

Oxy-coal 버너 사용이 연소대 온도에 미치는 영향

정진경[†] · 박판욱*

포항제철 기술연구소

*부산대학교 화학공학과

(1998년 4월 1일 접수, 1998년 7월 21일 채택)

Effects of Oxy-coal Injection on Blast Furnace Raceway Temperature

Jin-Kyung Chung[†] and Pan-Wook Park*

POSCO Research Laboratories, Kwangyang, Korea

*Dept. of Chem. Eng., Busan National Univ., Busan, Korea

(Received 1 April 1998; accepted 21 July 1998)

요 약

Oxy-coal 버너를 사용하여 미분탄 취입을 하는 경우 고로 연소대 온도를 측정하고 연소대 반경방향의 온도에 미치는 영향을 고찰하였다. 연소대 온도 측정은 고로 휴지시 코크스 샘플링을 통해 얻어진 코크스의 XRD분석, R-type 열전대를 이용한 직접측정, 2색 고온 온도계를 이용한 연소대 온도 최고점 측정을 통해서 이루어 졌으며, oxy-coal 버너 사용시 버너선단 주위 산소농도를 실험실적으로 측정하였다. 이러한 연소대에서 온도 및 산소성분의 거동을 파악하기 위해서 연소대에서 oxy-coal 버너 사용시 코크스와 미분탄의 연소반응을 고려한 1차원 연소모델을 사용하여 연소대 반경방향의 온도 및 성분 분포를 구하였으며 위의 측정값과 비교한 결과 매우 잘 일치하는 것을 알 수 있었다.

Abstract—Oxy-coal injection effects on blast furnace raceway temperature were discussed based on coke sampling experiments through the tuyere of blast furnace, measurement by R-type thermocouple and two-color pyrometer. To analyze the reason for the increase of coal combustion ratio by oxy-coal injection, the oxygen concentration was measured in the simulated experimental of oxy-coal burner. The one-dimensional mathematical model considering the kinetics of coal and coke combustion was developed in other to simulate the combustion characteristics, such as gas temperature and composition in the raceway. It was found that the calculated peak temperature of gas well concurred with the measured temperature according to oxygen enrichment through the oxy-coal burner.

Key words: Oxy-Coal Injection, Blast Furnace, Raceway Temperature

1. 서 론

일관 제철소에서는 용선(pig iron)을 생산하기 위해서 연속식 항류 화학반응기의 일종인 고로(blast furnace)의 상부에 원료인 철광석과 연료인 코크스를 장입하고 하부로는 1,200 °C의 열풍을 5,500-6,300 Nm³/min으로 공급하여 철광석을 고로내에서 환원시키기 위한 가스를 생성시킨다. 고로 하부에 있는 풍구를 통해서 공급되는 고온 공기의 송풍에너지에 의해서 풍구 전에는 코크스가 선화하면서 연소되는 공동이 생성되며 이곳을 연소대(raceway)라고 부른다. 고로조업에서 연소대는 인체의 심장부에 해당하는 곳으로서 철광석 환원에 필요한 열과 CO가스를 생성시켜서 고로 전체로 공급하는 역할을 하게 된다. 상부로 장입된 철광석은 고로내의 1,100 °C근처에서 환원 용융되어 용융하게 되고 이 용융물은 연소대를 지나 계속 하강하여 1,500 °C의 용융된 상태로 노저에 쌓이게 되고 노저 용융물 배출구를 통해서 노

외로 배출되게 된다. 이러한 전통적인 용선 생산 방법은 코크스용 강점결성 석탄 부족으로 인해 어려움을 겪게 되었다. '70년대 이후 각국에서는 코크스를 대체할 연료로서 중유를 고로 하부 연소대에 취입하여 철광석 환원에 필요한 열과 환원가스를 생성시킴으로서 코크스의 역할을 일부 담당하게 하였다. 그러나 1970년대 중반의 두 차례의 오일 쇼크로 인해서 용선원가가 크게 증가되었으며 중유를 대체할 수 있는 연료인 미분 석탄 취입이 각광을 받기 시작하였다[1].

1980년대 초부터 시작된 미분탄 취입은 현재 용선을 생산하는데 필요한 연료의 약 35-40 %를 담당하고 있다. 세계 각국에서는 원가를 절감하기 위해서 연료 중 60-70 %를 미분탄으로 대체할 수 있는 기술을 개발 중에 있다. 이러한 다량의 미분탄 취입은 용선 생산조업에 여러 가지 문제를 일으켰다. 그중 가장 큰 것은 통기성 불량으로서 미분탄이 코크스를 대체함으로써 고로하부에서 유입된 가스의 통로 역할을 하는 코크스가 노내에서 감소하게 되고 따라서 하부에서 발생된 열 및 환원가스를 철광석 충전층 중에 균일하게 전달하지 못하여 철광석의 환원이 잘 이루어지지 않게 되었다. 또 하나의 요

[†]E-mail: pc543984@smail.posco.kr

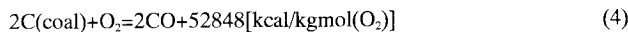
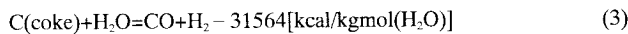
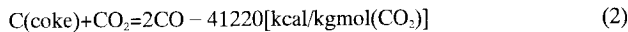
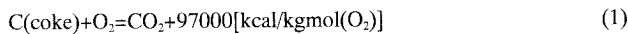
인으로는 미연소 미분탄의 발생을 들 수 있다. 다량의 미분탄 취입으로 인해서 미연소된 미분탄이 노내에 축적되므로서 가스 및 용융물의 흐름을 막아 철광석의 환원효율이 떨어지고 용선의 배출이 원활하지 못하였다. 또한 미연소 미분탄이 고로 외부로 배출되므로서 연료의 손실을 가져왔다. 이러한 문제들을 해결하기 위해서 미분탄 취입 버너의 구조를 개선하여 미분탄의 연소성을 높이는 방법을 사용하기도 한다[1, 2].

본 연구에서는 외부관에 순산소를 취입하고 내부관에 미분탄이 취입되는 이중관 구조의 버너인 oxy-coal 버너의 사용이 연소대 온도에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 이 론

2-1. 고로 연소대내 반응

고로 연소대는 취입된 열풍의 송풍에너지에 의해서 생성되며 열풍중 산소와 연료가 반응하는 곳으로서 평균온도는 2,100 °C로서 약 1m의 크기이다. 미분탄을 취입하는 경우 이곳에서 주요 반응은 다음과 같다[3].



미분탄은 다량의 탄화수소로 이루어진 휘발분을 함유하고 있기 때문에 연소대에서 열적으로 분해되면서 연소된다. 즉 미분탄에 함유된 수분의 방출 및 휘발분의 열분해가 일어나 착화되며, 이어서 고체 석탄입자의 연소반응이 진행된다. 그러나 미분탄 입자의 미세한 입도 및 높은 분위기 온도를 감안할 때 휘발분과 고체 탄소분의 연소가 거의 동시에 진행된다고 추정할 수 있다.

연소반응의 반응속도는 열전달, 기공확산을 포함한 물질전달 및 반응표면에서의 화학반응속도와 유체역학적인 난류혼합 특성 등에 영향을 받게 된다. 코크스 입자의 경우에 대한 반응속도식은 비가역 1차 반응이며 가스 경막내 확산과정이 반응 율속단계라고 가정하였다. 따라서 코크스 단일 입자에 대한 반응속도 γ_i 는 다음과 같이 쓸 수 있다[3].

$$\gamma_i = \pi d_p^2 k_i c_i \quad (\text{kgmol/hr}) \quad (5)$$

여기서 c_i : 가스경막내 반응물 i 의 농도(kgmol/m³)

d_p : 코크스 입경(m)

k_i : 반응물 i 의 가스경막내 물질이동 계수(m/hr)

반응물 O_2 , CO_2 및 H_2O 에 대한 연소대 단위 용적당 반응속도를 R_1^* , R_2^* 및 R_3^* 이라고 하면 연소대 단위 부피 중 코크스 입자수와 코크스 단일입자의 반응속도(γ_i)를 곱함으로써 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R_1^* = \{146.3(1 - \epsilon) k_{fO_2} P_{yO_2}\} / d_p (T + t_c) \quad (6)$$

$$R_2^* = \{146.3(1 - \epsilon) k_{fCO_2} P_{yCO_2}\} / d_p (T + t_c) \quad (7)$$

$$R_3^* = \{146.3(1 - \epsilon) k_{fH_2O} P_{yH_2O}\} / d_p (T + t_c) \quad (8)$$

여기서, P : 가스압력(atm), T : 가스온도(K), t_c : 코크스온도(K), y_i : 경막내 반응물 i 의 부피분율, ϵ : 연소대 공극률

고로에 취입되는 미분탄 중에는 고체탄소외에 휘발분인 탄화수소가 약 30%정도 함유되어 있으며, 모든 반응물에 대한 연소반응속도식을 수립하는 것은 용이하지 않다.

大野 등[4]은 거시적인 반응속도식을 구하기 위해서 (4) 식과 같은

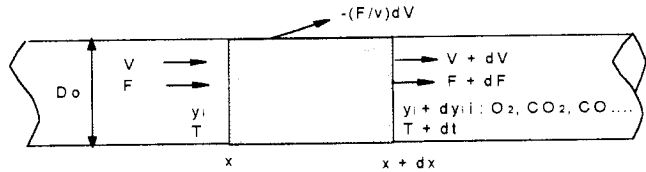


Fig. 1. Variables for calculating heat and mass balance in raceway.

반응식이 미분탄의 연소반응을 지배한다고 제시하였으며 연소 반응속도, R_4^* 를 다음과 같이 제시하였다.

$$R_4^* = 6(W_s/V_g) / (\rho_{pc} d_{pc}) K C_{O_2} \quad (9)$$

여기서 R_4^* : 연소속도(kgmol/m³ · hr)

W_s : 미분탄 유입유량(kg/hr)

V_g : 가스유량(m³/hr)

ρ_{pc} : 미분탄입자 겉보기 밀도(kg/m³)

d_{pc} : 미분탄 입자경(m)

K : 총괄 반응속도계수(m/hr)

C_{O_2} : 연소 공간내 산소 몰농도(kgmol O₂/m³)

이때 총괄 반응속도계수는 실험실적으로 측정된 값인 4.7×10^{-4} m/hr인 것으로 제시하였다.

2-2. 연소대 반경방향의 열 및 물질수지

코크스 및 미분탄에 대한 연소 반응식을 기본으로 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 연소대내에서 단면적이 A (m²)인 미소구간 dx (m) 주변에서 용적 유량 수지를 세우면 다음과 같다[3].

미분탄 취입버너의 끝단부터 x (m) 위치에서 유입되는 가스유량을 F (Nm³/hr), $x+dx$ 위치에서 유출되는 가스의 유량을 $F+dF$ (Nm³/hr)이라고 하고, 원통벽에서 빠져나가는 가스의 유량을 ΔV_i (Nm³/hr), 반응에 의해 증가하는 가스의 유량을 ΔV_i (Nm³/hr)라고 하면 다음식이 성립된다.

$$(F+dF) + \Delta V_i = F + \Delta V_i \quad (10)$$

미소구간 dx 에 대해서 O_2 , CO_2 , CO , H_2O , H_2 각 성분에 대해 물질수지식을 세워 정리하면 다음과 같이 각 성분농도에 대한 미분 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dy_{O_2}}{dx} = \frac{-22.4A}{F} \{R_1^* + y_{O_2}(R_2^* + R_3^* + R_4^*)\} \quad (11)$$

$$\frac{dy_{CO_2}}{dx} = \frac{22.4A}{F} \{R_1^* - (1 + y_{CO_2})R_2^* - y_{CO_2}(R_3^* + R_4^*)\} \quad (12)$$

$$\frac{dy_{CO}}{dx} = \frac{22.4A}{F} \{(2 - y_{CO})R_2^* + (1 - y_{CO})R_3^* + (2 - y_{CO})R_4^*\} \quad (13)$$

$$\frac{dy_{H_2O}}{dx} = \frac{-22.4A}{F} \{R_3^* + y_{H_2O}(R_2^* + R_3^* + R_4^*)\} \quad (14)$$

$$\frac{dy_{H_2}}{dx} = \frac{22.4A}{F} \{R_3^* - y_{H_2}(R_2^* + R_3^* + R_4^*)\} \quad (15)$$

여기서, y_{O_2} , y_{CO_2} , y_{CO} , y_{H_2O} , y_{H_2} : O_2 , CO_2 , CO , H_2O , H_2 의 부피비율[-]

풍구 연소대에서 축방향의 가스 온도분포를 구하기 위해서 미소구간 dx 에 관하여 열수지를 세우면 입열은 x 지점에서 유입되는 가스현열, 반응열, 코크스 현열 등이고 출열은 $x+dx$ 지점에서 유출되는 가스현열, 고속분출로 인해 미소구간 밖으로 퍼져서 소실되는 가스현열, 가스로부터 코크스 입자로의 전열량 등이다. 이에 대한 각각의 수식을 정리하면 다음과 같다.

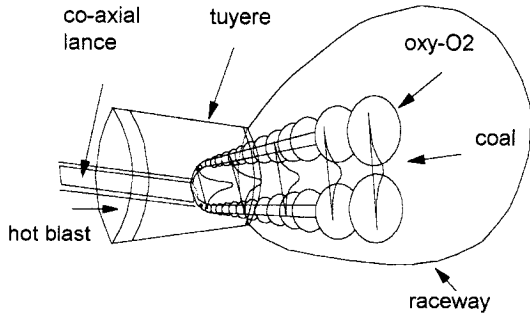


Fig. 2. Schematic view about mixing oxygen with hot blast and pulverized coal around nozzle tip.

$$\frac{dT}{dx} = \frac{A}{(\rho_g c_g F)} \{ -22.4 \rho_f c_f T (R_2^* + R_3^* + R_4^*) - 6(1-\epsilon) h_p \{ (T-t_c)/d_p - (T-t_{coal})/d_{pcoal} \} + 97000 R_1^* - 41220 R_2^* - 31564 R_3^* + 52848 R_4^* \} + c_c t_c (R_1^* + R_2^* + R_3^*) + c_{coal} t_{coal} R_4^* \quad (16)$$

여기서, c_c , c_{coal} : 코크스 및 미분탄의 평균비열, ρ_g : 가스의 평균밀도, c_g : 가스의 평균비열, h_p : 입자와 유체간의 전열계수, t_{coal} : 미분탄 온도

2-3. Oxy-coal 사용시 미분탄 연소 모사 모델

이중관을 사용하여 산소와 미분탄을 동시에 취입하는 경우 미분탄 주위의 산소농도가 아주 높을 것으로 생각된다. Fig. 2는 이중관을 사용하여 미분탄을 취입하는 경우 미분탄과 산소, 열풍과 산소와의 혼합상황을 모사한 것으로 버너노즐 주위에서는 $180 \text{ Nm}^3/\text{min}$ 의 열풍공기가 송풍되고 버너노즐의 이중관 사이에서는 $290 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ 의 산소가 취입되며 이중관 중 내부관에서는 미분탄이 2 t/hr 의 속도로 고로 내부로 유입된다. 이때 순수공기를 미분탄 주위에 취입하는 경우 초기의 산소농도는 21%를 나타내게 된다. 그러나 이중관 사이에 순산소를 취입하는 경우 초기의 산소농도가 산소유량에 따라서 다르게 될 것으로 생각된다. 식 (17)은 Fig. 2에 나타난 것과 같이 이중관 사이로 취입되는 산소 중 1/2이 미분탄쪽으로 1/2은 열풍쪽으로 섞인다는 가정하에 미분탄 주위 초기산소농도(y_{O_2})를 설정하는 식을 나타내고 있다.

미분탄 주위 초기산소농도 y_{O_2} 는 란스형상 및 oxy-coal로 취입되는 산소량에 따라 변화되는 미분탄 주위 취입산소량과 란스형상에 따라서 미분탄 연소에 참여하는 송풍량의 비로 나타난다고 가정하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$y_{O_2} = \frac{\left(0.21 \cdot 60 \cdot F_b + F_{oxy} + \frac{F_{oxy-coal}}{2} \right) C_{oxy} + \frac{F_{oxy-coal}}{2} D_{oxy}}{(60 \cdot F_b \cdot C_{oxy})} \quad (17)$$

여기서

$$D_{oxy} = \frac{\frac{F_{oxy-coal}}{2} D_{oxy}}{\left(0.21 \cdot 60 \cdot F_b + F_{oxy} + \frac{F_{oxy-coal}}{2} \right)} \quad (18)$$

라고 하면

$$y_{O_2} = \frac{\left(0.21 \cdot 60 \cdot F_b + F_{oxy} + \frac{F_{oxy-coal}}{2} \right)}{\left(60 \cdot F_b \cdot \frac{C_{oxy}}{C_{oxy} + D_{oxy}} \right)} \quad (19)$$

여기서 F_b : 송풍량(Nm^3/min)
 F_{oxy} : 열풍 중 산소부화량
 $F_{oxy-coal}$: 이중관으로 부화되는 산소량
 C_{oxy} : 버너형상에 따른 계수
 D_{oxy} , D_{oxy} : oxy-coal량에 따른 계수

이상의 다원 연립 상미분방정식의 해를 Runge-Kutta-Gill방법을 사용하여 쉽게 구할 수 있었다[5].

3. 실험

3-1. 연소대 온도 추정

고로하부로 취입하여 연소시키는 석탄은 일반탄으로서 코크스를 제조하기 위해서 사용되는 강점탄을 대체하기 위해서 사용되고 있다. 본 연구에서 사용된 석탄의 성상을 Table 1에 나타내었다.

고로 연소대는 미분탄 및 코크스의 연소로 인해서 축방향의 온도 분포가 있다. 연소대 최고점 온도는 $2,300\text{--}2,500^\circ\text{C}$, 압력은 4 kg/cm^2 정도이다. 고온, 고압인 조업 중에 연소대 온도를 직접 측정하는 것은 어려운 점이 있으며 다음과 같은 방법을 사용하여 연소대 온도를 측정하였다.

3-1-1. 코크스 샘플링에 의한 온도측정

고로 설비 휴지시 연소대내 코크스를 채취하고 코크스의 이력온도를 측정하여 연소대내 가스온도를 간접 측정하였다. Fig. 3은 연소대 구조 및 코크스 샘플링의 모식도를 나타내는 것으로서 풍구 바로 전에는 레이스웨이내로 유입되기 위해서 대기하고 있는 보쉬 코크스이며, 레이스웨이는 풍구로 유입되는 고속의 열풍으로 인해서 생기는 공동으로 이곳에서 코크스 및 미분탄이 선화하면서 연소된다. 레이스웨이를 지난 가스는 송풍에너지가 감소하면서 레이스웨이 가장자리에 미연소 코크스 및 미분탄 입자를 퇴적시키며 이러한 곳을 버드네스트라 한다. 이곳 다음에는 코크스의 연소나 움직임이 거의

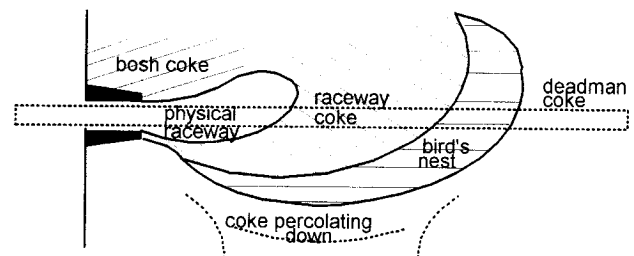


Fig. 3. Schematic view of raceway structure and coke sampling lance (dotted line).

Table 1. Typical characteristics of sample coal

Pyrolysis analysis				Ultimate analysis				Calorific value(Kcal/kg)	
IM(%)	Ash(%)	VM(%)	FC(%)	C(%)	H(%)	N(%)	O(%)	S(%)	
2.64	8.43	31.1	57.83	83.45	5.28	1.88	8.96	0.43	7485

IM(inherent moisture), VM(volatil matter), FC(fixed carbon)

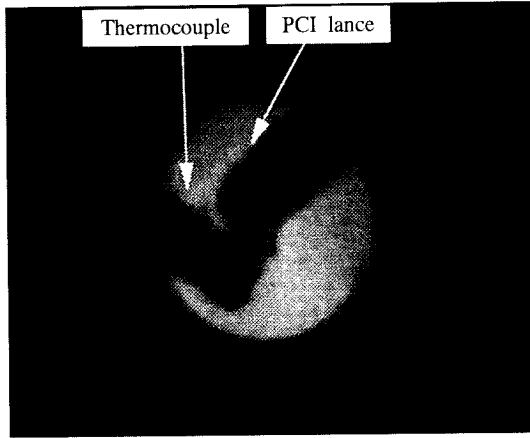


Fig. 4. Thermocouple and pulverized coal injection nozzle in blast furnace.

없는 구역인 데드맨이 있다[6].

각 부위에서 채취된 코크스를 XRD(RIGAKU, model: D/MAX III)로 측정하고 002면 회절각도($\text{CuK}\alpha$) $2\theta=26^\circ$ 에서 나타난 피크의 반가폭(Hw)을 분석하여 탄소의 흑연화도에 따른 코크스 열이력온도(T_{coke})를 다음과 같은 관계식을 이용하여 구하였다[7].

$$T_{\text{coke}} = -623.44 \ln(0.07384 \text{ Hw}) \quad (20)$$

3-1-2. 열전대에 의한 측정

열전대는 연소대 온도를 직접 측정하는데 있어서 매우 중요한 측정기구이다. Fig. 4에 나타난 것과 같이 미분탄 투입랜스의 반대편에서 B-type 열전대를 삽입하여 노즐선단 직하와, 선단으로부터 80 mm 지점에서 온도를 측정하였다.

3-1-3. Two-color pyrometer에 의한 측정

열전대에 의한 온도측정은 매우 정확하고 유용하나 최고 측정온도가 $1,800^\circ\text{C}$ 이므로 고온을 측정하기 위해서는 광학적인 측정기기를 이용하여야 한다. 그중 고로와 같이 열악한 환경에서 비교적 정확한 온도 데이터를 측정할 수 있는 것으로 알려진 미국 IRCON사의 two-color pyrometer를 사용하여 연소대내 최고점온도를 측정하였다.

3-2. 이중관 사용시 노즐주위 산소농도 분포조사

이중관 구조인 노즐을 사용하였을 때 노즐에서 분사된 각 기체의 혼합도를 알아보기 위해서 내경이 150 mm인 원통관 중심에 노즐을 위치시키고 노즐중앙에는 질소를, 관사이에는 산소를 취입했을 때 노즐선단 및 선단으로부터 50 mm, 200 mm 지점에서 산소농도를 측정하였다. 각 지점에서 반경방향으로는 관 중심인 center부분과 관 중심으로부터 75 mm 지점인 wall부에서 산소농도를 측정하였다. 산소농도는 on-line으로 분석이 가능한 일본 Toray사의 산소농도 측정기(LC-750H)를 이용하였다.

원통관 중앙에 설치된 노즐은 외부관 외경이 48.5 mm, 내경이 41 mm, 내부관 외경이 34 mm, 내부관 내경이 25 mm인 이중관으로서 현장에서 사용 중인 것과 동일한 노즐을 사용하였다. 취입가스는 미분탄 수송가스로 사용되는 질소를 내부관에 $100 \text{ Nm}^3/\text{hr}$, 이중관 사이에 순산소를 $300 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ 취입하여 산소농도를 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

고로내 연소대 온도는 전체의 고로조업 상태를 결정하게 되므로 매

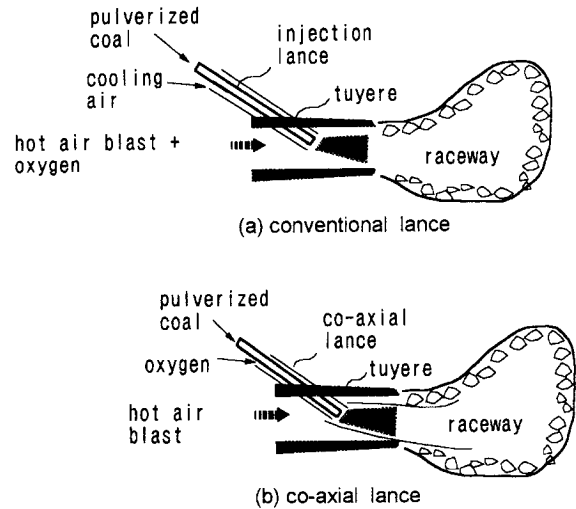


Fig. 5. Schematic view of pulverized coal injection system with the nozzle configuration.

우 중요하게 관리되는 인자이다. 특히 미분탄 취입 고로에서는 미분탄의 연소 상태를 나타내는 수단으로 이용되기도 한다. 허[7] 등은 고로내 온도분포를 구하기 위하여 코크스의 이력온도를 측정하였다. 미분탄 취입량 증가와 함께 oxy-coal 버너 사용으로 연소대에서 온도 분포는 크게 달라질 것으로 예상된다. Fig. 5는 이중관내에 공기를 사용하여 미분탄을 취입하는 경우와 산소를 사용하는 경우에 대해 풍구 및 연소대내에서 연소상황을 도식적으로 나타낸 것이다. 이중관 사이에 공기를 사용하는 경우 열풍 중에 부화된 산소와 미분탄과의 접촉을 방해하여 연소효율을 나쁘게 하는 것으로 생각된다. 산소를 사용하는 경우 미분탄 주위의 산소농도가 국부적으로 높아질 것으로 예상되며 연소대에서 미분탄 연소가 격렬하게 일어나고 연소대의 온도가 높게 될 것으로 예상된다. 이때 연소대 온도에 따라서 연소대내에서 선회하는 코크스 및 주위 코크스 중 탄소의 결정화 정도가 다르게 되며 이것을 분석하면 연소대의 온도를 간접적으로 추정할 수 있다.

4-1. 코크스 샘플링에 의한 연소대 온도 추정

Fig. 6은 oxy-coal을 하는 경우와 하지 않는 경우에 미분탄 취입량별

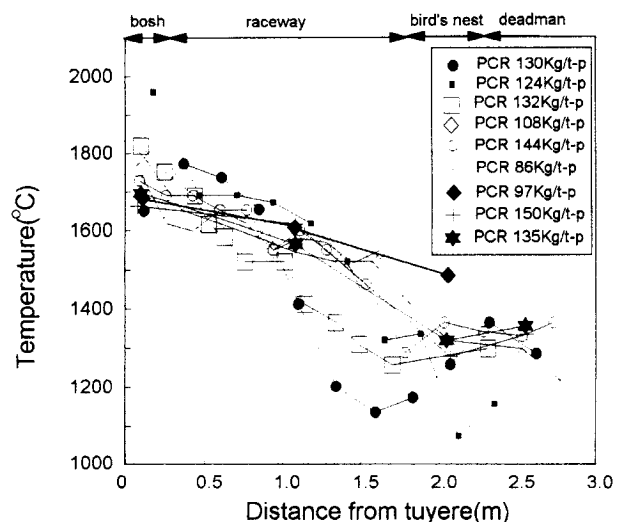


Fig. 6. Coke temperature estimated by XRD in radial direction of blast furnace.

Table 2. Operating conditions at oxy or non-oxy coal injection

No. of sample	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8
Burner type	non-oxy	non-oxy	non-oxy	non-oxy	oxy-coal	oxy-coal	oxy-coal	oxy-coal
PCR(Kg/t-p)	130	108	86	97	132	144	150	135
PD(ton/day)	8684	8767	8311	8742	8632	8816	8800	8833
VB(Nm ³ /min)	5789	6243	6196	6271	6095	5973	5975	6008
O ₂ in VB	9600	7248	4570	5100	—	3000	5000	3500
O ₂ in burner	—	—	—	—	8000	9000	10000	10000

연소대내 반경방향의 코크스의 이력온도를 나타내고 있으며 Table 2 에는 각각의 경우에 대한 조업조건을 표시하였다. 풍구 선단으로부터 0-0.4m 구역인 보쉬부 코크스 평균온도는 1,700-1,800 °C정도를 나타내고 있으며 선단으로부터 0.4-1.7m 구역인 레이스웨이 코크스 평균온도는 1,400-1,600 °C정도를 나타내고 있다. 미분의 코크스 및 석탄과 용융물과의 혼합으로 인해 노중심으로 가스가 흐르는 것을 막고 있는 버드네스트 부분은 1,300-1,400 °C를 나타내고 있으며 풍구선단으로부터 1.7-2.3m 구역에 위치한다. 연소대 가스의 영향이 적은 노중심의 데드맨 코크스의 경우 열이력온도는 1,300 °C정도의 온도 분포를 나타냈다.

Fig. 7은 oxy-coal을 하는 경우와 하지 않는 경우에 대해서 연소대

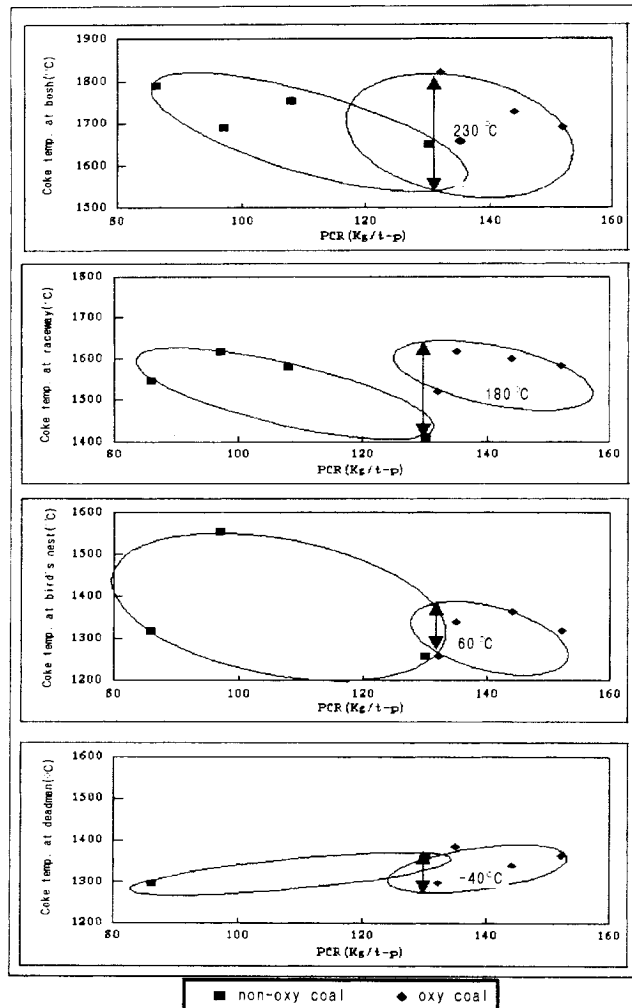


Fig. 7. Coke temperature estimated by XRD analysis of the coke obtained from tuyere.

반경방향의 각 부분에 대한 온도 분포를 나타낸 것이다. (a)는 풍구 선단으로부터 0.2m지점에서 열이력온도를, (b)는 1.1m, (c)는 1.7m, (d)는 2.2m 지점의 열이력온도를 나타내고 있다. 어느 경우든 미분탄 투입량 증가에 따라서 연소대 온도는 미분탄 투입량 1 Kg당 3 °C의 감소가 있을 것이라는 종래의 결과와 잘 일치하고 있다[8]. 이것은 미분탄이 코크스와 달리 연소대내로 투입되는 온도가 거의 상온에 가까우므로 인해 코크스에 비해 현열이 매우 적기 때문에 미분탄 투입량 증가와 함께 연소대 온도가 감소하는 이유이기도 하다. 그러나 oxy-coal 버너 사용과 함께 보쉬부에서 온도는 230 °C, 레이스웨이 및 버드네스트에서는 180 °C, 60 °C의 온도 상승이 있었으며 데드맨에서는 오히려 약 40 °C의 온도 감소가 있었다. 이것은 oxy-coal 버너 사용으로 인해 미분탄 투입 선단 부분에서 산소농도의 증가에 기인한 것으로 생각된다.

4-2. Oxy-coal 버너의 노즐 주위 산소농도 조사

Fig. 8은 냉간상태에서 이중관에 의한 산소와 미분탄 수송용 가스인 질소와의 혼합상태를 평가한 것이다. 현재 150 Kg/t-p의 미분탄 투입량인 경우와 동일하게 미분탄 수송용 질소유량을 100 Nm³/hr, oxy-coal로 사용하는 산소유량을 300 Nm³/hr 사용했을 경우 노즐 중심과 벽측에서 산소농도분포를 측 방향으로 측정한 결과이다. 벽측 부분에서 산소농도는 노즐선단으로부터 멀어질수록 증가함을 알 수

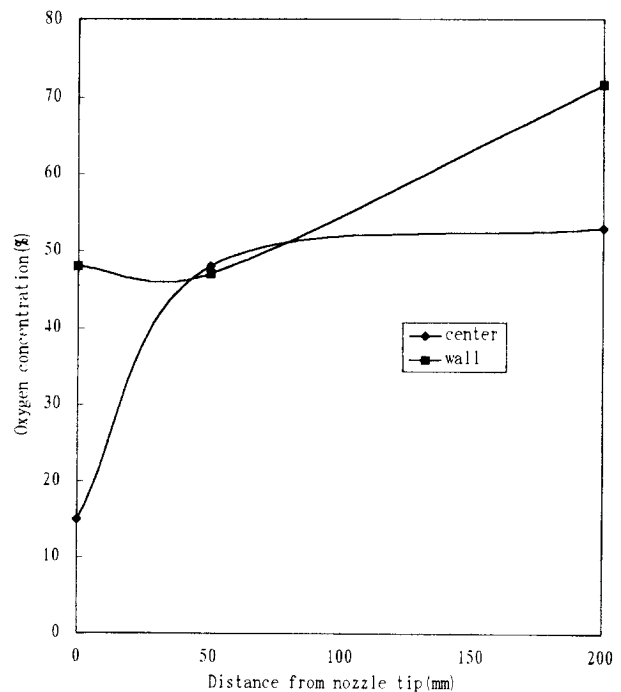


Fig. 8. Oxygen concentration distribution around the nozzle tip of the oxy-coal burner.

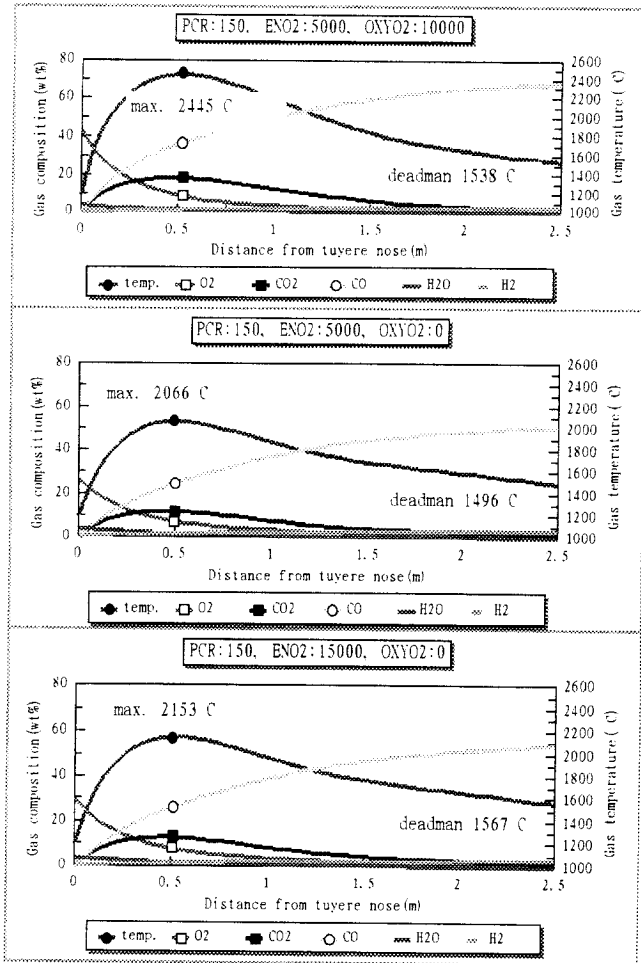


Fig. 9. Calculated gas temperature and composition between tuyere nose and deadman with PCR, oxygen enrichment rate in blast and oxy-coal.

있다. 노즐 중심의 산소농도는 노즐 선단에서는 15% 정도로 매우 낮은 값을 보이다가 선단으로부터 50 mm 지점에서부터 산소와 질소가 어느정도 섞이게 되어 약 50%를 나타내었으며, 노즐 선단으로부터 200 mm 지점에서도 비슷한 산소농도를 나타냈다.

이것은 이중관의 경우 중심에서는 질소흐름의 관성으로 인해서 쉽게 산소가 섞이지 않아서 산소농도는 초기에 노즐 선단에서 혼합된 농도를 그대로 유지하게 된다는 것을 알 수 있으며, 벽측에서는 노즐 선단으로부터 멀어질수록 turbulent flow로 인해 산소가 질소와 점점 균일하게 섞이게 된다는 것을 알 수 있다.

4.3. 수식모델에 의한 연소대 온도 추정

Fig. 9는 미분탄 투입량이 150 Kg/t-p일 때 연소대 온도 및 가스 조성분포를 나타낸 것이다. Fig. 2와 같이 이중관 사이로 투입되는 산소 부화량에 따른 산소의 초기농도를 식 (19)에 의해 설정하고 상미분연립 방정식의 해를 구한 결과 oxy-coal용 산소로 10,000 Nm³/hr를 사용하는 경우 연소대 최고점 온도는 2,445 °C를 나타냈으며, 산소의 초기농도가 50%정도를 나타냈다. 이는 냉간실험에 의해 확인된 산소농도와 거의 일치하였다. 온도의 경우에는 Fig. 7에 나타낸 것과 같이 oxy-coal을 하는 경우 미분탄 투입량 150 Kg/t-p에서 코크스의 이력온도의 최대값은 보쉬부에서 1,725 °C로 나타났으며 Ramm[9]이 가스와 코크스간의 온도구배가 0.75배라고 가정한 것에 비추어

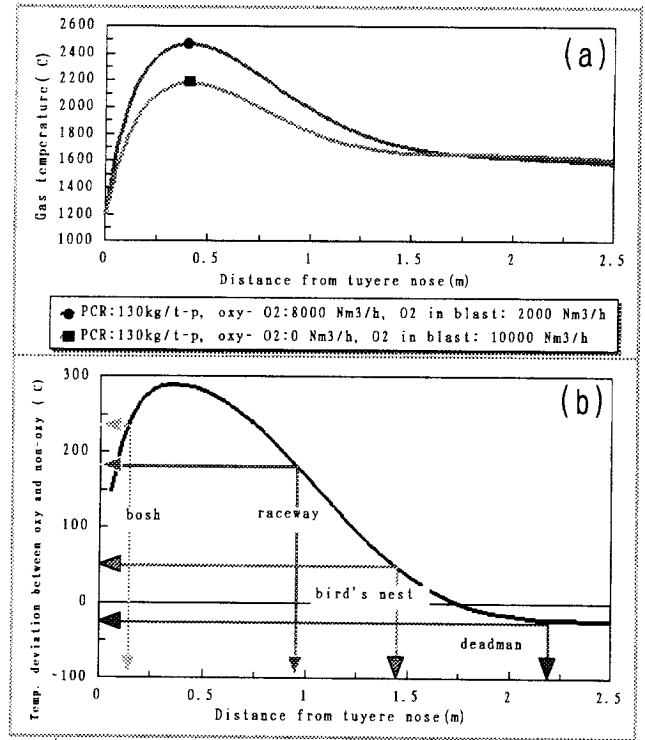


Fig. 10. Calculated gas temperature, (a) and its difference between oxy and non-oxy coal injection, (b).

볼 때 연소대 가스의 온도는 2,300 °C로 추정되며, 계산된 보쉬부의 온도 값과 거의 일치함을 알 수 있다. 또한 oxy-coal취입을 하지 않고 산소부화를 전량 열풍 중으로 하는 경우 보쉬부 온도는 2,070 °C를 나타냈다. Fig. 7에서 oxy-coal용 산소를 부화하는 것없이 미분탄 취입을 150 Kg/t-p하는 경우를 가정하여 보쉬부 온도를 추정해 보면 약 1,550 °C정도를 나타내며 연소대 온도는 2,070 °C로 추정할 수 있으며 이는 계산 결과와 거의 일치함을 알 수 있다. 산소 부화량을 5,000 Nm³/hr로 줄이는 경우 연소대 온도는 2,000 °C이하로 감소하여 보통 2,200 °C 전후로 관리하는 조업 기준에 비추어 볼 때 매우 적은 값이며 따라서 고미분탄 조업에는 충분한 산소 부화가 필요할 것으로 생각된다.

Fig. 10의 (a), (b)는 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 130 Kg/t-p의 미분탄 취입시 oxy-coal 취입을 한 경우와 하지 않는 경우의 코크스 이력온도 값을 동일 조업조건에서 계산한 결과와 비교하기 위해서 나타낸 것이다. 보쉬부에서는 230 °C, 레이스웨이에서는 180 °C, 데드맨에서는 -40 °C의 온도차를 나타낼 때 각각의 풍구로부터 거리는 0.2, 0.95, 2.2 m 등으로 Fig. 7의 경우와 거의 비슷하였다. 그러나 버드네스트의 경우는 1.4 m지점에서 60 °C를 나타냈으며 Fig. 7의 경우는 1.7 m로서 약간의 차이를 보이고 있다. Fig. 7에서도 알 수 있듯이 이 구역에서는 온도의 편차가 아주 심하며 이것은 버드네스트가 분이 축적되는 곳으로서 이분해 의해서 가스흐름이 크게 변하기 때문에 계산값과 실측온도가 잘 일치하지 않는 것으로 생각된다.

4.4. 연소대 온도 측정값과 계산값 비교

Fig. 11은 열전대로 연소대내의 온도를 측정한 결과이다. TC No. 1은 란선단으로부터 80 mm 지점에서 온도를 나타내고 있다. 미분탄 취입전에는 산소부화에 의한 냉각효과로 750 °C정도의 낮은 온도를 보이다가 미분탄 연소와 함께 온도가 급상승하는 것을 알 수 있다. 미분탄 취입량 130 Kg/t-p, 산소부화량 15,000 Nm³/hr인 전반

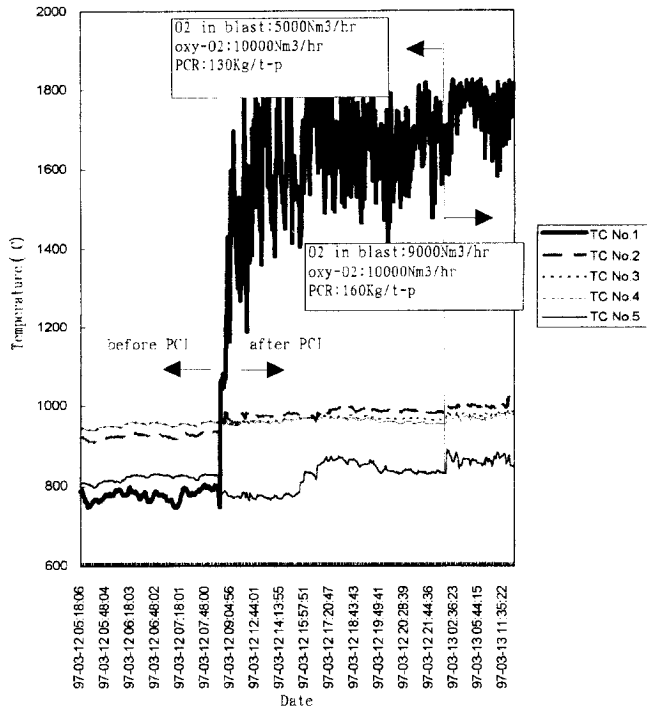


Fig. 11. Temperature variation measured by thermocouple(TC) around nozzle tip in blast furnace with pulverized coal injection rate(PCR).

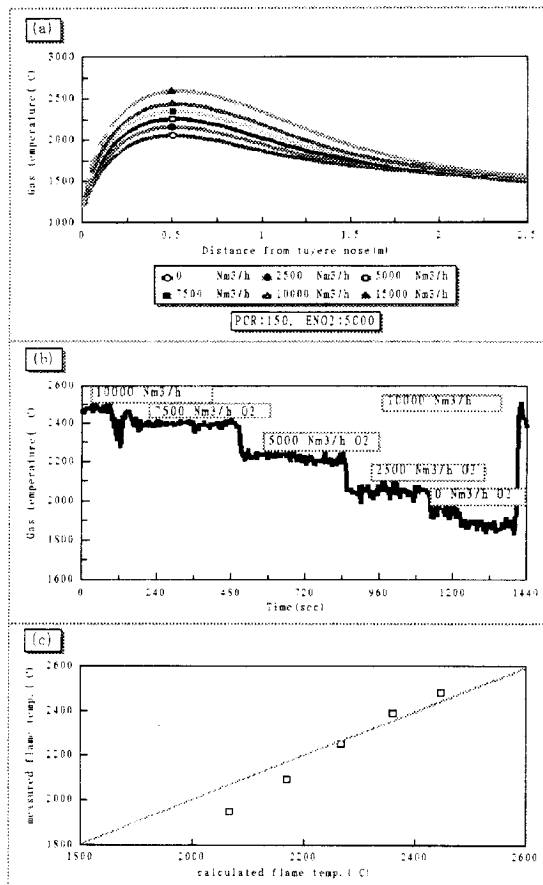


Fig. 12. Calculated, (a), measured, (b), temperature in raceway and relationship between both, (c), with oxygen enrichment rate by oxy-coal.

부에서 온도는 1,600-1,700 °C 정도를 나타내다가 미분탄 취입량 160 Kg/t-p, 산소부화량 19,000 Nm³/hr에서 1,800 °C에 가까워 짐을 알 수 있다. 측정온도의 변화폭이 큰 것은 고속의 열풍에 의해서 미분탄 화염이 일정하지 않고 계속적으로 흔들리게 되어 최고점 위치가 변하게 되므로서 생기는 것으로 생각된다. TC No. 2는 란스선단 직하의 열전대 온도를 나타낸 것으로서 미분탄 취입 시작과 함께 50 °C의 온도 상승이 있었다. TC No. 3, 4는 란스선단으로부터 각각 100 mm 후단에 설치된 것으로서 풍구내 열풍의 온도가 950 °C였다. TC No. 5는 열전대 냉각공기 출구 직전에 설치된 것으로 냉각공기량에 따라서 750-850 °C 정도를 나타냈다. Fig. 9, 10에서 계산된 연소대 온도에서도 란스선단으로부터 80 mm지점에서 온도는 1,600, 1,800 °C로서 열전대에 의해 측정된 결과와 거의 일치하였다.

Fig. 12는 송풍 중으로 산소를 5,000 Nm³/hr, 미분탄 취입을 150 Kg/t-p하였을 때 oxy-coal용으로 사용하는 산소의 부화량에 따른 연소대 최고점 온도변화를 계산하여 two-color pyrometer에 의해 측정된 결과와 비교하였다. (a)에 나타난 바와 같이 oxy-coal로 사용하는 산소부화량이 10,000 Nm³/hr에서 0 Nm³/hr로 감소함에 따라서 2,500 °C에서 2,000 °C로 감소하였다. (b)에 나타난 바와 같이 two-color pyrometer를 가지고 조업 중인 고로의 미분탄 화염에 대해서 측정된 연소대 최고점 온도도 2,500 °C에서 1,900 °C로 감소하였다. (c)에는 계산된 화염온도와 측정된 화염온도와 관계를 나타낸 것으로 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

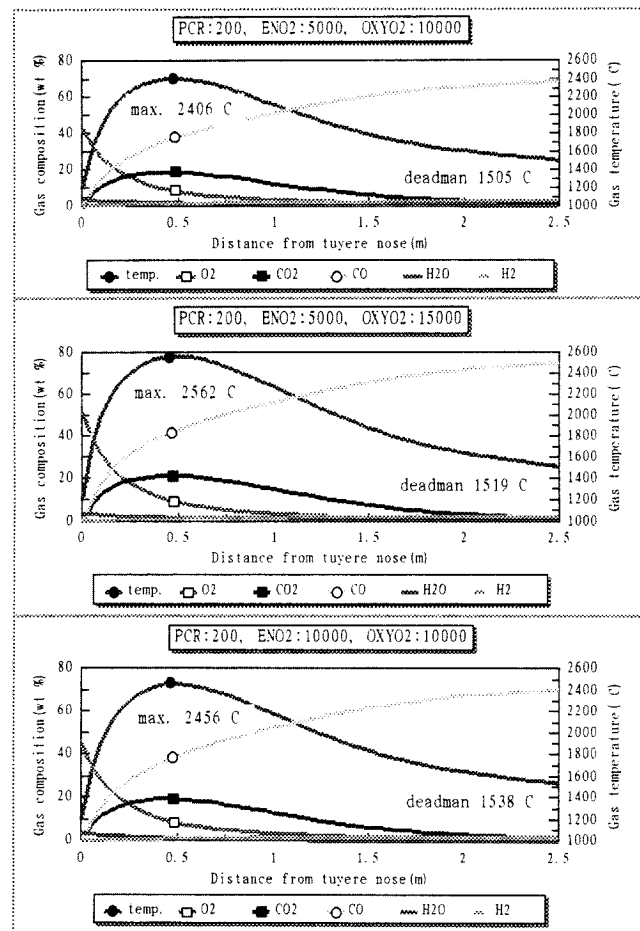


Fig. 13. Gas temperature and composition between tuyere nose and deadman with PCR, oxygen enrichment amount in blast and in oxy-coal nozzle.

따라서 본 연구에서 가정한 모델에 의한 연소대 온도 추정 방법이 매우 타당하며 조업조건 변경 등 연소대 조건이 변할 경우 연소대내에서 온도변화 상황을 잘 예측할 수 있으리라고 생각된다.

Fig. 13은 미분탄 취입을 200 Kg/t-p, 산소부하를 15,000, 20,000 Nm³/hr로 한다고 가정할 때 연소대내 온도 및 농도분포 예측 값을 나타내고 있다. 미분탄 취입비 150 Kg/t-p의 경우와 동일하게 산소 취입량을 15,000 Nm³/hr로 하는 경우 최고점 온도의 감소와 동시에 데드맨에서 온도가 감소하므로서 전체적으로 연소대 온도가 감소하게 된다. 미분탄 취입비 200 Kg/t-p의 경우 열풍 중으로 5,000 Nm³/hr 및 oxy-coal용으로 15,000 Nm³/hr를 하는 경우 초기 산소농도의 증가로 연소대 온도는 매우 증가하나 다량 발생된 CO₂의 흡열 반응으로 인해서 데드맨의 온도가 감소함을 알 수 있다. 열풍 중으로 10,000 Nm³/hr, oxy-coal용으로 10,000 Nm³/hr를 하는 경우 연소대 및 데드맨 온도는 현재 조업의 경우와 거의 비슷하였다.

5. 결 론

(1) Oxy-coal용 이중관 버너를 사용할 때 연소대내 온도분포를 구할 수 있는 모델식을 이용하여 계산한 연소대 온도는 XRD, 열전대 및 two-color pyrometer로 측정된 온도와 유사하였다.

(2) Oxy-coal 버너의 노즐선단 주위 산소농도는 50 % 내외인 것으로 측정되었으며 수식모델에 의해 계산된 결과와 잘 일치하였다.

(3) Oxy-coal용 산소 부하량이 1,000 Nm³/hr 증가시 연소대 최고점 온도는 50 °C씩 상승하는 것으로 나타났다.

(4) Oxy-coal용 산소를 과부화할 경우 연소대에서 온도는 상승하나 노심에서 온도가 감소하여 노심부에서 가스 및 용융물의 흐름에 악영향을 미치게 되므로 열풍 중에 적절한 산소부하가 필요한 것으로 나타났다.

사용기호

A	: cross section area of tuyere [m ²]
C _A	: concentration of the reactant, A, in the gas film [kgmol/m ³]
c _c	: specific heat capacity of coke [kcal/kgmol · °C]
c _{coal}	: specific heat capacity of pulverized coal [kcal/kg · °C]
c _g	: specific heat capacity of gas [kcal/kg · °C]
C _{O₂}	: mole concentration of O ₂ in the combustion area [kgmol O ₂ /m ³]
C _{oxy}	: coefficient due to burner configuration [-]
dF	: volumetric flow rate of output gas from differential segment in the combustion area [Nm ³ /hr]
d _p	: coke diameter [m]
d _{pc}	: coal diameter [m]
dx	: the size of differential segment in the combustion area [m]
F	: volumetric flow rate of input gas to differential segment in the combustion area [Nm ³ /hr]
F _b	: volumetric flow rate of blast [Nm ³ /min]
F _{oxy}	: volumetric flow rate of oxygen into blast [Nm ³ /min]
F _{oxy-coal}	: volumetric flow rate of oxygen in the oxy-coal nozzle [Nm ³ /min]
h _p	: heat transfer coefficient between particle and gas stream [kcal/m ² · hr · °C]

K	: overall reaction rate constant [m/hr]
k _A	: mass transfer coefficient of reactant A through gas film [m/hr]
P	: gas pressure [atm]
R ₁	: reaction rate constant between coke carbon and O ₂ [kgmol/m ³ · hr]
R ₂	: reaction rate constant between coke carbon and CO ₂ [kgmol/m ³ · hr]
R ₃	: reaction rate constant between coke carbon and H ₂ O [kgmol/m ³ · hr]
R ₄	: reaction rate constant between coal and O ₂ [kgmol/m ³ · hr]
T	: gas temperature [K]
t _c	: coke temperature [K]
t _{coal}	: coal temperature [°C]
V _g	: volumetric flow rate of gas [m ³ /hr]
W _s	: volumetric flow rate of input coal [kg/hr]
x	: arbitrary distance from combustion area forefront [m]
y _A	: volumetric ratio of the reactant A in the gas film [-]
y _{CO₂}	: volumetric ratio of CO ₂ [-]
y _{CO}	: volumetric ratio of CO [-]
y _{H₂O}	: volumetric ratio of H ₂ O [-]
y _{H₂}	: volumetric ratio of H ₂ [-]
y _{O₂}	: volumetric ratio of O ₂ in the blast at nozzle tip [-]
y _{O₂}	: volumetric ratio of O ₂ [-]

그리스 문자

γ _i	: reaction rate for a coke particle [kgmol/hr]
ΔV _r	: volumetric flow rate of the gas generated in differential segment [Nm ³ /hr]
ΔV _s	: volumetric flow rate of the output gas from side of differential segment [Nm ³ /hr]
ε	: porosity of combustion area [-]
ρ _g	: average gas density [kg/m ³]
ρ _{pc}	: apparent density of a coal particle [kg/m ³]

참고문헌

1. Peters, K. H., Beppler, E., Korthas, B. and Ppeters, M.: 2nd EIC, 247(1994).
2. Chung, J. K. and Hur, N. S.: *ISIJ int.*, **37**, 119(1997).
3. Han, C. H., Chung, J. K. and Kim, T. D.: *J. KIMM.*, **32**, 204(1994).
4. Ohno, Y., Furukawa, T. and Matsuura, M.: *ISIJ*, **78**, 50(1992).
5. Muchi, I.: Chemical Engineering Practice in Iron Making, 81 (1974).
6. Chung, J. K., Han, C. H. and Cho, B. R.: *AIME ISS*, **54**, 13(1995).
7. Heo, N. H., Chung, J. K. and Kim, T. D.: POSCO internal report, 91A005.
8. POSCO, Kwangyang works, standard book for the technique of blast furnace process(1987).
9. RAMM, A. N.: Byull. TsIINChM, (8): Symposium "Modern Problems of Metallurgy", AN SSSR(1958).