

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2014.38.10.807>

ISSN 1226-4881(Print)
2288-5324(Online)

고로 내 미분탄 연소조건에서 탄종에 따른 입자온도와 CO/CO₂ 배출 특성에 관한 연구

조영재* · 김진호* · 김량균* · 김규보** · 전충환**
* 부산대학교 기계공학부, ** 부산대학교 화력발전에너지분석기술센터

Experimental Study on Particle Temperature and CO/CO₂ Emission Characteristics of Pulverized Coal Combustion Condition According to Coal Types in Blast Furnace

Young Jae Cho*, Jin Ho Kim*, Ryang Gyun Kim*, Gyu Bo Kim** and Chung Hwan Jeon**

* School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.

** Pusan Clean Coal Center, Pusan Nat'l Univ.

(Received February 26, 2014 ; Revised June 23, 2014 ; Accepted June 30, 2014)

Key Words: Laminar Flow Reactor(층류반응기), Residential Time(체류시간), Pulverized Coal Injection (미분탄 공급), Blast Furnace(고로), Iron Oxide(산화 철)

초록: 본 연구는 최근 대형고로에 도입된 PCI 시스템에서 석탄의 탄종에 따른 연소 특성을 파악하기 위해, 고로내 석탄의 연소환경을 잘 모사할 수 있는 층류반응기(LFR)을 이용하여 화염형상을 분석하고, 체류시간별 입자의 온도와 배기가스인 CO와 CO₂를 측정하였다. 화염형상의 가시적인 분석뿐만 아니라, 입자온도와 배기가스의 배출특성을 근거로 하여 휘발분 연소와 좌 연소 구간을 구분하였다. 특히 CO는 고로내 발생하는 산화철의 환원반응에 영향을 주는 인자로서, 본 연구에서는 탄종별 CO의 배출시점과 특성에 대한 분석이 이루어졌다. 휘발분 함량이 많은 탄종의 연소 초기 입자온도는 높게 측정되었지만, 휘발분 연소구간이 길어지면서 이후에 연속적으로 시작되는 좌 연소가 지연되었다. 좌 연소구간에서는 연료비가 높을수록 CO발생량이 상대적으로 많고, 적정온도가 유지되었다.

Abstract: This study was performed using a laminar flow reactor that could replicate the combustion environment of pulverized coal in a blast furnace. Since a pulverized coal injection system was developed for iron making, the combustion characteristics of pulverized coal have been important in the iron and steel industry. The flame structure, particle temperature, and exhaust gas were investigated for different types of coal. The results of this study demonstrated that the combustion characteristics of coal are influenced by several properties of individual coals. In particular, the CO emission and volatile matter content of individual coals were found to have a strong influence on their combustion characteristics. Thus, this study found the properties of the coals to be significant and focused on the particle temperature and CO and CO₂ emissions.

1. 서 론

현재 제철산업에서는 경쟁력의 증대를 위한 대형고로(고로 내용적 2000m³이상) 중심의 조업이 이뤄지고 있고, 고품위 연료의 수요가 증가하고

있다. 하지만 고품위 연료의 고갈과 이로 인한 가격급등 현상이 일어나고 있는 실정이며, 불가피한 저품위 연료 사용의 증가로 고로내부의 온도변화로 인한 제선품질저하 등이 우려된다. 또한 매년 배기 배출물과 관련된 환경 규제가 강화되고 있기 때문에 이를 해결할 방법이 필요하다.

쇳물의 생산을 위해서는 가장 먼저 고로의 상부에서부터 소결광과 코크스가 적층구조로 장입

† Corresponding Author, chjeon@pusan.ac.kr

된다. 고로의 하부에서 1200℃의 예열된 공기는 송풍구(tuyere)를 통해 고압, 고속으로 주입되고, 장입된 코크스는 산소와의 반응으로 CO가스를 만들어내고, 이때 CO가스는 형성된 코크스층을 통과하여 하부에서 상부로 상승하게 된다. 송풍구로부터의 풍압, 코크스의 강도, 코크스의 팽창압력 등 의해 약 2000톤에 이르는 장입물의 하중에도 불구하고 상부에서부터 쌓여진 층들이 무너지지 않게 된다. 장입물들은 서서히 하부로 내려오면서 최종 쇳물은 장입 후 약 7시간 정도 후면 1400℃로 배출되게 된다. 즉, 고로의 상부에서부터 소결광은 코크스와 장입 된 이후 700~2300℃의 온도변화와 동시에 다양한 환원반응을 통해 하부에서 용선으로 빠져 나오게 된다. 제한된 고로의 용적 하에서 생산량 증대 및 제선 품질의 향상을 위해서는 고로내부의 온도조절이 반드시 필요하다. 특히 고로의 상부에서 일어나는 철 산화물과 CO의 환원반응은 전체 철 산화물의 환원반응에 큰 영향을 미치게 된다. 환원제인 CO가스를 정량적으로 제어할 수 있을 뿐만 아니라 고로내부의 온도조절을 위해 최근에 PCI(Pulverized Coal Injection) 시스템이 고로에 도입되었다. 즉, PCI는 고로내부의 열원으로 사용되는 코크스의 부족분을 미분탄으로 보상하기 위한 미분탄 공급 장치이다.

PCI 시스템으로부터 형성된 화염에서의 가스들은 철 산화물(iron oxide)을 환원시키는 반응에 큰 영향을 미치게 된다. 고로의 하단에서 형성된 이 화염은 크게 Zone A와 Zone B의 영역으로 나눌 수 있다. Zone A영역에서는 발열반응인 $C+O_2=CO_2$ 의 반응이 주를 이루고, Zone B에서는 흡열반응인 $C+CO_2=2CO$ 의 반응이 주를 이루게 된다. 특히 Zone A의 발열반응을 통해 얻어지는 열원은 용선 생산에 직접적인 영향을 미치는 Cohesive zone($Fe(s) \rightarrow Fe(l)$), Direct reduction zone($FeO(l)+C(s) \rightarrow Fe(l)+CO(g)$) 그리고 Carburization zone($Fe(l)+3C(s) \rightarrow Fe_2C(l)$)의 세 영역에 기여를 한다. 이에 따라 최근에는 고로내부의 PCI 시스템에서 석탄연소영역에 해당하는 Raceway에서의 온도분포와 가스구성(CO, CO₂)에 대한 연구가 이뤄지고 있다.⁽¹⁾

Blast Furnace에서 PCI 시스템과 관련된 연구들은 대부분 DTF(Drop Tube Furnace)를 이용해서 조건들을 잡고, Fixed bed reactor, XRD, SEM, BET 등의 분석을 통해서 석탄의 연소메커니즘을 이해하는 식의 실험이 진행되어왔다. Shan-Wen Du 등⁽²⁾은 DTF를 이용해서 Blast Furnace에서 사

용되는 PCI 석탄의 종류, 혼탄비에 따른 연소특성에 대한 연구를 진행하였다. 특히 반응온도(reaction temperature), 입자크기(particle size)와 더불어 혼탄 비율에 따른 Burnout을 비교하였다. Zhang 등⁽³⁾은 연소영역(raceway)을 형성할 수 있는 새로운 PCI 시스템 시뮬레이션 장비를 만들어 연구를 진행하였다. 이 실험에서는 연소 주변 환경의 변화뿐만 아니라 촉매(CaCO₃)가 연소효율에 영향을 미치는지에 대한 결과를 알 수 있다. Y.S.Shen 등⁽⁴⁾은 석탄의 휘발분 함량이 증가함에 따른 송풍구 입구에서부터 CO, CO₂ 등의 가스농도변화를 보고하고 있다. 휘발분 함량이 높은 저급탄 사용의 확산으로, 휘발분 가스의 양이 증가함에 따라 Raceway의 부피가 팽창되고 고로의 운전에 악영향을 미치기 때문에 적절한 비율에 대한 저급탄 사용이 요구되고 있다.

따라서 본 연구는 Blast Furnace 내부의 높은 승온율을 잘 모사할 수 있을 뿐만 아니라 체류시간에 따른 석탄 입자온도를 예측할 수 있는 LFR(Laminar Flow Reactor)이라는 장비를 이용해서, 석탄을 연소함에 따라 체류시간에 따라 다르게 조성되는 CO와 CO₂가스를 비교 및 분석하였다. 이는 고로내 PCI시스템에서 사용되는 석탄의 성상이 미치는 영향을 규명하여 고로의 미분탄 연소에 기초정보를 제공하고자 한다.

2. 실험

2.1 LFR(Laminar Flow Reactor)

LFR 실험 장치는 고로내부의 PCI 시스템의 미분탄 연소 환경과 같은 높은 온도와 온도상승률의 관점에서 운전조건을 잘 모사할 수 있다. 본 연구에 사용된 LFR 실험 장치는 부산대학교 화력발전에너지분석기술센터에서 직접 설계, 제작한 장치로서 Fig. 1에 개략도를 나타내었다.

2.1.1 평판화염버너 및 반응기

헨켈 버너를 설계 및 제작함으로써 청색의 평판확산화염(Diffusion-flat flame)을 형성하여, 석탄 입자가 화염으로 공급될 때 연속적인 연소가 가능하도록 열원을 제공할 수 있다. 사각의 평판화염면(43mm X 44mm)은 육각허니컴 모양의 셀 매트릭스에 일정한 등간격으로 삽입된 스테인리스 모세관(내경0.6mm)을 통해 연료와 산화제가 공급되어 연소 및 열분해를 통해 만들 수 있도록 설

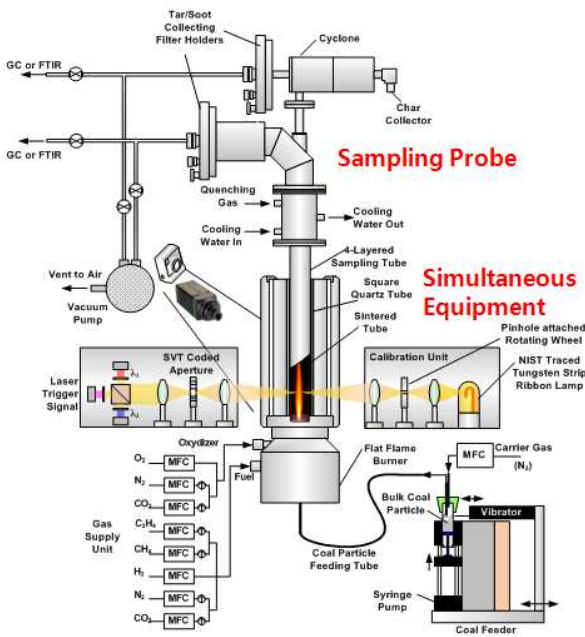


Fig. 1 Schematic of experiment apparatus

계되었다. 평판화염면 중앙의 하나의 모세관에는 석탄입자가 질소가스에 의해 이송된다.

버너 위에는 분리가 가능한 사각단면 형상의 석영관을 장착하여, 평판화염뿐만 아니라 석탄입자가 공급된 후 형성되는 화염까지 안정적인 연소가 이루어 질 수 있도록 하였다. 투명한 석영관 반응기를 통해 탄종의 특성에 따라 달라지는 화염을 관찰 할 수 있다.

2.1.2 미분탄 및 가스 공급 장치

본 실험에서 사용되는 석탄입자를 정량적으로 동일하게 공급하기 위해서 다음과 같은 방법으로 입자공급을 하였다. 석탄입자를 주사기(Syringe)에 저장하여 우레탄 고무마개로 막고, 두 개의 모세관이 고무마개를 관통하여 주사기 내부로 삽입된다. 한쪽 모세관에서는 이송용 질소가 주사기 내부로 주입되고, 나머지 모세관에서는 석탄입자가 질소가스와 함께 주사기를 빠져 나와 버너로 공급될 수 있도록 하였다. 주사기 펌프(Syringe pump)와 플런저(Plunger)로 공급속도를 조절하여 주사기 내부 석탄입자의 양을 일정하게 공급시킬 수 있도록 하였다. 우레탄 고무마개에는 진동펜(Vibrator)가 닿을 수 있어서 주사기 내부의 석탄입자가 표면에서 부유하여 버너로 이송이 용이하도록 하는 역할을 하게 된다.

버너로 공급되는 모든 가스는 질량유량제어장치(MFC, Mass Flow Controller)에 의해 제어되며, 평판화염을 만들기 위해서 연료로는 일산화탄소와 수소, 산화제로는 산소를 사용하였고, 연소 분위기의 온도 등 제어를 위해 질소 유량을 조절하였다.

2.1.3 샘플링 프로브

석영반응기 내부에 위치한 샘플링 프로브(Sampling Probe)는 석탄입자의 연소 후 배기 배출물을 용이하게 포집할 수 있도록 설계, 제작되었다. 프로브의 내벽에는 연소가 진행되고 있는 석탄입자의 반응을 강제로 종료시키기 위해서 질소 급냉가스가 배출되도록 설계가 되어, 상하로 움직일 수 있는 버너를 이용하여 석탄입자가 연소 시 체류시간(residence time)에 따른 영향을 확인할 수 있다.

2.2 온도측정

본 실험의 온도측정은 SVT광학동시계측기를 사용하여 진행되었다. 신호수신부의 부호화간극판(SVT Coded Aperture)에는 입자가 경로를 지날 때의 유무를 판단하는 트리거 슬릿, 입자크기를 결정하는 슬릿 및 광차단띠, 온도슬릿 등으로 구성되어 있다. 입자이미지가 부호화간극판을 통과할 때, 온도슬릿에서의 신호강도를 통해 입자의 온도신호를 오실로스코프를 통해 읽어내어 판별하였다.⁽⁵⁾

Calibration 시스템 내부의 텅스텐 램프로부터 나온 광원은 신호수신부의 온도슬릿에서 측정되어 서로 다른 두 파장의 신호 강도 값으로 나타나게 된다. 텅스텐 램프는 Calibration Data로부터 각각 암페어를 달리하여 가할 때의 밝기온도를 따로 가지게 된다. 각각의 파장이 가지는 신호강도와 온도와의 관계는 플랑크법칙(Plank's Law)에 의해 표현될 수 있다. 신호수신부의 온도슬릿에서 얻어낸 두 파장의 신호강도값은 오실로스코프로 연결하여 정량적으로 얻어낼 수 있다.

텅스텐램프에 저온에서부터 고온까지에 해당하는 암페어를 가하여 그에 해당하는 온도의 파장값들을 나열하여 Calibration선도를 획득하였다. 이후에 반응기내부에서 석탄입자의 연소 시 화염에서 방사되는 밝기의 파장 값들을 Calibration선도에 대입하여, 초점이 맞춰진 화염내부의 국소 영역의 온도를 알아낼 수 있다.

Table 1 Results of proximate and ultimate analysis of the selected coal
1)Moisture, 2)Volatile matter, 3)Fixed carbon

Coal	Proximate analysis (wt% Air Dry)				Ultimate analysis (wt% Dry)					HHV (kcal/kg)
	Moi. ¹⁾	V.M. ²⁾	Ash	F.C. ³⁾	C	H	O	N	S	
A	6.70	42.99	7.47	42.84	64.70	4.46	29.87	0.83	0.14	5487.62
B	2.67	30.59	8.82	57.92	77.80	5.18	15.27	1.23	0.53	7414.02
C	2.73	17.17	8.52	71.58	82.00	3.87	12.17	1.43	0.55	7440.57

2.3 가스분석장치

LFR장치를 통해 반응된 석탄의 배기가스는 sampling probe 후단의 진공펌프를 통해 배출되며, 배기가스를 분석하기 위하여 FT-IR 분석 장비를 사용하였다. FT-IR은 석탄 연소 가스를 분석하는 가장 기본적인 장비이며, 간접계의 원리를 이용한 분석 장비이다. 본 연구에 사용된 FT-IR은 Nicolet 6700모델로써 10m 길이의 Gas Cell이 장착되어 있다.

2.4 미분탄 준비 및 실험조건

본 연구에서 사용된 세 가지 탄종의 공업분석과 원소분석을 Table 1에 나타내었다. (A)탄의 경우 휘발분 함량이 42.99%로 상대적으로 많고 고정탄소가 적은 저급탄에 속하며 (B), (C)탄의 경우 (A)탄에 비해 휘발분 함량이 적고 고정탄소가 많으며, 발열량 또한 높은 고급탄에 해당된다. 그리고 세 가지 탄종 모두 75-90 μ m의 동일한 입자크기로 공급되었다. 그리고 석탄입자를 연소시키기 위한 평판화염 형성을 위하여 공급한 CO, H₂, O₂, N₂ 가스의 유량은 CO: 9.0slm, H₂: 0.4slm, O₂: 9.1 slm, N₂: 3.9slm이다. 특히 평판화염은 고로 내 높은 산소농도 환경을 모사하기 위하여 29%의 충분한 산소농도로 공급하여 형성되었다. 일정량의 석탄 공급을 위해서 일정시간 동안 공급되는 석탄입자의 무게를 재고 일정한 양으로 공급이 되는지 확인 하였다. 주사기 펌프에 의한 플런저 상승률에 따른 석탄입자의 공급률이 7mg/min이 되도록 동일하게 공급되도록 하였다.

각 탄종별로 LFR장치를 통해 연소가 되는 과정에서 화염구조 및 입자온도와 배기가스의 배출을 통하여, 고로 내부에 영향을 미치는 인자에 대한 연구가 진행되었다.

3. 결과 및 고찰

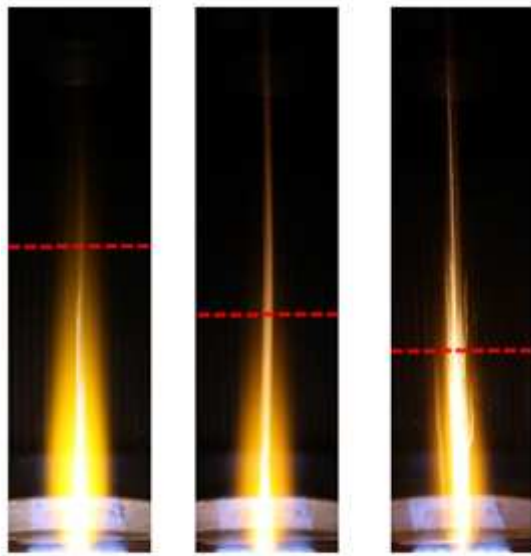
상대적으로 고온에 해당하는 세 영역(Cohesive, Direct reduction, Carburization zone)은 PCI시스템으로부터 직접적인 영향을 받기 때문에 석탄의 연소로 인한 정량적인 온도분석이 필요하다. 석탄의 초기 연소과정에 해당하는 휘발분 연소영역은 온도가 높은 반면, 휘발분 연소 뒤에 형성되는 좌 연소 영역은 휘발분 연소에 비해 온도가 낮다. 따라서 휘발분 연소와 좌 연소를 구분하고, 또한 온도가 높은 휘발분 연소에서의 탄종별 비교가 필요하다. 이렇듯 연소영역의 구분이 석탄의 전체 연소과정 분석에 있어서 중요한 부분이기 때문에, 선행연구자들에 의해 휘발분 연소와 좌 연소의 화염구조 분석이 다양하게 이루어졌다.

3.1 휘발분 함량에 따른 화염 비교

디지털 카메라(CANON 600D)로 측정된 Fig. 2의 결과는 세 가지 탄종에 대해 입자의 크기와 공급유량이 동일한 조건하에서 탄종의 특성에 따른 석탄 입자들의 화염구조를 보여주고 있다. 석탄입자가 반응기로 유입되어 연소되기 시작하면서 탄종의 특성에 따라 각기 다른 형상의 화염을 가지게 된다.

세 가지 탄종의 석탄입자의 크기는 75-90 μ m로 동일하여 석탄입자가 가열되는 영역, 입자가 가열되는 시점은 비슷하지만, 탈휘발 및 휘발분 연소와 좌 연소 과정은 탄종별로 다른 구조를 가지게 된다. 따라서 탄종별로 차이점을 가지기 때문에, 화염이미지를 통하여 각 탄종이 가지고 있는 고유한 물성치를 고려한 화염구조를 상대적으로 비교 분석하였다.

Bortz 등⁽⁶⁾의 연구자들은 고로 내부의 가스 온도와 연소효율에 있어서 석탄의 휘발분 함량은 전체 연소 과정에 있어서 가장 큰 영향 인자로



(a) (b) (c)

Fig. 2 The flame photographs of burning coal particles

판단된다고 보고하고 있다. 석탄 입자 내부의 휘발분은 입자의 온도가 상승하면서 외곽표면으로 방출하게 되고, 점화를 일으키기에 충분한 휘발분이 방출되면 반응기 내부의 산소와 혼합되어 점화가 시작된다. 휘발분 연소영역은 석탄입자가 고온의 반응기 내부로 공급된 후 휘발분 연소가 시작되고, 밝은 화염이 더 이상 안 보이는 지점에서 종료되는 것으로 정의하였다. 휘발분 연소가 종료되는 부근에서부터는 산소가 입자표면에 도달하게 되면서 최 연소가 시작되어 두 가지의 연소과정이 겹쳐서 일어나게 된다. 전체화염 이미지에서 전체 휘발분의 연소영역은 황염이 차지하고 있는 면적으로 볼 수 있어서, 휘발분 연소가 이뤄지고 있는 황염이 거의 없어지는 부근부터 최 연소가 오버랩(Overlap)하며 시작되는 것으로 가정하였다.

Fig. 2의 (a), (b), (c)는 반응기에서 석탄이 연소하는 화염 사진으로, 휘발분 함량이 많은 순서 ((a):42.99%, (b):30.59%, (c):17.17%)로 나열된 사진이다. 휘발분 함량이 많을수록 석탄입자의 외곽에 층을 이루는 휘발분 연소가 활발히 일어남으로써 화염의 폭이 상대적으로 두꺼워지는 것을 확인할 수 있다. 또한 휘발분 함량이 높을수록 휘발분의 연소시간이 상대적으로 길어짐에 따라 휘발분 연소의 종료 후 연속적으로 일어나는 최 연소로 접어드는 시간이 상당히 지연된다는 것을

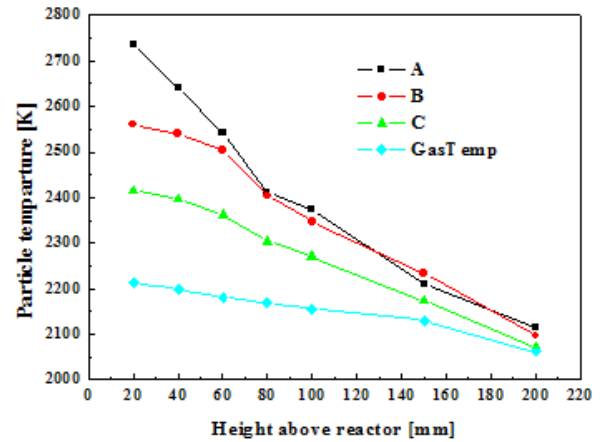


Fig. 3 The coal particle temperature distribution along the height above reactor

확인할 수 있다.

달리 말해서 휘발분의 함량이 상대적으로 낮은 고급탄인 (c)의 경우 최 연소 시점을 빠르게 앞당김으로써, 체류시간이 짧은 PCI시스템에 사용되는 석탄의 연소효율 향상에 도움을 줄 수 있다.

3.2 체류시간에 따른 입자의 온도측정

고로내부에서 석탄의 연소효율과 관련된 영향인자로는 탄종별 특성, PCI 시스템의 장치 디자인, 연소 환경 및 조건 등이 있는데, 연소 환경은 고로내의 효율과 가장 직접적인 관련이 있다. 특히 고로의 온도 설정 및 유지는 철 생산량과 더불어 철의 품질 향상에 큰 영향을 미치는 중요한 자이다. 선행연구들에서는 다양한 연료의 특징에 따라 송풍구 입구에서부터의 연소효율뿐만 아니라 각기 다른 가스들의 온도측정 또한 이뤄지고 있다.⁽⁷⁾ 따라서 PCI 시스템은 고로의 하부에서부터 석탄의 연소를 통해 고온의 열원을 공급해주는 역할을 하고 있기 때문에, 석탄입자의 온도측정으로부터 고로내부의 가스온도에 큰 영향을 주리라 사료된다.

Fig. 3은 석탄을 공급하기 전 평판확산화염의 온도분포와 각 탄종별 연소중인 석탄입자의 온도분포를 나타냈다. 반응기로부터 높이 20mm 간격으로 동시계측기를 이용하여 반응기에서 연소중인 석탄 입자의 온도를 측정한 결과를 보여주고 있는데, 미분탄 입자가 연소할 때 체류시간이 길어짐에 따른 입자온도의 변화를 나타내는 것이다.

휘발분 함량이 가장 많은 (A)탄이 연소 초기에 해당하는 20mm에서 입자의 온도는 2730K으로 가장 높고 (B)탄은 2560K, (C)탄은 2415K이다. 이는 휘발분의 함량이 초기 석탄 입자온도를 결정하는 중요인자라는 것을 의미한다. 그리고 상대적으로 온도차이가 많이 났던 (A)탄과 (C)탄을 비교했을 때, 높이 20mm에서 온도차가 약 310K으로 상당히 크게 측정되었으나, 연소가 종료되는 200mm에서는 온도차가 약 40K으로 줄어들었음을 확인 할 수 있었다. 이는 휘발분 연소에서 최연소로 접어들면서 온도차이가 점점 줄어들고 있음을 보여주고 있다.

PCI시스템에서 취입 랜스로부터 미분탄이 공급되면서 송풍구 입구에서 휘발분 연소가 시작되고, 휘발분 연소가 종료되는 시점과 오버랩하여 최 연소가 시작된다. 고로 내부로 유입되는 열풍의 온도는 약 1200℃ 정도로 석탄과 동시에 유입되며, 휘발분 연소는 아주 빠르게 종료된다. Hutny 등⁽⁷⁾은 고로의 송풍구 입구의 온도를 상승시키는 요인으로 휘발분으로 보고 있는데, 탈휘발 과정 동안의 열 분배와 휘발분 연소영역을 형성하는 과정으로 인한 결론으로서 실험적인 증명을 통해 보여주고 있다. 즉, Fig. 3에서의 결과와 같이 휘발분 함량이 많은 (A)탄이 초기 온도가 높게 측정된 것을 비추어 볼 때, 휘발분 함량은 PCI 시스템의 초기 연소과정에 영향을 미치는 가장 큰 인자로 사료된다.

휘발분 연소는 기본적으로 석탄입자의 외곽에 층을 이루면서 시작되고, 그로 인해 방출되는 열로 입자인근의 온도는 석탄입자의 온도보다 급격히 상승하게 된다. 이러한 과정으로 인하여 입자의 온도상승을 가속시키게 된다.⁽⁸⁾ 따라서 급속한 탈휘발 과정으로 인해 송풍구 입구에서 높은 온도로 연소가 시작될 수 있고, 입구 가스 온도의 승온률을 상당히 높일 수 있다는 사실을 보여준다.

하지만 항상 휘발분 함량이 높은 탄이 고로에 있어서 긍정적인 영향을 주는 것만은 아니다. Smoot 등⁽⁹⁾의 연구자들은 고휘발탄일수록 고로 내부에서 원하지 않는 타르/수트 발생량을 증가시킬 잠재적인 우려를 낳고, 특히 수트의 발생은 고로내부에서의 짧은 체류시간에서 부적절하다는 것을 보여주고 있다. 즉, 적절한 수준의 휘발분 함량을 가진 석탄의 선정에 대해서 시사하고 있

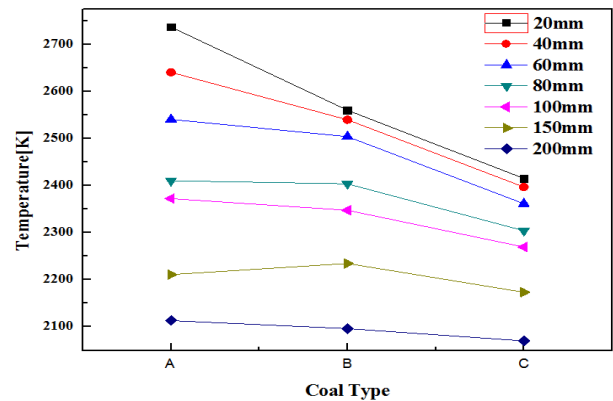


Fig. 4 The correlation of flame structure with particle temperature

다.

Fig. 4는 각 탄종의 높이별 온도분포를 나타낸 것으로, 휘발연소 영역과 최 연소 연소영역을 구별하고자 하였다. 송풍구 입구에서 석탄입자의 휘발분 연소는 매우 빠른 시간 동안 발생하기 때문에,⁽¹⁰⁾ Saastamonien 등⁽¹¹⁾의 연구자들은 연속적인 최 반응으로 이어지는 석탄 입자의 연소 특성 때문에 휘발분이 종료되는 시점을 명확히 구별하기 어렵다고 보고하였다. 하지만 Fig. 4에서 확인할 수 있듯이 반응기로부터 높이 80~100mm부근에서 각 탄종간의 온도차이가 줄어들게 됨을 확인하였다.

탈휘발 과정에서는 석탄 입자 내부로부터 생성되는 가스연소의 영향을 많이 받게 되는데, 각 탄종이 갖고 있는 고유물성치의 특징에 의해 차이점이 나타나게 되면서 휘발분 연소영역의 온도 분포를 결정짓지만, 최 연소과정으로 접어들면서 부터는 동일한 입자크기, 연소 환경 등에 의해서 온도측정 결과가 그리 크게 다르지 않음을 확인할 수 있다.

3.3 CO와 CO₂ 발생량 비교

반응기에서 석탄의 연소가 종료된 후 체류시간에 따른 배기가스를 포집하여 FT-IR을 통해 배기 배출물 분석을 진행하였다. 배출가스 중 CO와 CO₂를 주 생성물로 설정하였고, 반응기로부터 높이 20mm의 간격으로 sampling probe의 위치를 달리하여 석탄의 연소를 강제종료 시키고 배출가스를 FT-IR로 연결하였다. 탄종별 물성치가 다르기 때문에 연소특성에 따른 배기가스 CO와 CO₂의 농도 또한 탄종에 따라 달라짐을 확인할 수 있었

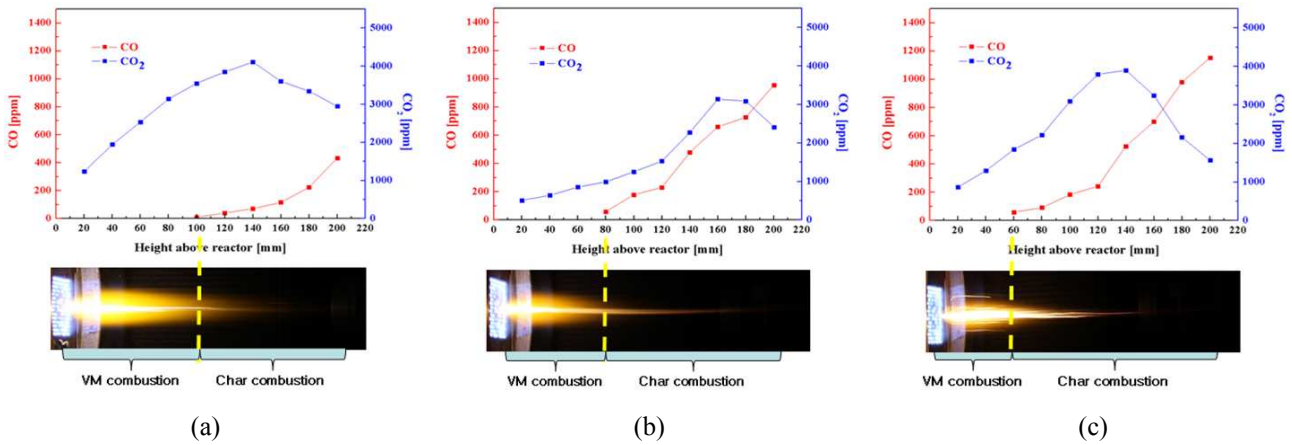


Fig. 5 Characteristics of CO and CO₂ emissions reflecting flame structure

다.

PCI 시스템에서 일어나는 석탄의 연소과정에서 발생하는 가스의 배출 시점과 양은 고로내부의 효율적인 면에서 상당히 큰 의미를 가지고 있다. 고로의 상부인 간접환원영역(indirect reduction region)에서 일어나는 산화철의 환원반응의 주요한 환원인자가 CO가스이기 때문이다. 고로상부에서는 CO 배기가스의 농도의 증가로 인해 Haematite(Fe₂O₃), Magnetite(Fe₃O₄) 등의 일차적인 산화철의 환원반응을 도와 전체 철 산화물의 환원반응에 큰 기여를 할 수 있다. 즉 고로의 효율을 올릴 뿐만 아니라, 용선생산량 또한 증가시킬 수 있다.

CO의 배출은 휘발분 연소가 종료되고 본격적인 화 연소로 접어들게 되는 것을 알려주고 있다. Normand등⁽¹²⁾의 연구에 따르면, 고로내부 같은 고온의 연소환경에서 석탄입자는 single film 연소모델을 따르게 되며, 석탄입자의 직경이 100 μm이하, 입자온도가 1000K 이상이 될 경우에 해당한다. 석탄입자는 주위 산소와의 접촉으로 인해 연소가 연속적으로 이루어지게 되는데, single film의 연소모델의 경우 석탄입자의 외곽층에서는 반응이 일어나지 않고, 석탄의 표면에서 반응이 일어나게 된다. 연소 초기의 CO₂ 발생은 미미한 정도이고, 주발생물은 CO로 이루어지게 된다.

Fig. 5 에서 확인 가능하듯이, CO와 CO₂의 배출 시점과 특징이 다르게 분포하고 있다. 휘발분 함량이 가장 많은 (a)탄의 경우 CO발생이 반응기로부터 높이 100mm에서 시작되는 반면, 휘발분 함량이 적어질수록 CO발생 시점이 점점 빨라지게 되고, (c)탄의 경우에는 60mm에서 CO발생이 시작된다. 그리고 고정탄소의 함량을 고려해봤을

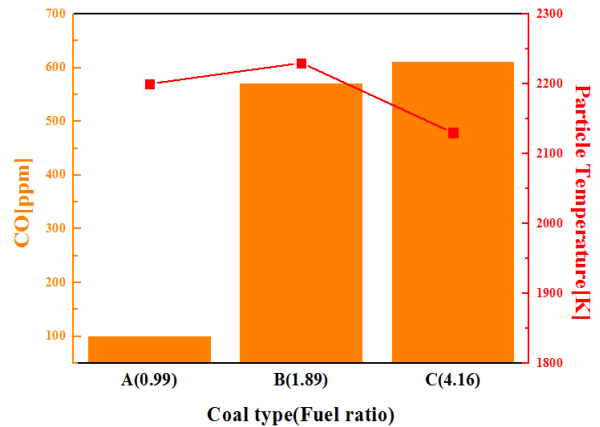


Fig. 6 Characteristics of CO emissions and particle temperature according to fuel ratio

때, 고정탄소 함량이 높을수록 CO 발생시점이 빠르고 배출량이 많음을 확인할 수 있다. 특히 높이 150mm에서 b탄이 다른 탄종에 비해 온도가 높게 측정되었는데, 이는 b탄의 휘발분 함량이 상대적으로 높은 수준이고, 이로 인해 휘발분에 의한 영향이 150mm까지 남아있었기 때문에 일시적으로 온도가 높아졌을 것이라 사료된다. 즉 화 연소의 영향이 큰 CO의 배출시점은 single film의 연소모델의 이론과 잘 부합하고 있지만, 휘발분 연소의 영향이 큰 CO₂의 배출 특성은 각 탄종의 물성치에 따라 달라질 수 있을 것이라 예상할 수 있다.

3.4 연료비증가에 따른 온도와 CO발생의 관계

Fig. 6은 CO의 발생량이 가장 뚜렷하게 나타나는 버너로부터 150mm지점에서 연료비의 증가에 따른 세 가지 탄종의 입자 온도분포와 CO발생량

을 동시에 나타내고 있다. 비록 (B)탄의 경우, 160mm 지점 이후에서부터 CO₂의 감소가 시작되지만, 대체로 세 가지 탄종 모두 CO₂의 최대발생 이후 감소가 시작되는 구간으로 좌 연소가 일어나는 지점으로 가정 할 수 있다. 연료비가 증가할수록 CO발생량은 증가하지만 온도는 떨어지는 경향을 보이고 있다.

연료비의 증감에 따른 고로 내부에 미치는 영향들에 대한 인자들에 대한 연구가 필요하고 선행연구자들에 의해 이뤄지고 있다. 대체적으로 연료비가 증가할수록 연소성이 오히려 떨어지는 경향에 의해 미연분도 증가한다고 하였으며, 특히 석탄의 연소성은 raceway 형성 시 초기에 종료되는 휘발분 연소보다 좌 연소에 의한 영향을 더 많이 받는다고 명시하고 있다.⁽⁷⁾ 연료비가 낮은 고회발탄의 휘발분 연소구간이 길어지면서 수트와 타르(soot, tar) 발생량을 증가시키기 때문이다. 특히 수트의 발생은 고로내부의 raceway형성을 방해하고, burden의 투과성을 막으며, 노 내 일정한 온도분배를 방해하는 등의 문제점을 발생 시키게 된다.⁽⁹⁾

Fig. 6에서도 연료비가 높은 (C)탄의 경우, 입자 온도는 상대적으로 낮지만 2000K이상으로 고로 내부로 충분한 열원제공이 가능하면서도, CO발생량이 가장 많다. 그리고 앞선 CO배출 그래프를 통해 확인 가능하듯이, CO의 배출시점 또한 빠르기 때문에 상대적으로 150mm까지의 전체 CO배출량 또한 많은 것으로 확인되었다. 따라서 좌 연소구간에서 연료비가 4.16인 (C)탄이 높은 CO발생량과 적정온도를 유지하면서도, 낮은 휘발분 함량으로 인해 고로 내 문제점들을 배제할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구는 고로내의 석탄 연소분위기를 잘 모사할 수 있는 층류반응기(LFR)를 이용하여 탄종별 화염형상을 비교분석하고, 체류시간에 따른 석탄입자의 온도분포, CO와 CO₂ 발생량을 측정하였다. 또한 연료비에 따른 휘발분 연소영역과 좌 연소영역을 구분하고 탄종별 특징을 비교하였다. 앞선 선행연구자들은 석탄의 연소에 있어서 탈휘발이 종료되는 구간과 좌 연소가 시작되는 지점을 명확하게 구분하기 어려워 화염형상으로부터 대략적인 탈휘발 종료지점을 가정하였다.

하지만 본 연구에서는 석탄입자의 온도측정과 더불어 석탄의 연소 시 배기 배출물인 CO와 CO₂ 측정을 통한 정량적인 분석을 통해 탈휘발 종료지점을 정의하였고, PCI 시스템에서의 탄종별 연소특성을 구분하고자 하였다. 화염이미지를 통한 탈휘발 종료지점은 CO의 발생시점과 잘 부합하고 있음을 알 수 있다.

(1) 휘발분 함량이 42.99%인 (A)탄은 17.17%인 (C)탄에 비해 휘발분 연소 화염의 폭이 넓고 길다. 뿐만 아니라 휘발분 함량이 많을수록 좌 연소가 시작되는 지점이 지체되었다.

(2) 버너로부터 높이 80~100mm부근까지는 휘발분 연소영역에 해당하고, 이 때 석탄입자 온도는 휘발분 함량이 가장 많은 (A)탄이 온도가 가장 높고, 다음으로 (B)탄, (C)탄의 순서로 온도가 낮아지게 되었다. 하지만 휘발분에 의한 가스연소가 종료되고, 주위 산소와 석탄입자의 직접적인 연소만이 일어나는 좌 연소가 시작되면서 세 가지 탄종 모두 비슷한 온도분포를 가진다. 특히 휘발분 함량이 낮은 (C)탄의 경우 대표적인 고급탄으로서 상대적으로 온도분포가 낮게 측정되었다. 휘발분의 함량은 초기 석탄입자의 온도를 결정하는 가장 중요한 인자이다.

(3) CO와 CO₂ 발생량으로부터 좌 연소영역의 시작점을 확인하였다. CO발생시점으로 확인 가능하였고, 휘발분 연소가 가장 빠르게 종료되는 (C)탄의 CO발생량이 가장 많음을 확인할 수 있었다. 각 탄의 휘발분 연소종료구간과 CO발생량을 통하여 PCI 시스템에 적합한 탄종을 구별해 낼 수 있는 실험적인 결과를 얻을 수 있었다.

참고문헌

(References)

- (1) Geerdes, M., Toxopeus, H. and Van Der Vliet, C., 2009, "Modern Blast Furnace Ironmaking: An Introduction," *IOS Press, 2 edition*, pp. 2~18.
- (2) Shan, W. D., Wei, H. C. and John, A. Lucas., 2010, "Pulverized Coal Burnout in Blast Furnace Simulated by a Drop Tube Furnace," *Energy*, Vol. 35, No. 2, pp. 576~581.
- (3) Zhang, J. L., Wang, G. W., Shao, J. G., Chen, Y. X. and Yang, T. J., 2013, "Pulverized Coal Combustion of Nitrogen Free Blast Furnace," *Journal of Iron and Steel Research, International*,

- Vol. 20, No. 3, pp. 1~5.
- (4) Shen, Y. S., Yu, A. B., Austin, P. R. and Zulli, P., 2012, "CFD Study of In-furnace Phenomena of Pulverised Coal Injection in Blast Furnace: Effects of Operating Conditions." *Powder Technology*, Vol. 223, pp. 27~38.
- (5) Kim, Y. G., Jeong, T. Y., Kim, G. B., Song, J. H., Chang, Y. J. and Jeon, C. H., 2010, "Consideration to In-situ Optical Measurement of the Diameter · Velocity · Temperature of a burning Solid Particle," *Proceeding of 2010 KSME Fall Annual Meeting*, pp. 3672~3677.
- (6) Bortz, S. and Flament, G., 1983, "Ironmaking and Steelmaking," Vol. 10, No. 5, pp. 222~229.
- (7) Hutny, W. P., Lee, G. K. and Price, J. T., 1991, "Fundamentals of Coal Combustion during Injection into a Blast Furnace," *Prog. Energy Combust.*, Vol. 17, pp. 373~395.
- (8) Jeon, C. H., Kim, Y. G., Kim, J. D., Kim, G. B. and Song, J. H., 2010, "An Experimental Investigation of the Effect of Particle Size on the Combustion Characteristics of Pulverized Sub-Bituminous Coal with Low Calorific Value by Using an LFR System," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 34, No. 3, pp. 259~267.
- (9) Smoot, L. D. and Smith, P. J., 1985, "Coal Combustion and Gasification," Plenum Press, New York.
- (10) Jeong, T. Y., Kim, Y. G., Kim, J. H., Lee, B. H., Song, J. H. and Jeon, C. H., 2012, "Effect of Volatile Matter and Oxygen Concentration on Tar and Soot Yield Depending on Coal Type in a Laminar Flow Reactor," *Korean Chemical Engineering Research*, Vol. 50, No. 6, pp. 1034~1042.
- (11) Saastamonien, J., Gurgel Veras, C. A., Carvalho, J. A. Jr and Aho, M., 1999, "Overlapping of The Devolatilization and Char Combustion Stages in The Burning of Coal Particles," *Combust. Flame*, Vol. 116, No. 4, pp. 567~579.
- (12) Normand, M. L., 1978, "Heterogeneous Kinetics of Coal Char Gasification and Combustion," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 4, No. 4, pp. 221~270.