 소재내의 열전도 방정식과 초기 및 경계조건은 다음과 같다.

지배방정식 :

$$\rho c_p(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) \quad (1)$$

초기조건 :

$$\theta(x, y, 0) = \theta_0 \quad (2)$$

경계조건 :

1) 상면

$$k(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_{y=H} = q_n \quad (3)$$

2) 하면

$$k(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_{y=0} = q_b \quad (4)$$

3) 측면

$$k(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=0,H} = q_s \quad (5)$$

여기서 열유속(q)은 복사 및 대류에 의한 열전달의 합으로 식 (6)과 같이 주어진다.

$$q = q_{radiation} + q_{convection} \quad (6)$$

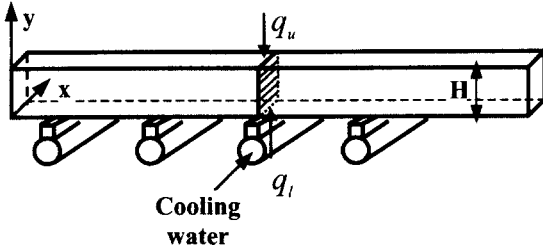


Fig. 2 Schematic representation of billet

복사에 의한 전열은 형상이 복잡하고 로내 가스 조성 및 온도가 수시로 변하기 때문에 형상계수 (F) 및 방사계수, ϵ 을 정확히 안다는 것은 상당히 어려운 일이다. 또한, 로내 가스흐름에 의한 대류열전달 계수도 로길이에 따른 연소가스 조성의 변화 및 로온의 변화등으로 이론적인 값을 구하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 가열로내 상황변화 및 로 형상에 따라 변하는 소재내로의 열유속을 결정하기 위해 소재가 로에 장입되는 시점에서부터 추출될 때까지의 내부온도를 실측하고, 이 측정된 소재내부의 온도분포를 만족시키는 표면 열유속을 구하였다. 결정된 표면 열유속에 의하여 F_{ϵ} 항으로 표현되는 로의 특성 및 대류에 의한 열전달의 로내 전열특성을 일괄적으로 나타내는 계수인 총괄열흡수율(the total heat exchange factor, Φ_{ϵ})을 결정하였다.⁽⁸⁻¹⁰⁾ 따라서, 식 (3)~식 (5)에 나타난 경계조건에 관한 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽⁶⁾

$$q_u = \Phi_{\epsilon}'' \sigma \left\{ \left(\frac{\theta_x'' + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta_h'' + 273}{100} \right)^4 \right\} \quad (7)$$

$$q_l = \Phi_{\epsilon}' \sigma \left\{ \left(\frac{\theta_x' + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta_h' + 273}{100} \right)^4 \right\} \quad (8)$$

$$q_v = \Phi_{\epsilon}' \sigma \left\{ \left(\frac{\theta_x^{v'} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta_h^{v'} + 273}{100} \right)^4 \right\} \quad (9)$$

그리고 강종별 온도에 따른 비열과 열전도계수는 0~1450 °C 까지 50 °C 간격으로 변화하며, 이 50 °C 간격에 대하여 일정한 평균비열 및 열전도계수를 적용하였다.⁽⁶⁾ 계산영역의 x, y 방향에 대하여 5x5 의 등간격 격자를 적용하였으며, Patankar 가 제시한 유한체적법(Finite Volume Method)을 사용하여 차분화를 실시하였다.⁽¹¹⁾

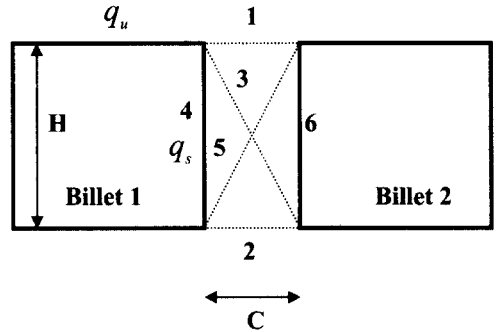


Fig. 3 Imaginary surface between billets

2.3 측면의 열유속

고온의 연소가스, 로벽으로부터의 복사 또는 대류에 의한 소재로의 전열은 소재의 상,하면 뿐만 아니라 Fig. 3 에 나타난 것처럼 소재와 소재 사이의 장입간격을 통하여 로 상,하부에서 소재 측면으로의 복사 및 대류에 의한 열유속을 고려해 주어야 한다. 여기서, 소재측면 사이의 복사 전열 및 측면간의 가스에 의한 복사 전열량을 무시한다. 그리고 소재측면으로의 복사전열은 가상면 1 에서 받는 복사 열유속을 상면에서 받는 복사열유속(q_u)과 같다고 보면, 가상면 1 로부터 방사되는 복사 전열량중 측면 4 로 도달되는 비율계산을 통하여 소재측면으로의 전열량을 다음과 같이 나타낼 수 있다. Fig. 3 에 나타난 것처럼 상면에 대한 가상면 1 을 통과하여 측면 4 로 전달되는 열유속을 q_v 라고 하면 복사 열수지식에 의하여 다음과 같은 관계식을 만들 수 있다.

$$(q_u \cdot A_1) \cdot F_{14} = A_4 \cdot q_v \quad (10)$$

여기서, A_1, A_4 는 가상면 1 과 측면 4 에 대한 수직방향 단위길이당의 면적을 나타내고, F_{14} 는 가상면 1 로부터 측면 4 로의 복사 형태계수(view factor) 이다. 따라서 식 (10)으로 부터 열유속 q_v 는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$q_v = \frac{A_1}{A_4} \cdot F_{14} \cdot q_u \quad (11)$$

따라서 측면부분의 총괄열흡수율은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

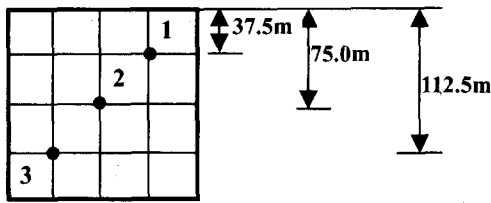


Fig. 4 Measuring points of billet temperature

$$\Phi_{cx} = \frac{A_1}{A_4} \cdot F_{14} \cdot \Phi_{cx}'' \quad (12)$$

그리고 측면 4,6 과 가상면 1,2,3,5 에 대하여 reciprocity 관계식과 summation 조건식들을⁽¹²⁾ 이용하면 형태계수 F_{14} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽¹³⁾

$$F_{14} = \frac{1}{2} \left(\frac{1 + X - \sqrt{1 + X^2}}{X} \right) \quad (13)$$

여기서 X 는 장입간격에 대한 소재두께의 비, 즉 $\frac{C}{H}$ 를 의미한다.

3. 소재의 내부온도 실측

가열로내 소재의 온도분포 측정은 고온분위기 (1000°C ~ 1350°C) 에서 장시간 소재가 체류하여야 하기 때문에 통상적으로 사용하는 내열데이터 로거(heat resistant data logger)를 사용하지만, 이를 장착하기에는 소재단면이 짧기 때문에 열전대를 소재에 심고 알루미나 파우더(Alumina Powder)로 밀폐시킨 다음 T/C(외경 4.5mm, SUS shielded K-type)을 길게 연결하여 가열로 밖에서 기록계(recorder)인 Thermodac EF 시스템에 의하여 온도를 측정하는 방법을 사용하였다. 측정점의 위치는 Fig. 4 에 나타낸 것과 같이 계산단면에 대하여 고정빔부의 두께방향에 대하여 세 점 (37.5mm, 75mm, 112.5mm)에 대하여 측정하였다. 이때 계측기의 오차는 ±3°C 이내이다. 이 3 개의 측정점은 각각 전술한 소재단면에 대한 온도계산시 사용된 격자의 온도계산 지점과 일치하게 하여, 측온 실험치를 이용한 총괄열흡수율 도출 계산에 바로 적용할 수 있게 하였다.

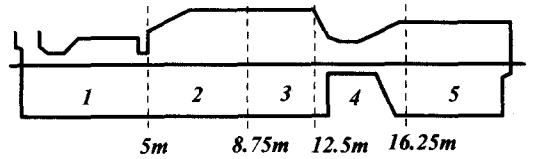


Fig. 5 Division of the total heat exchange factor(Φ_{cx})

4. 소재의 총괄열흡수율 결정

본 연구에서는 측온실험 데이터를 이용하여 전술한 소재온도예측모델의 총괄열흡수율을 도출하기 위하여 노 길이방향으로 총괄열흡수율의 적용구간을 실측 노내 온도분포를 이용하여 Fig. 5 에 나타내었다. 통상적으로 실조업에 온라인(on-line)으로 적용시 노 길이방향에 대하여 대(zone) 개수만큼 총괄열흡수율을 적용한다. 본 연구에서는 소재온도의 예측정도 향상측면을 고려하여 노내 길이방향으로의 가스온도 분포의 기울기에 따라 5 구간으로 총괄열흡수율을 적용하였다. 이와 같은 소재온도 예측모델의 각 구간별 총괄열흡수율을 구하기 위한 방법은 본 소재온도 예측모델이 비선형(non-linear), 편미방(Partial differential equation)이기 때문에 이와 같은 문제의 계수 최적화에 주로 이용되는 Nelder 와 Mead 의 SIMPLEX 방법을 사용하였다.⁽¹⁴⁾ Fig. 5 의 각 구간에 대한 최적의 총괄열흡수율을 구하기 위한 목적함수(objective function), P 는 다음과 같다.

$$P = \sum_{i=1}^N \left(\sum_{k=1}^M (\theta_{k,i}'' - \theta_{k,i})^2 \right) \quad (14)$$

식 (14)에서 하첨자 i 는 소재 두께방향의 측정점을 의미하고, 상첨자 M 은 측정값, 하첨자 k 는 소재의 장입서 추출시까지의 데이터 수집시간 간격(30 초)에 따른 데이터 수집개수를 나타내며 여기서 N 은 그 총 개수이다. 그리고 $\theta_{k,i}$ 는 장입서 추출시까지 측온데이터 수집간격과 동일한 시간간격에 따라 측온점과 동일한 위치에 대하여 소재온도 예측모델에 의해 계산되어 지는 소재온도이다. 즉, 목적함수를 최소화시키는 구간별 총괄열흡수율의 계산을 실시하였다. 다음의 Table 1 은 총괄열흡수율 계산을 위한 측온실험 조건들을 나타낸 것이다. 여기서 측온실험시 대상강종은 SUS304(150mmH × 150mmW × 9000mmL)이며 Table 2 는 해당강종의 온도에 따른 비열 및

Table 1 Experimental conditions

노온설정치 [°C]		재로시간 [분]		장입간격 [mm]	
가열대	균열대	가열대	균열대	전	후
1150	1230	73	47	250	100

Table 2 Thermophysical properties of SUS304

온도 (°C)	비열 (kcal/kg°C)	열전도계수 (kcal/hrmK)	온도 (°C)	비열 (kcal/kg°C)	열전도계수 (kcal/hrmK)
0	0.116	42.8	750	0.150	23.0
50	0.120	42.5	800	0.148	20.9
100	0.124	41.4	850	0.148	20.9
150	0.130	40.3	900	0.148	22.0
200	0.130	38.9	950	0.146	22.7
250	0.136	37.1	1000	0.150	23.0
300	0.138	35.6	1050	0.152	23.8
350	0.146	34.6	1100	0.156	24.5
400	0.150	32.8	1150	0.160	25.2
450	0.160	31.3	1200	0.162	25.9
500	0.168	30.2	1250	0.166	26.6
550	0.180	29.2	1300	0.170	27.3
600	0.186	28.1	1350	0.174	28.0
650	0.200	27.0	1400	0.178	28.7
700	0.522	25.9			

Table 3 Total heat exchange factors(Φ_{κ})

구분	총괄열흡수율(Φ_{κ})				
	1 구간	2 구간	3 구간	4 구간	5 구간
상부	0.76	0.68	0.86	0.64	0.77
하부	0.81	0.54	0.68	0.69	0.65

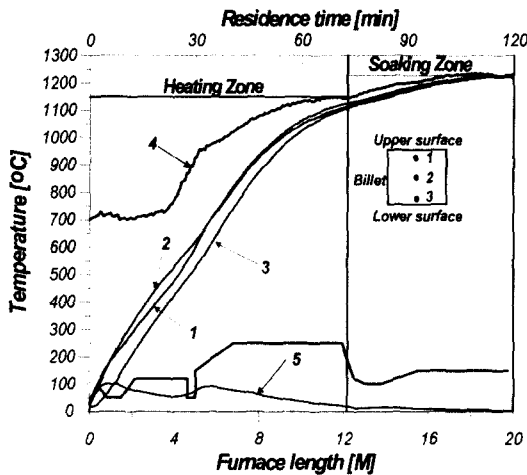
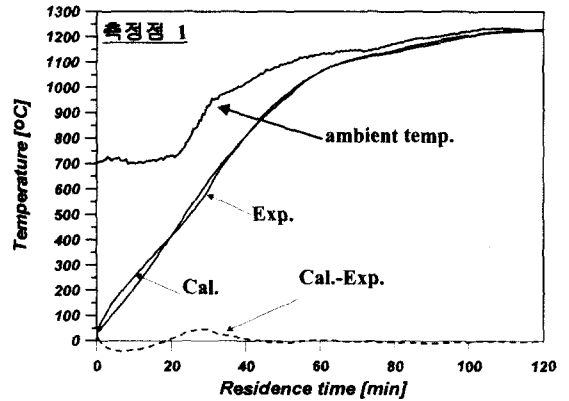
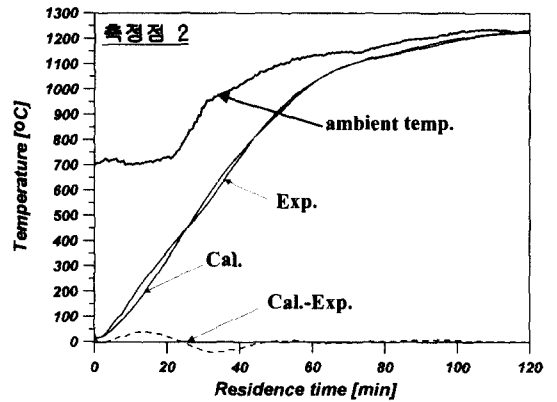


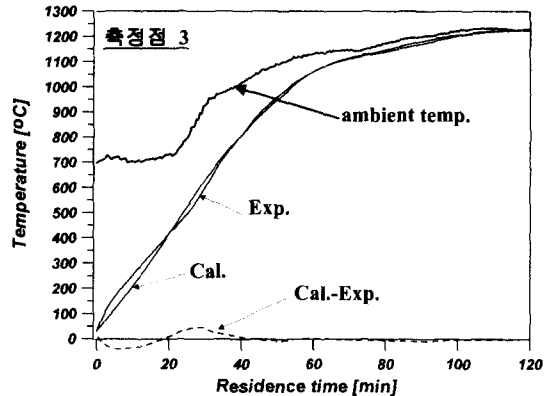
Fig. 6 Temperature distribution of billet with residence time



(a) Position 1



(b) Position 2



(c) Position 3

Fig. 7 Comparison of calculated and experimental billet temperatures at positions in Fig. 4

열전도계수를 나타낸 것이다. Fig. 6은 위의 조건에서 측온실험결과 승온커브를 나타낸 그림이다. Fig. 6에서 1,2,3은 Fig. 4에 나타낸 측정점의 온도를 나타낸 것이며, 4번은 길이방향의 노내 온도, 5번은 균열도를 나타낸 그림으로 37.5mm 깊이에서 측정온도와 75mm 지점에서의 측정온도와 의 편차를 의미한다. 목표균열도(10°C 이하의 편차)를 확보하는 지점은 약 16m 지점(재로시간 95분)에서 두께방향 온도편차가 목표로하는 10°C 이내로 들어오고 있다. 그리고 하부면에 해당하는 112.5mm 지점의 온도가 다른 측정점에 비해 전체적으로 낮게 나타나는 것은 고정빔의 냉각수 열손실에 기인한 것으로 사료된다. 측온소재가 추출시 37.5mm, 75mm, 하부 112.5mm의 측정온도는 각각 1225°C, 1224°C, 1220°C로 나타났다. 이 실험데이터를 가지고 전술한 SIMPLEX의 최적화 기법을 이용하여 총괄열흡수율을 도출한 결과치를 다음의 Table 3에 나타내었다.

그리고 Fig. 7(a) ~ Fig. 7(c)는 전술한 소재온도에 측모델에 Table 3에 나타난 총괄열흡수율을 적용하여 계산한 값과 측온실험값과의 비교를 나타낸 그림이다. Fig. 7(a)~Fig. 7(c)에서 알 수 있듯이 전체적으로 측온실험치와 총괄열흡수율 이용한 예측치와 잘 일치함을 알 수 있다. 장입에서부터 재로시간이 약 40분까지에서 최대편차(예측치-실험치)가 약 45°C을 보이는 것은 장입구의 개폐에 따른 방향의 불안정한 현상과 로온의 급격한 변화를 보이는 구간을 본 연구에서는 총괄열흡수율을 일정하게 주었기 때문에 위와 같은 이유로 발생되는 급격한 열유속을 제대로 반영하지 못했기 때문이라고 사료된다. 즉, 재로시간이 40분까지 해당되는 로 길이에 대하여 총괄열흡수율 적용구간을 좀더 세분화 하면 이러한 문제를 해결할 수 있으리라 판단된다.

5. 결론

가열로내 소재의 온도를 예측하기 위해서, 실

제 소재의 가열로내 온도를 측정하였으며, 측정된 소재의 온도 분포를 이용하여 새로운 총괄열흡수율을 계산하는 방법을 제시하였다.

한편, 본 연구의 방법에 의해 계산되는 총괄열흡수율을 이용하여 구한 소재온도와 실제 측정치를 비교해 본 결과 잘 일치하였다. 따라서 본 방법은 가열로 연소제어시 정확한 소재의 온도 분포 예측시 사용될 수 있다.

후기

본 연구는 POSCO와 창원특수강의 연구비 지원에 의하여 이루어진 것으로 이에 감사합니다.

참고문헌

- (1) Ishida, R., Matsuura, Y., Sawae, M. and Ohtomo, A., 1983, R & D, 神戶製鋼技報, 33(4), 81.
- (2) Veslocki, T.A., Smith, C.C. and Kelly, C.D., 1986, *Iron & Steel Engineer*, December, 47.
- (3) Lee, G.S., Yoo, E.J. and Song, D.I., 1985, *HWAHAK KONGHAK*, 23, 137.
- (4) 若宮宣範, 鶴田 誠, 住野知子, 1982, 三菱電機技報, 59(4), 294.
- (5) Hollander, F. and Zuurbier, S.P.A., 1982, *Iron & Steel Engineer*, January, 44.
- (6) 1971, 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.
- (7) Hollander, F. and Zuurbier, S.P.A., 1979, *Iron & Steel Engineer*, May, 60.
- (8) Watanabe, K., 1976, 鐵と鋼, 10, 23.
- (9) 松永省吾, 1973, 燃料協會誌, 52, 36.
- (10) 松永省吾, 1973, 鐵と鋼, 59, 120.
- (11) Patankar, S.V., 1980, *Numerical heat transfer and fluid flow*, McGraw Hill Book Company, 1980
- (12) Hottel, H.C. and Sarofim, A.F., 1967, *Radiative Transfer*, McGraw-Hill, New York.
- (13) 김기홍, 강덕홍, 1999, "90T/Hr 압연가열로의 연소 및 조로 최적화연구", RIST 연구보고서 (98C080)
- (14) William, H. Press, Brian, P. Flannery, and Saul, A. Teukolsky, William, T. Vetterling, 1988, *Numerical Recipes in C*, Cambridge University Press.