

층류 반응기를 이용한 수분함량에 따른 석탄 휘발분의 점화 특성에 관한 연구

김재동* · 정성재** · 김규보*** · 장영준**** · 송주헌**** · 전충환****†

* 부산대학교 기계공학부, ** 한국남부발전, *** 부산대학교 화력발전에너지분석기술센터, **** 부산대학교 기계기술연구소

Observation of Ignition Characteristics of Coals with Different Moisture Content in Laminar Flow Reactor

Jae Dong Kim*, Sung Jae Jung**, Gyu Bo Kim***, Young June Chang****, Ju Hun Song**** and Chung Hwan Jeon****†

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

** Koera Southern Power Co., LTD.

*** Pusan Clean Coal Center(PC³), Pusan Nat'l Univ.

**** School of Mechanical Engineering, RIMT, PC³, Pusan Nat'l Univ.

(Received September 24, 2010 ; Revised January 6, 2011 ; Accepted March 3, 2011)

Key Words: Combustion(연소), Fuel Moisture Micro Supplier(연료수분미소정량공급기), Ignition(점화), Moisture(수분), Volatiles(휘발분)

초록: 본 연구의 주 목적은 연료 수분 미소 정량 공급기를 장착한 층류 반응기(LFR)에서 수분함량 변화에 따른 석탄의 휘발분 점화 특성을 조사하는 것이다. 실제 발전소의 미분기 출구 분위기와 비슷한 수분량이 석탄량의 20, 30, 40%로 LFR에 석탄과 함께 공급했을 때 휘발분의 점화 위치와 시간을 실험적으로 관찰하였다. 석탄이 공급되는 층류 반응기 정 중앙의 수직방향으로 70 μ m R-type 열전대를 이용하여 복사 열손실을 고려한 가스온도를 측정하였고, 휘발분 점화 위치는 CCD 카메라를 이용해 촬영한 15~20개의 이미지를 디지털 이미지 프로세싱을 통해 얻은 평균 값으로 결정하였다. 그 결과 수분량이 증가할수록 가스 온도는 감소하였고, 점화 위치는 2.92, 3.36, 3.96, 4.65mm로 지수적으로 증가하였다. 이러한 실험결과는 이론적으로 adiabatic thermal explosion에서의 점화 지연 시간과 같은 경향을 나타내었다.

Abstract: The main objective of this study is to investigate the variation in the ignition characteristics of coals as a function of moisture content in a laminar flow reactor (LFR) equipped with a fuel moisture micro-supplier designed by the Pusan Clean Coal Center. The volatile ignition position and time were observed experimentally when a pulverized coal with moisture was fed into the LFR under burning conditions similar to those at the exit of the pulverizer and real boiler. The reaction-zone temperature along the centerline of the reactor was measured with a 70- μ m, R-type thermocouple. For different moisture contents, the volatile ignition position was determined based on an average of 15 to 20 images captured by a CCD camera using a proprietary image-processing technique. The reaction zone decreased proportionally as a function of the moisture content. As the moisture content increased, the volatile ignition positions were 2.92, 3.36, 3.96, and 4.65 mm corresponding to ignition times of 1.46, 1.68, 2.00, and 2.33 ms, respectively. These results indicate that the ignition position and time increased exponentially. We also calculated the ignition-delay time derived from the adiabatic thermal explosion. It showed a trend that was similar to that of the experimental data.

- 기호설명 -

A : 선지수함수 인자 (1/s)

c_v : 정적 비열 (J/g·K)

D_{AB} : 이성분확산계수 (m^2/s)

L : 실린더 길이 (m)

\dot{m}_A : 수분 질량 플럭스 ($kg/s \cdot m^2$)

q_c : 휘발분 연소열 방출량 (J/g)

T_g : 반응영역 온도 (K)

† Corresponding Author, chjeon@pusan.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

- T_a : 활성화 온도 (K)
- $Y_{A,i}$: $x=0$ 에서의 질량분율
- $Y_{A,\infty}$: $x=L$ 에서의 질량분율
- ρ : 밀도 (kg/m^3)
- τ_i : 점화 지연 시간 (s)

1. 서론

석탄은 화석연료 중 전 세계적으로 매장량이 가장 풍부한 에너지원으로 국제 에너지 기구(IEA)에 따르면, 2008년 기준 약 8천억 톤에 이르며 가채년 수 또한 120년으로 추산되고 있다.⁽¹⁾ 그러나, 세계 경기 및 달러 가치, 공급국 인프라, 기상이변 등에 따라 석탄 가격의 상승 움직임이 현저해 지고 있다. 이에 국내 발전회사에서는 탄종 다변화와 원가절감을 위해 석탄 품질 구매 규격 완화와 함께 저열량 아역청탄 수입을 증가하였다.

저열량 아역청탄은 국내 500MW 표준 화력을 포함 대용량 석탄 화력의 설계탄이나 범위탄과는 상당한 차이가 있으며, 저열량 아역청탄에 다량 함유된 수분은 보일러 내부의 국부적인 열 불균형과 그에 따른 미연분 발생, 석탄 건조용 1차 공기 온도를 상승시켜 미분기 화재 발생 등 여러 가지 설비 운영상의 문제점을 유발한다.⁽²⁾

이러한 문제들을 해결하기 위해 선행 연구자들에 의해 저열량 아역청탄에 대한 많은 연구가 활발하게 이루어지고 있으며, 특히 Asay 등⁽³⁾은 약 25%의 고유수분을 함유한 석탄으로 실험을 수행하여 배기 배출물에 영향을 미친다는 것을 확인하였으며, Karel 등⁽⁴⁾은 휘발분의 양이 연소 특성 및 배기 배출물에 중요한 영향을 미친다는 것을 나타내었다.

본 연구에서는 LFR에 연료수분미소정량공급기를 장착하여 수분함량에 따른 석탄 휘발분 점화 특성을 미시적 관점에서 관찰하였다. 이는 실제 미분기 내에 약 220~250℃의 석탄 건조용 1차 공기로 인해 석탄의 부착수분이 제거되는데, 별도의 외부로의 배출 장치 없이 기체 상태의 수분과 석탄이 직접적으로 보일러 내부로 투입되는 현상을 모사하고 있다.

2. 실험

2.1 Laminar Flow Reactor(LFR)

실험에 사용된 LFR은 Kramlich 등⁽⁵⁾에 의해 소개

된 메탄-공기 확산화염을 기초하여 부산대학교 화력 발전에너지분석기술센터에서 설계 제작하였다. LFR 시스템의 개략도⁽⁶⁾는 Fig. 1에 나타내었다. 버너는 스테인리스 튜브를 육각 허니컴에 격자로 삽입하여 중앙 튜브에 연료로서 메탄을 공급하고, 이웃하는 6개의 튜브에는 산화제로서 공기를 공급하여 고온 층류 평판 확산화염을 형성시켜 post gas에 의해 질소가스에 이송되는 석탄입자가 연소하도록 하였다. 석탄 입자는 버너의 정중앙에 마이크로 입자 미소 정량 공급기를 이용하여 일정한 양으로 공급되며, LFR에서 연소되는 입자를 광학 진단을 가능케 하는 사각 투명 석영관을 설치하였다. LFR은 실제 발전소의 미분탄연소의 연소 환경을 가스온도와 온도상승률 측면에서 매우 유사하다는 장점을 가지고 있다. 본 실험에서 형성시킨 석탄 입자 연소 환경은 Table 1에 나타내었다. 이러한 연소 환경은 모든 실험 과정에 동일하게 유지하였고, 실험에 사용된 시료는 전형적인 아역청탄 Roto-South로 수분을 제거하여 사용하였다.

Table 1 Experimental conditions

Gas flow conditons	
CH ₄ (sccm)	380
Air(slm)	6.02
Carrier N ₂ (sccm)	40
Coal Burning Conditions	
Equivalence ratio	0.613
Oxygen molar fraction(%)	7.67
Coal feeding rate(g/hr)	0.125
Reaction zone temperature(K)	1400~1700

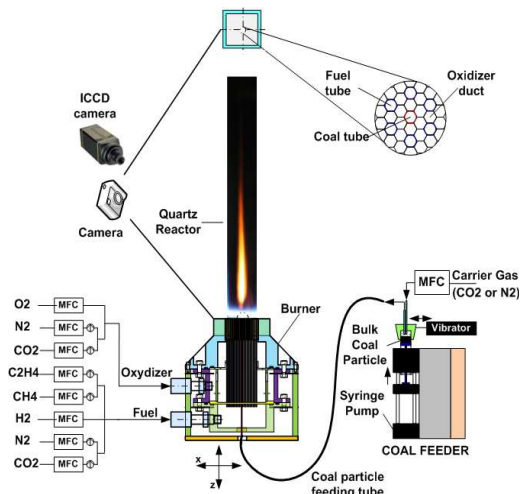


Fig. 1 Schematic diagram of laminar flow reactor system equipped with optical diagnostics

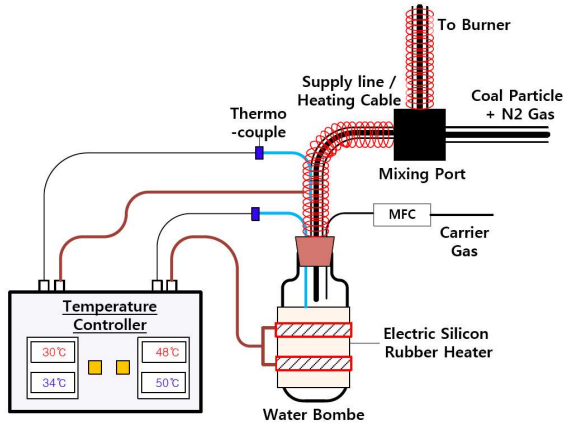


Fig. 2 Schematic of fuel moisture micro supplier

2.2 Fuel moisture micro supplier(연료수분미소정량공급기)

수분 함량에 따른 휘발분 점화특성을 관찰하기 위해서는 수분 공급조건에 따라 정량적으로 발생시키고 공급할 수 있는 별도의 장치가 필요로 하였고 본 실험을 위해 개발된 연료수분미소정량공급기를 Fig. 2에 나타내었다. 연료수분미소정량공급기는 크게 증발시키려는 물을 저장하는 유리 재질의 투명 용기, 저장된 물의 온도와 공급관의 온도를 조절하기 위한 가열부로 나누어진다.

용기에 전기 실리콘 고무 히터를 결합하여 온도 조절을 통해 수분 증발량을 조절하도록 하였고 증발된 수분은 용기 내로 흐르는 질소와 함께 공급관으로 이송되고 공급관에는 열선을 감아 이슬점 온도 이상으로 유지시켜 증발된 수분이 이송되는 동안 응축이 되지 않도록 하였다.⁽⁷⁾ 온도 조절은 열전대와 온도 조절기를 통해 시퀀스 제어가 가능하도록 하였다. 최종적으로 Fig. 2에서 알 수 있듯이 증발된 수분은 석탄입자와 혼합부에서 만나 반응기로 공급된다.

용기에서의 수분 증발 현상은 공급되는 질소가스의 수분 농도가 기체-액체 접촉면의 수분 농도보다 작기 때문에 물질 확산에 의해 수분은 빠른 속도로 용기 출구 측으로 확산되는 대표적인 물질 전달 현상이다.⁽⁸⁾ 따라서 연료수분미소정량공급기에서 증발되는 수분 증발량은 식 (1)을 통해 계산되어진다.

$$\dot{m}_A = \frac{\rho D_{AB}}{L} \ln \left[\frac{1 - Y_{A,\infty}}{1 - Y_{A,i}} \right] \quad (1)$$

식 (1)에서 알 수 있듯이 수분 증발량은 용기

Table 2 Operation conditions of Fuel moisture micro supplier

	Moisture ratio (%)*		
	20	30	40
Water bombe size (m)	0.024		
Water height (m)	0.02		
Water temp. (°C)	24	30	34
Evaporation rate (mg/hr)	26	40	50
Dew-point temp. (°C)	22	29	45
Moisture carrier N ₂ (sccm)	10		

* Moisture ratio : Evaporation rate/coal feeding rate

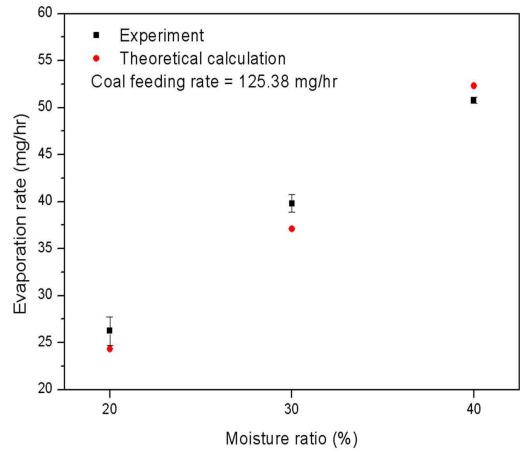


Fig. 3 Comparison of evaporation rate between theoretical calculation and experimental data

내의 물 높이, 용기의 직경 그리고 물의 온도에 따른 수분 질량분을 변화에 의해 조절된다. 여기서 용기 내 질소가스가 차지하는 높이(L)은 수분 증발에 의한 높이 변화는 매우 느린 속도로 진행된다.

본 실험에서는 석탄 공급량의 20, 30, 40%의 수분을 공급하기 위한 연료수분미소정량 공급기의 작동조건을 Table 2에 나타내었다.

식 (1)로부터 계산된 이론 수분 증발량과 실험을 통해 측정된 수분 증발량 비교 결과 비교는 Fig. 3과 같다. 결과로부터 이론 수분 증발량과 실험을 통해 측정된 수분 증발량은 거의 일치하고, 연료수분미소정량공급기의 정밀 제어가 가능하다는 것을 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 반응영역 온도

석탄 입자 반응영역 온도를 수분 함량을 증가

시키며 석탄입자가 공급되는 중앙튜브를 따라 수직 방향으로 석탄 공급노즐에서 2mm 간격으로 70 μ m, R-type 열전대를 이용하여 측정하였다. 측정된 온도는 Fig. 4와 같으며, 열전대의 비드로부터 복사 열손실을 고려하여 보정한 값을 획득하였다. Fig. 4에서 수분 함량이 증가할수록 반응영역 온도가 감소하는 것은 증발된 상태에서 공급된 수분은 응축 방지하기 위해 50 $^{\circ}$ C로 유지하여 공급하였기 때문에 과열증기 상태이며 석탄 휘발분이 점화되는 위치에서의 주위 gas와 접촉하면서 주위로부터 현열을 흡수하기 때문이다.⁽⁹⁾ 또한 비열을 고려하면 주로 N₂, CO₂, O₂로 구성되어 있는 주위 gas의 비열보다 수분의 비열이 높기 때문에 석탄 입자 반응영역 온도가 현저하게 감소하는 것을 알 수 있다.

실제 석탄 화력 발전소 보일러에서 높은 수분을 함유하고 있는 석탄 연소시 화염 및 보일러 내부온도가 저하되는 것과 일치한다. 이는 상대적으로 Thermal NO_x를 감소시켜 환경적인 측면에서 장점이 있지만, 미연분이 증가하는 단점 또한 내재하고 있다.⁽¹⁰⁾ 따라서 미연분 발생을 최소화하기 위해서는 완전연소를 위한 Over Fire Air (OFA) damper의 적정 운영과 미분기 출구온도 상승을 필요로 하기 때문에 석탄의 수분함량이 보일러 운영조건에 중요한 인자임을 시사한다.

3.2 휘발분 점화 위치 및 시간

휘발분 점화는 높은 승온율을 가진 LFR에서 석탄입자 공급 후 매우 짧은 시간 내에 일어나고, 석탄입자 연소 전 과정 중 가장 강한 발광강도를 내며 연소되기 때문에 CCD 카메라를 이용하여 촬영한 이미지로부터 화염 중앙의 발광강도를 추출하여 최대 발광강도가 되는 점을 휘발분 점화위치라고 정의하였다.

휘발분 점화위치를 도출하는 방법을 Fig. 5를 통해 도식화하여 나타내었고, 동일한 촬영조건에 대한 기준값 (mm/pixel)을 이용하여 최종 휘발분 점화 위치를 도출하였다. 그림에서 알 수 있듯이 최대 발광강도에 도달하기 전에 상대적으로 낮은 발광강도를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이는 실험에 사용된 시료는 32-45 μ m이기 때문에 평균 크기의 입자보다 작은 입자가 국소적으로 먼저 점화가 일어나 발생하는 현상이다. 결국 최대 발광강도 지점을 휘발분 점화위치라고 정의하는 것은 논리적으로 타당하다고 할 수 있다.

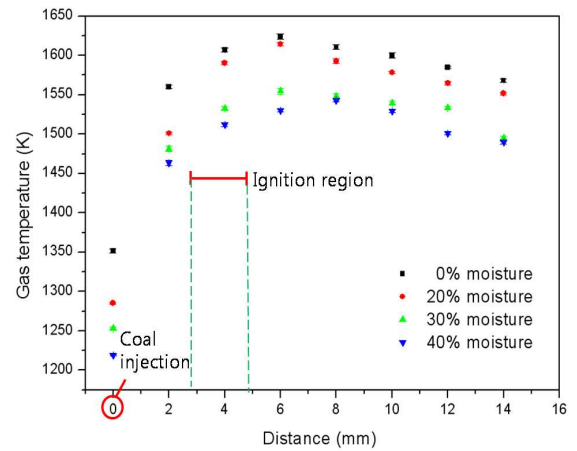


Fig. 4 Reaction zone temperature profiles of along the LFR centerline

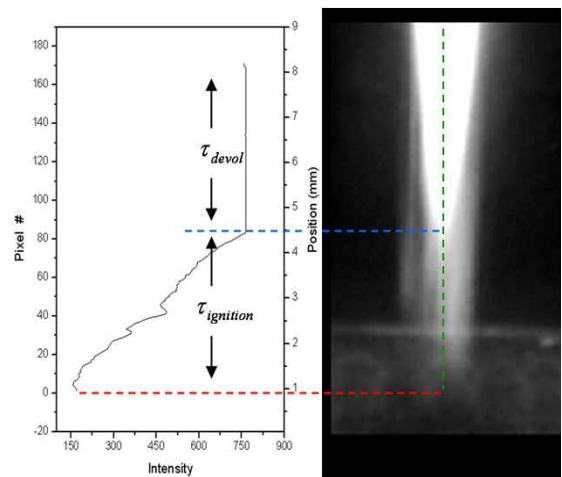


Fig. 5 Definition of volatiles ignition position from the plot of intensity versus pixel number

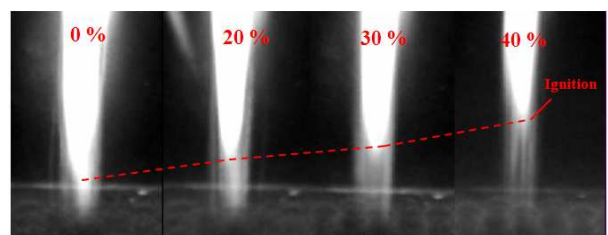


Fig. 6 Variation of volatiles ignition position at different moisture ratio

수분함량을 증가시키며 CCD 카메라를 이용해 특정 warm-up 시간 후에 steady한 석탄화염을 15~20장의 이미지를 촬영한 결과를 Fig. 6로 나타내었다. 수분함량이 증가할수록 휘발분 점화위치가 점점 증가하는 경향을 나타낸다는 것을 알 수 있다. 실제 보일러에서 저열량 아역청탄 연소시

높은 휘발분으로 인해 조기 착화가 일어나 석탄 화염이 버너노즐에 근접하게 되고 휘발분 연소가 빠르게 일어나면서 버너노즐 근처의 온도는 급격하게 높아진다.⁽¹⁰⁾ 위 결과로부터 발열량을 유지하면서 석탄의 수분 함량을 조절하도록 적절한 혼탄법을 도입하여 버너노즐의 손상을 해결할 수 있음을 도출할 수 있다.

휘발분 점화시간은 휘발분 점화위치와 상응하는데 micro-scale의 석탄 입자 속도는 post gas 속도와 같다는 가정을 통해 도출할 수 있다. 휘발분 점화위치와 시간을 Fig. 7과 같이 나타내었다. 수분함량이 0, 20, 30, 40%로 점차 증가할수록 점화 위치는 2.92, 3.36, 3.96, 4.65mm로 증가하였고, 점화시간 또한 1.46, 1.68, 2.00, 2.33ms 로 증가하였다. 점화시간 변화 형태를 살펴보면 기하급수적으로 증가하는 경향을 나타내었다.

휘발분 점화현상은 주위 열원으로부터 순간적인 열전달에 의해 발생하기 때문에 화학반응에 비교하여 열손실을 무시할 수 있다.⁽¹²⁾ 석탄의 휘발분을 대표적인 탄화수소인 메탄 (CH₄)으로 가정하고⁽¹³⁾ 이를 단일 열 폭발 문제로 단순화하여 유도한 점화 지연시간은 식 (2)와 같다.⁽¹²⁾

$$\tau_i = \frac{c_v(T_g^2/T_a)}{q_c Y_{F,0} A \exp(-T_a/T_g)} \quad (2)$$

석탄 공급량이 일정하기 때문에 휘발분의 연소 열 방출량 (q_c)는 일정하고, 정적비열 (c_v)는 반응 영역 온도의 함수로 수분 함량에 따른 반응영역 온도를 이용하여 선형보간법을 통해 도출하였고, 수분 함량에 증가할수록 휘발분 초기 질량분율 ($Y_{F,0}$)는 감소하였다. 그리고 반응영역 온도 (T_g) 또한 수분 함량에 따라 변함을 Fig. 4에서 확인할 수 있었고, 휘발분의 kinetic parameters (A, T_a)는 메탄의 단일 단계 반응속도 상수로 채택하였다.⁽⁸⁾ 휘발분의 반응률은 반응영역 온도의 함수이며, 3.1절에서 언급한 바와 같이 수분함량의 영향을 받는다. 식 (2)로부터 점화 지연시간은 정적비열, 휘발분 초기 질량분율 그리고 반응물의 함수임을 알 수 있고, 점화 지연에 영향을 미치는 주요 인자의 유효성을 규명하기 위해 수분함량이 0%를 기준으로 수분 함량 증가에 따른 각 인자의 변화를 각 인자에 대해 정규화하여 Fig. 8에 나타내었다.

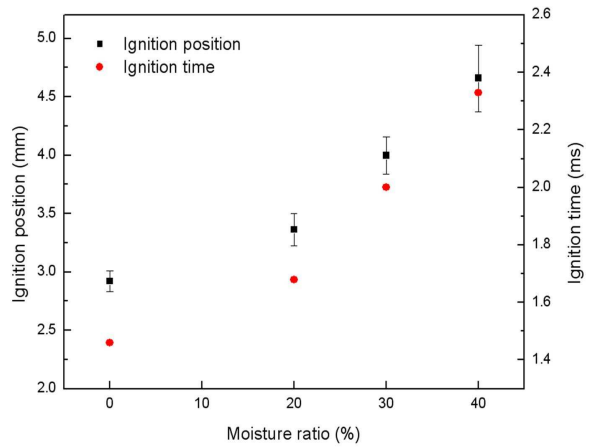


Fig. 7 Variation of ignition position and time at different moisture ratio

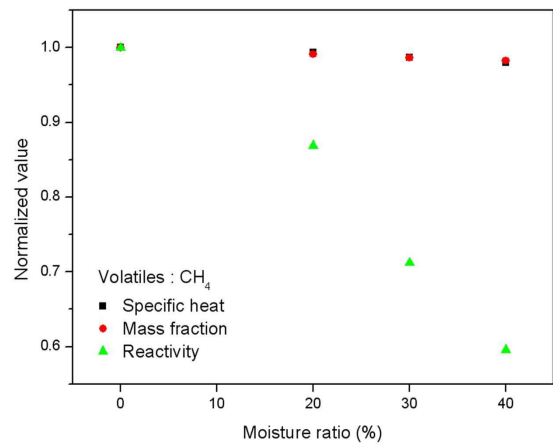


Fig. 8 Comparison of normalized values between specific heat, mass fraction of fuel and reactivity of fuel

Fig. 8에 따르면 수분함량의 증가에 따라 정적비열과 휘발분 초기 질량분율의 변화가 작기 때문에 점화지연에 큰 영향을 미치지 않는다. 그러나, 휘발분의 반응률은 수분함량 증가에 따라 그 변화가 다른 두 인자에 비해 크다는 것을 알 수 있고, 이는 휘발분의 반응률이 점화 지연에 가장 지배적인 인자임을 도출할 수 있다. 다시 말해 반응영역 온도 변화에 따른 열적 영향에 의해 점화지연이 발생한다는 것을 의미한다.

수분 함량이 증가에 따른 점화 시간 변화 형태를 파악하기 위해 이론적 점화 지연시간과 실험을 통해 얻어진 휘발분 점화시간을 정규화하여 비교한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 앞에서 언급한 바와 같이 실험으로부터 얻어진 수분함량에 따른 휘발분 점화위치와 시간은 기하급수적으로

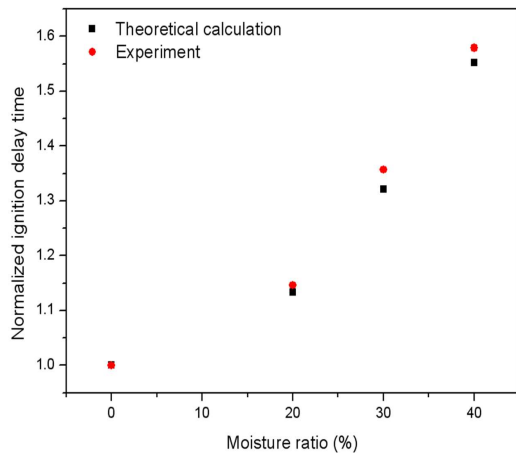


Fig. 9 Comparison of normalized ignition delay time between theoretical calculation and experimental data

증가하는 경향을 나타내었고, Fig. 9에서 알 수 있듯이 이론적 점화 지연시간이 실험적 결과와 정성적으로 동일한 경향을 가짐을 확인할 수 있다.

본 연구에서 도출한 결과는 석탄 점화 거동에 주 영향 인자인 수분함량과 휘발분 함량의 유효성을 규명하는데 기초 연구로 수행하였으며, 이론적 점화 지연 시간 도출에 있어 화학반응뿐만 아니라 추가적인 열전달을 고려하는 것이 필요하다고 판단된다.

3. 결론

본 연구에서는 LFR과 연료수분미소정량공급기를 이용하여 실제 발전소 미분기 출구 현상을 모사하여 수분 함량 변화에 따른 휘발분 점화 특성에 대해 연구하였다.

(1) 수분함량이 증가할수록 석탄 반응영역 온도는 감소하였고, 상대적으로 낮은 온도인 기체 상태의 수분이 주위의 가스로부터 현열을 흡수하기 때문이다.

(2) 수분함량이 0, 20, 30, 40%로 증가할수록 점화위치는 각각 2.92, 3.36, 3.96, 4.65mm로 증가하였고, 점화시간 또한 각각 1.46, 1.68, 2.00, 2.33ms 로 증가하였다.

(3) 수분함량은 정적비열, 휘발분 초기 질량분율, 석탄 반응영역 온도의 영향을 받는 휘발분의 반응물에 영향을 미친다. 수분함량이 증가함에 따라 반응영역 온도 감소에 의해 반응물의 감소

가 점화 지연시간이 증가하는데 다른 두 인자에 비해 지배적인 영향을 끼친다.

(4) 수분함량 증가에 따라 실험으로부터 얻어진 휘발분 점화시간과 이론적 점화 지연시간을 정규화하여 비교한 결과 기하급수적으로 증가하는 동일한 경향을 가진다. 이는 열적 영향으로 인한 현상임을 확인하였다.

후 기

본 논문은 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업의 대학전력연구센터의 지원으로 연구를 수행하였으며, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) BP Statistical Review of World Energy, June, 2010, p. 32.
- (2) 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 a Using LFR System," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 34, No. 3, pp. 259~267.
- (3) Asay, B. W., Smoot, L. D. and Hedman, P. O., 1983, *Combustion Science and Technology*, pp. 15~35.
- (4) Karel, S. and Michael, P., 2004, "Influence of Operating Conditions and Coal Properties on NO_x and N₂O Emissions in Pressurized Fluidized Bed Combustion of sub-bituminous Coals," *Fuel*, Vol. 83, pp. 1095~1103.
- (5) Kramlich, J. C., Seeker, W. R. and Samuelsen, S. G., 1988, "Observations of Chemical Effects Accompanying Pulverized Coal Thermal Decomposition," *Fuel*, Vol. 67, pp. 1182~1189.
- (6) Kim, J. D., Kim, G. B., Chang, Y. J., Song, J. H. and Jeon, C. H., 2010, "Examination of Flame Length for Burning Pulverized Coal in Laminar Flow Reactor," *Journal of Mechanical Science and Technology*, in Press.
- (7) Cengel, Y. A. and Boles, M. A., 2004, "Thermodynamics for Engineering Approach,"

- McGraw-Hill*, pp. 668~673.
- (8) Turns, S. R., 2000, "An Introduction of Combustion," *McGraw-Hill*, pp. 92~98, 166.
- (9) Kurose, R., Ikeda, M., Mitazaki, T. and Makino, H., 1998, *CRIERI report*, W98002.
- (10) Rod, H., 2003, Moisture Impacts on Coal Handling and Heat Rate, *World Coal*.
- (11) Lee, B. H., Song, J. H., Lee, C. S., Chang, Y. J. and Jeon, C. H., 2009, "Effect of Coal Properties on Combustion Characteristics in a Pulverized Coal Fired Furnace," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 33, No. 10, pp. 737~747.
- (12) Law, C. K., 2006, "Combustion Physics," *Cambridge University Press*, p. 309.
- (13) Vamvuka, D. and Woodburn, E. T., 1998, "A Model of the Combustion of a Single Small Coal Particle Using Kinetic Parameters Based on Thermogravimetric Analysis," *Int. J. Energy Res*, Vol. 106, pp. 207~218.
- (14) Hwang, M. Y., Jeon, C. H., Song, J. H., Kim, G. B., Kim, S. M. and Park, M. S., 2010, Coal Ash Combustion Simulation of Coal-Firing Boiler," *KSME 2010 Spring annual meeting*, pp. 65~67.