

< 논문 >

가열로 내 슬랩의 온도 예측을 위한 2차원 열전달 모델

김만영[†] · 이동은* · 박해두*

(2006년 1월 31일 접수, 2006년 8월 16일 심사완료)

2D Heat Transfer Model for the Prediction of Temperature of Slab in a Direct-Fired Reheating Furnace

Man Young Kim, Dong Eun Lee and Hae-Doo Park

Key Words : Reheating Furnace(가열로), Slab(슬랩), Heat Transfer(열전달), Thermal Radiation(열복사), Heat Flux(열유속)

Abstract

A mathematical heat transfer model for the prediction of heat flux on the slab surface and temperature distribution in the slab has been developed by considering the thermal radiation in the furnace and transient conduction governing equations in the slab, respectively. The furnace is modeled as radiating medium with spatially varying temperature and constant absorption coefficient. The slab is moved with constant speed through non-firing, charging, preheating, heating, and soaking zones in the furnace. Radiative heat flux which is calculated from the radiative heat exchange within the furnace modeled using the FVM by considering the effect of furnace wall, slab, and combustion gases is applied as the boundary condition of the transient conduction equation of the slab. Heat transfer characteristics and temperature behavior of the slab is investigated by changing such parameters as absorption coefficient and emissivity of the slab. Comparison with the experimental work shows that the present heat transfer model works well for the prediction of thermal behavior of the slab in the reheating furnace.

기호설명

I : 복사강도(intensity), $[W/m^2sr]$
 I_b : 흑체복사강도, $[W/m^2]$
 \bar{s} : 복사강도의 방향, 식 (4c)
 T : 온도, $[K]$
 Ω : 입체각(solid angle), $[sr]$
 ϕ : 방위각(polar angle), $[rad]$
 κ_a : 흡수계수(absorption coefficient), $[m^{-1}]$

θ : 극각(polar angle), $[rad]$

σ_s : 산란계수(scattering coefficient), $[m^{-1}]$

1. 서론

가열로는 압연공정의 전단계로서 에너지 소비가 매우 클 뿐만 아니라 철강제품의 품질을 결정하게 되므로 적절한 연소제어를 통한 슬랩의 추출 목표 온도 및 균열도의 확보가 필요하다. 하지만 실제 가열로의 경우 고온 연소가스의 유동 및 슬랩 외부에 발생하는 스케일층으로 인하여 장입된 슬랩의 온도 이력을 파악하기가 용이하지 않기 때문에 전산해석에 의한 슬랩의 온도 변화를 파악하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다.⁽¹⁻³⁾

이러한 가열로 내 슬랩의 온도 변화를 예측하기 위한 해석적 연구는 크게 다음의 두 가지로 구분

[†] 책임저자, 회원, 전북대학교 기계항공시스템공학부, 전북대학교 부설 공학연구원 공업기술연구센터
 E-mail : manykim@chonbuk.ac.kr
 TEL : (063)270-2473 FAX : (063)270-2472
 * 포스코 기술연구소 공정제어연구그룹

될 수 있다. 첫째는 유동장 파악을 위한 Navier-Stokes 방정식 해석과 함께 열복사가 연계된 에너지 방정식 및 슬랩 내부의 열전도 해석을 통한 가열로 각 영역별 또는 시간대별 슬랩의 온도 이력을 예측하는 것이다.⁽⁴⁾ 하지만 이러한 방법은 비록 정확한 연소장 및 슬랩의 온도 파악이 용이하지만 가열로 형상의 복잡성 및 다수의 버너와 열복사 해석에 따른 전산해석 시간 및 비용이 크다는 단점을 가지고 있다.

두번째 방법은 슬랩 온도 파악을 위하여 단순히 슬랩의 열전도 방정식만을 해석하는 것이다. 이러한 경우 슬랩의 열전도 방정식의 경계조건으로서 가열로의 연소가스 및 노벽에서 슬랩으로 유입되는 열유속의 예측이 요구되며, 이러한 열유속 예측을 위하여 슬랩이 연소로에 장입되는 시점부터 추출될 때까지의 슬랩의 내부온도를 실측하고 측정된 슬랩 내부의 온도분포를 만족시키는 표면 열유속을 구하고 이에 따른 로의 특성 및 대류에 의한 열전달의 로내 전열특성을 일괄적으로 나타내는 총괄열흡수율(total heat exchange factor)을 이용하는 방법,⁽⁵⁾ 그리고 역해석(inverse analysis)⁽⁶⁾을 통한 슬랩 표면의 열유속 예측방법이 이용되고 있다. 이러한 방법들은 첫번째 방법에 비하여 계산시간 및 비용의 절감으로 인하여 실제 연소로의 연소온도 제어를 위한 온라인 모델의 개발을 가능하게 할 뿐만 아니라 실험조건 설정의 유용한 도구로 이용될 수 있다.

본 연구에서는 가열로 내의 각 위치 및 시간에 따른 슬랩의 온도 분포를 파악하기 위하여 전술한 두 방법의 장점을 혼합한 열전달 모델을 제시하고자 한다. 즉, 가열로 벽면 및 노내 가스의 온도 및 농도 분포와 관련된 측근 실험결과를 최대한 활용하여 기체장의 복사전달방정식을 해석하여 슬랩으로 유입되는 열유속을 예측하고 이를 경계조건으로 사용하여 슬랩의 비정상 열전도 해석을 수행함으로써 장입에서 추출에 이르는 전 과정에 대한 슬랩으로 유입되는 열유속과 슬랩의 온도 분포 및 이력을 추정하고자 한다.

2. 이론해석

2.1 가열로 공정 및 해석 모델

가열로 공정은 제철소의 연주공정에서 만들어진 슬랩을 적절히 가열하여 후속 압연공정의 압연기에 대한 부하의 변동폭을 줄여 조업의 안정화를 위한 공정으로서 이를 위하여 버너를 이용한 슬랩의 균일 가열 및 적절한 제어가 요구된다. Fig. 1은 본 연구에 사용된 가열로 모델을 도시한 것으

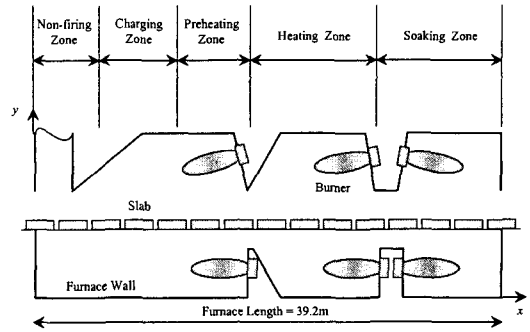


Fig. 1 Geometry of the reheating furnace

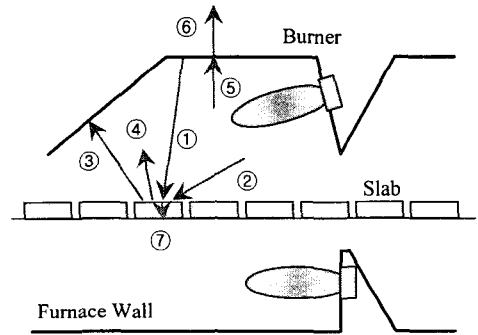


Fig. 2 Schematic of the heat transfer mechanism in the reheating furnace

로서, 전체 길이가 39.2 m 인 가열로의 개략적인 구조를 보여주고 있다. 노입구(non-firing zone)에서 투입된 슬랩은 장입대(charging zone), 예열대(preheating zone), 가열대(heating zone), 그리고 균열대(soaking zone)를 차례로 거치면서 목표 추출온도에 도달하게 된다. 슬랩은 슬랩의 하부면에 위치해 있는 이동지지대(moving beam)에 의하여 다음 위치로 이동한 후 고정지지대(fixed beam) 위에서 일정시간 체류하면서 가열로 내벽 및 고온 연소가스와의 열전달을 통하여 점점 가열되다가 다시 이동지지대에 의하여 다음 위치로 이동하는 과정을 반복하면서 균열대를 통하여 출구에서 추출된다.

Fig. 2는 가열로 내부의 슬랩 표면에서의 열전달 메커니즘을 나타낸 것으로서, 슬랩의 표면은 버너에 의하여 가열된 노내의 가스 및 노벽과의 복사 및 대류열전달을 통하여 열교환이 발생하고(①~④), 슬랩 표면에서 흡수된 열에 의하여 전도열전달을 통하여 슬랩 내부가 가열된다(⑦). 한편, 슬랩으로 유입되는 전체 열유속(=복사+전도열유속)의 90% 이상은 복사 열유속으로 알려져 있는데,⁽²⁾ 이는 슬랩의 가열을 고려하는 가열로 해석 모델의 경우 열복사 해석에 주의해야함을 의미한다.

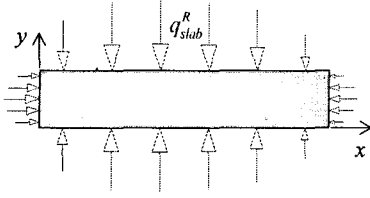


Fig. 3 Schematic of the slab geometry showing the radiative heat flux on the slab surface

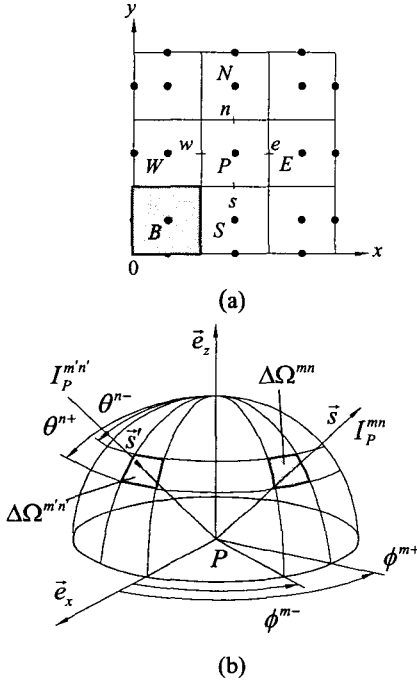


Fig. 4 Spatial control volume and control (solid) angles : (a) control volume, (b) control angle

Table 1 Temperature conditions used in this study [°C]

zone	T_{w_upper}	T_{g_upper}	T_{g_lower}	T_{w_lower}
Non-firing	700	900	900	650
Charging	900	1,100	1,100	850
Preheating	1,000	1,200	1,200	950
Heating	1,100	1,300	1,250	1,000
Soaking	900	1,100	1,050	800

Table 2 Conductivity and specific heat of the slab

Temperature [°C]	Conductivity [W/mK]	Specific heat [J/kgK]
30	26.89	299.0
400	25.44	401.6
600	22.70	512.0
800	20.89	542.8
1,000	23.69	478.9

이와 같은 분석에 근거하여 본 연구에서는 다음과 같은 2 차원 모델을 고려하였다. 즉, 노 내의 기체 열복사 해석을 통하여 슬랩으로 유입되는 열 유속을 예측하고, 이러한 열유속을 경계조건으로 하여 슬랩의 비정상 열전도 해석을 수행함으로써 가열로 각 위치에서의 슬랩 내부의 온도 분포를 예측하는 것이다. 가열로 깊이 방향의 중심축을 고려함으로써 길이 방향의 2 차원 해석을 수행하였다. 한편, 가열로 하부의 지지대로 인하여 슬랩으로의 열전달이 왜곡될 수 있지만(즉, skidmark),⁽⁷⁾ 본 연구에서는 이러한 효과를 무시하였다.

2.2 지배방정식

가열로 내 각 슬랩의 내부 온도변화를 예측하기 위한 2 차원 비정상 열전도 방정식은 다음과 같다.

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

윗 식의 해석을 위한 경계조건은 Fig. 3에 도시된 바와 같은 복사열유속, q_{slab}^R 으로 주어진다. 즉,

$$q_{slab}^R = \int_{\Omega=4\pi} I(\vec{r}_w, \vec{s}) (\vec{s} \cdot \vec{n}_w) d\Omega \quad (2)$$

여기에서 \vec{n}_w 은 슬랩 표면에서의 단위수직벡터를 나타낸다. 한편, q_{slab}^R 을 구하기 위해서는 다음과 같은 복사전달방정식(RTE)의 해석이 요구된다. 즉,

$$\frac{1}{\beta_0} \frac{dI}{ds} = -I + (1 - \omega_0) I_b + \frac{\omega_0}{4\pi} \int_{\Omega'=4\pi} I\Phi(\vec{s}' \rightarrow \vec{s}) d\Omega' \quad (3)$$

여기에서 $\beta_0 = \kappa_0 + \sigma_s$ 인 소멸계수, $\omega_0 = \sigma_s / \beta_0$ 인 산란알베도, 그리고 $\Phi(\vec{s}' \rightarrow \vec{s})$ 는 입사방향, \vec{s}' 에서 산란방향, \vec{s} 로 산란되는 산란위상함수를 나타낸다. 윗 식의 경계조건으로는 확산 방사 및 반사하는 임의의 온도를 갖는 벽면조건을 적용한다.

2.3 유한체적법

식 (1)로 표현된 슬랩의 열전도 방정식은 Fig. 4(a)에 도시된 격자계에서 유한체적법(FVM)을 이용하여 차분하였고 비정상 항의 차분에는 내재적 방법을 적용하였다.

또한 매질의 열복사 방정식은 Fig. 4(a)와 (b)에 도시된 공간격자 및 검사각도를 적용한 유한체적법(FVM for Radiation)을 도입하였으며, 이와 같은 유한체적 검사각도에서 복사강도의 방향은 변할 수 있지만 크기는 일정하다는 가정을 적용하면 다음과 같은 유한체적 공식울 얻을 수 있다.⁽⁸⁾ 즉,

$$\sum_{i=e,w,n,s} I_i^{mn} \Delta A_i D_{ci}^{mn} = \beta_0 \left(-I^{mn} + S_R^{mn} \right)_P \Delta V \Delta \Omega^{mn} \quad (4a)$$

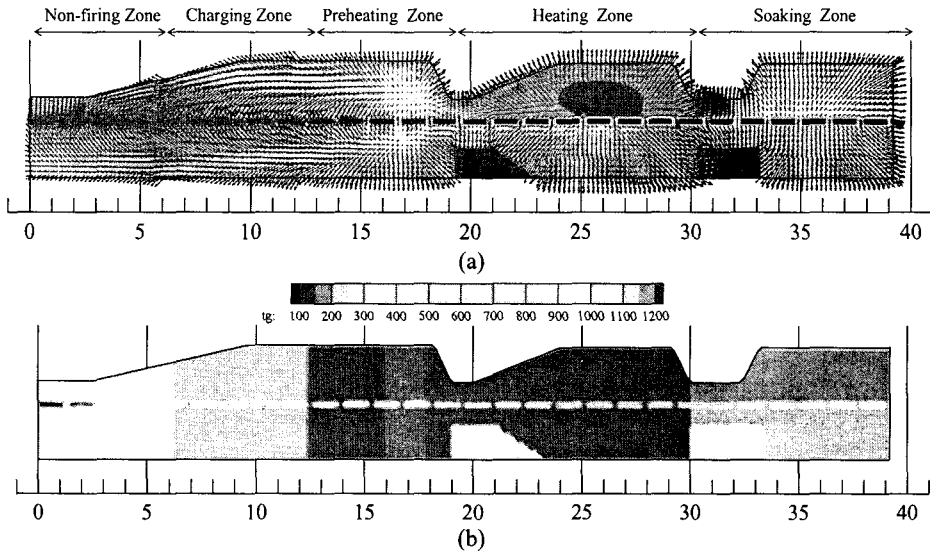


Fig. 5 Distribution of the (a) radiative heat flux vectors and incident radiation and (b) temperature (°C)

여기에서,

$$D_{\sigma}^{mn} = \int_{\phi^{mn}}^{\phi^{m+n}} \int_{\theta^{mn}}^{\theta^{m+n}} (\vec{s} \cdot \vec{n}_i) \sin \theta d\theta d\phi \quad (4b)$$

$$\vec{s} = \sin \theta \cos \phi \vec{e}_x + \sin \theta \sin \phi \vec{e}_y + \cos \theta \vec{e}_z \quad (4c)$$

$$S_R^{mn} = (1 - \omega_0) I_b + \frac{\omega_0}{4\pi} \int_{\Omega=4\pi} I^{m'n'} \Phi^{m'n' \rightarrow mn} d\Omega' \quad (4d)$$

식 (4a)의 좌변항에 있는 검사면에서의 복사강도, I_i^{mn} 는 계단차분법을 적용하여 격자점의 복사강도, I_p^{mn} 로 표현하면 다음과 같은 최종 차분식을 얻을 수 있다. 즉,

$$a_p^m I_p^{mn} = \sum_{l=E,W,N,S} a_l^m I_l^{mn} + b_p^m \quad (5)$$

한편, Fig. 4(a)의 점 B와 같은 비활성영역의 경우 차분식 (4d)로 표현된 생성항을 $S_R^{mn} = S_C^A + S_P^A I_p^{mn}$ 와 같이 표현함으로써 처리할 수 있다. 이에 대한 자세한 내용은 참고문헌에서 찾을 수 있다.⁽⁸⁾

2.4 해석 조건 및 물성치

본 연구의 해석대상 가열로의 형상이 Fig. 1에 도시되어 있다. 슬랩의 재원은 1.16 m × 0.23 m이며 슬랩간의 간격은 0.2 m로서 가열로 내부에 동시에 28 개의 슬랩이 위치한다. 로입구에서 투입된 슬랩이 출구에서 추출될 때까지의 운전시간은 180 분으로서 슬랩의 평균 이동속도는 13.07 m/hr이다.

한편, 본 연구에서는 계산의 정확성 및 계산시간을 고려하여 $(N_x \times N_y) = (198 \times 29)$ 및 $(N_\theta \times N_\phi)$

$= (4 \times 12)$ 격자계를 적용하였으며, 열전도방정식 및 복사전달 방정식은 각각 이전 계산단계와의 온도차 및 복사강도의 차이가 10^{-6} 이하이면 수렴한 것으로 판정하였다. 또한, 비정상 열전도 방정식의 시간증분은 2.57 s로 설정하였다.

가열로 내의 열복사를 해석하기 위해서는 복사물성치 및 온도조건과 벽면조건이 필요하다. 우선, 가열로 가스의 온도는 각 위치에서의 연소 및 유동 조건에 따라 상이한 값을 갖겠지만 본 연구에서는 측온실험 결과를 근거로 Table 1과 같은 평균값을 부여하였고, 연소가스의 흡수계수는 $\kappa_g = 0.125 \text{ m}^{-1}$ 로 설정하였다. 하지만 연소가스의 산란은 무시하였다. (즉, $\sigma_s = 0$) 방사율 $\epsilon_w = 0.75$ 인 가열로 벽면의 온도는 Table 1과 같이 각 영역의 연소가스 대비 윗벽면에서는 200°C 그리고 아랫벽면에서는 250°C 낮은 값을 설정하였다. 한편, 슬랩의 밀도는 일정(즉, $\rho = 7,778 \text{ kg/m}^3$)하지만 열전도도와 비열은 Table 2와 같이 온도에 따라 변하는 값을 적용하였다.

3. 해석 결과 및 고찰

3.1 슬랩 단면의 온도 분포

전술한 기본 조건하에서의 가열로 내의 복사열 유속과 입복사의 분포 및 슬랩 단면에서의 온도 분포와 변화 이력을 Fig. 5에 도시하였다. 21.2°C의 차가운 상태로 슬랩이 유입되는 로입구 및 이

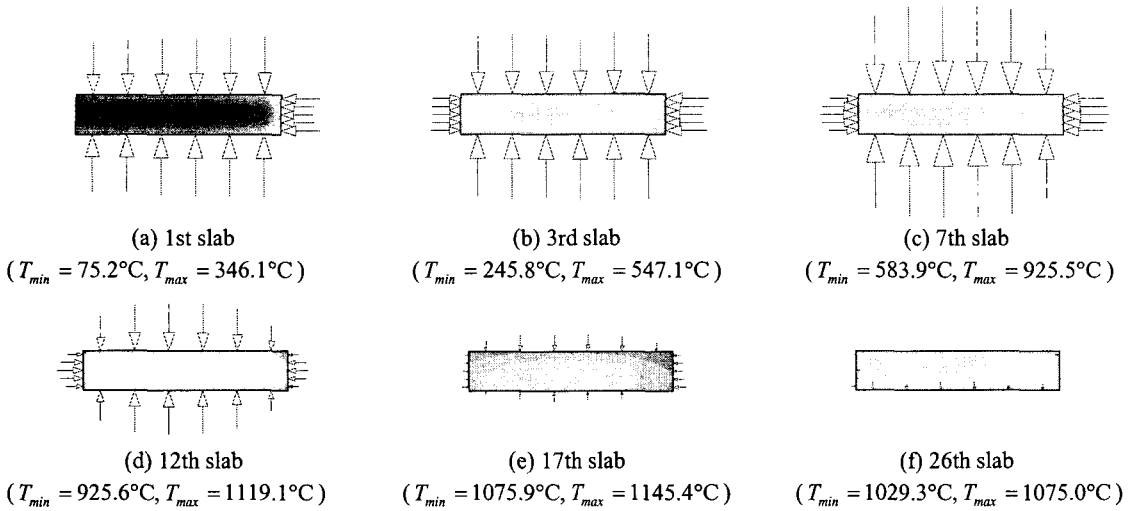


Fig. 6 Distribution of the radiative heat flux vector on the slab surface and temperature contours in the slab

어지는 장입대에서는 슬랩의 온도를 승온시키기 위하여 상대적으로 뜨거운 가열로의 벽면 및 연소가스로부터 차가운 슬랩으로 복사열이 집중되고 있다. 이러한 현상은 예열대까지 지속되어 슬랩의 온도는 급격히 상승하게 된다. 하지만 가열대에서는 슬랩의 온도가 주변 온도 가까이 상승하기 때문에 슬랩으로 유입되는 열유속이 점차 감소하고, 연소로의 온도가 낮아지는 균열대에서는 일부 슬랩의 경우 오히려 슬랩으로부터 열이 주변으로 전달되는 현상이 나타난다.

한편, 연소로 각 지점에서의 이러한 열전달 현상은 슬랩의 온도와 슬랩 표면에서의 복사열유속 벡터를 도시한 Fig. 6에서 자세히 관찰할 수 있다. 여기에서 열유속 벡터의 방향은 슬랩으로 유입되는 경우 화살표가 슬랩으로 향하도록 정렬하였다. Fig. 6(a)는 로입구에서 투입되는 슬랩이다. 따라서 왼쪽면에서의 열유속은 존재하지 않으며, 오른쪽으로 갈수록 뜨거운 내부 매질의 영향을 받기 때문에 열유속이 점점 커지고 있으며, 오른쪽 모서리 부근의 가장 큰 열유속으로 인하여 슬랩의 온도 역시 이 부근에서 최고점을 보인다. 21.2°C로 투입된 이 슬랩의 최저온도는 75.2°C로서 슬랩의 내부에서 관찰되고, 최고온도는 346.1°C로서 슬랩의 오른쪽 모서리에서 나타난다. 하지만, 같은 로입구 영역에 존재하지만 이보다 가열로 안쪽에 위치한 3번 슬랩의 경우 Fig. 6(b)에 도시한 바와 같이 슬랩의 온도가 상승하여 최고온도는 547.1°C에 이른다. 또한, 연소가스의 복사열을 받아 슬랩 표면 온도가 먼저 상승한 후 열전도에 의하여 슬

랩 내부로 열전달이 일어나기 때문에 슬랩 표면과 내부의 온도구배를 살펴볼 수 있다. 한편, Fig. 6(c)에 도시된 7 번째 슬랩의 경우 장입대에 위치한 슬랩으로서 슬랩 주변의 연소가스 온도가 매우 높기 때문에 슬랩으로 유입되는 열유속의 크기 역시 매우 높게 분포하고 있음을 알 수 있다. 하지만 시간이 경과하여 슬랩이 예열대로 이동하면 슬랩의 온도가 보다 상승하여 연소가스와의 온도차가 작아지기 때문에 Fig. 6(d)와 같이 슬랩으로 유입되는 복사 열유속의 크기가 작아지게 된다. 슬랩이 지속적으로 이동하여 가열대에 위치하면 Fig. 6(e)와 같이 열유속의 크기가 매우 작아지고 이에 따라 슬랩 내부의 온도 구배가 작아지고 슬랩은 보다 높은 온도에서 평균화되는 현상을 보이고 있으며, 최종적으로 Fig. 6(f)의 균열대에서는 이러한 온도평균화 현상이 보다 진전되고 있음을 알 수 있다. 한편, 균열대에 존재하는 슬랩의 열유속의 경우 다른 영역에서와는 달리 슬랩의 일부분에서는 슬랩으로부터 연소가스 또는 가열로 벽면 쪽으로 열이 빠져나가는 현상이 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이러한 현상은, 비록 본 계산 조건의 경우 계산된 슬랩의 온도가 주변의 연소가스의 온도 보다는 높지만 가열로 벽면의 온도가 슬랩의 온도 보다 낮기 때문에 발생하는 현상으로서 실제 가열로의 경제적 운용 및 슬랩 온도의 균일화 관점에서 주의깊은 고찰이 필요하다.

Fig. 7은 슬랩의 윗면과 아랫면, 그리고 두께 중심에서의 각 위치에서의 (즉, 시간에 따른) 온도 이력을 나타낸 것으로서, 가열로 내의 연소가스의

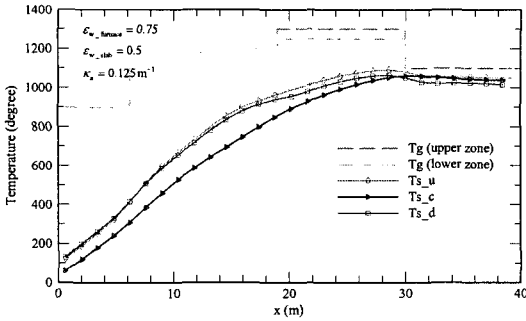


Fig. 7 Predicted temperature profiles of the slab along the axial direction of the furnace

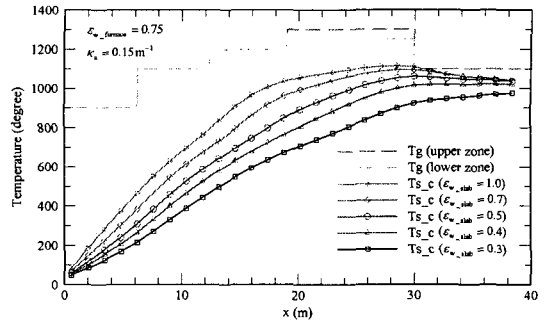


Fig. 9 Effect of slab emissivity on the predicted longitudinal temperature profile of the slab

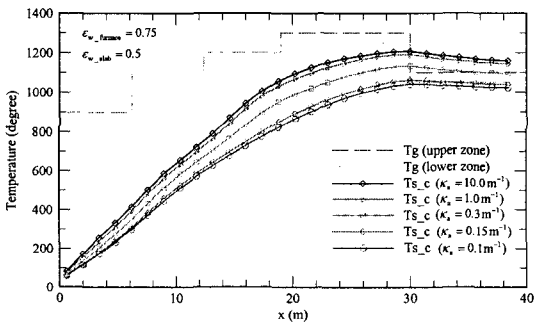


Fig. 8 Effect of absorption coefficient on the predicted longitudinal temperature profile of the slab

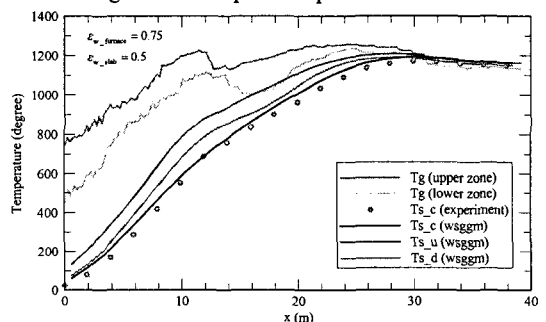


Fig. 10 Comparison of the predicted and measured longitudinal temperature profile of the slab

온도와 함께 도시되어 있다. 로입구에서 21.2°C 로 투입된 슬랩의 두께중심의 온도는 첫번째 슬랩의 온도 60.4°C 에서 시작하여 가열대가 끝나는 약 30 m 지점까지 거의 선형적으로 증가하다가 이후 균열대에서는 상승을 멈추고 평준화되는 과정을 보여주고 있다. 한편, 슬랩의 윗면과 아랫면의 온도의 경우 로입구 부근에서는 가열로의 아랫면의 면적이 크기 때문에 슬랩 아랫면의 온도가 윗면의 온도보다 약 10°C 정도 높지만 장입대를 거치면서 윗면과 아랫면의 온도 역전이 발생하고, 상대적으로 차가운 가열로 하부의 블록이 존재하는 20 m 부근에서 약 30°C 정도의 온도 편차를 보이며, 특히 균열대에서는 오히려 슬랩 표면의 온도가 감소하여 아랫면 온도의 경우 두께 중심의 온도보다 낮아지는 경향을 보이고 있다.

한편, 가열로 내 슬랩의 온도거동을 파악하는 본 프로그램의 계산시간은 1.7GHz PC 에서 약 460s 가 소요된다.

3.2 흡수계수의 영향

Fig. 8 은 가열로 벽면과 슬랩의 방사율이 각각 0.75 및 0.5 일 때 가열로 내 흡수계수의 변화에 따른 슬랩 두께중심에서의 온도 변화를 보여주고

있다. 일반적으로, 흡수계수는 매질의 복사 참여정도를 나타내는 것으로서 흡수계수의 증가는 열복사의 침투깊이가 작아짐을 의미한다. 따라서, 가열로 전 영역에서 연소가스의 온도가 로벽면의 온도보다 높기 때문에 (평균적으로 약 200°C) 가열로의 중심 부근에 놓인 슬랩은 그 주변 연소가스의 영향을 많이 받기 때문에 흡수계수가 증가할수록 두께중심에서의 온도는 보다 높아지고 있다. 한편, 흡수계수가 1.0 m⁻¹ 로 높아지면 균열대에서는 슬랩 두께중심에서의 온도는 벽면의 온도보다 높아지고 있지만 흡수계수가 10.0 m⁻¹ 로 급격히 증가하더라도 슬랩의 온도는 크게 변화하지 않고 있다.

3.3 슬랩 방사율의 영향

물체 표면의 방사율은 물체가 흑체복사할 때와 비교하여 실제 방사되는 복사에너지의 비율을 나타내는 것으로서, 물체의 표면온도가 주변온도보다 낮은 경우 보다 많은 복사에너지를 흡수할 수 있음을 의미한다. 즉, 본 연구와 같은 가열로 조건에서는 슬랩의 방사율이 증가할수록 보다 많은 연소가스의 복사에너지를 흡수하여 슬랩의 온도를 높일 수 있다. Fig. 9 는 가열로 벽면의 방사율을 0.75 로 고정하고 매질의 흡수계수가 0.15 m⁻¹ 일

때 슬랩의 방사율의 변화에 따른 슬랩 두께중심에서의 온도변화를 도시한 것으로서, 방사율이 증가할수록 슬랩의 열복사 흡수량이 증가하기 때문에 로입구에서의 온도변화 기울기가 급격해지고 있음을 알 수 있다. 방사율이 가장 작은 0.3 인 경우 열복사 에너지 흡수량이 작아서 슬랩의 온도는 가열로의 전 영역에서 거의 선형적으로 증가하고 있는데, 이러한 경우 원하는 추출온도를 얻기 위해서는 가열로 길이의 증가 또는 급격한 연소를 통한 가열로 연소가스 온도의 증가가 필요함을 보여주고 있다. 한편, 방사율이 0.5 이상인 경우, 비록 초기 로입구부터 가열대까지의 온도차이는 크지만 균열대를 거치면서 주변으로의 열방출에 따라 소재의 추출온도는 서로 유사함을 알 수 있다.

3.4 실제 가열로에의 적용 가능성 평가

여기에서는 본 연구에서 개발된 열전달 모델을 실제 가열로에 적용하였다. 즉, 가열로 벽면과 슬랩의 방사율을 각각 0.75 및 0.5 로 고정하고 측온 실험에서 측정된 가열로 내 슬랩 상부 및 하부의 연소가스의 온도를 적용하고, 연소가스의 흡수계수 모델로는 측정된 H₂O 및 CO₂ 가스의 물분율을 사용하여 비회체가스 모델인 회체가스가중합산 모델(WSGGM)을 적용하였다.⁽⁹⁾ Fig. 10 에 계산된 슬랩의 온도와 함께 두께중심에서의 실험결과를 함께 도시하였는데, 비록 1 차원적으로 변화하는 연소가스 온도를 적용하더라도 본 열전달 모델은 슬랩의 실제 온도변화의 경향을 효율적으로 모사할 수 있음을 보여주고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 2 차원 열복사 모델을 적용하여 가열로 내 슬랩 표면에서의 열유속을 예측하고 이를 경계조건으로 적용한 비정상 열전도 방정식을 해석함으로써 로입구부터 균열대에 이르는 가열로 전 과정에서의 슬랩의 온도 변화를 예측하였고, 실제 가열로에 적용하여 실험결과와 비교함으로써 그 타당성을 검증하였다.

또한, 가열로 각 지점에서의 슬랩 표면의 열유속과 내부의 온도분포를 도시함으로써 측온실험으로 관측하기 어려운 가열로 전 과정의 슬랩의 온도 거동을 모사하였을 뿐만 아니라, 가열로 연소가스의 흡수계수 및 슬랩의 표면방사율의 변화에 따른 매개변수 연구를 수행하여 슬랩의 추출 목표온도에 영향을 미치는 인자의 영향을 고찰하였다.

하지만 슬랩의 보다 실제적인 온도 거동을 예측

하기 위해서는 추후 본 연구에서 무시한 지지대의 영향, 그리고 가열로 표면의 열손실을 고려한 노벽 온도의 예측과 같은 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 POSCO 기술연구소의 연구비 지원에 의하여 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Chapman, K. S., Ramadhyani, S. and Viskanta, R., 1991, "Modeling and Parametric Studies of Heat Transfer in a Direct-Fired Continuous Reheating Furnace," *Metallurgical Transactions B*, Vol. 22B, pp. 513~521.
- (2) Li, Z., Barr, P. V. and Brimacombe, J. K., 1988, "Computer Simulation of the Slab Reheating Furnace," *Canadian Metallurgical Quarterly*, Vol. 27, No. 3, pp. 187~196.
- (3) Maki, A. M., Osterman, P. J. and Luomala, M. J., 2002, "Numerical Study of the Pusher-Type Slab Reheating Furnace," *Scandinavian Journal of Metallurgy*, Vol. 31, pp. 81~87.
- (4) Kim, J. G. and Huh, K. Y., 2000, "Prediction of Transient Slab Temperature Distribution in the Reheating Furnace of a Walking-beam Type for Rolling of Steel Slabs," *ISIJ International B*, Vol. 40, No. 11, pp. 1115~1123.
- (5) Kang, D.-H., Kim, K.-H. and Lee, Y.-K., 2000, "Prediction of Billet Reheating by the Total Heat Exchange Factor in the Reheating Furnace," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 24, No. 11, pp. 1549~1554.
- (6) Kang, D.-H., Kwag, D.-S., Kim, W.-S. and Lee, Y.-K., 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) Yang, B. Y., Wu, C. Y., Ho, C. J. and Ho, T.-Y., 1995, "A Heat Transfer Model for Skidmark Formation on Slab in a Reheating Furnace," *J. of Materials Processing & Manufacturing Science*, Vol. 3, pp. 277~295.
- (8) Byun, D. Y., Baek, S. W. and Kim, M. Y., 2003, "Investigation of Radiative Heat Transfer in Complex Geometries Using Blocked-Off, Multiblock, and Embedded Boundary Treatments," *Numerical Heat Transfer, Part A*, Vol. 43, pp. 807~825.
- (9) Smith, T. F., Shen, Z. F. and Friedman, J. N., 1982, "Evaluation of Coefficients for the Weighted Sum of Gray Gases Model," *J. of Heat Transfer*, Vol. 104, pp. 602~608.