

가열로 유동특성에 관한 수치해석

이동은*·김창영·김상준·김종근

Numerical Simulation of Flow Characteristics in a Heating Furnace

D. E. Lee, C. Y. Kim, S. J. Kim and J. K. Kim

Key Words: Reheating Furnace(재가열로), Turbulent Reacting Flow(난류반응유동)

Abstract

The flow characteristics in a hot mill reheating furnace is numerically simulated in this study. Navier-Stokes equations for conservation of mass, momentum, energy are solved and the standard $k-\epsilon$ model, mixture fraction/PDF model are used for the turbulent reacting flow in the furnace. Radiation heat transfer is incorporated by the P-1 method with the absorption coefficient evaluated using WSGGM. First, simulation results are obtained for the total furnace region with existing protective dam, and then the calculations are carried out only for the preheating zone in the furnace. In that zone, additional center dam is built in order to control the flow behavior of the inlet air and the combustion gas.

과를 규명하는데 목표를 두었다.

1. 서론

열간압연용 가열로는 압연공정 전에 피가열체인 슬라브를 가열함으로써 열연제품이 수유가가 원하는 두께와 폭으로 압연될 수 있도록 하는 설비이다. 슬라브의 균일한 가열, 버너연소의 효율성 확보 등이 가열로의 운영목표이며, 이와 함께 슬라브의 온도예측을 위해서는 가열로 내의 복잡한 유동특성에 대한 이해가 선행되어야 한다.

슬라브가 가열로에 장입될 때 주위공기가 노내로 침입할 수 있으며 차가운 외부공기의 침입은 가열로 입측의 온도 및 산소농도 분포에 영향을 미치게 된다. 본 연구는 기존 가열로에서 외부공기 침입에 따른 유동특성을 수치적으로 해석하고, 이러한 침입공기에 효과적으로 대응하도록 가열로 입측에 댐(dam)을 설치하였을 경우 그 효

2. 물리적 모델

가열로내의 유동 및 연소, 열전달 현상 등을 수치적으로 모사하기 위해서는 질량, 모멘텀, 에너지 보존에 대한 Navier-Stokes 방정식에 난류현상, 버너화염 및 복사열전달 현상을 추가로 모델링하는 과정이 필요하게 된다. 본 연구에서 난류 모델은 레이놀즈 평균에 근거한 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였고, 유동은 완전히 난류이며 분자의 점성효과는 무시해도 좋다고 가정하였다.

가열로의 상, 하부 버너연소는 혼합분율/PDF 방식을 사용하여 모델링하였다. 혼합분율/PDF 방식은 유동이 비압축성, 난류이고 확산화염인 경우에만 적용이 가능한데 이러한 접근방식은 화학반응 미케니즘이 알려져 있지 않거나 너무 복잡하여 외부에서 반응률을 정의해 주기 곤란한 경우에 유용하다. 또한 개개 화학종들의 보존식을 일일이 풀지 않고 대신에 하나의 보존스칼라로서 혼합분율의 보존식만을 풀게 되므로 효율적인 계산이 가능하다.

* 포항산업과학연구원

혼합분율, f 는 다음과 같이 정의되는데,

$$f = \frac{Z_k - Z_{k0}}{Z_{kF} - Z_{k0}} \quad (1)$$

여기서, Z_k 는 어떤 화학종의 질량분율을 나타내며 첨자 O와 F는 각각 산화제 및 연료의 분출 입구를 가리킨다. 이와 같이 정의된 혼합분율, f 는 화학반응 전후에서 보존되는 양으로 평균혼합분율, \bar{f} 와 혼합분율변동, $\overline{f^2}$ 에 대한 보존식의 해를 통해 계산된다.

유동장내의 화학종의 농도, 밀도, 온도 등의 순간값들은 계산된 혼합분율 분포를 통해 계산되는데, 반응계가 비단열계(nonadiabatic system)인 경우 혼합분율과 다른 스칼라량들간의 순간적인 관계를 일반화하여 표현하면 다음과 같다.

$$\Phi_i = \Phi_i(f, H^*) \quad (2)$$

$$H^* = \sum_j m_j H_j = \sum_j m_j \left[\int_{T_{ref}}^T c_{P,j} dT + h_j^0(T_{ref}) \right] \quad (3)$$

여기서 Φ_i 는 화학종의 농도, 밀도, 온도 등의 순간 스칼라량을, H^* 는 식 (3)과 같이 정의된 순간 엔탈피를 나타낸다. 화학반응은 연료와 산화제가 만났을 때 1단계 반응(one-step reaction)이 무한히 빠르게 일어난다고 가정하였다.

식 (2)는 혼합분율과 스칼라량들간의 순간적인 관계를 기술하지만 난류유동은 이들 스칼라의 시간평균값의 예측과 관련되므로 혼합분율, f 의 시간변동을 기술하는 확률밀도함수, $p(f)$ 를 통해서 난류와 화학반응을 연계시킨다. 화학반응에 의한 열 생성/손실이 엔탈피 변동에 큰 영향을 주지

않는다고 가정하면 화학종의 농도, 밀도, 온도 등의 스칼라량 평균값은 식 (4)를 통해 결정되며, 여기서 엔탈피, $\overline{H^*}$ 는 식 (5)을 풀어 얻는다.

$$\overline{\Phi_i} = \int_0^1 \Phi_i(f, \overline{H^*}) p(f) df \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{H^*}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \overline{H^*}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{k_i}{c_p} \frac{\partial \overline{H^*}}{\partial x_i} \right) + (\tau_{ik}) \frac{\partial u_i}{\partial x_k} + S_h \quad (5)$$

복사모델은 P-N 계열중에서 가장 간단한 형태인 P-1 모델을 사용하였다. 혼합가스의 scattering 효과는 무시하였고 흡수계수는 WSGGM(Weighted Sum of Gray Gases Model)을 사용하여 계산하였다.

3. 수치해석모델

3.1 가열로 모델링

본 연구의 대상인 포항제철소 열연 가열로는 워킹빔(Walking Beam)형으로 전체 크기는 길이(x축), 폭(z축), 높이(y축)가 각각 34.8m, 10.8m, 5.2m이다. 가열로는 크게 예열대와 가열대, 균열대로 구분되며 고정빔과 이동빔들이 슬라브를 유지, 이송한다. 버너는 상부에 24개, 하부에 26개가 배치되어 있고 상부버너의 경우 아랫방향으로 8°의 분출각도를 갖는다.

Fig.1은 이러한 특징을 갖는 가열로의 유동해석을 위해 실제 형상을 단순화시킨 그림을 보여준다. 우선 기하학적 대칭구조를 반영하여 폭(z축) 방향의 중심부분을 대칭면(z=0)으로 삼고 한쪽부

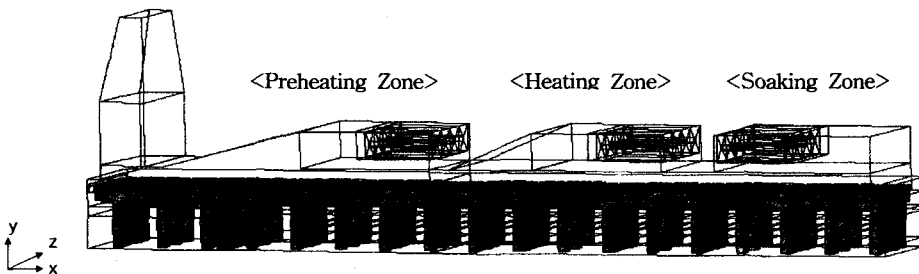


Fig.1 Geometry of POSCO reheating furnace

분단을 계산영역으로 설정하였으며 이 경우 폭은 5.4m가 되고 상, 하부 버너는 각각 12개, 13개만이 고려된다. 버너의 연료 및 공기 유입부는 Fig. 2에서와 같이 중앙에서 연료가 공급되고 이를 둘러싼 나머지 영역에서 공기가 회전방향 속도성분을 가지며 공급되는 시스템으로 단순화하였다.

슬라브 장입측($x=0$)의 모델링은 Fig.3와 같은데, 여기서 a는 고정범의 단면이고 b는 이동범의 단면으로 슬라브와 20cm 간격을 유지한다. 그림에서 빗금친 부분은 외부공기가 유입될 수 있는 영역을 표시한 것이다. 가열로내의 기존 탬은 $x=5.4m$ 지점에 위치하고 있는데, 가열로 측벽으로부터 안쪽으로 4.4m, 높이 1.4m로 쌓여져 있다.

3.2 계산조건

계산에 사용된 가열로의 통상적인 조업조건은 Table 1과 같고, 상부 및 하부버너를 통해 공급되는 연료와 공기의 조성은 Table 2에 요약하였다. 슬라브 장입측의 외부공기 유입속도는 1m/s로 이는 실측된 값을 반영한 것이다.

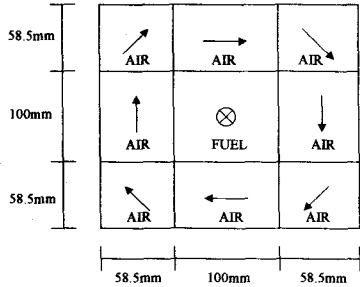


Fig.2 Fuel/air inlet region in the burner

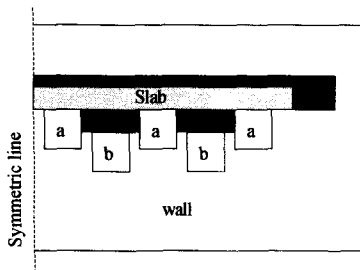


Fig.3 Modeling of slab inlet region

Table 1 Operating conditions (kcal/Nm³)

		예열대	가열대	균열대
조업 조건	상부 버너	3375	2571	964
	하부 버너	3857	3857	1446

Table 2 Composition of fuel & air (volume fraction:%)

	H ₂	N ₂	O ₂	CO	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO ₂
fuel	32.5	25.6	0.2	14.3	14.9	1.2	0.5	10.8
air		79	21					

Fig.1의 전체 가열로를 대상으로 정상상태 3차원 수치해석을 수행하였다. 해석코드는 상용 S/W인 FLUENT를 사용하였고, 생성된 계산격자는 약 27만개이다. 전체 가열로의 해석을 통하여 기존 탬 주위의 유동특성과 온도분포, 산소농도 분포 등의 결과를 얻었고, 특히 예열대만을 대상으로 하는 이후의 계산수행시 예열대 끝부분의 경계조건에 사용되어질 온도, 속도, 난류운동에너지, 난류소산율 등의 형상을 결정하였다.

외부공기의 유입에 대비하여 기존 탬 이외에 가열로 중앙에 탬을 새로이 설치하는 경우, 두께 및 높이는 기존 탬과 동일하고 노의 중심면에서부터 길이 1.6m의 탬을 $x=3.4m$ 위치(중앙탱-1)와 $x=1.4m$ 위치(중앙탱-2)에 각각 설치한 경우를 가정하였다. 이때의 관심영역은 가열로 앞부분에 해당하므로 예열대만을 대상으로 수치해석을 수행하였으며 이 경우에 하부버너는 3개, 상부버너는 4개가 포함되고 사용된 계산격자는 약 10만개로서 계산시간을 상당히 단축시킬 수 있었다.

4. 결론

4.1 전체 가열로 해석결과

외부공기가 1m/s의 속도로 슬라브 장입측을 통해 노내로 유입되는 경우, 가열로 대칭면($z=0$)과 하부버너 중심면($y=1m$), 상부버너 중심면($y=4.6m$)

의 온도분포를 Fig.4에 나타내었다. 최대화염온도는 약 1930K이고, 슬라브 장입측($x=0$)에서 유입된 찬 공기는 기존 덤의 설치위치($x=5.4m$)까지 영향을 미치고 있다. 슬라브는 상부와 하부의 유동을 분리시키는데 상부유동에서, 예열대와 가열대 상부버너로부터 분출되는 폐가스는 슬라브 하부유동에 거의 영향을 미치지 않는다(Fig.5 (a)). 하부버너에서 분출되는 폐가스의 주된 유동형태(Fig.5 (b))는, 노 중앙의 대칭면에서 반대쪽 유동과 만나 노 중앙을 따라 기존 덤 사이를 통과하면서 장입측에서 유입되는 외부공기와 섞이게 된다. 하부버너에서 분출되는 폐가스중에서 슬라브 사이를 통과하거나 슬라브 끝단과 측벽사이 공간을 통해 상부로 이동한 경우에는 상부버너의 유동과 함께 노밖으로 배출된다.

Fig.6는 노의 중심부($z=0$)와 측면부($z=4.5m$)를 대상으로, 장입측으로부터 기존 덤의 설치위치까지의 노온과 산소농도를 도시한 것이다. 노온 및 산소농도는 덤의 중간높이($y=0.8m$)와 덤 바로 위의 높이($y=1.6m$)에서의 계산값을 보여주는데, Fig.6 (a)에서 노온은 중심부가 측면부에 비해 높게 나타나며 이는 앞서 설명한 고온의 폐가스 유동형태에 기인한 것이다. 덤은 노의 측벽으로부터 중심부의 1m 전까지 뺏어있으므로 노의 중심부($z=0$)에서는 $x=5.4m$ 위치를 기준으로 급격한 온도변화가 나타나지 않지만, 덤의 단면을 통과하는 측면부($z=4.5m$)에서는 $x=5.4m$ 위치를 전후하여 덤 아래쪽($y=0.8m$)에서는 230℃, 덤 바로 위쪽($y=1.6m$)에서는 120℃의 온도차이를 보여준다. 산소농도는 중심부에 비해 측면부가 최대 5배까지 높으며, 측면부에서 덤 설치위치를 전후하여 산소농도가 급격히 증가하고 있다.



Fig.4 Temperature contour on the centerline, $y=1, y=4.6m$ planes

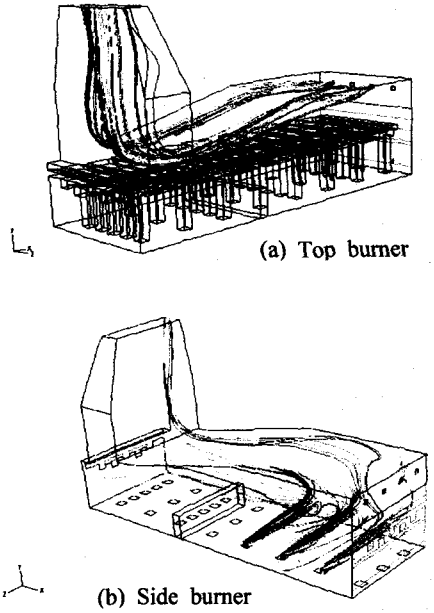
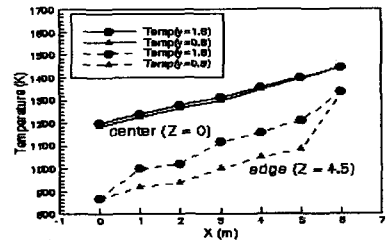
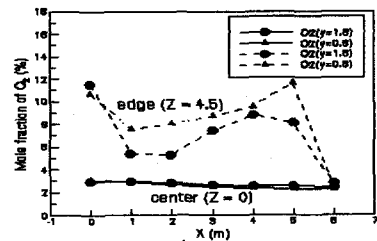


Fig.5 Path lines from top & side burners



(a) Furnace temperature (K)



(b) O₂ mole fraction (%)

Fig.6 Furnace temperature and O₂ mole fraction along the X-axis

4.2 추가 댐 설치에 따른 해석결과

4.2.1 중앙댐-1의 경우

기존 댐과 함께 중앙 댐을 $x=3.4m$ 위치에 설치한 경우에 대하여, 전체 가열로 중에서 예열대만을 대상으로 하여 수치해석을 수행하였다. Fig.7은 계산된 노온과 산소농도 분포를 나타내는데 노온분포를 Fig.4와 비교하면 추가로 설치된 중앙 댐이 차가운 외부공기의 유입을 차단하고 있으며, 기존 댐과 중앙 댐 사이 영역의 온도가 상승한 것을 알 수 있다. 이는 하부버너를 통해 분출되는 고온의 폐가스가 기존 댐 사이를 통과하다가 중앙 댐을 만나면 이를 돌아 들어오게 됨으로써 발생한 현상이며(Fig.8 (a)), 폐가스 유동이 중앙 댐을 돌아 가열로 측면부에서 중심부로 향하기 때문에 중심부와 측면부간의 온도차도 줄어들게 된다.

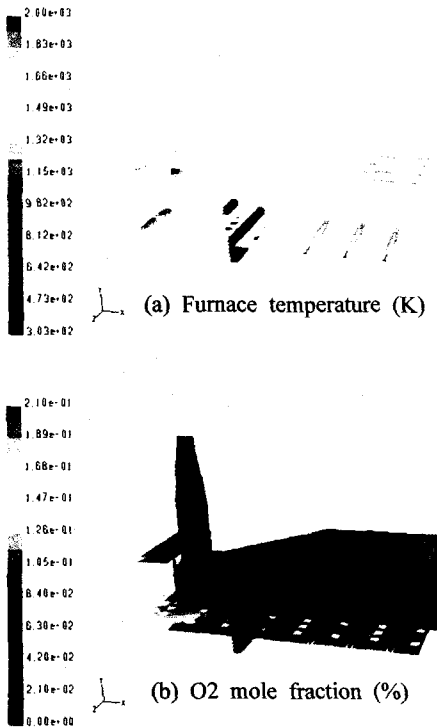
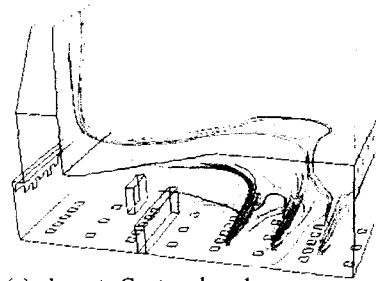
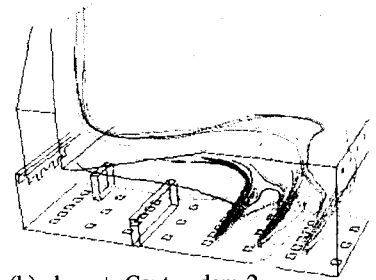


Fig.7 Contours of furnace temperature and O_2 mole fraction (dam+Center dam-1)



(a) dam + Center dam-1



(b) dam + Center dam-2

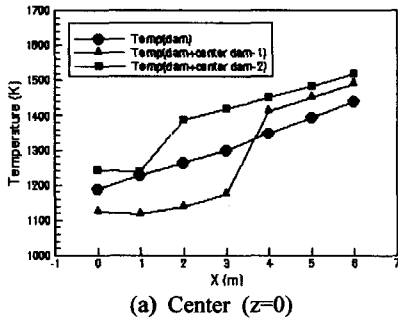
Fig.8 Path lines from side burners

4.2.2 중앙댐-2의 경우

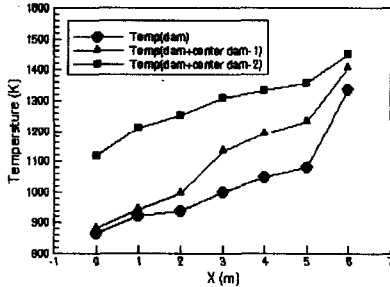
중앙 댐을 중앙댐-1의 경우보다 가열로 입측으로 2m 앞쪽인 $x=1.4m$ 위치에 설치하면 중앙 댐을 돌아 나오거나 넘어가는 폐가스는 바로 입구벽을 마주하게 된다(Fig.8 (b)). 이 경우 가열로 입측($x=0$)에서 유입되는 공기는 중앙댐-2에 의해 앞쪽에서 차단되고, 가열로 측면부를 따라 노내로 퍼져가게 됨으로써 유입공기가 슬라브 표면에 미치는 영향이 줄어들 것으로 예상된다.

4.3 고찰

가열로 중앙부에 추가로 댐을 설치하면, 노 중심부를 따라 이동하는 고온의 폐가스가 중앙 댐을 넘어가는 유동과 댐을 돌아 노의 측면부로부터 중심으로 향하는 유동으로 분리된 후 섞이게 되어 가열로의 폭방향 온도편차를 줄여주는 효과를 나타내게 된다. Fig.9-10은 노의 중심부($z=0$)와 측면부($z=4.5m$)에서 높이 0.8m 부근의 온도 및 산소농도 계산결과를 보여주고 있다.



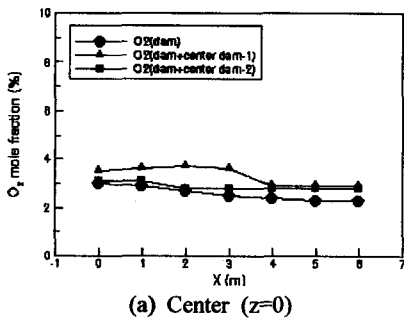
(a) Center ($z=0$)



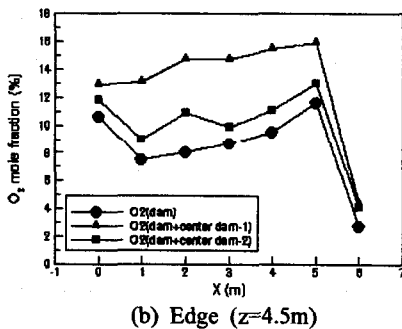
(b) Edge ($z=4.5m$)

그림 27

Fig.9 Furnace temperature along the X-axis



(a) Center ($z=0$)



(b) Edge ($z=4.5m$)

Fig.10 O2 mole fraction along the X-axis

중앙 댐을 가열로 입측에 가까이 설치한 경우 (중앙댐-2)가 기존 댐만이 있는 경우보다 중심부와 측면부 모두 높고 균일한 노온분포를 확보할 수 있었고(Fig.9), 산소농도의 경우는 노 중심부의 산소농도분포(Fig.10 (a))가 세가지 계산경우에 대하여 큰 차이를 보이지 않는 반면에, 중앙 댐을 설치하면 노내로 침입한 외부공기가 가열로 측면을 따라 이동함으로써 이곳의 산소농도 값은 기존 댐만 있는 경우에 비해 높게 나타나고 있다.

5. 결론

기존 댐을 포함하는 전체 가열로를 대상으로 노내 유동특성 및 온도, 산소농도 등의 분포를 계산하였고, 가열로의 예열대만을 대상으로 중앙 댐 설치위치에 따라 수치해석을 수행하였다.

1. 포항제철소 열연 가열로의 예열대에 설치되어 있는 기존 댐은 연소가스를 노 중심부로부터 측면부로 이동시켜, 노온의 경우 중심부의 온도가 높게 나타나고 산소농도의 경우는 반대로 측면부로 갈수록 높아지게 된다.

2. 가열로 중앙에 댐을 설치하면 슬라브 하부의 유동특성이 변하여, 연소가스가 측면부에서 중심부로 향하는 유동을 만들고 따라서 가열로 폭방향의 온도 및 산소농도 편차를 줄여주는 효과를 얻을 수 있다.

3. 통상적인 조업조건에서 외부공기 유입속도가 1m/s로 같은 경우, 중앙 댐을 가열로 입측에서 가까운 지점($x=1.4m$)에 설치할수록 높고 균일한 노온이 확보되며, 중앙 댐을 설치하면 가열로 내로 유입된 공기를 슬라브에 영향을 미치지 않는 노의 측면부로 이동시키는 효과가 얻어진다.

참고문헌

- (1) E.S. Oran and J.P. Boris, 1987, "Numerical Simulation of Reactive Flow", Elsevier, N.Y.
- (2) F.A. Williams, 1985, "Combustion Theory", 2nd edition, Addison-Wesley
- (3) W.P.Jones and J.H.Whitelaw, 1982, "Calculation Methods for Reacting Turbulent Flows", Combust. Flame, vol.48, pp.1~26