

미분탄화염에서 가열률이 화염전단의 거동에 미치는 영향

조한창* · 박정규* · 신현동**
(1999년 1월 20일 접수)

Effect of Heating Rate on the Behavior of the Flame Front in the Pulverized-Coal Flame

Han Chang Cho, Jung Kyu Park and Hyun Dong Shin

Key Words: Heating Rate(가열률), Flame Front(화염전단), Gas Concentration(기상농도), Gas Temperature(기상온도)

Abstract

An experimental study was carried out in two laboratory-scale reactors to investigate the effect of heating rate on the behavior of flame front in a pulverized coal flame. Each reactors had different heating mechanisms. For reactor A losing large heat through transparent quartz wall, pulverized coal particles were ignited by secondary air of 1050K. Flame front could be visualized through the transparent wall. Reactor B was insulated with castable refractory to minimize the heat loss through the reactor wall and accompanied with secondary air of 573K. Flame front was estimated from the gas temperature and species concentration measured using R-type thermocouple(Pt-Pt/Rh 13%) and gas chromatograph at various coal-air ratios and swirl intensities. The flame front position was closely related with the magnitude of heating rate. The heating rate for lifted flame was of the order of 10^4 to 10^5 K/s and for coal ignition at least over 10^4 K/s. The heating mechanism had little impact on the extinction limits. The weak swirl number of 0.68 forced the flame front to move toward the upstream by the rapid mixing of coal and air. The primary/secondary momentum ratio was an inappropriate variable to distinct the liftoff of flame.

1. 서론

석탄의 반응과정은 빠른 입자가열에 의한 휘발 물질이 방출되는 탈휘발과정(devolatilization)과 잔류 화(char)가 반응하는 석반응과정으로 구분된다.⁽¹⁾ 석반응은 휘발분의 방출량, 조성, 그리고 반응물들의 탈휘발특성에 의해 지배되며, 탈휘발과정은 가열률(heating rate), 입자크기, 탄의 종류등에 의해 그 특성이 결정된다.^(2,3) 그중 가열률은 입자가 탈휘발과정과 연소를 위해 가열되는 온도 변화율(dT/dt)로 정의되는데, 높은 가열률에서는 탈휘발량의 증가와 입자의 점화온도를 상승시키는 역할을 한다고 알려져 있다.^(2,3)

가열률과 관련된 연구들은 주로 미분탄화염의

전단위치를 비교하여 화염전파(flame propagation) 특성을 파악하는데 집중되었다. Essenhigh⁽⁴⁾는 가열률에 따른 화염전파속도와 연소시간 등의 기존 결과들을 정리하였으며, Beck⁽⁵⁾은 예혼합된 미분탄화염에서 입자크기, 주위가스의 조성과 온도에 따른 점화시간(ignition time)의 변화를 조사하였다. Cogoli⁽⁶⁾는 여러 탄과 공기유량에서 측정된 벽면온도로부터 화염전단의 위치를 파악하였다. Anagnostopoulos⁽⁷⁾와 Abbas⁽⁸⁾는 여러 선회강도와 1차/2차유동의 운동량비에 따른 화염전단의 거동을 관찰하고 이를 근거로 화염안정화선도를 제시하였다.

미분탄 화염전단과 가열률과의 관계에 대한 연구는 많이 있지만, 입자를 가열시키는 가열기구(heating mechanism)가 서로 다른 경우에 있어 가열률이 화염전단의 거동에 미치는 영향에 대한 실험적 연구는 거의 보고되지 않았다. 반응로에 공급되는 석탄입자는 다음의 두 요소에 의해 가열되고 점화된다. 화염과 고온 벽면으로부터의

* 한국과학기술원 대학원 기계공학과

** 회원, 한국과학기술원 기계공학과

복사열전달과 고온으로 공급되거나 내부재순환영역(internal recirculation zone)을 통해 상류로 재유입된 하류의 고온 가스에 의한 대류열전달이 그것이다. 이때 만약 복사열이 대류열에 비해 크다면, 화염선단에서의 입자온도는 입자의 큰 흡수 계수때문에 기상온도에 비해 높을 것이다. 이에 따라 최는 방출된 휘발분이 연소되기 전에 주위 산소와 먼저 반응할 것이다. 반면 입자가 주로 대류열전달에 의해 가열된다면, 화염선단에서는 기상온도가 입자온도에 비해 높게 되고 휘발분이 먼저 점화되고 이후 최의 반응이 본격적으로 일어날 것이다. 즉 미분탄화염을 형성시키는 가열률의 크기가 가열기구에 따라 달라질 수 있다.

본 연구에서는 서로 다른 가열기구를 갖는 두 개의 분류층 석탄반응로(entrained-bed coal reactor)를 제작하여 각각의 가열률에 따른 화염선단의 거동을 살펴보고, 화염선단의 거동으로부터 화염을 노내에 안정화시키기 위한 입자의 가열률을 얻어 보고자 한다. 두 개의 반응로에서 하나는 화염가시화물 수행하고 나머지 하나는 기상온도와 농도를 측정하여 화염선단의 위치를 확인하였다. 측정된 온도와 농도정보는 차후에 진행될 수치해석을 위한 기초정보로 활용하고자 여러 선회수와 석탄/공기비에서 측정하였다. 이들 결과로부터 1차/2차유동의 운동량비(momentum ratio)에 따른 화염선단의 거동을 검토해 보고자 한다. 또한 선회강도가 미분탄화염의 연소특성에 미치는 영향을 파악해 보고자 한다.

2. 실험장치와 방법

2.1. 실험장치

원통형의 분류층 석탄반응로는 모두 상압에서 하방향의 유동을 갖도록 실험실규모로 제작하였다. 장치는 모두 1차유동(primary stream)과 2차유동(secondary stream)을 공급하기 위한 유로계(flow system), 일정량의 미분탄을 공급하는 석탄공급기(coal feeder), 그리고 반응로로 구성되어 있다.

장치 A는 Fig.1과 같이 길이 1200mm이고 직경 57mm인 투명한 석영관을 화로로 사용하였다. 스크류형태의 석탄공급기에서 공급되는 미분탄은 284K의 1차공기와 함께 내경 5mm, 외경 6mm의 분류관을 통해 반응로에 공급된다. 1차공기와 동

축으로 분류되는 2차공기는 내경 28mm의 관으로 공급된다. 이때 2차공기는 미분탄점화물 위하여 버너출구로부터 45mm 하류에서 측정한 기상온도가 정상상태의 안정된 1050K가 될때까지 예열하여 공급하였다. 이때 2차공기의 예열은 별도 제작된 예비버너에 LPG-공기화염을 형성시키고 이곳에 2차공기를 통과시켜 예열시켰다. 기상유동의 유량은 오리피스와 마노메타를 이용하여 검증하였다.

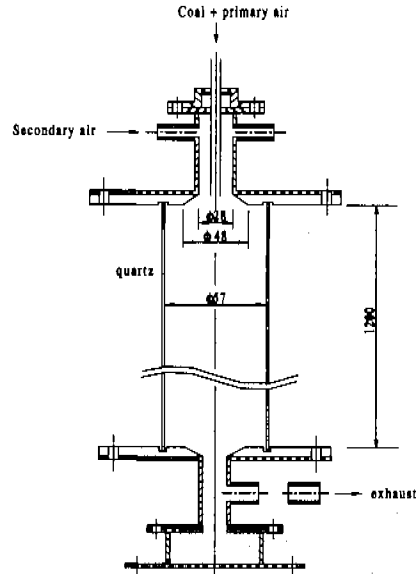


Fig. 1 Schematic diagram of coal feeder A.

길이 1200mm, 직경 50mm의 원통형 반응로 B는 Fig.2와 같이 캐스터블(castable)로 단열된 각 300mm의 블록 4개로 구성하였다. 반응로 B의 상단에는 스파크(spark) 점화기를 장착시켜 반응로를 예열시키기 위한 LP가스-공기 혼합기(mixture)를 점화시켰으며 화염을 점화시킨 후에는 유동교란을 막기 위하여 이를 반응로에서 제거시켰다. 국부적인 화염모양과 거동을 관찰하고 온도와 농도동을 측정하기 위하여 반응로의 양쪽에 각 4개씩의 창(window)을 쉐기모양으로 만들어 부착시켰다. 이때 창에 의해 생긴 공간을 통해 발생하는 유동교란과 열손실을 최소화하기 위하여 창에 내화물질을 넣어두었다. 한쪽면의 창에는 내화물질에 K형 열전대를 부착시켜 반응로의 벽면온도를 계속 측정하고, 다른 쪽의 창은 개조하여 온도와 농도 프루브(probe)를 삽입하기 위한 주입구를 만들었다. 미분탄과 284K의 1차공기는 두께

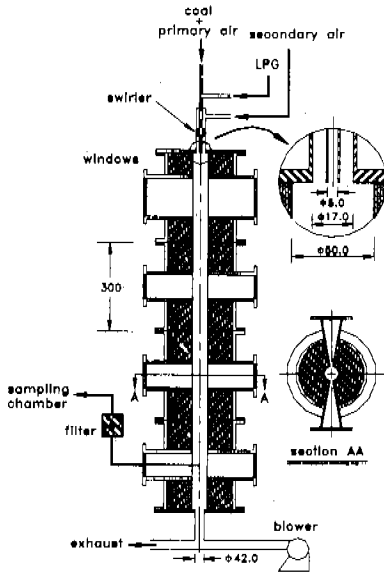


Fig. 2 Schematic diagram of coal reactor B.

0.5mm, 내경 5mm의 인젝터(injector)를 통해 반응로에 공급하였다. 전기예열기에서 573K로 가열된 2차공기는 인젝터와 동축인 외경 17mm의 강관을 통해 공급하였다. 반응로의 배기구에 있는 송풍기(blower)는 배출가스와 입자의 배기를 원활히 하기 위하여 설치하였다.

2.2. 실험방법

실험에는 고휘발분의 인도네시아산 키데코탄(kideco coal)이 사용되었다. 보령화력발전소의 야적장에서 채취한 원탄을 분쇄하여 Table 1과 같은 입경으로 만들어 실험에 사용하였다. 키데코탄은 공업분석(proximate analysis)으로부터 12.10% 수분, 43.30% 휘발분, 42.92% 고정탄소, 그리고 1.68% 회분으로 구성되어 있으며, 원소분석(ultimate analysis)으로부터 70.40% C, 4.79% H, 1.22% N, 0.25% S, 1.78% ash and 21.56% O의 성분으로 이루어져 있음을 알 수 있으며, 건조상태(dry basis)에서의 발열량은 26.62MJ/kg이었다.

반응로 A에서는 1차공기와 2차공기의 유량을 각각 0.54와 1.78kg/hr로 고정시키고, 미분탄유량, m_c 를 73에서 230g/hr까지 공급하여 실험하였다. 이에 따라 사용된 당량비는 최소 0.34에서 최대 1.04이었다. 실험과정은 다음과 같다. 정상상태(steady state), 1050K의 2차공기를 얻기 위하여 예비버너와 2차공기의 배관을 2시간동안 가열하고,

Table 1 Particle size distribution.

Diameter(μ m)	Weight %	Cum. weight %
0-3	0.9	0.9
3-6	3.5	4.4
6-12	8.2	12.6
12-24	16.5	29.1
24-48	25.4	54.5
48-64	7.3	61.8
64-96	18.5	80.3
96-128	14.7	95.0
128-196	5.0	100.
Mean diameter 43.2 μ m		

Table 2 Experimental conditions of reactor B.

Coal feed rate(kg/hr), m_c	1.45 ~ 2.74
Primary air (kg/hr), m_1	1.37 ~ 2.57
Secondary air(kg/hr), m_2	7.77 ~ 14.54
Equivalence ratio	0.88 ~ 2.64
Theoretical swirl number, S	0.0, 0.68

이후 반응로에 석영관을 끼워 넣고 5분정도물 더 가열한 후에 미분탄을 공급하였다. 미분탄을 공급하면 입자들이 석영관의 벽면에 부착되어 불투명해지므로 빠른 시간내에 화염가시화물 중절하도록 하였다.

반응로 B에서는 Table 2와 같이 미분탄유량, 공기유량, 그리고 선회수동을 변수로 채택하였다. 이때 1차/2차유동의 질량유량비는 15/85로 항상 일정하게 고정시켰다. 실험은 주로 비교적 높은 연료과잉의 당량비에서 수행되어졌다. 2차류의 선회유동은 베인(vane)각이 43° 인 베인형 선회기를 이용하여 형성시켰다.

이론적인 2차류의 선회수는 정의식 $S = 2G_\phi / G_x D$ 로부터 0.68임을 알 수 있었다.⁽⁹⁾ 이때 버너출구에서의 각운동량(angular momentum) G_ϕ 와 축방향운동량(axial momentum) G_x 는 아래와 같이 정의된다.

$$G_\phi = \int_{D/2}^{D/2} \rho U W \cdot \pi r^2 dr \quad (1)$$

$$G_x = \int_{D/2}^{D/2} \rho U^2 \cdot \pi r dr \quad (2)$$

여기서 U와 W는 2차공기의 축방향과 반경방향

속도를 의미한다. 또한 D 와 D_h 는 2차공기가 주입되는 외경($D=17\text{mm}$)과 내경($D_h=6\text{mm}$)이다.

반응로 B에서는 실험을 한번 수행하는데 대략 3.5시간이 소요되었다. 처음의 두시간은 LP가스를 노내에 점화시켜 반응로를 가열하는데 사용되고, 이후 LP가스의 공급을 중단시키고 미분탄을 공급하였다. 이후 형성된 미분탄 화염을 안정화시키는데 45분이 소요되었다. 이때 안정된 미분탄 화염은 노내 벽면에 부착된 K형 열전대를 이용하여 측정된 온도가 정상상태인 경우를 기준으로 정의하였다. 안정된 미분탄화염이 얻어지면 이후 노내에서 온도를 측정하고, 기상농도를 측정하기 위해 기상샘플을 포집하였다.

반응로 B에서 기상온도는 0.125mm R형 열전대(Pt-Pt/Rh 13%)를 창으로 삽입시켜 충분히 안정된 후에 측정하였다. 열전대의 비드에서는 큰 복사열손실이 일어나는데, 비드에 용융 화분이나渣가 부착되면 이것은 더욱 증가될 것이다. 그러나 슬래그(slag)의 부착률과 방사율(emissivity), 그리고 누셀 수(Nusselt number)를 정확히 알 수 없기 때문에 복사열손실을 고려하여 실제온도를 알아내는 것은 매우 어렵다. 단순히 대류와 복사열전달을 고려하여 그 오차를 평가해보면 측정된 결과의 10%이내에 있다는 것을 알 수 있었다.

농도측정을 위한 기상샘플은 창을 통해 내경 2mm, 외경 9.6mm의 water-cooled probe를 삽입하여 노 중심에서 채취한 샘플에서 입자와 수분을 제거한 후에 채집관에 포집하였다. 이러한 포집 방법은 프루브에 의해 유동장내 난류변동(turbulent fluctuation)이 생성되고 이에 따라 측방향 분해능(spatial resolution)이 불확실해진다. 난류변동은 실험과정에서 측정할 수 없었지만, 포집된 기상샘플은 포집배관에서외 간단한 연속방정식으로부터 프루브 주위의 5mm내에 있는 가스가 채집되었다는 것을 알 수 있었다. 채집관에서 동일 부피의 샘플을 주사기로 채취하여 이를 GC(HP 7590A with a TCD)에 주입하여 H_2 , O_2 , N_2 , CH_4 , CO , CO_2 와 C_2H_2 의 농도를 분석하였다. 농도측정과 관련된 오차는 측정된 결과에 대하여 $\pm 5\%$ 내에 있었다.

3. 실험결과 및 토론

3.1. 실험결과

Fig.3은 반응로 A의 상류에서 공급된 석탄입자가 하강하면서 연소되는 과정을 직접 가시화한 것이다. 사진은 셔터속도 1/125초로 촬영한 것이다. 공기유량을 고정시키고 석탄유량을 증가시키면서 가시화한 결과이다. 당량비, $\phi=0.34$ 에서는 화염이 버너에 부착되어 있지만, 석탄유량이 증가되면서 화염이 버너에서 탈착되어 부상거리가 증가되며 당량비 1.06에서는 미약한 반응만이 나타나고 안정된 화염을 얻을 수 없었다. 화염선단의 상류에 나타난 붉게 가열된 가스는 석탄으로부터 발산된 휘발분이 미약하게 반응하기 때문에 나타나는 것으로 판단된다. Fig.3에서 미분탄의 연소과정이 상류에서의 탈휘발과 기상연소, 그리고 기상연소가 중결되고 개개의 입자들이 떨어지면서 반응하는 두 개의 반응과정으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 그러나 다른 연구자들⁽⁴⁾에 논란이 되고 있지만, 기상연소와 착연소가 동시(simultaneous)에 또는 일련(series)의 과정으로 구성되어 있는지에 대한 사항은 확인할 수 없었다. 이는 고휘발분의 탄을 사용하여 휘발분이 광범위한 영역에서 연소되었기 때문이다.

Fig.4는 반응로 B의 중심축에서 측정된 기상온도분포를 도시한 것이다. 기상온도는 버너출구부터 점차 상승하여 반응로의 중간부근에서 최대값을 나타내었고 이후에는 점차 감소하는 경향을

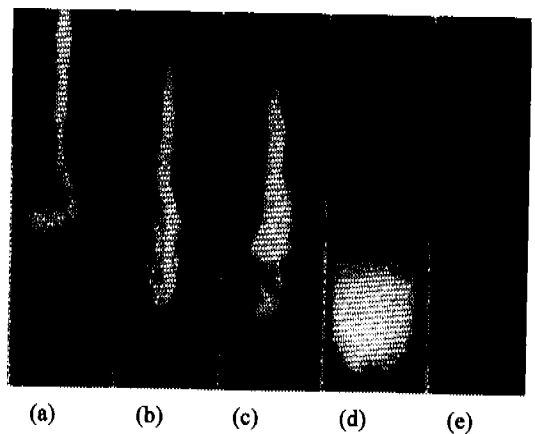


Fig. 3 Direct photographs of coal flame with various coal feed rates at constant air flow rate of 2.32kg/hr (a) $m_c(\text{g/hr})=72.6$, $\phi=0.34$ (b) $m_c=101.7$, $\phi=0.47$ (c) $m_c=136.1$, $\phi=0.63$ (d) $m_c=191.4$, $\phi=0.88$ (e) $m_c=230.1$, $\phi=1.06$.

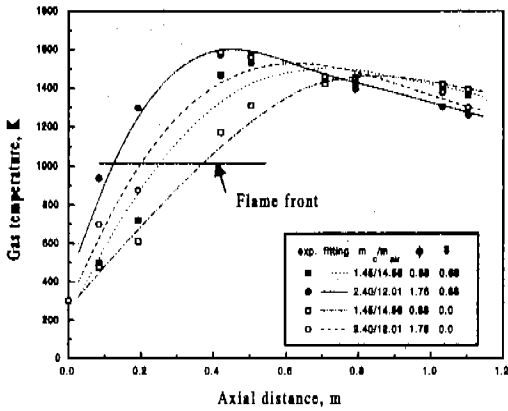


Fig. 4 Axial gas temperature profiles at several swirl numbers and flow rates.

나타내었다. 기상의 최고온도는 대략 1500K로 비교적 낮았다. 이는 다음의 두가지 요소때문이라 판단된다. 하나는 열전대 비드에서의 복사열손실을 보상하지 않았기 때문이며, 또 하나는 작은 반응로에서는 단열을 하였더라도 큰 반응로에 비해 벽면열손실이 크기 때문이다.⁽¹⁰⁾ 반응로 B의 벽면열손실은 대략 30%정도였는데, 이는 다른 연구자들⁽¹¹⁾의 반응로에 비해 10%정도 높은 것이다.

창을 통해 가시적으로 확인하거나 측정된 온도와 농도로부터 화염전단의 위치를 결정할 수 있다. 가시적인 화염전단에서의 온도가 923K라는 Anagnostopoulos⁽⁷⁾의 결과가 있지만 1000K를 화염전단이라 가정하면, Fig.4로부터 화염전단은 당량비, 전체적인 공기유속, 그리고 선회수에 지배됨을 알 수 있다.

Fig.5는 반응로 B에서 선회수가 0.68이고 당량비가 0.88, 1.43, 그리고 1.76인 경우의 산소, 이산화탄소, 일산화탄소, 그리고 수소의 축방향 농도를 중심축에서 측정하여 도시한 것이다. 산소는 버너출구에서 빠르게 감소하고 어느 정도이후에는 평평한 분포를 갖고 있었다. 나머지 일산화탄소, 이산화탄소, 그리고 수소는 하류로 가면서 점차 증가되었는데 산소농도가 평평한 위치에서 이들도 역시 평평한 분포를 갖고 있음을 볼 수 있었다. 이는 이 지점이 약한 반응률을 갖는 불균일반응영역(heterogeneous reaction zone)이라는 것을 의미한다. 위와 같은 경향은 다른 연구자들의 결과^(12,13,14)와 일치한다. 당량비 0.88에서 일산화탄

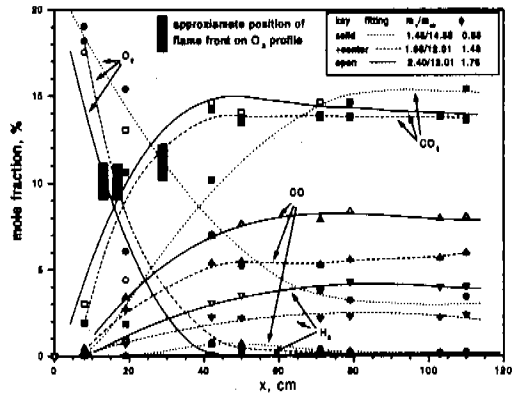


Fig. 5 Axial gas concentration profiles at S=0.68.

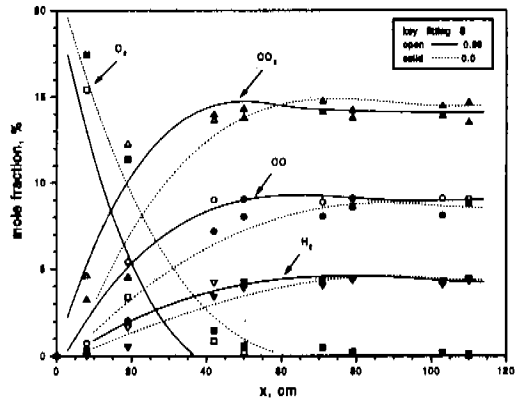


Fig. 6 Effect of swirl on axial gas concentration profiles at equivalence ratio of 2.64 and coal feed rate of 2.74kg/hr.

소는 약간 생성되었다가 소멸되지만, 수소는 거의 검출되지 않았다. 당량비 1.43과 1.76에서 산소는 노내에서 완전 소멸되었으며, 일산화탄소와 수소는 약간씩 생성되는데 당량비가 높을수록 많이 생성되었다. 위의 당량비에서 농도분포는 모두 비슷한 경향을 보였으며, 화염전단의 위치나 반응영역의 크기에 차이가 약간 존재하였다. 즉 당량비가 높을수록 화염전단이 약간 상류에 존재하였으며 반응영역도 약간 짧아져 불균일반응영역이 좀 더 상류에서 시작되었다.

반응로 B에서 2차류의 선회수가 0.0과 0.68인 경우의 축방향 기상농도를 Fig.6에 도시하였다. 선회가 없는 경우(S=0.0)에 비해 S=0.68일 때 좀 더 급한 농도기울기를 갖고 있었으며 화염전단도 상류에 위치하였다. 이는 높은 선회수에서 급한 기울기와 빠른 화염전단의 결과를 얻은 다른

연구^(14,15)와 결과와 같은 경향이다. 그러나 배기구로 배출되는 기상농도는 차이가 없었다.

3.2 토론

화염선단까지의 입자 가열률은 주위 공기로부터의 대류열전달과 화염과 벽면으로부터의 복사열전달에 의한 열교환의 크기에 의해 지배된다. 반응로 A에서 석탄입자는 주로 고온의 2차공기에 의해 가열된다. 비록 화염선단부근에서는 복사열전달량이 증가되었지만 화염과의 solid angle이 적다. 또한 파장별 복사에너지와 석영관의 투과율을 고려하면,⁽¹⁶⁾ 고온영역(800K이상)에서는 대부분의 복사열이 석영관을 그대로 투과되기 때문에 그만큼 복사열손실이 일어나고 벽면에 흡수되지 못하므로 벽면의 온도는 낮은 상태로 존재하게 된다. 이에 따라 벽면과 화염으로부터 석탄입자를 향한 복사열전달량을 무시할 수 있다. 공기유량을 일정하게 유지시키고 석탄유량만을 증가시키면, 미분탄의 온도를 상승시키기 위해 요구되는 열량이 증가되므로 그들의 평형온도는 점차 하락할 것이다. 즉 각 입자의 관점에서 보면, 탈휘발과 점화를 위한 가열시간이 점차 길어지게 된다. 이에 따라 화염선단은 Fig.3에서 보는 바와 같이 점차 하류로 이동하게 된다. Fig.3의 가시화 결과로부터 화염선단까지의 가열률을 계산해 보면, 당량비 0.34에서는 10^4 K/s 이상, 당량비 0.47에서는 10^5 K/s 정도, 당량비 0.63에서는 7.0×10^4 K/s, 당량비 0.88에서는 2.0×10^4 K/s로 점차 하락하고, 그 이하의 가열률에서는 Fig.3(e)와 같이 입자들이 점화되지 않았다. 여기서 가열률의 계산에 필요한 버너에서 화염선단까지의 입자속도는 비반응유동장에서의 기상속도와 큰 차이가 없을 것으로 판단하여 수치계산에서의 기상속도를 버너에서 화염선단까지 평균하여 얻었다.

반응로 B에서 입자들은 주로 화염과 고온의 반응로 벽면으로부터의 복사열에 의해 가열된다. 왜냐하면 공급되는 2차공기의 온도가 낮고 하류의 고온가스가 상류로 유입되는 내부재순환영역(internal recirculation zone)이 노내에 존재하지 않기 때문이다. Fig.5에서 화염선단의 위치는 국부적인 석탄의 발열량(heat release rate)과 벽면열손실의 크기로부터 유추할 수 있다. 석탄유량의 감소는 노내 발열량의 감소를 의미하기 때문에 동일한 벽면열손실비에서 벽면온도는 하락할 수밖

에 없다. 이에 따라 복사열이 줄어들면서 부상거리는 점차 증가되고 화염선단까지의 입자 가열률은 점차 감소하게 된다. 당량비 1.43과 1.76에서 입자의 가열률은 5.0×10^4 K/s로 대략 비슷하였다. 이는 화염선단의 위치차이가 크지 않았기 때문이다. 긴 부상거리를 갖는 당량비 0.88에서 그 가열률은 2.0×10^4 K/s이었다. 이보다 낮은 가열률에서는 화염이 노내에서 안정되지 못하고 점차 소멸된(extinction)을 실험적으로 확인할 수 있었다. 이로부터 안정된 미분탄화염을 얻기 위해서는 최소한 10^4 K/s 이상의 가열률이 필요함을 알 수 있었다.

반응로 A와 B로부터 안정된 미분탄화염은 가열기구에 관계없이 10^4 K/s 이상의 가열률이 필요함을 알 수 있었다. 석탄입자의 점화한계는 탈휘발특성을 결정하는 탄의 종류와 입도에 따라 결정될 것이다. 실험에 사용된 키데코탄은 점화온도가 554K로 매우 낮은 등 다른 탄에 비해 반응성이 매우 뛰어나다. 그러므로 거의 모든 탄의 점화를 위해서는 최소 10^4 K/s 이상의 가열률이 필요하다고 할 수 있다.

화염의 부상거리를 증가시키는 방법은 선회수의 감소, 주유동 속도의 증가, 그리고 공기외 예열온도를 저하시키는 방법등이 있다.⁽¹⁷⁾ 선회수 1.5까지는 선회류가 미분탄을 빠르게 분산시켜 산화제와의 혼합을 촉진시키기 때문에 화염을 상류로 이동시킨다. 이렇게 줄어든 부상거리가 항상 점화시간을 감소시키고 가열률을 증가시키지는 않는다. 왜냐하면 선회류에 의해 버너출구에서의 축방향속도가 더욱 빠르게 감소되기 때문이다. 주유동속도의 증가는 어느정도 혼합을 억제시키기때문에 부상거리를 증가시키지만, 가열률의 크기는 크게 감소되지는 않는다.

몇몇 연구자들^(7,8)은 1차/2차유동의 운동량비 $[(m_1+m_2)u_1/m_2u_2]$ 가 높을수록 화염이 부상되면서 불안정해진다고 보고하였다. 이는 주유동속도를 증가시키는 경우와 동일한 변수로 취급될 수 있다. 본 연구의 반응로 A에서는 위의 연구자들과 같은 경향의 결과를 얻었다. 즉 운동량비 2.29의 Fig.3(a)에서 부착된 화염을 관찰할 수 있었으며, 2.88의 Fig.3(e)에서는 점화되지 않았다. 그러나 반응로 B에서는 0.26에서 0.46으로 운동량비를 증가시켰을 때 화염선단이 오히려 상류로 이동하는 것을 볼 수 있었다. 이것이 당량비에 의한 것인

지 가열기구의 차이에 따른 결과인지는 확실하지 않다. 그러나 이로부터 화염의 부상여부를 판단하는 인자로 1차/2차류의 운동량비를 택하는 것은 부적절함을 알 수 있었다.

4. 결 론

가열물에 따른 화염전단의 거동을 조사하기 위하여 두 개의 소형 반응로를 제작하였다. 반응로 A에서 입자는 주로 대류열전달에 의해 점화되며, 화염가시화를 수행하여 화염전단의 위치를 확인하였다. 복사열전달을 극대화하기 위하여 반응로 B는 벽면을 단열시켰으며, 기상온도와 농도를 측정하여 석탄/공기비와 2차선화수의 효과를 얻었다. 반응로 B의 결과는 차후에 수행할 수치해석의 기초정보로 활용하고자 하며, 위의 실험으로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 가열물로부터 화염전단의 위치를 대략적으로 확인할 수 있었다. $10^3 \sim 10^4 \text{K/s}$ 에서는 부상화염이 형성되었으며, 10^4K/s 이하에서는 화염이 형성되지 않았다. 이 가연한계는 가열기구의 영향을 받지 않았다.

(2) 화염전단은 당량비, 공기유속, 그리고 선회수에 의해 결정되었다. 선회수는 상류에서 높은 반응률을 유도하였지만, 배기농도에는 큰 영향을 주지 못하였다.

(3) 1차/2차류동의 운동량비는 화염의 부상을 판정하기에는 부적절한 인자였다. 운동량비에 따라 화염은 상류 또는 하류로 이동할 수 있었다.

후 기

본 연구는 한전연구원(KEPRI)의 재정지원(TR.92GJ11.97.26-12)에 의해 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) Smoot, L. D., 1984, "Modeling of Coal-Combustion Processes," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol.10, pp. 229-272.

- (2) Niksa, S., Heyd, L. E., Russel, W. B., and Saville, D. A., 1984, "On the Role of Heating Rate in Rapid Coal Devolatilization," *Twentieth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, pp.1445-1453.
- (3) Singer, S., 1984, *Pulverized Coal Combustion*, Prenum press.
- (4) Essenhigh, R. H., 1976, "Combustion and Flame Propagation in Coal Systems: A Review," *Sixteenth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh pp.353-374.
- (5) Beck, N. C. and Hayhurst, A. N., 1990, "The Early Stages of the Combustion of Pulverized Coal in High Temperatures I: The Kinetics of Devolatilization," *Combust. Flame*, Vol.79, pp.47-74.
- (6) Cogoli, J. G., Gray, D., and Essenhigh, R. H., 1977, "Flame Stabilization of Low Volatile Fuels," *Combust. Sci. Technol.*, Vol.16, pp.165-176.
- (7) Anagnostopoulos, J. S., Sargianos, N. P., and Bergeles, G., 1993, "The Prediction of Pulverized Greek Lignite Combustion in Axisymmetric Furnaces," *Combust. Flame*, Vol.92, pp.209-221.
- (8) Abbas, T., Costen, P., Hassan, M. A., and Lockwood, F. C., 1993, "The Effect of the Near Burner Aerodynamics on Pollution, Stability and Combustion in a PF-Fired Furnace," *Combust. Sci. Technol.*, Vol.93, pp.73-90.
- (9) Gupta, A. K., Lilley, D. G., and Syred, N., 1984, *Swirl Flows*, Abacus press.
- (10) Yagi, S. and Kunii, D., 1956, "Studies on Combustion and Gasification of Pulverized Coal in a Model Cyclone Generator," *Sixth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, pp.584-590.
- (11) Soelberg, N. R., Smoot, L. D., and Hedman, P. O., 1985, "Entrained Flow Gasification of Coal," *Fuel*, Vol.64, pp.776-788.
- (12) Smoot, L. D., Horton, M. D. and Williams, G. A., 1976, "Propagation of Laminar Pulverized Coal-Air Flames," *Sixteenth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, pp.375-387.

- (13) Milne, T. A. and Beachey, J. E., 1977, "The Microstructure of Pulverized-Coal Flames. II. Gaseous Species, Particulate and Temperature Profiles," *Combust. Sci. Technol.*, Vol.16, pp.139~162.
- (14) Godoy, S., Hirji, K. A., and Lockwood, F. C., 1988, "Combustion Measurements in a Pulverized Coal-Fired Furnace," *Combust. Sci. Technol.*, Vol.59, pp.165~182.
- (15) Beer, J. M., Chomiak, J., and Smoot, L. D., 1984, "Fluid Dynamics of Coal Combustion: A Review," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol.10, pp.177~208.
- (16) Incropera F. P. and De Witt D. P., 1990, *Introduction to Heat Transfer*, John Wiley & Sons.
- (17) Wendt, J. O. L. and Pershing, D. W., 1977, "Physical Mechanisms Governing the Oxidation of Volatile Fuel Nitrogen in Pulverized Coal Flames," *Combust. Sci. Technol.*, Vol.16, pp.111~121.