

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.3.259

LFR 장치를 이용한 입자 크기 변화에 따른 저열량 아역청 미분탄의 연소특성에 관한 실험적 연구[§]

전충환^{*†} · 김용균^{*} · 김재동^{*} · 김규보^{**} · 송주현^{*}

* 부산대학교 기계공학부, ** 부산대학교 화력발전에너지분석기술센터

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

Chung-Hwan Jeon^{*†} Yong-Gyun Kim^{*}, Jae-Dong Kim^{*}, Gyu-Bo Kim^{**} and Ju-Hun Song^{*}

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

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

(Received August 31, 2009 ; Revised December 30, 2009; Accepted January 8, 2010)

Key Words : Pulverized Coal(미분탄), Combustion(연소), Laminar Flow Reactor(층류반응기), Flame Length(화염 길이), Residential Time(체류시간), Heating Rate(온도상승율), Particle Size(입자크기)

초록: 본 연구는 아역청탄의 미분탄 연소특성에 있어서, 입자크기가 미치는 영향을 알고자 실험을 통해 고찰한 것이다. 본 연구를 위하여, 온도 및 온도 상승률을 고려해 볼 때, 실제 미분탄 연소로의 환경을 잘 구현할 수 있는 층류반응기를 설계하고 이용하였다. 크기가 다른 미분탄 입자들이 탈 때 형성되는 화염구조 및 길이를 본 반응기를 이용해 조사하였다. 육안으로 관찰된 화염구조로부터 석탄연소과정들을 분명하게 구분할 수 있었다. 입자의 크기변동은 휘발분 점화개시점에 미치는 영향이 큰 반면, 휘발분의 연소시간에 미치는 영향은 가장 적었다. 입자의 크기가 커질수록 좌의 화염길이도 증가하였다. 화염불안정성 역시 입자가 커짐에 따라 증대되었다. 일정한 체류시간 간격내에서의 좌의 소비율은 거의 일정하였다.

Abstract: In this study, the effect of particle size on the combustion characteristics of pulverized sub-bituminous coal was experimentally investigated. A laminar-flow-entrained reactor was designed and implemented to realize the desired heating ratio and temperature corresponding to the combustion atmosphere of a pulverized-coal-fueled furnace. The flame length and structure of burning particles according to different sizes were investigated. Coal combustion processes were clearly distinguished by direct visual observation of the flame structure. The onset point of volatile ignition is greatly affected by changes in the particle size, and the burning time of the volatiles is least affected by changes in the particle size. The length and instability of char flame also increase with the increase of the particle size. However, the char consumption rate within the residential time remains nearly constant.

- 기호설명 -

- d : 임의 입자군 입자크기 산술평균 대표값
- d_{32-45} : Group I 입자군 입자크기 산술평균 대표값
- d_p : 좌 입자의 크기
- T_p : 좌 입자의 온도
- $T_{g_corrected}$: 열전대 비드의 온도복사손실 보정한 반응기내의 가스온도

- STD : 화염길이의 표준편차
- z : 반응기 단면 중심에서 평판 화염면으로부터 입자 유동의 하류방향 축

1. 서 론

석탄연료는 한국의 전력생산에 있어서 큰 비중을 차지해왔다. 2007년 말 현재 국내 전력 생산에 사용되는 전체 에너지원 중에서 석탄이 차지하는 비중은 38.8%에 달하고 있다.⁽¹⁾ 이는 석탄의 가격이 다른 연료에 비해서 상대적으로 저렴하고, 전세계적으로 화석연료

§ 이 논문은 2009년도 에너지 및 동력공학부분 춘계학술대회 (2009. 5. 21., BEXCO) 발표논문임

† Corresponding Author, chjeon@pusan.ac.kr

중에서 가장 풍부한 매장량을 지니고 있다는 사실에 기인하고 있다. 미분탄을 연료로 사용하고 있는 발전소는 이제 새로운 도전에 직면하고 있다. 지구온난화에 대한 자각과 더불어 이산화탄소를 비롯한 여러 공해물질 배출저감에 대한 압력과 급등하는 석탄연료 가격에 따른 저열량탄의 도입이 불가피한 실정이다. 이러한 저열량탄은 현재 발전소들이 보유하고 있는 화로에서 사용하도록 하고 있는 설계탄 내지는 표준탄과는 거리가 있다. 저열량탄을 기존의 화로에 연료로 사용할 경우, 화로내에서 국부적인 열 불균형을 초래할 수 있고, 출력을 현재의 수준만큼 올리기 위해서는 석탄량과 공기량을 더 늘려야 하며, 노내에서의 슬래킹과 파울링이 증가하는 등 예기치 않았던 운전상의 문제들을 초래하게 된다. 이러한 문제들은 석탄연소기술과 직접 혹은 간접적으로 관련이 있다.

한편 석탄청정기술에 대한 전 세계적인 관심과 더불어 석탄의 연소 및 가스화에 활발한 연구가 진행되고 있다.

이때까지 수십년간 석탄의 특정 연소과정-수분의 증발과정,⁽²⁾ 열분해 내지는 탈휘발화 과정,⁽³⁻⁷⁾ 휘발분의 연소, 그리고 탈휘발 이후 고정탄소가 연소되는 최(Char)의 산화과정⁽⁸⁻¹⁰⁾에 대한 광범위한 연구가 이루어져 왔다. 석탄 연소에 있어서 특정과정을 기술하기 위하여 각기 다른 해석적 모델들이 여러 제한조건들과 더불어 제안되었다. 예를 들자면, 최근 Recheleu Barranco 등⁽¹¹⁾의 연구자들은 다른 연구자들이 제안했던 최(char) 연소 동특성 모델들을 검토한 바 있는데, 어떤 연구자들은 최 연소 메커니즘 모델을 단지 두 가지 주요변수-온도 및 산소농도-만을 고려하여 제안한 반면 또 다른 연구자들은 마세랄 그룹과 같은 석탄의 특정 조성을 고려할 것을 제안하기도 했다.

이는 석탄연소과정의 연구에 있어서 많은 진전이 있었다고 할 지라도, 아직까지 모든 종류의 석탄에 대해 특정 석탄연소과정의 메커니즘을 일반적으로 적용할 수 있는 모델이 없다는 것을 상기 시킨다. 이는 또한 수십년간 석탄연소에 관한 연구가 이루어져 왔음에 불구하고 오늘날까지 많은 연구자들이 연구를 하고 있는 이유가 되기도 한다.

선행연구자들은 석탄입자의 연소특성을 파악하기 위하여 타고 있는 석탄입자의 화염길이를 연구하였다. 그들은 석탄입자가 연소할 때의 발광화염이 석탄입자연소 특성을 나타내는 척도가 될 수 있음을 보여주었다.⁽¹²⁻¹⁴⁾ 화염길이는 석탄입자의 조성과 주변의

분위기 온도 및 산소농도, 석탄입자의 크기와 같은 물리적 특성 등에 따라 변하게 된다.

본 연구의 주된 목적은 LFR(Laminar Flow Reactor)를 이용한 석탄입자의 발광화염의 구조와 길이의 비교 실험을 통하여 입자의 크기에 따른 저열량탄의 연소특성을 미시적 관점에서 관찰하고자 하는 데 있다.

2. 실험

2.1 반응기의 설치

석탄입자의 연소현상을 연구하기 위하여 열중량 분석기나 DTF(Drop Tube Furnace), 그리고 LFR 과 같은 실험실 내에서 사용되는 비교적 소규모의 반응기들을 사용해 왔다. 석탄연소 실험을 할 때에는 어떤 석탄연소방법을 상정하고 실험을 해야 하기 때문에 연소방법 - 예를 들면 미분탄 연소, 유동층 연소-이나 연소환경과 유사한 분위기를 조성할 수 있는 적절한 반응기를 사용할 필요가 있다. Alfredo Zolin 등은 석탄연소에 있어서 각기 다른 반응기의 영향을 보여준 바 있다.⁽¹⁵⁾ Mario 는 온석탄입자의 온도상승율(heating rate)은 열분해과정에 지대한 영향을 준다고 보고한 바 있다.⁽¹⁶⁾

LFR 실험장치는 많은 발전소에서 채택하고 있는 미분탄연소의 연소환경을 온도와 온도상승률의 관점에서 잘 모사할 수 있는 실험장치로 알려져 있다. 본 연구에 있어서 사용한 LFR 시스템은 부산대학교 화력발전에너지분석기술센터가 직접 설계, 제작한 장치로서, Fig. 1 에 개략도를 나타내었다. 실험장치는 다음의 주요 구성품으로 이루어져 있다.

2.1.1 평판화염버너 및 반응기

버너는 헨켄버너를 원형으로 설계, 제작하였으며, 석탄입자들을 연속적으로 고온의 층류평판화염면 위에 띄워 탈 수 있도록 하는 열원을 제공한다. 스테인리스 모세관(내경 0.6mm)을 육각 허니컴 모양의 셀 매트릭스에 일정한 등 간격으로 삽입하였다. 전체 평판 화염면은 그림에 나타낸 것처럼 사각형 단면(26mmX27mm)이다. 이들 모세관들은 가스연료가 공급되는 도관이다. 석탄입자는 평판화염면의 중심에 위치한 셀에 삽입된 하나의 모세관을 통하여 공급된다. 모세관이 삽입되지 아니한 다른 허니컴 셀들은 산화제의 통로로 사용된다. 반응기의 역할을 하게 되는 사각단면 형상을 갖는 석영관이 버너 위에 세워져 있다. 본 실험

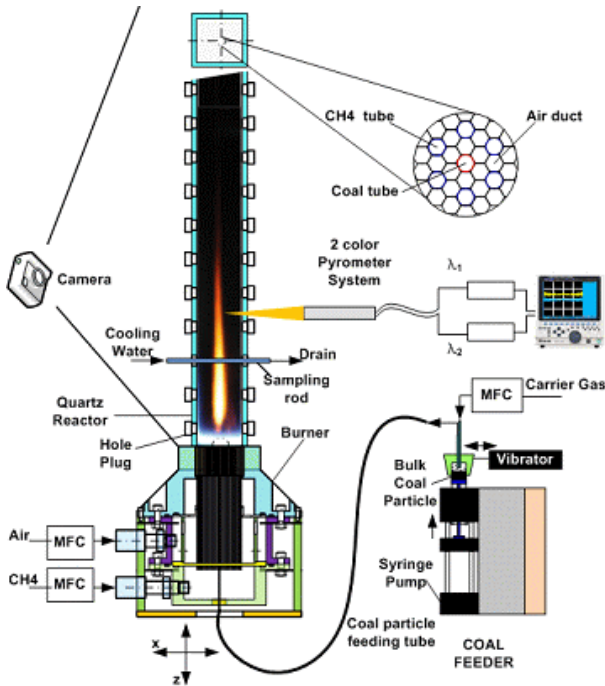


Fig. 1 Schematic of experiment apparatus

험에서는 메탄-공기의 연소를 통해 청색평판화산 화염을 형성하였다. 반응기 내부의 가스 온도의 측정과 연소하고 있는 석탄입자를 샘플링 하기 위하여 석영관의 서로 마주보는 벽면에 일정 간격의 구멍을 내었다. 반응기의 온도를 재거나 연소중인 석탄입자를 샘플링 하는데 사용하는 구멍들을 제외한 모든 구멍은 세라믹 마개로 막았다. 메탄-공기 연소로 인한 생성물들은 화학평형방정식으로부터 계산하였다.

2.1.2 석탄입자 공급장치

석탄입자연소실험에 있어서 가장 큰 난점중의 하나는 마이크로 크기의 입자를 정량으로 공급하는 것이다. 석탄입자의 크기가 약 100 μ m 이하가 되면 입자들이 정전기 대전으로 인하여 쉽게 튜브 벽면 내에 부착되게 되어 쉽게 막히거나 이송이 어렵게 된다. 미소석탄입자의 연소실험을 위하여 여러 종류의 입자공급장치가 개발되어 사용되고 있다.⁽¹⁷⁻¹⁸⁾ 본 실험에서 사용된 입자 공급기는 Fig. 1에 나타내었다. 이 장치는 석탄입자를 담고 있는 용기 역할을 하는 밀폐된 주사기, 공급하고자 하는 일정량의 석탄 유량에 상응하는 속도로 주사기 플런저를 밀어 올리는 기능을 하는 주사기펌프, 두 개의 모세관 튜브, 진동자로 구성되어 있는데, 두 개의 모세관은 주사기 끝 단을 밀폐시키기 위한 우레탄 고무마개를 관통하여 주사기 내부로

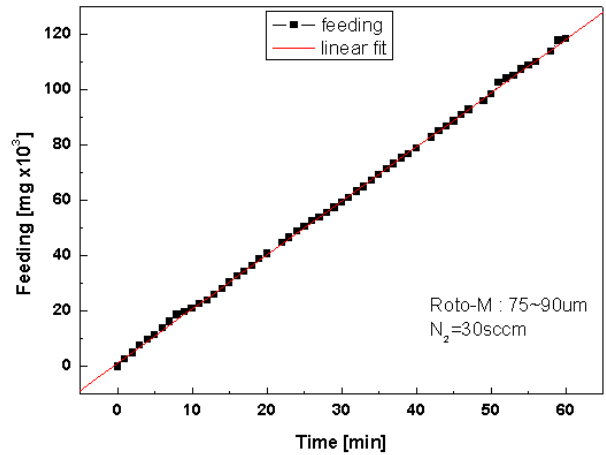


Fig. 2 Coal particle feeding test result

삽입되어, 하나는 이송용 질소가스를 주입하는통로로 사용하며, 다른 하나의 모세관은 석탄입자를 질소가스에 실어 공급하기 위한 통로로 사용된다. 한편 진동자는 우레탄 고무마개에 부착되어 진동을 주사기에 가하여 석탄입자가 표면으로부터 약간 부상하도록 하는 역할을 하게 된다. 석탄입자를 주사기에 주입한 후 플런저를 삽입한 후 주사기 펌프에 장착하여 플런저가 공급하고자 하는 석탄입자의 유량에 해당하는 일정한 속도로 전진하도록 하면 부상된 석탄입자는 곧장 질소가스와 함께 모세관으로 유입되어, 버너로 이송되게 된다. 석탄의 이송 유량은 일정시간 동안 공급되는 석탄입자의 무게를 재어 일정한 양으로 공급이 되는 지 확인하였다. Fig. 2는 본 실험에 사용된 75~90 μ m 크기 미분탄의 시간에 따른 공급 유량을 시험하여 얻은 것이다. 시간에 따라 거의 일정한 량의 미분탄이 공급된다는 것을 알 수 있다.

2.1.3 가스공급장치

버너로 공급되는 모든 가스는 평판화산화염을 만들기 위한 연료 및 산화제, 석탄입자를 이송하기 위한 이송용 가스이다. 본 장치는 석탄입자를 연소하는 분위기에 다른 실험조건, 즉 온도, 산소농도, 수분량에 따라, 사용하는 연료 및 산화제를 선택, 혼합할 수 있도록 제작되었다. 모든 가스는 질량유량제어장치 (Mass Flow Controller)에 의해 제어된다. 본 실험에서는, 산화제로서 공기, 연료로서 메탄가스, 그리고 석탄입자 이송용 가스는 질소를 각각 사용하였다.

2.2 측정장치

2.2.1 석탄입자의 크기 측정

체류시간의 경과에 따른 특정시점에서 연소하고

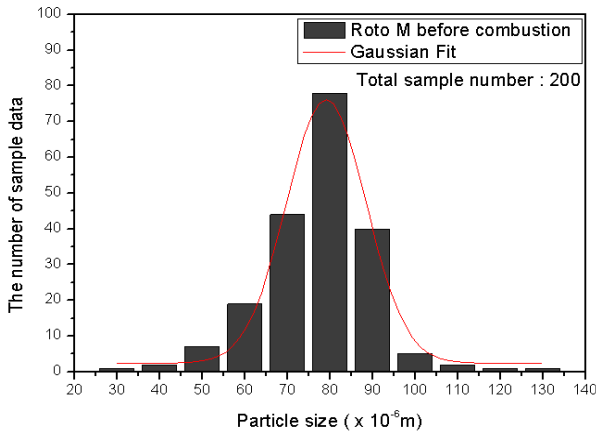


Fig. 3 Size distribution of 75~90 μm sample

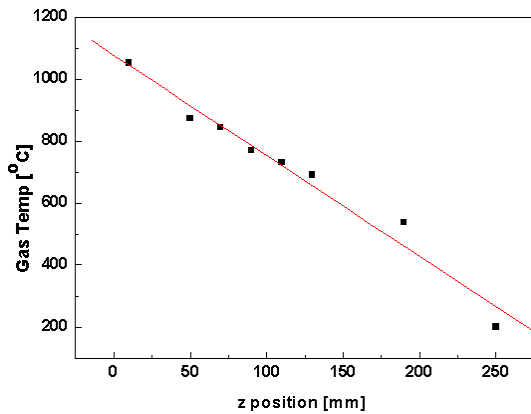


Fig. 4 Gas temperature at center line along the z axis in the reactor

있는 최 입자의 크기변화를 측정하기 위하여 최 입자를 세 지점에서 샘플링 하였는데, 시료의 채취는 냉각수가 흐르는 유리관 튜브를 석영관을 수평으로 관통하도록 삽입하여 차가워진 유리관 외부표면에 고온의 입자가 부딪쳐 부착하게 되는 데, 이때 온도가 급강하하여 더 이상 산화반응이 진행하지 못하고 그 상태에서 멈추게 된다. 수집된 입자들의 분포와 크기는 주사전자현미경(SEM)으로 획득한 이미지로부터 입자의 장방향의 길이를 측정 및 계산 하였다. 본 실험에서는 세 종류의 입자군에 대하여 각각 200개의 입자를 무작위로 선택하여 측정하였다. Fig. 3은 석탄입자 크기 75~90 μm 입자 군에 대해 연소전의 크기분포를 측정한 값을 나타낸 것이다. 전체적으로 입자의 평균 크기가 82 μm 이고 표준편차 12.8 μm 를 가지는 정규분포를 보이고 있다. 그리고 최가 부분 산화하고 있는 지점이라고 판단되는 평판화염면으로부터 하류방향으로 각각 z=50mm, 90mm and 130mm 지점에서도 샘플을 채취해서 동일한 방법으로 입자의 크기를 측정하였다.

2.2.2 반응기내 연소 후 가스 및 석탄입자 온도

반응기 내의 메탄가스 연소 후 가스의 온도는 석탄의 공급량이 미소량이어서 전체 반응기내의 온도에 미치는 영향은 거의 없는 조건에서 실험을 하기 때문에, 석탄을 공급하지 않은 상태에서 측정하였다. R-type 열전대를 사용하였고 빠른 응답속도를 얻기 위하여 직경이 0.3mm 인 비드를 형성하였다. Fig. 4는 석탄입자가 연소하며 지나게 되는 z 축을 따라 측정된 온도값과 선형화 한 것을 나타낸 것이다. 이후 측정된 온도는 열전대의 비드로부터 복사 열손실을 고려하여 수정하였다. 타고 있는 석탄입자의 온도의 측정을 위해서 2-과장 광 고온계 (Optical Pyrometer)를 사용 하였다.⁽¹⁹⁾ 측정에 사용된 두 과장은 각각 반폭치 (FWHM) 10nm 를 지니는 650nm, 700nm 광학필터를 통해 얻었다. Fig. 1에서 나타난 것처럼 발광하는 석탄 입자의 광원은 집광렌즈를 통해 모아지고, 집광렌즈 후단부에는 앞서 언급한 각각의 과장을 감지하기 위한 2 개의 광섬유 다발이 일체형으로 삽입된다. 이때 각각의 광섬유 다발을 통해 감지된 신호는 광 증폭기 및 컨디셔닝을 거쳐 오실로스코프를 통해 각 과장의 광 강도를 전기적 신호로 변환하여 읽게 된다.

2.2.3 화염길이

화염의 디지털 이미지 정보를 얻기 위하여 Nikon D70 모델의 카메라를 사용하였고, 이미지는 모두 동일한 조건(aperture:f2.8, 노출시간:1 초)에서 각각의 입자군에 대해 15~20 이미지를 획득하였다. 화염의 평균길이는 디지털 이미지 프로세싱 통해 얻었다. 화염의 안정도를 정량적으로 평가하기 위하여 각 입자군에 대해 얻은 이미지들로부터 획득한 화염길이 변동에 대한 표준편차를 도입하였다.

2.3 실험조건

2.3.1 분위기 가스 및 석탄 공급량

본 연구에서 석탄입자를 연소시키기 위한 분위기 가스의 온도를 조절하기 위해 공급한 메탄 및 공기유량과 입자를 공급하기 위한 질소가스 유량 및 공급한 석탄입자의 유량은 Table 1에 나타내었다. 3 가지 가스를 반응기 내부로 주입하였을 때의 당량비는 0.6 으로 희박연소 조건인데, 이때 완전연소 조건보다 과잉으로 공급된 공기는 석탄입자의 연소에 필요한 산소를 공급하기 위한 것이다.

메탄화염 생성시 배출되는 가스 중 반응에 참여하지 않고 남아있는 산소는 전체 배출가스에 대한 몰분율은 7.76%이다.

이러한 분위기 가스 조건은 모든 실험조건에서 동일하게 유지하였다. 한편 석탄의 공급량 역시 본 실험에서 선정한 입자군의 크기가 달라짐에 따라 상관없이 일정한 량으로 공급되도록 하기 위하여 주사기 펌프에서의 플런저의 이송속도를 가변 함으로써 단지 입자의 직경변화에 따른 영향만 관찰하고자 하였다.

2.3.2 시료 미분탄 준비 및 물성치

본 실험에 사용된 석탄은 Roto-M 이라고 하는 석탄으로 인도네시아에서 수입되어 국내 발전소에서 현재 사용하고 있는 탄으로, 미분화 시켜 체를 사용하여 3 종류의 입자군으로 분류하였다. 첫번째 입자군은 Group I으로 입자의 크기가 32-45 μm 사이의 체를 통과시킨 것이고, 두번째인 Group II 는 75-90 μm 사이의 체를 통과시킨 것이며, 세번째는 Group III로 150-180 μm 사이의 체를 통과시켜 시료 얻었다. 이들 그룹의 입자 산술평균 대표값은 각각 38.5 μm , 82.5 μm , 165 μm 로서 입자의 크기에 따른 연소 특성을 파악하고자 Group I 의 입자 크기를 기준으로 각각 약 1 배, 2 배, 4 배로 변화시켰다. 통상 발전소에서는 70 μm 정도 크기로 미분화 하여 사용하고 있다. 이 탄에 대한 공업분석 및 원소분석의 결과값을 Table 2 에 나타내었다. H/C and O/C 비율을 기초로 하여 평가해 볼 때, Roto-M 탄은 전형적인 아역청탄에 해당하며, 휘발성분이 아주 많이 함유되어 있다.

Table 1 Gas and coal flow condition

Coal	Particle size(μm)	CH4 (sccm)	Air (slm)	Carrier N ₂ (sccm)	Coal Feed-ing (g/hr)
Roto-Middle	32-45 75-90 150-180	380	6.02	30	0.1

Table 2 Results of proximate and ultimate analysis of the selected coal

Coal (geographic origin)	Moisture (wt%) As rec'd	HHV (kcal/kg) Air dry	Proximate (wt% Air dry)				Ultimate (wt% Dry)					
			Moisture	VM	ASH	FC	C	H	O	N	S	ASH
ROTO-MIDDLE (Indonesia)	26.36	5,701	12.62	46.65	2.74	38	69.7	5.5	20.86	0.76	0.04	3.14

3. 결과 및 고찰

3.1 화염구조와 길이에 미치는 입자크기의 영향

Fig. 5 는 세 종류의 입자군에 대해 모두 입자의 공급유량이 동일한 조건하에서 입자의 크기 변화에 따른 석탄 입자들의 화염구조를 보여주고 있다. 그림에서 보여주고 있는 이미지는 각 입자군의 시료가 연소할 때 획득한 이미지들을 가지고 계산한 평균화염길이를 기준으로, 각 입자군에 대해 이 평균화염길이에 가장 가까운 이미지를 나타낸 것이다. 이 화염은 개별입자가 층류 가스유동장에 유입되어 연소되면서 형성한 것으로 전형적인 층류화염이다.

전체 화염길이가 입자의 크기에 의해 직접적으로 영향을 받고 있음을 보여준다. 석탄입자의 개별 연소단계는 Fig. 5 에서 보여주듯이 화염의 외관 형상으로부터 구분이 가능하다. 즉, 석탄입자가 가열되는 영역, 입자가 점화되는 시점, 탈휘발 및 휘발분 연소 그리고 촉 산화과정을 구분할 수 있다. 그러므로 이들 각 과정에서의 상대적 지속시간을 상대 비교하는 것이 가능하다.

입자의 표면은 열과 산소의 통로가 되므로 동일한 석탄 유량을 공급하면서 석탄입자를 작게 하면 총 접촉 면적은 커지게 되어 입자가 신속히 가열된다. 미분탄 입자의 온도가 상승함에 따라 석탄입자내의 휘발분이 입자의 외곽표면 밖으로 방출되면서 주변의 고온가스로 확산되면서 반응기 내부의 산소와 혼합되기 시작하고 점화를 일으킬 수 있을 만큼의 충분한 휘발분이 존재하면 점화가 시작된다.

Fig. 6 은 휘발분의 착화시간, 휘발분의 연소 지속시간, 가시화염이 지속되는 동안의 최의 일부 산화시간을 입자의 크기 변화에 따른 함수로서 Group I 의 대표값 입자크기인 38.5 μm 및 시간을 기준으로 무차원수를 도입하여 비교한 것이다.

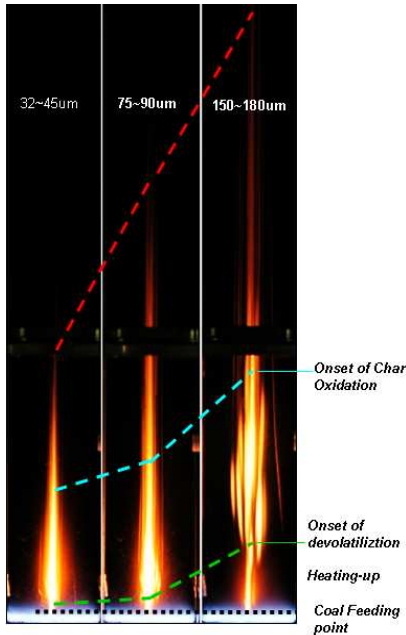


Fig. 5 Flame structure of burning particles for Roto-M coal with different sizes

휘발분의 점화시점은 상온의 석탄입자가 고온의 가스분위기 내로 유입된 시점부터 밝은 화염의 하부선단이 보이기 시작하는 지점까지의 시간으로 정의하였다. 이 시간 동안 입자내의 수분의 증발과 입자의 가열이 일어난다. 일반적으로 각 연소과정의 지속시간은 입자가 커질수록 길어지지만, 휘발분의 착화시점이 입자의 크기에 상대적으로 가장 큰 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

입자의 크기가 커짐에 따라 입자의 체적이 세계 곱에 비례해서 커지기 때문에, 입자의 크기가 휘발분의 착화시점도 이와 같은 비율로 지연되고 있음을 볼 수 있는데, 이는 입자의 크기가 증가할수록 입자내부에 있는 고정수분의 증발과 휘발분의 착화에 필요한 에너지를 흡수해야 할 시간이 더욱 필요하기 때문이라고 여겨진다.

달리 말해서, 입자의 크기를 작게 미분화 할수록 착화시점이 짧아지기 때문에 입자크기가 보다 작은 미분탄 연소에 있어서는 휘발분의 조기착화로 인한 고온의 가스화염이 석탄입자를 분출하는 버너의 노즐 팁 가까이로 부착될 가능성이 높다는 것을 의미한다. 즉, 휘발분의 함량이 상대적으로 높은 저열량 아역청탄의 경우 미분탄의 입자의 크기를 상대적으로 크게 하면 휘발분의 착화시점을 지연하여 고온의 휘발분 가스화염이 노즐 팁으로부터 멀어지게 하여 팁을 보호할 수가 있음을 시사한다.

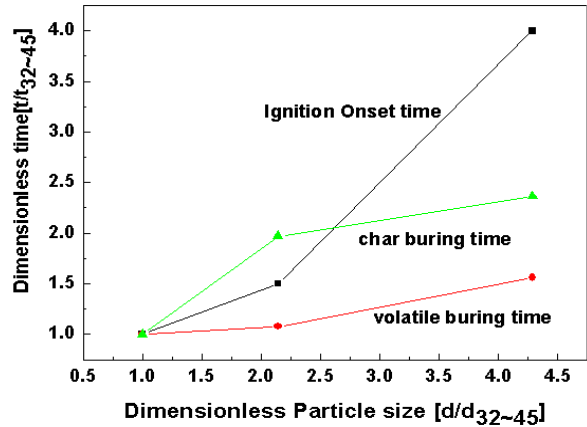


Fig. 6 Comparison of each combustion process durations as a function of size

일단 석탄입자의 외곽에 층을 이루어 휘발분이 연소하기 시작하면 석탄입자를 둘러싸며 밝은 황색빛을 띠는 코로나가 형성된다. 휘발분 연소시 방출되는 열로 인하여 입자 인근의 가스온도는 석탄입자의 온도보다 급격히 상승하여, 열이 입자로 전달되어 입자의 온도상승을 가속시키게 되고 이는 다시 휘발분의 방출을 가속시키는 펌핑 효과를 유발하여, 총 휘발분이 방출되어 연소하는 시간은 입자의 크기변화에 따라 상대적으로 적게 영향을 받는 것으로 나타났다. 휘발분이 연소하고 있는 동안에는 황색빛의 화염이 지배적이다. 코로나는 휘발분의 방출율이 최대에 도달할 때 까지 팽창되었다가 방출할 수 있는 휘발분이 줄어들기 때문에 수축하게 된다. 휘발분의 연소에 의한 가스화염면이 입자와 떨어져 형성되기 때문에 아직 최의 연소는 시작되지 않는다. 이는 입자쪽으로 침투하여 오는 산소는 휘발분의 산화에 소모되어 어느 시점까지는 입자에 도달할 수 없기 때문이다. 탈휘발화가 한계에 도달함에 따라 Fig. 5 에서 볼 수 있듯이 화염면은 입자의 표면에 가까워지고 휘발분 방출이 거의 종료될 때에는 산소가 입자의 표면에 도달하여, 최의 산화가 시작되어 두 연소과정의 오버랩 하게 된다.

따라서 본 연구에서는 최의 연소 시작점을 화염 구조로부터 정확히 예측하기는 곤란하지만, 앞에서 언급한 것처럼 휘발분이 연소할 때에는 밝은 황염이 지배적이기 때문에, 각각의 이미지에서 밝은 황염이 차지하는 영역은 전체 휘발분의 연소로 인해 생겨난 것으로 볼 수 있어 휘발분의 연소가 시작된 이후 황염이 차지하는 누적전체 면적이 90%이상 되는 시점부터, 즉 휘발분이 90%이상 방

출된 상태에서 좌의 연소가 시작되는 것으로 가정하였다. 그리고 Fig. 5의 모든 화염이미지에 대하여 동일한 조건하에서 이미지 처리과정을 통하여 각각의 이미지에 대하여 화염이 차지하는 누적면적이 90% 이상이 되는 위치에서 화염강도가 일정하게 같게 보이는 선단을 얻어 좌의 산화가 시작되는 점이라고 보았고 상대적인 좌의 산화시작점을 비교하였다. Group II 입자군의 경우 좌 산화의 시작점은 구조로부터 체류시간이 $z = 45\text{mm}$ 지점부터 시작되는 것으로 계산되었다.

Fig. 6에서 group III의 입자군이 연소할 때 좌의 연소시간의 증가율이 완만하게 변화하고 있는 것을 볼 수 있는데, 이는 산화하고 있는 좌와 주변 가스 온도와의 차이가 커서 좌 온도의 급속한 강하로 인한 영향으로 인한 화염의 소화를 가속화시켰기 때문이라고 사료된다.

3.2 화염안정성에 미치는 입자크기의 영향

미분탄의 연소시 화염의 안정성은 주로 입자크기의 분포와 휘발분의 함량에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다.⁽²⁰⁾ 화염의 안정도에 미치는 입자크기의 영향은 앞서 설명한 방법을 통하여 조사하였는데, 그 결과를 Table 3에 입자의 크기 증가에 따른 화염의 평균길이와 표준편차, 그리고 정규화한 표준편차의 값으로 나타내었다. 화염의 불안정성은 그룹 I, II, III으로 입자의 크기가 증가할수록 3.3%, 7%, 9.6%로 각각 증가하였다. 하지만 불안정성의 증가율은 입자크기의 증가율에 대하여 지수함수적으로 완만하게 증가하는 것으로 나타났다.

3.3 체류시간에 따른 좌의 온도 및 크기변화

Fig. 7은 Group II에 속한 미분탄 입자가 연소할 때, 체류시간이 길어짐에 따른 입자의 크기와 온도가 어떻게 변화하고 있는지를 반응기 내부의 온도변화와 함께 보여주고 있다. 그림에서 나타낸 반응기 내부의 온도값들은 열전대의 복사손실을 보정하여 구한 값으로 표시하였다.

Group II 입자군의 좌연소의 시작점이 $z = 45\text{mm}$ 지점부터 시작한다고 계산되었기 때문에, 입자의 유입이 시작되는 평판화염으로부터 하류방향으로 각각 $z = 50\text{mm}$, 90mm and 130mm 세 지점에서 부분적으로 산화하고 있는 좌입자의 샘플을 채취하였다. 좌 입자의 온도와 주변 가스와의 온도차는 체류시간에 따라서 약 $400\sim 450\text{ }^\circ\text{K}$ 로 나타났다.

입자의 유속은 미분탄의 입자의 크기가 마이크로 사이즈이고 유속도 빠른 편이 아니어서 분위기

Table 3 The mean flame length and the normalized standard deviation.

Coal	Group I	Group II	Group III
Dimensionless size	1	2.1430	4.29
Mean Flame length [mm]	74.76	124	168.33
STD	2.488	9.15	16.18
Normalized STD	0.033	0.07	0.096

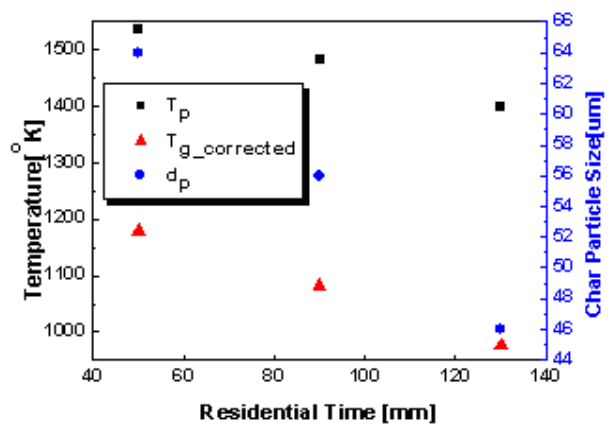


Fig. 7 Variation of char particle size and temperature for Roto-M coal at different burning times

가스의 유속과 동일한 속도로 흐른다고 가정한 후, 반응기 단면을 통해 흐르는 총 공급 가스 유량 6.43slpm 에서 반응기 단면적과, 메탄과 공기의 반응으로 가스온도의 상승에 의한 가스팽창을 고려하여 계산하였다. 본 실험의 경우 좌의 연소과정이 진행되고 있는 하류방향 세 지점, 즉 평판화염면으로부터 유동의 하류 방향으로 10 , 50 , 90 , 130mm 에서의 가스속도는 이들 각 지점에서의 가스 온도에 의한 팽창을 고려해 계산하면 0.7 , 0.6 , 0.544 , 0.5m/sec 이다. 이들 속도를 고려하여 50 , 90 , 130mm 지점에 해당하는 석탄입자의 체류시간은 각각 75.8 , 145.8 , 222.4ms 이다.

Fig. 7에서 좌 입자의 크기를 체류시간에 따른 변화율을 볼 때 좌 입자는 약 $0.11\sim 0.13\text{mm/sec}$ 의 비율로 줄어드는 것으로 계산되었다. 한편 좌입자의 온도강하율은 본 실험의 좌 연소 구간에서 $1000\text{ }^\circ\text{K/sec}$ 에 달하였다.

4. 결론

미분탄 연소특성을 연구하기 위하여, 실제 상용 미분탄 연소환경을 잘 모사할 수 있는 정교한

LFR 실험장치를 개발, 이 장치를 이용하여 저열량 아역청탄인 Roto-M 의 입자 크기 변화에 따른 미분탄 연소특성을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) LFR 장치는 연소하고 있는 석탄입자의 관찰이 용이하게 하여, 화염구조로부터 휘발분의 연소영역과 좌의 연소시점 등 석탄연소의 각 단계를 파악할 수 있으며 좌의 연소 특성을 파악하고자 할 때에도 별도의 좌를 만드는 준비과정이 필요 없이, 실험을 할 수 있는 편리함을 제공한다.

(2) 석탄입자의 크기는 미분탄 각 연소과정 단계에 큰 영향을 미침을 확인할 수 있었다. 석탄의 입자가 증가할수록 휘발분의 착화 시점에 가장 큰 영향을 주는 것으로 파악되었고, 입자가 커질수록 착화시점은 더욱 급격히 지체되었다. 좌의 연소시간은 입자가 증가할수록 증가하기는 하지만, 본 실험에서는 입자 크기의 증가율에 비해 좌의 연소시간 증가율은 둔화되는 것으로 나타났는데, 이는 타고 있는 좌와 주변공기와의 온도차가 커서 좌 온도의 급격한 강하로 나타난 결과로 판단되지만, 반응기 내부의 가스 온도변화를 최소화한 상태에서 추가 실험을 통하여 확인을 할 필요가 있다고 하겠다. 휘발분의 착화가 일단 시작되면 휘발분 연소시간은 입자크기의 증가에 따라 약간 증가하지만, 다른 연소단계에 비해 입자의 영향은 상대적으로 적었다.

(3) 화염의 불안정성은 석탄입자의 크기가 증가함에 따라 증가함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원 인력양성사업의 대학전력연구센터의 지원으로 연구를 수행하였으며, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Korea Energy Economics Institute, 2008, *Yearbook of Energy Statistics 2008*, Korea Energy Economics Institute, Kyeonggi-do, p. 151
- (2) Kurose, R., Tsuji, H. and Majino, H., 2001, "Effects of Moisture in Coal on Pulverized Coal Combustion Characteristics," *Fuel*, Vol. 80, No. 10, pp. 1457~1465
- (3) Therssen, E., Gourichon, L. and Delfosse, L., 1995, "Devolatilization of Coal Particles in a Flat Flame Experimental and Modeling Study," *Combustion and Flame*, Vol. 103, pp. 115~128.
- (4) Alejandro Molina and Christopher R. Shaddix, 2007, "Ignition and Devolatilization of Pulverized Bituminous Coal Particles During Oxygen/Carbon Dioxide Coal Combustion," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 31, pp. 1905~1912.
- (5) Xiaoxun Ma, Hiroshi Nagaishi, Tadashi Yoshida, Guangwen Xu and Michiaki Harada, 2003, "Kinetics of Rapid Coal Devolatilization Measured Using a Spot Heater Apparatus," *Fuel Processing Technology*, Vol. 85, pp. 43~49.
- (6) Bradley, D., Lawes, M., Ho-Young Park and Usta, N., 2006, "Modeling of Laminar Pulverized Coal Flames with Speciated Devolatilization and Comparison with Experiments," *Combustion and Flame*, Vol. 144, pp. 190~204.
- (7) Christopher R. Shaddix and Alejandro Molina, 2009, "Particle Imaging of Ignition and Devolatilization of Pulverized Coal During Oxy-Fuel Combustion," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 32, pp. 2091~2098.
- (8) Fu, W. B., Zhang, B. L. and Zheng, S. M., 1997, "A Relationship Between the Kinetic Parameters of Char Combustion and the Coal's Properties," *Combustion and Flame*, Vol. 9, pp. 587~598.
- (9) Hongwei Wu, Gary Bryant, Kathy Benfell, and Terry Wall, 2000, "An Experimental Study on the Effect of System Pressure on Char Structure of an Australian Bituminous Coal," *Energy Fuels*, Vol. 14, No.2, pp. 282~290.
- (10) Arias, B., Pevida, C., Rubiera, F. and Pis, J. J., 2007, "Changes in Coal Char Reactivity and Texture During Combustion in an Entrained Flow Reactor," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 90 No.3, pp. 859~863.
- (11) Richelieu Barranco, Andres Rojas, Juan Barraza and Edward Lester, 2009, "A New Char Combustion Kinetic Model 1. Formulation," *Fuel*, Vol. 88, No.12, pp.2335~2339.
- (12) Jeffrey J. Murphy and Christopher R. Shaddix, 2006, "Combustion Kinetics of Coal Chars in Oxygen-Enriched Environments," *Combustion and Flame*, Vol. 144, No. 4, pp. 710~729
- (13) Pinto, A. and Gollahall, S.R., 1979, "Experimental Studies on the Structure of Pulverized Coal Flame," *Proc Okla. Acad. Sci.*, Vol. 59, pp. 64~69
- (14) Yan, Y., Lu, G. and Colechin, M., 2002, "Monitoring and Characterization of Pulverized Coal Flames Using Digital Imaging Techniques," *Fuel*, Vol. 81, No.5, pp. 647~656
- (15) Alfredo Zolin, Anker Jensen, Lars Storm Pedersen, and Kim Dam-Johansen, 1998, "A Comparison of Coal Char Reactivity Determined from Thermogravimetric and Laminar Flow Reactor Experiments," *Energy & Fuels*, Vol.12, No.2, pp 268~276
- (16) Mario L. de Souza-Santos, 2004, *Solid Fuels*

- Combustion and Gasification*, Marcel Dekker Inc., New York, p. 25
- (17) Jinliang Ma, 1996, *Soot Formation During Coal Pyrolysis*, Ph.D. Dissertation, Department of chemical engineering, Brigham Young University, pp 35~37
- (18) Alejandro Molina, 2002, *Evolution of Nitrogen During Char Oxidation*, Ph.D. Dissertation, Department of Chemical and Fuels engineering, University of Utah, pp. 37~39
- (19) Thchenor, D.A., Mitchell, R.E., Henken, K.R. and Niksa, S., 1984, "Simultaneous in Situ Measurement of the Size, Temperature and Velocity of Particles in a Combustion Environment," *The Combustion Institute*, 20th Symposium(International) on Combustion pp. 1213~1221.
- (20) Drbal, Larry, 1996, *Power Plant Engineering*. Westra, Kayla, Boston, Pat (Eds.) p.768.